Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering



25. SEMINAR OPTIČNE KOMUNIKACIJE 2021

Ljubljana, 4. in 5. februarja 2021
ZBORNIK

25TH SEMINAR ON OPTICAL COMMUNICATIONS 2021

Ljubljana, 4 and 5 February 2021
PROCEEDINGS

UREDILA/EDITORS:
Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 54585347

ISBN 978-961-243-417-5 (PDF)

URL: https://sok.fe.uni-lj.si/zborniki

Copyright © 2021 Založba FE. All rights reserved.
Razmnoževanje (tudi fotokopiranje) dela v celoti ali po delih brez predhodnega dovoljenja Založbe FE je prepovedano.

Založnik / *Publisher*: Založba FE, Fakuleta za elektrotehniko, Ljubljana
Urednik / *Editor*: prof. dr. Sašo Tomažič
1. elektronska izdaja / *1st Electronic edition*

Gradivo za interno uporabo na 25. seminarju Optične komunikacije SOK 2021.
Material for internal use at the 25th Seminar on Optical Communications SOK 2021.

Uredila / *Editors:* Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj

Predgovor

Od izuma optičnega vlakna mineva že 50 let, pravi razmah gradnje optičnih omrežij do slehernega doma pa se je začel pred sedemnajstimi leti – tudi v Sloveniji. Od takrat je optična tehnologija vodilna in vseprisotna v komunikacijskih omrežjih, pa tudi na drugih področjih. Po zgledu razvijalcev celičnih radijskih komunikacij, ki so tehnologije že kmalu po njihovih komercialnih začetkih začeli ločevati po generacijah (1G do 5G), se zdaj tudi v fiksne komunikacije uvaja ta pojem. Pri fiksnih komunikacijah smo trenutno pri četrti generaciji (F4G), kar pomeni nekaj 100 Mbit/s prenosa podatkov do uporabnika. Naslednja generacija (F5G) naj bi končnim uporabnikom brez težav omogočala hitrosti dosti preko 1 Gbit/s, kar bo ob nizkih zakasnitvah in veliki zanesljivosti delovanja omogočalo uvedbo npr. video-storitev 8K, storitve navidezne resničnosti in izjemno interaktivno uporabniško izkušnjo tudi na velikih zaslonih. Sodobna optična tehnologija porabi za prenos enega bita informacije le tisočinko energije, potrebne za prenos po brezžični zvezi, izboljšanje spektralne učinkovitosti v komunikacijskih sistemih pa si obetamo z vpeljavo optičnih gradnikov na osnovi mikrovalovne fotonike in integrirane optike.

Razvoj področja optoelektronike in optičnih komunikacij je spodbudil prve začetke in kasnejši razvoj nove izobraževalne dejavnosti na Fakulteti za elektrotehniko že okoli leta 1980, torej razmeroma zgodaj. Sledilo je oblikovanje predmeta Optične komunikacije na dodiplomskem in podiplomskem študiju. Strokovne seminarje Optične komunikacije je zasnoval zasl. prof. dr. Jožko Budin iz izobraževalne dejavnosti, ki jo je pod okriljem projekta TEMPUS JEN-04202 v letih 1993 do 1997 izvajala Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Pri uvajanju začetnih tečajev in pozneje seminarjev je bilo zasl. prof. dr. Jožku Budinu v pomoč večletno sodelovanje s partnerskimi organizacijami projekta, in sicer Mednarodnim centrom za teoretično fiziko (ICTP) v Trstu, Univerzo v Trstu, Univerzo v Padovi, Univerzo Strathclyde v Glasgowu in drugimi. Nobenega dvoma ni, da je seminar Optične komunikacije v preteklih desetletjih bistveno prispeval k strokovnemu izpopolnjevanju telekomunikacijskih strokovnjakov. Njegov osnovni namen je bil razširjanje, izpopolnjevanje in osveževanje znanja o optičnih tehnologijah ter dvig strokovnosti zaposlenih na področju telekomunikacij v Sloveniji. Imel je ključno vlogo pri uvajanju tehnologije optičnega vlakna v slovenski prostor.

Dvajset prispevkov v tokratnem 25. zborniku seminarja Optične komunikacije obravnava predvsem dve pomembni področji: dostopovni in transportni del optičnih omrežij ter nove tehnološke rešitve v fotoniki.

Program prvega dne je posvečen povezavi končnega uporabnika z optičnim vlaknom. V uvodnem prispevku Boštjan Batagelj podaja retrospektivo uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji, kjer predstavi ključne korake, akterje in tehnologije, ki so omogočili današnjo pokritost z optičnim omrežjem pri nas. V dopoldanskem delu sledita prispevka Roka Čotića o vpeljevanju tehnologije XGS-PON v omrežje Telekoma Slovenije in pogled Mitje Golja iz Iskratela na prihodnost FTTH. V tem delu Katja Mohar Bastar z Digitalnega inovacijskega stičišča Slovenije razpravlja o pomenu optičnega omrežja za Slovensko digitalno družbo, Žan Knafelc z Agencije za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije pa predstavlja razvoj optičnih omrežij z vidika regulacije.

Ioannis Tomkos z Univerze v Patrasu podaja evolucijo fiksnih in brezžičnih omrežij v smeri omrežij šeste generacije (6G), Eran Inbar iz izraelskega podjetja Prisma Photonics pa predstavlja uporabo senzorjev na osnovi

optičnega vlakna. Sledi vrsta prispevkov o razvojnem delu laboratorijev na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer se raziskovalci ukvarjajo s fotonskimi integriranimi vezji in mikrovalovno fotoniko. V to skupino prispevkov spadajo predstavitev fotonskih integriranih vezij Janeza Krča in sodelavcev, integracije metamaterialov v fotonska integrirana vezja Andraža Debevca in sodelavcev, merjenje lomnega količnika v optičnem čipu Andreja Lavriča in premostitve pojava presiha moči v optični komunikacijski zvezi Kristjana Vuka Baliža.

V drugem dnevu seminarja Matjaž Vidmar osveži znanje z obravnavo fizikalnih osnov svetlobnega vlakna in njegovih omejitev ter osvetli ukrepe za njihovo premostitev. Klaus Samardžić iz podjetja SmartCom se v svojem prispevku poglablja v transportna optična omrežja, ki naj bi zagotavljala dovolj velike zmogljivosti za potrebe mobilnih omrežij 5G. Sledi predstavitev uporabe 200 Gbit/s prenosnih sistemov DWDM na jedrnem omrežju RUNE in priklop prvih rezidenčnih uporabnikov na 10 Gbit/s simetričnem dostopovnem omrežju XGS-PON, kar bo obravnaval Goran Živec.

V zadnjem delu zbornika so zbrane optične rešitve, kot so delujoč primer prostozračne optične zveze Luke Mustafa, uporabnost komunikacij z vidno svetlobo Žige Pušelca, prisotnost optičnih tehnologij na sodobnih potniških ladjah Mladena Radovanovića in uporaba optičnih kasnilnih linij Uroša Dragonje.

Kakovostna izvedba dosedanjih tečajev in seminarjev, sodelovanje priznanih vabljenih strokovnjakov, znaten interes udeležencev in premierna izvedba letošnjega spletnega seminarja, utrjuje naše prepričanje, da je redno strokovno spopolnjevanje strokovnjakov na naglo razvijajočem se področju optičnih komunikacij ne le primerno in koristno, ampak tudi potrebno in nujno. Med našimi strokovnjaki vlada izredno zanimanje za seznanjanje z novimi tehnologijami in za uporabo tega znanja v strokovnem delu. Ta seminar to v polni meri dokazuje. Postal je redna oblika strokovnega izpopolnjevanja in srečevanja vseh, ki jih zanimajo razvoj, novosti in dosežki zadnjega časa ter priložnost za dvig strokovnosti in širšo informiranost strokovnjakov o temah, ki odražajo razvoj v svetu in so že ali pa še bodo aktualne tudi za razvoj optičnih komunikacij v Sloveniji.

Organizatorji seminarja se zahvaljujemo vsem predavateljem za njihov neprecenljiv prispevek, med njimi vabljenima tujima predavateljema iz Grčije in Izraela, prav tako pa tudi domačim podjetjem in posameznikom za sodelovanje in pomoč pri pripravi ter izvedbi seminarja. Zahvala gre odgovornim v naših podjetij in institucijah, ki so svojim strokovnjakom omogočili udeležbo na seminarju in s tem podprli to dejavnost.

Želiva vam, da v 25. zborniku seminarja Optične komunikacije najdete uporabne vsebine, ki vam bodo koristile v vašem poslovnem in osebnem življenju.

Ljubljana, februarja 2021

Tomi Mlinar in Boštjan Batagelj,
urednika

Foreword

It has been 50 years since the invention of optical fiber. Real expansion of the construction of optical networks to every home began seventeen years ago - also in Slovenia. Since then, optical technology has been a leader and ubiquitous in communication networks as well as in other fields. Following the example of the developers of cellular radio communications, who soon after their commercial beginnings began to separate technologies by generations (1G to 5G), this concept is now being introduced into fixed communications as well. In fixed communications, we are currently in the fourth generation (F4G), which means some 100 Mbps of data transfer to the user. The next generation (F5G) should easily allow end users speeds well over 1 Gbps, which will allow for example the introduction of 8K video service, virtual reality services and an interactive user experience even on big screens. Modern optical technology consumes only a one thousandth of the energy required for wireless transmission to transmit one bit of information, and we hope to improve spectral efficiency in communication systems by introducing optical building blocks based on microwave photonics and integrated optics.

The development of optoelectronics and optical communications stimulated the first beginnings and later development of a new educational activity at the Faculty of Electrical Engineering as early as around 1980. This was followed by the design of the course on Optical Communications in undergraduate and postgraduate studies. Professional seminars on Optical Communications developed professor emerituras Jožko Budin from the educational activity carried out by the Faculty of Electrical Engineering of the University of Ljubljana under the auspices of the TEMPUS JEN-04202 project in the years 1993 to 1997. In the introduction of courses and later seminars, prof. Jožko Budin cooperated with the partner organizations of the project by many years, namely the International Center of Theoretical Physics (ICTP) in Trieste, the University of Trieste, the University of Padova, the University of Strathclyde in Glasgow and others. There is no doubt that the Optical Communications seminar has made a significant contribution to the professional development of telecommunication professionals over the past decades. Its main purpose was to spread, improve and refresh knowledge about optical technologies and raise the professionalism of employees in the field of telecommunications in Slovenia. It played a key role in the introduction of optical fiber technology in Slovenia.

Twenty papers in this year's 25th proceedings of the Optical Communications seminar deal with two important areas: the access and transport optical networks and new technological solutions in photonics.

The programme of the first day is dedicated to the fiber to the home. In the introductory article, Boštjan Batagelj gives a retrospective of the introduction of the optical access network in Slovenia, where he presents the key steps, actors and technologies that enabled today's coverage with the optical network in Slovenia. The morning part is followed by Rok Čotić's contribution on the introduction of XGS-PON technology in the Telekom Slovenije network and view on the future of FTTH prepared by Mitja Golja from Iskratel. In this part, Katja Mohar Bastar from the Digital Innovation Hub of Slovenia discusses the importance of the optical network for the Slovenian digital society, and Žan Knafelc from the Agency for Communication Networks and Services of the Republic of Slovenia presents the development of optical networks from the regulatory point of view.

Ioannis Tomkos from the University of Patras presents the evolution of fixed and wireless networks in the direction of sixth generation (6G) networks, and Eran Inbar from the Israeli company Prisma Photonics presents the use of fiber-based sensors. The following is a series of papers on the development work of laboratories at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, where researchers deal with photonic integrated circuits and microwave photonics. This group of papers includes the presentation of photonic integrated circuits by Janez Krč and colleagues, the integration of metamaterials into photonic integrated circuits by Andraž Debevec and colleagues, the measurement of the effective refractive index of a fiber in a silicon chip by Andrej Lavrič and overcoming the power fading in optical communication link with the use of integrated microwave photonics by Kristjan Vuk Baliž.

On the second day of the seminar, Matjaž Vidmar refreshes our knowledge on the glass fiber by presenting its physical bases and limitations, and presents measures to overcome them. In his contribution, Klaus Samardžić from the company SmartCom delves into transport optical networks, which should provide sufficient capacity for the needs of 5G mobile networks. This is to be followed by a presentation of the use of 200 Gbps DWDM transmission systems on the RUNE core network and the connection of the first resident users to the 10 Gbps symmetric XGS-PON access network, which is to be discussed by Goran Živec.

The last part of the proceedings contains optical solutions, such as a working example of Luka Mustafa's free-air optical connection, the usefulness of Žiga Pušelec's visible light communications, the presence of optical technologies on modern passenger ships of Mladen Radovanović and the use of optical delay lines, which is to be presented by Uroš Dragonja.

Quality implementation of previous courses and seminars, participation of renowned invited experts, significant interest of participants and premiere of this year's webinar strengthens our belief that regular professional education of experts in the rapidly evolving field of optical communications is not only appropriate and useful, but also necessary. There is a great interest among our experts to get acquainted with new technologies and to use this knowledge in professional work. This seminar fully proves this. It has become a regular form of professional development and meeting of all those interested in recent developments, innovations and achievements, as well as an opportunity to raise professionalism and inform experts on topics that reflect achievements in the world and are already relevant for the development of optical communications in Slovenia.

The organizers of the seminar would like to thank all the lecturers for their invaluable contribution, including invited lecturers from Greece and Israel, as well as companies and individuals for their cooperation and assistance in the preparation and implementation of the seminar. Thanks go to those responsible in our companies and institutions who enabled their experts to participate in the seminar and thus support this activity.

We wish you to find useful content in the proceedings of the 25th Optical Communications seminar that will be useful in your business and private life.

Ljubljana, February 2021

Tomi Mlinar and Boštjan Batagelj, editors

Seznam prispevkov

	Avtor(ji)	Naslov predavanja	Stran
1	**Boštjan Batagelj**	Kronološki pregled uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji	**9**
2	**Katja Mohar Bastar**	Pomen optičnega omrežja za Slovensko digitalno družbo	**22**
3	**Rok Cotič**	Vpeljava XGS-PON v Telekomu Slovenije	**31**
4	**Žan Knafelc**	Optična omrežja v Sloveniji	**48**
5	**Mitja Golja**	Pogled na bodočnost FTTH	**60**
6	**Ioannis Tomkos**	The evolution of fixed and wireless network generations towards 6G	**75**
7	**Eran Inbar**	Next Generation Fiber Sensing - Theory and Applications	**77**
8	**Janez Krč, Andraž Debevc, Marko Topič, Aleksander Sešek, Bruno Cacovich, Miha Cacovich, Janez Trontelj, Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj**	Uvod v fotonska integrirana vezja in aktivnosti s tega področja na FE	**91**
9	**Andraž Debevc, Janez Krč, Marko Topič**	Strukture metamaterialov za višjo stopnjo integracije v fotonskih integriranih vezjih	**116**
10	**Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj**	Merjenje efektivnega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem čipu	**127**
11	**Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj, Andraž Debevc, Janez Krč**	Premostitev presihanja moči v optični komunikacijski zvezi z uporabo integrirane mikrovalovne fotonike	**134**
12	**Matjaž Vidmar**	Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi, 1. del	**143**
13	**Matjaž Vidmar**	Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi, 2. del	
14	**Klaus Samardžić**	Optična transportna omrežja z linijskimi kapacitetami za mobilna omrežja 5G	**160**
15	**Goran Živec**	Uporaba 200 Gbps prenosnih sistemov DWDM na jedrnem omrežju RUNE in priklop prvih rezidenčnih uporabnikov na 10 Gbps simetričnem dostopovnem omrežju XGS-PON	**178**
16	**Luka Mustafa**	Prostozračne optične zveze	**184**
17	**Žiga Pušelc, Boštjan Batagelj**	Komunikacije z vidno svetlobo	**195**
18	**Mladen Radovanović, Boštjan Batagelj**	Optične tehnologije na sodobnih ladjah	**204**
19	**Jernej Mušič, Boštjan Batagelj**	Lidar	**219**
20	**Uroš Dragonja, Boštjan Batagelj**	Uporaba optičnih kasnilnih linij	**235**

Table of contents

	Author(s)	Article	Page
1	**Boštjan Batagelj**	Chronological overview of the introduction of the optical access network in Slovenia	**9**
2	**Katja Mohar Bastar**	Importance of the optical network for the Slovenian digital society	**22**
3	**Rok Cotič**	Introduction of the XGS-PON in Telekom Slovenije	**31**
4	**Žan Knafelc**	Optical networks in Slovenia	**48**
5	**Mitja Golja**	A look at the future of FTTH	**60**
6	**Ioannis Tomkos**	The evolution of fixed and wireless network generations towards 6G	**75**
7	**Eran Inbar**	Next Generation Fiber Sensing - Theory and Applications	**77**
8	**Janez Krč, Andraž Debevc, Marko Topič, Aleksander Sešek, Bruno Cacovich, Miha Cacovich, Janez Trontelj, Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj**	Introduction to photonic integrated circuits and activities in this field at FEE	**91**
9	**Andraž Debevc, Janez Krč, Marko Topič**	Structures of metamaterials for a higher degree of integration in photonic integrated circuits	**116**
10	**Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj**	Measurement of the effective refractive index of a fiber in a silicon chip	**127**
11	**Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj, Andraž Debevc, Janez Krč**	Overcoming the power fading in optical communication link with the use of integrated microwave photonics	**134**
12	**Matjaž Vidmar**	Optical fiber: comparison, physical background, limitations and countermeasures, Part 1	**143**
13	**Matjaž Vidmar**	Optical fiber: comparison, physical background, limitations and countermeasures, Part 2	
14	**Klaus Samardžič**	Optical transport networks with line capacities for 5G mobile networks	**160**
15	**Goran Živec**	Use of 200 Gbps DWDM transmission systems on the RUNE core network and connection of the first resident users on a 10 Gbps symmetric XGS-PON access network	**178**
16	**Luka Mustafa**	Free-space optical communications	**184**
17	**Žiga Pušelc, Boštjan Batagelj**	Visible Light Communications	**195**
18	**Mladen Radovanović, Boštjan Batagelj**	Optical technologies on modern ships	**204**
19	**Jernej Mušič, Boštjan Batagelj**	Lidar	**219**
20	**Uroš Dragonja, Boštjan Batagelj**	Use of optical delay lines	**235**

Kronološki pregled uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

Chronological overview of the introduction of the optical access network in Slovenia

Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Katedra za informacijsko komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek

Letos mineva več kot 3 desetletja od kar je bila v svetovni znanstveni literaturi prvič predstavljena pasivna optična tehnologija do končnega uporabnika. Mineva 17 let od kar je bil mednarodno sprejet GPON standard in prav toliko od kar se je optično dostopovno omrežje začelo graditi v Sloveniji. Prispevek je retrospektiva implementacije optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji. Predstavi ključne korake, akterje in tehnologije, ki so omogočili današnjo pokritost z optičnim omrežjem. Prikazane bodo tehnološke rešitve za optično dostopovno omrežje, ki so se uveljavile v slovenskem prostoru in ki jih lahko koristijo končni uporabniki.

Abstract

This year marks more than 3 decades since end user passive optical technology was first introduced into the world scientific literature. It has been 17 years since the internationally accepted GPON standard was introduced and just as long since the deployment of the optical access network started in Slovenia. The presentation is a retrospective on the implementation of the optical access network in Slovenia. It presents the main steps, actors and technologies that made today's optical network coverage possible. It presents technological solutions for the optical access network that have been established in Slovenia and that can be used by end users.

Biografija avtorja

Boštjan Batagelj je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer predava predmete optične komunikacije, radijske komunikacije in satelitske komunikacije. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se med drugim ukvarja z fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskim omrežji zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, osmih patentnih prijav in sodeluje v domačih ter mednarodnih raziskovalnih projektih s področja optičnih in radijskih komunikacij.

Author's biography

Boštjan Batagelj received his Ph.D. from the University of Ljubljana in 2003 for work on optical fiber nonlinearity measurements. He is currently an Assistant Professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana teaching courses in optical communications and radio communications. As researcher he works at Radiation and optics laboratory. His research interests include work on the physical layer of optical transport and optical access networks including convergence with radio systems and components.

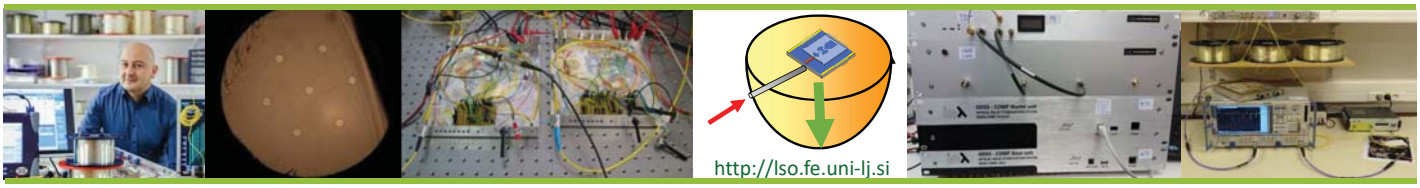
Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko | IKT Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije | LSO Laboratorij za sevanje in optiko | SOK 2021 sok.fe.uni-lj.si

Kronološki pregled uvajanja optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

izr. prof. dr. Boštjan Batagelj

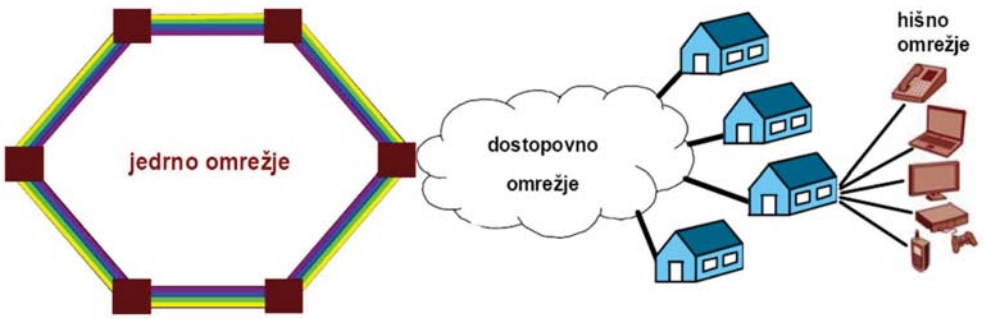
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

4. februar 2021



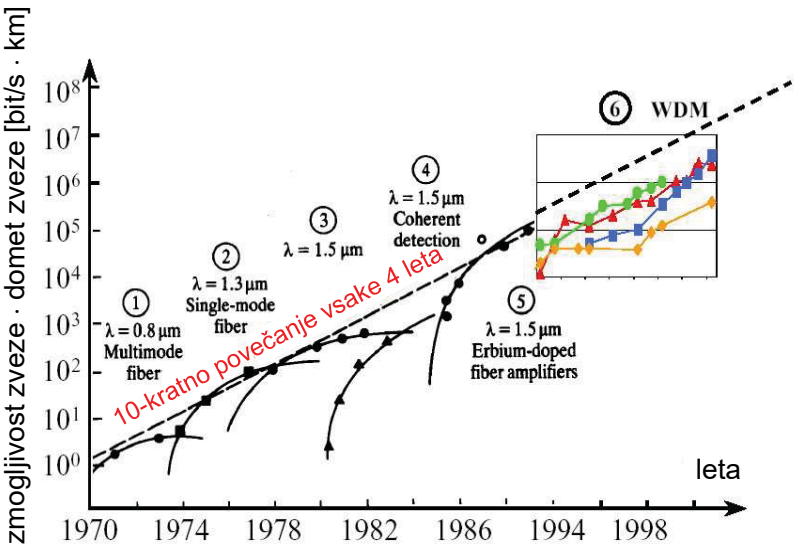
Vsebina predstavitve

- Zakaj optično vlakno v dostopu?
- Kronologija dogajanja v preteklih letih
  - od 2004 do 2009
  - od 2009 do 2021
- Tehnološke značilnosti optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji
  - točka – točka
  - točka – mnogo točk
- Kam naprej?



Razvoj optičnih komunikacij v prejšnjem stoletju za hrbtenico omrežja

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 3/23



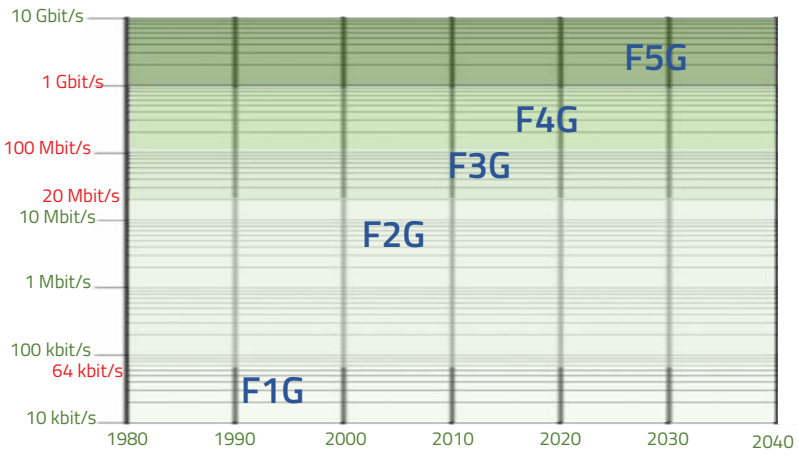

Emanuel Desurvire, "Optical Communications in 2025", SOK 2006

- Leta 1970 je bila prva objava o WDM tehnologiji.
- Leta 1978 je bil izveden prvi laboratorijski WDM preizkus z uporabo dveh valovnih dolžin.
- Leta 1994 so se začeli uporabljati optični ojačevalniki.

vir: E. Desurvire et al., "EDFA, Device and System developments,Vol. 2" *J.Wiley & Sons, Inc., 2004*.

Razvoj fiksnega omrežja v dostopu

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 4/23





F1G
Prva generacija fiksnih omrežij so bila telefonska omrežja v obdobju od začetka 19. stoletja do konca 20. stoletja, ko se pojavijo prve podatkovne storitve z uporabo klicnega dostopa in tehnologije ISDN. (Hitrosti prenosov do 64 kbit/s.)

F2G
Fiksno telekomunikacijsko omrežje vstopi v širokopasovno dobo v obdobju devetdesetih let prejšnjega in v prvem desetletju tega stoletja. Tehnologija ADSL je ponovno oživila sto let staro bakreno omrežje. (Prenosi do 20 Mbit/s)

F3G
Ker tehnologija ADSL ni podpirala storitev nad 30 Mbit/s, so operaterji za doseganje večje hitrosti uvedli tehnologijo VDSL in mrežno arhitekturo optičnih vlaken. (Prenosi do 100 Mbit/s)

F4G
Četrto generacijo zaznamuje vzpostavitev širokopasovnega optičnega dostopovnega omrežja – vlakno do doma, ki omogoča storitve 4K in stabilne zmogljivosti dostopa 100 Mbit/s ali več.

F5G
Specifikacije pete generacije fiksnih omrežij so usmerjene na dostopovna omrežja, ki so v celoti izvedena iz optičnih vlaken, hitrost dostopa pa bo znašala več kot 1 Gbit/s.

vir: ETSI, Fifth Generation Fixed Network (F5G) https://www.etsi.org/technologies/fifth-generation-fixed-network-f5g
Boštjan Batagelj, Digitalni polet na krilih pete generacije, Delo, 23. 1. 2021 https://www.delo.si/novice/znanoteh/digitalni-polet-na-krilih-pete-generacije/

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 5/23

Primerjava optičnih vlaken z električnimi vodi



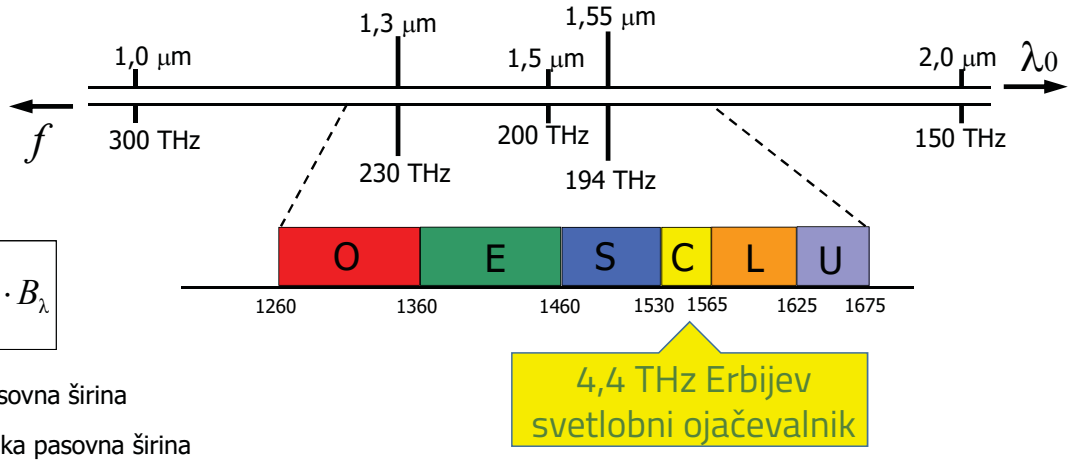


	bakrena parica, koaksialni vodnik	optično vlakno
izgube signala	(-) velike	(+) zelo majhne
frekvenčni pas	(-) majhen	(+) izredno velik
elektromagnetna občutljivost	(-) velika	(+) neobčutljivost
prisluškovanje	(-) enostavno	(-) je mogoče
galvanska ločitev	(-) v posebnih primerih	(+) vedno
komunikacijska oprema	(-) zahtevnejša	(+) enostavna
cena opreme	(+) cenejša	(+) drastično pada
energetska potratnost	(-) velika	(+) zelo majhna

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 6/23

Spekter optičnih komunikacij

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$



$$B_f \approx \frac{f^2}{c_0} \cdot B_\lambda = \frac{c_0}{\lambda_0^2} \cdot B_\lambda$$

$B_f \equiv$ frekvenčna pasovna širina

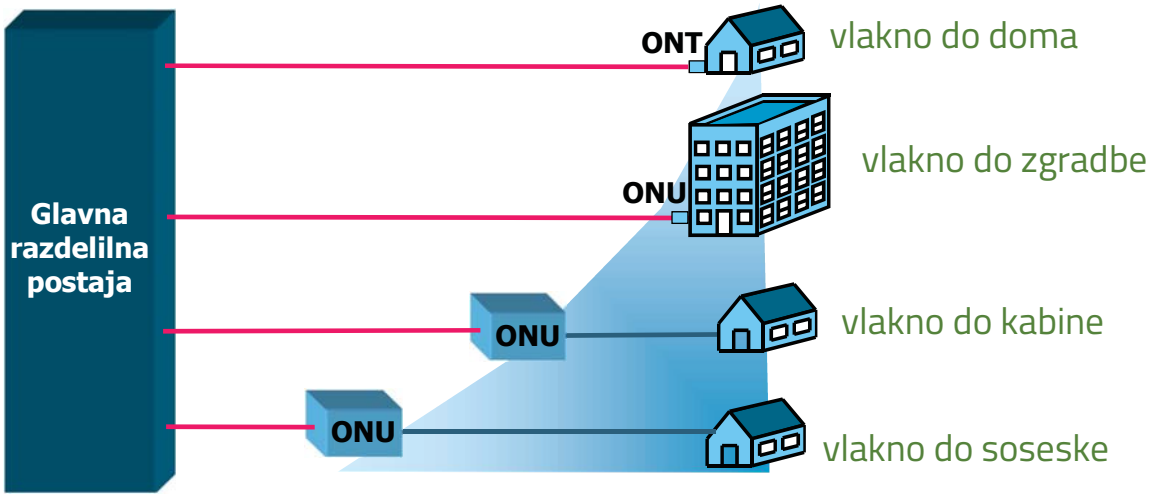
$B_\lambda \equiv$ valovnodolžinska pasovna širina

frekvenčna in valovnodolžinska pasovna širina pri $\lambda_0 = 1{,}55\,\mu\text{m}$ in $f = 194\,\text{THz}$

B_λ	100 nm	10 nm	1 nm	0,1 nm	0,8 nm	0,08 nm	8 pm	0,8 pm
B_f	12,5 THz	1,25 THz	125 GHz	12,5 GHz	100 GHz	10 GHz	1 GHz	100 MHz

Vir: B. Batagelj, učbenik "Osnove optičnih komunikacij", 2015, http://lso.fe.uni-lj.si/studij/optika_vs/opticne%20komunikacije_BatageljB.pdf

FTTx (Fiber To The x) tehnologija



- ONT - (angl. Optical Network Terminal) optični omrežni terminal
- ONU - (angl. Optical Network Unit) optična omrežna enota

Začetki izgradnje optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji

- Septembra 2004 je Gratel začel za T-2 postavlja FTTH omrežje (enega prvih v Evropi).
- To je bil logičen korak, saj je bil do takrat T-2 brez lastne fizične telekomunikacijske infrastrukture – "greenfield" operator.



Vir: Dušan Kočevar, "*Deployment of Broadband Fiber–Optic Network in Slovenia*". Gratel, Kranj, 2007.

- Leta 2006 je bilo v izgradnjo zajetih že nekaj večjih mestih v Sloveniji.
- Leta 2006 je Telekom Slovenije začel množičen FTTH projekt, imenovan **F²**.
- Bil je eden od prvih telekomov (nacionalnih operaterjev) v Evropi.
- Aprila 2007 je Telekom Slovenije priklopil svojega prvega FTTH naročnika.
- F² je imel za cilj opremiti 50.000 slovenskih domov do konca leta 2007 (dosegel je 40.000 v 2007).

Telekom Slovenije Group, "Annual report 2006 Telekom Slovenije Group and Telekom Slovenije d.d.", Ljubljana, May 2007.
Telekom Slovenije Group, "Annual report 2007 Telekom Slovenije Group and Telekom Slovenije d.d.", Ljubljana, May 2008.
https://www.telekom.si/en/investor-relations/annual-and-interim-reports

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 9/23

Slovenija ima zavidljivo pozicijo v svetu

FTTH COUNCIL ISSUES FIRST OFFICIAL EUROPEAN RANKING OF FTTH MARKET PENETRATION

Brussels, Dec 15‴, 2008 -

Sweden, Norway and Slovenia are the leaders in the first official European ranking of FTTH penetration published by the FTTH Council Europe today. The ranking shows the percentage of homes that receive broadband communications services over direct fibre optic connections. More than 80 percent of the

Country	Households connected in %
Sweden	8,28
Norway	7,22
Slovenia	4,72
Iceland	3,90
Denmark	3,11
Finland	1,73
Netherland	1,43
Italy	1,34
Estonia	0,99
Latvia	0,99

od 685 tisoč gospodinjstev



LSO Laboratorij za sevanje in optiko 10/23

Pogled na prihodnost leta 2008

- Predvidevanja so leta 2008 uvrščala Slovenijo na drugo mesto v Evropi.

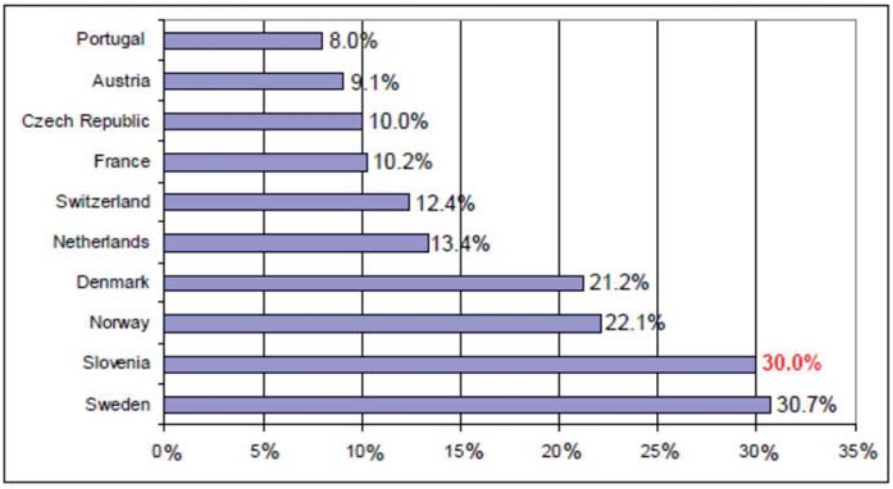


Figure 4. Top 10 European countries FTTH penetration rates (by the 2013).

LSO Laboratorij za sevanje in optiko

11/23

Januarja 2011

- Slovenija ponovno pridobi svetovno pozornost zaradi tehnologije FTTH.
- Tokrat zaradi prevelikega zadolževanja (800 milijonov evrov).
- Italijanski časopis "L'Espresso" razgalil propadle finančne posle mariborske nadškofije.



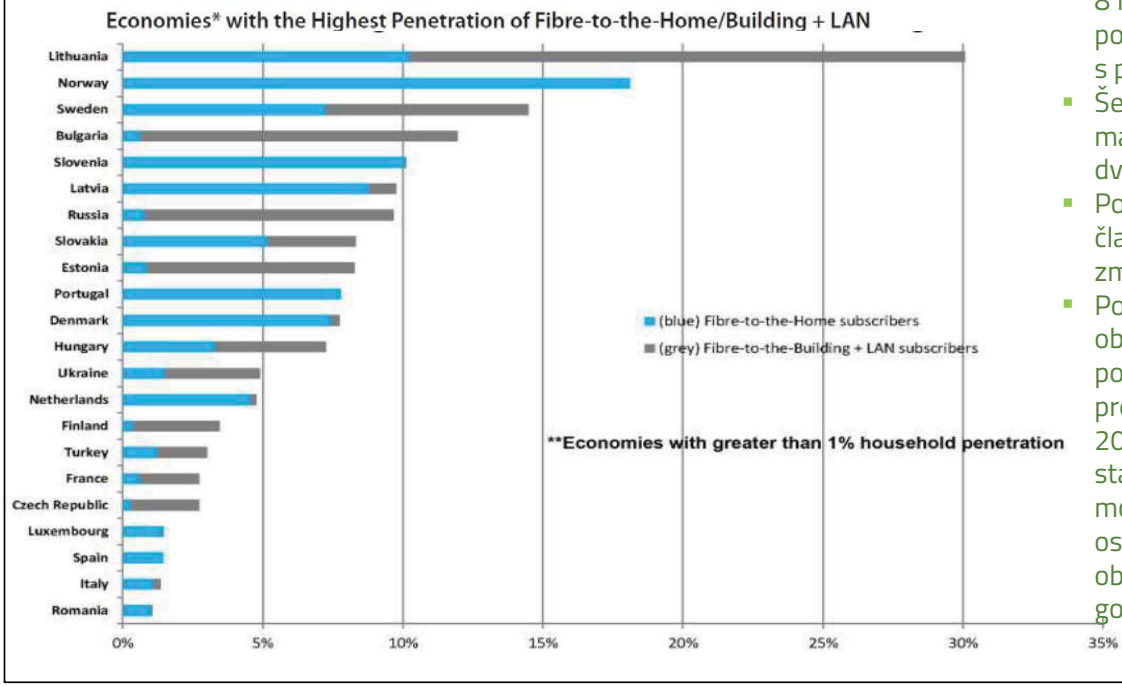

IL SANTO CRAC

Dalle tv porno ai cavi ottici: la diocesi slovena di Maribor sbaglia investimenti e perde quasi un miliardo di euro. Ecco



Vir: Tomaž Modic, Matjaž Polanič, "Kako sta Stres in Kramberger za Cerkev iz nič ustvarila milijonski dobiček", 3. avgust 2013, https://www.dnevnik.si/1042600892
"Zlom mariborske nadškofije je prispodoba za Slovenijo", Finance, 22. 1. 2014, https://www.finance.si/8355508

Junij 2012: Slovenija ima še vedno zavidljivo pozicijo v Evropi



LSO Laboratorij za sevanje in optiko

12/23

Statistični urad Republike Slovenije:

- 1. januarja 2011 je imela Slovenija 813.531 gospodinjstev, kar je povečanje za 128.000 v primerjavi s pred 10 let.
- Še posebej se je povečal delež manjših gospodinjstev z enim ali dvema članoma.
- Povprečno število družinskih članov v gospodinjstvu, se je zmanjšal z 2,8 na 2,5 članov.
- Povečanje števila gospodinjstev v obdobju od 2002 do 2011 je posledica povečanja števila prebivalcev (za 86.000 od leta 2002) in intenzivne gradnje stanovanj, ki zagotavljajo možnost za mlade, da zapustijo osnovno gospodinjstvo in oblikovanje svoje družine in gospodinjstva.

Opremljanje belih lis

- Gradnja odprtega širokopasovnega omrežja
- 82 milijona evrov EU denarja (od tega 12,4 milijona evrov nacionalnega denarja)
- 38 milijona privatnih investicij
  - GOŠO1 (od 2008 do 2010), opremi 15.957 gospodinjstev s FTTH (konec 2015 je "take-up rate" 67%)
  - GOŠO2 (od 2011 do 2012), opremi 13.497 gospodinjstev s FTTH (konec 2015 je "take-up rate" 33%).
  - GOŠO 3 ni bil izpeljan
  - GOŠO 4 v obsegu 7,6 milijona evrov (februar 2020) za 6.550 gospodinjstev do septembra 2023

Vir: "Načrt razvoja širokopasovnih omrežij naslednje generacije do leta 2020", marec 2016, a Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport ter zunanji deležniki, https://www.gov.si/assets/ministrstva/MJU/DI/Nacrt-razvoja-sirokopasovnih-omrezij.pdf

Vir: European Commission, "The Broadband Handbook: 'Facing the challenges of broadband deployment in rural and remote areas'.", 29. april 2020, https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/broadband-handbook-facing-challenges-broadband-deployment-rural-and-remote-areas

F3
www.finance.si
FINANCE, petek, 27. marca 2009

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 13/23

Do leta 2013 za optiko 82,4 milijona evrov

Gradnja širokopasovnih omrežij je v Sloveniji na prednostni listi

Na Službi vlade za lokalno samoupravo in regionalno politiko (SVLR) so nam povedali, da je za gradnjo optičnih omrežij možno pridobiti sredstva iz Evropskega sklada za regionalni razvoj, in sicer v okviru Operativnega programa krepitve regionalnih razvojnih potencialov za obdobje 2007–2013.

Gradnja širokopasovnih omrežij je v okviru navedenega operativnega programa predvidena v prednostni usmeritvi, poimenovani Informacijska družba, ki je med drugim namenjena hitrejšemu razvoju informacijske družbe z možnostjo dostopa do širokopasovnih omrežij oziroma do storitev, ki jih ta omogočajo.

Optična vlakna za raziskovalce in kulturnike

Za zagotavljanje širokopasovnih povezav se izvajajo alternativne rešitve gradnje odprtih omrežij. Ta financirajo kot javno-zasebna partnerstva, temeljijo pa na različnih tehnologijah, denimo optika, xDSL, fiksni brezžični dostop (FWS), brezžične tehnologije ... »V prvem koraku je predvidena zagotovitev dostopa uporabnikom na celotnem ozemlju Slovenije do širokopasovnih storitev s funkcionalno zadovoljivo hitrostjo. V naslednjih korakih pa se bo omogočil dostop do večjih hitrosti s končnim dolgoročnim ciljem povezave večine prebivalcev v visoko zmogljivo – verjetno optično – omrežje,« poudarjajo na SVLR. Projekti se bodo izvajali na območju vse Slovenije s poudarkom na pospešeni gradnji širokopasovnih omrežij v manj razvitih regijah, še posebej na podeželskih območjih. Predvidena je tudi zagotovitev hitrih povezav za potrebe organizacij s področja vzgoje, izobraževanja, raziskovanja in kulture.

Evropskega denarja skoraj šestkrat več kot domačega

Za izvedbo aktivnosti širokopasovnih povezav je pristojno ministrstvo za gospodarstvo v vlogi posredniškega telesa, razlagajo na SVLR. V novem programskem obdobju 2007–2013 znašajo sredstva za gradnjo širokopasovnih povezav 82,4 milijona evrov, od tega je 70 milijonov namenskih sredstev EU, natančneje Evropskega sklada za regionalni razvoj, preostalih 12,4 milijona je slovenska udeležba. Ministrstvo za gospodarstvo je v novem programskem obdobju 2007–2013 objavilo že en javni razpis za gradnjo, upravljanje in vzdrževanje odprtih širokopasovnih omrežij elektronskih komunikacij v lokalnih skupnostih, in sicer za 47,4 milijona evrov nepovratnih sredstev. Trenutno na direktoratu za elektronske komunikacije v okviru ministrstva za gospodarstvo potekajo aktivnosti za pripravo novega javnega razpisa za gradnjo širokopasovnih omrežij.

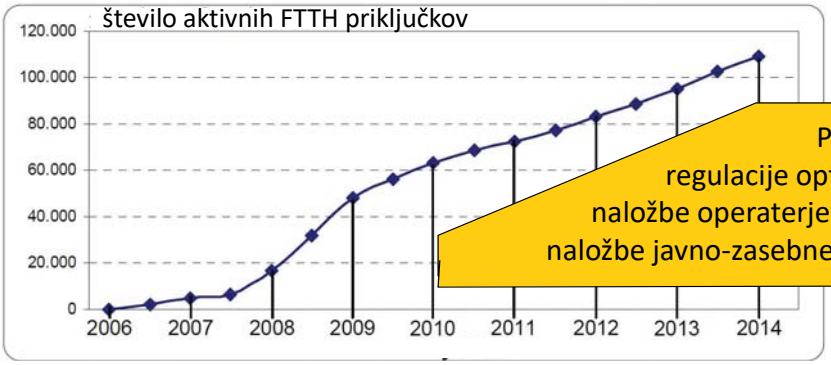
Del petih milijard za krizo gre tudi k nam

V okviru iskanja kriznih mehanizmov je bil na ravni EU dosežen okvirni dogovor o svežnju pet milijard evrov za oživitev evropskega gospodarstva. Del sredstev naj bi imelo na voljo tudi ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, in sicer za sofinanciranje gradnje širokopasovnih omrežij v okviru Operativnega programa razvoja podeželja za obdobje 2007–2013. ●

Prelomno leto 2009

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 14/23

- Zaradi ekonomske krize se popolnoma ustavi gradnja pri T-2. → Tudi Telekom Slovenije ustavi gradnjo.
- Na trg vstopi regulacija (tudi optičnega) dostopovnega omrežja.
- Regulacija prizadene zgolj Telekom Slovenije, saj jemlje dostopovno omrežje kot celoto.
- T-2 s 16% in Telemach s 13% tržnim deležem aktivnih povezav nista vključena v uredbo.



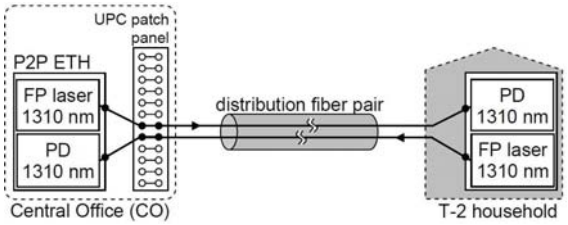
Po letu 2009 prirastek zaradi:
regulacije optičnega dostopnega omrežja
naložbe operaterjev kabelskih omrežij v mestih
naložbe javno-zasebnega partnerstva na podeželju

pospešena izgradnja omrežja FTTH v mestih s komercialnimi naložbami

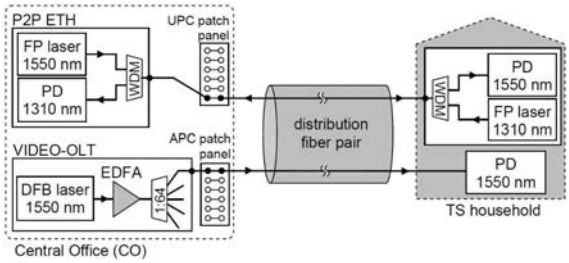
izgradnja podeželskih območij z javno-zasebnim partnerstvom in upoštevanje načela odprtih dostopnih omrežij

- Nekateri za zamrznitev gradnje krivijo APEK (današnji AKOS), ker mislijo, da predpisi za trg ovirajo naložbe.
- Vendar iz zaporedja dogodkov vemo, da to ni res, saj se je gradnja ustavila že preden je na trg vstopila regulacija v prvi polovici leta 2011.

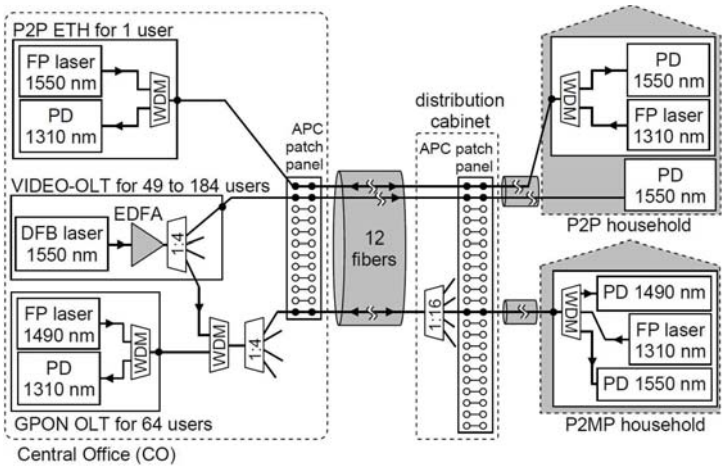
Izvedbe optičnega dostopovnega omrežja v Sloveniji



- prenos po dveh vlaknih (ločen video)
- uporabljena WDM tehnologija za izogib motnjam
- odtok na 1310 nm (poceni FP laser pri uporabniku)
- dotok na 1550 nm
- distribucija videa na 550 nm (EDFA, deljenje)
- zahtevano dobro razmerje S/N
- problem je interferometerski šum
- APC konektorji na enem vlaknu



- prenos po dveh vlaknih brez videa (zgolj IPTV)
- popolnoma dvosmerna zveza brez deljenja pasovne širine
- enostavnost izvedbe, vzdrževanja in nadgradnja
- za prenos podatkov se uporablja 1300 nm
  - nizke krivinske izgube
  - poceni FP laser (poceni pretvorniki)



vir: Boštjan Batagelj, "Deployment of fiber-to-the-home in the Slovenian telecommunications market" *Fiber and integrated optics*, vol. 32, str. 1-11, 2013.

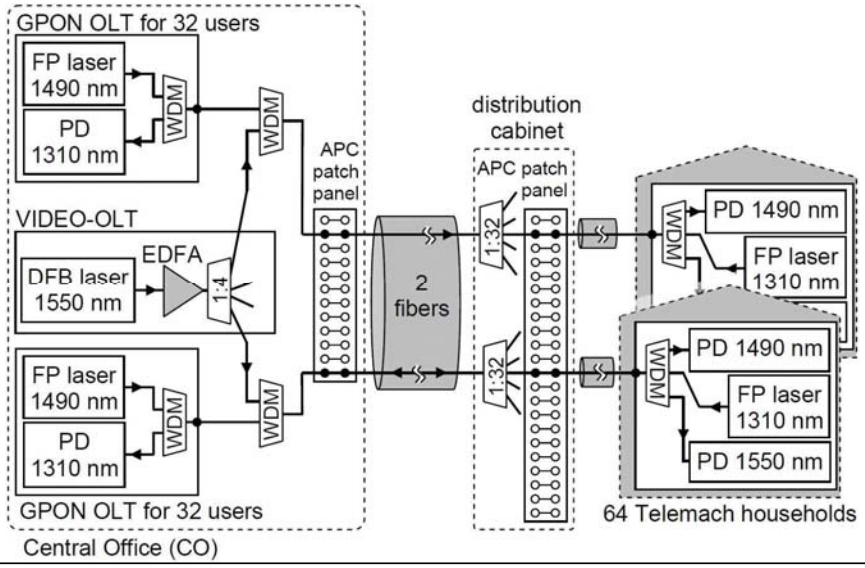
Kebeljski operaterji

Razlogi za nadgradnjo KKS v hibridno optično/koaksialno (angl. hybrid fiber-coaxial – HFC) omrežje:

- odpravljanje kaskade velikega števila električnih ojačevalnikov,
- zamenjava enosmernih ojačevalnikov za dvosmerni promet,
- razdelitev investicijskih stroškov na več uporabnikov,
- pomenljivo varčnejše vzdrževanje vlakenskih povezav.

Razlogi za uvedbo popolnoma optičnega omrežja:

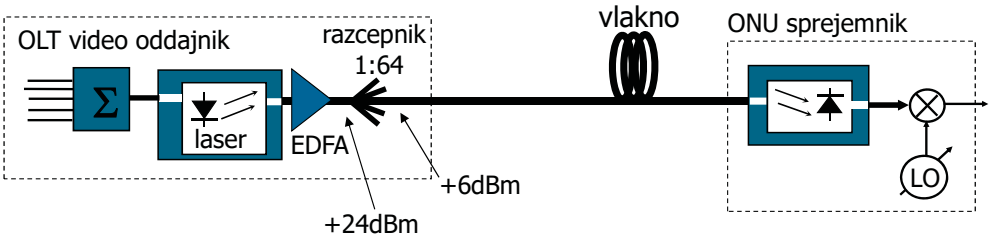
- za nadgradnjo HFC omrežja se uporablja uveljavljena tehnologija GPON.
- GPON zahteva le polovico servisnih posegov v primerjavi s HFC.
- Zaradi nizkih izgub v optičnem vlaknu se tudi privarčuje precej energije.



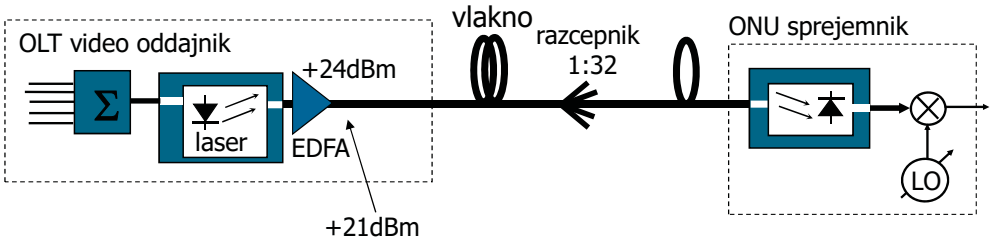
Namestitev razcepnika

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 17/23

- Razcepnik v OLT

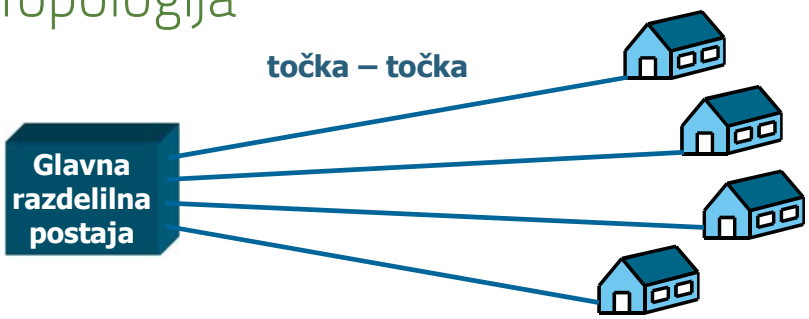


- Razcepnik bliže ONU

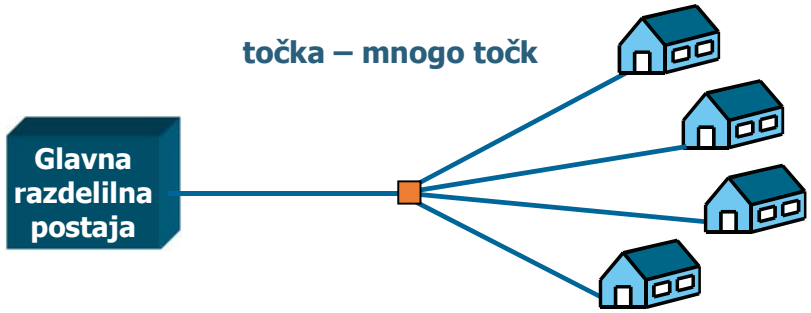


Topologija

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 18/23



Topologija pasivne zvezde:
- povezava točka-točka
- usmerjevalnik v glavni razdelilni postaji
- enostavna nadgradnja sistema na višje zmogljivosti zvez
- popolnoma dvosmerna zveza brez deljenja pasovne širine
- domet do 80 km (120 km)
- do končnega uporabnika peljemo dve vlakni



Topologija pasivnega drevesa:
- zahteva manjšo količino položenega vlakna
- zahteva manj prostora v centrali
- manjša poraba električne energije v centrali
- porazdelitev stroškov izgradnje in obratovanja med več uporabnikov
- do končnega uporabnika peljemo eno vlakno (GPON v standardu predvideva eno ali dve vlakni)

Pasivno optično omrežje

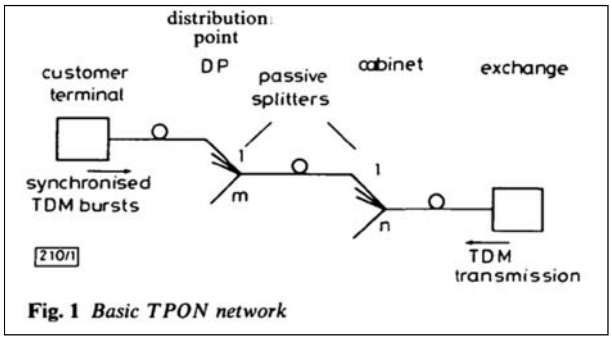


Fig. 1 *Basic TPON network*

- Prvi zapis o tehnologiji PON (angl. passive optical network)
  - J. R. Stern, et. al. (British Telecom), **Passive Optical Local Networks for Telephony Applications and Beyond**, Electronics Letters, november 1987
- Prvi standard tehnologije GPON (2004)

$$\text{delilno razmerje[dB]} = -10\log\left(\frac{1}{N}\right)$$

1:2	3 dB
1:4	6 dB
1:8	9 dB
1:16	12 dB
1:32	15 dB
1:64	18 dB
1:128	21 dB

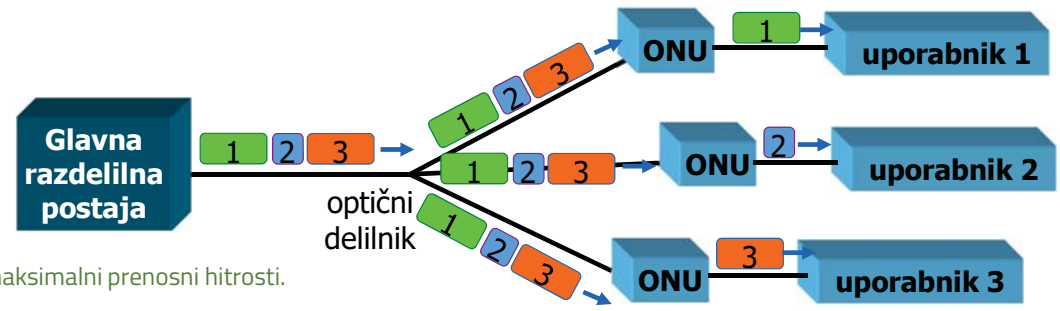
PON razcepnik

- Svetlobni razcepnik je vlakenski element, ki spaja eno optično vlakno na mnogo ločenih vlaken.
- Optični signal, ki prihaja na vhod razcepnika, se pojavi na vseh izhodih.
- Moč signala se razdeli med vse izhode.
- V primeru enakomernega deljenje moči je izhodna moč zmanjšana za faktor delilnega razmerja – število izhodov (N).
- Svetlobni razcepnik je linearen in recipročen element.

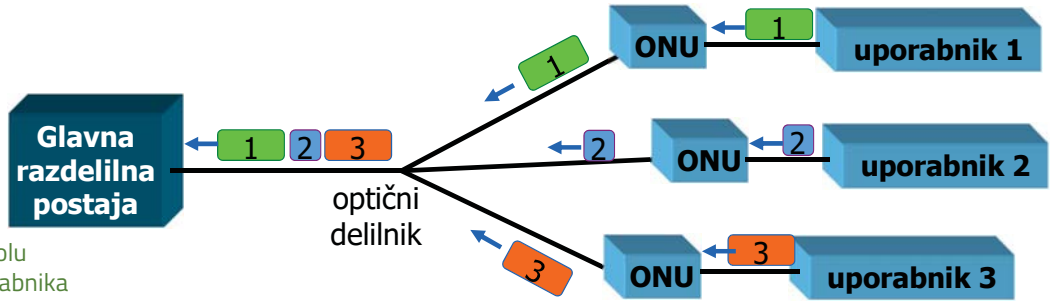
$$P_{\text{izh}} = \frac{P_{\text{vh}}}{N}$$

Časovni multipleks in časovni sodostop

- valovna dolžina 1550 nm ali 1490 nm
- Optična omrežna enota sprejme vse pakete in izloči samo tistega, ki je namenjen pripadajočemu uporabniku. -> prisluškovanje
- Optična omrežna enota deluje na maksimalni prenosni hitrosti.

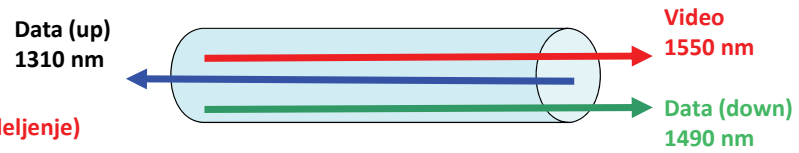


- valovna dolžina 1310 nm
- preprečiti je potrebno kolizije med paketi
- ko ena izmed optičnih omrežnih enot govori, so ostale izključene (časovni sodostop)
- zahteva po komunikacijskem protokolu
- nevarnost pred neposlušnostjo uporabnika



Tehnike razvrščanja v PON

- odtočni in dotočnim promet na istem vlaknu se ne smeta motiti



valovnodolžinsko razvrščanje:

- **Za distribucijo videa se uporablja 1550 nm (EDFA, S/N, deljenje)**
- **Za podatke k uporabniku (dotok) se uporablja 1490 nm (laser z veliko močjo)**
- **Za podatke od uporabnika (odtok) se uporablja 1300 nm (poceni FP laser)**

časovno razvrščanje:

- **upravljanje z dotočnim (angl. downstream) prometom**
- **upravljanje z odtočnim (angl. upstream) prometom**

- Zahtevni uporabniki poleg zmogljive zveze želijo tudi nizke zakasnitve (angl. latency).
  - Dolžina dostopovnega omrežja je maksimalno 20 km.
  - Hitrost razširjanja svetlobnega signala je $2 \cdot 10^8$ m/s.
  - Zakasnitev signala v eni smeri je 0,1 ms.
  - Zakasnitev signala v obe smeri je 0,2 ms.
  - Pri TDM PON je dotok sestavljen iz okvirjev, ki trajajo 0,125 ms.
  - Dinamično dodeljevanje pasovne širine (angl. Dynamic Bandwidth Allocation) ima odzivnost dveh ciklov, kar je 0,250 ms.
- GPON tehnologija je časovno potratna in neprimerna za zahtevne uporabnike.

Pred zaključkom

- "Digitalna Agenda" - strateški dokument evropske komisije izdan 2010

Europe's Digital Agenda

"By 2020, all Europeans should have access to internet of above 30 Megabits per second (Mbps) and 50% or more of European households have subscriptions above 100Mbps"

- Do leta 2020 naj bi vsi Evropejci imeli dostop do interneta s hitrostjo več kot 30 megabajtov na sekundo (Mbps), 50 % ali več evropskih gospodinjstev pa naj bi bilo naročenih na hitrosti, večje od 100 Mbps

- Septembra 2016 dopolnjeno na
  - The European Commission's public consultation on the needs for Internet speed and quality beyond 2020 and measures to fulfil these needs by 2025 reveals clear expectations for the quality of service of fixed Internet connectivity to improve by 2025, especially regarding downlink speed (above 1 Gbps) and responsiveness (less than 10 milliseconds), and confirms the increasing importance of features other than download speed for both fixed and mobile connectivity.
  - Strategic objective for 2025: Gigabit connectivity for all main socio-economic drivers such as schools, transport hubs and main providers of public services as well as digitally intensive enterprises.

(1) Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2010) 245 final, A Digital Agenda for Europe, 19.5.2010, https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0245:FIN:EN:PDF
(2) See Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European broadband: investing in digitally driven growth, COM(2010) 472 final, 20/09/2010, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52010DC0472
(3) See Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Connectivity for a Competitive Digital Single Market - Towards a European Gigabit Society, COM(2016) 587 final, 14.9.2016 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0587

Zaključki

Katedra za IKT
LSO Laboratorij za sevanje in optiko
23/23
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- FTTH je končna rešitev v širokopasovnih dostopovnih tehnologijah
- Na žalost so investicije v FTTH v preteklosti zapoznele zaradi:
  - alternativnih vrvičnih rešitev (DOCSIS, VDSL, G.fast)
  - alternativnih brezvrvičnih rešitev (WiFi, 4G, 5G (26 GHz))
  - Napačnih političnih in menedžerskih odločitev
  - Pomanjkanja uporabnosti
- FTTH je najbolj energetsko učinkovita dostopovna tehnologija

Pomen optičnega omrežja za Slovensko digitalno družbo

Importance of the optical network for the Slovenian digital society

Katja Mohar Bastar
Digitalno inovacijsko stičišče Slovenije
katja.bastar@gmail.com

Povzetek

Digitalizacija je v letu 2021 že dejstvo, ki nam omogoča novo realnost v zadnjem letu. V tem letu smo ugotovili katere so glavne potrebe na digitalnem področju ter kje so močne in kje šibke točke. Pogoj, ki je vitalen pa je vsekakor infrastruktura. Kljub umestitvi Slovenije v povprečje EU glede na povezljivost v analizi kazalnikov DESI, nam to nikakor ne sme biti dovolj, temveč si mora Republika Slovenija prizadevati za polno pokritost z omrežjem, kar je bil tudi cilj Evropske Digitalne agende pred skoraj že desetletjem. Kljub številnim projektom, vključeni državni pomoči in razpisom za tržni interes, pa tega cilja še vedno nismo dosegli. Nadzor nad izvajanjem zavez v projektih, povezanih z državno pomočjo bo nuja, če bomo želeli doseči ustrezno pokritost ozemlja.

Abstract

In 2021 digitalization is already a fact, enabling the new normality we are facing. Last year brought us recognitions of the main needs on a digital field, where are our strong and weak spots. The vital condition is infrastrucutre. The fact of Slovenia being the EU average in the DESI index in the section of connectivity should not be sufficient but we must still aim for the reaching Digital agenda goals from almost a decade ago. Despite many pojects and state aid engaged commercial interest tenders, the goal is not reached by now. The supervision of the state aid projects realization is necessary if we want to achieve the sufficient coverage.

Biografija avtorja

Mag. Katja Mohar Bastar od marca 2020 deluje kot direktorica Digitalnega inovacijskega stičišča Slovenija, enotne točke za digitalizacijo v Sloveniji, s fokusom na digitalizaciji malih in srednjih podjetij, pa tudi drugih področij družbe. Pred tem je več kot 15 let delovala na področju regulative, ki jo preko Sekcije operaterjev elektronskih komunikacij in strateške skupine za regulativo in okolje pri Slovenski digitalni koaliciji aktivno spremlja še danes. Kot vodja regulative je bila od leta 2016 zaposlena v Telekomu Slovenije, do leta 2016 pa je bila na Agenciji za komunikacijska omrežja in storitve zaposlena kot vodja področja za telekomunikacije.

Seminar optične komunikacije: Pomen optičnega omrežja za slovensko digitalno družbo

DIGITALNO INOVACIJSKO STIČIŠČE SLOVENIJE

mag. Katja Mohar Bastar, direktorica DIH Slovenije

DIGITALNO INOVACIJSKO STIČIŠČE SLOVENIJE
EVROPSKA UNIJA
EVROPSKI SKLAD ZA REGIONALNI RAZVOJ
REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSKI RAZVOJ IN TEHNOLOGIJO
I FEEL SLOVENIA
Naložbo sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

DIGITALNO INOVACIJSKO STIČIŠČE SLOVENIJE

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

ZADIHAJMO DIGITALNO!

- vzpostavitev digitalnega ekosistema
- povezovanje na nacionalni in evropski ravni
- neposredna podpora MSP
- promocija in ozaveščanje o pomenu digitalizacije
- dvig digitalnih kompetenc
- vzpodbujanje inovacij in prototipov
- podpora digitalni transformaciji

Teoretični okvir – DESI index

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

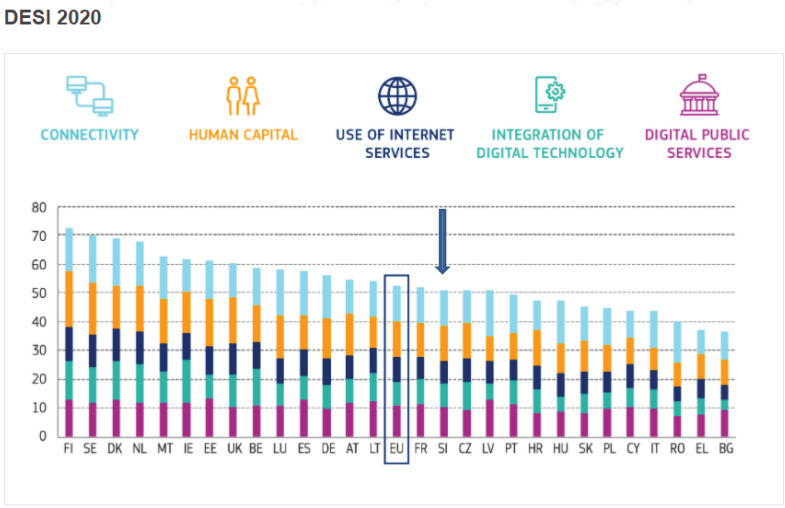
DESI indeks (digital economy and society index – indeks digitalnega gospodarstva in družbe), je sestavljen iz naslednjih komponent:

- Povezljivost, ki zajema fiksno in mobilno širokopasovni omrežje, torej, da sploh obstaja možnost da uporabniki dostopajo do storitev,
- Človeški kapital: veščine uporabe interneta in napredne veščine,
- Uporaba interneta, ki kaže koliko državljani uporabljamo internetne storitve in spletne transakcije,
- Integracija digitalne tehnologije, ki pomeni poslovno digitalizacijo in elektronsko trgovanje,
- Ter javne digitalne storitve ki zajemajo e-upravo in e-zdravje.

Vir: https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-economy-and-society-index-desi

Teoretični okvir – DESI index

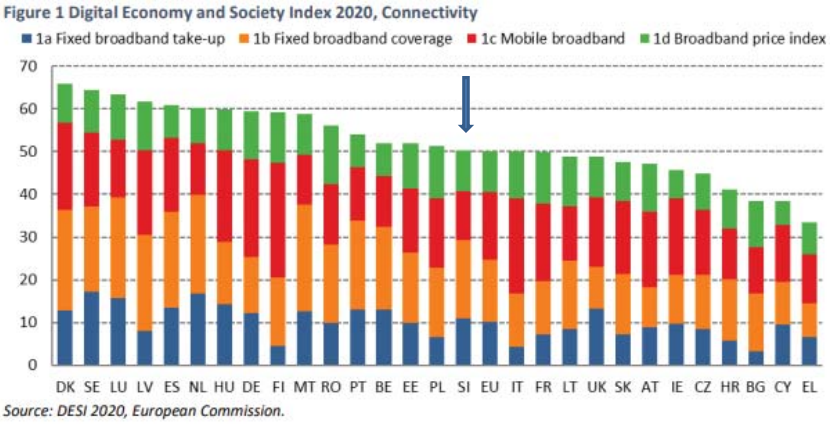
DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-economy-and-society-index-desi

Teoretični okvir – DESI index

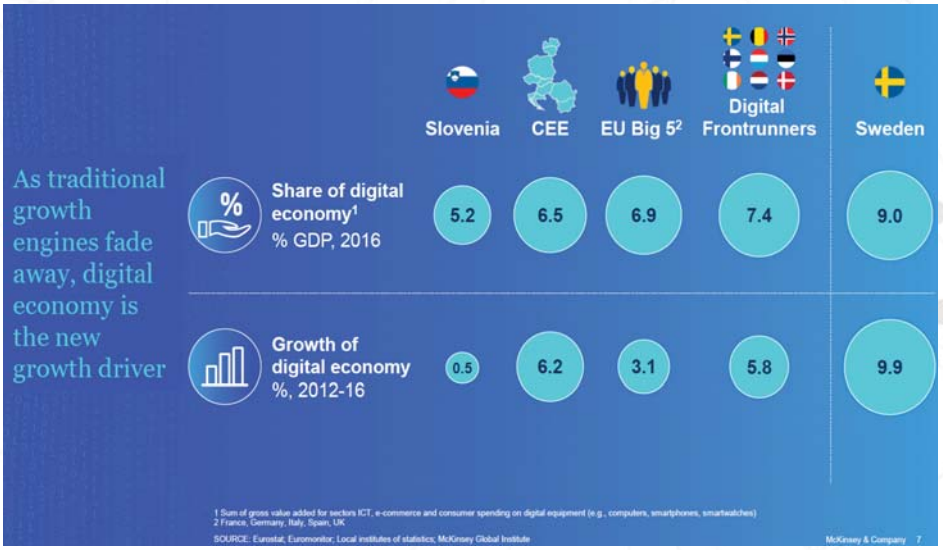
DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-economy-and-society-index-desi

Teoretični okvir – McKinsey študija

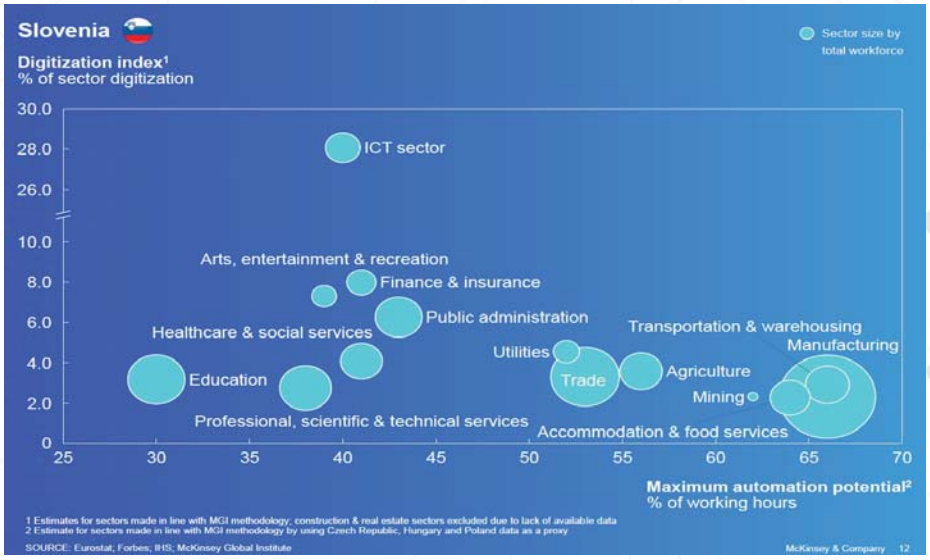
DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: https://digitalchallengers.mckinsey.com/

Teoretični okvir – McKinsey študija

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: https://digitalchallengers.mckinsey.com/

Teoretični okvir – McKinsey študija

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA



Vir: https://digitalchallengers.mckinsey.com/



- V tem desetletju preplet **digitalne preobrazbe s prehodom v četrto industrijsko revolucijo,** demografske spremembe, prehod v nizkoogljično družbo in gospodarstvo.
- **Znanje in neoprijemljiv kapital**, katerega pomen se bo v času četrte industrijske revolucije še povečal, je Slovenija zadržala relativne primerjalne prednosti glede na konkurenčne države in regije, ki pa jih postopoma izgublja.
- 26% tehnično ogroženih delovnih mest - pozitivno povezavo med digitalizacijo oz. robotizacijo in zaposlenostjo, kar pomeni, da podjetja, ki se uspejo prva preobraziti, realizirajo ne samo hitrejšo rast, ampak tudi pospešujejo zaposlenost.
- **Okrepljen socialni dialog** in vnaprejšnji družbeni dogovor o načinih ohranjanja družbene in teritorialne kohezije –neukrepanje povečanje nevarnosti socialnih neenakosti; potreba po skladnejšem teritorialnem razvoju
- Slovenija se po **indeksu digitalnega gospodarstva** in družbe sicer uvršča rahlo za povprečjem EU, pri čemer svoj zaostanek postopno povečuje.
- Pri osnovni ravni uvajanja digitalizacije v podjetja, so **velika podjetja med uspešnejšimi, majhna in srednja podjetja pa zaostajajo in so na povprečju EU.**

Vir:
https://www.umar.gov.si/fileadmin/user_upload/publikacije/Porocilo_o_produktivnosti/2020/slovenski/PoP_2020_splet.pdf



Priporočila UMAR ekonomski politiki

1. Bolj ambiciozen pristop k spodbujanju digitalne preobrazbe
2. Krepitev poslovnega okolja z digitalno-inovacijskim ekosistemom
3. Srednjeročnim potrebam prilagojen razvoj znanj in spretnosti
4. Nadaljnje vlaganje v digitalno infrastrukturo, varnost in odprte podatke
5. Mobilizacijo družbe za spremembe in vključujoč prehod

Vir:
https://www.umar.gov.si/fileadmin/user_upload/publikacije/Porocilo_o_produktivnosti/2020/slovenski/PoP_2020_splet.pdf

UMAR IN EF ŠTUDIJA PRODUKTIVNOSTI

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

Priporočila UMAR za podjetniški sektor:

- Takojšen in strateški pristop k digitalni preobrazbi
- Intenzivna vlaganja v (vseživljenjsko) učenje zaposlenih ter vzpostavitev »digitalne miselnosti in kulture«,
- Pospešitev vlaganj v digitalne projekte (vlaganj, še posebej v raziskave, razvoj in inovacije)
- Preobrazba organizacije in poslovnih modelov

Vir:
https://www.umar.gov.si/fileadmin/user_upload/publikacije/Porocilo_o_produktivnosti/2020/slovenski/PoP_2020_splet.pdf

Povzetek študij in priporočil

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

- Slovenija je po vseh kazalnikih nekje okoli povprečja.
- Nujne so vzpodbude gospodarstvu za digitalno preobrazbo.
- Dvig kompetenc na ravni šolanja, kot tudi vseživljenjskega učenja – zaposlenih, potrošnikov, aktivnega pa tudi neaktivnega prebivalstva.
- Spodbujanje inovacij in raziskovanja za povečanje blaginje in konkurenčnosti.
- Oblikovanje socialne pogodbe.
- Oblikovanje teritorialno uravnotežene proizvodnje.
- Ustrezna regulativa, predvidljivost, sorazmernost.



Optična povezava do vseh slovenskih šol in izobraževalnih ustanov

- Pouk na daljavo – delo učiteljev iz prostorov šole;
- Sprememba kurikuluma in vključitev predmetov, ki učencem omogočajo izgradnjo digitalnih profilov;
- Spodbujanje šolskih inkubatorjev ;
- Motiviranje otrok in mladostnikov za tehnične poklice;
- Centralna točka za optično povezavo tudi na sivih in belih lisah.



Industrija 4.0

- Poslovni objekti izven komercialno zanimivih središč (teritorialna uravnoteženost)
- Potreba po hrbteničnem omrežju
- Integracija informacijsko komunikacijskih tehnologij (ERP, IoT, komunikacija človeka in stroja, kibernetsko fizični proizvodni sistemi)
- Obvladovanje rešitev 3.0
- Spodbujanje inovacijskih in eksperimentalnih okolij

Področja digitalizacije

DIGITAL INNOVATION HUB SLOVENIA

Mala in srednja podjetja

- Najštevilčnejši segment
- Podpore za intenzivno digitalno transformacijo
- Teritorialna/ kohezijska razpršenost
- Agilnost in vitko delovanje
- Podporna okolja
- Slabše digitalizirana kot večja podjetja (e-računi, ERP, CRM, sistemi za zagotavljanje in upravljanje kakovosti)

HVALA za pozornost!



info@dihslovenia.si

040 606 710

www.dihslovenia.si

Vpeljava XGS-PON v Telekomu Slovenije

Introduction of the XGS-PON in Telekom Slovenije

Rok Čotić

Telekom Slovenije

rok.cotic@telekom.si

Povzetek

V predavanju je zajeta kratka predstavitev storitvenih in tehnoloških trendov na področju širokopasovnega dostopa, ter vpliv enih na druge. Prikazan je razvoj optičnih tehnologij in pogled v prihodnost, kaj lahko na tem področju pričakujemo. Glavna tema je namenjena opisu možnosti vpeljave tehnologije XGS-PON v omrežje Telekoma Slovenije ter katerim tehnološkim lastnostim je pri tem potrebno posvetiti pozornost.

Abstract

The lecture includes a brief presentation of service and technological trends in the field of broadband access, and the impact of one on another. The development of optical technologies and a look into the future of what to expect in this field are presented.

Biografija avtorja

Rok Čotić je začel svojo kariero leta 1997 v investicijskem oddelku Telekoma Slovenije. Najprej je bil odgovoren za omrežje TDM, kasneje Centrex in xDSL. Leta 2006 je uspešno zaključil študij MBA in v letu 2007 postal vodja Oddelka za dostopovne elemente. V letu 2013 je postal koordinator za dostopovne elemente, v letu 2016 pa je prevzel vodenje tima za dostopovne naprave in sisteme prenosa.

Author's biography

Rok Čotić started his career in 1997 in the investment department of Telekom Slovenije. He was initially responsible for the TDM network and latter on for Centrex and xDSL technologies. He successfully completed his MBA in 2006 and in 2007 he became head of the Department for access elements. In 2013, he became the coordinator for access elements, and in 2016 he took over the management of the team for access devices and transmission systems.

Vpeljava XGS-PON v Telekomu Slovenije

Rok Čotić, MBA

4. februar 2021

TelekomSlovenije

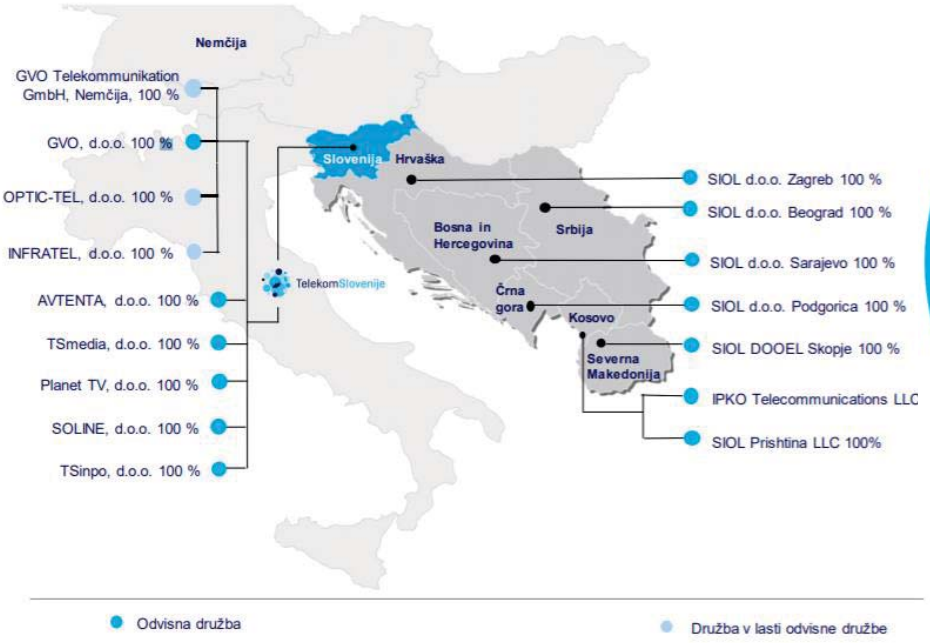
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

TelekomSlovenije

Telekom Slovenije

Trgi in družbe Skupine Telekom Slovenije

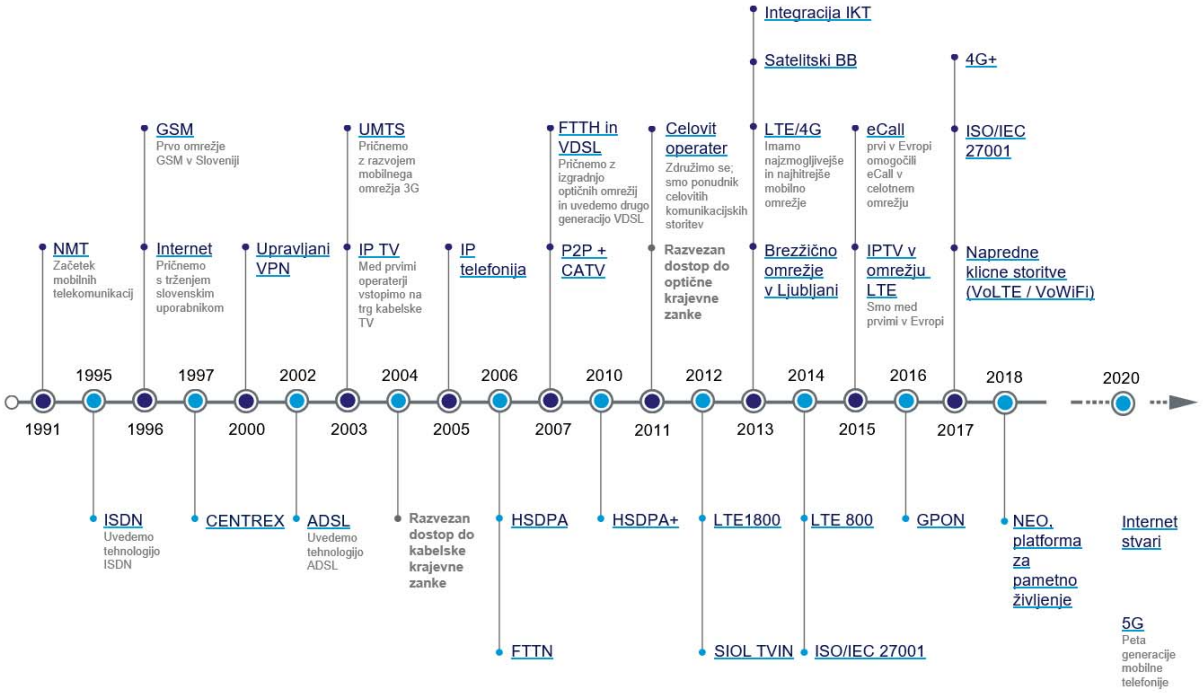


Vizija, poslanstvo in vrednote



TelekomSlovenije

Razvoj omrežja in storitev Telekoma Slovenije skozi čas



TelekomSlovenije

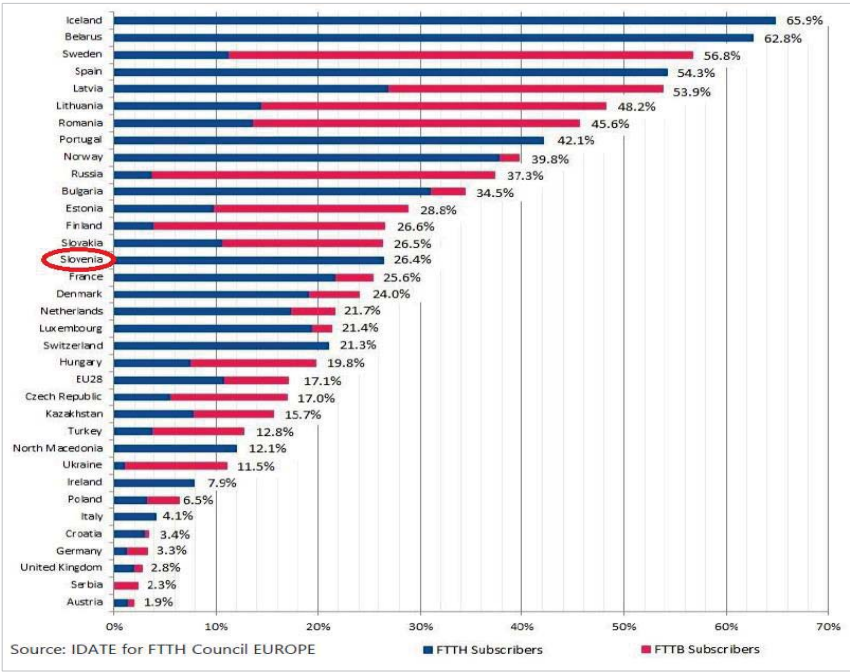
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

TelekomSlovenije

Trendi v svetu

- Giga Home evolucija;
- Rast podatkovnega prometa in NGA priključkov;
- Internet stvari;
- Mobilnost;
- Pospešena FTTH gradnja;
- Konvergenca 5G in FTTH;
- Novi poslovni modeli (Smart-x) in ekosistemi;
- Varnost in zasebnost;
- Kakovost in odlična uporabniška izkušnja;
- Infrastrukturna konkurenca;
- Nove tehnologije in višje potrebe po pasovni hitrosti;
- Opuščanje bakrenih omrežij.



TelekomSlovenije

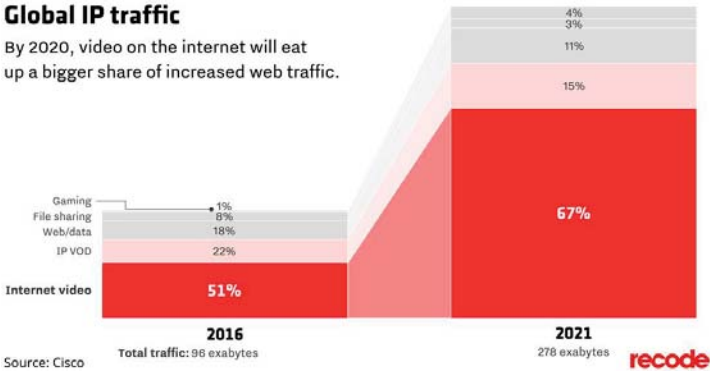
Zagotovitev dostopovnega omrežja prihodnosti

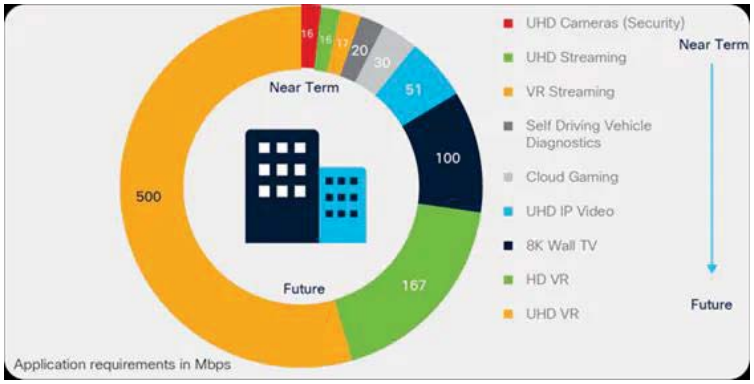
Omrežje mora omogočati delovanje prihajajočih storitev

Prihaja 4K, 8K, VR/AR, IOT, massive connectivity, IOE (Internet of Everything), videoanalitične rešitve, Internet TV, VR konference, VR gaming, telemedicina, …

Smernice:
- Full 1Gbit/s mainstream -> Gigabitna družba
- Širjenje omrežja z opremo, ki podpira vgradnjo prihajajočih FTTH tehnologij in združevanje omrežij
- Ekonomičnost gre v smeri PON tehnologij
- Masovni prehod xDSL → FTTH



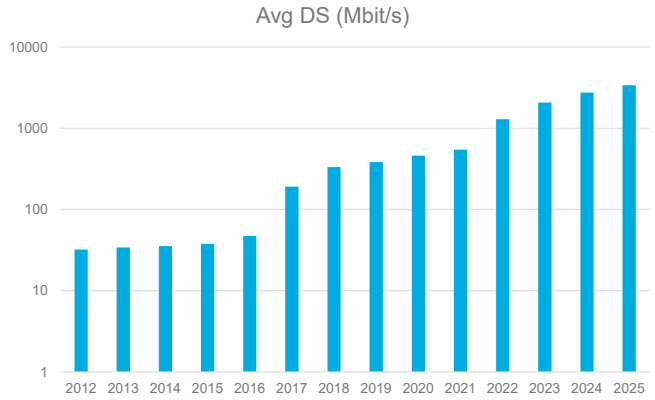




Source: Cisco Annual Internet Report, 2018–2023

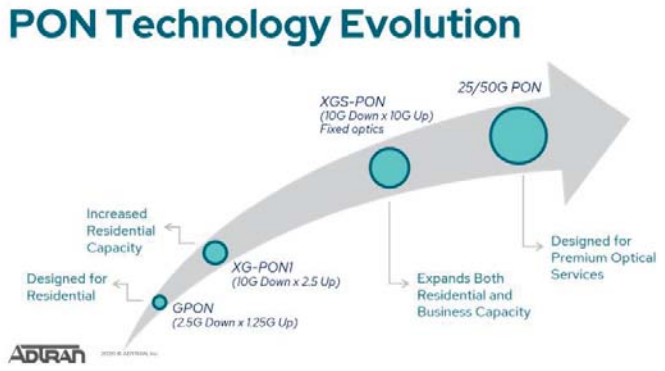
TelekomSlovenije

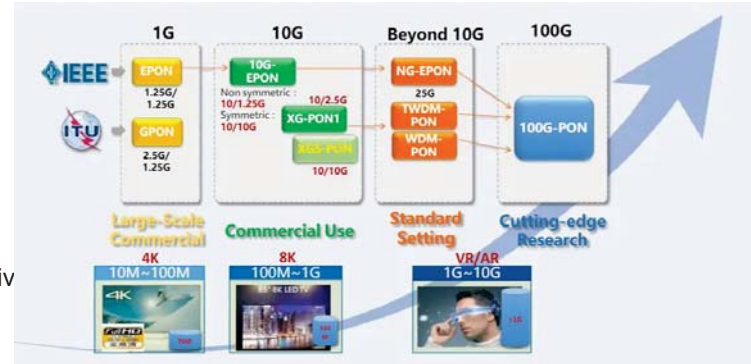
Trendi - FTTH omrežja



Vir: Telekom Slovenije

- do 2017 ima največji vpliv xDSL in maks. FTTH 100M zmogljiv
- do 2021 ima največji vpliv FTTH z maks 1G zmogljivosti;
- do 2025 ima največji vpliv FTTH z maks 10G zmogljivosti.





Vir: https://www.academia.edu/38090047/Fiber_Home_GPON_Solutions

TelekomSlovenije

Širokopasovna tehnologija bakrenega omrežja se poslavlja

Bakreno omrežje – Topologija točka – točka

POTS (Plain Old Telephone Service):

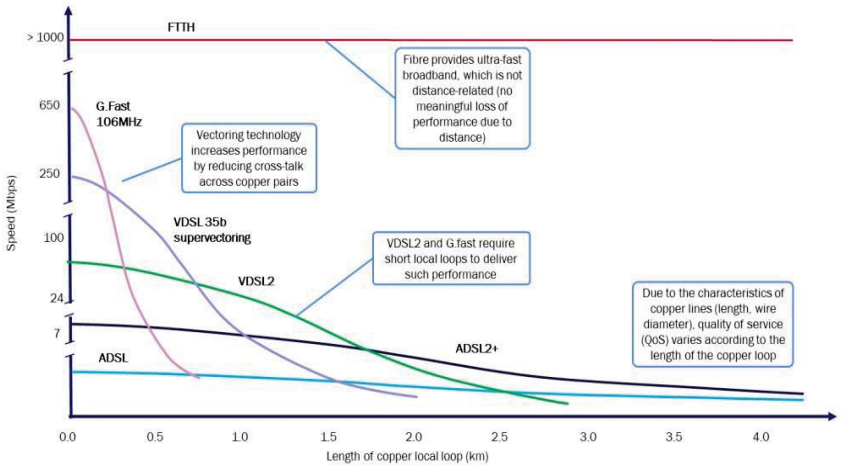
- zgrajeno za govorno telefonijo
- uporablja frekvenčni pas 300Hz – 3400Hz
- maksimalna hitrost preko analognih modemov 56 kbit/s

ADSL2+:

- vklopljeni naročnik z najdaljšo razdaljo 10km
- uporablja frekvenčni pas 138 kHz – 2,2 MHz
- maksimalna hitrost do 21 Mbit/s Down, do 1,2 Mbit/s Up

VDSL2:

- vklopljeni naročnik z najdaljšo razdaljo 2,2 km
- uporablja frekvenčni pas 2,2 MHz – 17 MHz
- maksimalna hitrost do 100 Mbit/s Down, do 20 Mbit/s Up



Source:https://medux.com/ftth-vs-docsis-ii-future-gigabit-capable-technologies/

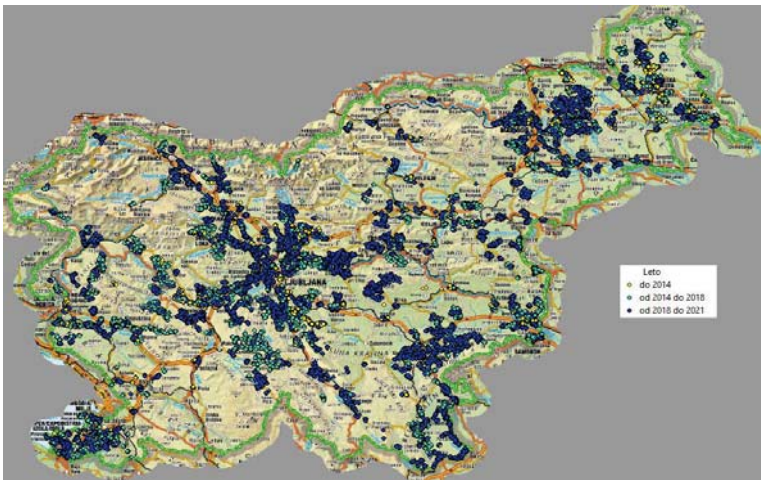
TelekomSlovenije

Širokopasovna strategija države:

- 2016: Načrt NGN 2020 (do 2020 zagotoviti 100Mbit/s dostop 96% gospodinjstev; preostalim 4% pa 30Mbit/s)
- 2018: Dodatek Načrtu NGN 2020
  do 2025: šole, univerze, prometna središča 1Gbit/s simetrično
  do 2025: vsa gospodinjstva 100Mbit/s z možnostjo nadgradnje na 1Gbit/s
  do 2025: urbana območja ter pomembnejše ceste in železnice neprekinjeno pokrite s 5G

Gradnja FTTH v Telekomu Slovenije:

- FTTH gradnja od leta 2007
- Trenutno pokrivamo 370k gospodinjstev (45% od 824k)
- Odprto omrežje, pod enakimi pogoji za vse
- Pokritost gospodinjstev na ruralu 26%, suburbanih 43% in urbanih področjih 55%
- 43% zgrajene optične infrastrukture TS na področjih, kjer je gostota naseljenosti pod 500 prebivalcev na km^2
- Zgrajen Tržni interes iz 2016; 45k gospodinjstev
- Več kot pol realiziranega od TI 2019; 12k gospodinjstev

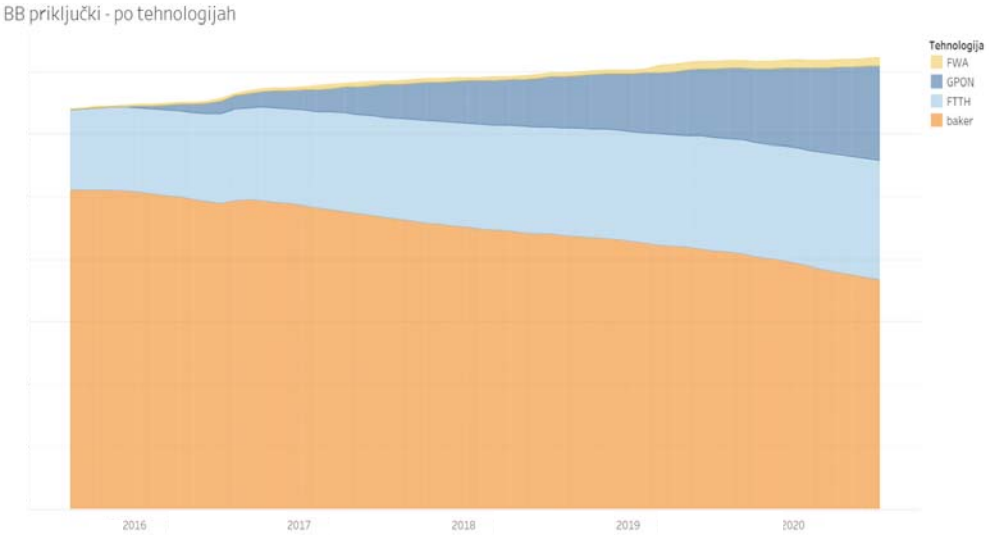


Vir: Telekom Slovenije

TelekomSlovenije

Trend tehnologij na omrežju Telekoma Slovenije 2016 - 2020

Vključitve na bakrenih paricah so v konstantnem upadu
FTTH tehnologije dobivajo vse večji delež
Z vpeljavo GPON tehnologije se v zadnjih letih povečuje delež P2MP
FTTH P2P tehnologija se je ustalila in je zadnjih nekaj let na približno isti ravni



Vir: Telekom Slovenije

11

TelekomSlovenije

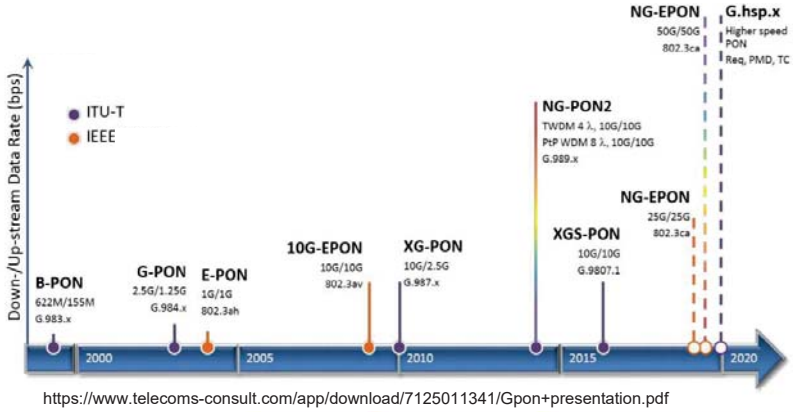
Vsebina

- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

12

TelekomSlovenije

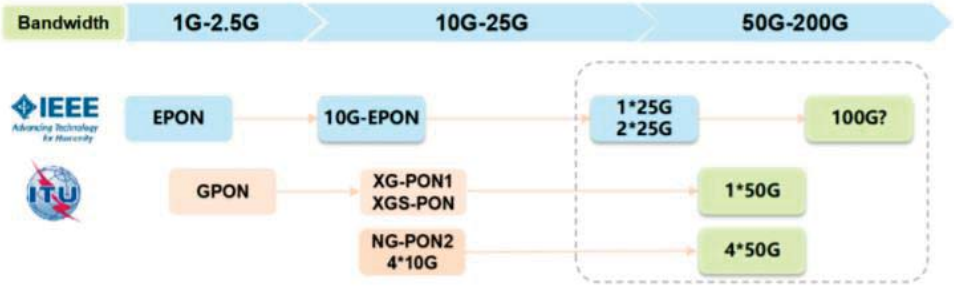
Standardizacija PON tehnologije



https://www.telecoms-consult.com/app/download/7125011341/Gpon+presentation.pdf

Item	Downstream	IEEE	ITU-T
GPON/EPON	1G/2.5G	EPON (IEEE 802.3ah)	GPON (ITU-T G.984)
10G PON	10G	10G-EPON (IEEE 802.3av)	XG-PON(ITU-T G.987) XGS-PON(ITU-T G.9807)
50G PON	25G/50G	25G/50G EPON (IEEE 802.3ca)	50G PON (ITU-T G.hsp)

Vir: https://res-www.zte.com.cn/mediares/zte/Files/PDF/white_book/White_Paper_on_Next-Generation_Fixed_Network_Access_Technologies_20200922_EN.pdf



https://res-www.zte.com.cn/mediares/zte/Files/PDF/white_book/White_Paper_on_Next-Generation_Fixed_Network_Access_Technologies_20200922_EN.pdf

TelekomSlovenije

PON evolucija (ITU-T družina)

GPON (2.5G Down x 1.25G Up)

XGPON (10G Down x 2.5G Up)

Valovne dolžine izbrane za koeksistenco z GPON

XGS-PON (10G Down x 10G Up)

Iste valovne dolžine kot XGPON1 / 10G-EPON

10G Upstream zagotavlja storite poslovnim strankam

NGPON2 (4-8 x 10Gx2.5G or 10Gx10G)

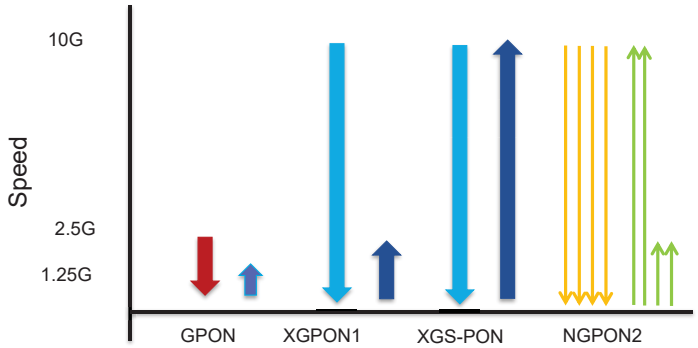
DWDM + PON = TWDM

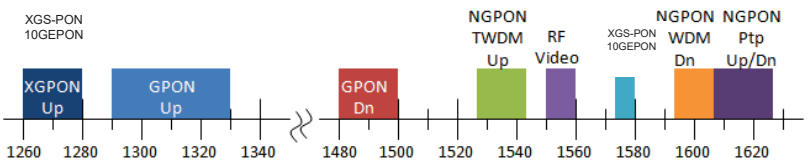
- Višje cene komponent:
  - Nastavljivi filtri in laserji na ONT-ju
  - Povečane optične izgube

10G Upstream zagotavlja storite poslovnim strankam

Večkratne valovne dolžine omogočajo višje hitrosti

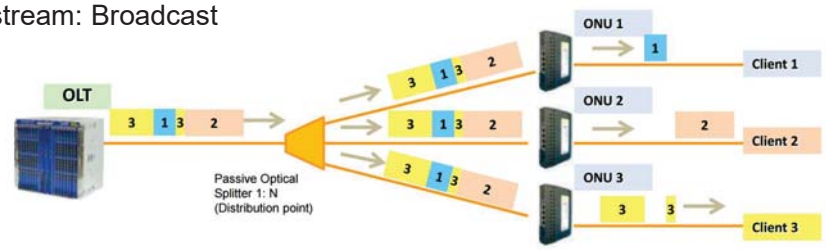
Stacking TDM PON -> TWDM-PON



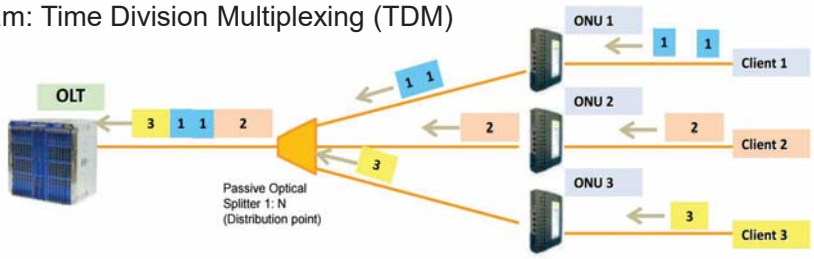


Princip delovanja TDM PON-a

Downstream: Broadcast



Upstream: Time Division Multiplexing (TDM)



15

TelekomSlovenije

Primerjava GPON in XGS-PON

Najpomembnejše karakteristike in razlike med GPON in XGS-PON

	GPON	XGS-PON
valovna dolžina downstream	1490 nm	1577 nm
valovna dolžina upstream	1310 nm	1270 nm
tipi SFP (max RX sensitivity)	B+ (-28 dB), C+ (-32 dB), C++ (-35dB)	N1 (-29dB), N2 (-31dB), E1 (-33 dB), E2 (-35 dB)
downstream nazivna hitrost	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s
upstream nazivna hitrost	1,25 Gbit/s	10 Gbit/s
največja teor. fizična oddajna razdalja	60 km	100 km
največje teor. delilno razmerje	1:128	1:256
struktura okvirja	GEM	XGEM

ITU-T G.986: 1 Gbit/s point-to-point Ethernet-based optical access system:
Physical layer specification for ONT:

- Receive wavelength nm 1480-1500 (1490)
- Transmit wavelength nm 1260-1360 (1310)

16

TelekomSlovenije

Vsebina

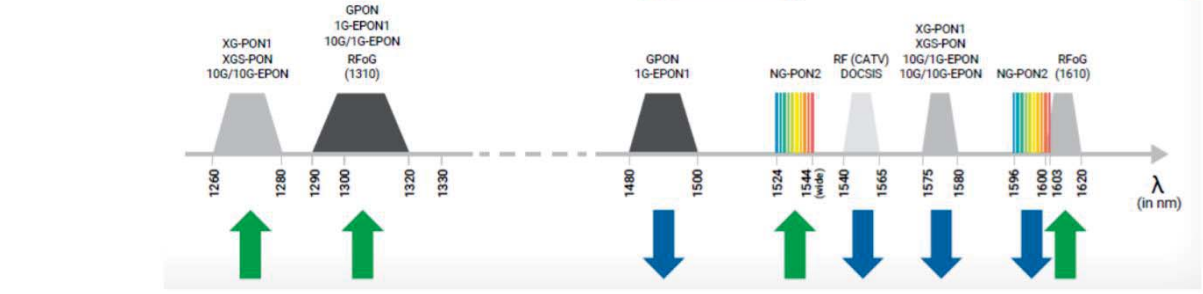
- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

TelekomSlovenije

Možnosti vpeljave XGS-PON tehnologije

FTTH omrežje: Topologija P2PM (točka več točk)

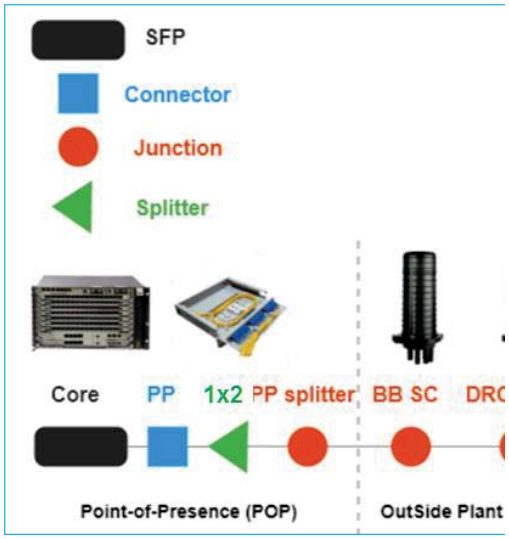
	Legacy and current				Next generation		
	GPON	1G-EPON1	XG-PON1	XGS-PON	10G/1G-EPON	10G/10G-EPON	NG-PON2
PON rate (down/up)	2.5G/1.25G	1.25G/1.25G	10G/2.5G	10G/10G	10G/1.25G	10G/10G	10G/10G
Downstream λ (nm)	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1575-1580	1575-1580	1575-1580	1596-1603
Upstream λ (nm)	1310 ±20	1310 ±50 or 1310 ±20	1260-1280	1260-1280	1310 ±50 or 1310 ±20	1270 ±10	1524-1544 (wide)
Max split ratio	1:128	1:64	1:128	1:256	1:64	1:64	1:256



Vir: http://www.kkk.forum.hu/wp-content/uploads/2018/06/KKK-2018_PON_halozatok_jovoje_EXPO.pdf

TelekomSlovenije

Power budget – doseg



https://webthesis.biblio.polito.it/13091/1/tesi.pdf

Table 6.2. Example of attenuation calculation.

Attenuation calculation **Link: Access node - Building distributor**				
Fibre type: ITU-T G.652.D		Unit	Wavelength	
			1310 nm	1550 nm
1.	Fibre attenuation coefficient	dB/km	0,40	0,25
2.	Chromatic dispersion coefficient	ps/nm*km	3,50	18,00
3.	Link length	km	5,00	5,00
4.	Total fibre attenuation	dB	2,00	1,25
5.	Average splice loss	dB	0,10	0,10
6.	Number of splices	pc.	5	5
7.	Total splice loss	dB	0,50	0,50
8.	Repair splice loss	dB	1,00	1,00
9.	Average insertion loss of connection	dB	0,30	0,30
10.	Number of connections	pc.	6	6
11.	Total connector loss	dB	1,80	1,80
12.	Splitting loss, 1:32	dB	17,50	17,50
13.	**Total attenuation of link**	**dB**	**22,80**	**22,05**
14.	**Maximum allowed attenuation**	**dB**	**25,00**	**25,00**
15.	**Attenuation margin**	**dB**	**2,20**	**2,95**
16.	**Total dispersion of link**	**ps/nm**	**17,50**	**90,00**

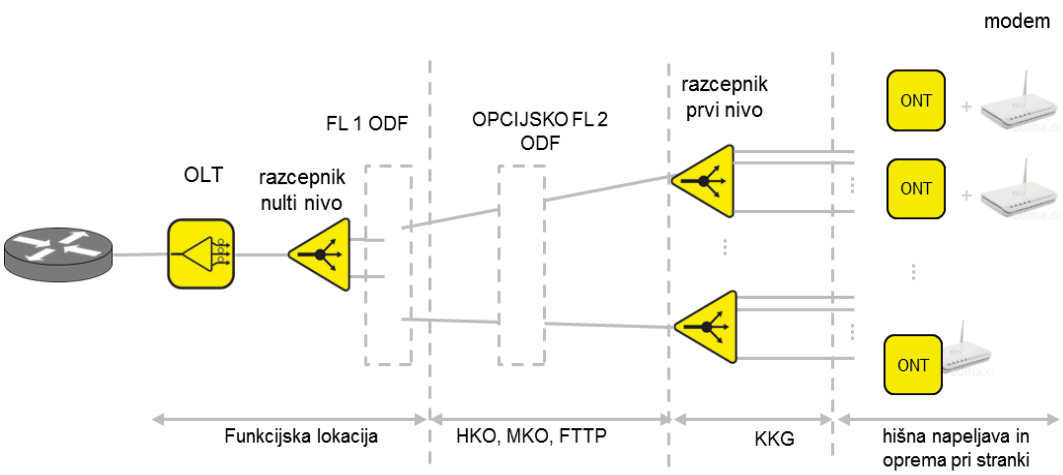
https://www.nestorcables.com/media/aineistopankki/kirjat/fttx_principles_technologies_and_installation_solutions_eng.pdf

19

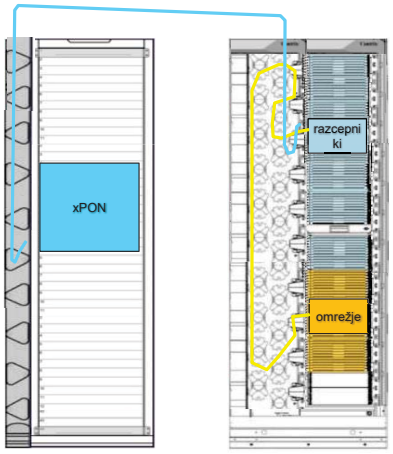
TelekomSlovenije

Topologija PON omrežja

- Velja za vsa PON (Passive Optical Network) omrežja (GPON, XGS-PON, TWDM-PON, WDM-PON…)
- Del omrežja si delijo uporabniki na isti veji (OLT, vlakno pred spliterjem)
- Lahko je več nivojsko splitano (1-nivojsko, 2-nivojsko)



Postavitev na FL:

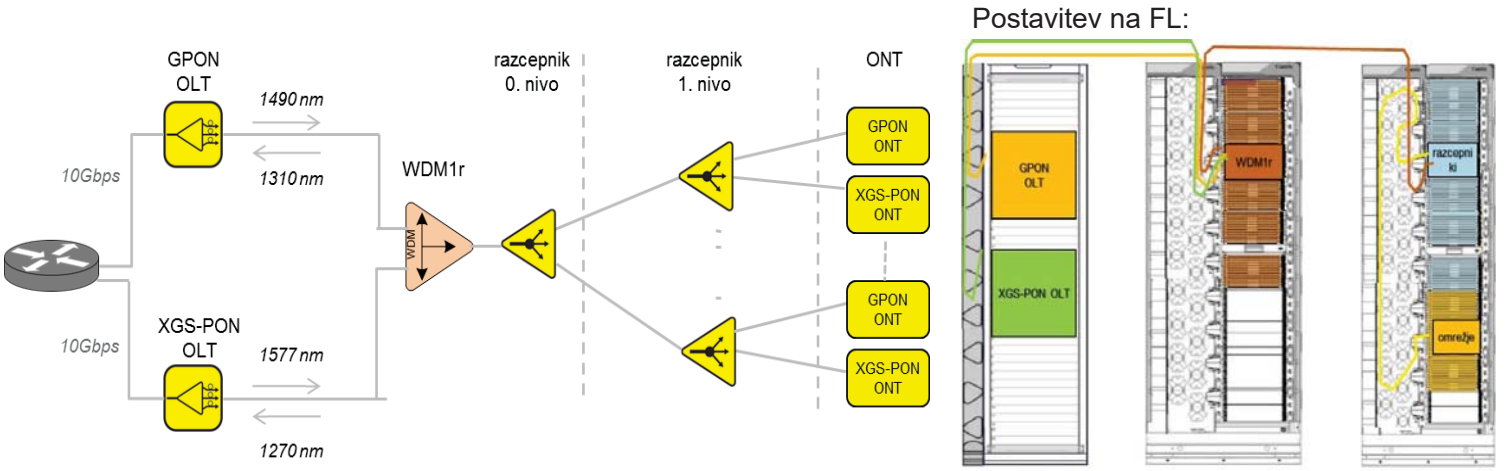


20

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na GPON-u – P2MP

- Pouporaba obstoječega optičnega pasivnega omrežja
- Vpeljava sklopnega elementa WDM1r
- Istočasno delovanje GPON in XGS-PON tehnologije

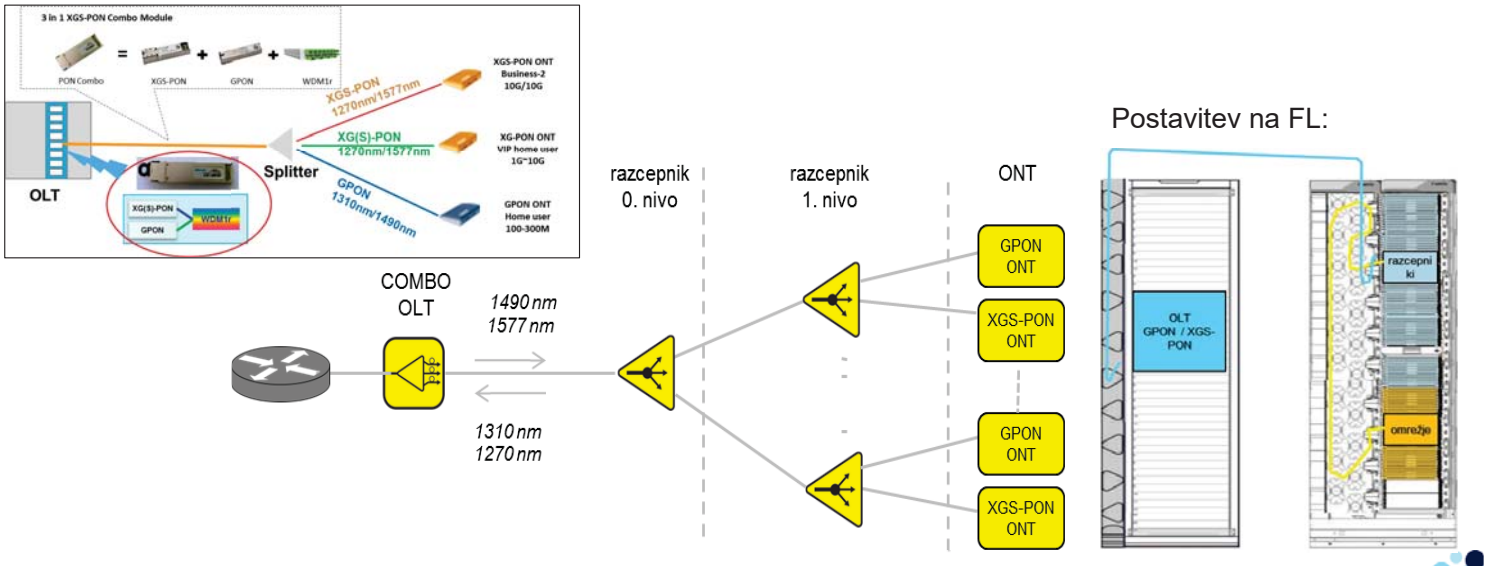


21

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na GPON-u – Combo SFP

- Combo SFP omogoča združitev GPON, XGS-PON in WDM1r-ja na samem SFP-ju plošče
- Ni potrebe po zunanjem WDM1r-u
- Ni potrebe po ohranitvi obstoječe GPON opreme (možna pouporaba na drugih FL-jih)

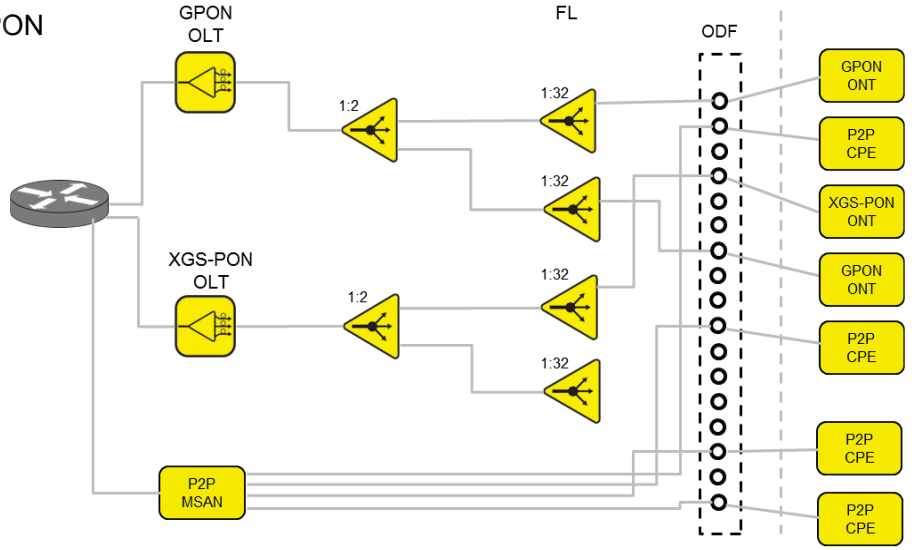


22

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na P2P topologiji omrežja

- Pouporaba obstoječega pasivnega optičnega omrežja
- Brez vpeljave sklopnega elementa WDM1r
- Istočasno delovanje GPON in XGS-PON tehnologije
- Zagotavljanje regulatornih obveznosti

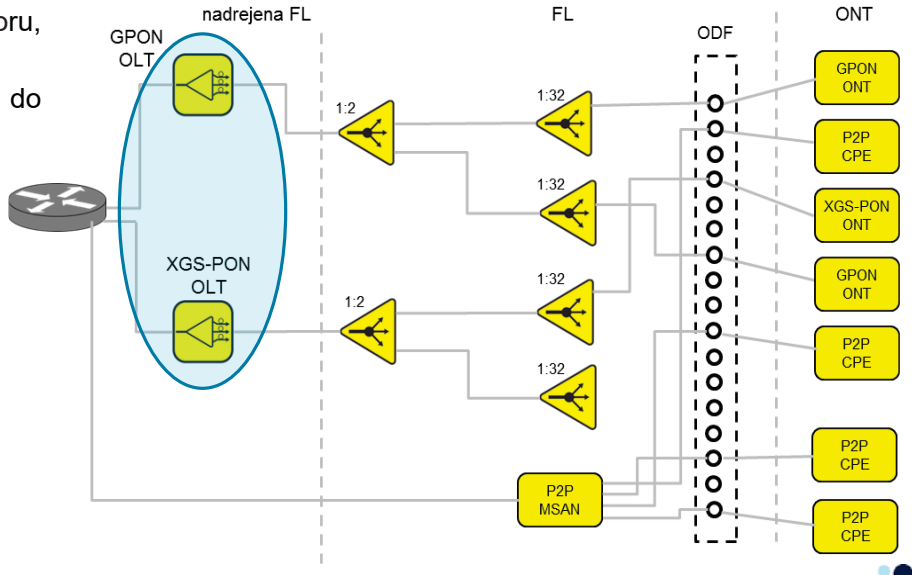


23

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na P2P topologiji omrežja iz nadrejene lokacije

- Pokrivanje večih P2P lokacij iz ene nadrejene funkcijske lokacije
- Dolgoročno ohranjanje potreb po prostoru, energiji in hlajenju
- Potrebne zadostne optične povezave do nadrejene FL

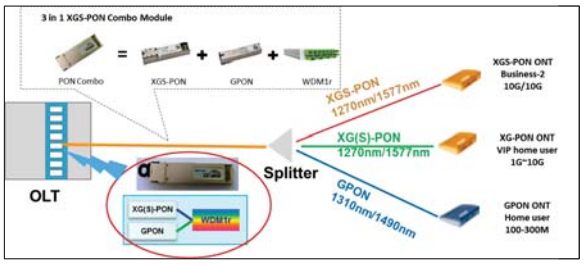


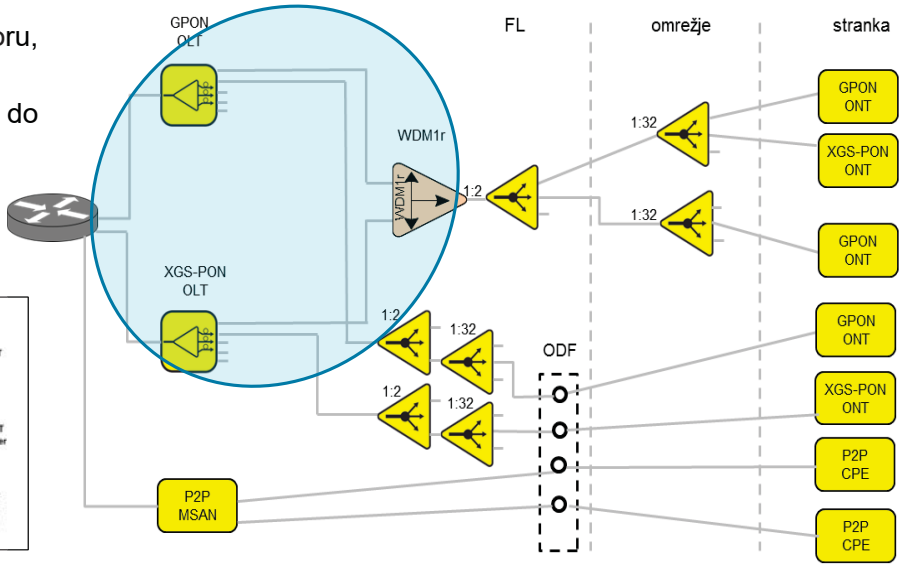
24

TelekomSlovenije

Vpeljava XGS-PON tehnologije na P2P in P2MP topologiji omrežja iz nadrejene lokacije

- Pokrivanje večih P2P in P2MP lokacij iz ene nadrejene funkcijske lokacije
- Omogočeno ohranjanje potreb po prostoru, energiji in hlajenju
- Potrebne zadostne optične povezave do nadrejene FL
- Potreben zadosten optični power budget



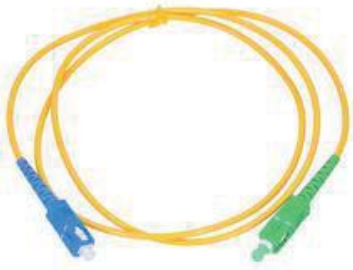


TelekomSlovenije

Oprema pri naročniku

Nadgradnja GPON->XGS-PON:
- Naročniki Telekom Slovenije bodo zaključeni z XGS-PON modemom
- Naročniki drugih ISP-jev bodo zaključeni z XGS-PON bridgem, ki bo imel 2,5 Gbit/s oz. 10Gbit/s ETH port
- Povezovalna vrvica iz doze do ONT-ja ostane ista

Nadgradnja P2P->XGS-PON:
- Naročniki Telekom Slovenije bodo zaključeni z XGS-PON modemom
- Naročniki drugih ISP-jev bodo zaključeni z XGS-PON bridgem, ki bo imel 2,5 Gbit/s oz. 10Gbit/s ETH port
- Povezovalna vrvica iz doze do ONT-ja se zamenja s takšno, ki ima SC/APC konektor
- Oz. se pouporabi obstoječa vrvica in se namesti pretvornik SC/UPC->SC/APC





TelekomSlovenije

Vsebina

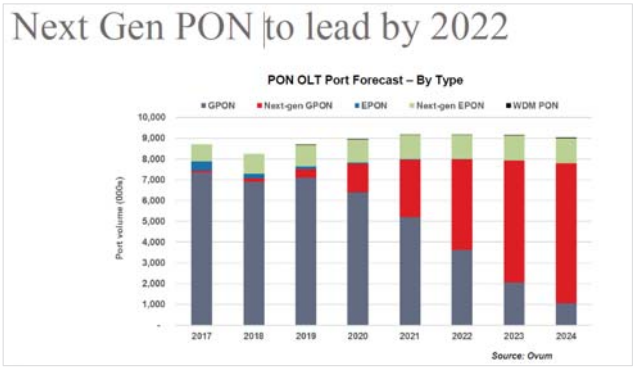
- Kratka predstavitev Telekoma Slovenije
- Tehnološki in storitveni trendi
- PON tehnologija
- Možnosti vpeljave XGS-PONa na FTTH omrežjih P2P in P2MP
- Povzetek

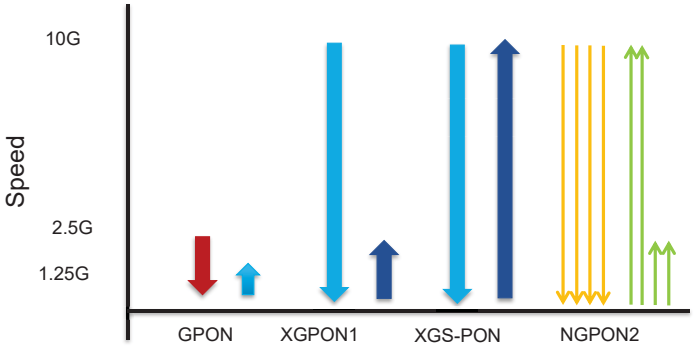
TelekomSlovenije

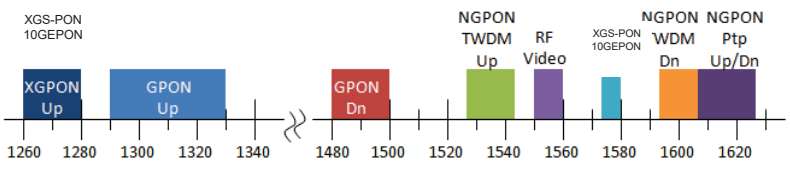
GPON tehnologije -> XGS-PON









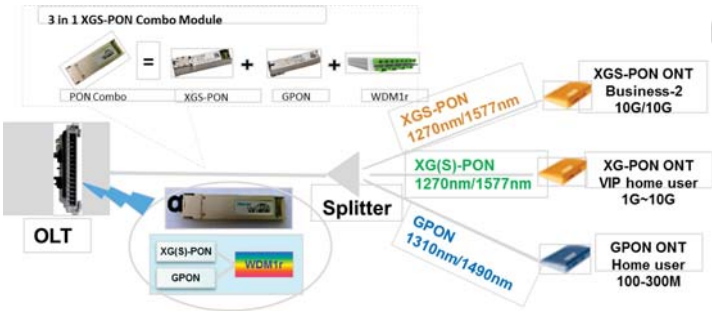


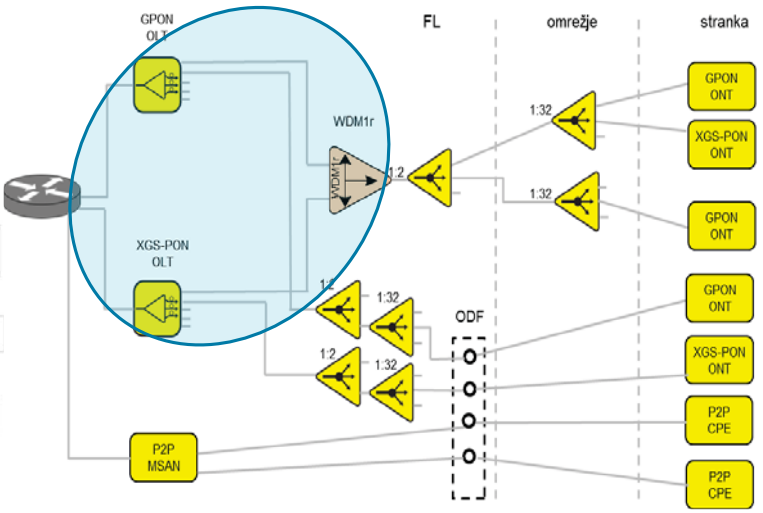
TelekomSlovenije

Nadgradnja GPON tehnologije -> XGS-PON

Možnih je več tehničnih rešitev – primer XGS/GPON Combo kartica:

- na P2MP omrežju - aktivna oprema, ki združuje valovne dolžine od GPON in XGS-PON;
- ena kartica oz. port → dve tehnologiji;
- vključevanje zahtevnejših poslovnih uporabnikov;
- priključitve malih BP;
- možen model plačila „pay as you grow“.



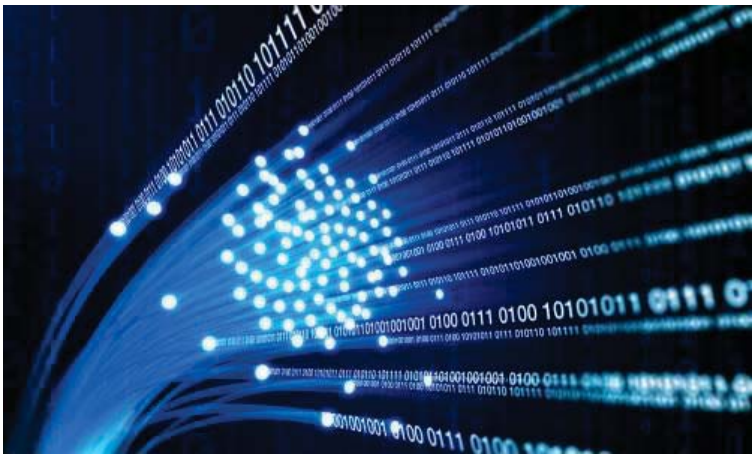


29

TelekomSlovenije

Prihodnost je optična

- Tehnološki in storitveni trendi narekujejo višje hitrosti
- Prihodnje tehnologije omogočajo sobivanje na obstoječem omrežju
- Dolgoročno je omogočeno ohranjanje footprinta
- Potrebno je zgraditi dodatne medkrajevne povezave
- Masovna proizvodnja bo izbrala cenovno učinkovito tehnologijo



30

TelekomSlovenije

Hvala!

Telekom Slovenije, d.d.
Cigaletova 15
1000 Ljubljana

www.telekom.si
T: 041 700 700 ali 080 8000
E: info@telekom.si

TelekomSlovenije

Optična omrežja v Sloveniji

Fibre networks in Slovenia

Žan Knafelc

Agencija za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije

zan.knafelc@akos-rs.si

Povzetek

Trg elektronskih komunikacij je bil liberaliziran že pred približno dvema desetletjema z namenom znižanja vstopnih ovir za konkurenčne ponudnike storitev, kar je prineslo pozitivne učinke za trg v smislu uvajanja sodobnih tehnologij, nižjih cen storitev in večje izbire za končne uporabnike. V prispevku je v kontekstu regulacije predstavljen tehnološki napredek na trgu in stanje optične infrastrukture v Sloveniji s pogledom v prihodnost.

Abstract

The electronic communications market was liberalized about two decades ago with the aim of reducing barriers to entry for competing service providers, which had positive effects on the market in terms of new technology deployments, lower prices for service and greater choices for end-users. In the context of regulation, the article presents technological progress on the market and the state of optical infrastructure in Slovenia with a view to the future.

Biografija avtorja

Žan Knafelc je na AKOS-u zaposlen od leta 2007, zadnja štiri leta kot vodja oddelka za regulacijo trga elektronskih komunikacij. Pred tem si je izkušnje nabiral pri mobilnem operaterju na področju razvoja in uvajanja storitev. Ima univerzitetno izobrazbo s tehničnega in ekonomskega področja.

Author's biography

Žan Knafelc has been employed at AKOS since 2007, the last four years as a head of market regulation department for electronic communications. Prior to that, he gained experience working for a mobile operator in the product management. He holds degrees in technical and economics area.

AKOS

Optična omrežja v Sloveniji

Seminar optične komunikacije 2021

Žan Knafelc, AKOS

Zoom, 4. februar. 2021

AKOS

Kako se je začelo?

PRI MENI DOMA

23 let nazaj (1998)

- Klicni dostop
- 33,6 kbit/s



14 let nazaj (2007)

- Paket trojček – internet 1 Mbit/s

AKOS

Pa danes?

PRI MENI DOMA

Danes (2021)

- Optika – 1 Gbit/s



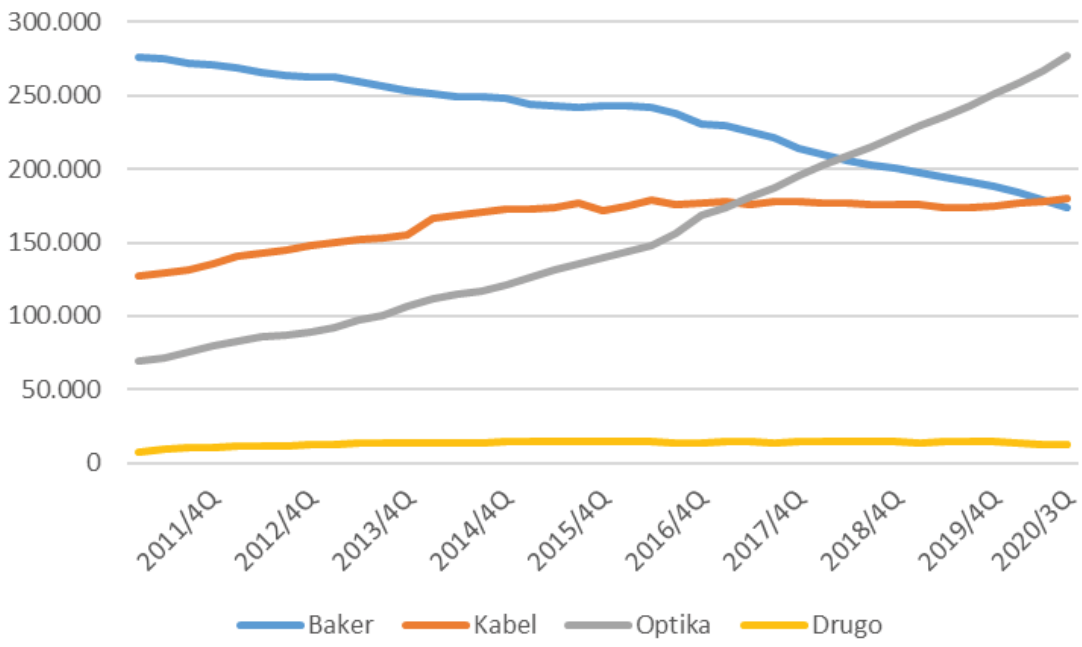
Prihodnost (2030)?

- Optika – 10 Gbit/s

AKOS

Dostopovna omrežja

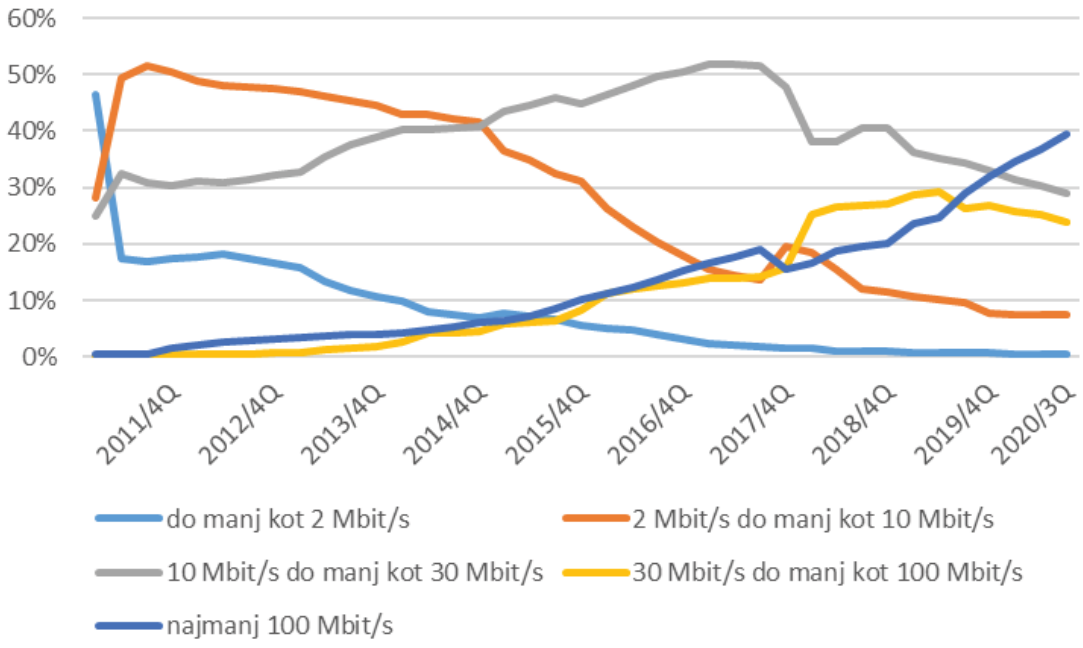
MALOPRODAJNI TRG



AKOS

Hitrosti dostopa

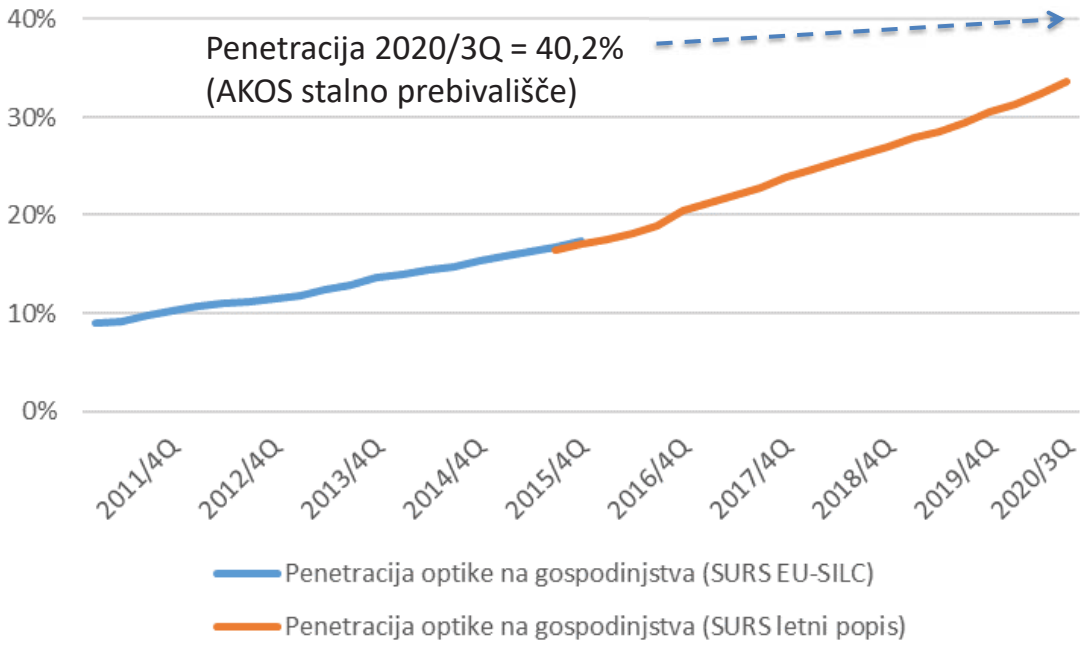
MALOPRODAJNI TRG



AKOS

Penetracija optike

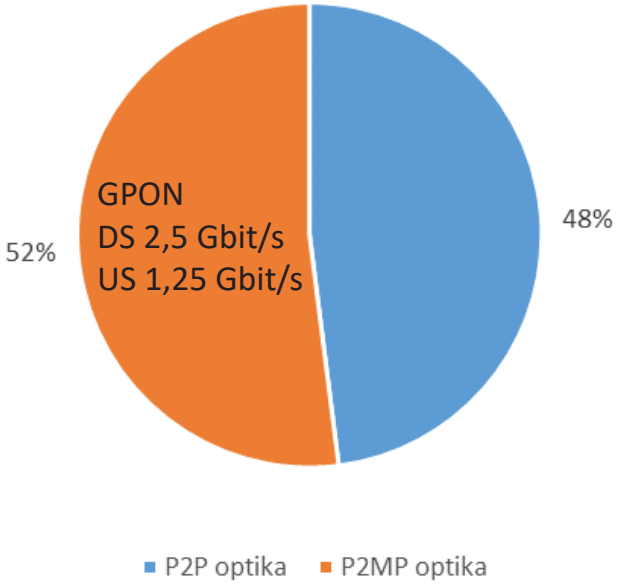
MALOPRODAJNI TRG



AKOS

Topologija optike

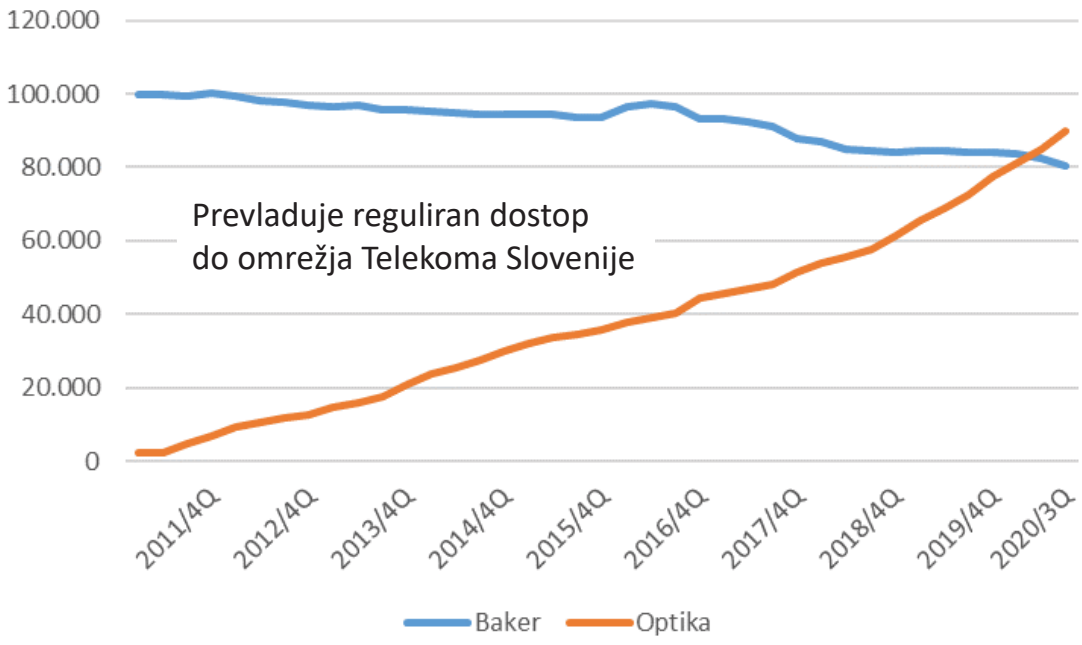
MALOPRODAJNI TRG



AKOS

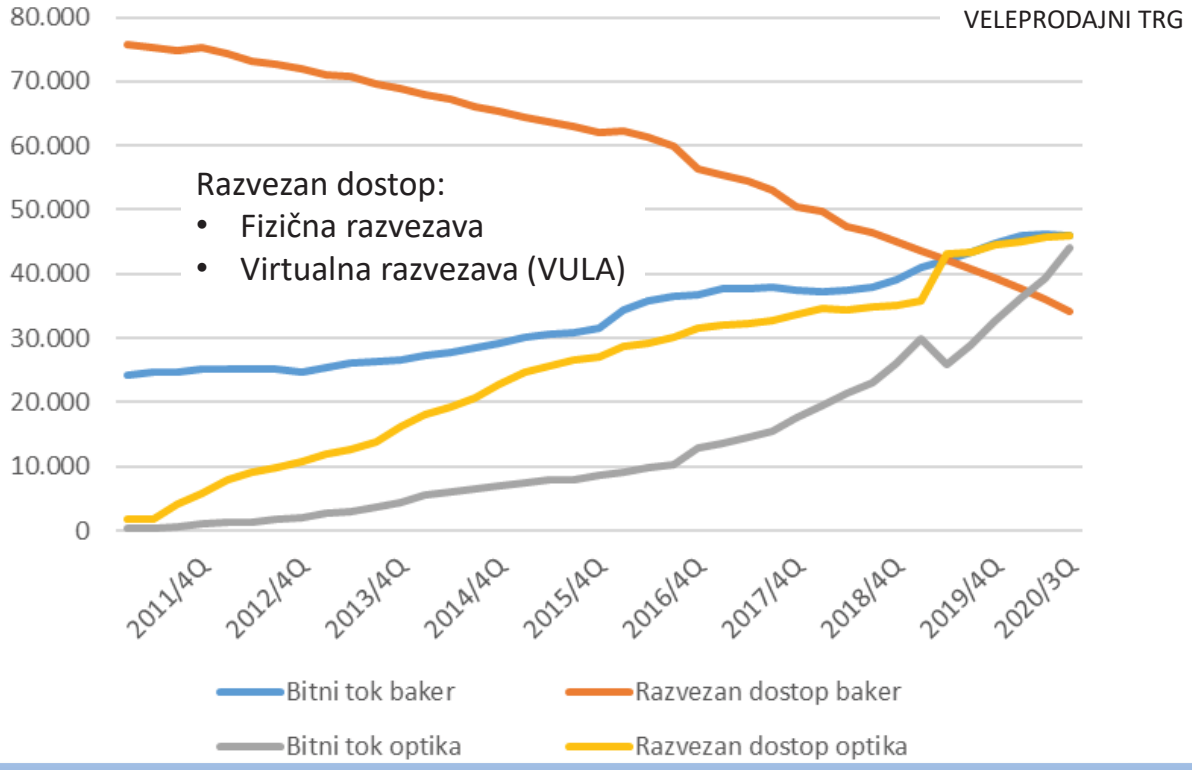
Veleprodajni dostop

VELEPRODAJNI TRG



AKOS

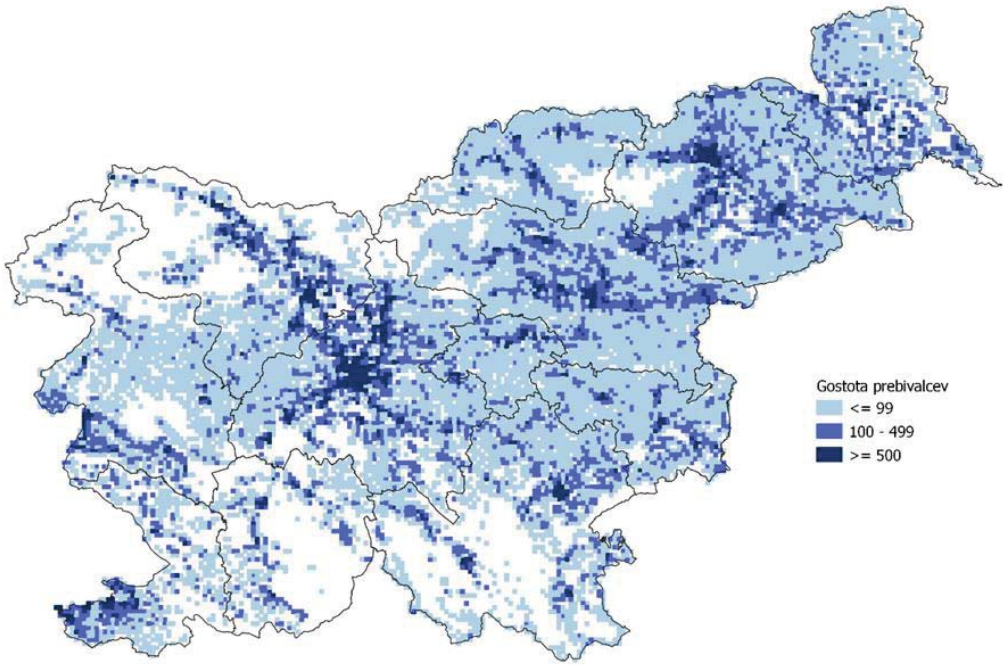
Veleprodajni dostop



AKOS

Poseljenost Slovenije

Mreža 1000 m



AKOS

Poseljenost Slovenije

Mreža 1000 m

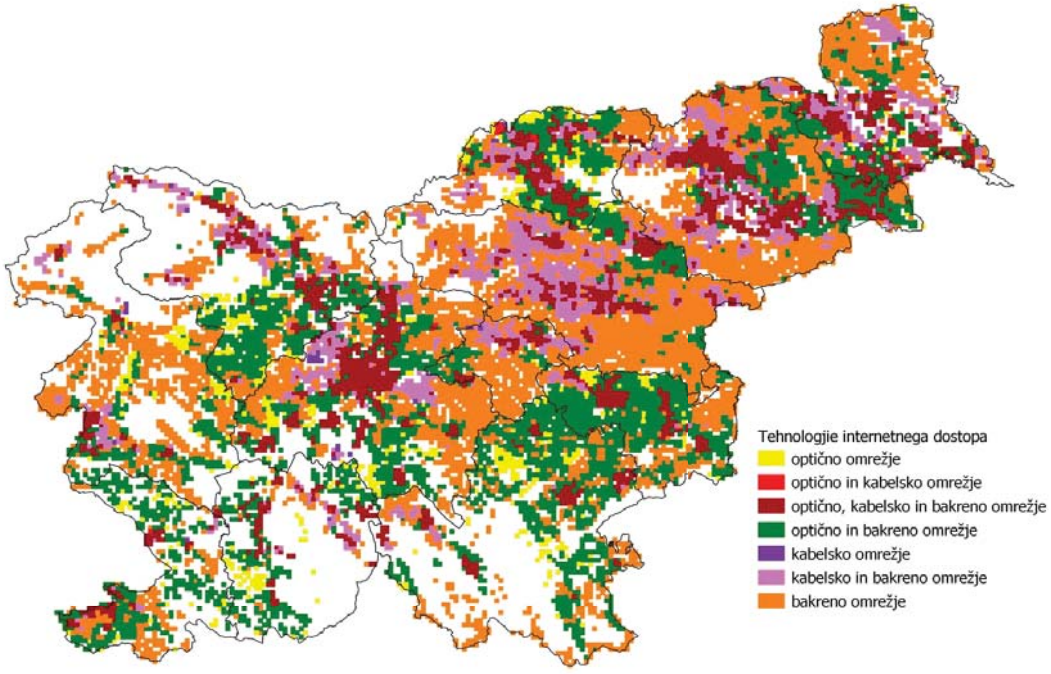
	Delež ozemlja	Delež gospodinjstev
Urbano	3,3%	57,6%
Suburbano	14,5%	27,7%
Ruralno	45,0%	14,7%
Ni poseljenosti	37,1%	---

Op.: Urbano (min 500 preb/m^2), suburbano (100 do 499 preb/m^2) in ruralno (1 do 99 preb/m^2).

AKOS

Pokritost omrežij

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

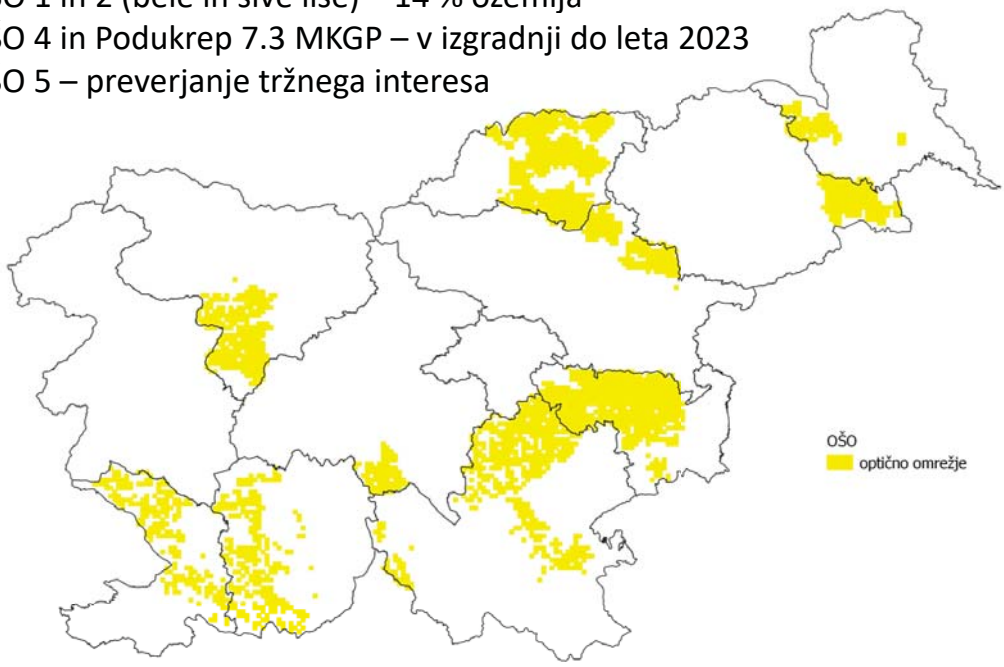


AKOS

OŠO optična omrežja

OPT (zgrajeni in omogočeni priključki)

GOŠO 1 in 2 (bele in sive lise) – 14 % ozemlja
GOŠO 4 in Podukrep 7.3 MKGP – v izgradnji do leta 2023
GOŠO 5 – preverjanje tržnega interesa



AKOS

Dostopovna omrežja

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

	Pokritost ozemlja	Pokritost gospodinjstev
Baker	58,3%	78,9%
Kabel	16,2%	47,7%
Optika	30,7%	53,1%
Ni pokritosti z OPT	38,5%	7,3%

AKOS

Dostopovna omrežja

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

Pokritost gospodinjstev

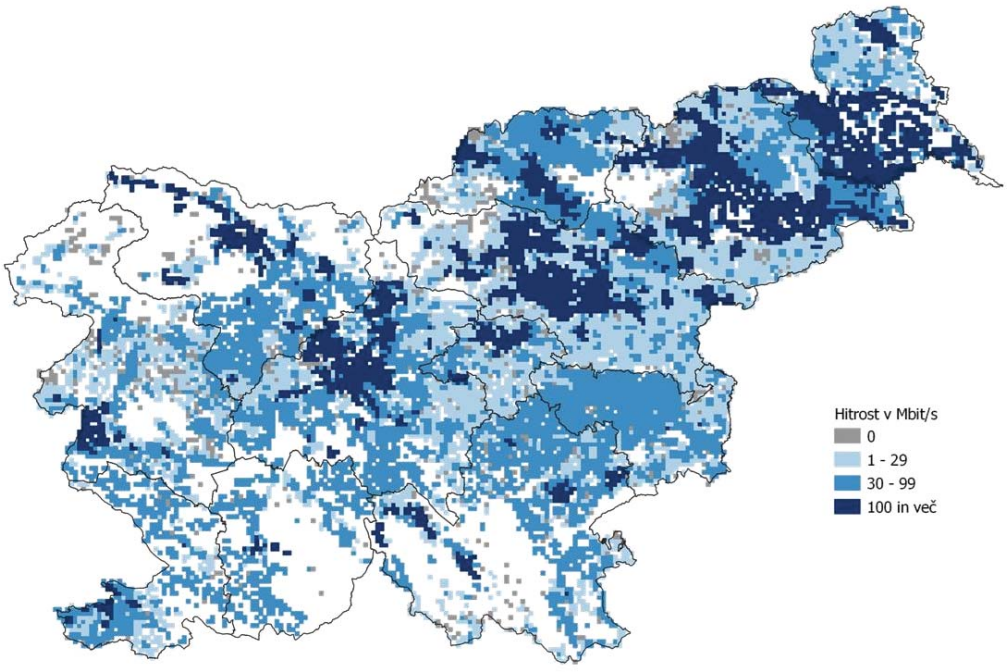
	Urbano	Suburbano	Ruralno
Baker	86,0%	72,3%	63,4%
Kabel	65,6%	30,6%	9,6%
Optika	66,2%	37,9%	30,3%
Skupaj	98,0%	89,4%	78,0%

Op.: Urbano (min 500 preb/m^2), suburbano (100 do 499 preb/m^2) in ruralno (1 do 99 preb/m^2).

AKOS

Hitrosti dostopa

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)



AKOS

Hitrosti dostopa

OPT – baker, kabel in optika (zgrajeni in omogočeni priključki)

Pokritost gospodinjstev

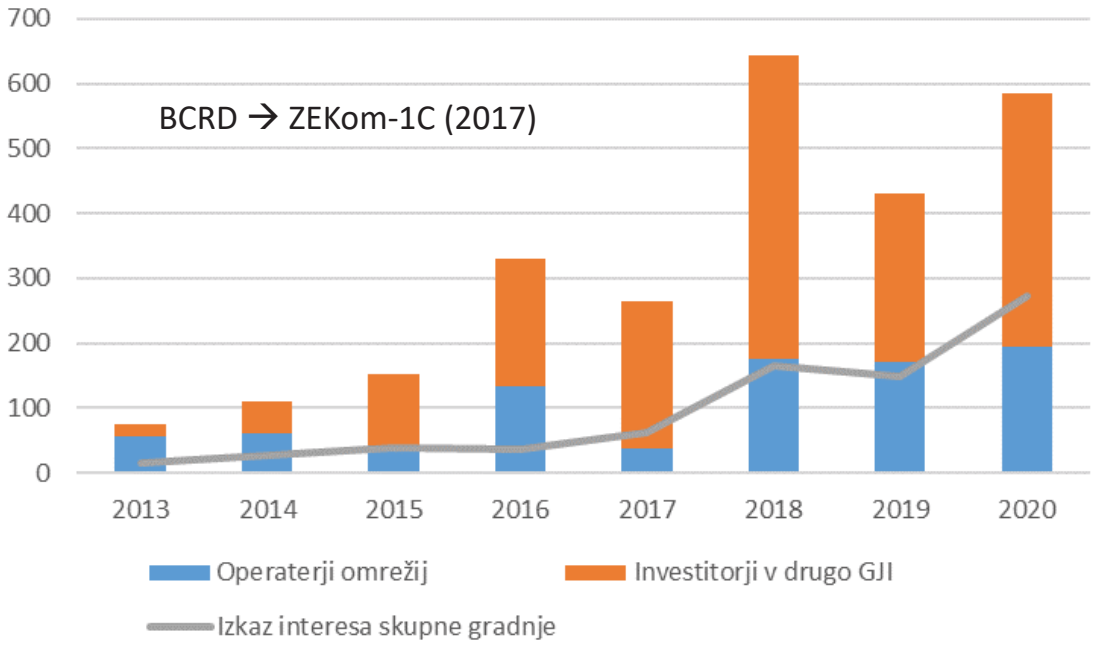
	Urbano	Suburbano	Ruralno
100 Mbit/s in več	87,2%	59,0%	37,7%
30 do manj kot 100 Mbit/s	6,9%	11,5%	6,8%
Manj kot 30 Mbit/s	3,9%	18,9%	33,6%
Ni pokritosti z OPT	2,0%	10,6%	22,0%

Op.: Urbano (min 500 preb/m^2), suburbano (100 do 499 preb/m^2) in ruralno (1 do 99 preb/m^2).

AKOS

Skupne gradnje

Objave investitorjev na portalu infrastrukturnih investicij



AKOS

Skupna uporaba

Simetrična regulacija (ZEKom-1):

- Skupna uporaba stavbne fizične infrastukture
- Skupna uporaba napeljav v stavbah
- Dostop do fizične infrastukture
- Dostop do neuporabljenih vlaken (druga GJI)
- EECC → možnost razširitve obveznosti skupne uporabe napeljav v stavbah prek prve razdelilne točke (BEREC smernice)

AKOS

Predhodna regulacija

Predhodna SMP regulacija (Odločba):

- Lokalni dostop (fizična in virtualna razvezava)
- Osrednji dostop (bitni tok) → izvzet iz Priporočila o upoštevnih trgih (2020)
- Visokokakovostni dostop
- Postopen umik regulacije na območjih, ki se nagibajo k učinkoviti konkurenci na maloprodajnem trgu

AKOS

Predhodna regulacija

EECC → ZEKom-2 do konca polovice leta 2021:

- Dostop do fizične infrastrukture kot prednostna obveznost
- Posebna regulativna obravnava skupnih vlaganj v visoko zmogljiva omrežja
- Manjši obseg obveznosti za izključno veleprodajne operaterje

AKOS

Vprašanja?

zan.knafelc@akos-rs.si

Pogled na bodočnost FTTH

A look at the future of FTTH

Mitja Golja
Iskratel
golja@iskratel.si

Povzetek

Razvoj optičnih omrežij sledi razvoju ostalih informacijsko komunikacijskih storitev, ki jih končni uporabniki potrebujejo (oblačne storitve, delo na domu, navidezna resničnost/obogatena resničnost itd.). 10-gigabitne dostopovne tehnologije so danes že pri nas, poteka pa standardizacija in razvoj še hitrejših novih tehnologij. V predavanju bomo predstavili evolucijo tehnologij FTTH, njihove lastnosti, vpeljavo in poslovne vidike.

Abstract

Development of fibre optic networks is following the development of ICT services that are requested by end users (cloud services, virtual reality, augmented reality, etc.). 10 Gb access technologies are already deployed in Slovenia, we have already started the standardization and development of new faster technologies. In this lecture we will present the evolution of FTTH technologies, their characteristics, implementation and business aspects.

Biografija avtorja

Dr. Mitja Golja je zaposlen v podjetju Iskratel kot direktor razvoja poslov v poslovni enoti dostop. Odgovoren je za pripravo tržnih strategij in razvoja poslov novih tehnologij. Ima več kot 15 let izkušenj z globalnimi širokopasovnimi operaterji in se strastno ukvarja z razvojem produktov, poslovnih modelov in strategij. Pred vodenjem razvoja poslov je delal na več vodilnih pozicijah v podjetju Iskratel, med drugim je bil odgovoren za vodenje produktne linije in razvoja.

Author's biography

Dr. Mitja Golja is a Business Development Director at Iskratel's Business Unit Broadband. He is responsible for new market strategies and go-to-market initiatives for new technologies. He brings 15+ years of global operating experience in the broadband-networking industry and a deep passion for product business development and strategy to Iskratel. Prior to heading business development, Mitja held various management positions within Iskratel. Amongst others he was in charge for product line management and R&D.



ISKRATEL

Pogled na bodočnost FTTH

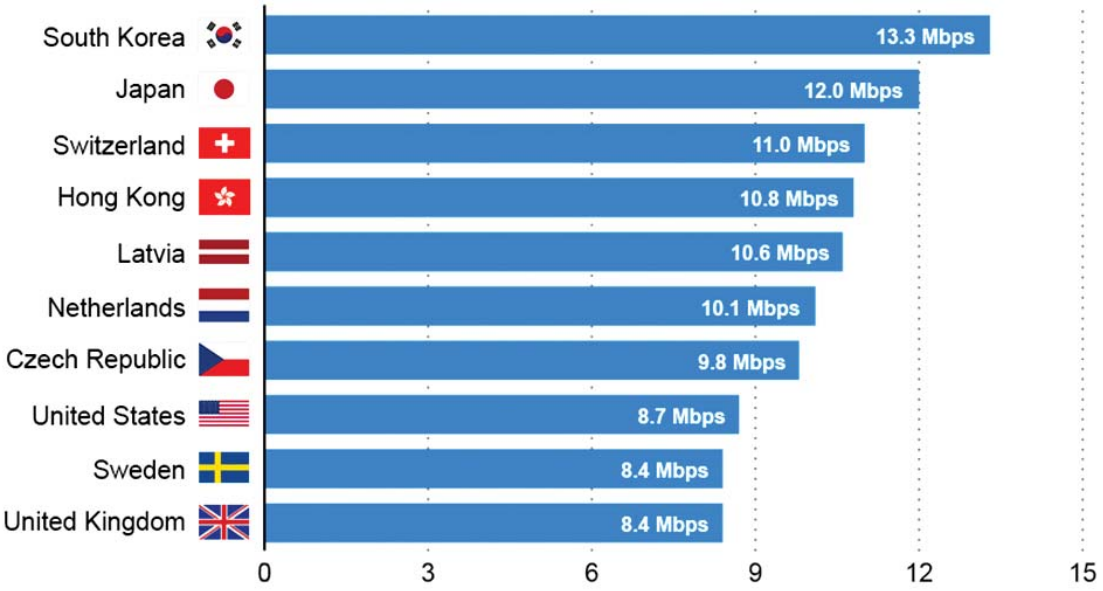
dr. Mitja Golja

Agenda

- Potreba po hitrosti
- Pregled novih FTTH tehnologij
- Poslovni vidiki uvedbe novih FTTH omrežij
- Sklep

© iskratel. All rights reserved.

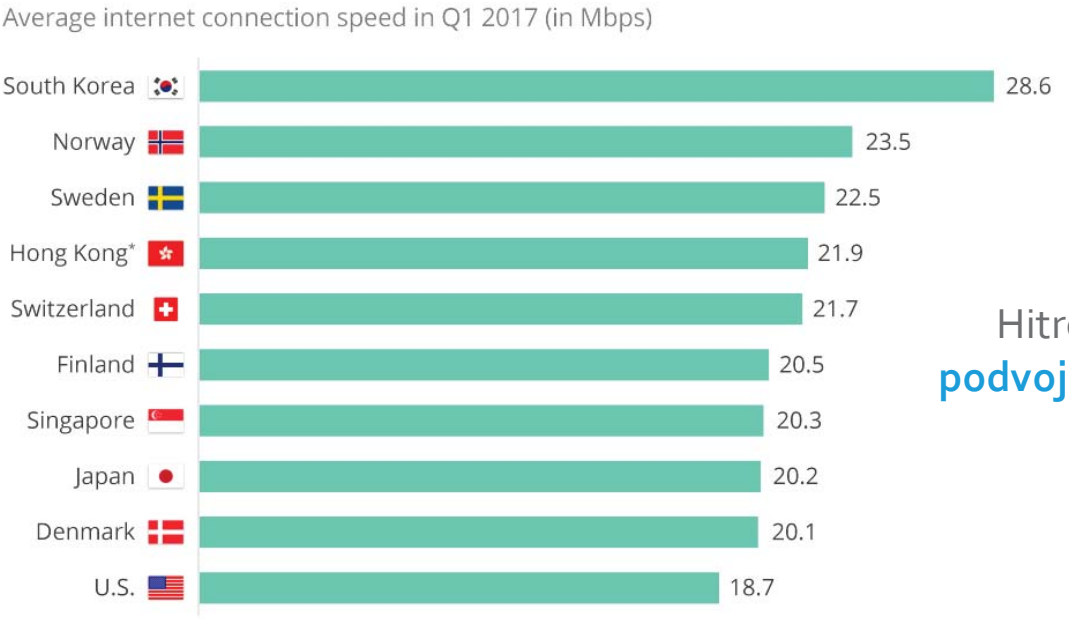
Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2013



© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2017

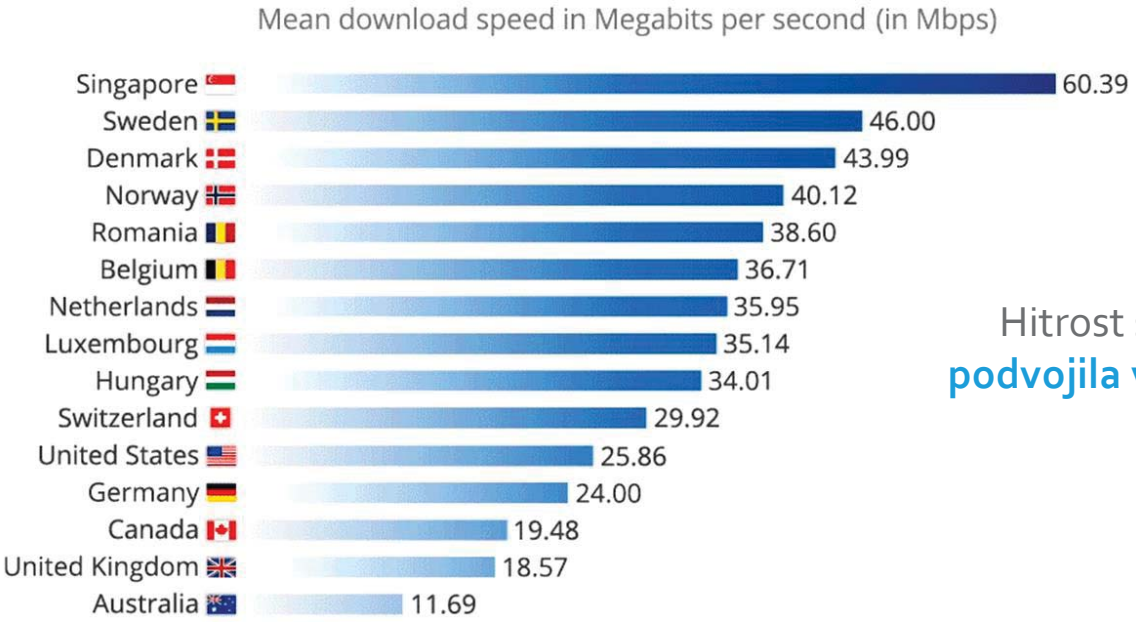


Hitrost se je **podvojila v 4 letih**

© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2018

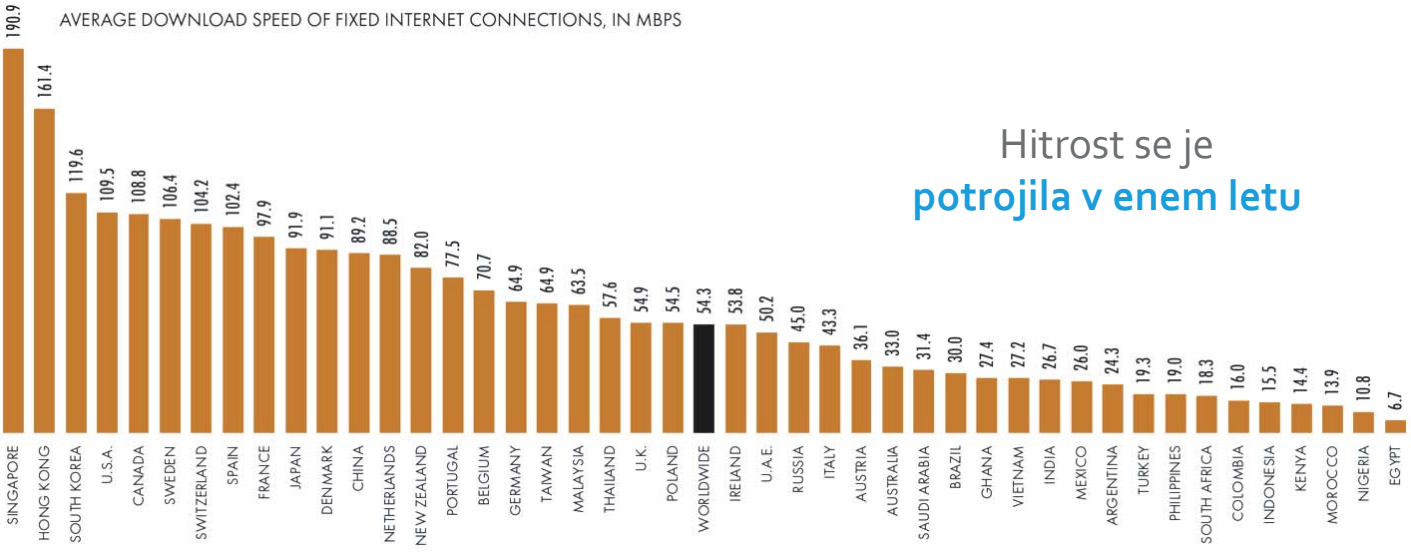


Hitrost se je
podvojila v 1 letu

ISKRATEL

© Iskratel. All rights reserved.

Potreba po hitrosti: Kje smo bili 2019



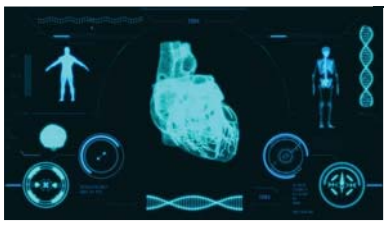
Hitrost se je
potrojila v enem letu

ISKRATEL

© Iskratel. All rights reserved.

Potreba po hitrosi: Kje smo v 2021

Singapur: 226Mbps
Slovenija: 93Mbps



4k/UHD video
Navidezna in obogatena resničnost
Video na zahtevo
Oblačne storitve, shranjevanje
HD video konference
5G in mobilnost

Delo in izobraževanje od doma

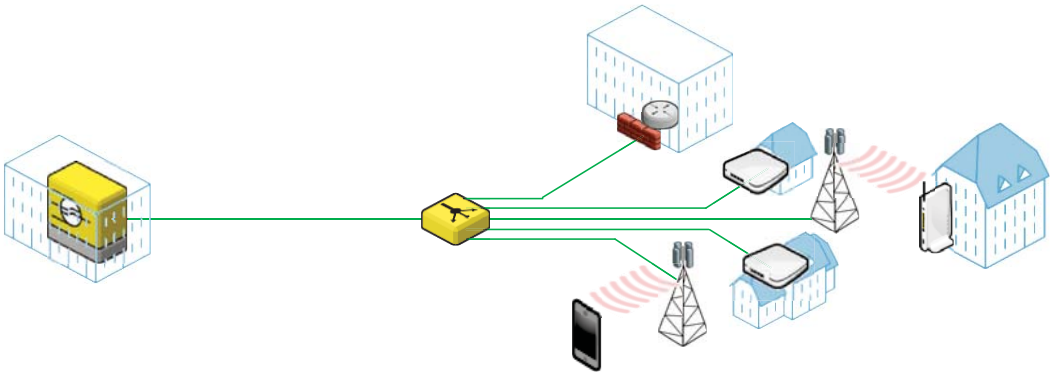
2020: >10-kratno povečanje zaradi COVID-19

© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Konvergenčna dostopovna omrežja

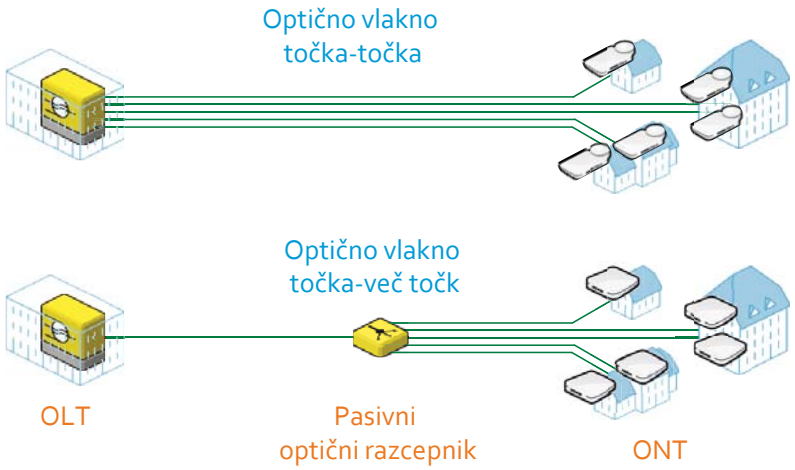
- Rezdenčni uporabniki
- Poslovni uporabniki
- Hrbtenična povezava za mobilna omrežja



© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Optično vlakno do hiše - Fibre to the Home (FTTH)



P2P FTTH
1/10 Gbps do uporabnika

PON FTTH
2.5/10 Gbps na skupino

© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

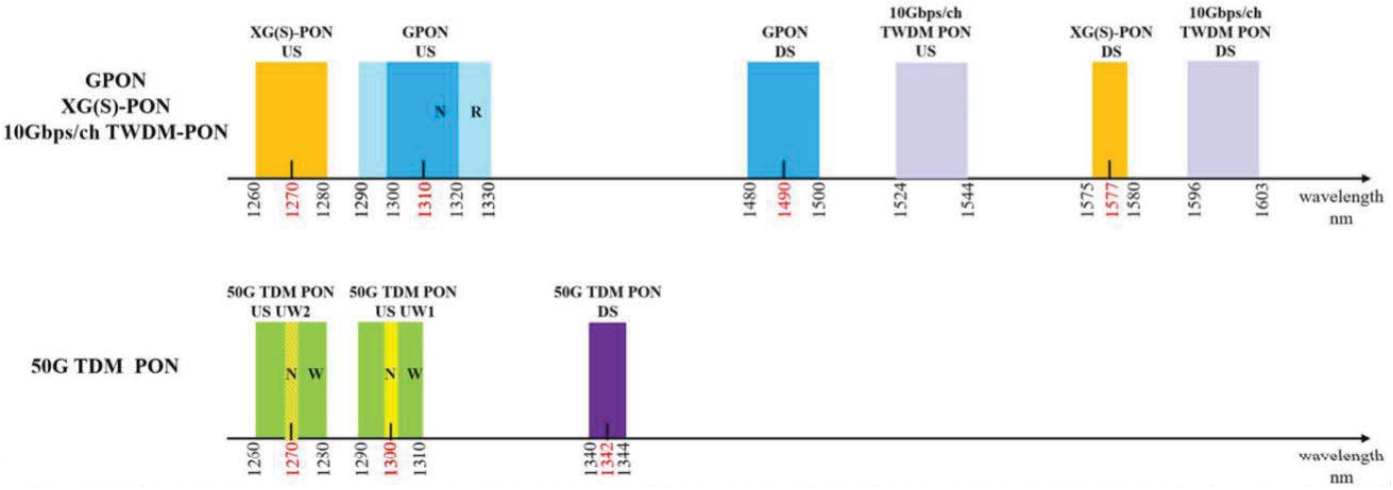
Evolucija PON tehnologij: standardizacija

1G/2,5G	10G	25G/50G
GPON G.984 **2,5/1 Gbit/s** Standardiziran:2004 Uporaba: 2007->	**XG PON1** G.987 **10/2,5 Gbit/s** Standardiziran:2012 Uporaba: 2014->	**XGS PON** G.9807 **10/10 Gbit/s** Standardiziran:2016 Uporaba: 2019->
		NG PON2 G.989 **4x10/4x10 Gbit/s** Standardiziran:2015 Uporaba: 2019->
		HS PON G.9804 / G.hsp **50/50 Gbit/s TDM PON** **N x 50 Gbit/s TWDM PON** Standardiziran:2021* Uporaba: 2024->
EPON 802.3ah **1,25/1,25 Gbit/s** Standardiziran:2004 Uporaba: 2006->	**10GE PON** 802.3av **10/1 10/10 Gbit/s** Standardiziran:2009 Uporaba: 2012->	**25/50GE PON** IEEE 802.3ca **25/25 50/50 Gbit/s** Standardiziran:2020 Uporaba: 2022->

© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Valovne dolžine PON tehnologij



© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

25GS-PON iniciativa proizvajalcev



© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Poslovni vidiki novih FTTH omrežij

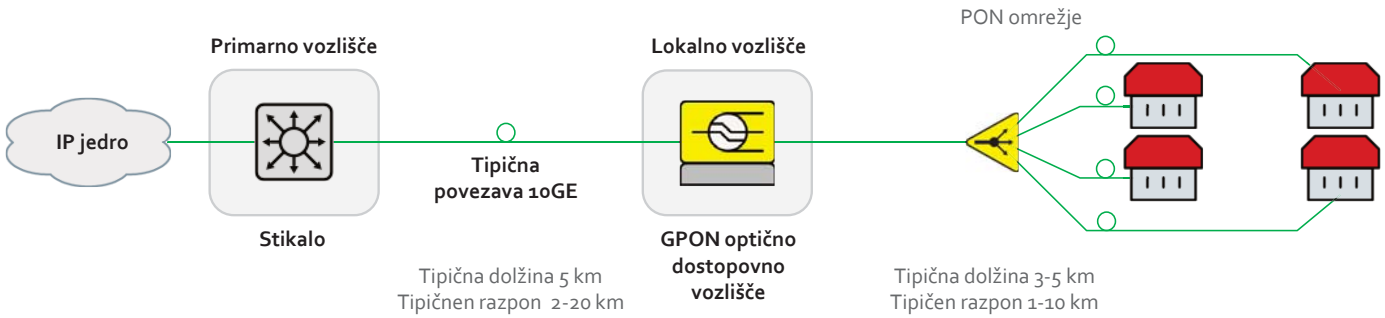
1. Zmanjševanje števila aktivnih lokacij

2. Podaljševanje življenjskega cikla uporabe naprav

© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

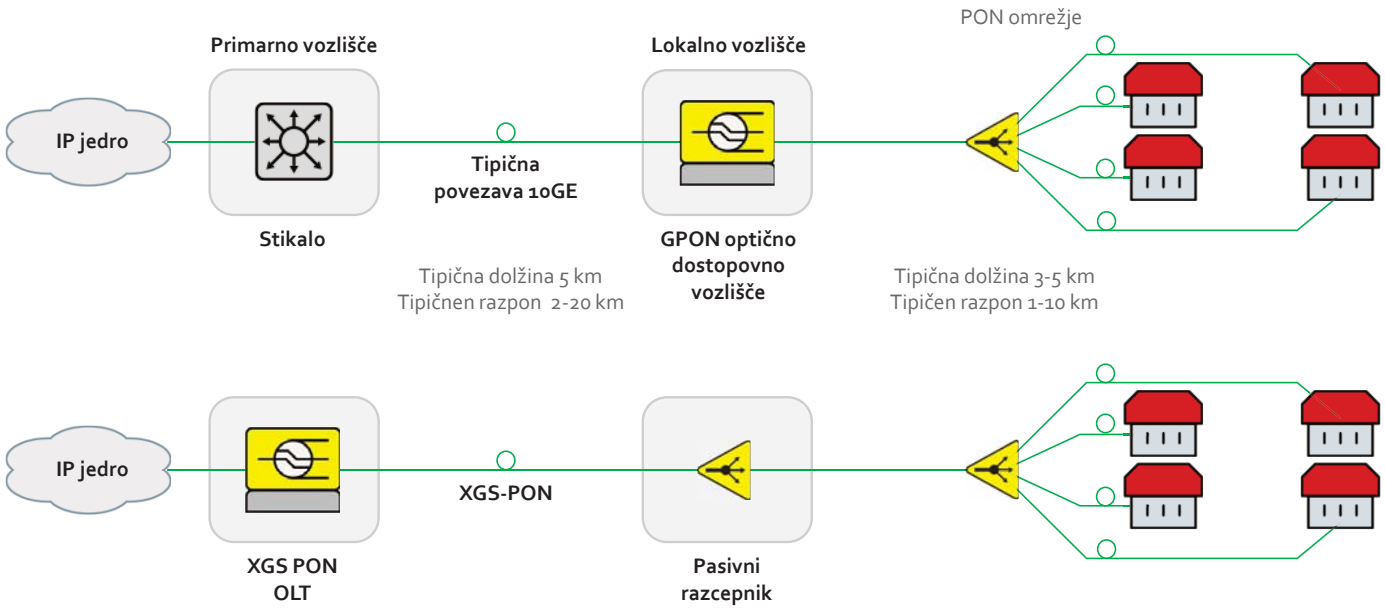
Gradnja PON omrežij z lokalne točke koncentracije



© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

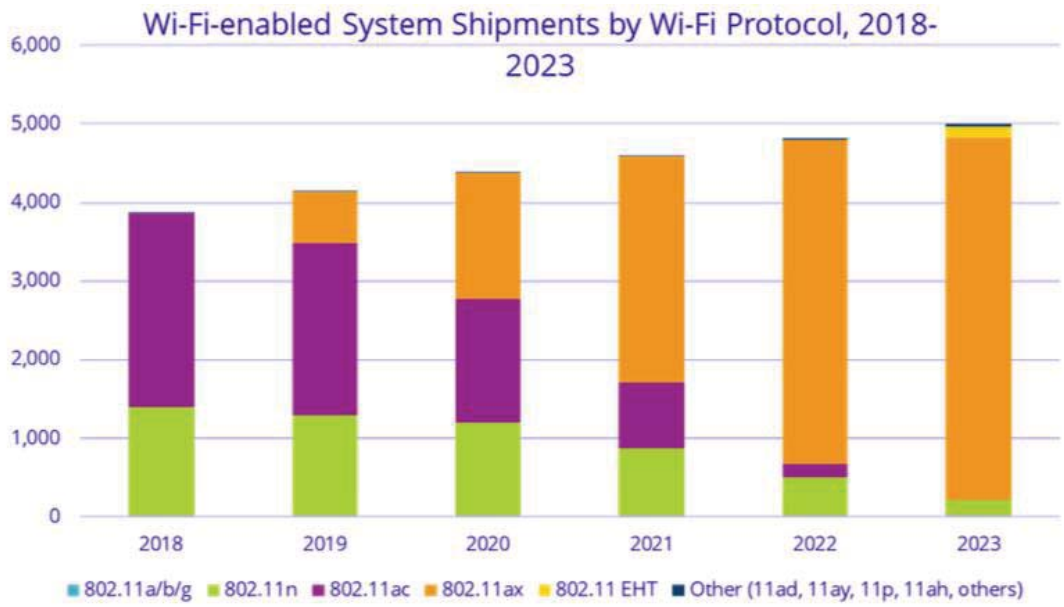
Gradnja PON omrežij z lokalne točke koncentracije



© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Posvajanje WLAN standardov: napoved



© Iskratel. All rights reserved.

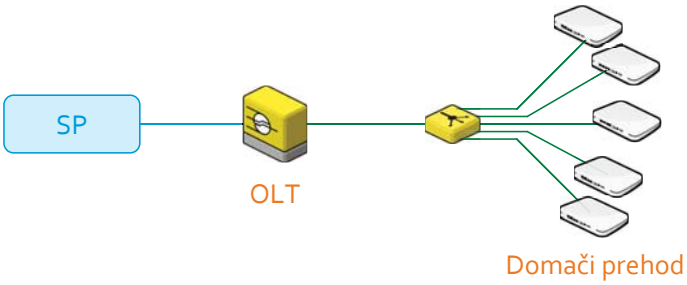
ISKRATEL

Vir: Wi-Fi chipset shipment forecast by IDC towards 2023

Ena uporabniška naprava

– Domači prehod je povezan preko podprte dostopovne tehnologije

© Iskratel. All rights reserved.

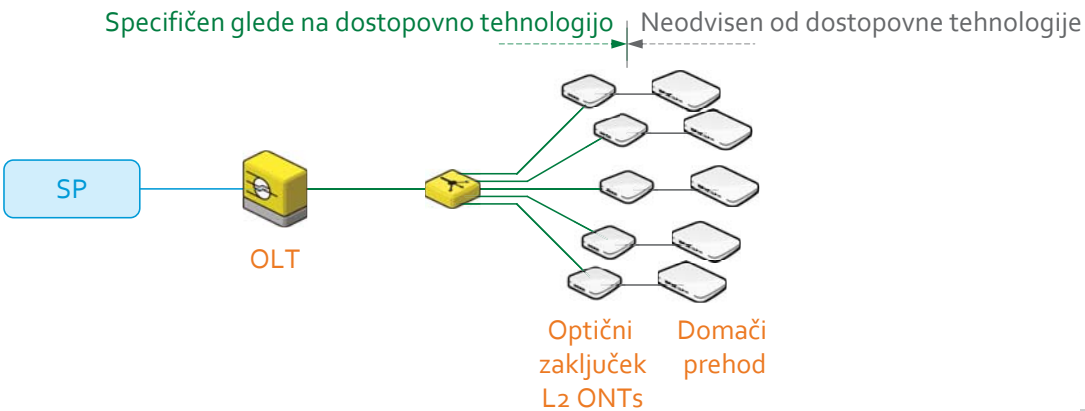


ISKRATEL

Dve uporabniški napravi

– Enostavna menjava optičnega zaključka v primeru menjave dostopovne tehnologije
– Napredne funkcionalnosti zagotavlja domači prehod
– Možen več-operaterski model

© Iskratel. All rights reserved.



ISKRATEL

Ena naprava ali dve napravi : izhodišča

WAN tehnologija se zamenja vsakih **7-10 let**

Ena naprava

Capex: zamenjava domačega prehoda

Opex: poseg na terenu

Dve napravi

Capex: zamenjava optičnega zaključka

Opex: poseg na terenu

LAN tehnologija se zamenja vsakih **3-4 leta**

Ena naprava

Capex: zamenjava domačega prehoda

Opex: poseg na terenu

Dve napravi

Capex: zamenjava domačega prehoda

Opex: pošljemo nov domač prehod po pošti

© iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL

Ena naprava ali dve napravi: stroškovne predpostavke

Postavitev z **eno napravo**

- Strošek domačega prehoda - ena naprava **2.5** enoti (relativno)

Postavitev z **dvema napravama**

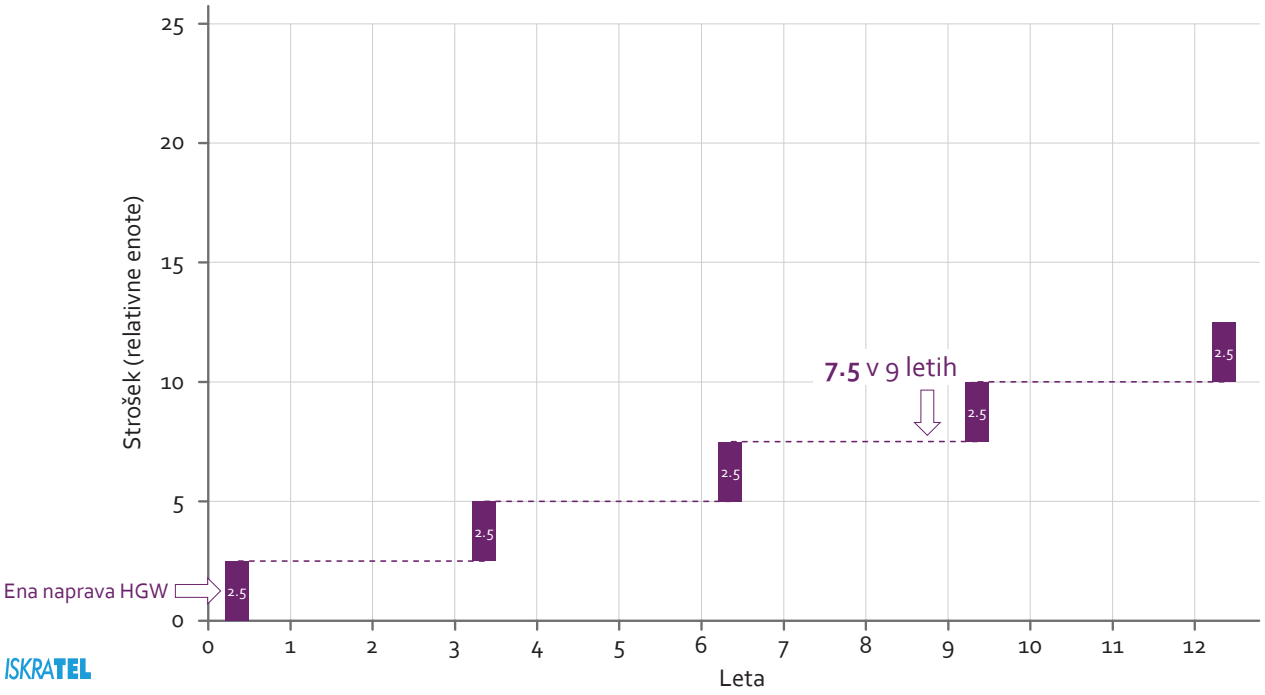
- Strošek samostojnega optičnega zaključka (L2 ONT) **1** enota (relativno)
- Strošek samostojenga domačega prehoda **2** enoti (relativno)

Strošek **zamenjava opreme na terenu** (obisk uporabnika na domu) **4** enote (relativno)

© iskratel. All rights reserved.

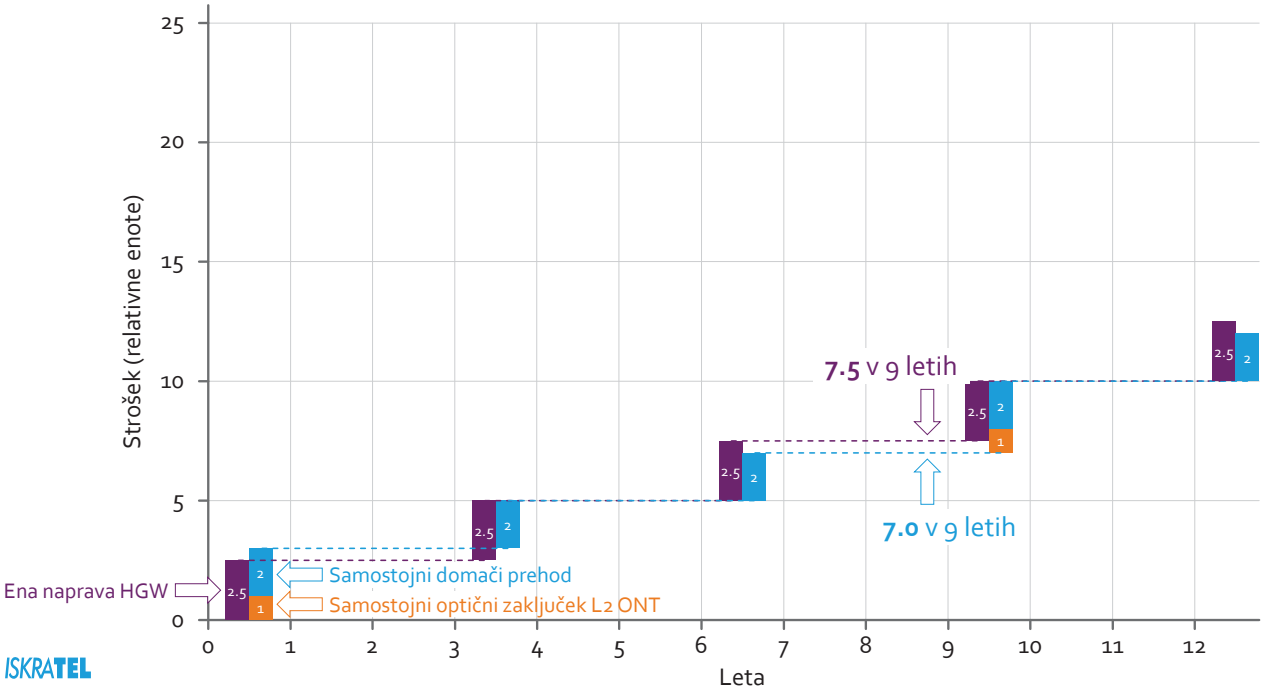
ISKRATEL

Ena naprava ali dve napravi: Capex



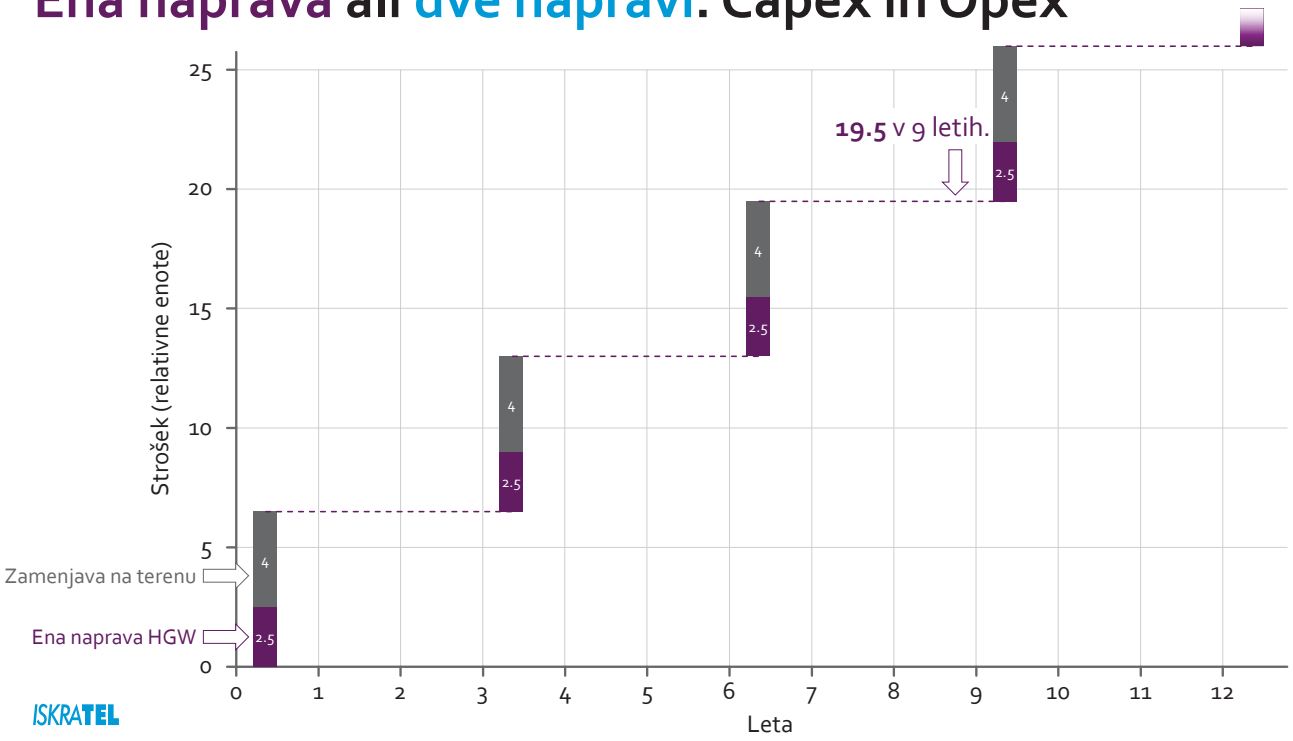
© Iskratel. All rights reserved.

Ena naprava ali dve napravi: Capex



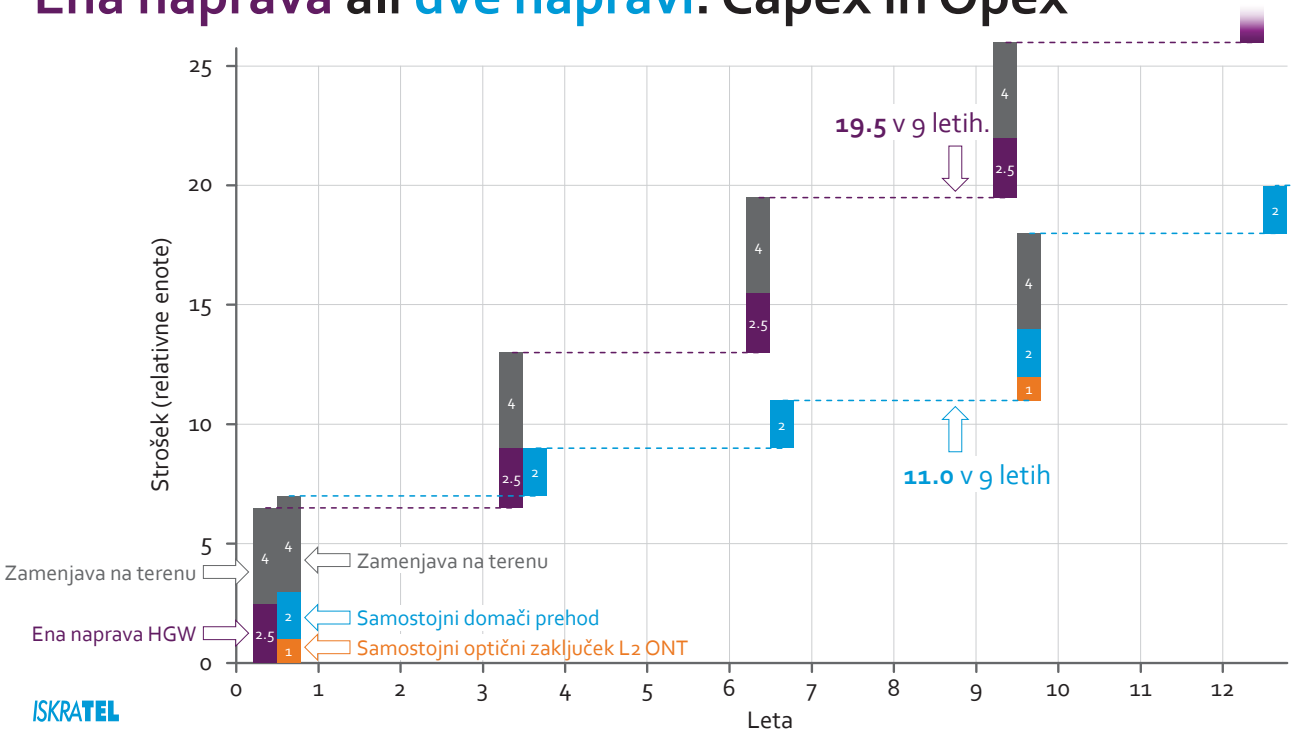
© Iskratel. All rights reserved.

Ena naprava ali dve napravi: Capex in Opex



© Iskratel. All rights reserved.

Ena naprava ali dve napravi: Capex in Opex



© Iskratel. All rights reserved.

Sklep

- Nove storitve in aplikacije pospešujejo **potrebo** po **višjih hitrostih**
- Za rezidenčne uporabnike **prevladuje PON** tehnologija
- **10Gbit/s** tehnologija se danes že uporablja, razvijajo se standardi za **25Gbit/s in 50Gbit/s**
- **Zmanjševanje** števila aktivnih **lokacij**
- Podaljševanje življenjskega cikla uporabe naprav
  - **Trend vpeljave dveh naprav**

© Iskratel. All rights reserved.

ISKRATEL



*Celovite **digitalne rešitve** za **varno** in **pametno prihodnost***

Več kot **70 let** izkušenj
30 lokacij po vsem svetu
900 zaposlenih
Globalna prisotnost v več kot **50 državah**
100 milijonov zadovoljnih uporabnikov
Lastna razvoj in proizvodnja v **EU**

*Vodilni evropski ponudnik rešitev za digitalno transformacijo **telekomunikacij**, **transporta**, **javne varnosti** in **energetike** ter nudenja **proizvodnih storitev**.*

25

Hvala za pozornost. Vprašanja?

www.iskratel.com

marketing@iskratel.si

linkedin.com/company/Iskratel

@Iskratel

Sign-up for Iskratel's monthly newsletter at our webpage.

Family Friendly Enterprise

ISKRATEL



© Iskratel. All rights reserved.

The evolution of fixed and wireless network generations towards 6G

Ioannis Tomkos

Department of Electrical and Computer Engineering of the University of Patras, Greece

tomkos.ioannis@gmail.com

Abstract

This article is focusing on the key steps that determined the evolution of architectures and technologies of Fixed and Wireless Broadband Networks over the past 50 years. We are currently in the 5th generation of this evolution, which is dominated by advanced communication systems and network technologies, on the way to define the 6th generation that will be based on the convergence of the communications infrastructure with computing infrastructure and the fusion of other technologies like sensing, AI, etc. with the goal to offer unprecedented experience to the end users.

Author's biography

Dr. Ioannis Tomkos is Professor of Optical Communications at the Department of Electrical and Computer Engineering of the University of Patras, Greece. His Research Group was/is involved in over 25 EU-funded research projects with a consortium-wide leading role (serving as Technical Manager of 10 major EU projects). In 2018, Dr. Tomkos was elected a Fellow of IEEE “for contributions in Dynamic Optical Networks”. He is also a Fellow of the IET (2010) and a Fellow of the “Optical Society - OSA” (2012). Together with his colleagues and students he has co-authored over 650 peer-reviewed archival articles, including over 150 Journal/Magazine/Book publications. His published work has received about 10.500 citations (h-factor=49).

Zaradi zaupne vsebine, prispevek ni objavljen.

Due to confidential content, the article has not been published.

Next Generation Fiber Sensing, Theory and Applications

Eran Inbar

Prisma Photonics, Israel

eran@prismaphotonics.com

Abstract

Physical infrastructure – pipelines, powerlines, highways, railways, optical-networks, borders, perimeters & more – is huge market with a strong need for monitoring and control solutions. Fiber-optic sensing (using very long fibers as sensors) has been around for more than a decade and is probably the most cost effective, robust and reliable approach for long infrastructure monitoring (as opposed to thousands of discrete sensors). However, 3 major problems prevent it from being a widely spread solution: high false alarm rate, poor target classification and very limited ability to use already installed optical communication fiber cables as sensors. Prisma-Photonics' Hyper-Scan Fiber-Sensing™ is a breakthrough patented technology enabling ultra-sensitive detection and intelligent machine learning classification which revolutionize the Fiberoptic Sensing market by increasing dramatically the detection sensitivity and solving the 3 major problems mentioned. In this presentation, we describe fiber sensing technology, next generation fiber sensing (i.e. Hyper-Scan) and show concrete applications of usage of this technology in the different market segments mentioned above.

Author's biography

Dr. Eran Inbar is founder and CEO of Prisma Photonics since 2017. Prisma Photonics is using next-generation fiber sensing technology to monitor long stretched utilities. Before that, he was the CEO and founder (2001-2016) of V-Gen: among the early and dominant players in the Fiber-Laser field. Eran holds a Ph.D. in Physical Electronics from Tel-Aviv University with many patents relating to novel laser design. In his diminishing free time, Eran is also an enthusiastic triathlete.

PRISMA PHOTONICS
MAKING SENSE

SOK 2021
25th Seminar on Optical Communications

Next Generation Fiber Sensing - Theory and Applications

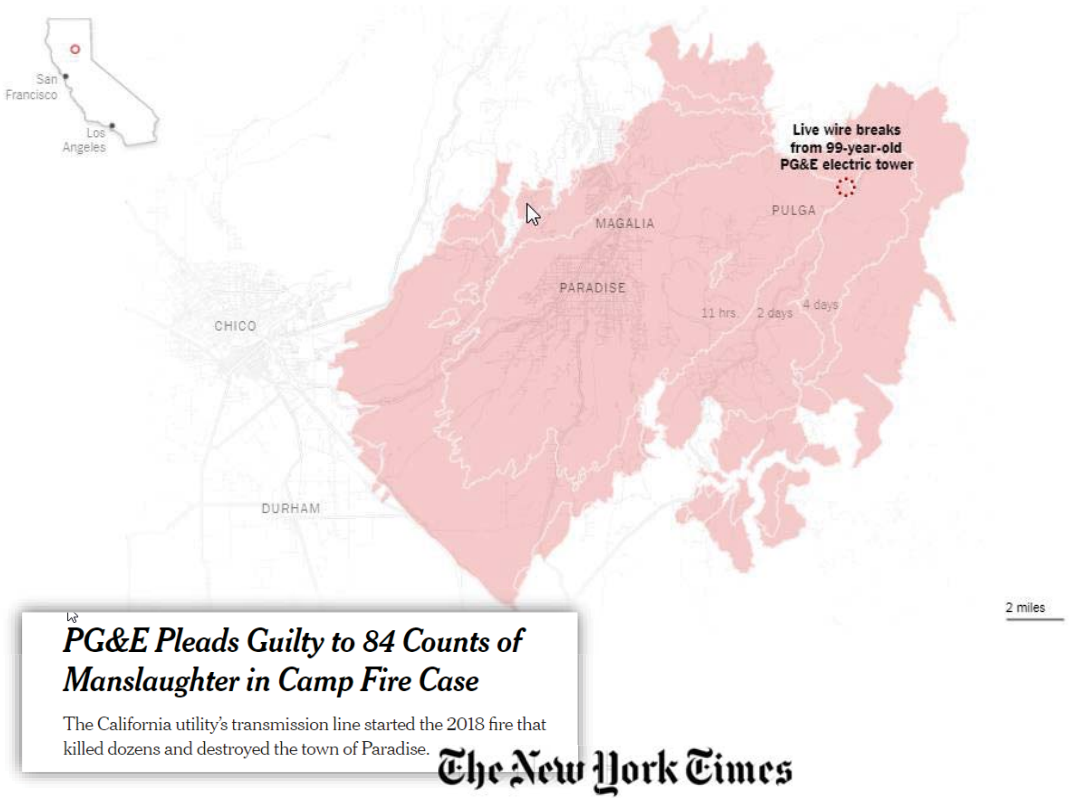
25th Seminar on Optical Communication

Dr. Eran Inbar, CEO | February 2021

This presentation contains information which is **confidential and proprietary** of **Prisma Photonics** and shall not be published, reproduced, copied, disclosed, or used for other than its intended purpose without the express written consent of a duly authorized representative of **Prisma Photonics**



- Tower 27/222 is **100 years** old
- Peak speed of fire was **250 kph**
- The town of Paradise burned in **4 hours**
- **85 people** died
- **620 KM²** were burned (4 x Ljubljana)
- **$8.4 Bn** in insured losses



PG&E Pleads Guilty to 84 Counts of Manslaughter in Camp Fire Case

The California utility's transmission line started the 2018 fire that killed dozens and destroyed the town of Paradise.

The New York Times

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary 3

Sensing over long running utilities

- **Detecting faults on powerlines is not easy**, mainly for long lines
- **Regular sensing technologies is expensive or unreliable**:
  - Installation of multitude of sensors along the utility
  - Dependance on manual patrols, UAVs or other error prone inspection
- **Fiber Sensing along the powerline solves** all that
- **High sensitivity** combined with **simple installation over 100s of KMs**

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary 4

- Optical fibers are placed along large-scale utilities In the last 20 years



PRISMA PHOTONICS

- Along oil, gas and water pipelines
- With sub-sea utilities
- Along railways and main roads









PRISMA PHOTONICS

Optical Fiber Sensing

- Using multi-thousands of sensors is a highly cumbersome solution
  - Huge cost for installation, maintenance and future upgrades.
  - Very long ramp-up time, etc.



Conventional multi-thousands of sensors

vs

Prisma Photonics' "Sensor's Free" solution

- What is a "sensor-free" solution?
  - We are using pre-existing fiber cables as our sensors

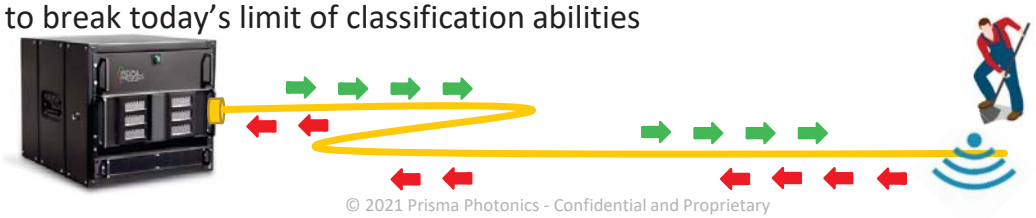


DAS: Distributed Acoustic Sensing

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Next Generation Fiber Sensing

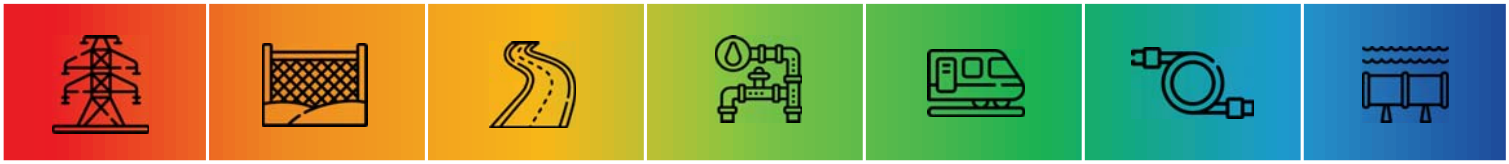
- An Optical Interrogator (OI) system is sending laser pulses along the fiber and detecting & analyzing the back-reflected light
  - Prisma's technology overcomes fiber type and condition which limits existing DAS operational distance
- If a target along the fiber is generating an acoustical signal the system can detect it, find its location in meters resolution and classify it (e.g., differentiate between walking and digging, etc.)
  - Prisma's technology process huge (x100) amount of data enabling artificial intelligence to break today's limit of classification abilities

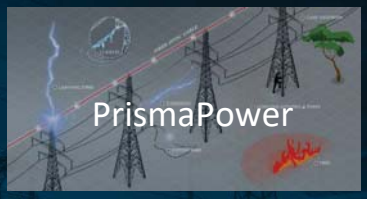


© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

We are **Prisma Photonics**

- Founded in 2017, Innovating next generation fiber sensors for smart infrastructure
- An expert team, a proven track record of building and scaling companies in deep technology and laser domain
- The company is in revenue stage with active pilots and initial commercial deployments
- Prisma Photonics offers solution to many segments
  - Power, Gas & Oil pipeline, Subsea infrastructure, Perimeter, Highways, Railway and physical cyber







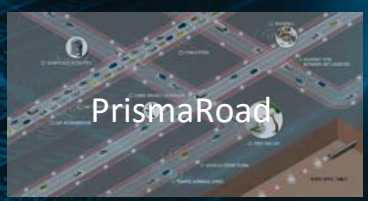




Long Infrastructure use cases







© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

We won some awards…

















© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

What is a ‘sensor free’ solution?

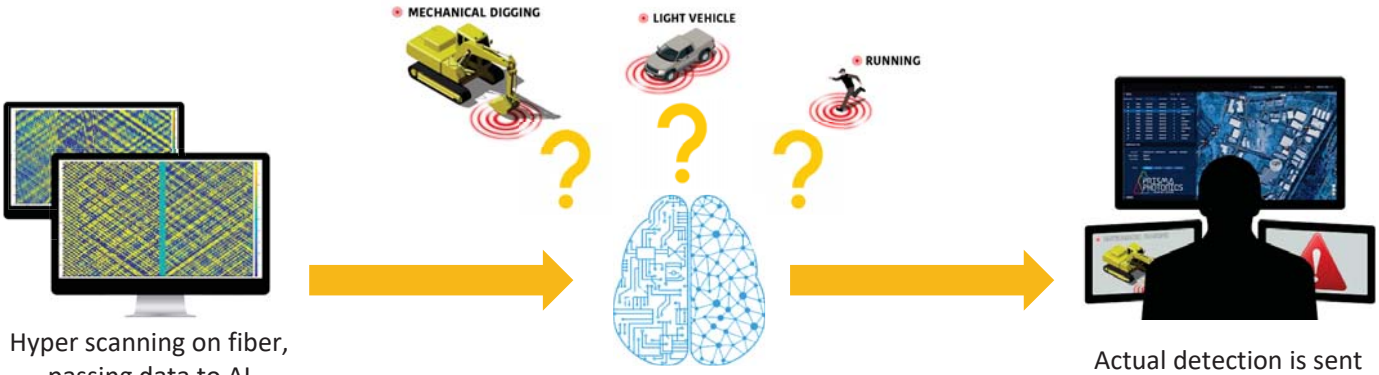
Watch Video

- A **disruptive solution** for physical infrastructure
- Covers a wide variety of use-cases:
  - safety, security, preventive & predictive maintenance
- **AI-Based classification** of events with **negligible false alarm rate**
- **Leverages preexisting fiber cables**, turning assets to value generators
  - The fiber is the sensor no need to install any sensors along physical infrastructure!
- Ramp-up time for **installation and the cost per meter are unparalleled low**
  - Compared to any conventional technology
- Prisma Photonics offers also an **innovative service model**
  - Data as a Service

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

PrismaAI: Smart-Classification™

Using **Smart-Classification™** techniques to automatically identify and classify events: Increasing Probability of Detection (PD) and eliminating False Alarm Rate (FAR)



Hyper scanning on fiber, passing data to AI

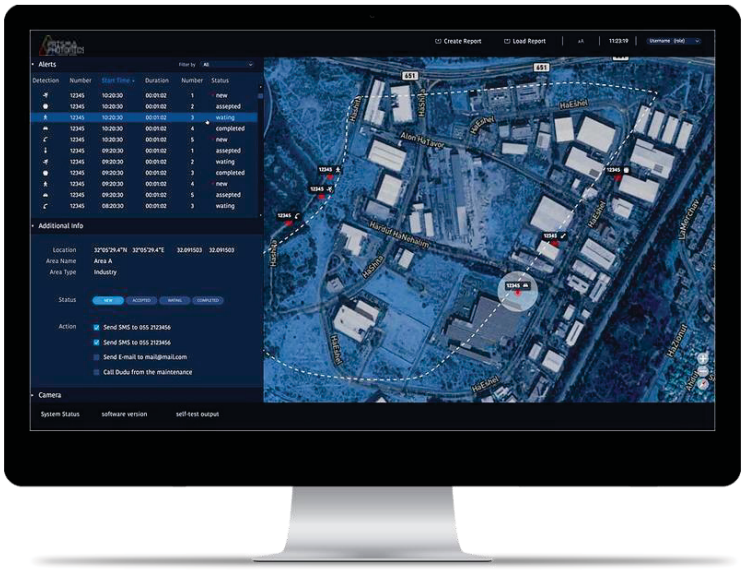
Machine Learning AI Models classifying events, looking at history and progressing events

Actual detection is sent to Operations center

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Schematic installation

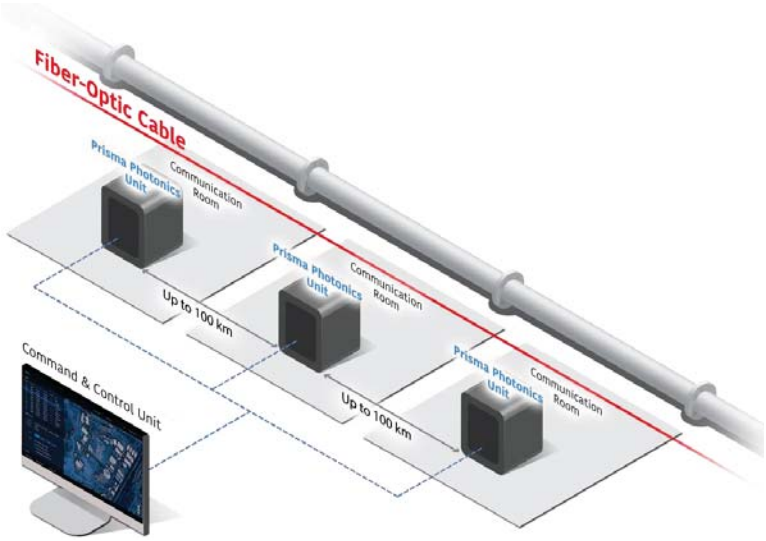
- A single system monitors few hundred electrical towers
- All the data from multiple systems is consolidated into single C&C (command & control unit)



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Cascaded schematic installation

- Single & Consolidated User Interface
- A single system monitors the pipeline
- All the data from multiple systems is consolidated into single C&C (command & control unit)



© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Game Changer for Physical Infrastructure Monitoring

- **"Sensor Free" -** no installation on the infrastructure
- **"The Fiber is the Sensor" -** using preexisting fiber, extreme reliability and very long lifetime
- **Immediate ramp-up time -** from kick-off to full-functionally in a few days
- **One platform – multiple use cases -** predictive and preventive maintenance, safety, security, etc.
- **Disruptive technology for the first time -** ultra-sensitive fiber-sensing that can compensate the loss since the pre-existing fiber is in conduit and not buried directly in the ground
- **DaaS (Data as a Service model) -** the utility can use the solution in service model (Pay as You Grow) with no upfront cost or commitment

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Real world examples

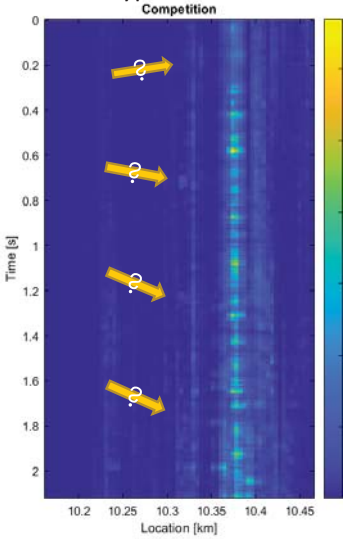
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Hyper-Scan™: excellent Signal-to-noise ratio

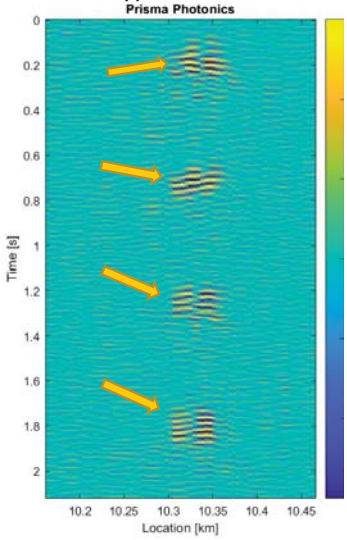
Step 30 meters from a buried optical cable

- Typical DAS:
- Undetectable
- Noise (Rayleigh fading)
- Hyper-Scan™ :
- Much better Signal to Noise
- No Rayleigh fading
- More detail:
  - Signal strength
  - Signal frequency
  - Wavefront phase

Typical DAS



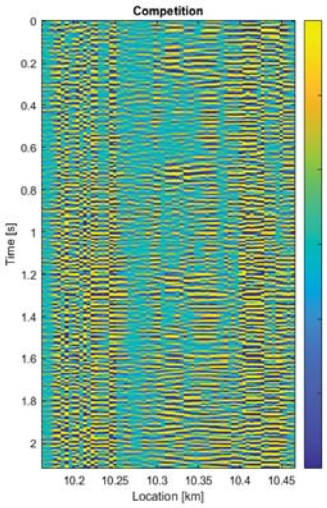
Hyper-Scan™



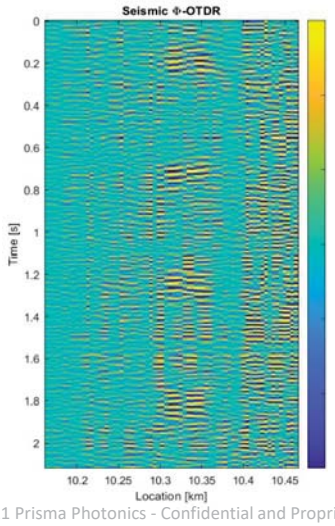
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Comparison with other phase sensitive, Phi-OTDR

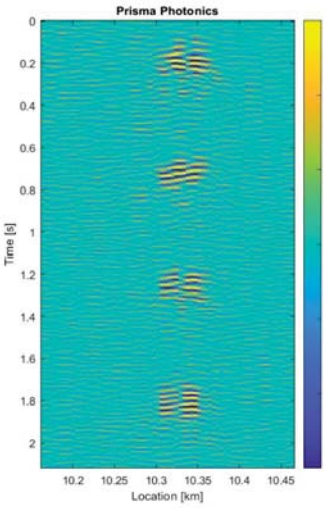
Typical DAS - Phase



Seismic Grade



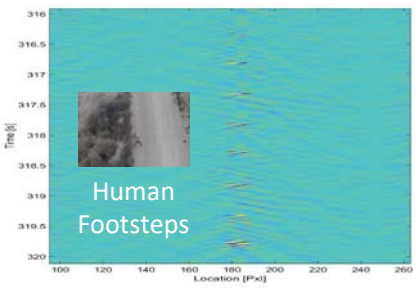
Hyper-Scan™

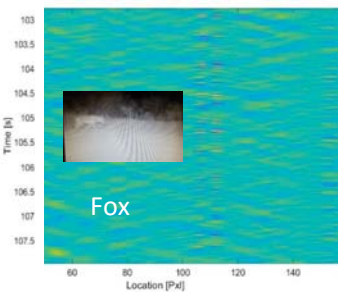


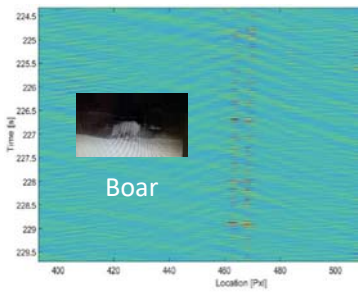
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

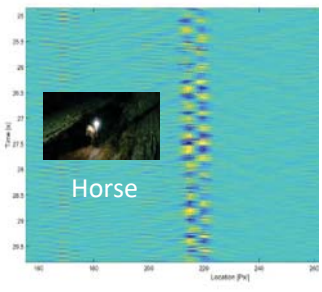
Hyper-Scan™: detailed data

- Use detail to differentiate similar targets
- Well suited for Machine-Learning





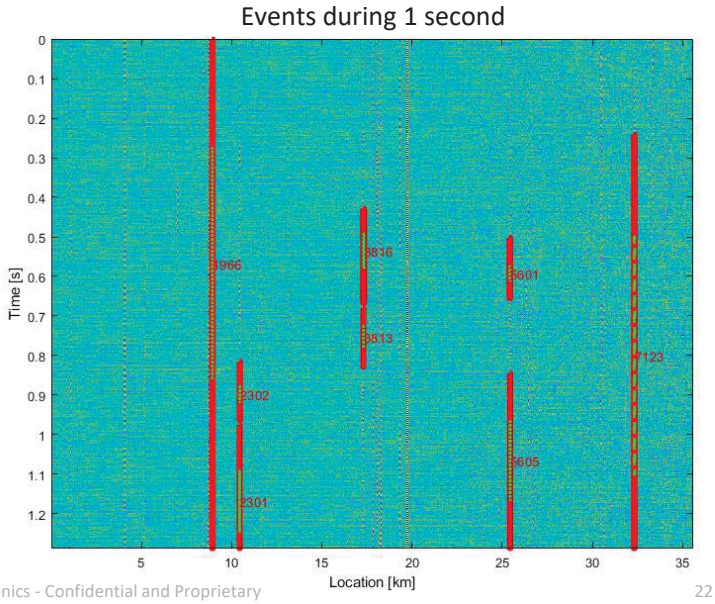




© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Classification: key to low false positive alerts

- Monitored 35 km of gas transmission pipeline
- Many different activities near pipeline:
  - Highway
  - Cities
  - Construction sites
  - Agricultural fields



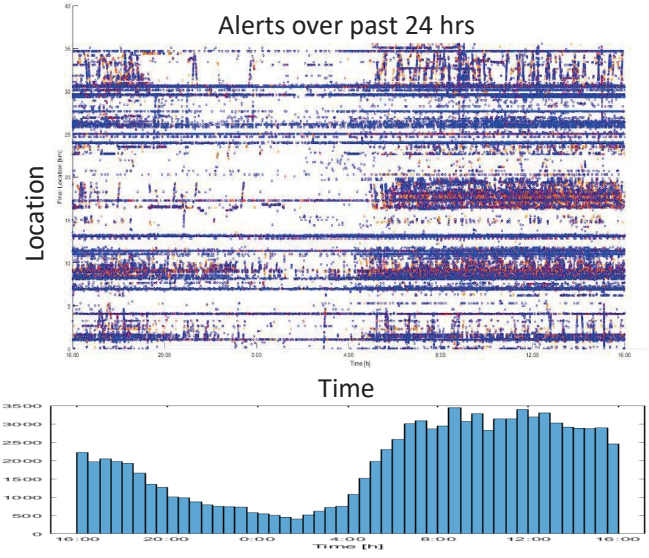
© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Classification: key to low false positive alerts

- Alerts in 24hrs:

Digger	Other classes
0	92,514

- Successfully reduced False / Nuisance Alarm Rate (FAR & NAR) to zero in a noisy real-life scenario

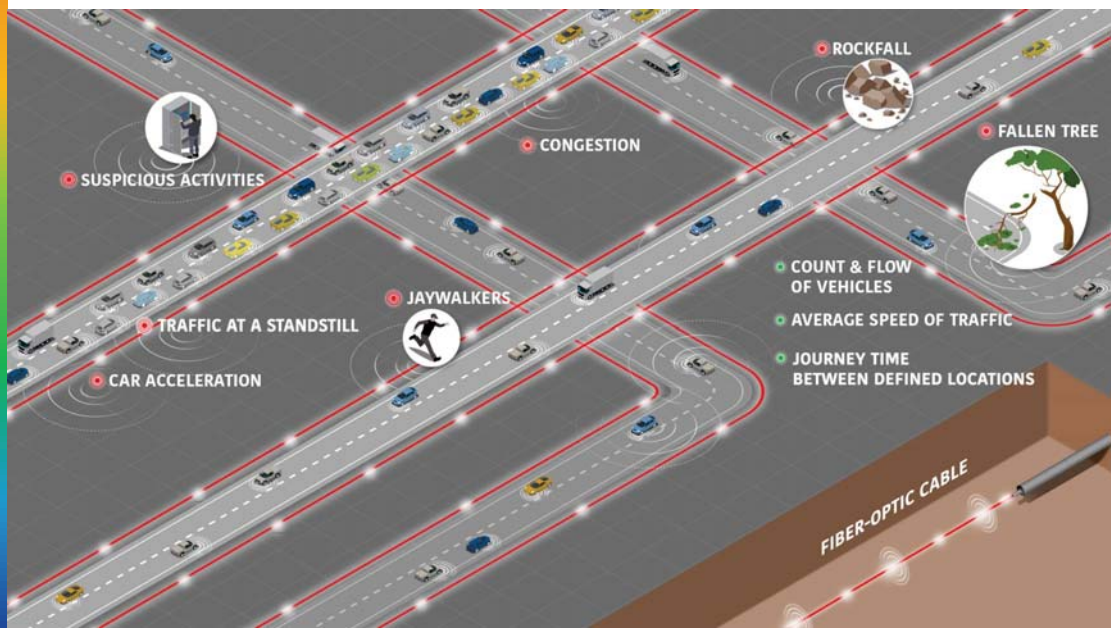


© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

Sample: PrismaRoad Use Cases

- Accident detection
- "Car on the shoulder" alert
- Car speeding alert
- Average speed of traffic
- Congestion
- Traffic at a standstill
- Journey time between defined locations
- Vehicle count flow
- Volume estimate
- Rockfall and landslide events

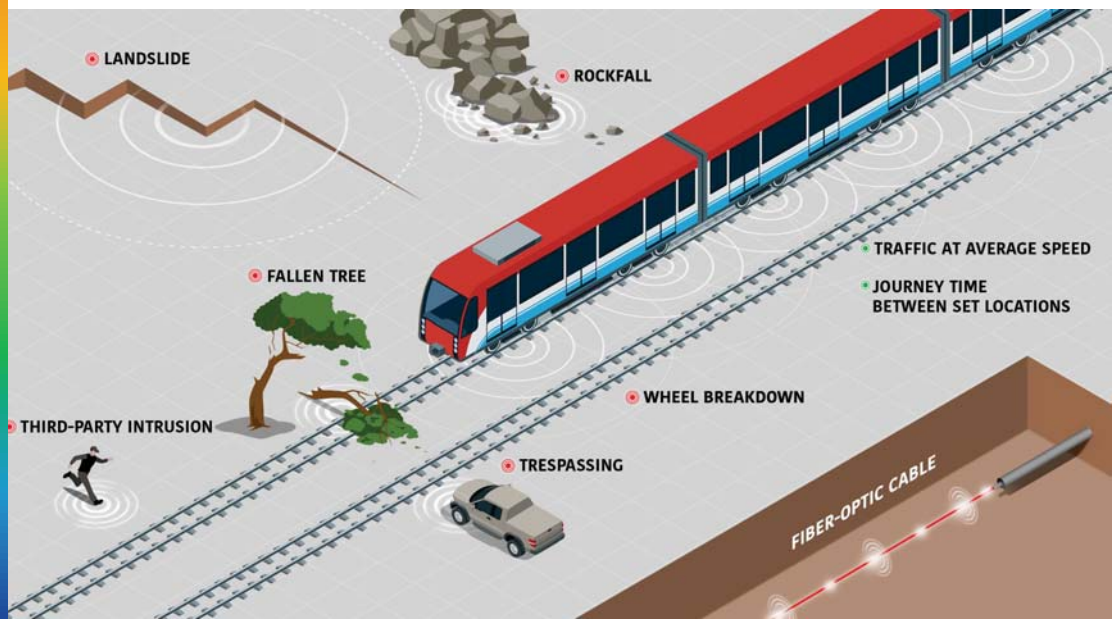
PRISMA PHOTONICS



Sample: PrismaRail Use Cases

- Real-time, accurate location of all trains on the rails
- Rockfall and landslide events
- Fallen trees near the train tracks
- Trespassing
- Intruders into the train track area
- Breakdown of train wheels
- Journey time between defined locations
- Average speed
- Vandalism

PRISMA PHOTONICS



Summary

- A complete physical-infrastructure monitoring solution in a “Sensor Free” approach
- Covering a very wide variety of use-cases in safety, security, preventive & predictive maintenance
- An award-winning solution with commercial implementations

PRISMA PHOTONICS

© 2021 Prisma Photonics - Confidential and Proprietary

PRISMA PHOTONICS
MAKING SENSE

SOK 2021
25th Seminar on Optical Communications

Thank you for your attention

Dr. Eran Inbar | February 2021

eran@PrismaPhotonics.com

Visit us at **www.PrismaPhotonics.com**

This presentation contains information which is **confidential and proprietary** of **Prisma Photonics** and shall not be published, reproduced, copied, disclosed, or used for other than its intended purpose without the express written consent of a duly authorized representative of **Prisma Photonics**

Uvod v fotonska integrirana vezja in aktivnosti s tega področja na Fakulteti za elektrotehnikov v Ljubljani

Introduction to photonic integrated circuits and activities in this field at Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana

Janez Krč, Andraž Debevc in Marko Topič
UL FE, Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko

Aleksander Sešek, Bruno Cacovich, Miha Cacovich in Janez Trontelj
UL FE, Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko

Kristjan Vuk Baliž in Boštjan Batagelj
UL FE, Laboratorij za sevanje in optiko

janez.krc@fe.uni-lj.si

Povzetek

V prispevku so prikazane tehnološke rešitve za optično dostopovno omrežje, ki so se uveljavile v slovenskem prostoru in ki jih lahko koristijo končni uporabniki. Integracija fotonskih gradnikov predstavlja pomemben korak v smeri večje funkcionalnosti, zanesljivosti in cene fotonskih gradnikov in sistemov. Po kratkem uvodu v fotonska integrirana vezja so predstavljene prve aktivnosti s področja načrtovanja, izdelave in karakterizacije integriranih svetlovodnih struktur na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Abstract

The integration of photonic components represents an important step towards greater functionality, reliability and cost of photonic building blocks and systems. After a short introduction to photonic integrated circuits, there are presented first activities in the field of design, manufacturing and characterization of integrated waveguide structures at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana.

Biografija predavatelja

Dr. Janez Krč je redni profesor na Fakulteti za Elektrotehniko Univerze v Ljubljani in član Laboratorija za fotovoltaiko in optoelektroniko na Katedri za elektroniko. Njegovo raziskovalno delo sega na področje opto-elektronskih simulacij, načrtovanja in karakterizacije sončnih celic, organskih svetlečih diod in fotonskih integriranih vezij.

Lecturer's biography

Dr. Janez Krč is a full professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, and a member of Laboratory of Photovoltaics and Optoelectronics at the Department of Electronics. His research work covers opto-electrical simulations, design and characterization of solar cells, organic light emitting diodes and photonic integrated circuits.



Uvod v fotonska integrirana vezja in aktivnosti s tega področja na FE

Janez Krč, Andraž Debevc in Marko Topič
Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko – LPVO

Bruno Cacovich, Miha Cacovich, Aleksander Sešek in Janez Trontelj
Laboratorij za mikroelektroniko FE – LMFE

Kristjan Vuk Baliž in Boštjan Batagelj
Laboratorij za sevanje in optiko LSO

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko – UL FE
Tržaška 25, 1000 Ljubljana

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering LMFE LSO

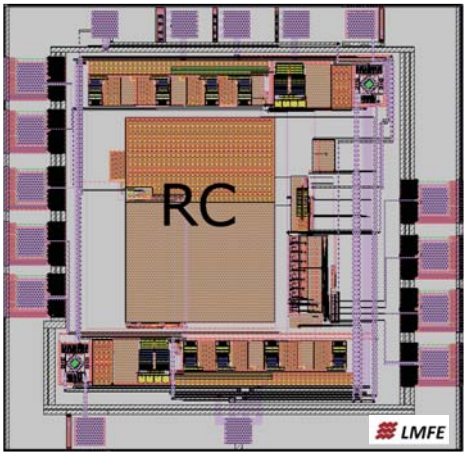
Vsebina predstavitve

- Uvod v fotonska integrirana vezja
- Aktivnosti na Fakulteti za elektrotehniko UL
  - Orodja za načrtovanje in simulacije
  - Merilna oprema
  - Izdelava prvih testnih vzorcev na osnovi tehnologije Si_3N_4

Uvod

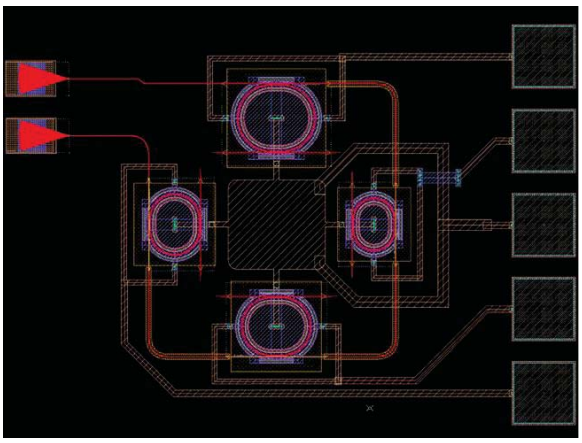
Elektronsko integrirano vezje - IC

- elektroni -



Fotonsko integrirano vezje - PIC
(Photonic Integrated Circuit)

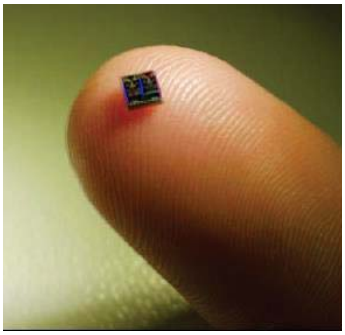
- fotoni -



Integracija optičnih komponent



PIC



- majhno, lahko kombiniramo z IC
- kompaktnost, funkcionalnost
- odpadejo ohišja posameznih komponent
- uniformnost (enakost) komponent
- večja zanesljivost

- omejitve glede stopnje integracije

Energija



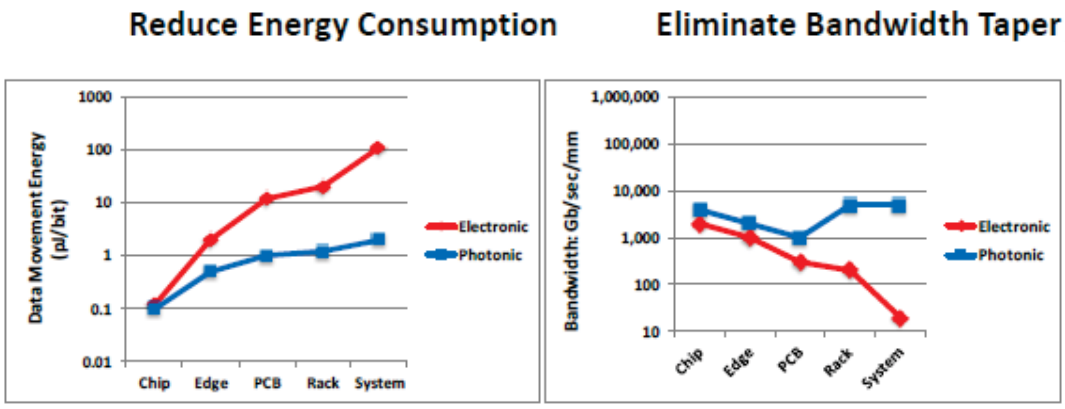
Podatkovni centri
Velik del energije se porabi za prenos podatkov (premikanje elektronov po bakrenih povezavah)

- ohmske izgube
- RLC zakasnitve
- EM interference



Silicon Photonics –PhD course prepared within FP7-224312 Helios project

Energija in pasovna širina – elektron in foton



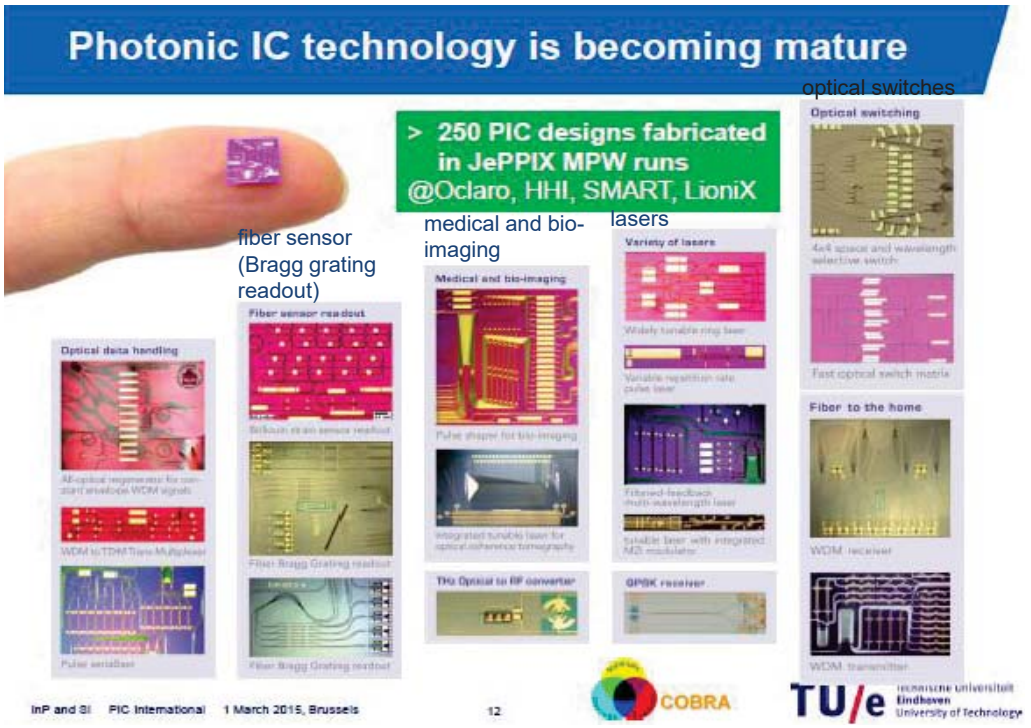
Courtesy of Karen Bergman, Columbia Uni.

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Področja uporabe PIC

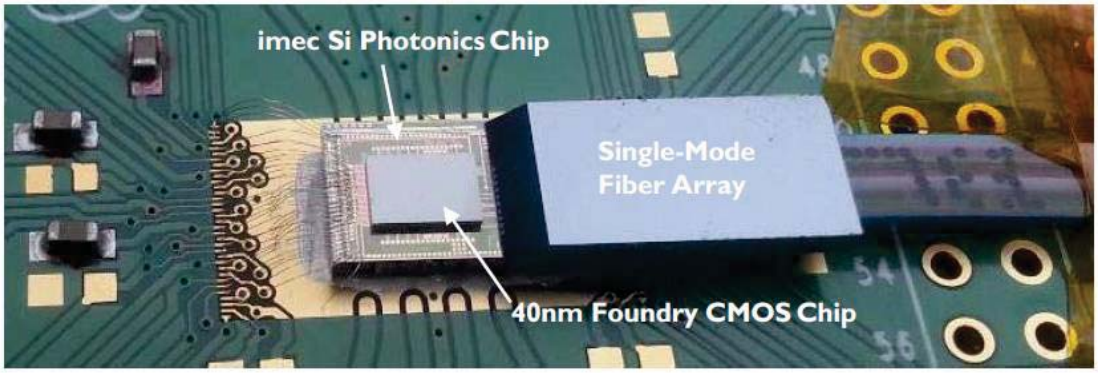
- telecom, datacom
- optično procesiranje signalov
- senzorika
- LIDAR
- kvantno računanje
- mikroskopija
- vesolje
- …



University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Sožitje IC (CMOS) in PIC (Si tehnologija)



Hybrid CMOS Si-Photonics Transceiver Module

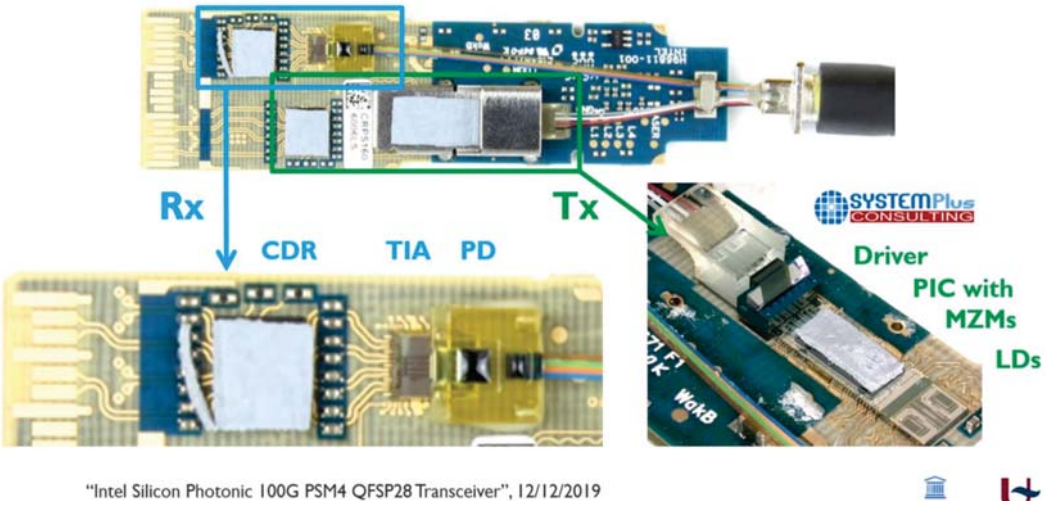
imec

Courtesy of imec

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

FIBER-OPTIC TRANSCEIVERS
ALL NEED ELECTRONICS



SPIE Photonics Europe 2020
High-speed electronics for silicon photonics transceivers *(Invited Paper)*,
Johan Bauwelinck et al., imec, Univ. Gent (Belgium).

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Coherent transceivers

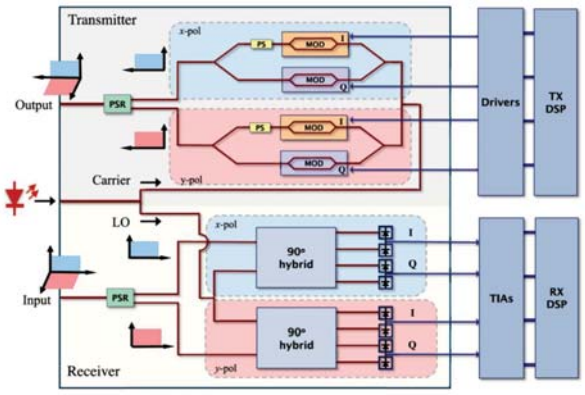


Figure 6: Block diagram of a fully integrated photonic coherent transceiver.

Table 1: Recent demonstrations of integrated silicon coherent optical transceivers.

Ref.	Year	Performance	Feature
[81, 82]	2016	DP QPSK/16/64-QAM, 30 Gbaud[a]	Ultrabroad band (*O*, *E*, *S*, *C*, *L*)
[78]	2020	400 Gb/s, near 70 Gbaud	6.41 b/s/Hz over 6600 km
[79]	2018	DP QPSK/16-QAM, 64 Gbaud	Hybrid integrated tunable laser
[80]	2020	DP 16-QAM, 96 Gbaud	50+ GHz electro-opticelectro bandwidths

[a] The authors claimed 60 Gbaud under deployment with constellations up to 64 QAM for 600 Gb/s net per wavelength [82].
QPSK, quadrature phase-shift keying.

W. Shi et al.: Scaling capacity of fiber-optic transmission systems, **Nanophotonics** 2020; 9(16): 4629–4663

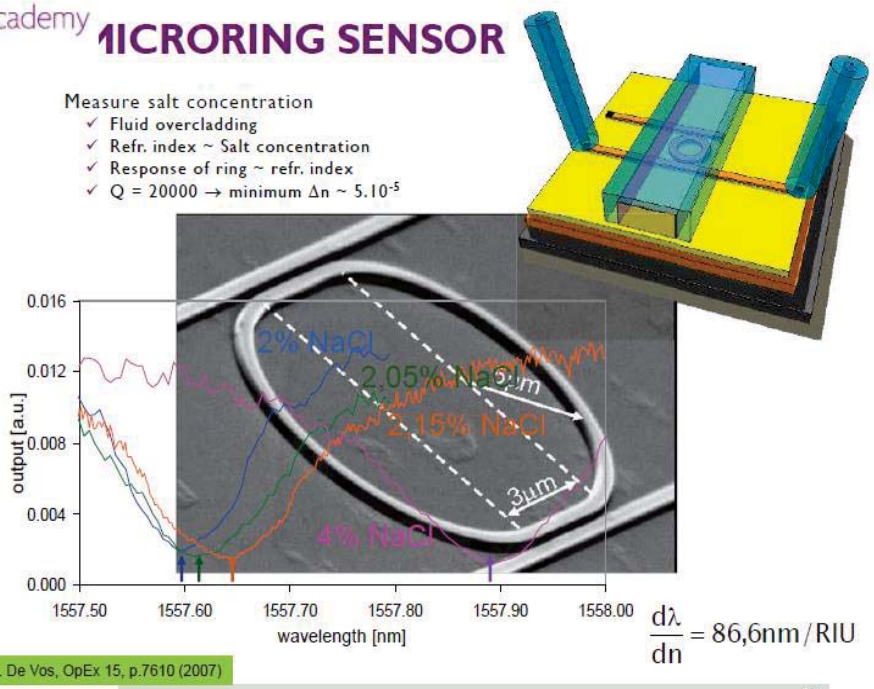
University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

imecacademy

MICRORING SENSOR

Measure salt concentration
- ✓ Fluid overcladding
- ✓ Refr. index ~ Salt concentration
- ✓ Response of ring ~ refr. index
- ✓ Q = 20000 → minimum Δn ~ 5.10^{-5}



K. De Vos, OpEx 15, p.7610 (2007)

Courtesy of imec

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

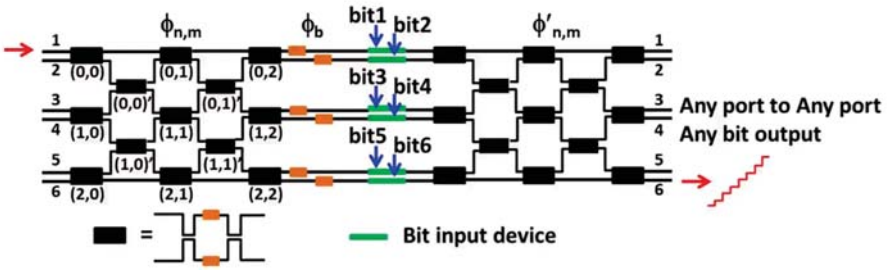
Photonic digital to analog converter with MZMs and electrically (bit) controlled WGs

Photonic DAC (1) 9/20

What kinds of photonic DAC?
- Bit-resolution reconfigurable
- Lossless, even if reconfigured
- Port-port reconfigurable

$$U=\left[\left(\prod_{m=N-1}^{1}U_m^sU_m^pU_m^s\right)U_0^sU_0^pU_0^s\right]f(b)\left[\left(\prod_{m=N-1}^{1}U_m^sU_m^pU_m^s\right)U_0^sU_0^pU_0^s\right]$$

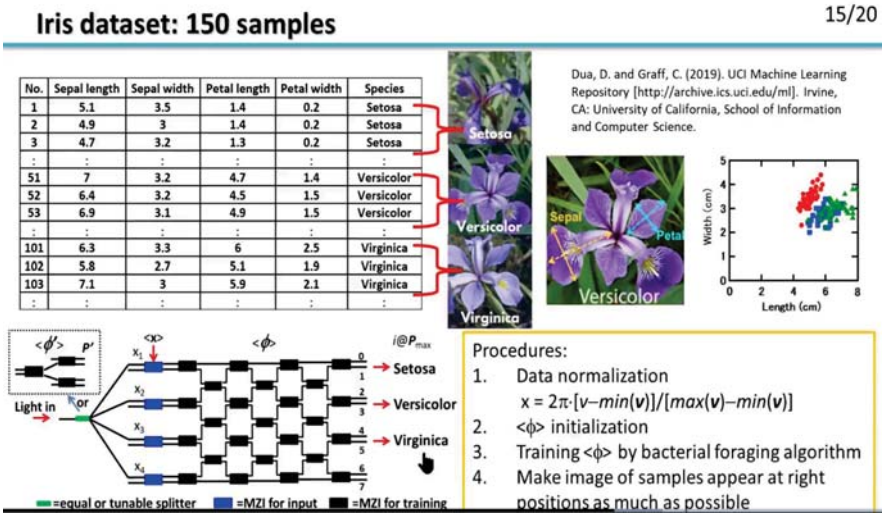
Optics Express 27, 24914 (2019)



SPIE Photonics Europe 2020
Opportunities of silicon photonics for calculation and machine learning applications *(Invited Paper)*, Guangwei Cong et al., National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Which flower it is?

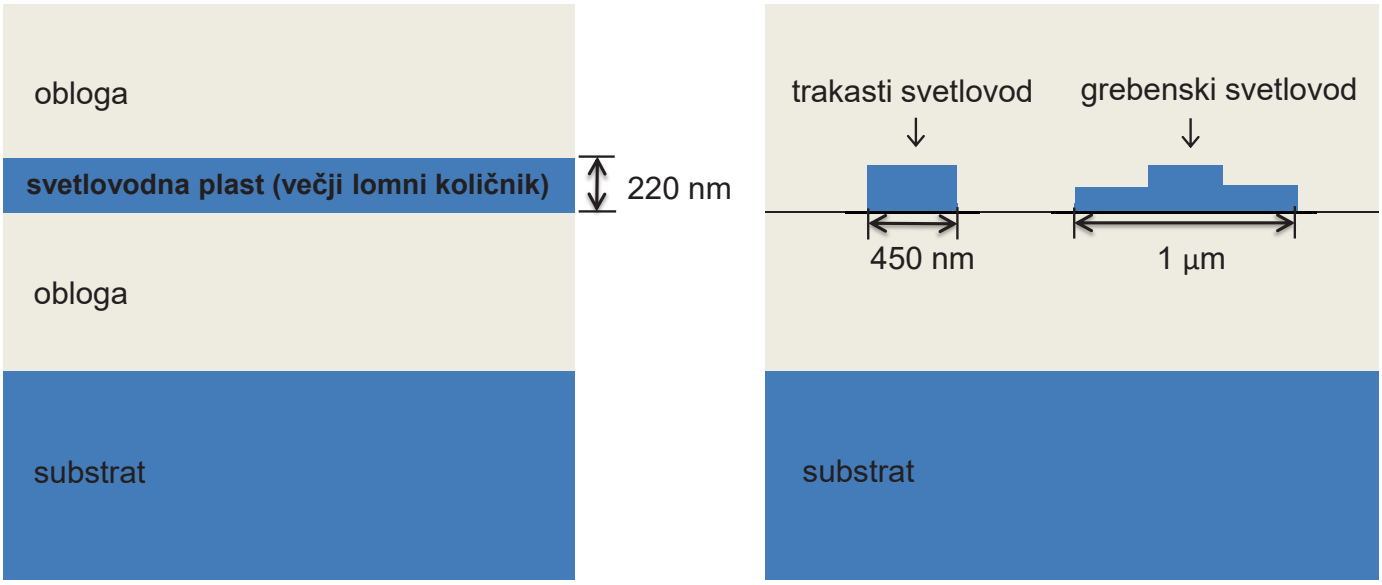


SPIE Photonics Europe 2020
Opportunities of silicon photonics for calculation and machine learning applications *(Invited Paper)*, Guangwei Cong et al., National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Osnovna struktura in gradniki PIC

strukturiranje svetlovodne plasti

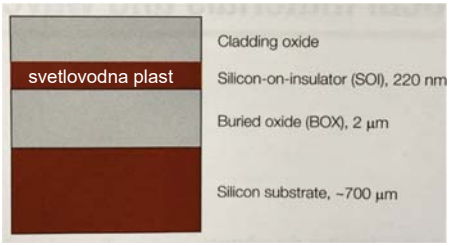


Tehnologije (material svetlovodne plasti)

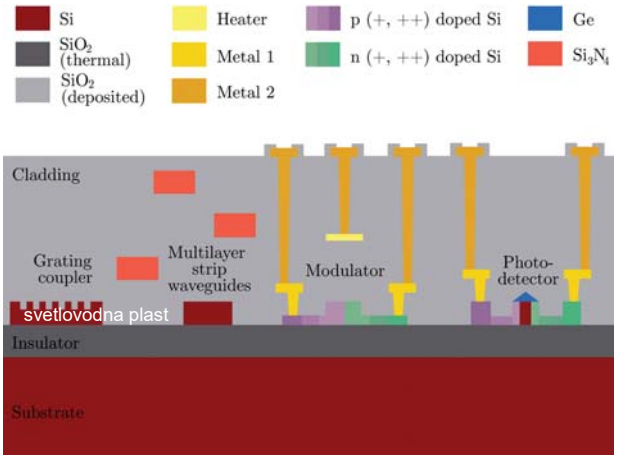
- **Si**
- **SiO_x**
- **Si_4N_4**
- **InP**
- **GaAs**
- **$LiNbO_3$**
- **polymers**
- **GFP**
- **(Si, Ge, Sn)**

Primer strkture za Si:

struktura **SOI** (Si on insulator)



Za aktivne gradnike potrebujemo še ostale plasti

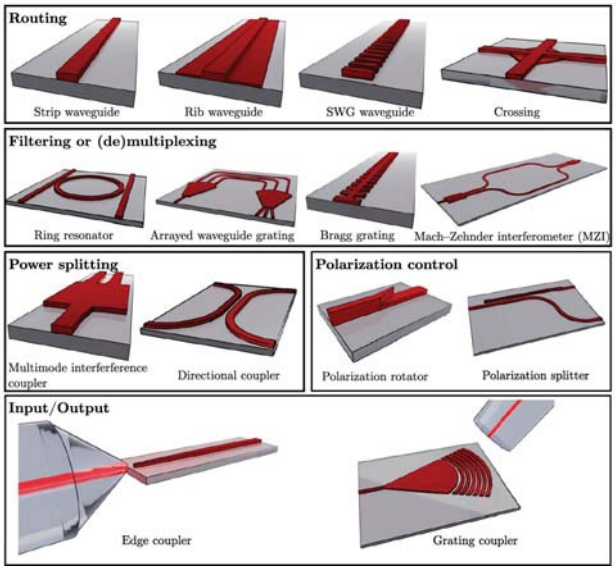


W. Shi et al.: Scaling capacity of fiber-optic transmission systems, **Nanophotonics** 2020; 9(16): 4629–4663

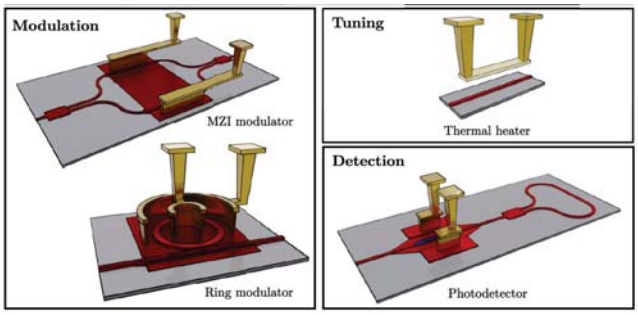
University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Primeri osnovnih gradnikov PIC (Si)

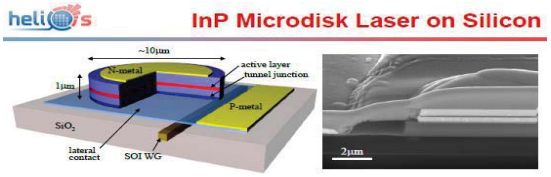
pasivni



aktivni



Integrirani laserji – uporaba direktnih polprevodnikov!



W. Shi et al.: Scaling capacity of fiber-optic transmission systems, **Nanophotonics** 2020; 9(16): 4629–4663

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Aktivnosti na področju PIC na FE

- Katedra za elektroniko
- Katedra za mikroelektroniko
- Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije

Laboratoriji:

LPVO LMFE LSO

Izobraževanje - študenti

Fotonska integrirana vezja

- v okviru magistrskega študija: **Modul D - Fotonika**



- v okviru doktorskega usposabljanja: delno predmet **Optoelektronika**

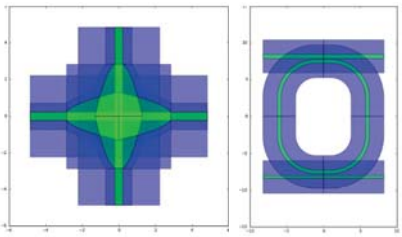
  in raziskovalno delo doktorandov (LPVO, LSO)

Orodja za načrtovanje in simulacije PIC na FE

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

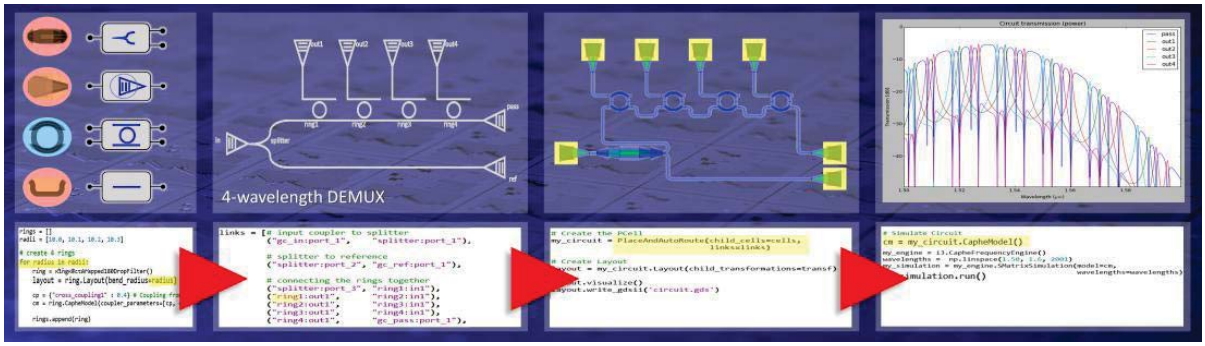
LMFE LSO

Načrtovalska orodja



- na osnovi vezij: **IPKISS**

LUCEDA PHOTONICS



https://www.lucedaphotonics.com/en/product/ipkiss

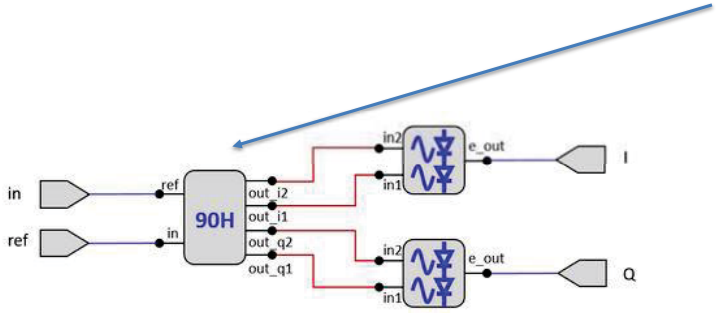
University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

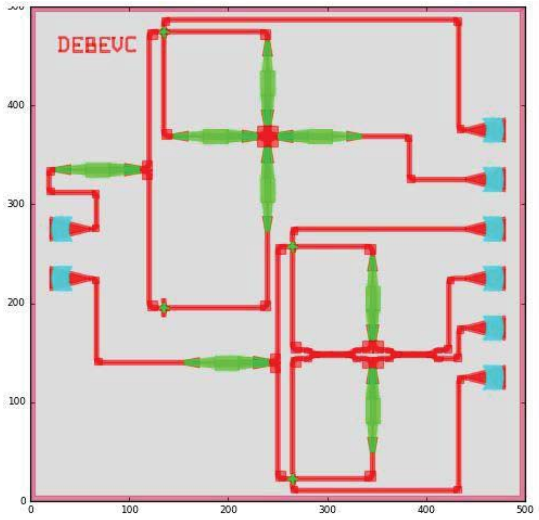
LMFE LSO

Načrtovanje z IPKISS-om

90° hibrid – dve izvedbi z uporabo MMI in smernih sklopnikov

kvadraturni demodulator:

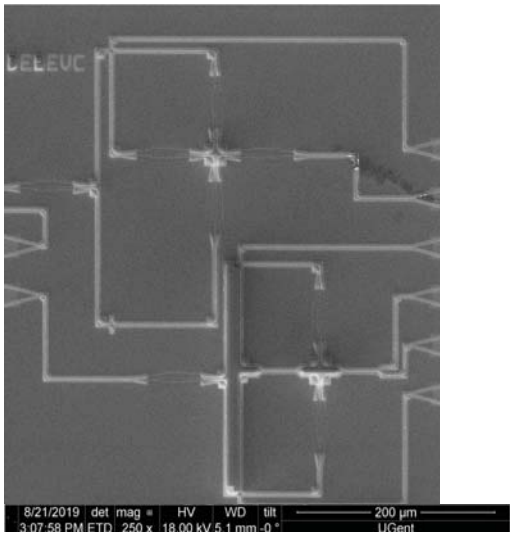




A. Debevc, PIC design training Uni. Ghent

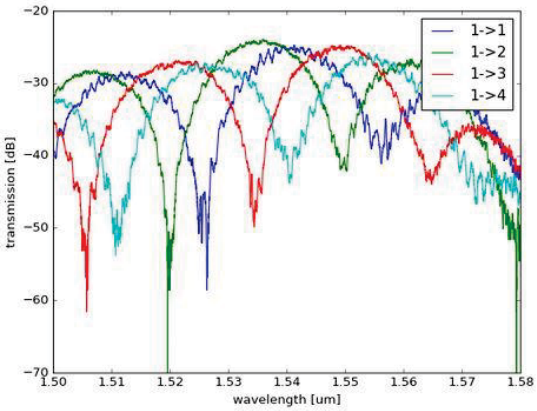
Načrtovanje z IPKISS-om

Izdelana 90° hibrida v silicijevi tehnologiji (SOI) preko RMIT, Australian Photonics



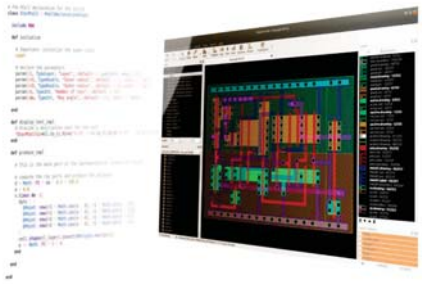
A. Debevc

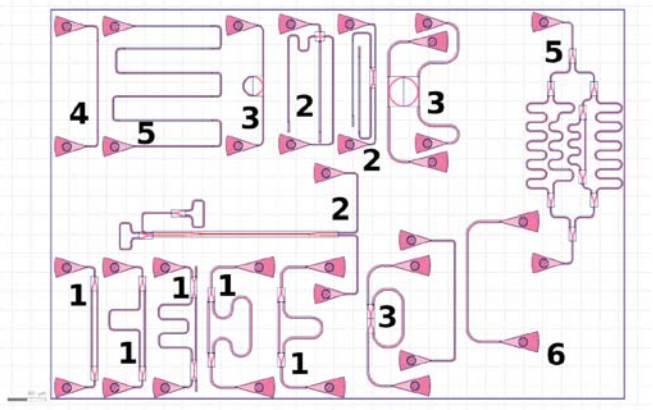
Meritev izbranih izhodov:



Načrtovalska orodja

- na osnovi vezij: **Klayout**





A. Lavrič

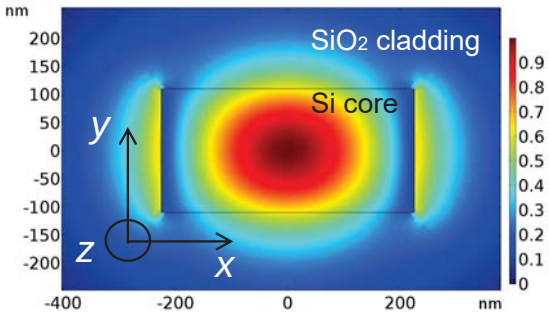
Gl. predstavitev **A. Lavriča** v nadaljevanju SOK 2021

University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

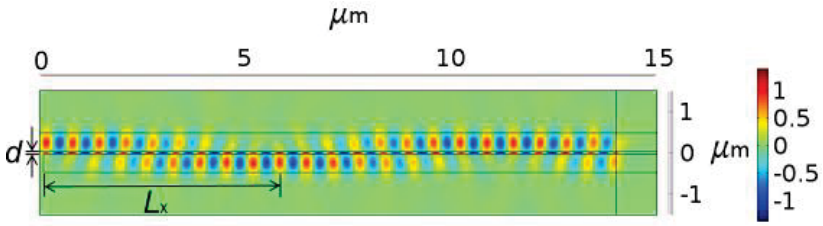
Načrtovalska orodja

➢ na osnovi komponent (EM): **COMSOL** (FEM), **LUMERICAL** (FDTD)

Simulacija električnega polja, trakasti svetlovod
Prečni pogled, *x* komponenta polja, rod TE1



Simulacija dela smernega sklopnika (dva Si svetlovoda)
vzdolžni pogled, prečna komponenta električnega polja

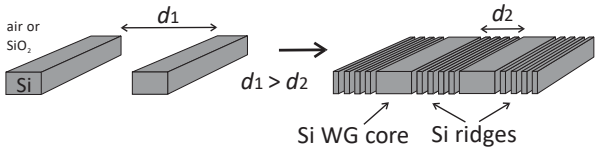


A. Debevc et al. MIDEM 2018

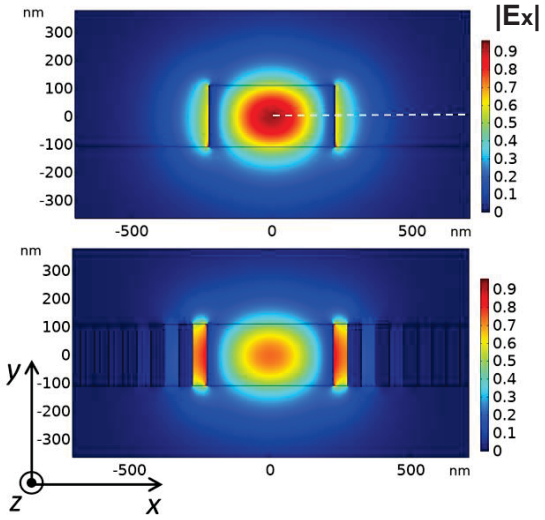
University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Optimizacija naprednih struktur s COMSOL-om

Optimizacija **metamaterialov** za večjo stopnjo integracije fotonskih gradnikov v PIC



Gl. predstavitev **A. Debevca** v nadaljevanju SOK 2021



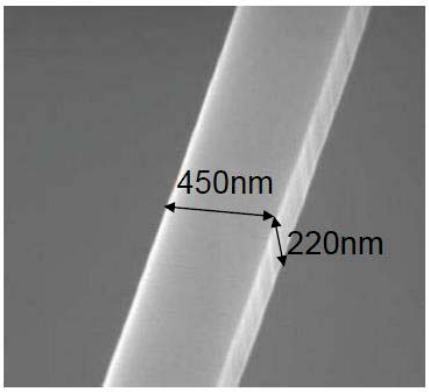
A. Debevc et al. SPIE Photonics Europe 2020

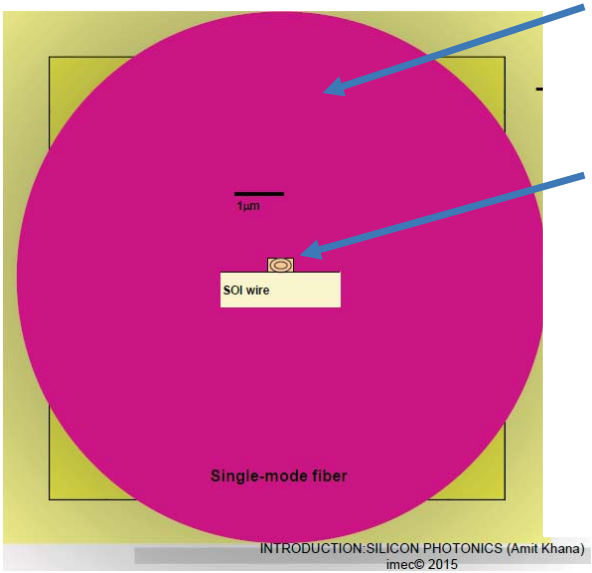
Merilna oprema za optično karakterizacijo PIC na FE

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering
LMFE LSO

Sklopitev z optičnim vlaknom

Si trakasti svetlovod
W = 450 nm

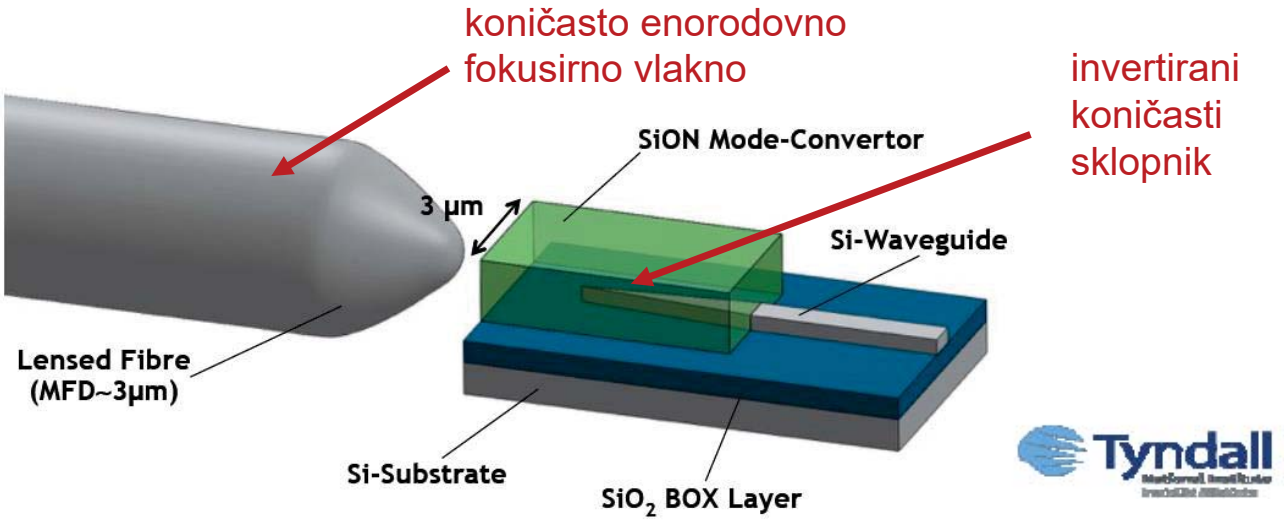




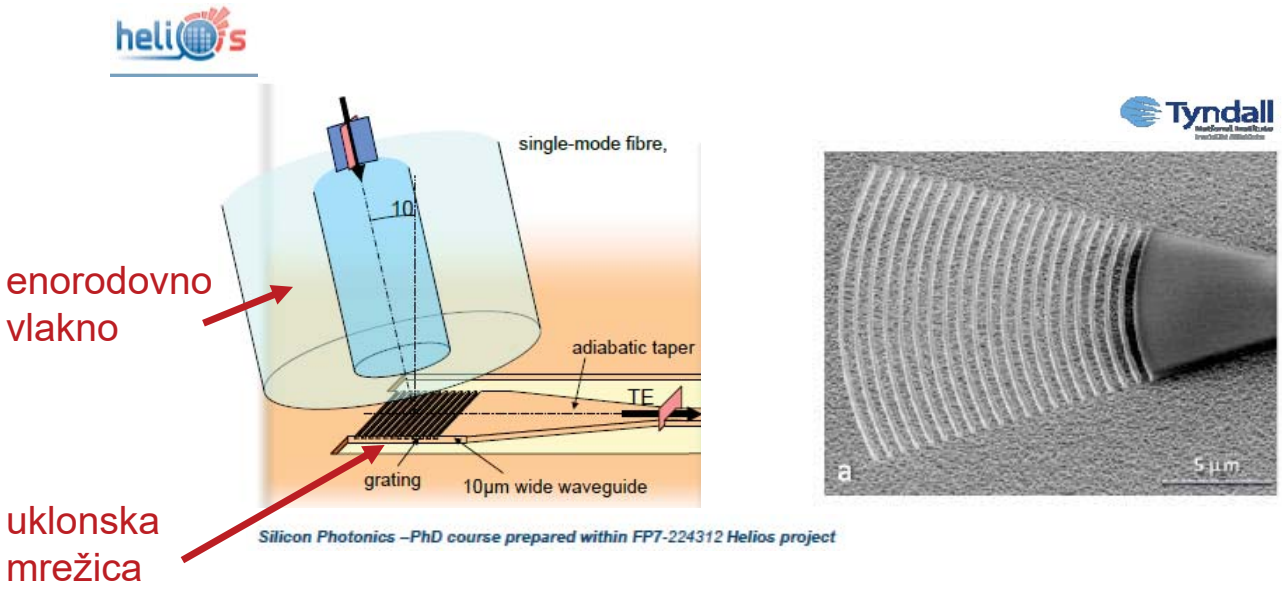
jedro vlakna
$2R$ = 8 µm

Si svetlovod
$W \approx$ 450-500 nm

Horizontalni vhodno/izhodni sklopnik



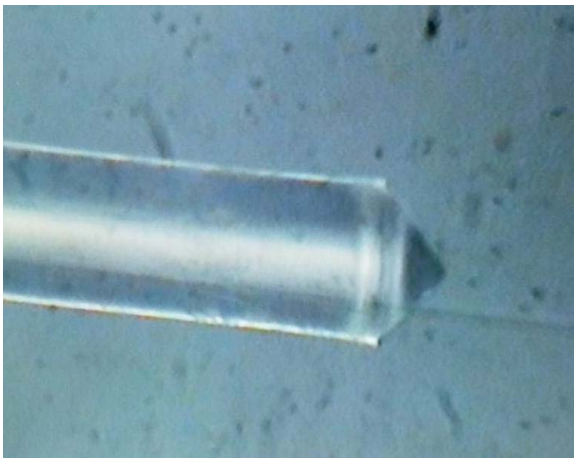
Vertikalni vhodno/izhodni sklopnik (uklonska mrežica)

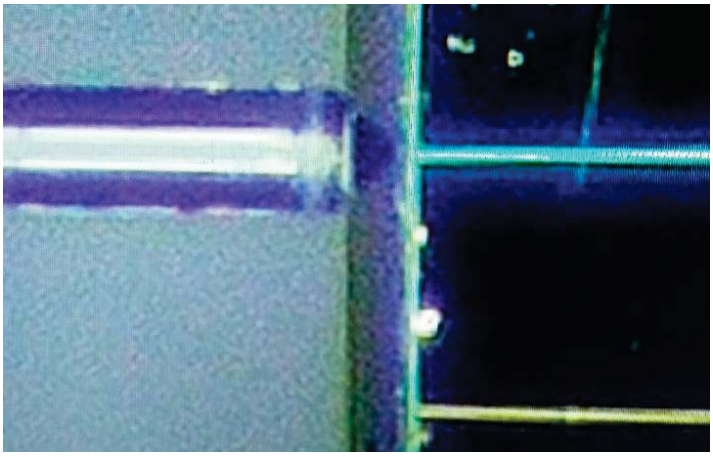


University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Koničasto vlakno in sklopitev svetlobe





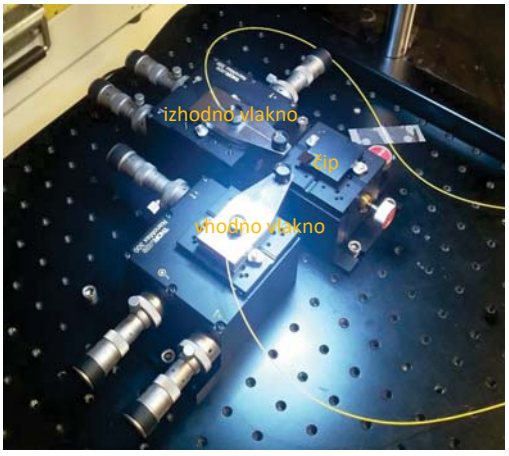
UL FE

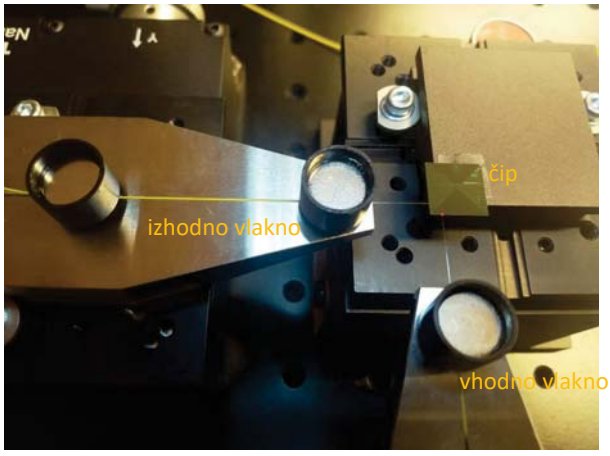
University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Precizne mizice za sklopitev vlakna s svetlovodom na PIC

- ročna ločljivost: 100 nm (s piezzo aktuatorji ~ 20 nm)
- omogoča horizontalno (na slikah) in vertikalno sklopitev vlaken

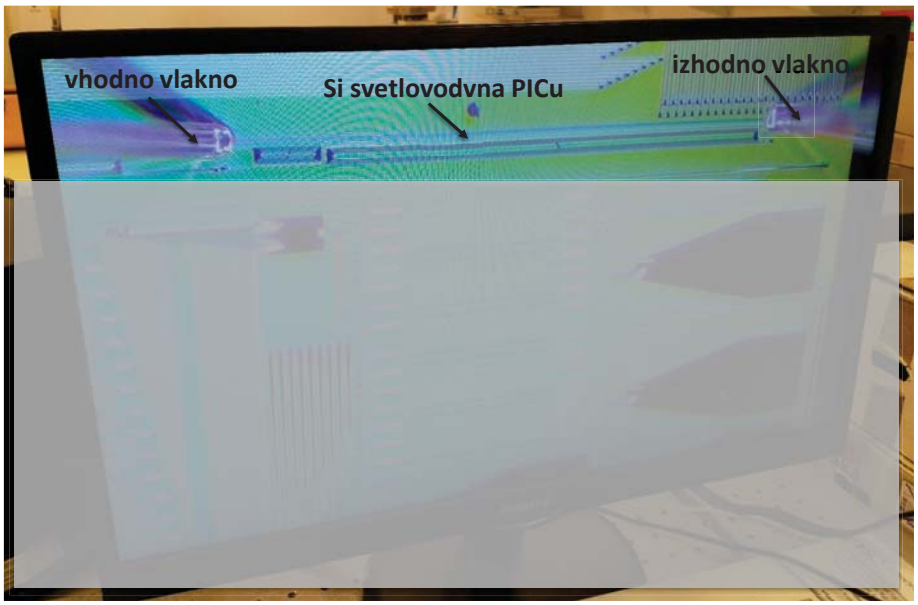




University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Primer slike svetlovoda in priključnih vlaken zajete s kamero



Si PIC izdelan na
Uni. Ghent in imec, Belgija

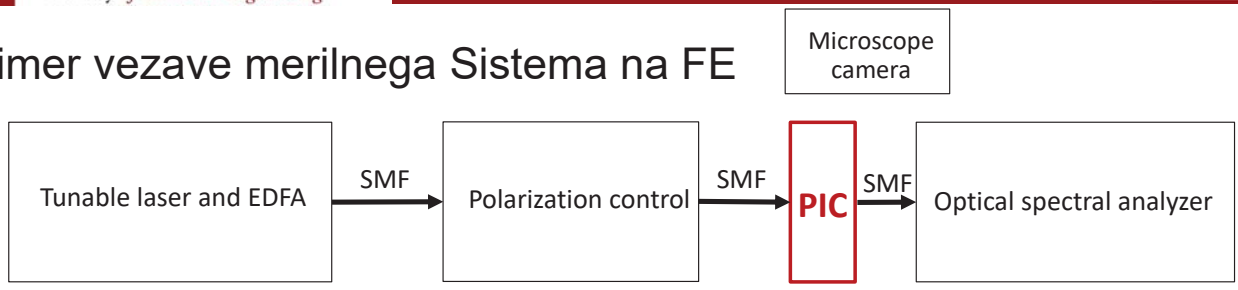
GHENT UNIVERSITY imec

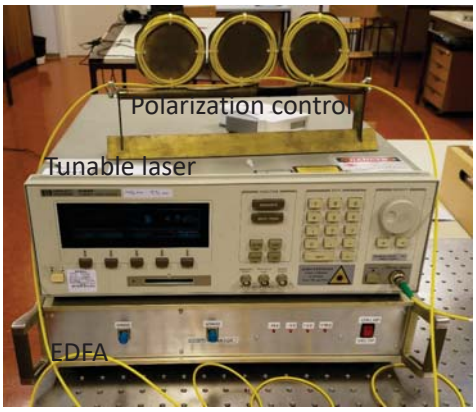
Meritve izvedene na FE

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

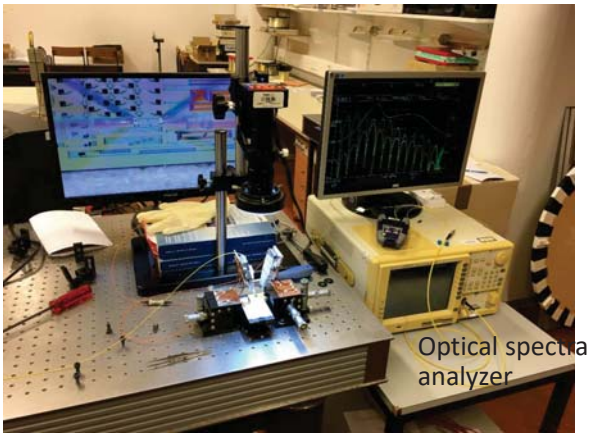
LMFE LSO

Primer vezave merilnega Sistema na FE





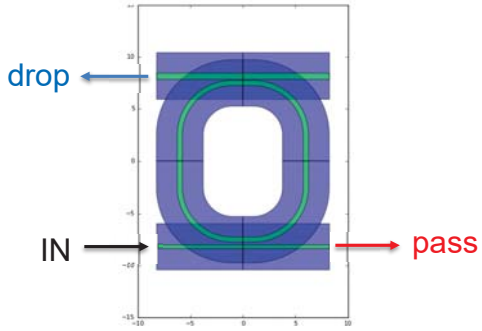
LSO & LPVO



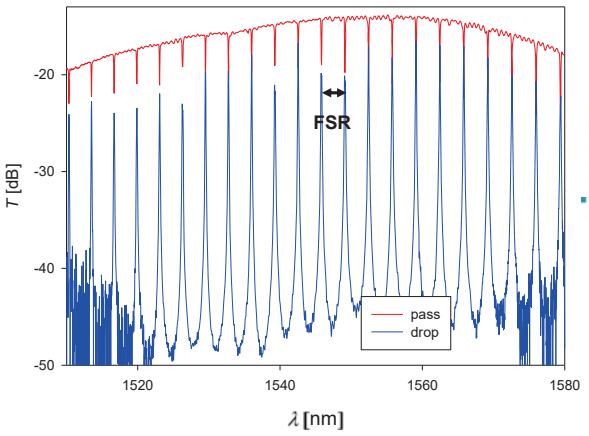
University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Prve meritve obročnega resonatorja



Izmerjena karakteristika izbranega obročnega resonatorja na PIC



PIC izdelan na
GHENT UNIVERSITY
imec

Gl. primer uporabe mikro obročnega resonatorja v RoF v predtavitvi **K. Bališ-a Vuk-a** SOK 2021

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

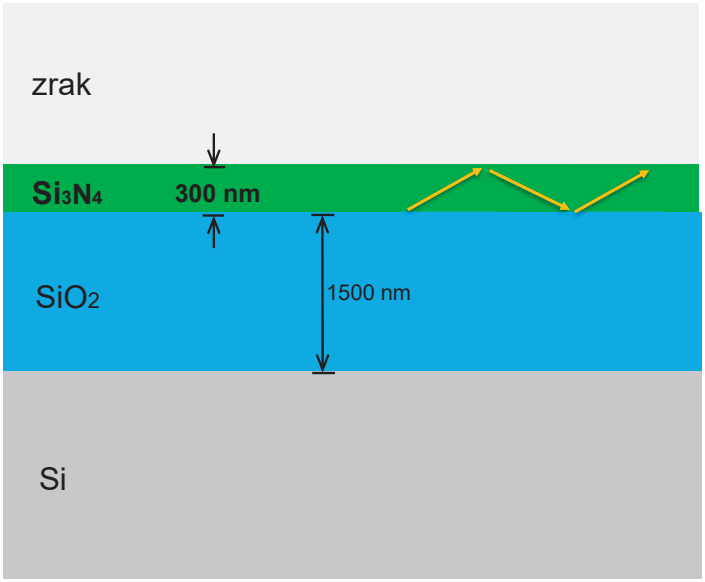
LMFE LSO

Prvi testni vzorci na osnovi tehnologije Si_3N_4 izdelani na FE

LMFE

University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

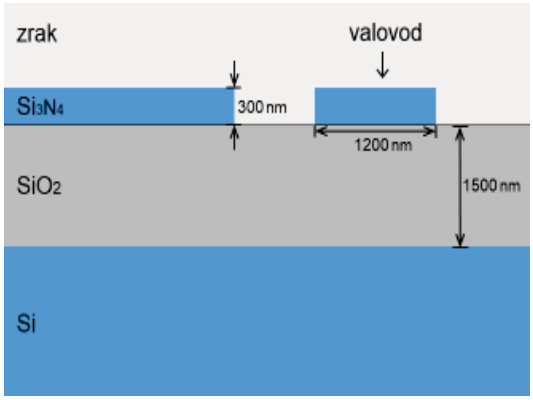
Izhodišče - 4” Si rezina z SiO_2/Si_3N_4 plastema



osrednja plast Si_3N_4 (PECVD/LPCVD) za vodenje svetlobe, ki jo strukturiramo

University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

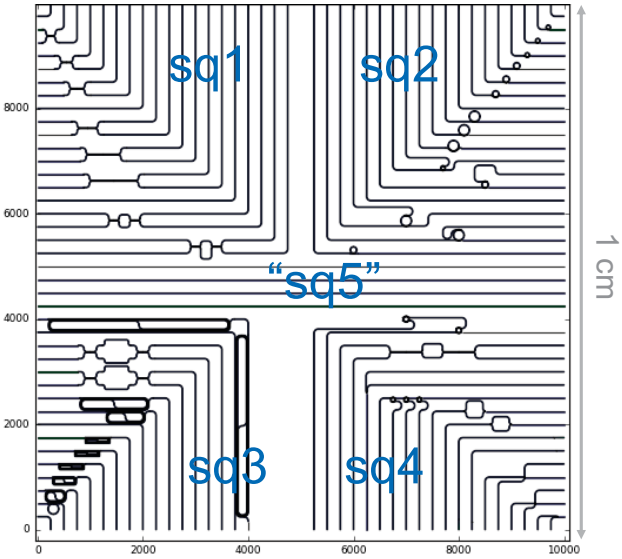
Postopek izdelave prvih testnih struktur na FE



- zasnova, načrt in simulacija testnih struktur -> gds datoteka (IPKISS) za izdelavo mask
- nanos SiO_2 in Si_3N_4 plasti na Si (PECVD, LPCVD)
- fotorezist, osvetljevanje preko maske, razvijanje, suho/mokro jedkanje Si_3N_4, razrez čipov
- preverjanje izjedkanih struktur (konfokalni mikroskop LMFE, elektronski mikroskop KI)
- optične meritve

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Testno fotonsko integrirano vezje iz Si_3N_4 PIC ULFE 2019-1a (1 x 1 cm^2)



Vključeni gradniki:

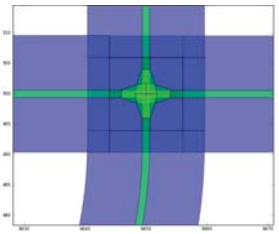
- ravni in ukrivljeni (L) svetlovodi različnih dolžin (tudi spiralni) in širin
- smerni sklopniki in razcepniki, presečišča
- obročni resonatorji različnih dimenzij
- Mach-Zehnderjevi interferometri
- valovni demultipleksor, Vernierjev filter
- nekateri ostali gradniki

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

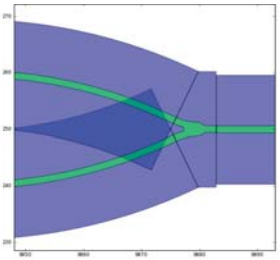
sq4

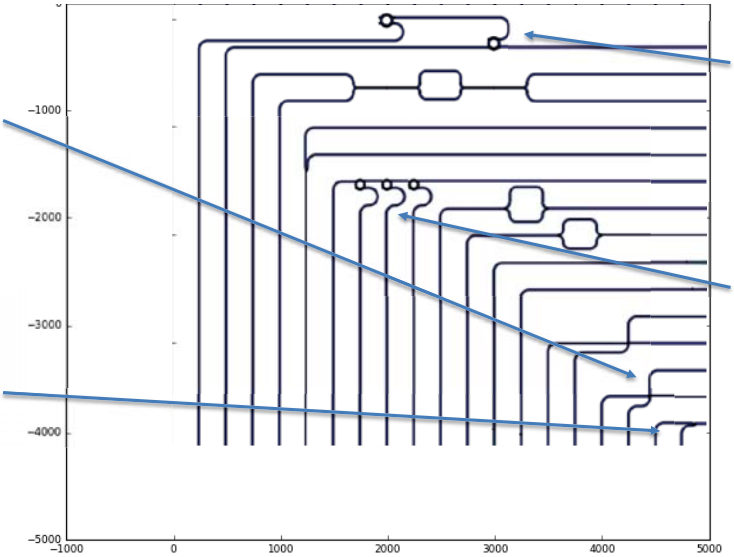
Nekatere strukture z različno funkcionalnostjo

presečišče

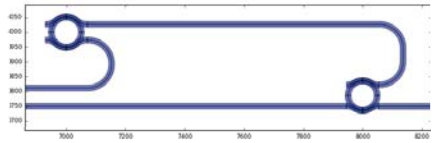


razcepnik

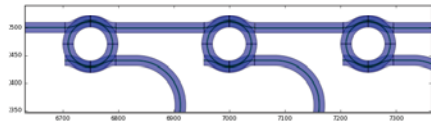




Vernierov filter



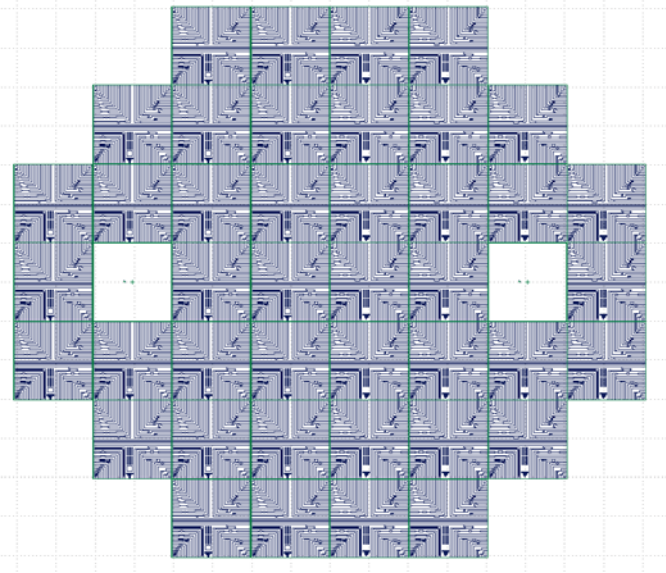
valovni demultipleksor



University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Načrt za masko za 4” Si rezino

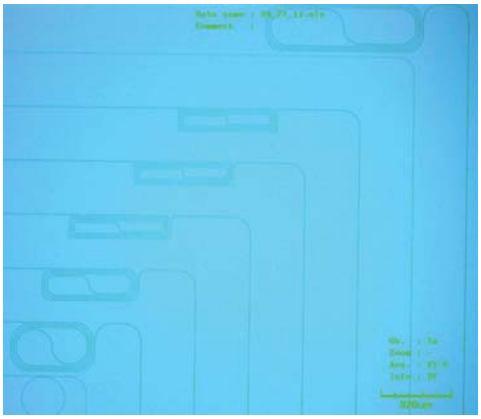


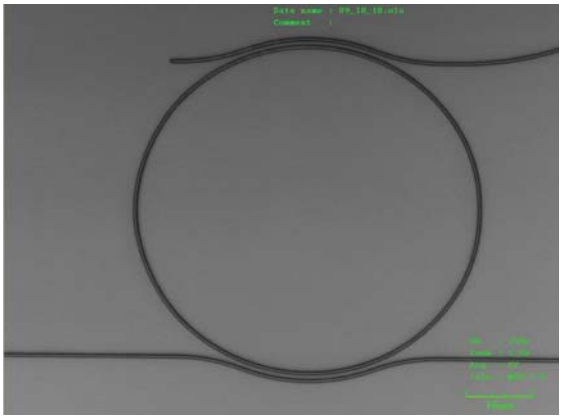
- 42 x 1 cm^2 čipov
- vključena dva, nekoliko različna dizajna

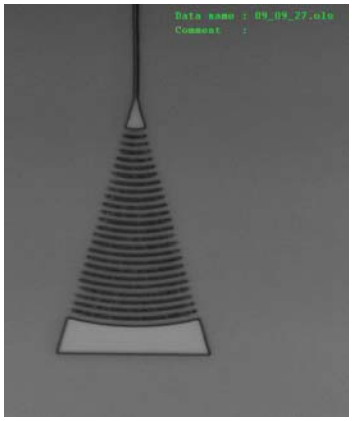
University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

Slike prvih izdelanih struktur iz Si_3N_4 na FE







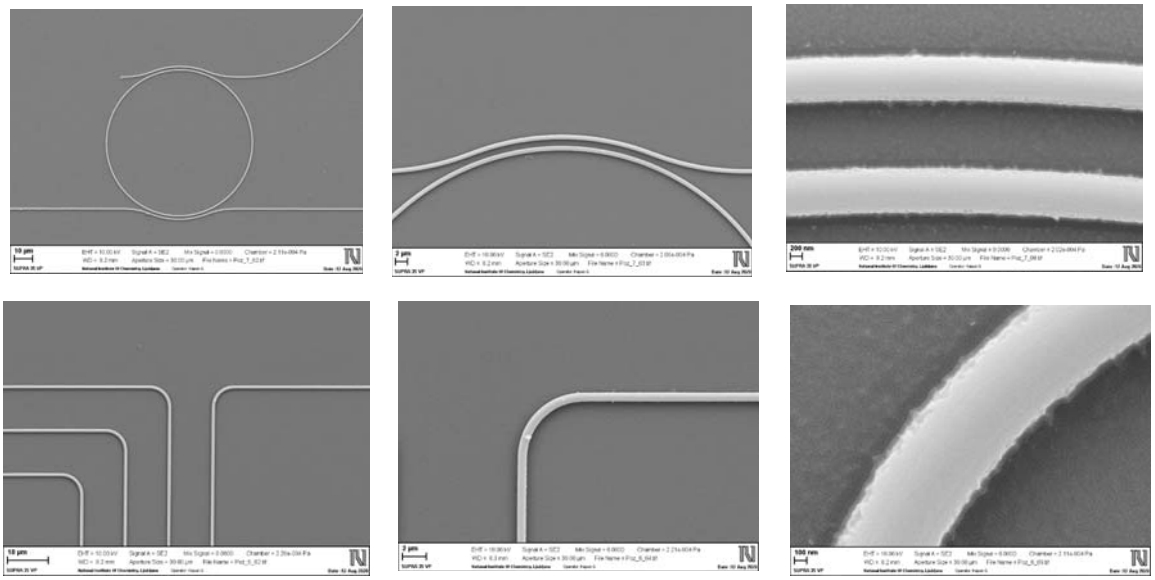
Posneto s konfokalnim mikroskopom v LMFE

LMFE

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

SEM slike izdelanih struktur iz Si_3N_4 na FE



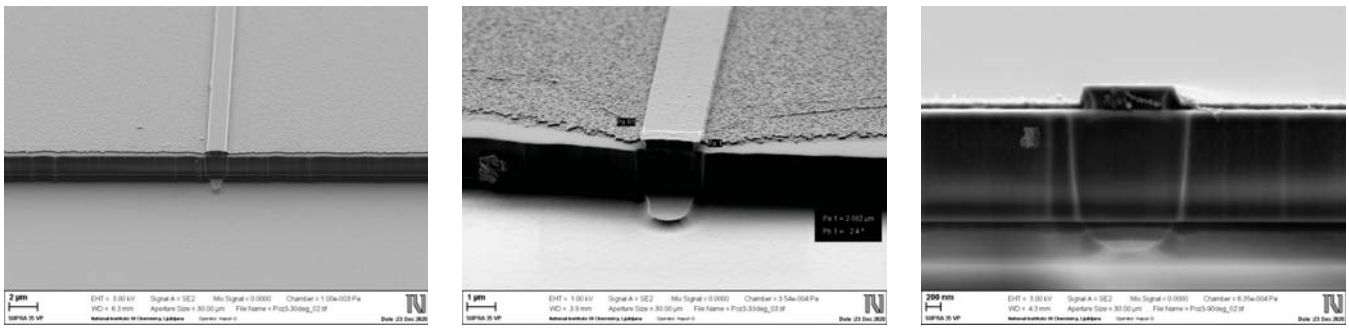
Posneto z elektronskim mikroskopom na Kemijskem inštitutu

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

LMFE LSO

SEM slike izdelanih struktur iz Si_3N_4 na FE

Rob svetlovoda

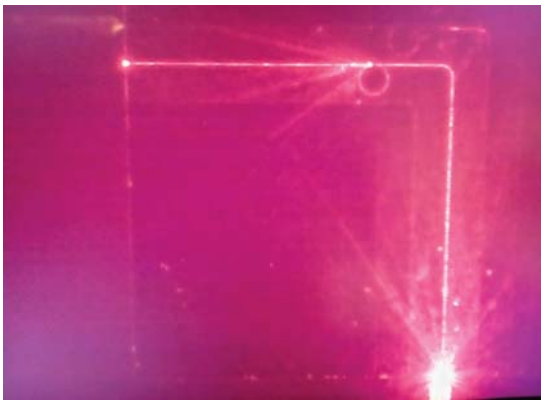


Posneto z elektronskim mikroskopom na Kemijskem inštitutu

University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Prve optične meritve izdelanih svetlovodov iz Si_3N_4 na FE

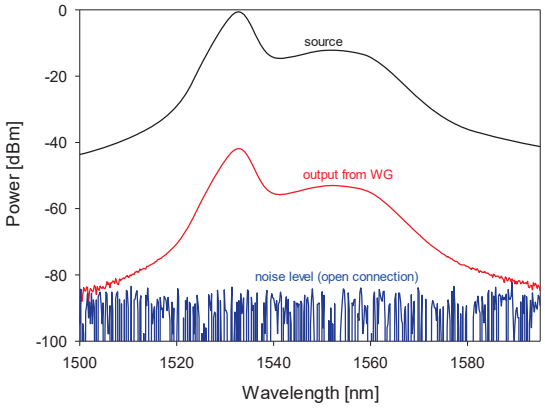
Preizkus sklopitve z vidno svetlobo



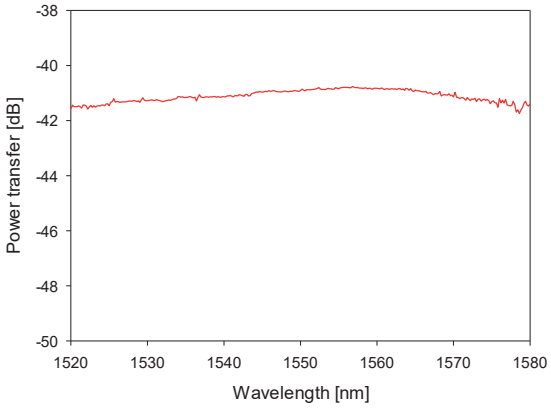
University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Prve optične meritve izdelanih svetlovodov iz Si_3N_4 na FE

Spektri moči signalov in šuma



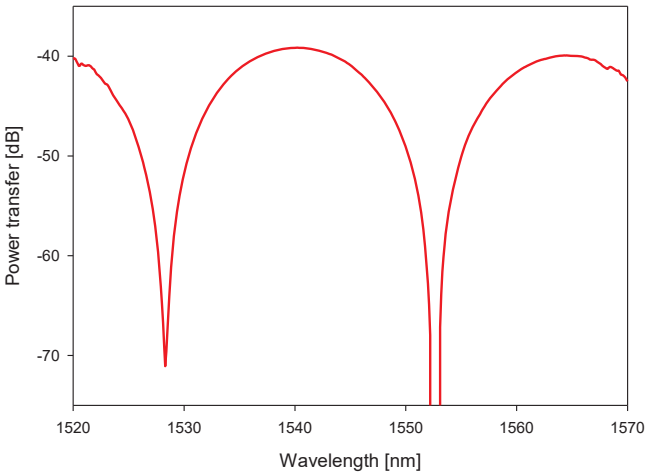
Prenosna močnostna funkcija svetlovoda

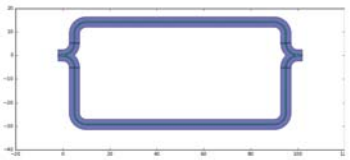


Kasneje dosežena višja prenosna razmerja, npr. **– 18 dB**

Prve optične meritve izdelanih struktur iz Si_3N_4 na FE

Mach-Zehnder interferometer - MZI





Zaključek

- PIC so pomembni gradniki na področju optičnih komunikacij in na druguh področjih (hitrost, funkcionalnost, kompaktnost, cena)
- Na FE potekajo aktivnosti na področju načrtovanja (Si in Si_3N_4 tehnologije), karakterizacije in izdelave testnih struktur (Si_3N_4)
- S PIC se srečajo tudi študenti v izobraževalnem procesu
- Vljudno vabljeni, da prisluhnete predstavitvam raziskovalnega dela doktorandov s področja PIC v nadaljevanju konference in k morebitnem sodelovanju!

janez.krc@fe.uni-lj.si

Strukture metamaterialov za višjo stopnjo integracije v fotonskih integriranih vezjih

Metamaterial structures for a higher degree of integration in Photonic Integrated Circuits

Andraž Debevc, Janez Krč in Marko Topič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko

andraz.debevc@fe.uni-lj.si

Povzetek

Periodični metamaterial, ki sestoji iz izmenjujočih se plasti zraka in silicija ima potencial, da zniža presluh med integriranimi silicijevimi valovodi, če ga uporabimo kot stransko oblogo valovodov. To nam omogoča, da valovode postavimo bližje drug drugemu in s tem povečamo stopnjo integracije. V prispevku bodo predstavljene numerične simulacije in optimizacija valovodov z metamateriali. Predstavljeno bo tudi načrtano testno fotonsko integrirano vezje iz amorfnega silicija, ki vključuje valovode z metamateriali in je trenutno v izdelavi.

Abstract

A metamaterial consisting of periodically exchanging layers of air and silicon has the potential to reduce the cross-talk between silicon waveguides when used as the side cladding.This enables us to put waveguides closer together on the chip and in turn increase the integration density. Numerical simulations and optimization of waveguides with metamaterial cladding will be presented in this contribution. We will also present the design of a test photonic integrated circuit that is curently being fabricated. The chip will be made on amorphous sillicon and will include waveguides with metamaterial cladding.

Biografija predavatelja

Andraž Debevc je leta 2017 končal magistrski študijski program Elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Istega leta se je na tej fakulteti vpisal na doktorski študij in postal mladi raziskovalec v Laboratoriju za fotovoltaiko in optoelektroniko. Pri raziskovalnem delu se ukvarja s področjem fotonike. Njegova primarna raziskovalna dejavnost vključuje načrtovanje, optično modeliranje in karakterizacijo fotonskih integriranih vezij.

Lecturer's biography

Andraž Debevc received his MSc in Electrical Engineering at the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, in 2017. Since October 2017 he is a PhD student and a member of the Laboratory of Photovoltaics and Optoelectronics. His research work is related to photonics. The main research activities include design, optical modelling and characterization of photonic integrated circuits.

Strukture metamaterialov za višjo stopnjo integracije v fotonskih integriranih vezjih

Andraž Debevc, Janez Krč in Marko Topič

Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko - LPVO
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko,
Tržaška 25, 1000 Ljubljana



LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

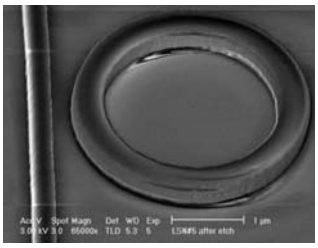
Vsebina predavanja

- Uvod
- Gostota integracije in metamateriali
- Rezultati simulacij in optimizacije strukture metamaterialov
- Zaključki

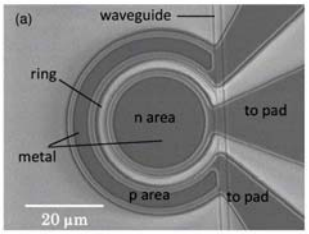
University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

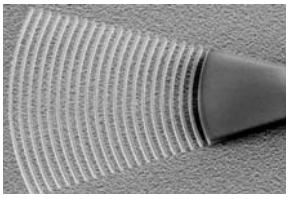
Uvod

- Integrirane fotonske komponente→ **Fotonska integrirana vezja PIC**

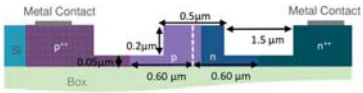


Xu e.a., Opt. Express. 16, pp 4309 (2008)

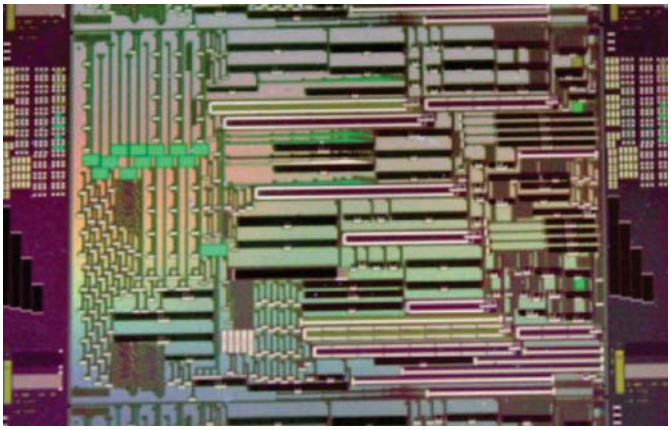




Rath e.a., Bjnano 4, pp 303 (2013)



Dong e.a., Opt. Express. 17, pp 22487 (2009)

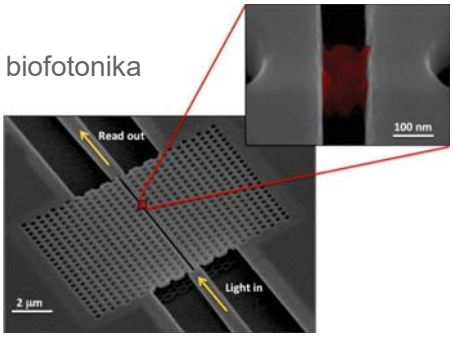


Novack e.a., Nanophotonics 3(4-5), pp 205-214 (2014)

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

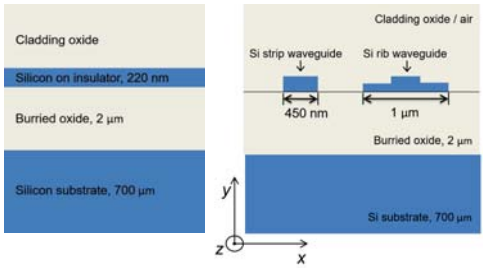
Uvod

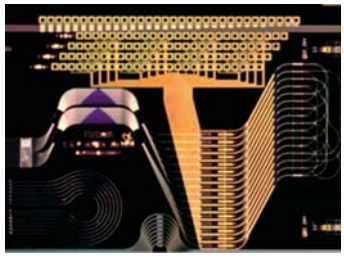
- Materialne platforme PIC:
  - › Si, Si_3N_4, SiO_2 ,InP, $LiNbO_3$, polimeri,...
- Aplikacije PIC:
  - › Telekomunikacije in optično procesiranje signalov
  - › Optične povezave
  - › Medicinska senzorika in biofotonika
  - › LIDAR
  - › Kvantna fotonika



Scullion e.a., SPIE newsroom (2012)

Si valovodi na SOI (Silicon-on-Insulator) rezini:





Smit e.a., Semicond Sci. Technol. 29, pp. 41 (2014)

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Gostota integracije in metamateriali

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Presluh in gostota integracije PIC

- Z večjo gostoto integracije lahko povečamo zmogljivost fotonskih integriranih vezij in znižamo njihovo ceno
- Optični presluh je eden izmed omejevalnih faktorjev višje gostote integracije
- Nekatere aplikacije kot npr. optični fazni niz za krmiljenje žarkov v LIDAR sistemih zahtevajo čim manjši razmik med posameznimi valovodi na čipu

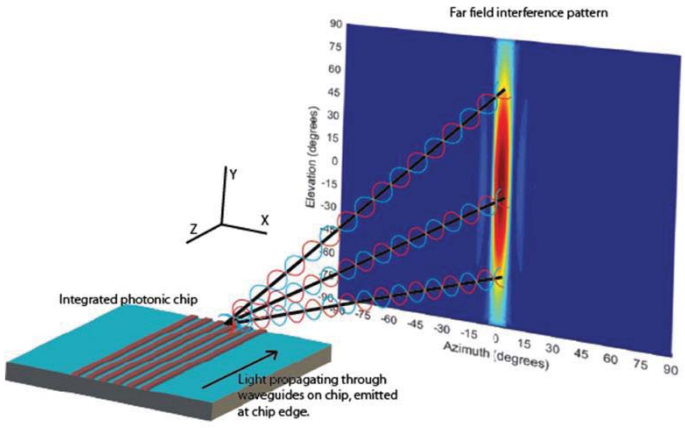


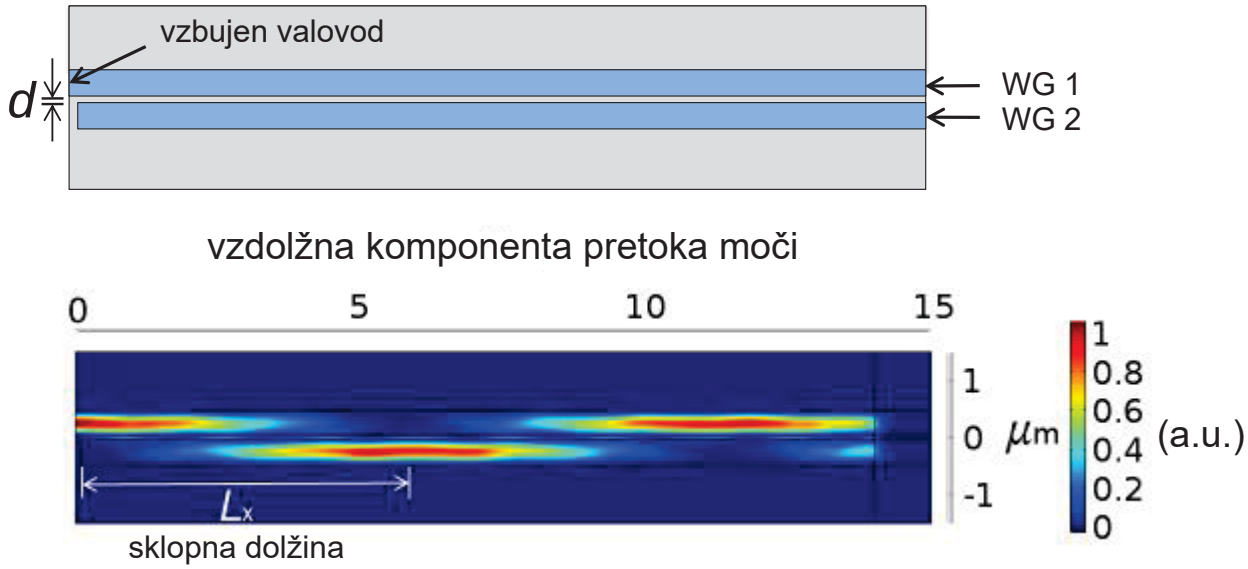
FIG. 1. Overview of end-firing waveguide optical phased array.

Kossey e.a., APL Photonics. 3, 011301 (2018)

A. Debevc 25. seminar optične komunikacije, 4. Februar 2021, FE-UNI-LJ, Ljubljana, Slovenija 6

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Sklopitev optičnih valovodov – pogled od zgoraj

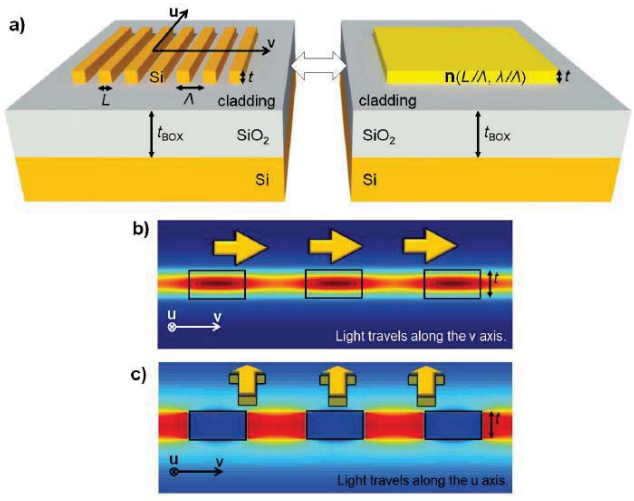


Debevc e.a., MIDEM conference proceedings 54, pp 87 (2018)

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Dielektrični metamateriali

- Sestojijo iz dveh ali več periodično izmenjujočih se dielektričnih materialov s periodo, ki je občutno manjša od valovne dolžine svetlobe
- Anizotropnost lomnega količnika→ lahko jo izkoristimo za manipulacijo svetlobe
- Izdela se jih lahko z obstoječimi standardnimi proizvodnimi procesi (npr. CMOS)

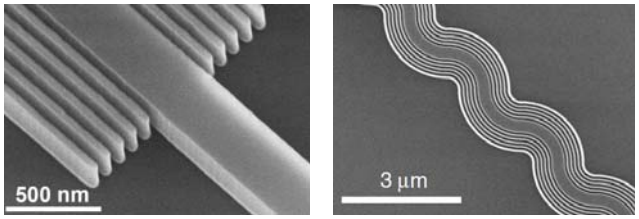


Halir e.a., Proc. IEEE 106, No. 12, pp. 2144 (2018)
Cheben e.a., Nature 560, pp 565 (2018)
Jahani e.a., Nat. Nanotecnol. 11, pp 23 (2016)

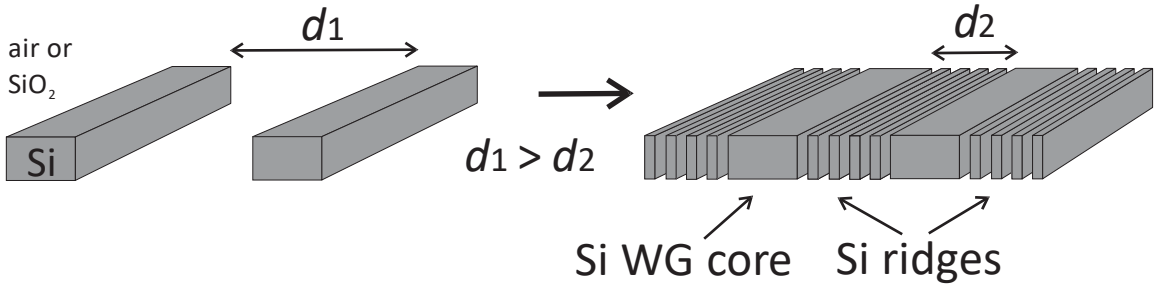
LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Valovodi z oblogo iz dielektričnih metamaterialov

- Z uporabo dielektričnega metamateriala kot stranske obloge valovoda lahko znižamo presluh in zmanjšamo razmik med valovodi
- Metamaterial sestoji iz materiala jedra (npr. Si) in materiala obloge (npr. zrak ali SiO_2)



Jahani e.a., Nat. Commun. 9, pp 1893 (2018)



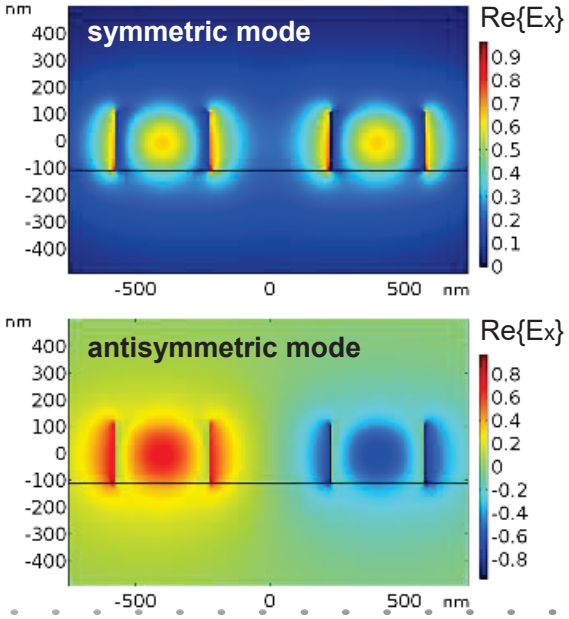
LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Rezultati simulacij in optimizacije strukture metamaterialov

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Uporabljene metode

- Simulacije v frekvenčni domeni (COMSOL):
  - › Analiza rodov na osnovi 2-D metode končnih elementov (FEM)
  - › 2-D in 3-D FEM simulacije razširjanja valov
- Eigenmode expansion metoda (EME)
  - › Izračun sklopne dolžine iz efektivnih lomnih količnikov simetričnega in antisimetričnega rodu



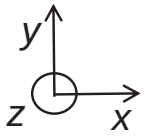
LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Vpogled v preseke električnega polja

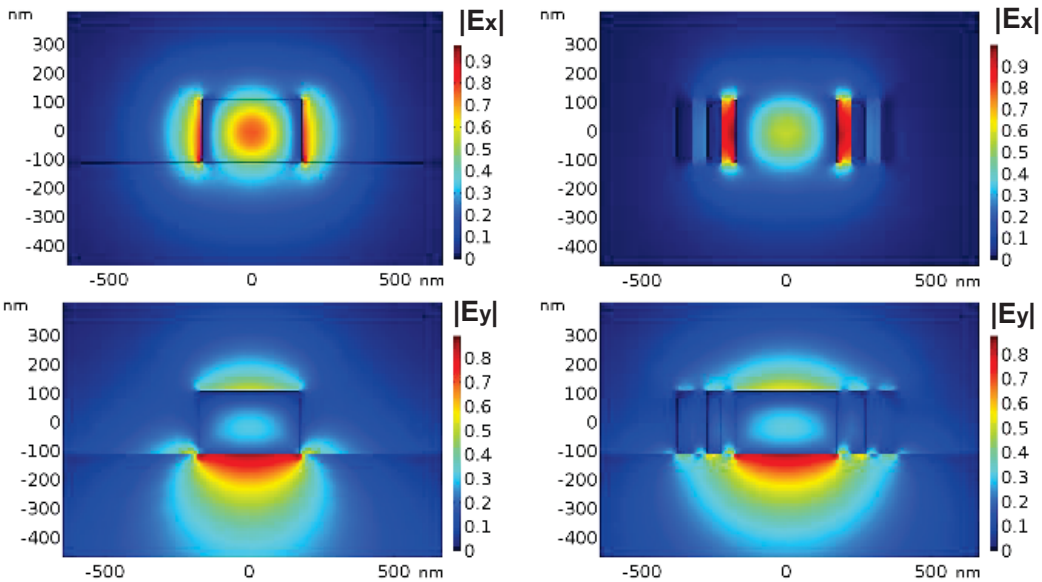
trakasti valovod: **valovod z oblogo iz metamateriala:**

λ =1550 nm

TE rod:



TM rod:

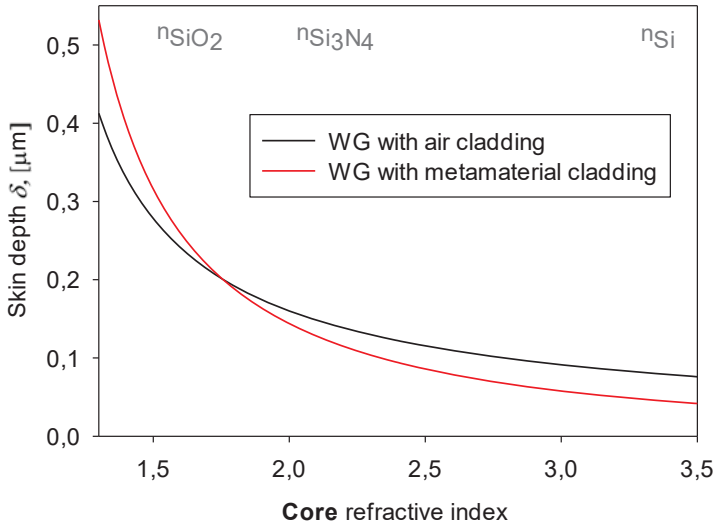


Debevc e.a., Proc.SPIE 11344, Metamaterials XII, 1134420 (2020)

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Izračun udorne globine električnega polja

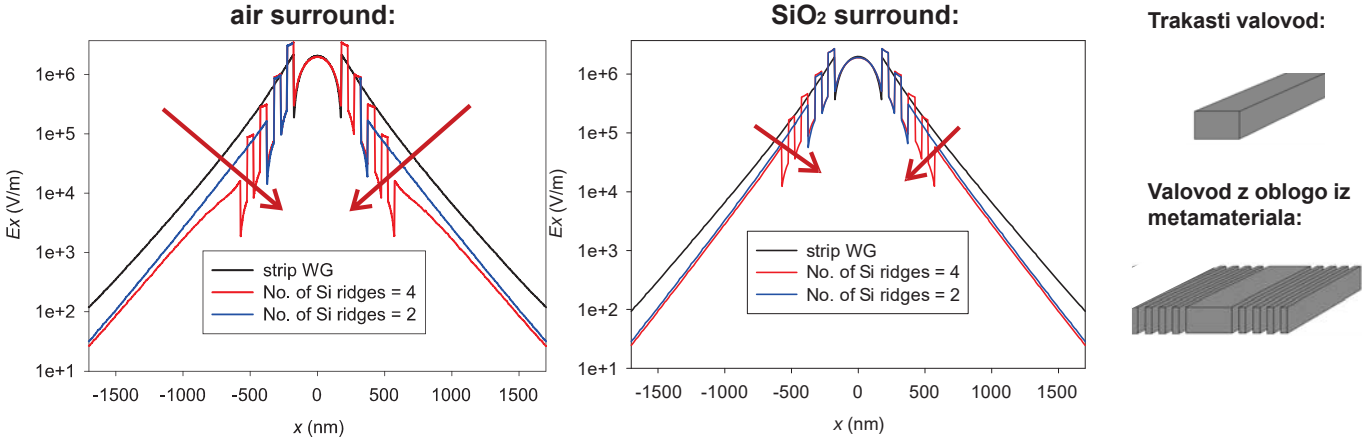
- Dielektrični metamaterial lahko povzroči hitrejši upad evanescenčnega polja – krajša udorna globina
- Pogoj je dovolj velik kontrast lomnih količnikov materialov, ki tvorijo metamaterial



Debevc e.a., Proc.SPIE 11344, Metamaterials XII, 1134420 (2020)

University of Ljubljana
Faculty of Electrical Engineering

Simulirani profili električnega polja (rod TE)

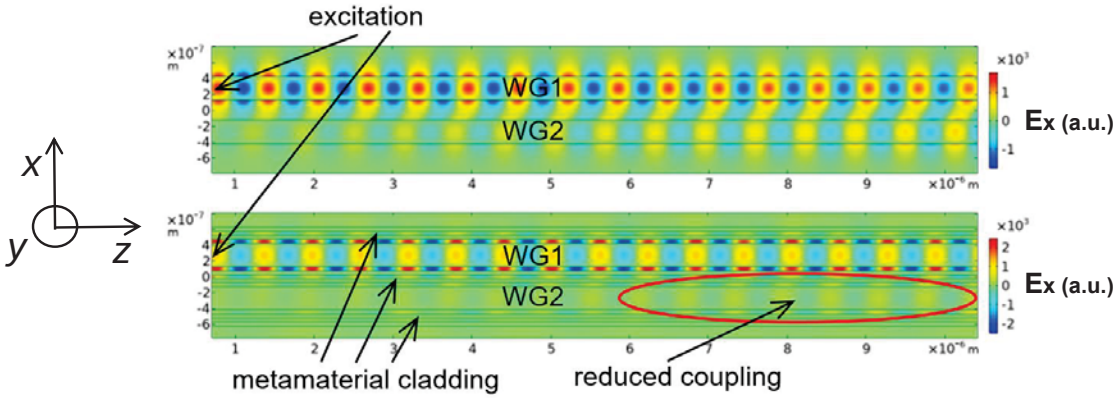


Večji kontrast lomnih količnikov→ vpliv metamateriala je bolj izražen

Debevc e.a., Proc.SPIE 11344, Metamaterials XII, 1134420 (2020)

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Simulacija sklapljanja polja med dvema valovodoma

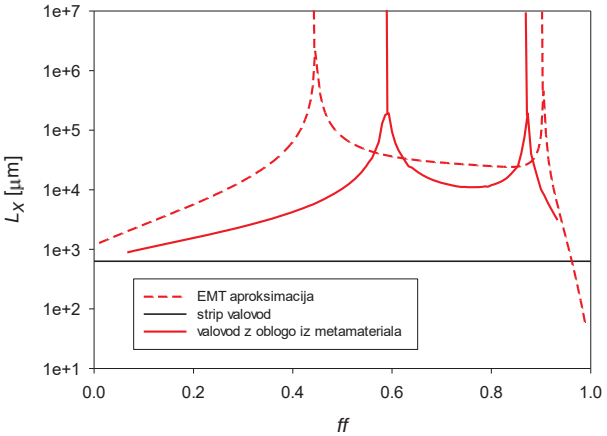


- Zaradi manjšega prekrivanja evanescenčnih polj rodov sklopljenih valovodov se v primeru obloge iz metamateriala polje iz vzbujenega valovoda počasneje sklaplja v prileżni valovod

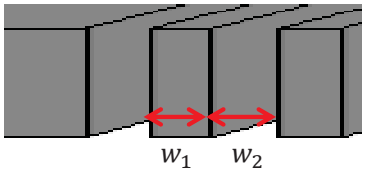
LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Simulacija sklopne dolžine

- Pri simulaciji smo spreminjali faktor polnitve (*ff*), ki predstavlja razmerje med širino Si rebra in celotne periode metamateriala
- Pri določenih geometrijskih pogojih sklopna dolžina neomejeno naraste, kar lahko pojasnimo s teorijo sklopljenih rodov (CMT)



Faktor polnitve:



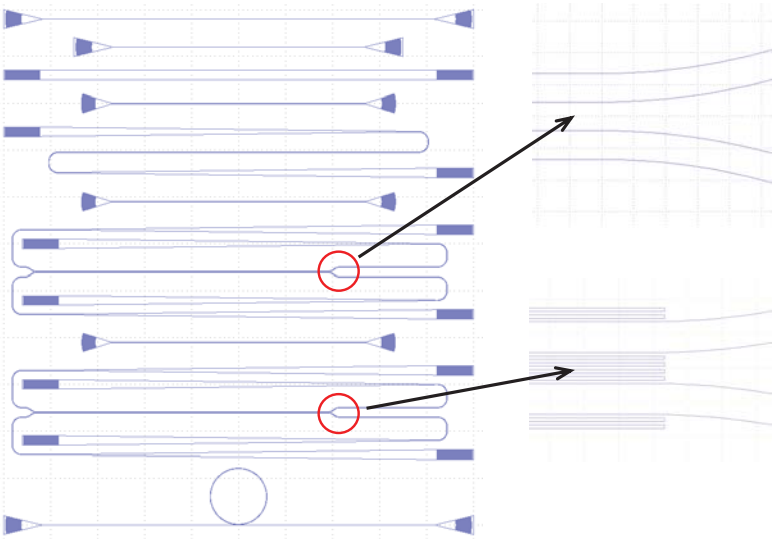
$$ff = \frac{w_1}{w_1 + w_2}$$

perioda metamateriala = 150 nm, širina jedra valovodov = 350 nm, razmik med valovodoma = 975 nm

LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Testno vezje na amorfnem siliciju - v izdelavi v nanofotonskem tehnološkem centru Valencia

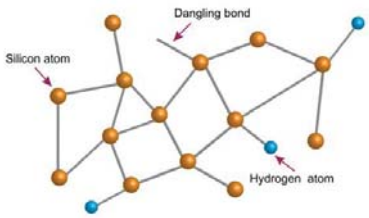


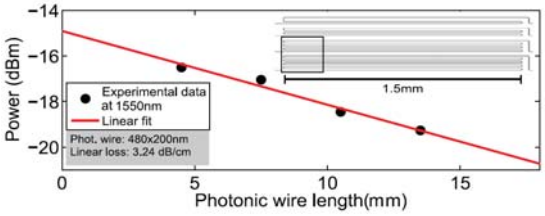


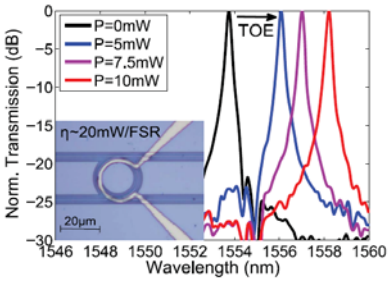
LPVO University of Ljubljana Faculty of Electrical Engineering

Hidrogenirani amorfni silicij kot material za integrirana fotonska vezja

- Lomni količnik primerljiv s kristalnim silicijem (lahko celo višji)
- Proces izdelave pri nižji temperaturi (PECVD), fleksibilnejša izbira substratov
- Možnost integracije z back-end-of-line CMOS procesa







Lipka e.a. , Photon. Res. 4, No. 3, pp 126 (2016)

Zaključki

- Uporaba metamateriala kot stranske obloge integriranih valovodov lahko občutno zmanjša presluh med valovodi. To nam omogoča večjo gostoto integracije fotonskih integriranih vezij
- Za želen vpliv metamateriala je ključen velik kontrast lomnih količnikov (npr. zrak in silicij)
- Zaradi hitrejšega upadanja evanescenčnega polja zunaj jedra valovodov se presluh občutno zniža v primerjavi z običajnimi valovodi. Pod določenimi pogoji lahko zaradi medsebojne kompenzacije posameznih komponent sklopnih koeficientov dosežemo celo popolno izničenje presluha

Merjenje efektivnega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem čipu

Measurement of the effective refractive index of a fiber in a silicon chip

Andrej Lavrič in Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za sevanje in optiko

andrej.lavric@fe.uni-lj.si

Povzetek

Integrirana fotonska vezja so vse bolj privlačna v optičnih komunikacijah, senzoriki, obdelavi in prenosu podatkov. V prispevku je predstavljen preprost fotonski čip z različnimi testnimi strukturami. Podrobneje so predstavljeni rezultati določanja dejanskega efektivnega lomnega količnika valovoda z uporabo Mach-Zehnderjevega interferometra.

Abstract

Integrated silicon photonics has gained significant attraction in various technology fields such as optical communications, sensing, data processing and transfer. In this contribution we present a simple optical chip which was designed to perform different tests. In particular we show the results of determination of an actual effective refractive index of an integrated waveguide by using Mach-Zehnder interferometer.

Biografija predavatelja

Andrej Lavrič je magistriral na Univerzi v Ljubljani v letu 2019. Trenutno je mladi raziskovalec v Laboratoriju za sevanje in optiko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Področja njegovega raziskovanja so fazni šum, optoelektronika, metamateriali in mikrovalovna fotonika.

Lecturer's biography

Andrej Lavrič received his master's degree from the University of Ljubljana in 2019. He is currently working as a junior researcher and PhD candidate in the Radiation and Optics Laboratory at the University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering. His research interest include phase noise, optoelectronics, metamaterials and microwave photonics.

Določanje dejanskega efektivnega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem optičnem čipu

Andrej Lavrič

prof. dr. Janez Krč, izr. prof. dr. Boštjan Batagelj

Ljubljana, 2. februar 2021



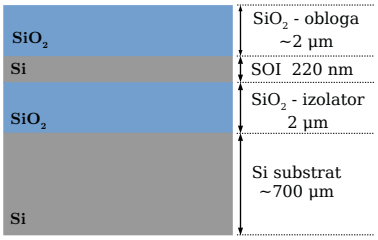
Redosled

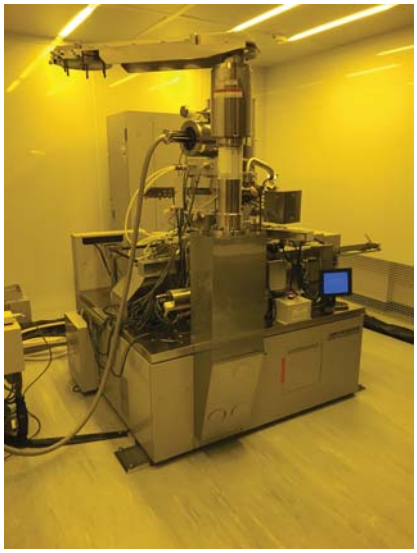
Tehnologija in izdelan čip

Delovanje MZI in efektivni lomni količnik

Rezultati meritev in analiza

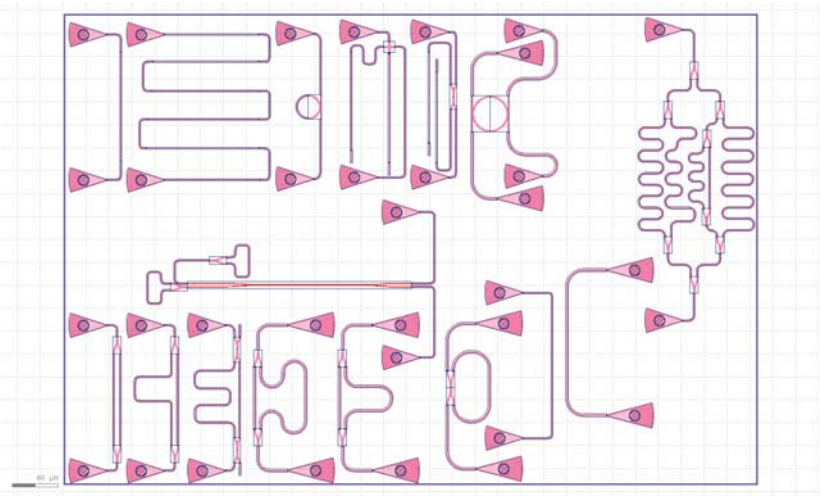
SOI in elektronski snop





3 / 11

Izdelan čip



4 / 11

Mach-Zehnderjev interferometer

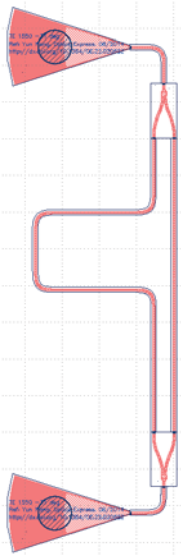
$$E_{o1} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-j\beta_1 L_1} \text{ in } E_{o2} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-j\beta_2 L_2}$$

$$T_{MZI}(\lambda) = \frac{1}{4}\left|1 + e^{-j\beta(\lambda)\Delta L}\right|^2$$

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi n_{eff}(\lambda)}{\lambda}$$

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g \Delta L}$$

$$\Delta L = 57,48 \text{ µm}$$



5 / 11

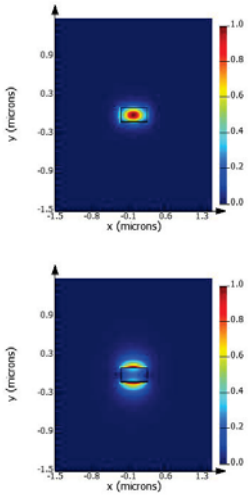
Efektivni lomni količnik

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi n_{eff}(\lambda)}{\lambda}$$

$$n_{eff}(\lambda) = n_1 + n_2(\lambda - \lambda_0) + n_3(\lambda - \lambda_0)^2$$

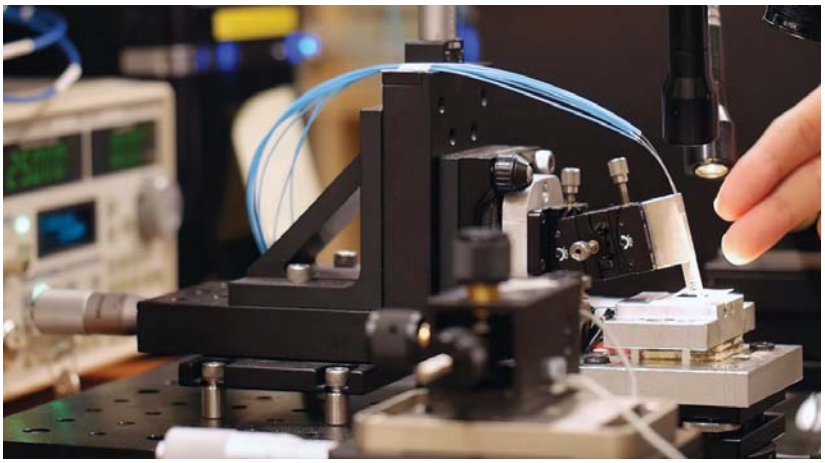
$$n_g(\lambda) = n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{eff}(\lambda)}{d\lambda}$$

	n_1	n_2	n_3	n_g
TE	2,4453	-1,1295	-0,0421	4,1960
TM	1,7727	-1,2795	1,8131	3,7559



6 / 11

Merilna postavitev



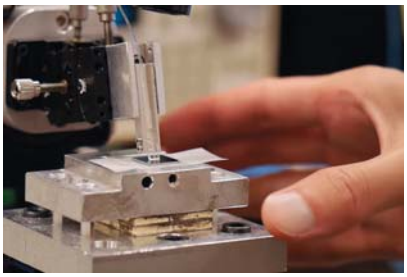
https://youtu.be/R0Tbjth_d-Y

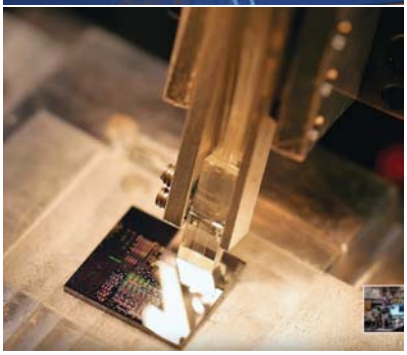
7 / 11

Merilna postavitev



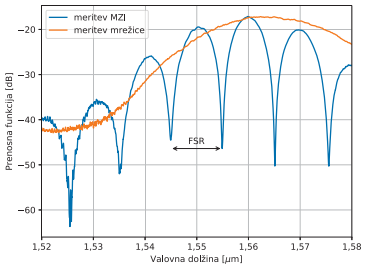


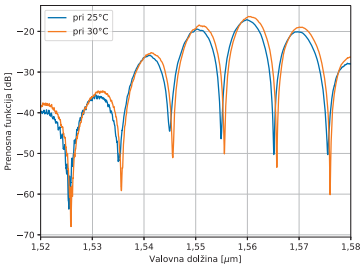




8 / 11

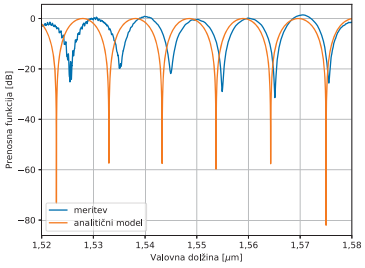
Rezultati meritev

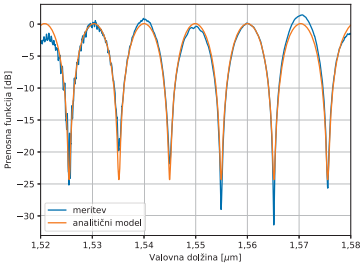




9 / 11

Analiza meritev





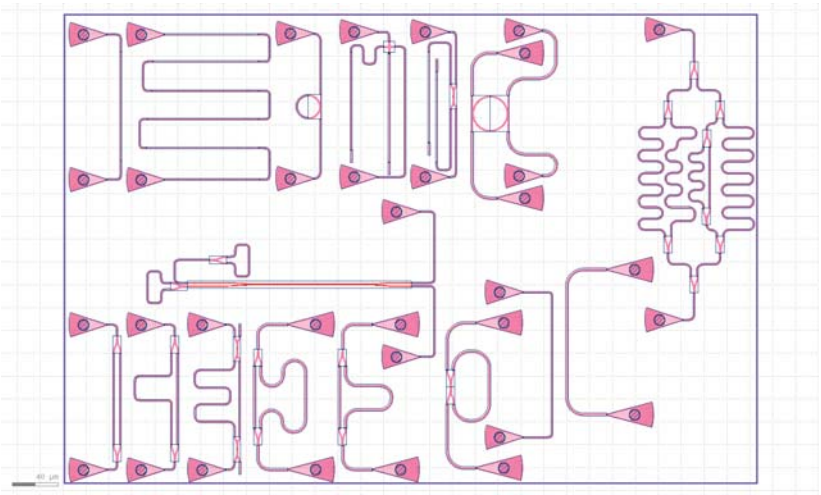
$$T_{MZI}(\lambda) = \frac{1}{4}\left|1 + e^{-j\beta(\lambda)\Delta L}\right|^2$$

$$n_{eff}(\lambda) = n_1 + n_2(\lambda - \lambda_0) + n_3(\lambda - \lambda_0)^2$$

	načrtovan	dejanski	abs. napaka	rel. napaka
n_{eff}	2,4453	2,4537	0,0084	0,34
n_g	4,2044	4,1819	-0,0225	-0,54

10 / 11

Vprašanja?



Premostitev presihanja moči v optični komunikacijski zvezi z uporabo integrirane mikrovalovne fotonike

Overcoming the power fading in optical communication link with the use of integrated microwave photonics

Kristjan Vuk Baliž in Boštjan Batagelj
UL FE, Laboratorij za sevanje in optiko

Andraž Debevc in Janez Krč
UL FE, Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko

kristjan.vuk-baliz@fe.uni-lj.si

Povzetek

Prispevek proučuje ukrep dušenja stranskega boka pri optični intenzitetni modulaciji v milimetrskem področju z uporabo rešitve integrirane mikrovalovne fotonike na osnovi obročnega resonatorja. Za ta namen je bila v laboratorijskem okolju vzpostavljena merilna konfiguracija, s pomočjo katere je bil uporabljen pristop tudi kvantitativno ovrednoten. Dosežena je bila izravnava prevajalne funkcije optične (vlakenske) zveze v širokem pasu modulacijskih frekvenc (34-44 GHz).

Abstract

This paper examines a side-band suppression approach in optical intensity modulation in the mm-wave region based on the integrated microwave photonic application, i.e. integrated micro-ring resonator. For this purpose, an experimental setup was established in a laboratory environment, and used for quantitative evaluation of the applied approach. The conducted transfer function of optical fiber link was equalized for a wide range of modulation frequencies (between 34-44 GHz).

Biografija predavatelja

Kristjan Vuk Baliž je leta 2019 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen na delovnem mestu (pedagoškega) asistenta na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Interesna področja njegovega raziskovanja vključujejo mikrovalovno fotoniko, elektromagnetno sevanje in razširjanje valov v telekomunikacijah ter numerično analizo elektromagnetnih pojavov v valovodnih strukturah.

Lecturer's biography

Kristjan Vuk Baliž received his master's degree from the Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, in 2019. He is currently employed as an assistant teacher at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. His research interests include microwave photonics, electromagnetic radiation and wave propagation in telecommunications and numerical analysis of electromagnetic phenomena inside waveguide structures.



Premostitev presihanja moči v optični komunikacijski zvezi z uporabo integrirane mikrovalovne fotonike

Kristjan Vuk Baliž, Boštjan Batagelj
Laboratorij za sevanje in optiko
kristjan.vuk@fe.uni-lj.si

Andraž Debevc, Janez Krč
Laboratorij za fotovoltaiko in optoelektroniko

Pregled

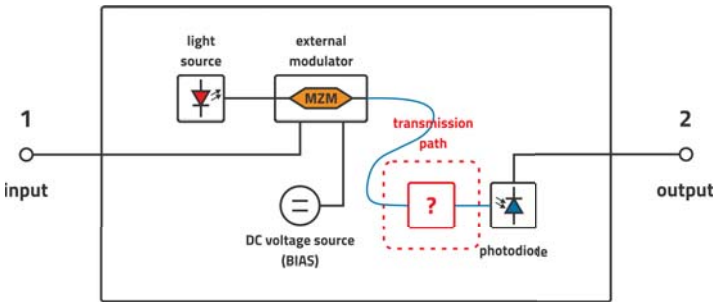
- Uvod
- Presihanje moči
- Premostitev pojava
- PIC: obročni resonator
- Merilna konfiguracija
- Merilni rezultati

MWP signal processing, i.e., filtering

A system for generation, detection and/or processing of microwave signals by means of photonic technologies.

MWP Filter:

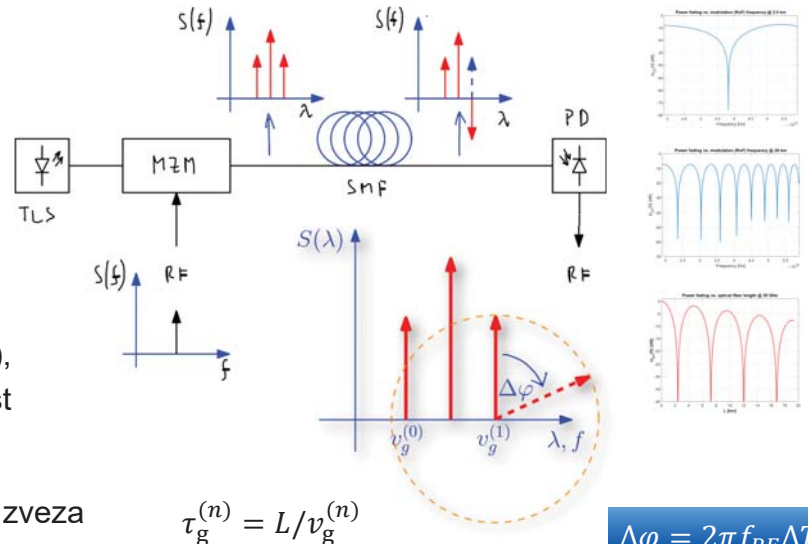
1. Laser source
2. External modulator (e.g. MZM)
3. DC voltage supply for BIAS
4. Transmission path (e.g. Optical fiber, free space)
5. Photodetector (e.g. Photodiode)



LSO 3

Presihanje moči

- Intenzitetna (dvobočna) modulacija
  - tritonski optični signal!
- Krivec: barvna razpršitev; valovno-dolžinsko odvisna skupinska hitrost
- Pojav odvisen od parametrov optične zveze: dolžina prenosne poti (vlakna), modulacijska frekvenca, disperzivnost medija, lomni količnik
- Protiukrepi: kompenzacija disperzije, zveza v II. Valovnem oknu, nizek produkt $B \cdot L$, prenos z dvotonskim signalom



$$\tau_g^{(n)} = L/v_g^{(n)}$$

$$\Delta\tau_g = \tau_g^{(1)} - \tau_g^{(0)} = 2D|\Delta\lambda|L$$

$$\Delta\varphi = 2\pi f_{RF}\Delta T_g$$

LSO 4

Presihanje moči (frekvenčno)

- Demonstracija pojava v odvisnosti od modulacijske frekvence (~0-59 GHz) oz. dolžine prenosne poti (0-20 km).
- Analitičen izračun ter izris funkcijskih odvisnosti pojava
- Meroslovni prikaz pojava

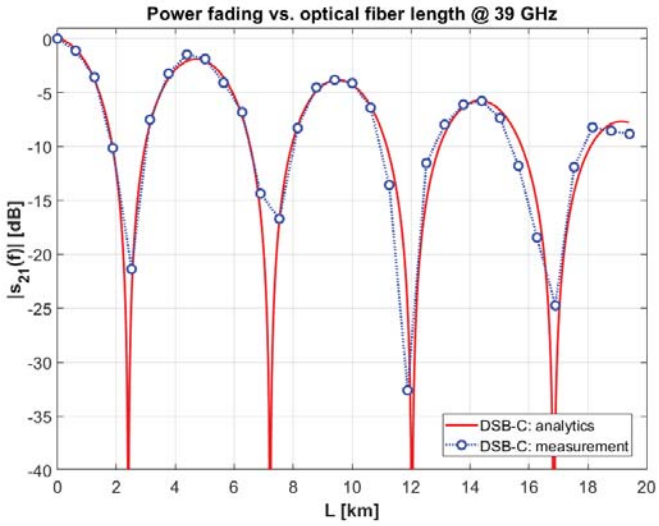
$$PP[\mathrm{dB}] = 10\log\cos^2(\pi\, f_{\mathrm{RF}}\, D\, 2\Delta\lambda\, L) - 2aL$$

$\Delta\lambda$ - premik bokov glede na nosilec

f_{RF} - frekvenca modulacijskega signala

L - dolžina (optične) prenosne poti

a - slabljenje optičnega vlakna



Presihanje moči (dolžinsko)

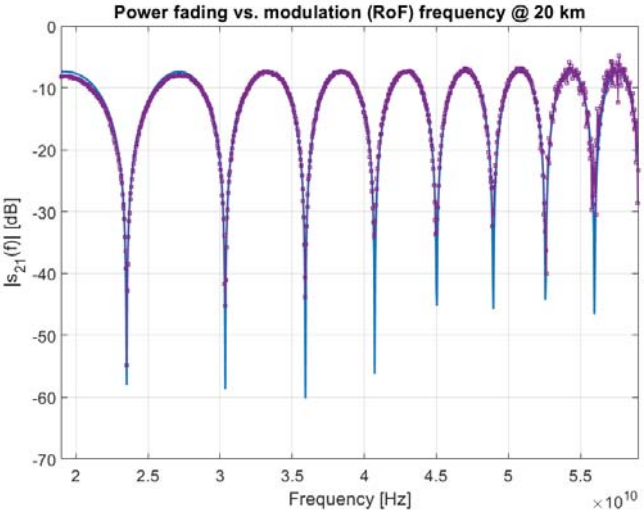
- Demonstracija pojava v odvisnosti od modulacijske frekvence (~0-59 GHz) oz. dolžine prenosne poti (0-20 km).
- Analitičen izračun ter izris funkcijskih odvisnosti pojava
- Meroslovni prikaz pojava

$$PP[\mathrm{dB}] = 10\log\cos^2(\pi\, f_{\mathrm{RF}}\, D\, 2\Delta\lambda\, L)$$

$\Delta\lambda$ - premik bokov glede na nosilec

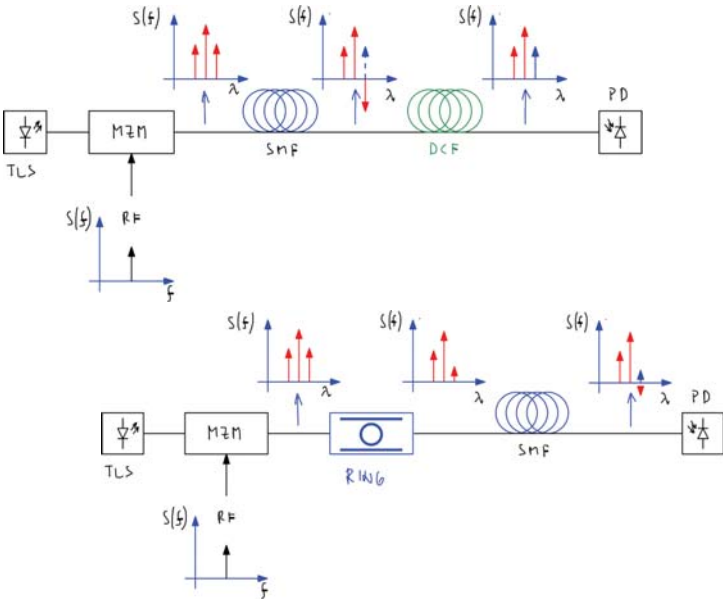
f_{RF} - frekvenca modulacijskega signala

L - dolžina (optične) prenosne poti



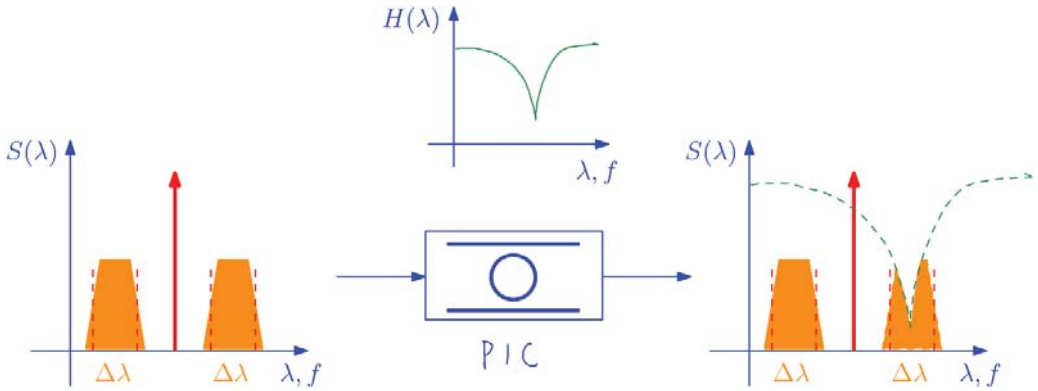
Premostitev pojava

- Kompenzacija disperzije (odvisno od dolžine)
  - Vlakno za kompenzacijo disperzije
  - Zveza v II. valovnem oknu (izničenje snovne in barvne razpršitve)
  - Nastavljiv modul za kompenzacijo disperzije
- Prenos v “dvotonskem” načinu (pogojno odvisno od frekvence, pasovne širine)
  - Dušenje boka z uporabo optičnih sit
    - Obročni resonator na PIC-u



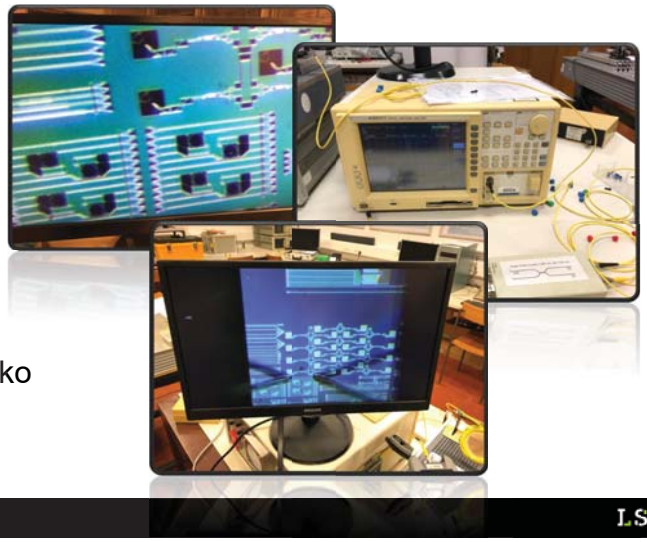
Premostitev pojava

- Od nič različna pasovna širina modulacijskega signala



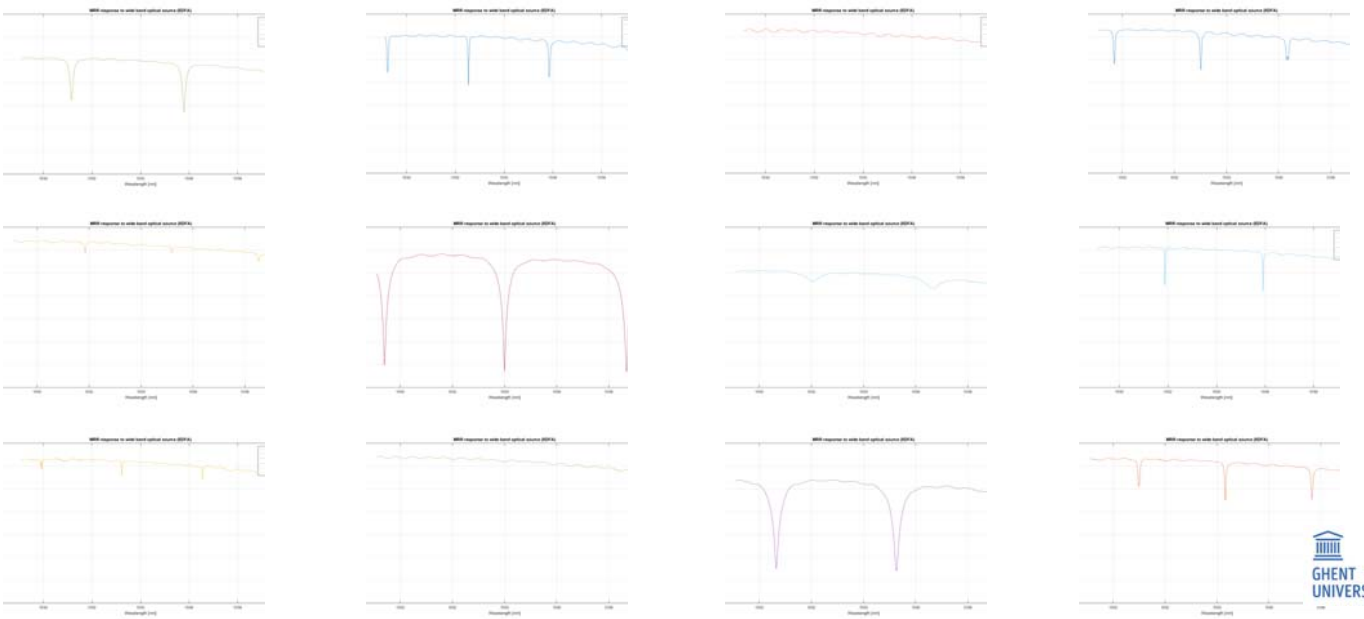
Premostitev pojava

- Uporabljen pristop: dušenje stranskega boka z obročnim resonatorjem na integriranem fotonskem vezju (PIC)
- Izzivi:
  - identifikacija primerne strukture na dostopnem PIC-u
  - ovrednotenje karakterističnih parametrov potencialnih struktur
  - sklop svetlobe iz SM vlaken v PIC preko grabličastih sklopnikov
- Vzpostavitev merilne konfiguracije za ovrednotenje učinkovitosti pristopa



GHENT UNIVERSITY

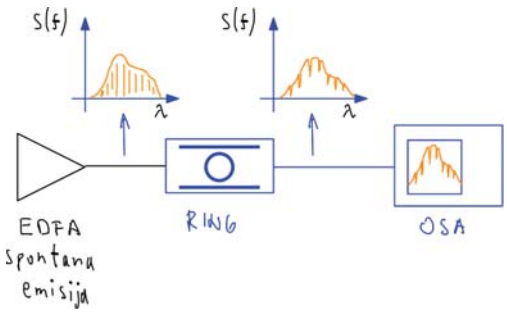
Obročni resonator

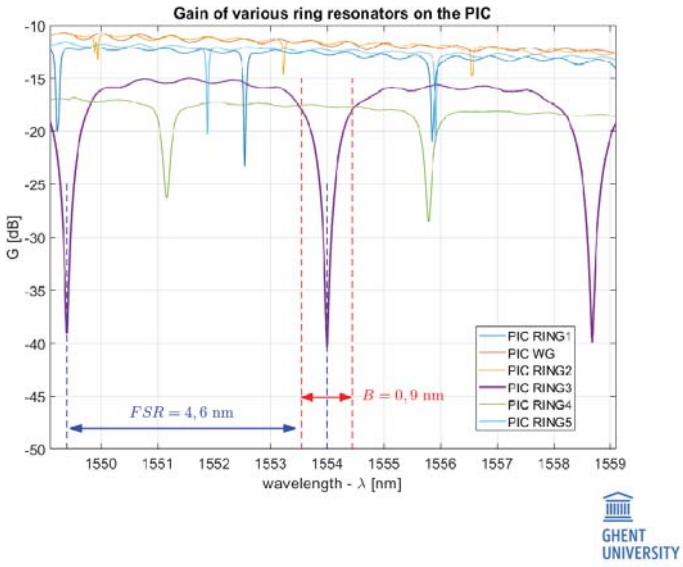


GHENT UNIVERSITY

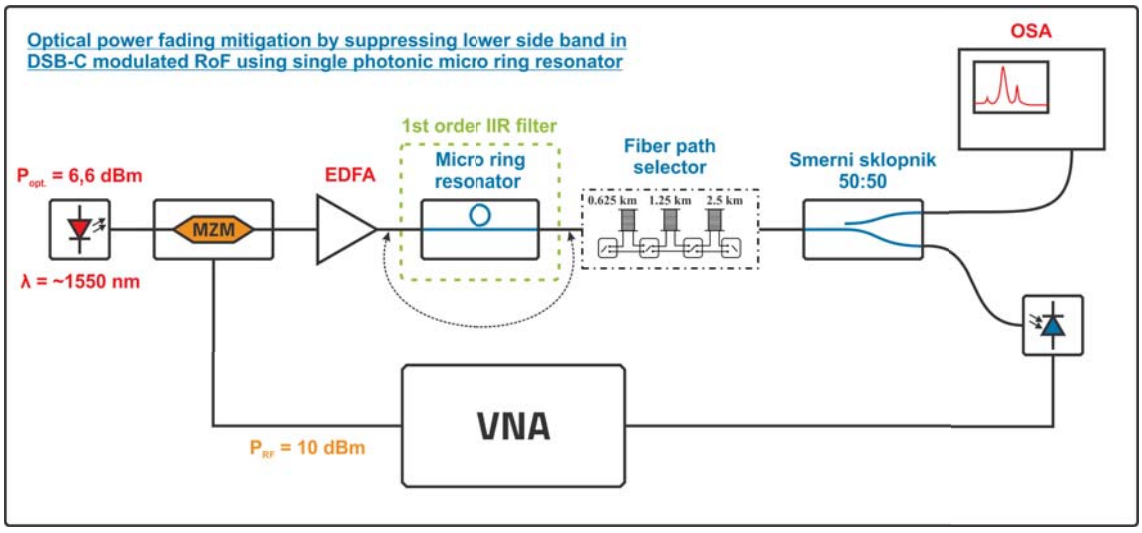
Ovrednotenje

- Vzbujanje s širokopasovnim optičnim virom (EDFA)
- Meritev sprejete optične moči z OSA
- Ocena ugasnega razmerja
- Ocena periode sita

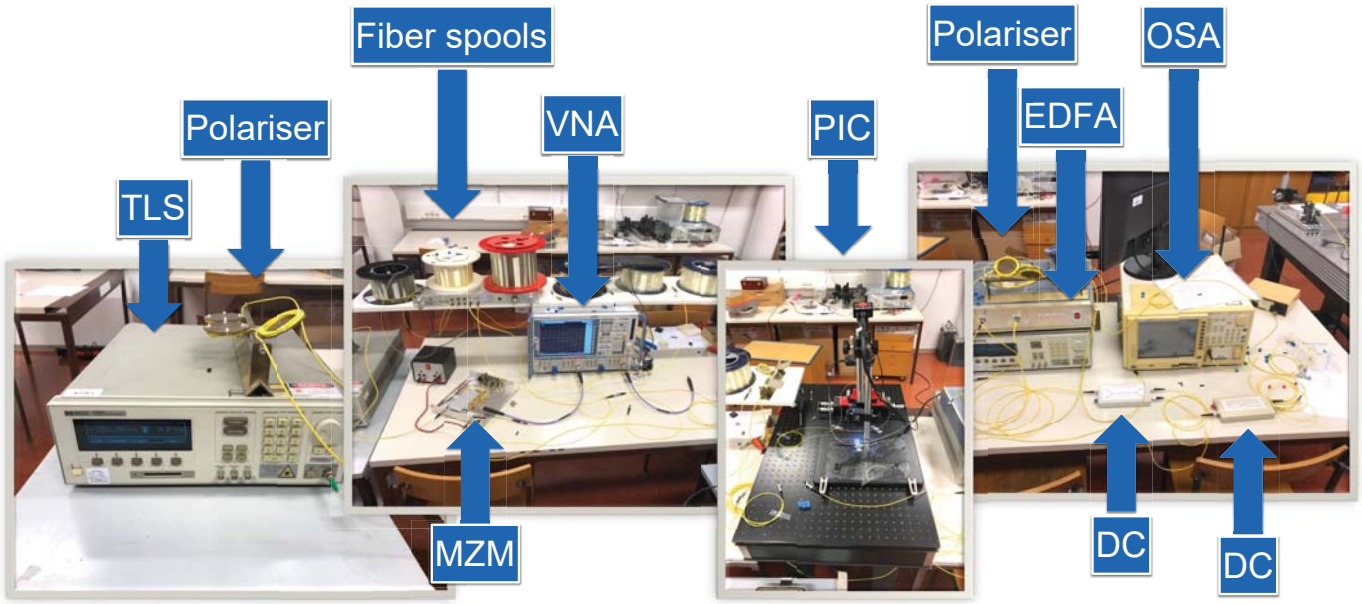




Merilna konfiguracija

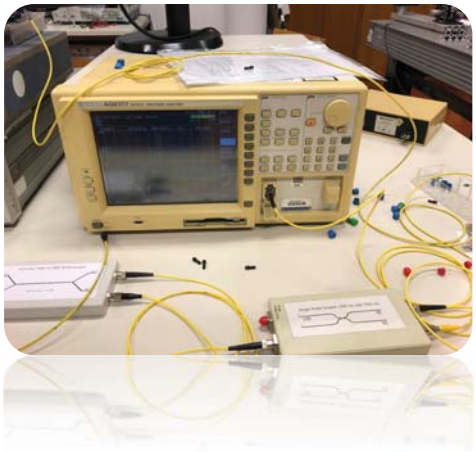


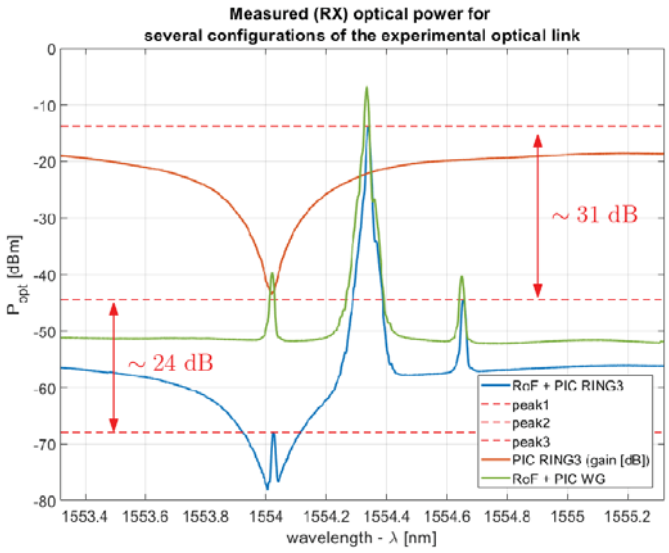
Merilna konfiguracija



Merilni rezultati

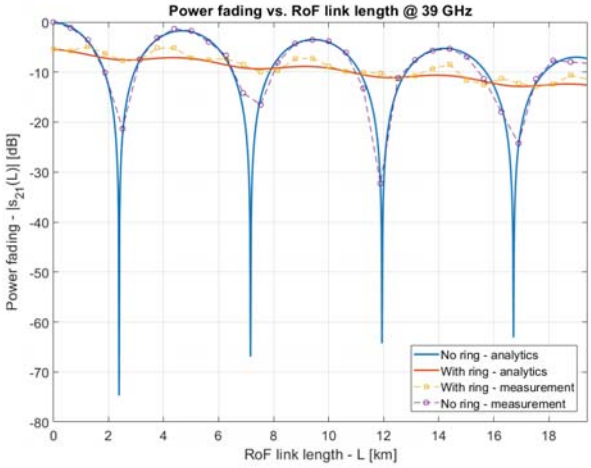
- Optični spekter signala RoF



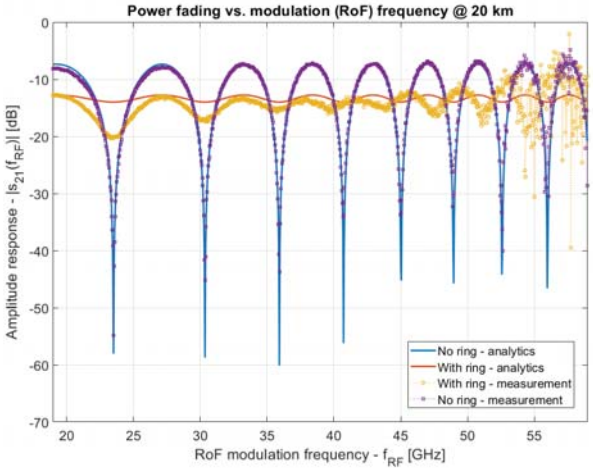


Merilni rezultati

Presihanje v odvisnosti od dolžine vlakna pri fiksni modulaciji ($f_\mathrm{m} = 39\ \mathrm{GHz}$)

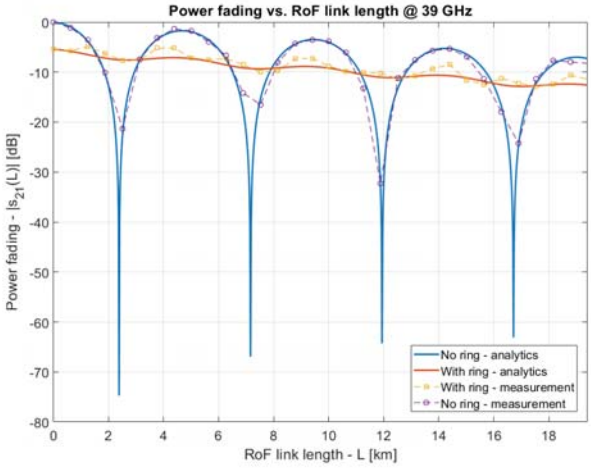


Prevajalna funkcija sistema: amp. odziv pri fiksni dolžini ($L = 20\ \mathrm{km}$)

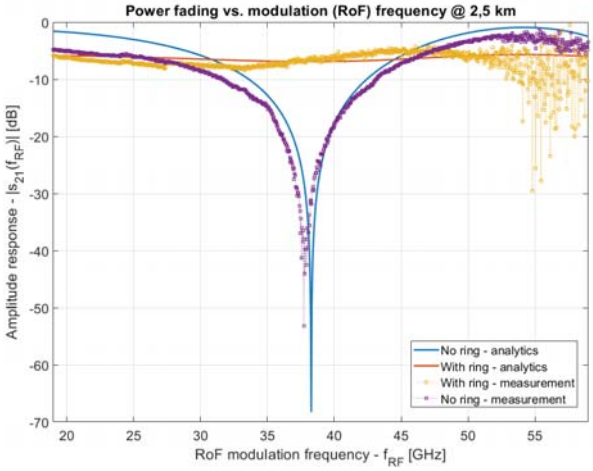


Merilni rezultati

Presihanje v odvisnosti od dolžine vlakna pri fiksni modulaciji ($f_\mathrm{m} = 39\ \mathrm{GHz}$)



Prevajalna funkcija sistema: amp. odziv pri fiksni dolžini ($L = 2{,}5\ \mathrm{km}$)



Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukepi

Optical fiber: comparison, physical background, limitations and countermeasures

Matjaž Vidmar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Katedra za informacijsko komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko

matjaz.vidmar@fe.uni-lj.si

Povzetek

Prispevek obdeluje naslednjo vsebino: vrvične in brezvrvične zveze, slabljenje koaksialnega kabla, načrtovanje koaksialnega kabla, primerjava slabljenja zvez, stekleno svetlobno vlakno, tuneliranje na krivinah, nadomestno vezje dielektrika, kompleksni lomni količnik, Rayleighjevo sipanje, slabljenje kremenovega stekla, OTDR, numerična apertura, razpršitev večpotja, zvezni lomni lik, prečna fazna resonanca, 1D valovodni rodovi, polje 1D rodov, valovodni rodovi v vlaknu, hitrost svetlobe v steklu, barvna razpršitev vlakna, vlakna s premaknjeno razpršitvijo, kompenzacija barvne razpršitve, polarizacijska razpršitev, obremenitev materialov vlakna, elektrostrikcija v steklu, Brillouinovo in Ramanovo sipanje, spekter Brillouinovega sipanja, štirivalovno mešanje, prekooceanski kabel in neuspehi optike.

Biografija avtorja

Matjaž Vidmar je doktoriral leta 1992 z naslovom teme »Metoda korekcije ionosferskih pogreškov pri satelitski navigaciji in prenosu časa«. V ZDA je razvijal satelitske oddajnike za organizacijo AMSAT. V sklopu sodelovanja z AMSAT-om je sodeloval pri razvoju komunikacijske in navigacijske opreme za satelit "AMSAT-Phase-3D", ki je bil uspešno izstreljen v novembru 2000. Profesor Vidmar trenutno poučuje dodiplomske in podiplomske predmete s področja telekomunikacij na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo področje dela je mikrovalovna elektronika, ki obsega področja od letalske industrije do optičnih komunikacij.

Author's biography

Matjaž Vidmar received his PhD in 1992 from the University of Ljubljana, for developing a single frequency GPS ionospheric correction receiver. Mr. Vidmar is currently teaching undergraduate and postgraduate courses in Electrical Engineering at the University of Ljubljana, where he serves as head of the Radiation and Optics Laboratory (LSO) at the department for Electrical Engineering (FE). His current research interests include microwave and high speed electronics ranging from avionics to optical-fiber communications. Under his leadership, the LSO developed most of the 10Gbps electronics (pulse modulator, clock recovery) used in the Ester (ACTS 063) project and many 40Gbps circuits used in the ATLAS (IST 10626) project: EAM drivers, transmitter clock distribution, 40Gbps and 80Gbps clock-recovery circuits and 40Gbps PMD compensation receiver electronics. Mr. Vidmar also developed and built satellite hardware flown in space in 1990 on the Microsat mission and in 2000 on the AMSAT-P3D satellite.).

25. seminar optične komunikacije 4-5.2.2021

Svetlobno vlakno: primerjava, fizikalne osnove, omejitve in protiukrepi

Matjaž Vidmar

---------- Seznam slik ----------

Slika 1 − Vrvične in brezvrvične zveze
Slika 2 − Slabljenje koaksialnega kabla
Slika 3 − Načrtovanje koaksialnega kabla
Slika 4 − Primerjava slabljenja zvez
Slika 5 − Stekleno svetlobno vlakno
Slika 6 − Tuneliranje na krivinah
Slika 7 − Nadomestno vezje dielektrika
Slika 8 − Kompleksni lomni količnik
Slika 9 − Rayleighjevo sipanje
Slika 10 − Slabljenje kremenovega stekla
Slika 11 − OTDR
Slika 12 − Numerična apertura
Slika 13 − Razpršitev večpotja
Slika 14 − Zvezni lomni lik
Slika 15 − Prečna fazna rezonanca
Slika 16 − 1D valovodni rodovi
Slika 17 − Polje 1D rodov
Slika 18 − Valovodni rodovi v vlaknu
Slika 19 − Hitrost svetlobe v steklu
Slika 20 − Barvna razpršitev vlakna
Slika 21 − Vlakna s premaknjeno razpršitvijo
Slika 22 − Kompenzacija barvne razpršitve
Slika 23 − Polarizacijska razpršitev
Slika 24 − Obremenitev materialov vlakna
Slika 25 − Elektrostrikcija v steklu
Slika 26 − Brillouinovo in Ramanovo sipanje
Slika 27 − Spekter Brillouinovega sipanja
Slika 28 − Štirivalovno mešanje
Slika 29 − Prekooceanski kabel
Slika 30 − Neuspehi optike

Domet in zmogljivost vrvične zveze

$$Slabljenje: \quad P_{RX} = P_{TX} \cdot e^{-2\alpha r} = P_{TX} \cdot 10^{-\frac{a/l}{10} \cdot r}$$

$\alpha\,[\mathrm{Np/m}] \equiv konstanta\ slabljenja\ voda$

$r\,[\mathrm{m}] \equiv razdalja$

$a/l\,[\mathrm{dB/m}] \equiv slabljenje\ na\ enoto\ dolžine$

$B\,[\mathrm{Hz}] \equiv pasovna\ širina\ (izvedba\ ?)$

$N \equiv število\ vrvic\ (presluh\ ?)$

$B_{eff} = N \cdot B$

Domet in zmogljivost brezvrvične zveze

$$Razširjanje: \quad P_{RX} = P_{TX} \cdot \frac{A_{TX}\, A_{RX}}{\lambda_0^2 r^2}$$

$A_{TX}\,[\mathrm{m^2}] \approx d_{TX}^2 \equiv velikost\ oddajnika$

$A_{RX}\,[\mathrm{m^2}] \approx d_{RX}^2 \equiv velikost\ sprejemnika$

$\lambda_0\,[\mathrm{m}] \equiv valovna\ dolžina \qquad r\,[\mathrm{m}] \equiv razdalja$

$Pasovna\ širina \equiv B\,[\mathrm{Hz}] \ll 10\,\%\, f_0$

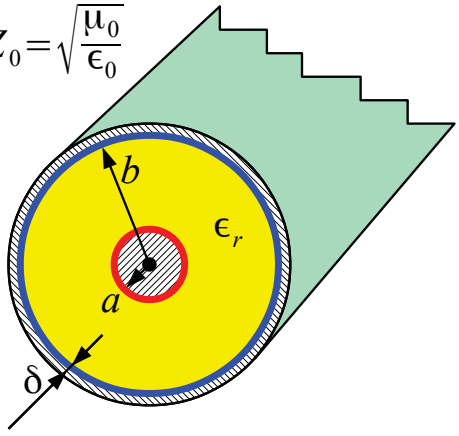
$N \equiv število\ rodov\ (motnje\ ?)$

$$Fraunhofer: \quad r \gg \frac{2\, d_{TX}\, d_{RX}}{\lambda_0} \quad \rightarrow \quad N \leq 2$$

$$Fresnel: \quad r \ll \frac{2\, d_{TX}\, d_{RX}}{\lambda_0} \quad \rightarrow \quad N \rightarrow \infty$$

1 − Vrvične in brezvrvične zveze

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$



$x = 3.6$	ϵ_r	Z_{Kopt}
zrak	1	76.9Ω
pena	1.5	62.8Ω
teflon	2.1	53.0Ω
polietilen	2.3	50.7Ω

$$Z_K = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln\frac{b}{a} \approx \frac{60\,\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\frac{b}{a} \equiv karakteristična\ impedanca$$

$$Zgled: \quad f = 100\mathrm{MHz} \qquad Baker: \quad \mu \approx \mu_0 \quad \gamma = 56 \cdot 10^6\, \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{m}}$$

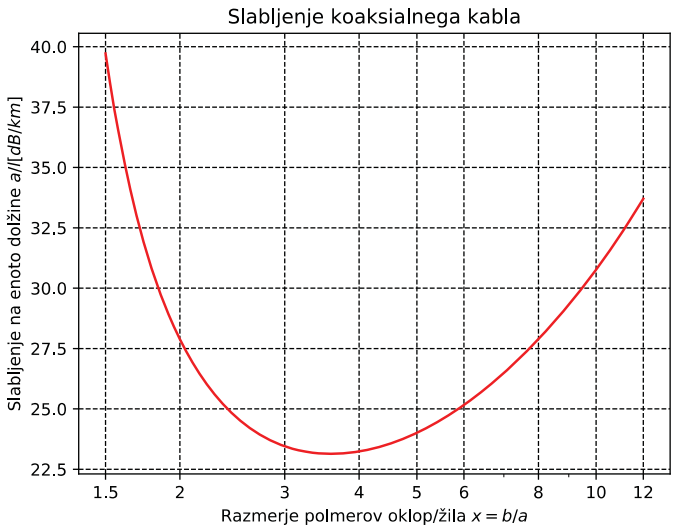
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \gamma}} \approx 6.73\,\mu\mathrm{m} \equiv vdorna\ globina\ v\ baker$$

$$R/l = R_{žile}/l + R_{oklopa}/l = \frac{1}{2\pi a \delta \gamma} + \frac{1}{2\pi b \delta \gamma} = \frac{1}{2\pi \delta \gamma}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)$$

$$\alpha\left[\frac{\mathrm{Np}}{\mathrm{m}}\right] = \frac{R/l}{2 Z_K} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2 b \delta \gamma Z_0}\left(\frac{b}{a} + 1\right) \Big/ \ln\frac{b}{a} \qquad x = \frac{b}{a}$$

$$a/l\left[\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{m}}\right] = \frac{20}{\ln 10}\alpha = \left(\frac{10\sqrt{\pi\epsilon_0}}{\ln 10}\right)\frac{1}{b}\sqrt{\frac{\epsilon_r f}{\gamma}}\left(\frac{x+1}{\ln x}\right)$$

2 − Slabljenje koaksialnega kabla



$$a/l\left[\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{m}}\right]=\left(\frac{10\sqrt{\pi\epsilon_0}}{\ln 10}\right)\frac{1}{b}\sqrt{\frac{\epsilon_r f}{\gamma}}\left(\frac{x+1}{\ln x}\right)$$

$$Zgled:\quad a=2\mathrm{mm}\quad b=7.2\mathrm{mm}$$
$$\epsilon_r=2.3\quad f=100\mathrm{MHz}\quad \gamma=56\cdot10^6\,\mathrm{S/m}$$

$$x=3.6$$

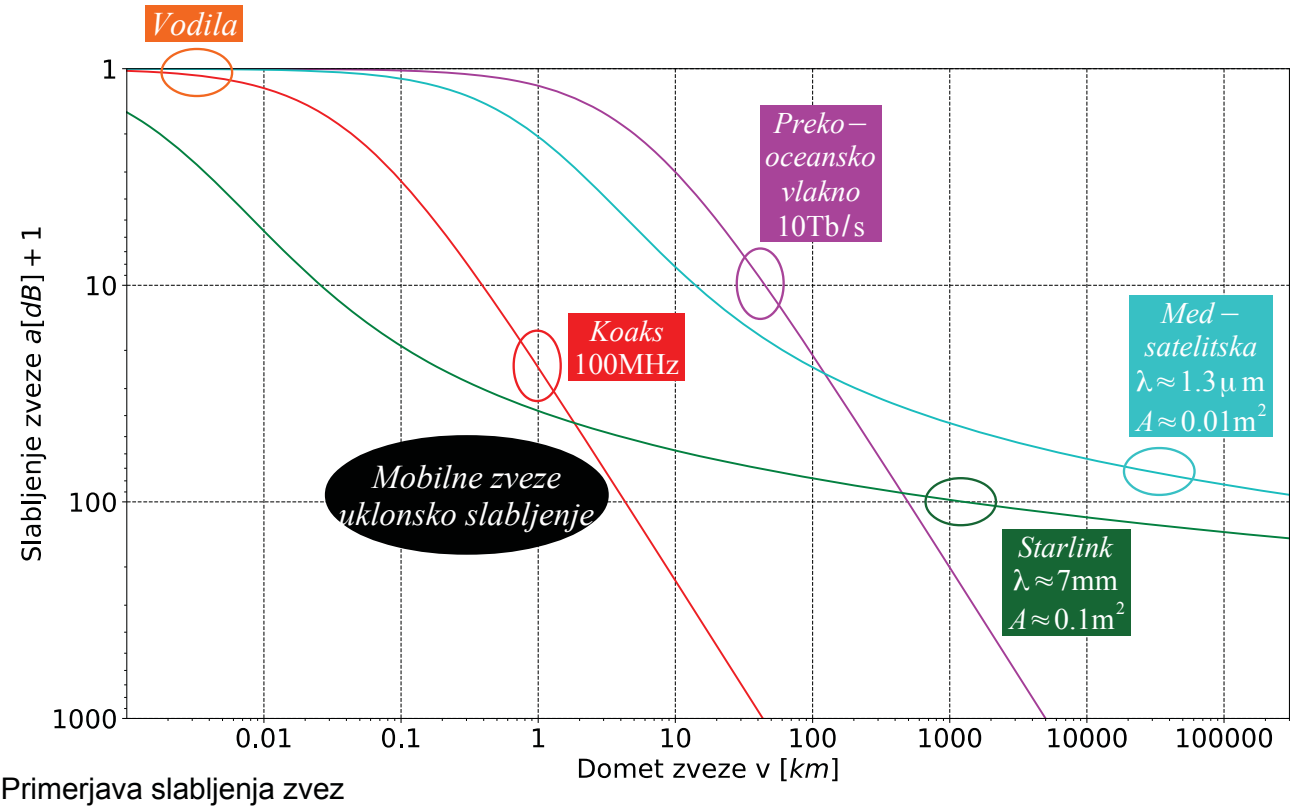
$$a/l\left[\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{m}}\right]\approx0.023\mathrm{dB/m}=23\mathrm{dB/km}$$

$$x_{MIN}=3.591121476668622\approx3.6$$

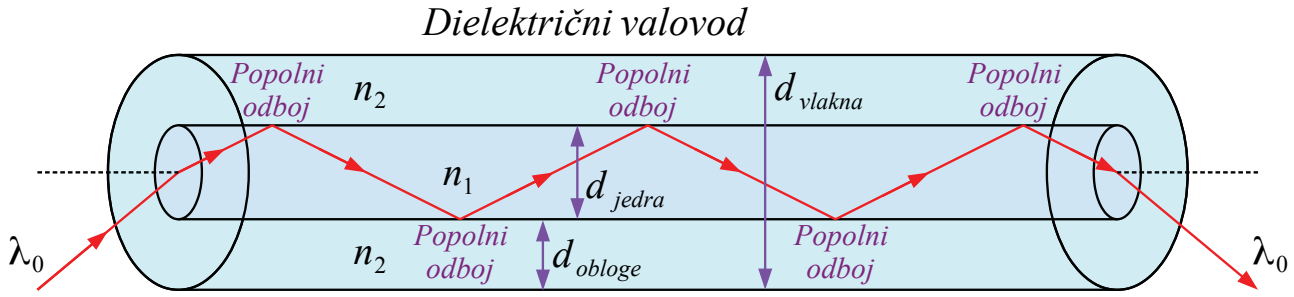
Pojav višjih valovodnih rodov:

$$f_{MAX}\approx\frac{c_0}{\pi(a+b)\sqrt{\epsilon_r}}\approx6.84\mathrm{GHz}$$

3 − Načrtovanje koaksialnega kabla



4 − Primerjava slabljenja zvez



Popolni odboj: $n_1(SiO_2+GeO_2)>n_2(SiO_2)$

TK standard: $d_{vlakna}=125\,\mu m$

$3\,\mu m<d_{jedra}<63\,\mu m$

$d_{obloge}\gg\lambda_0$

$780nm<\lambda_0<1630nm \Leftrightarrow 385THz>f_0>184THz$

Prednosti v komunikacijah:

(1) *Slabljenje*: a/l=0.15 ... 0.5dB/km

(2) *Pasovna širina*: B>4THz

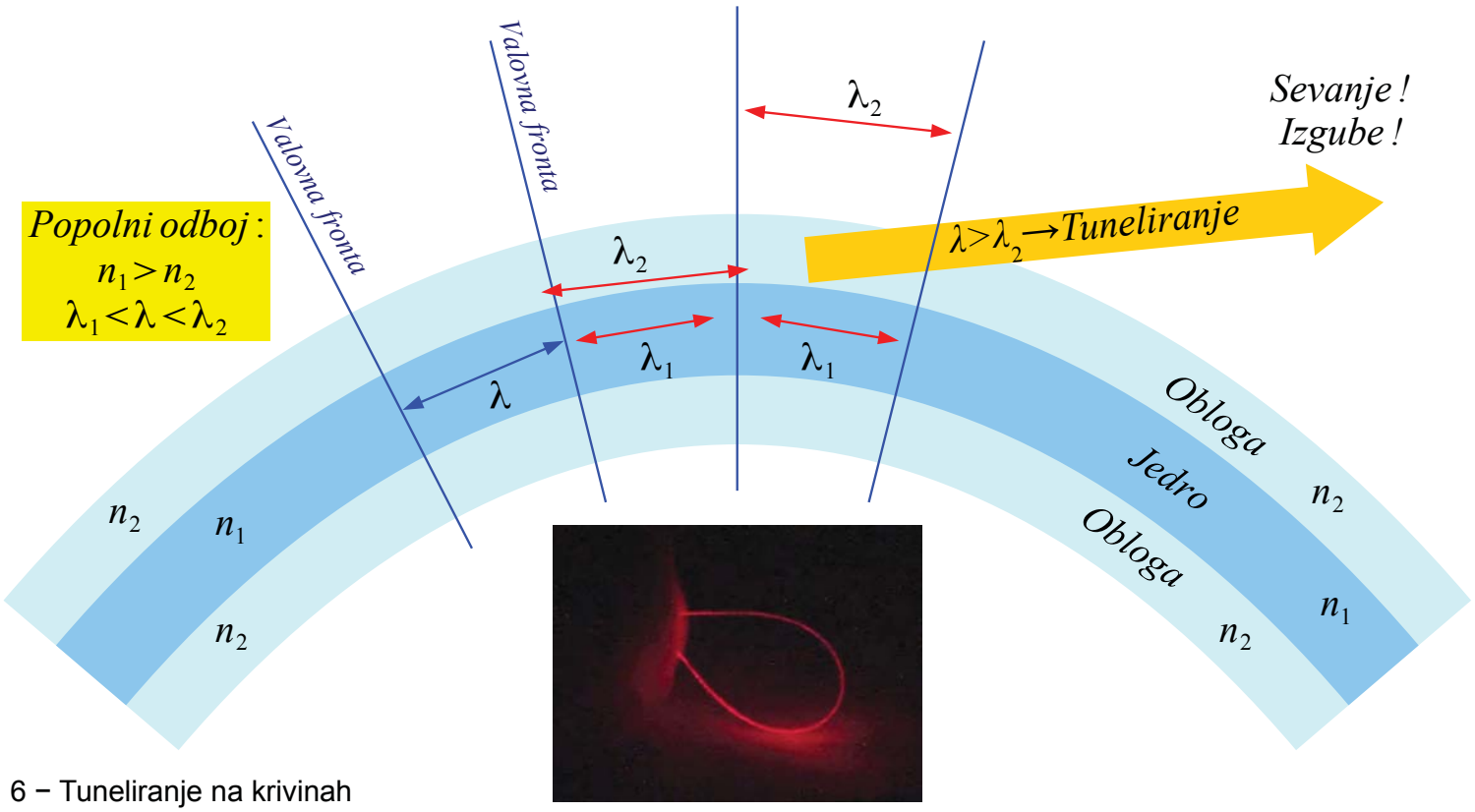
(3) *Galvanska ločitev!*

Pomanjkljivosti pri obdelavi:

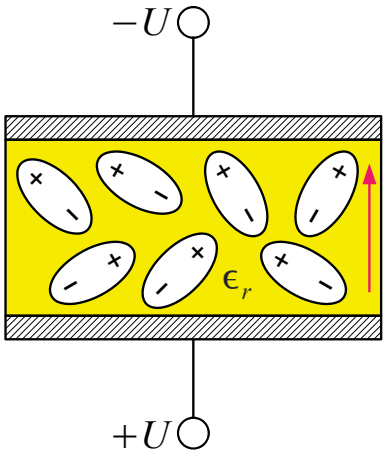
(1) *Enosmerni ojačevalnik za svetlobne frekvence (optični tranzistor) NE obstaja!*

(2) *Pasivni gradniki preveliki* d>>λ *za integracijo!*

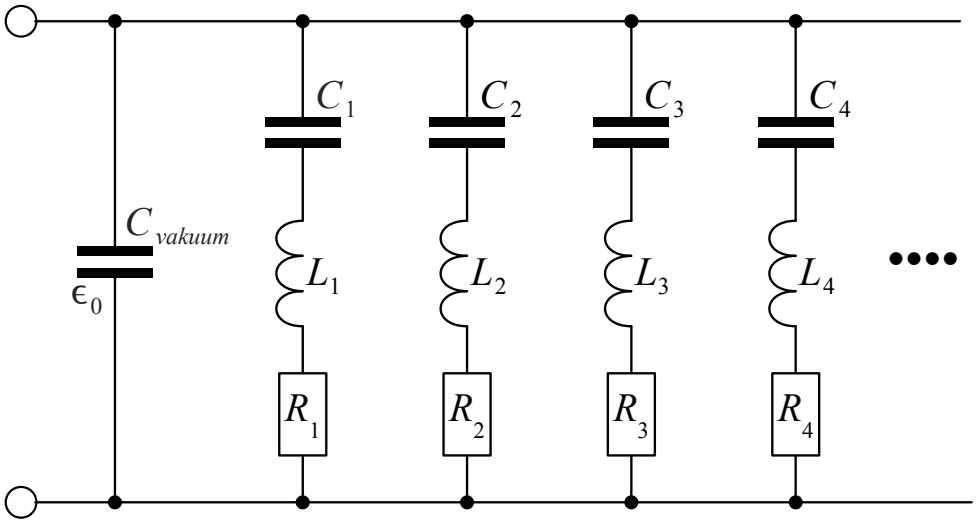
5 − Stekleno svetlobno vlakno



6 − Tuneliranje na krivinah



$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

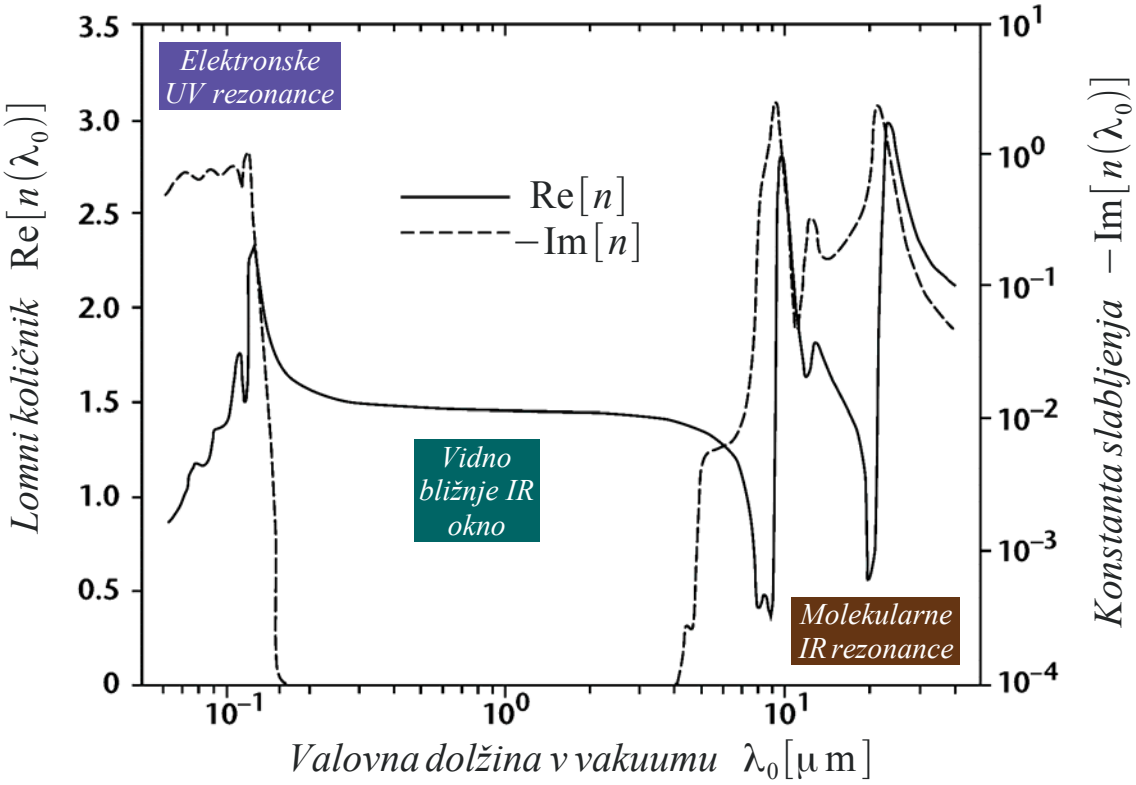


Elektronske UV rezonance $f > 1500\text{THz}$

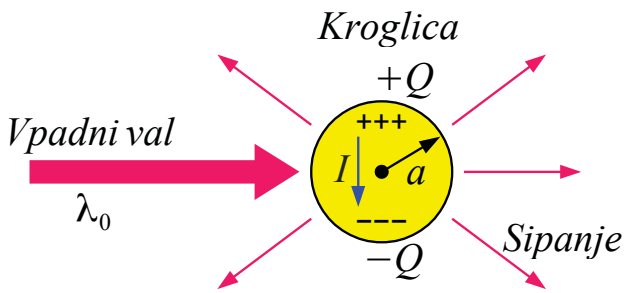
Steklo SiO_2

Molekularne IR rezonance $f < 50\text{THz}$

7 − Nadomestno vezje dielektrika



8 − Kompleksni lomni količnik



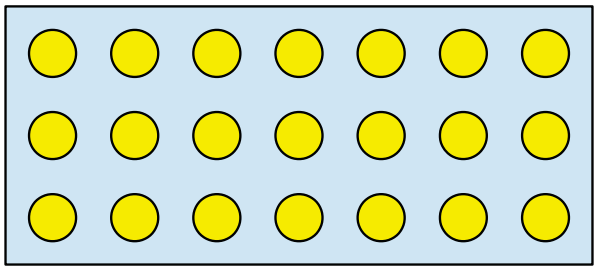
$Zveznost\ toka + elektrine: \quad j\omega Q = I \rightarrow sevanje!$

Rayleigh $a \ll \lambda_0$

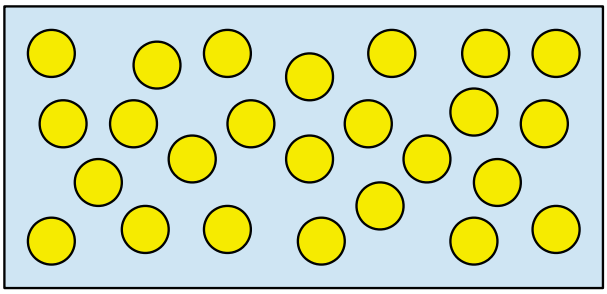
Odmevna površina kovinske kroglice $\sigma = 64\pi^5 \frac{a^6}{\lambda_0^4}$

Odmevna površina dielektrične kroglice $\sigma = 64\pi^5 \frac{a^6}{\lambda_0^4}\left|\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right|^2$

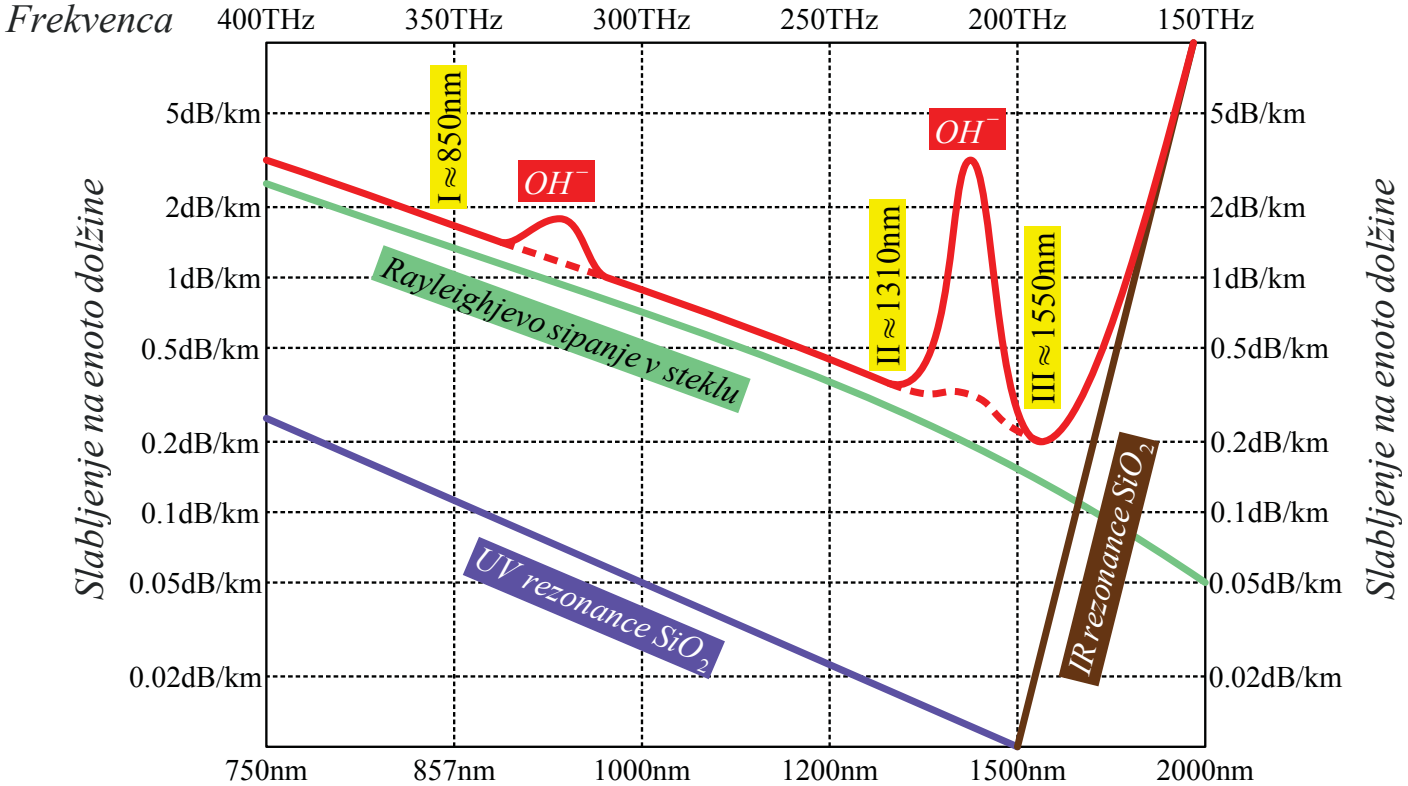
Kristal $SiO_2 \rightarrow$ *Braggov uklon*



Steklo $SiO_2 \rightarrow$ *Rayleighjevo sipanje*



9 − Rayleighjevo sipanje



10 − Slabljenje kremenovega stekla

Vlakno \ λ_0	850nm	1310nm	1550nm	1625nm
G.652 9/125		−77dB	−82dB	−83dB
NZDSF LEAF		−75dB	−81dB	−82dB
G.651 50/125	−68dB	−76dB	Γ_{1ns}	
"H" 62.5/125	−68dB	−76dB		

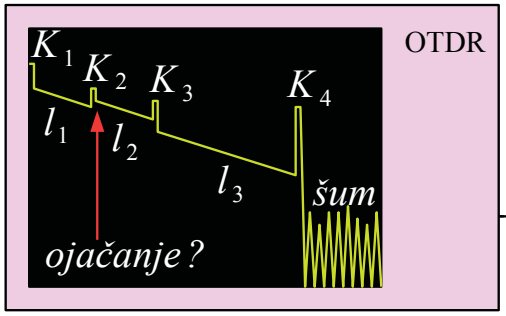
$\Gamma_{steklo/zrak} \approx -14\text{dB}$

$\Gamma_{PC/PC} \approx -40\text{dB}$

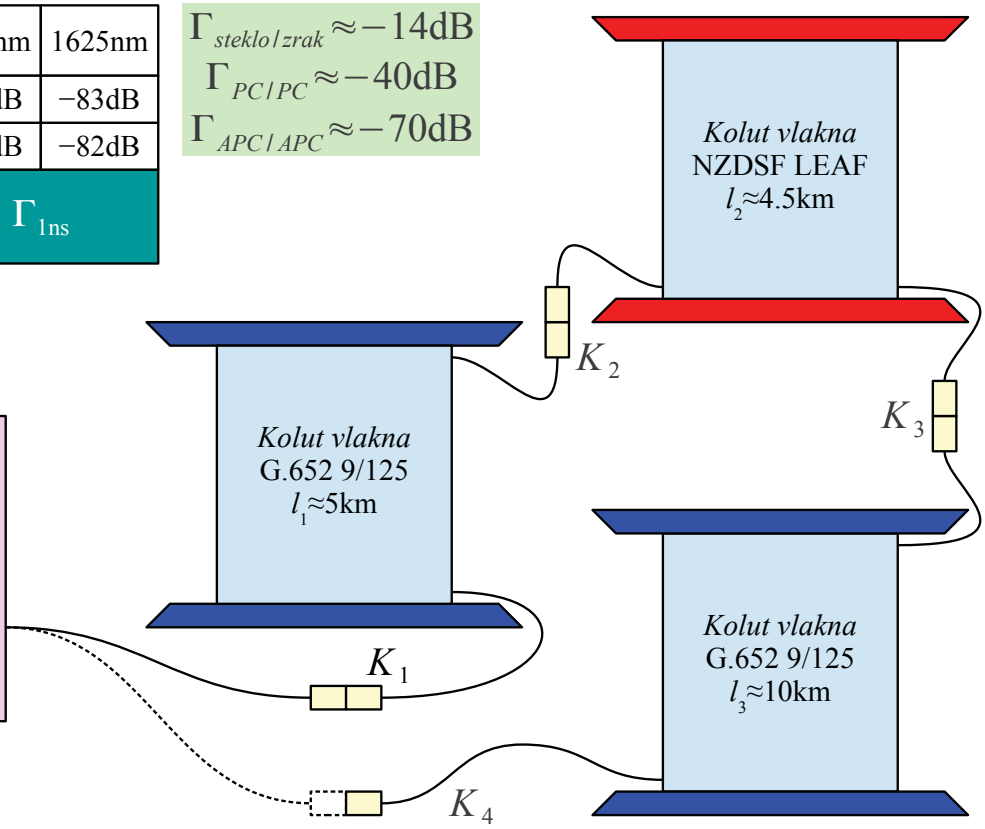
$\Gamma_{APC/APC} \approx -70\text{dB}$

$\Gamma_p = \Gamma_{1ns} + 10\log_{10}(t_p/1\text{ns})$

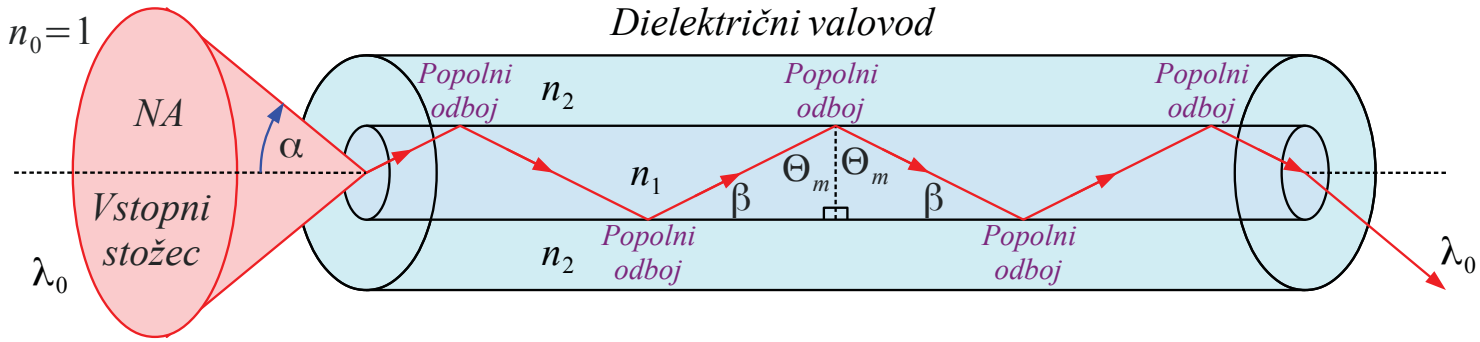
$t_p = 50\text{ns}/200\text{ns}/1\,\mu\text{s}/5\,\mu\text{s}$



$\lambda_0 = 1.31\,\mu\text{m}/1.55\,\mu\text{m}$



11 − OTDR



$\text{Relativna razlika lomnih količnikov} \equiv \Delta = \dfrac{n_1 - n_2}{n_1}$

$\text{Šibkolomno vlakno}: \quad \Delta \ll 1$

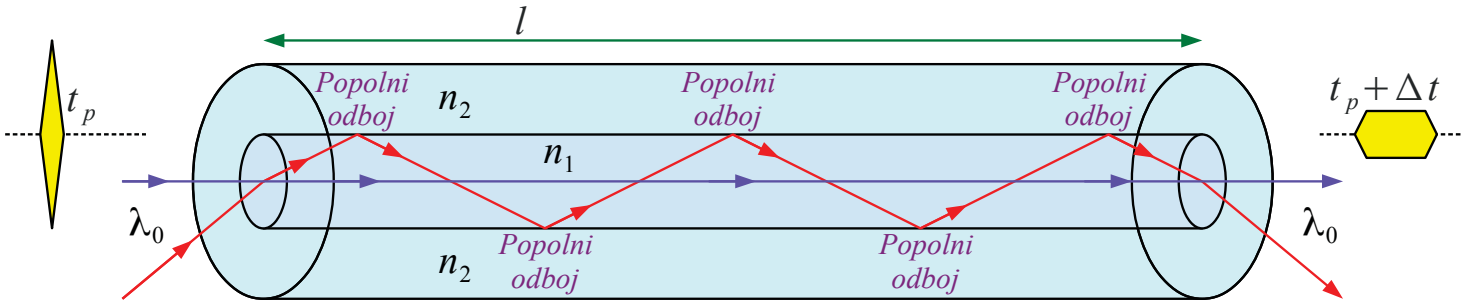
$\text{Popolni odboj}: \quad \sin\Theta \geq \sin\Theta_m = \dfrac{n_2}{n_1} = \cos\beta$

$$\text{Numerična apertura} \equiv \sin\alpha = n_1 \sin\beta = n_1\sqrt{1-\cos^2\beta} = n_1\sqrt{1-\frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$$

$$\text{Približek} \quad \Delta \ll 1 \rightarrow \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1+n_2)(n_1-n_2)} \approx \sqrt{2n_1(n_1-n_2)} = n_1\sqrt{2\Delta} \approx NA \qquad \Delta \approx \frac{NA^2}{2n_1^2}$$

$\text{Steklena vlakna}: \quad (\text{Krivine ?})\, 0.1 \leq NA \leq 0.2\, (\text{Rayleigh ?})$

12 − Numerična apertura



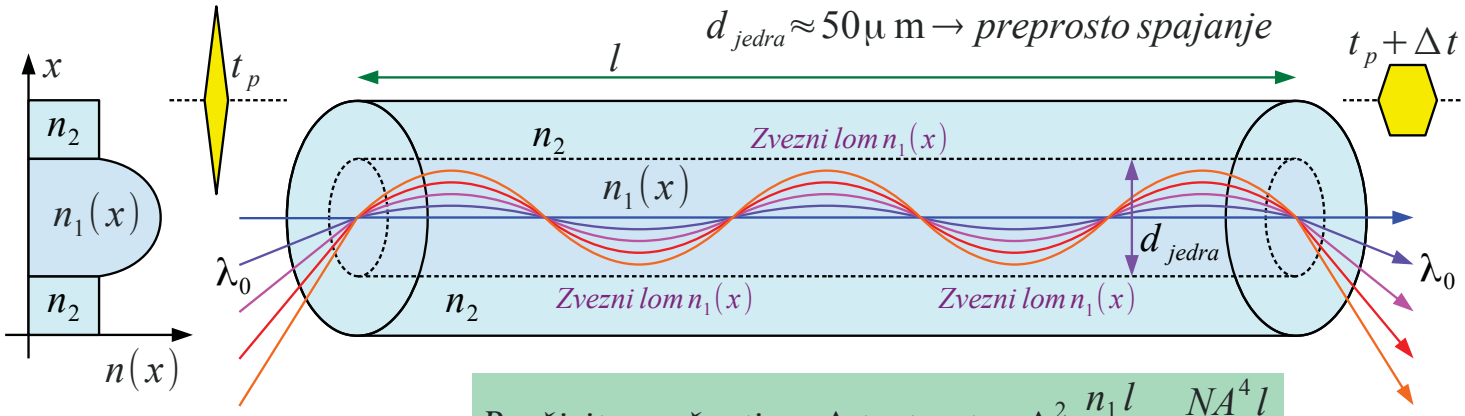
$$\textit{Ravni žarek}: \quad t_1=\frac{n_1 l}{c_0} \qquad \textit{Cikcakajoči žarek}: \quad t_2=\frac{n_1 l}{c_0 \sin\Theta_m}=\frac{n_1^2 l}{n_2 c_0}$$

$$\textit{Razpršitev večpotja}: \quad \Delta t=t_2-t_1=\frac{n_1 l}{c_0}=\left(\frac{n_1-n_2}{n_2}\right)\frac{n_1 l}{c_0}\approx\Delta\cdot\frac{n_1 l}{c_0}\approx\frac{NA^2 l}{2 n_1 c_0}$$

$$\textit{Zgled}: \quad NA=0.2 \quad l=10\text{km} \quad n_1=1.46 \;\rightarrow\; \Delta t\approx 0.46\,\mu\text{s} \;\rightarrow\; C\approx\frac{1}{3\Delta t}\approx 730\text{kb/s}$$

$$\textit{Sklopni izkoristek vira}: \quad \eta_{LED}\approx\frac{NA^2}{4}=0.01=1\,\% \qquad \textit{Neuporabno !}$$

13 − Razpršitev večpotja



$$NA=\sqrt{n_{1\,MAX}^2-n_2^2}$$

$$\textit{Razširitev večpotja}: \quad \Delta t=t_2-t_1\approx\Delta^2\cdot\frac{n_1 l}{c_0}\approx\frac{NA^4 l}{4 n_1^3 c_0}$$

$$\textit{Zgled}: \quad NA=0.2 \quad l=10\text{km} \quad n_1=1.46 \;\rightarrow\; \Delta t\approx 4.3\text{ns} \;\rightarrow\; C\approx\frac{1}{3\Delta t}\approx 78\text{Mb/s}$$

$$\Delta\approx\frac{NA^2}{2 n_1^2}\approx 0.0094$$

Standardizirano vlakno GI 50/125 ≡ ITU G.651

Prve medkrajevne zveze ~ 1980 C ~ 8Mb/s *LED* ~ 850nm

Uporaba ~ 2020: *najcenejši SFP moduli* $C\leq 1\text{Gb/s}$ @ $l\leq 100\text{m}$

14 − Zvezni lomni lik

$$Popolni\ odboj:\ \Gamma=\frac{a-jb}{a+jb}=e^{j\phi}$$

$$a_{TE}=\cos\Theta \qquad a_{TM}=(n_2/n_1)^2\cos\Theta$$

$$b=\pm\sqrt{\sin^2\Theta-(n_2/n_1)^2}$$

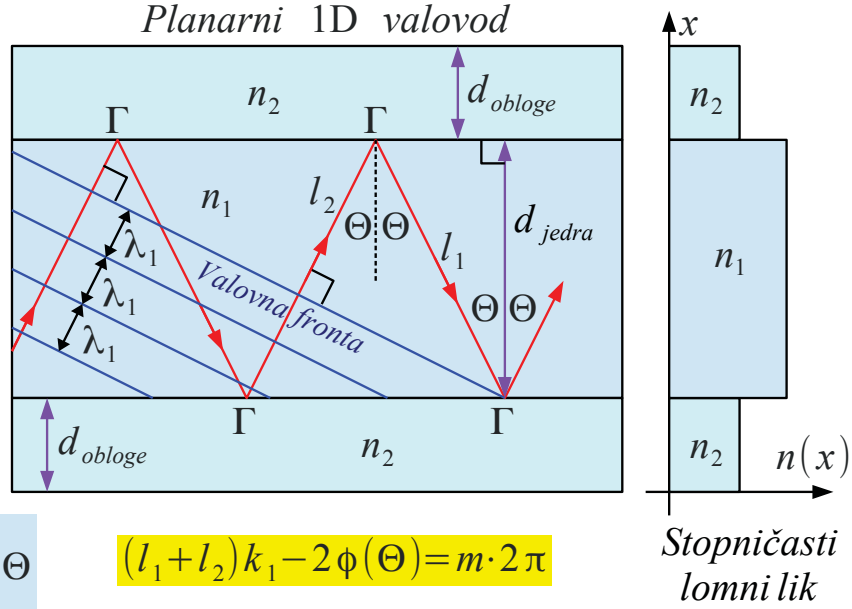
$$\phi(\Theta)=2\arctan(b/a) \qquad 0\le\phi<\pi$$

$$l_1=\frac{d_{jedra}}{\cos\Theta} \qquad l_2=l_1\cdot\cos 2\Theta$$

$$l_1+l_2=\frac{d_{jedra}}{\cos\Theta}(1+\cos 2\Theta)=2\,d_{jedra}\cos\Theta$$

$$\lambda_1=\frac{\lambda_0}{n_1} \qquad k_1=k_0 n_1=\frac{2\pi}{\lambda_0}n_1=\frac{\omega}{c_0}n_1$$

Planarni 1D valovod



Stopničasti lomni lik

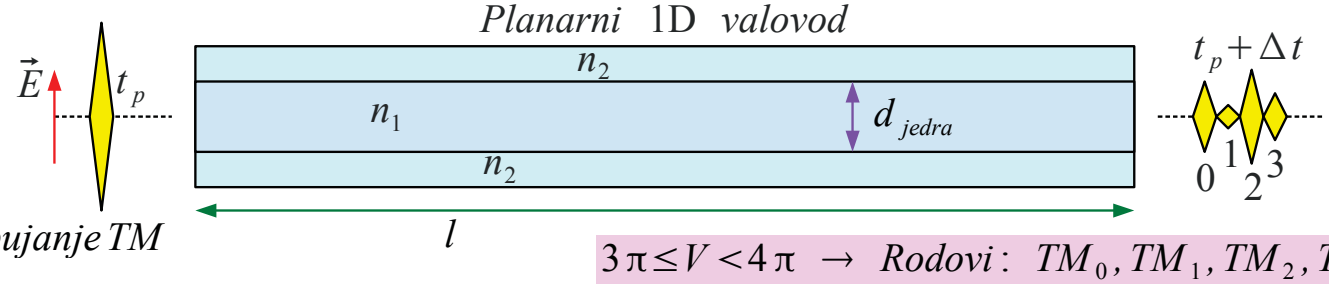
$$(l_1+l_2)k_1-2\phi(\Theta)=m\cdot 2\pi$$

$$m=0,1,2,3,4,5\ldots\equiv celo\ število$$

$$d_{jedra}\frac{\omega}{c_0}n_1\cos\Theta-\phi(\Theta)=m\cdot\pi\ \rightarrow\ \Theta=?\ \ TE\ ali\ TM\ ?$$

15 − Prečna fazna rezonanca

Planarni 1D valovod



Vzbujanje TM

$$3\pi\le V<4\pi\ \rightarrow\ Rodovi:\ TM_0, TM_1, TM_2, TM_3$$

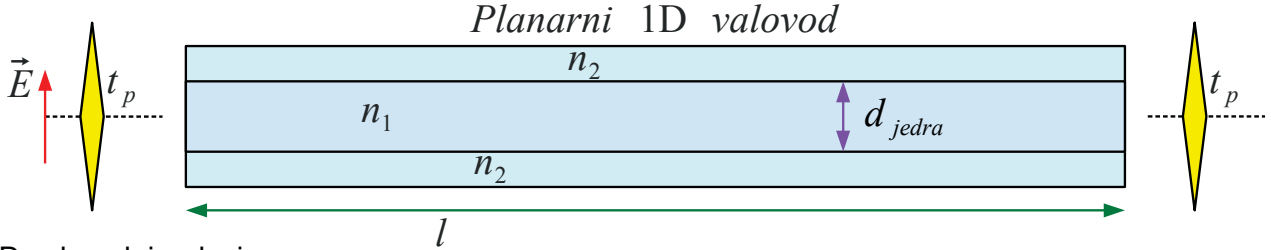
$$0<n_1\cos\Theta<n_1\cos\Theta_m=n_1\sqrt{1-\sin^2\Theta_m}=n_1\sqrt{1-(n_2/n_1)^2}=\sqrt{n_1^2-n_2^2}=NA$$

$$Normirana\ frekvenca\equiv V=d_{jedra}\frac{\omega}{c_0}n_1\cos\Theta=d_{jedra}\frac{\omega}{c_0}NA$$

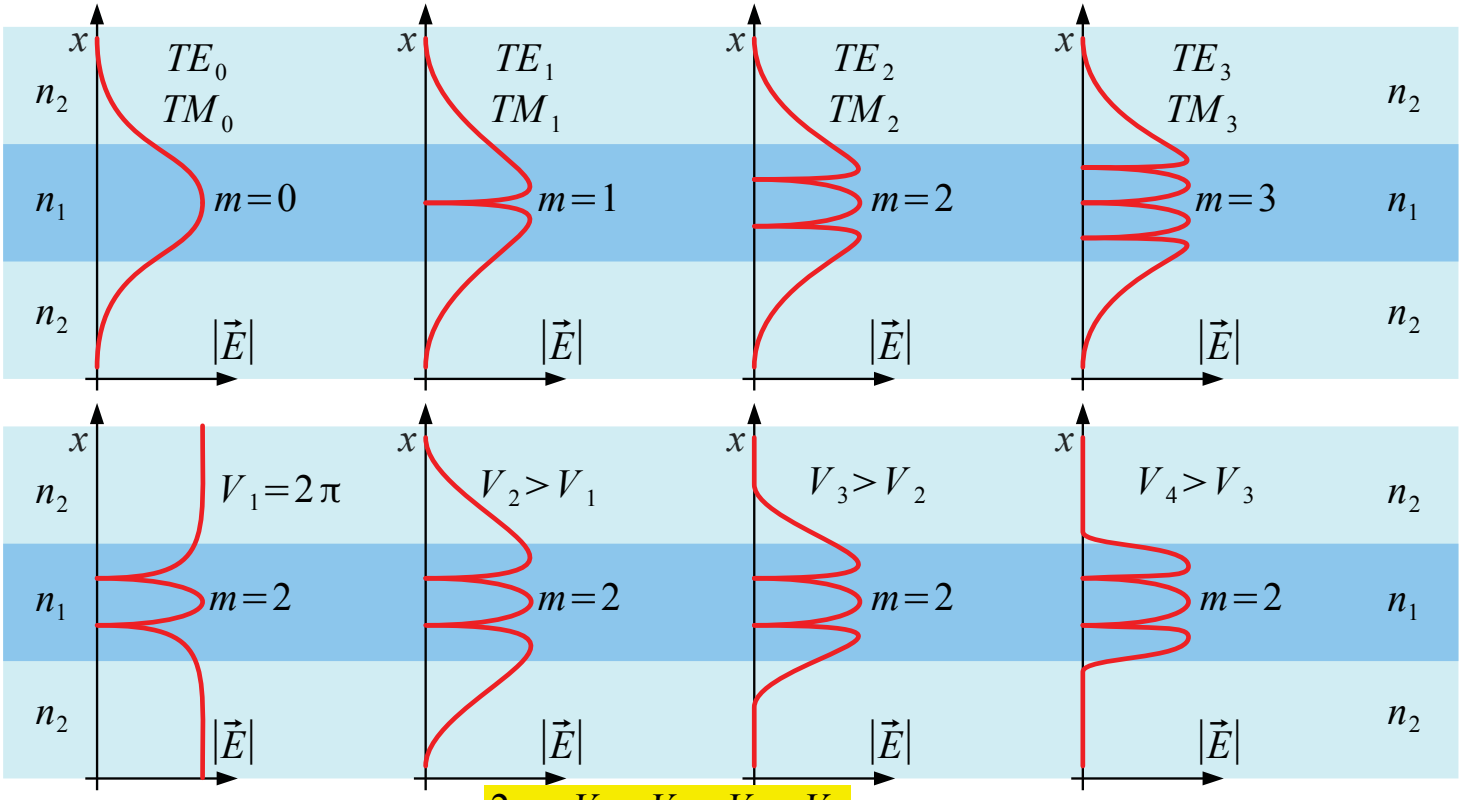
$$V<1\ \rightarrow\ Uhajanje\ polja\ v\ oblogo$$

$$0\le V<\pi\ \rightarrow\ Rod:\ TM_0$$

Planarni 1D valovod

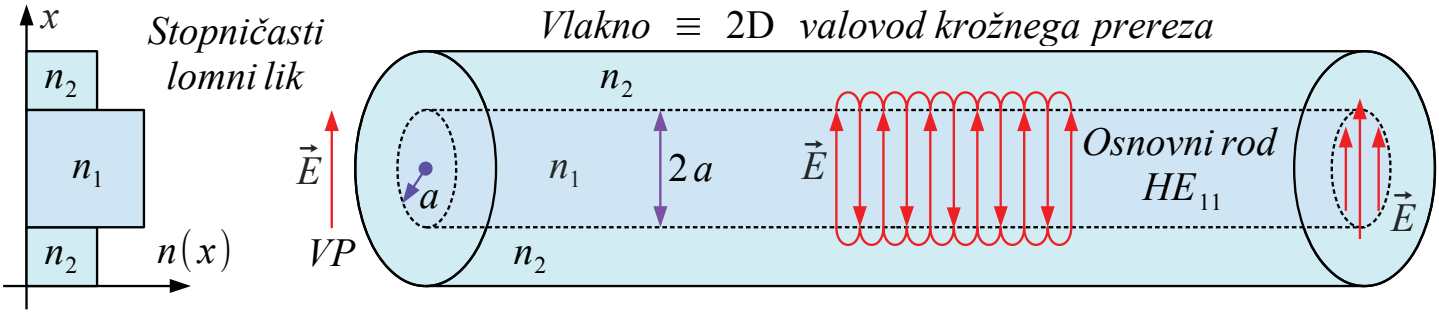


16 − 1D valovodni rodovi



17 − Polje 1D rodov

$2\pi=V_1<V_2<V_3<V_4$



$$Normirana\ frekvenca \equiv V = a\frac{2\pi}{\lambda_0}NA = a\frac{\omega}{c_0}NA$$

$0 \le V < 2.4049 \rightarrow$ *Samo* HE_{11}

$V < 1.8 \rightarrow$ *Uhajanje polja v oblogo*

$2.4049 \le V < 3.8318 \rightarrow$ *4 rodovi*

$3.8318 \le V \rightarrow \ge 7$ *rodov*

$$Bessel:\ J_0(2.4049)=0 \quad J_1(3.8318)=0$$

18 − Valovodni rodovi v vlaknu

HE_{11} *ima dve različici HP + VP !*

Standardizirano enorodovno vlakno
*9/125 ali 10/125 ≡ ITU G.652**

$2a \approx 9 \ldots 10\,\mu m \quad NA \approx 0.1$

$V(1.31\,\mu m) \approx 2.16 \ldots 2.40$

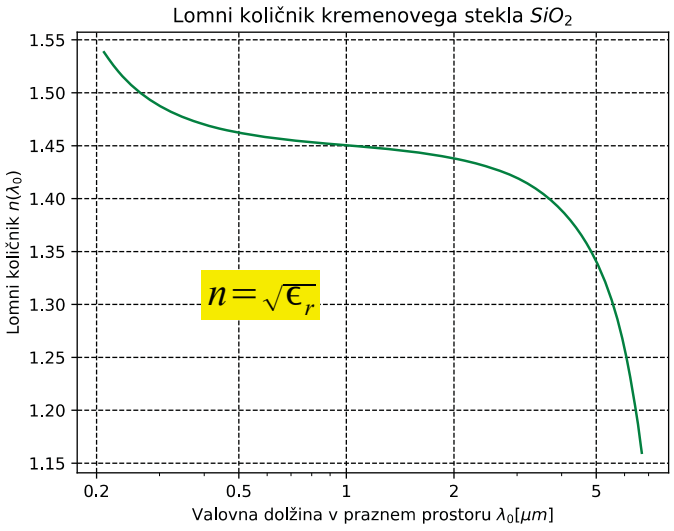
$V(1.55\,\mu m) \approx 1.82 \ldots 2.03$

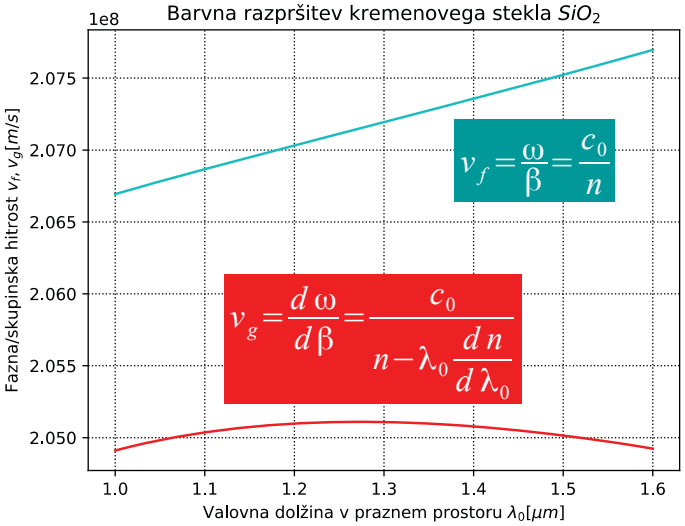
G.652 v uporabi od 1984 naprej*
Ožanje dovoljenih odstopanj !*

Sellmeier za steklo SiO_2 $\quad \lambda_0 = 0.21 \ldots 6.7\,\mu\mathrm{m}$ *Velja brez izgub !*

$$\epsilon_r = 1 + \frac{0.6961663\cdot\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.00467914826} + \frac{0.4079426\cdot\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.0135120631} + \frac{0.8974794\cdot\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 97.9340025}$$

Skupinsko hitrost v_g *upočasnjuje jalova moč (energija) nihanja elektronov / molekul* SiO_2

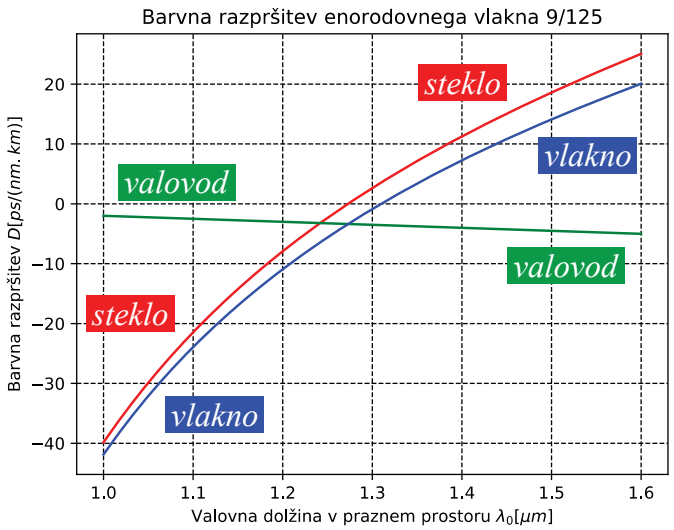




19 − Hitrost svetlobe v steklu

$$t_g = \frac{l}{v_g} \qquad \textit{Barvna razpršitev}: \quad \Delta t = D\cdot l\cdot\Delta\lambda_0$$

Skupinsko hitrost v_g *upočasnjuje jalova moč (energija) nihanj :*
(1) elektronov oziroma molekul SiO_2
(2) prečne fazne rezonance valovoda



$$D\left[\frac{\mathrm{ps}}{\mathrm{nm}\cdot\mathrm{km}} = 10^{-6}\,\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}\right] = \frac{1}{l}\frac{d\,t_g}{d\,\lambda_0} = -\frac{1}{v_g^2}\frac{d\,v_g}{d\,\lambda_0}$$

Zgled cenen FP laser: $\Delta\lambda_0 = 3\mathrm{nm} \quad l = 50\mathrm{km} \quad C \approx \frac{1}{3\,\Delta t}$

$$|D(1.31\,\mu\mathrm{m})| < 2\,\frac{\mathrm{ps}}{\mathrm{nm}\cdot\mathrm{km}} \rightarrow \Delta t < 300\mathrm{ps} \rightarrow C > 1.1\mathrm{Gb/s}$$

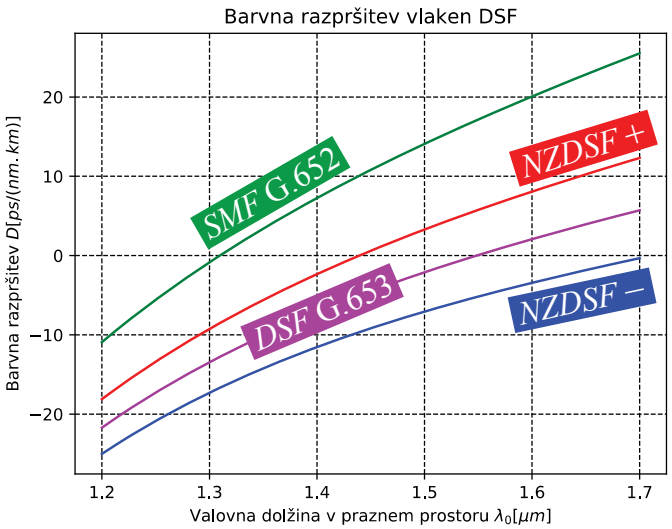
$$D(1.55\,\mu\mathrm{m}) \approx 17\,\frac{\mathrm{ps}}{nm\cdot km} \rightarrow \Delta t \approx 2.55\mathrm{ns} \rightarrow C \approx 130\mathrm{Mb/s}$$

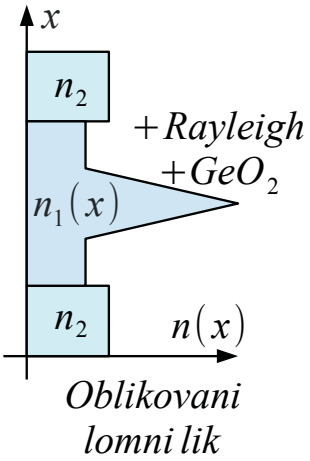
$$DFB\ laser + LiNbO_3\ EOM \rightarrow \frac{1}{\Delta t} \approx C \approx \Delta f = \Delta\lambda_0\frac{c_0}{\lambda_0^2}$$

$$l = \frac{\Delta t}{D\cdot\Delta\lambda_0} \approx \frac{c_0}{D\,\lambda_0^2 C^2} \qquad \lambda_0 = 1550\mathrm{nm} \quad D \approx 17\,\mathrm{ps}/(nm\cdot km)$$

C	2.5Gb/s	10Gb/s	40Gb/s	100Gb/s
l	1175km	73km	4.59km	0.73km

20 − Barvna razpršitev vlakna





Vlakno z neničelno premaknjeno razpršitvijo

$NZDSF \equiv Non-Zero\ Dispersion-Shifted\ Fiber$

NZDSF + oziroma ITU G.655

$D(1550\text{nm}) \approx +4 \ldots +7\ \frac{\text{ps}}{\text{nm.km}}$

$A_{jedra} \rightarrow 80\,\mu\text{m}^2\ (LEAF)$

NZDSF –

$D(1550\text{nm}) \approx -4 \ldots -7\ \frac{\text{ps}}{\text{nm.km}}$

Kompenzacijsko vlakno DCF

$D(1550\text{nm}) \approx -80\ \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$

$a/l \approx 1\text{dB/km}$

$9/125\ ali\ 10/125 \equiv ITU\ G.652$

$D(1550\text{nm}) \approx +17\ \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$

$a/l \approx 0.2\text{dB/km} \rightarrow 0.15\text{dB/km}$

$A_{jedra} \approx 70\,\mu\text{m}^2$

DSF ali 8/125 ali ITU G.653

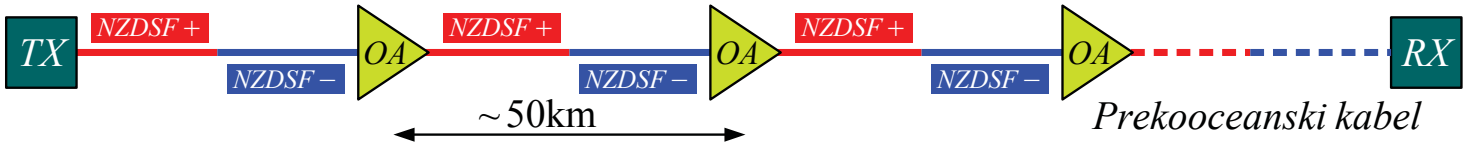
$D(1550\text{nm}) \approx 0\ \frac{\text{ps}}{\text{nm.km}}$

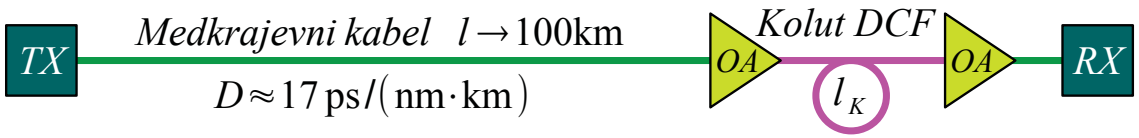
$a/l \approx 0.5\text{dB/km} \rightarrow 0.25\text{dB/km}$

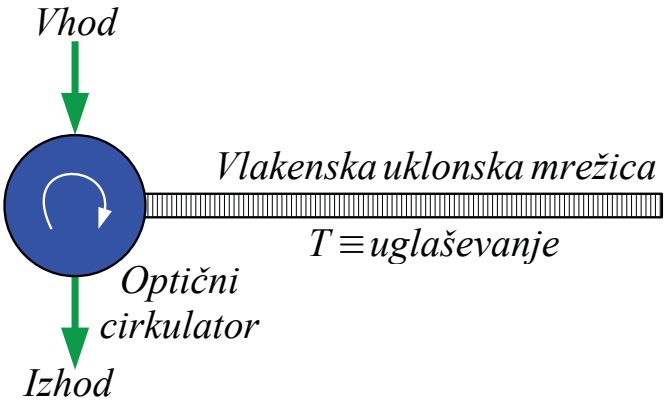
$A_{jedra} \approx 30\,\mu\text{m}^2$

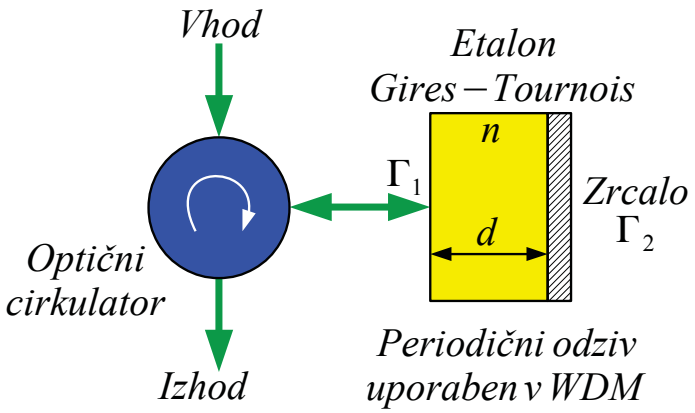
Neuporabno zaradi nelinearnosti

21 − Vlakna s premaknjeno razpršitvijo



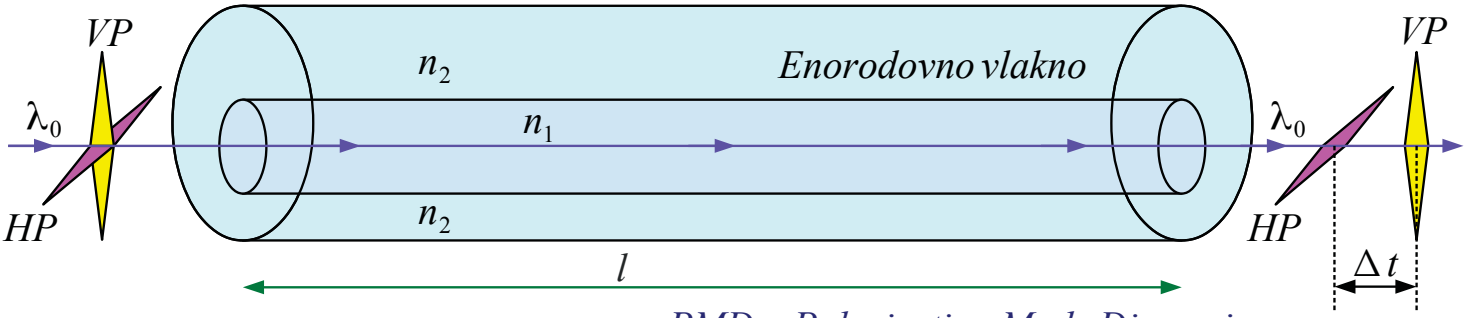






22 − Kompenzacija barvne razpršitve

Ekscentrično jedro → Mehanske sile → Dvolomnost → PMD



HE_{11} ima dve različici $HP + VP$, ki zaradi majhnih odstopanj nista popolnoma enaki med sabo !

$PMD \equiv$ Polarization Mode Dispersion

Dvolomnost je naključno porazdeljena ! Vlakno ne ohranja polarizacije !

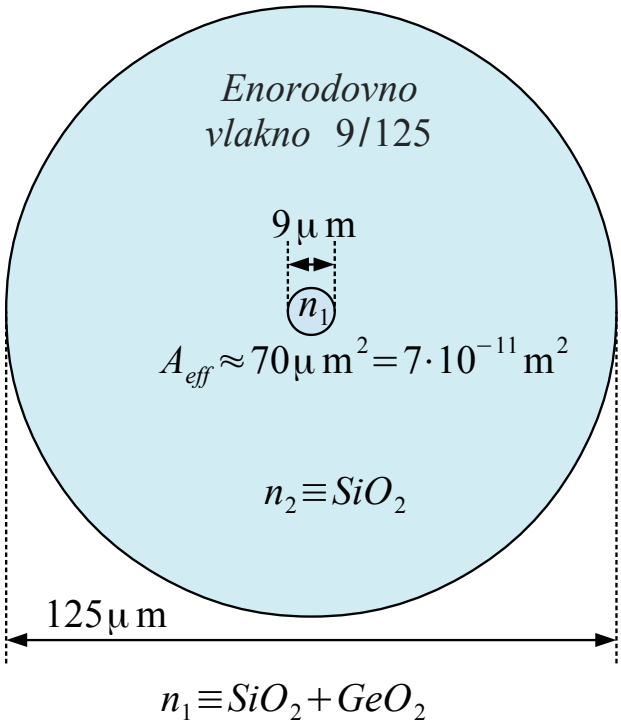
$\Delta t \approx D_{PMD} \cdot \sqrt{l} \quad @ \quad l > 1\text{km}$

	D_{PMD}	Δt(100km)	Δt(10000km)
Stara vlakna <2000	$\sim 10\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	~100ps	~1ns
Sukana vlakna >2000	$\sim 0.1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	~1ps	~10ps

$\Delta t \equiv$ naključen ! V položenem kablu se spreminja počasi : tedni , meseci ...

23 − Polarizacijska razpršitev

Sukanje vlakna med vlečenjem $\sim 5\,obratov/\text{m}$



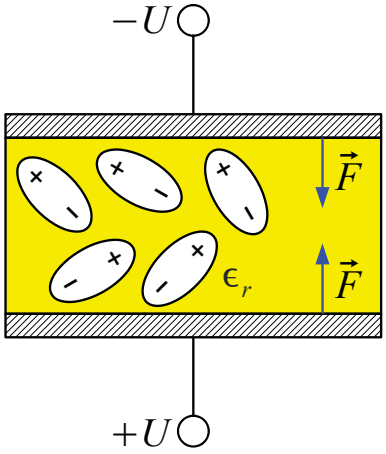
Zgled : $P \approx 100\text{mW} \quad n_1 \approx 1.46 \quad Z_0 \approx 377\,\Omega$

$$S = \frac{P}{A_{eff}} \approx \frac{100\text{mW}}{7 \cdot 10^{-11}\,\text{m}^2} \approx 1.4\text{GW/m}^2 = 140\text{kW/cm}^2$$

$$|\vec{E}| = \sqrt{\frac{2 Z_0 S}{n_1}} \approx 850\text{kV/m} = 8.5\text{kV/cm}$$

P	*Učinek*
1mW	*Nelinearni pojavi!*
10mW	*Zažig vtičnic!*
100mW	*Max P na vtičnici!*
1W	*Max P v vlaknu!*
10W	*Taljenje jedra vlakna!*

24 − Obremenitev materialov vlakna



$$Elektrostrikcija \;\rightarrow\; povečanje \;\; n=\sqrt{\epsilon_r}\uparrow$$

$$n(E)=n_0+n_1'\cdot E+n_2'\cdot E^2+n_3'\cdot E^3+\ldots$$

$$n_2' \equiv Kerrov\ pojav\,(elektrostrikcija)$$

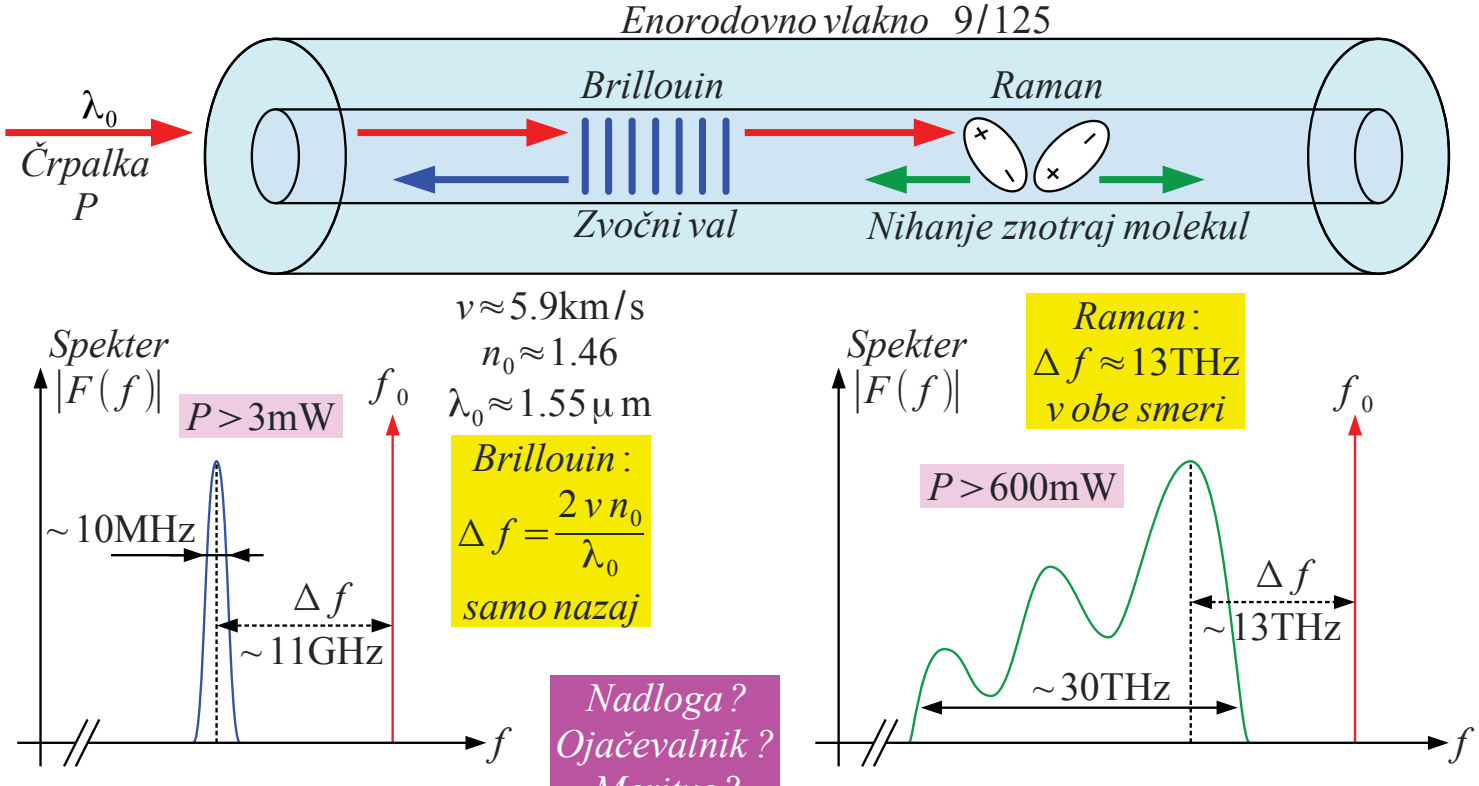
$$n_1' \equiv Pockelsov\ pojav\,(elektrostrikcija+vgrajeni\ E_0)$$

$$Steklo\ SiO_2(+GeO_2) \;\rightarrow\; vgrajeni\ E_0=0 \;\rightarrow\; n_1'=0$$

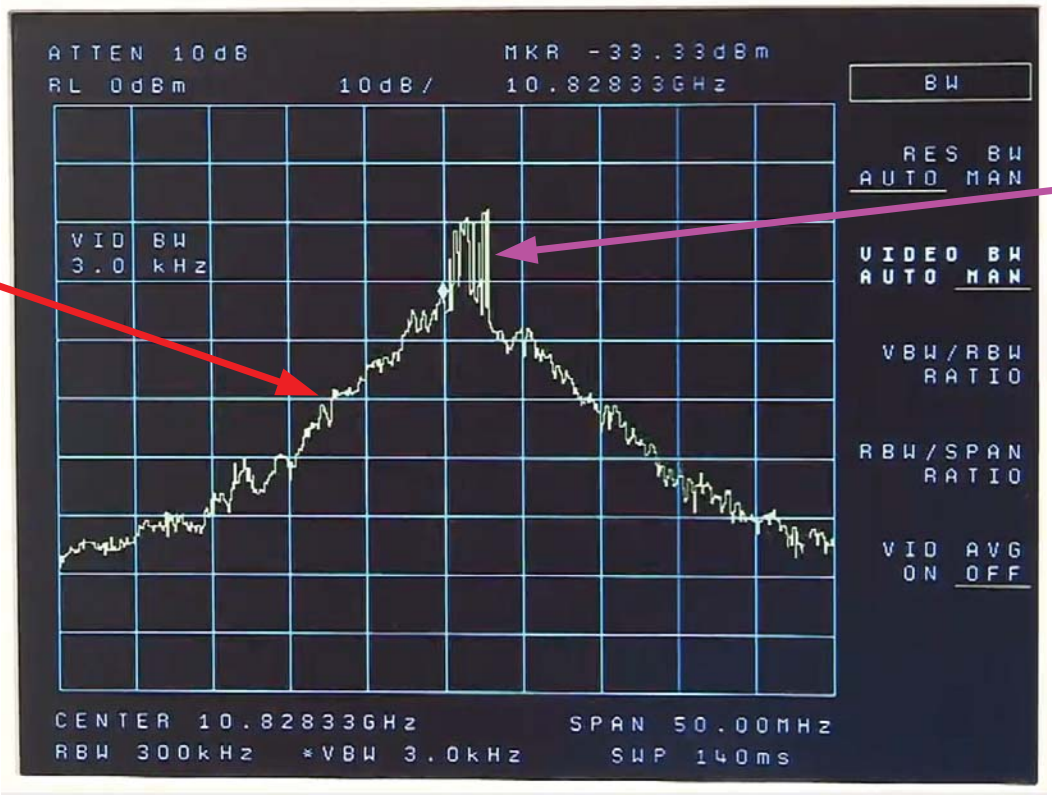
$$S=\frac{E^2}{2Z} \;\rightarrow\; n(S)=n_0+n_2\cdot S$$

$$Steklo\ SiO_2(+GeO_2):\;\; n_0\approx 1.46 \qquad n_2\approx 2.5\cdot 10^{-20}\frac{m^2}{W}\ldots 3.2\cdot 10^{-20}\frac{m^2}{W}$$

25 − Elektrostrikcija v steklu



26 − Brillouinovo in Ramanovo sipanje



Ojačani zrnati šum ASE

Odboj na konektorjih nihanje laserja

Zrnati šum: $\sigma_f = \sqrt{\langle N_f \rangle}$

27 − Spekter Brillouinovega sipanja

Lastna fazna modulacija: $\Delta\phi = \Delta k \cdot l = \frac{2\pi n_2 P}{\lambda_0 A_{eff}} \cdot l \approx 0.15\text{rd}$

$P = 100\text{mW} \quad A_{eff} = 70\mu\,\text{m}^2$

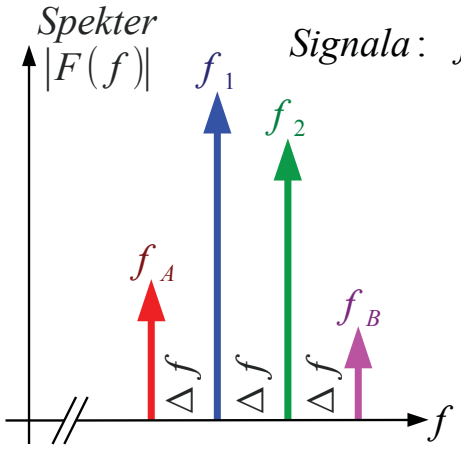
$n_2 \approx 2.5 \cdot 10^{-20}\,\text{m}^2/\text{W}$

$\lambda_0 = 1550\text{nm} \quad l = 1\text{km}$

Linearni D − Nelinearni n → Solitonski prenos ~ 1995 ?

Križna fazna modulacija → Štirivalovno mešanje FWM (Four − Wave Mixing)

Radijski inženirji 50 let pred optiki: Intermodulacijsko popačenje IMD



Signala: $f_1 \quad f_2$ → *Mešalni produkti*: $f_A = 2f_1 - f_2 \quad f_B = 2f_2 - f_1$

$P_A = \frac{P_1^2 P_2}{P_{IP3}^2}$

$P_B = \frac{P_1 P_2^2}{P_{IP3}^2}$

$P_{IP3}[\text{W}] = \frac{\lambda_0 A_{eff}}{2\pi n_2 l_{eff}}$

$\alpha\left[\frac{\text{Np}}{\text{m}}\right] = \frac{\ln 10}{20} a/l\left[\frac{\text{dB}}{\text{m}}\right]$

Dolgo vlakno: $l \gg l_{eff}[\text{m}] = \frac{1}{\sqrt{(2\alpha)^2 + (\Delta\beta)^2}}$

Fazna neusklajenost: $\Delta\beta\left[\frac{\text{rd}}{\text{m}}\right] = \beta_2 + \beta_A - 2\beta_1 \approx -\frac{2\pi\lambda_0^2 D}{c_0} \cdot (\Delta f)^2$

28 − Štirivalovno mešanje

$\sim 1995 \rightarrow$ *Vlakno DSF* G.653

$a/l \approx 0.3\text{dB/km} \quad A_{eff} \approx 30\,\mu m^2$

$D \approx 0 \rightarrow \Delta\beta \approx 0$

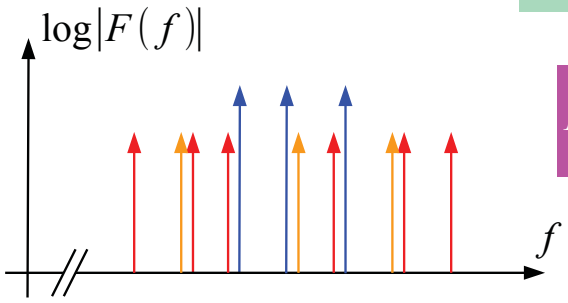
$l_{eff} \approx \frac{1}{2\alpha} \approx 14.5\text{km}$

$\lambda_0 \approx 1550\text{nm}$

$n_2 = 2.5 \cdot 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$

$B \approx 4\text{THz}$

$P_{IP3} \approx 20\text{mW} = +13\text{dBm}$



$P_{FWM} = \frac{P^3}{P_{IP3}^2}$

4 *kanali WDM* $\times 2.5\text{Gb/s} = 10\text{Gb/s}$

$\sim 2015 \rightarrow$ *Vlakno NZDSF* G.655

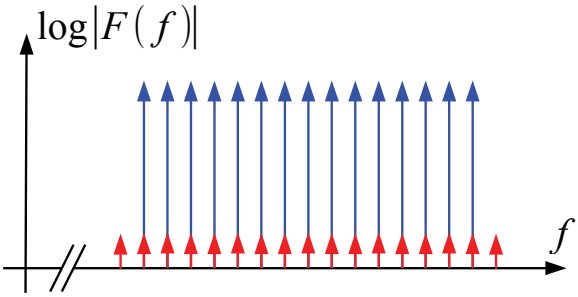
$a/l \approx 0.2\text{dB/km} \quad A_{eff} \approx 80\,\mu m^2$

$D \approx +5\text{ps/(nm.km)} \quad \Delta f = 100\text{GHz}$

$\Delta\beta \approx -2.52\text{rd/km} \quad |\Delta\beta| \gg 2\alpha$

$l_{eff} \approx \frac{1}{|\Delta\beta|} \approx 0.4\text{km}$

$P_{IP3} \approx 2\text{W} = +33\text{dBm}$



40 *kanalov WDM* $\times 100\text{Gb/s} = 4\text{Tb/s}$

29 − Prekooceanski kabel

(1) *Optični tranzistor (enosmerni ojačevalnik za svetlobne frekvence) ne obstaja !*

Ne poznamo niti fizikalnih osnov enosmernega ojačevalnika $B \approx 300\text{THz}$ *?*

Brez tranzistorja ni optičnega računalnika !

Nobelova nagrada čaka izumitelja !

(2) *Optični gradniki so preveliki za integracijo ?*

Fotolitografija v mikroelektroniki

1970 $\sim 10\,\mu\text{m} \rightarrow$ 2020 $\sim 10\text{nm}$

$B \approx 1\text{GHz} \rightarrow B \approx 1\text{THz}$

Svetlobni valovod $\sim 10\,\lambda \equiv \sim 10\,\mu\text{m}$

Uklonska mrežica $\sim 1000\,\lambda \equiv \sim 1\text{mm}$

pasivna

~~*integrirana*~~ *Fotonična vezja*

(3) *Optični gradniki (p) ostajajo predragi ?*

~ 1990 *Erbijev vlakenski ojačevalnik za velikostni razred cenejši od SDH regeneratorja.*

~ 2020 *SFP modul (TX + RX) za velikostni razred cenejši od erbijevega ojačevalnika.*

~ 2020 *Cenena elektronika popravlja barvno razpršitev ter PMD.*

30 − Neuspehi optike

Optična transportna omrežja z linijskimi kapacitetami za mobilna omrežja 5G

Optical transport networks with line capacities for 5G mobile networks

Klaus Samardžić

Smart Com

klaus.samardzic@smart-com.si

Povzetek

Mobilno omrežje 5G bo omogočilo nič manj kot povezovanje vsega z vsem ostalim. Razvoj komunikacijskih storitev za industrijo 4.0 ni mogoč brez mobilnega omrežja 5G. Uresničitev takšnega omrežja z obvladljivimi naložbami zahteva uporabo sodobnih tehnologij in rešitev, kot so zagotavljanje storitev v oblaku, virtualizacija funkcionalnosti v omrežju in učinkovita uporaba radijskih frekvenčnih pasov. V tem prispevku bomo podali pregled novih arhitektur za transportna omrežja Forehaul, Midhaul in Backhaul, ki omogočajo uporabo odprtega radijskega dostopnega omrežja (O-RAN) 5G.

Abstract

A 5G mobile network will allow for nothing less than connecting everything to everything else. The development of communication services for the Industry 4.0 is not possible without the 5G mobile network. Industry 4.0 is about the significant transformation taking place in the way goods are produced and delivered. The realization of such a network with manageable investments requires the implementation of modern technologies and solutions, such as the provision of cloud services, virtualization of functionality in the network and efficient use of radio frequency bands. In this paper, we will provide an overview of new architectures for the Forehaul, Midhaul and Backhaul transport networks enabling the implementation of 5G Open Radio Access Network (O-RAN).

Biografija avtorja

Klaus Samardžić ima tridesetletne izkušnje pri razvoju in implementaciji komunikacijskih sistemov. Prvih deset let je sodeloval ali vodil razvoj komunikacijskih sistemov. V podjetju Fotona, takrat uveljavljenemu podjetju na področju optičnih sistemov, je sodeloval pri razvoju komunikacijskega sistema za prenos po optičnih vlaknih, ki je bil uspešno implementiran v Sloveniji in Sovjetski zvezi. V podjetju Smart Com, vodilnem sistemskem integratorju, že dvajset let sodeluje pri realizaciji komunikacijskih omrežij, z implementacijo optičnih in radijskih komunikacijskih sistemov v Sloveniji in na območju Jadranske regije. Kot pooblaščeni inženir Inženirske Zbornice Slovenije, z izkušnjami pri realizaciji projektov, ima vpogled v vse faze življenjskega cikla projekta, od načrtovanja, izvedbe in preizkusa sprejemljivosti do prehoda v operativno fazo. Takšne izkušnje mu omogočajo razumevanje potreb operaterjev komunikacijskih omrežij in želja uporabnikov komunikacijskih storitev. Razumevanje potreb vseh vpletenih strani mu pride prav pri sodelovanju v tržnih dejavnostih ali pri evaluaciji prihodnjega razvoja komunikacijskih storitev.

Author's biography

Klaus Samardžić has thirty years of experience in the development and implementation of communication systems. The first ten years he has participated or led the development of communication systems. In Fotona, at that time an established vendor of optical systems he colaborated in development of an optical fiber communication system and its successfull implementation in Slovenia and the Soviet Union. In Smart Com, a leading system integrator he has been involved in the realization of communication networks, implementing optical and radio communication systems in Slovenia and the Adriatic region for twenty years. As a Certified and Authorized Engineer for electrical engineering in civil works at Engineering Chamber of Slovenia with experience in the realization of communication networks projects he has insight into all phases of the project life cycle, from planning, implementation and acceptance testing to the transition into the operational phase. Such experiences allows him to understand the demands of communication networks operators and wishes of communication services users. When participating in marketing activities or evaluating the future development of provisioning communication services such understanding of the demands and wishes gives him the opportunity to offer solutions of mutual benefits for all involved parties.



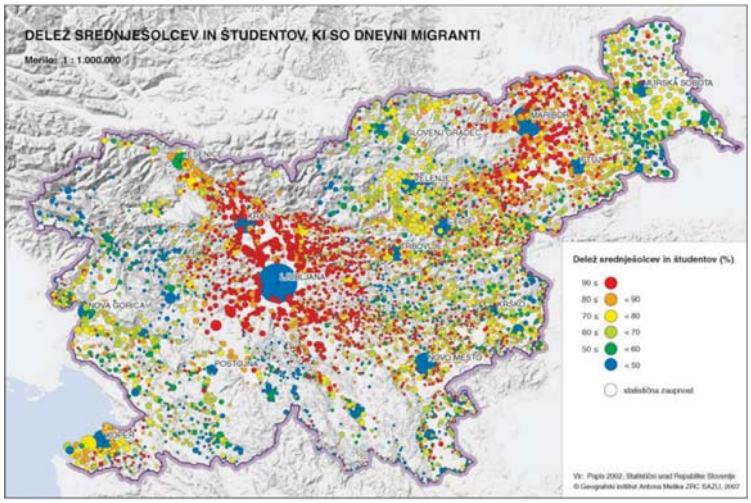
Optična transportna omrežja za mobilna omrežja 5G

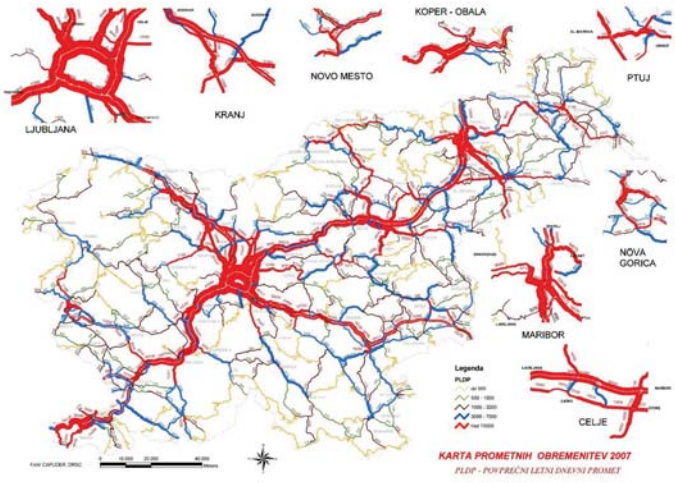
Klaus Samardžić

Mobilna omrežja 5G kot rešitev komunikacijskih potreb v Sloveniji

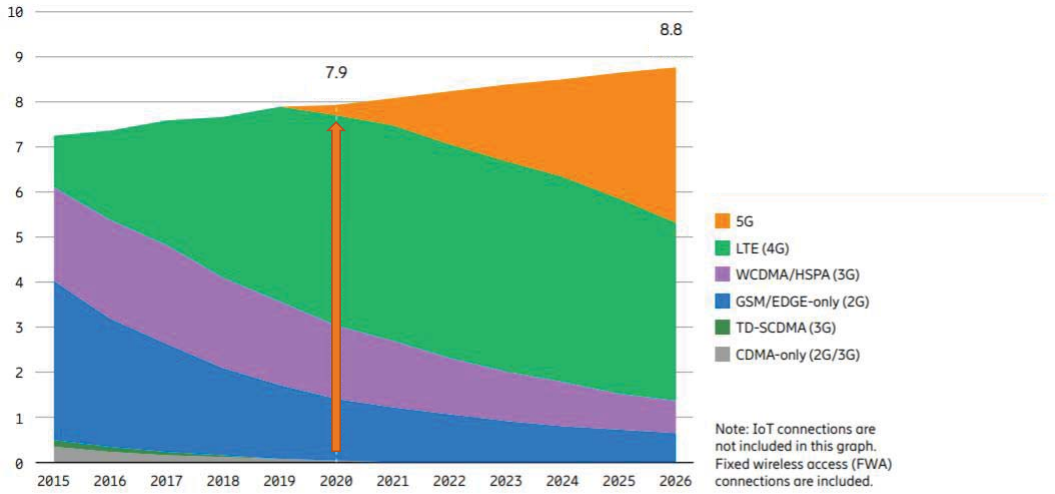

Stockholm 2012

Kdo potrebuje sodobne komunikacijske storitve v Sloveniji ?



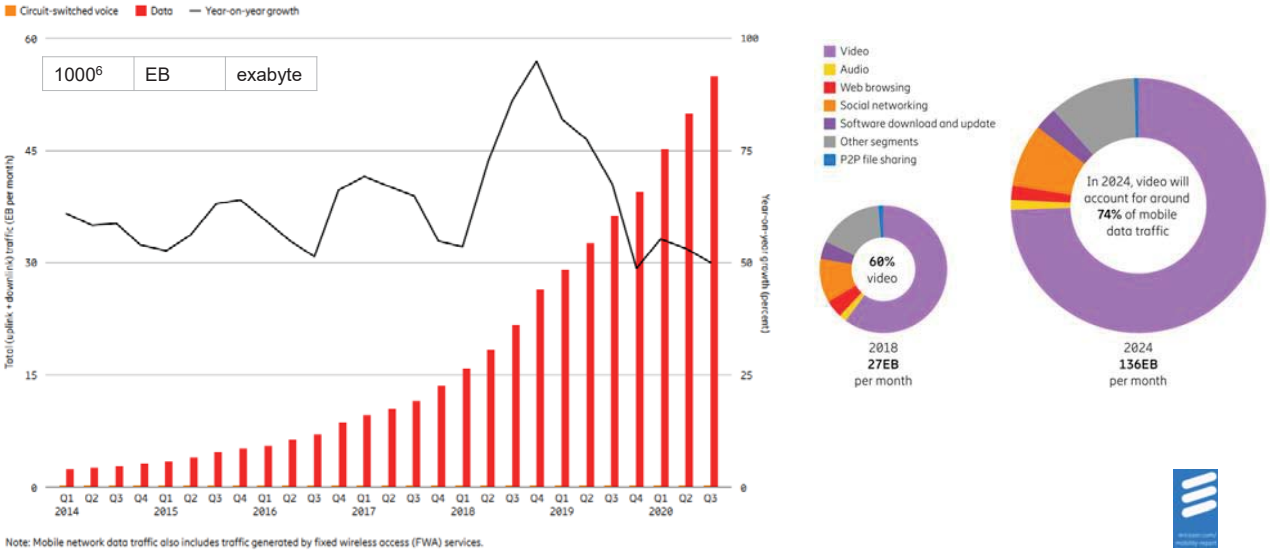


Rast povpraševanja po storitvah mobilnih omrežij

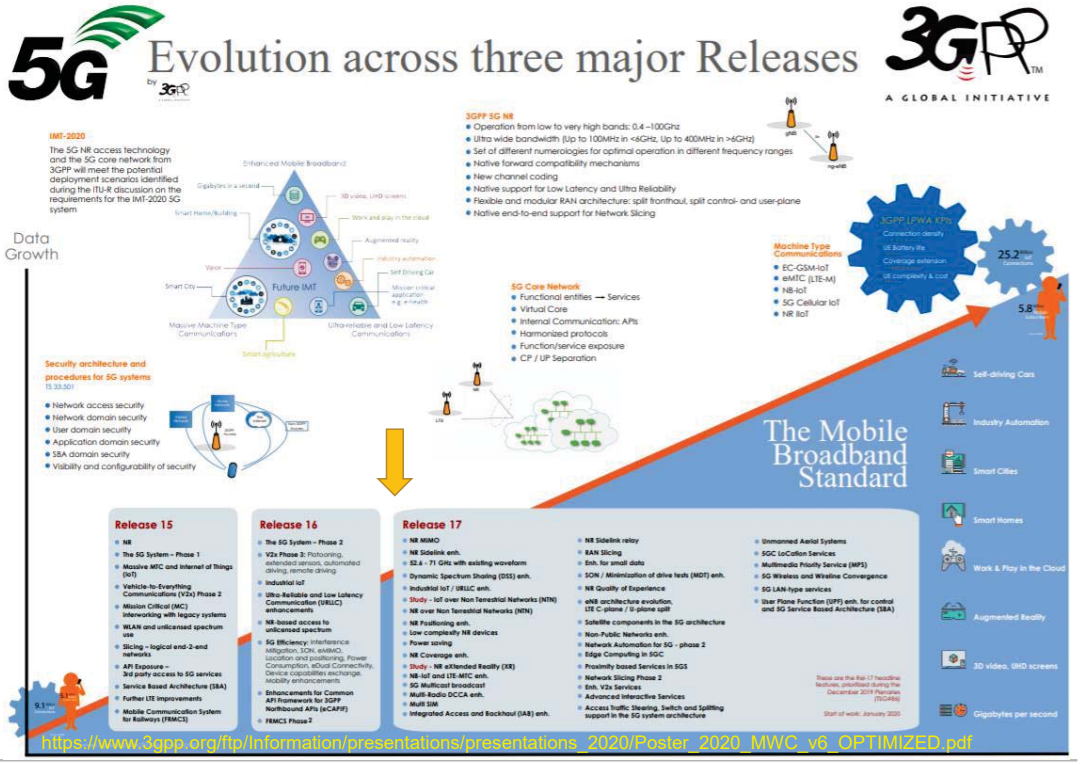


[1] Ericsson and GSA (October 2020).
[2] A 5G subscription is counted as such when associated with a device that supports New Radio (NR), as specified in 3GPP Release 15, and is connected to a 5G-enabled network.

Podatkovni promet globalnega mobilnega omrežja in medletna rast (EB na mesec)

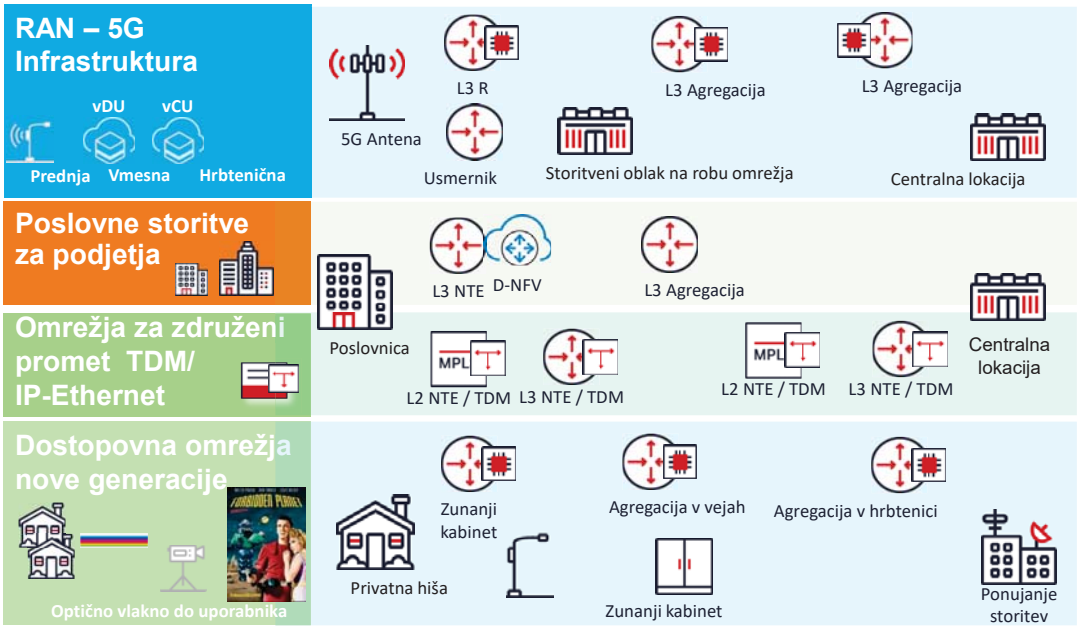


Note: Mobile network data traffic also includes traffic generated by fixed wireless access (FWA) services.
[1] Traffic does not include DVB-H, Wi-Fi or Mobile WiMAX. VoIP is included.



Committed to connecting the world
Español Français Русский

Realizacija storitvenih omrežji z enim transportnim omrežjem?



Koncepti 5G mobilnega omrežja pomembni pri načrtovanju transportnega omrežja

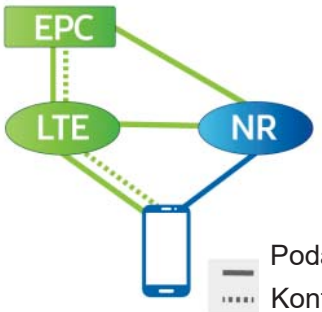


5G mobilna omrežja – Dve arhitekturi

'5G' 2018 – 2020 ?

'Popolni 5G': 2020+

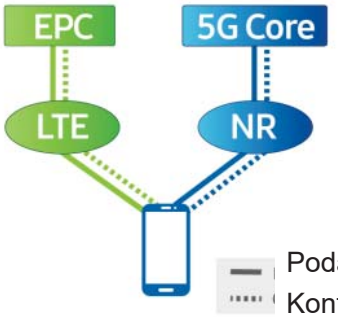
Nesamostojna



Podatkovni promet
Kontrolni promet

NR = 5G New Radio
LTE = 4G
EPC = 4G network
(evolved packet core)

Samostojna



Podatkovni promet
Kontrolni promet

enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)
massive Machine Type Communications (mMTC)

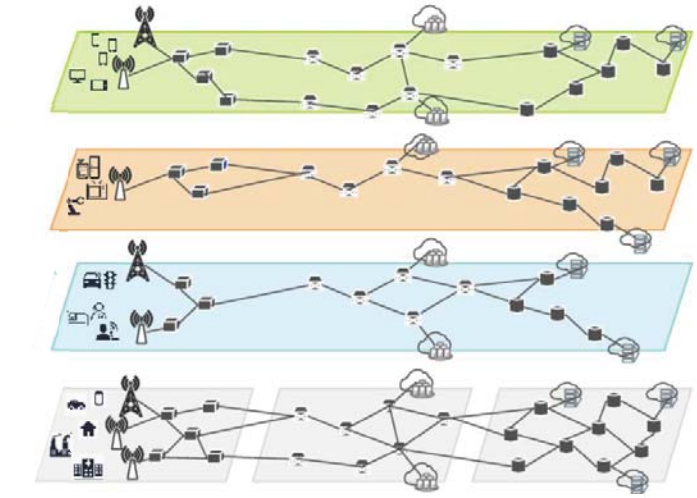
5G mobilna omrežja – Network slicing

enhanced Mobile Broadband (eMBB)

massive Machine Type Communications (mMTC)

Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)

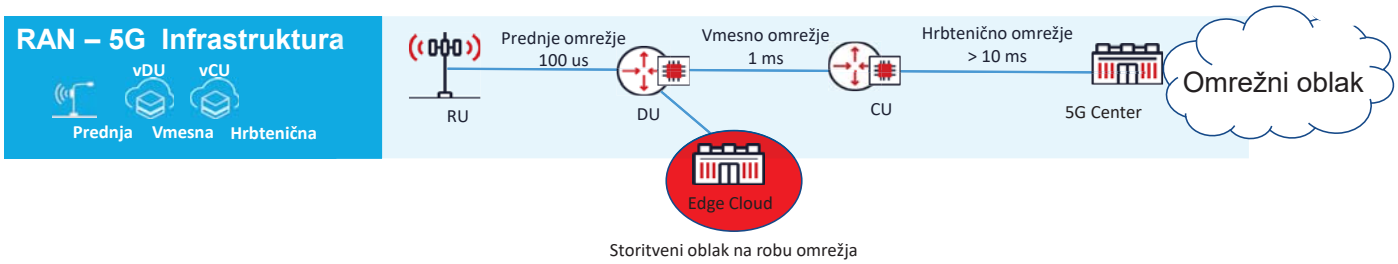
Arhitektura omrežja



Dostopovna omrežja Transportna omrežja Jedrna omrežja

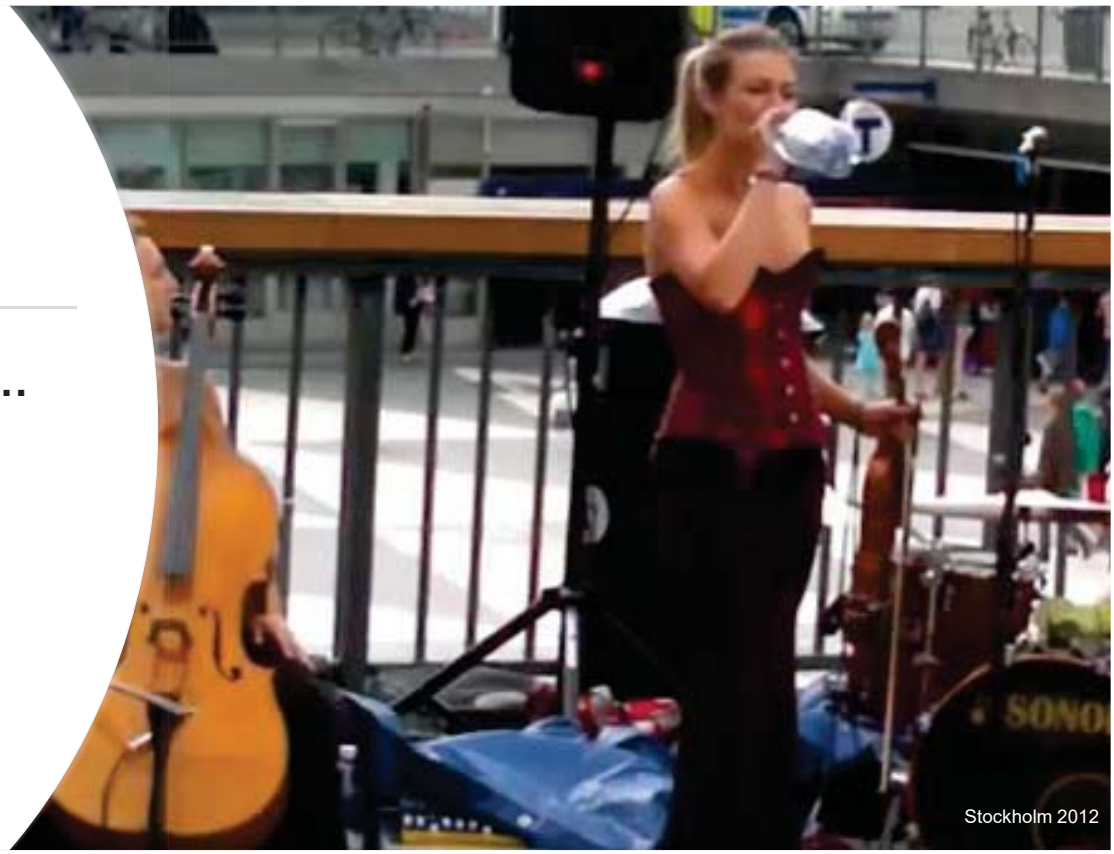
5G mobilna omrežja – Storitveni oblak na robu omrežja

- MEC - Multi Access Edge Computing
- CORD - Centralna lokacija je načrtovana kot podatkovni center
- V-RAN – Virtualni RAN (Radio Access Network)

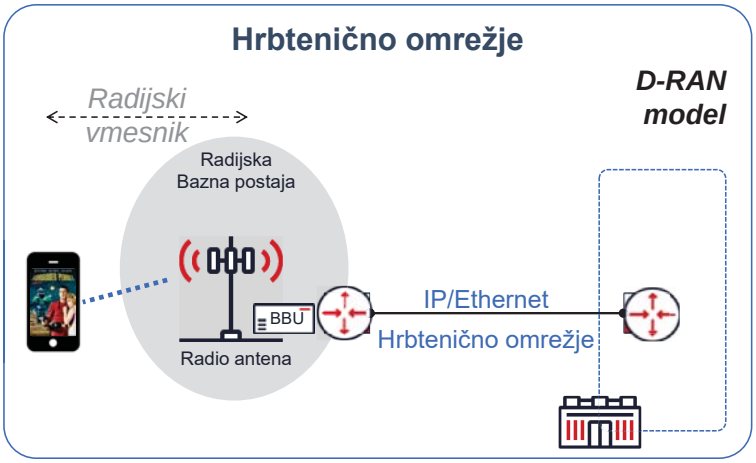


Storitveni oblak na robu omrežja

D-RAN, C-RAN …



Razvoj 4G -> 5G Realizacija makrocelic



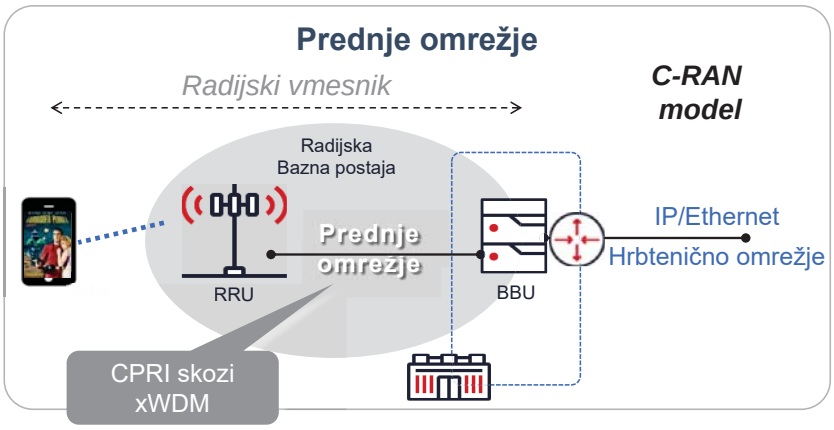
Omrežne zahteve:

- 10G linijski signali.
- Migracija od radijskih povezav proti infrastrukturi optičnih vlaken zaradi zahtevane kapacitete in zanesljivosti povezav.

D-RAN = Distributed RAN Radio Access Network

BBU = BaseBand Unit

Razvoj 4G -> 5G Prednje omrežje <> Hrbtenično omrežje

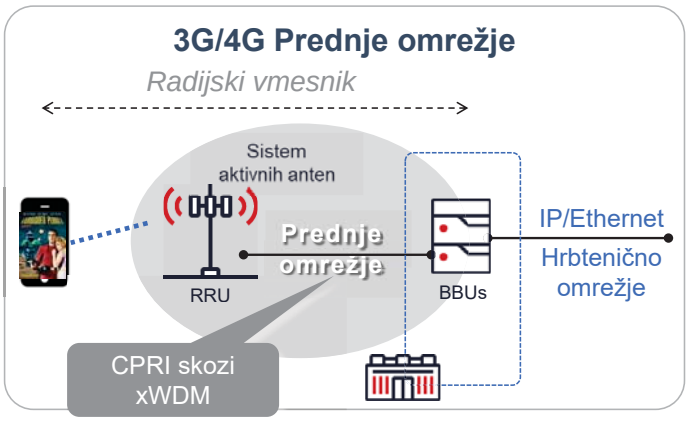


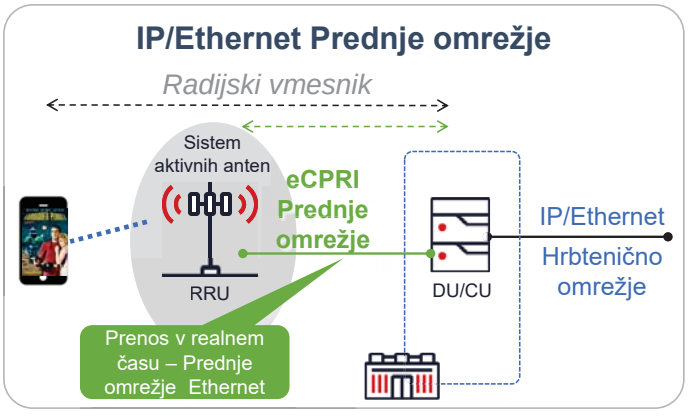
- 4G in 5G omrežja ni možno realizirati brez velikega števila radijskih enot z veliko pasovno širino radijskega kanala.
- Prednje omrežje omogoča, da so te radijske enote majhne in številne.

RAN = Radio Access Network
C-RAN = Cloud RAN, Centralized RAN
BBU = BaseBand Units co-located
RRU = Remote Radio Unit
CPRI = Common Public Radio Interface

Ali je eCPRI potreben za 5G omrežja

DU: 5G Distributed Unit
CU: 5G Centralised Unit
RRU: Remote Radio Unit

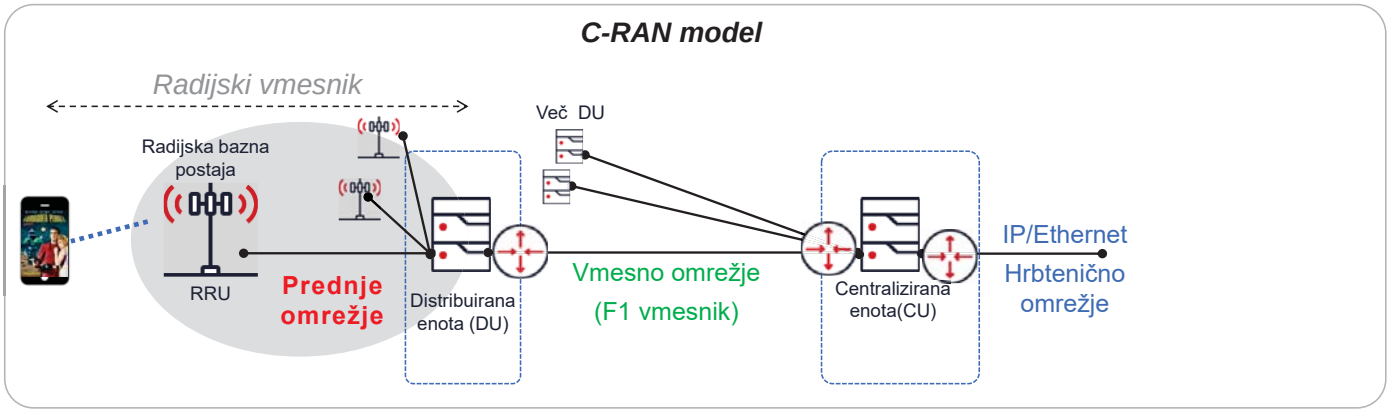




Radijski vmesnik / Prednje omrežje	4G Storitev
5 Gb/s	300 Mb/s >
5 Gb/s	150 Mb/s <

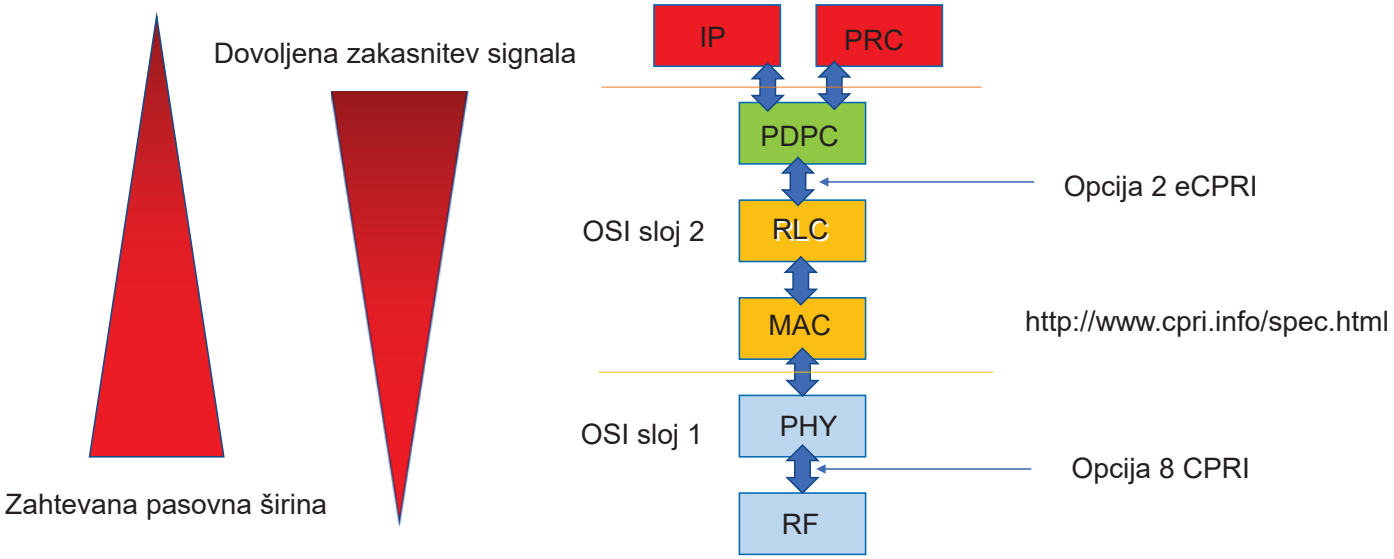
Radijski vmesnik	Prednje omrežje	5G Storitev
236 Gb/s	20 Gb/s	3 Gb/s >
236 Gb/s	10 Gb/s	1.5 Gb/s <

Zakaj Vmesno omrežje?

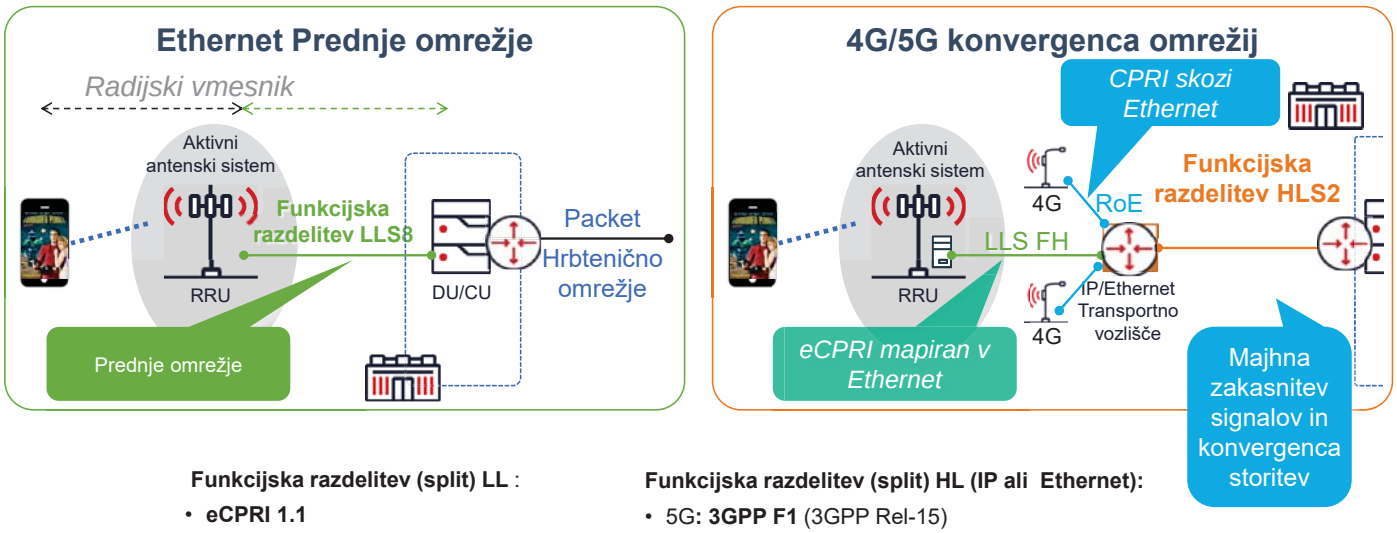


- Centralizirani RAN omogoča enostavnejše koordinacijske funkcije celic.
- Omogoča zmanjšanje stroškov z uporabo delno navideznega (V) RAN.
- Vmesno omrežje je realiziran z navadnimi Ethernet protokoli.

eCPRI evolved - Common Public Radio Interface



Konvergenca omrežji



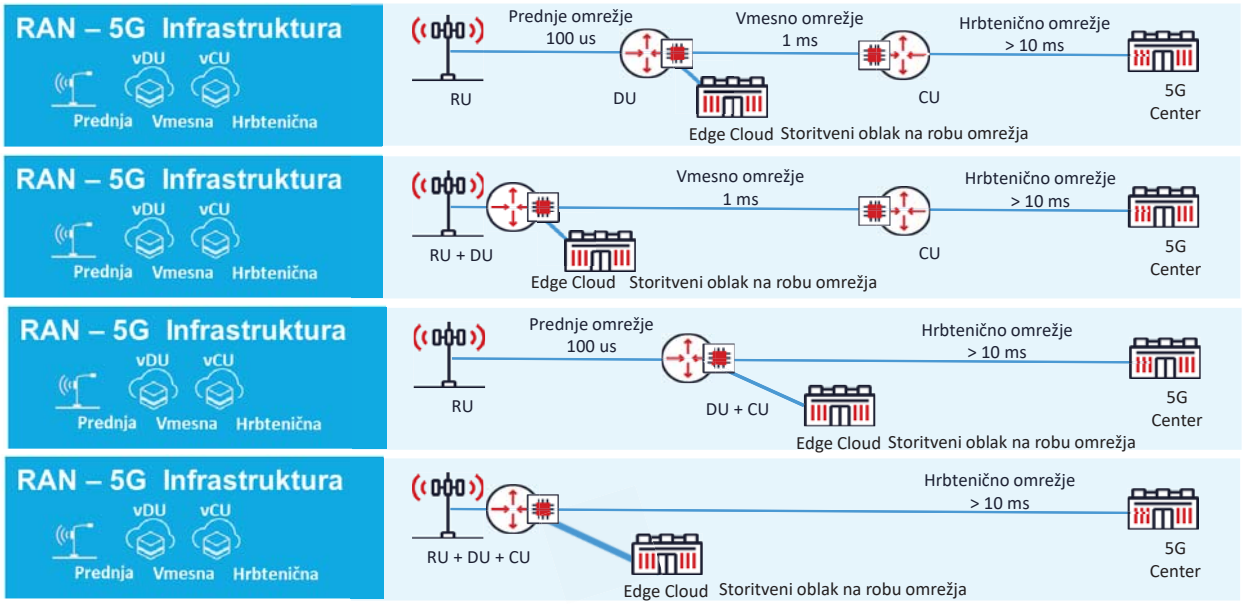
Funkcijska razdelitev (split) LL :

- **eCPRI 1.1**
- **xRAN Fronthaul 1.0**
- **IEEE 1914.3 RoE**

Funkcijska razdelitev (split) HL (IP ali Ethernet):

- 5G: **3GPP F1** (3GPP Rel-15)
- ng-LTE: **3GPP V1** (3GPP Rel-16)

Planiranje IP/Transporta in radijskega omrežja



Implementacija sodobnega RAN dostopovnega omrežja



Implementacija 4G/5G

5G READY O-RAN ALLIANCE

Prednje omrežje	Vmesno/Hrbtenično omrežje	Agregacija	Transport
BBU	Centralna enota.	Centralna enota. / Centrala mobilnega omrežja	Centrala mobilnega omrežja / Centrala mobilnega omrežja
CPRI/RoE/eCPRI/O-RAN	1GE/10GE NTE	10GE > 100GE Agregacija	Optoelektrični moduli
P/V/H usmernik L2/L3 CPRI/RoE/eCPRI/O-RAN	10GE NTE / L3 za radijsko celico	10GE > 100GE Agregacija	100GE – 200GE CFP2-DCO za neklimatirzirane prostore
Transport Prednje omrežje GW CPRI/RoE/eCPRI/O-RAN	100GE NTE	WDM PAM4 sistem prenosa	400GE QSFP-DD
		100GE NTE za neklimatizirane prostore	Transport Vmesno/Hrbtenično omrežje usmernik L2/L3

Paketni 4G/5G sistem za prednje omrežje

- STORITVE PREDNJEGA OMREŽJA
- TELEMETRIJA / NADZOR
- SINHRONIZACIJA
- INTEGRIRANA VEZJA
- TEMPERATURA & OKOLJE
- MONTAŽA



(2) 100G QSFP28 (12) 25G/10G SFP28

Usmerjevalnik za kreiranje P/V/H omrežnih rezin



- STORITVE PREDNJEGA OMREŽJA
- STORITVE
- SINHRONIZACIJA
- MEDPOMNILNIKI LEAF/AGREGACIJA
- TELEMETRIJA / NADZOR
- INTEGRIRANO VEZJE
- TEMPERATURA

GNSS/ Časovni signali in nadzor

(2) QSFP-DD
(100G/200G/400G)

(32) SFP28
(25G/10G/1G)

(12-16) CPRI

WDM PAM-4 Linijski sistem

- Realizacija N x 100 Gbit/s povezav za razdalje do 80 km z minimalnimi investicijami.. Bilo je potrebno nekaj inovativnosti za razvoj **linijskega sistema, ki omogoča prenos do 8 X 100 Gbit/s Ethernet signalov** na razdaljo do 80 km z uporabo signalov z modulacijo **PAM-4 (Pulse-Amplitude Modulation 4-Level)**.
- Če omrežni operater razpolaga s sodobnimi komunikacijskimi Ethernet stikali ali usmerniki, ki vsebujejo QSFP28 vmesnike za WAN (Wide Area Network) omrežja je do večjih linijskih kapacitet en enostaven korak. Postavitev linijskega sistema s PAM-4 linijskim signalom in uporaba ustreznih QSFP28 optoelektričnih modulov.



- Optoelektrični pretvorniki za 100 Gbit/s signale skozi čas: CFP, CFP2, CFP4, QSFP28



Orkestracija– popolni pregled nad kreiranjem storitev v omrežju in zagotavljanje QoE končnega uporabnika

- https://www.youtube.com/watch?v=IJtX_mPiOCw

blueplanet
a division of ciena

OpenFlow
NETCONF/YANG
SNMP
CLI



python

TOSCA

O-RAN ALLIANCE

JSON

docker

RESTful API
GET PUT POST DELETE

Swagger

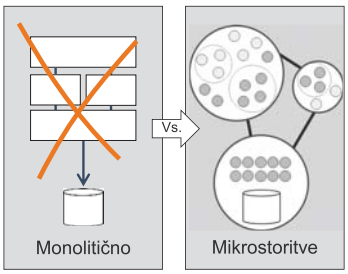
GitHub

blueplanet

Inteligentna Avtomatizacija

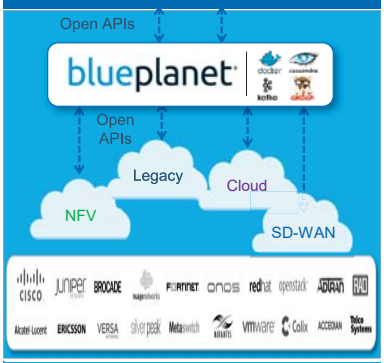
Adaptivna Omrežja

Platforma zasnovana na mikrostoritvah (containers)



Modularnost in nadgradljivost ter možnost hitrih sprememb

Koncept dostopnosti in odprtokodna orodja



Programiranje v različnih tehnoloških okoljih in omrežna fleksibilnost

DevOps Programabilnost



Operativna agilnost In celovito razvojno in uporabniško okolje

Potek dela z Blue Planet DevOps orodji



Bistvo

- 5G Mobilna omrežja za sodobne komunikacijske storitve.
- Skupina https://open-ran.org si je postavila za cilj:

  odpreti tradicionalne RAN sisteme proizvajalcev z določitvijo enotnih protokolov in dezintegracijo kompleksnih sistemov ter vpeljati nova programska orodje za dinamično konfiguracijo storitev.
- Enotno transportno omrežje z možnostjo določanja rezin (slice) omrežja za določeno storitev.
- 5G RAN Prednje, Vmesno in Hrbtenično omrežje.
- Celovita orkestracijska platforma za zagotovitev kreiranja in ponujanja storitev v omrežju.

email: klaus.samardzic@smart-com

twitter: @KlausSamardzic

tel: 040 882594

www.**smart-com**.si

Uporaba 200 Gbps prenosnih sistemov DWDM na jedrnem omrežju RUNE in priklop prvih rezidenčnih uporabnikov na 10 Gbps simetričnem dostopovnem omrežju XGS-PON

Use of 200 Gbps DWDM transmission systems on the RUNE core network and connection of the first resident users on a 10 Gbps symmetric XGS-PON access network

Goran Živec

RUNE – Rural Networks

goran@vahta.eu

Povzetek

Uvodoma je predstavljen kratek povzetek izvedbene dinamike projekta RUNE. Prikazana je geografska umestitev projektov in njihov trenutni status. Nadaljevanju predstavitve je osredotočeno na agregacijsko/jedrno omrežje, s poudarkom na spremembi izhodišč določanja potrebnih zmogljivosti teh nivojev pri ultra-hitrih širokopasovnih omrežjih. V zadnjem delu je ob priključitvi prvih testnih gospodinjskih uporabnikov na veleprodajno storitev 10Gbit/s podano še razmišljanje o primerjavi infrastrukturnih zmogljivosti s tistimi, ki jih maloprodajni trg ponuja končnim uporabnikom.

Abstract

Initially a short overview of the deployment dynamics of the RUNE project is given, showing the geographical extension and current status. A focus is given to the aggregation/core network, with emphasis on challenges related to shifts in the capacity planning in ultra-fast broadband networks. As the first residential test users were connected to a 10Gbps, XGS-PON supported wholesale service, a reflection on how to compare infrastructural capacities to retail offerings over same infrastructure is given.

Biografija avtorja

Goran Živec se je rodil leta 1973. Diplomiral je iz ekonomije na Univerzi v Trstu, ima MBA iz mednarodnega poslovanja na MIB School of Management in diplomo iz informacijske tehnologije na Univerzi v Liverpoolu. Ima dolgoletne izkušnje iz vodenja v kovinski industriji, gradbenih materialov, potrošniškem blagu in v prosveti. V sektorju TK je začel delati leta 2007, ko je ustanovil svoje podjetje. Od takrat se posveča problematiki širokopasovnega pokrivanja podeželja. Sodeloval je v mnogih projektih pokrivanja podeželja v Sloveniji. Trenutno je lastnik infrastrukturnega ponudnika na jugozahodnem delu Slovenije, ki ponuja dostopovno omrežje. Dela na več ravneh, organizira bodoča širokopasovna omrežja na slovenskem podeželju, sosednjih državah in širše v Centralni in Vzhodni Evropi.

Author's biography

Goran Živec was born in 1973. He holds MA from Economics at University of Trieste, MBA in International Business at MIB School of Management, Graduate degree in Information technology at University of Liverpool. After experiences on leading positions in metalworking, building materials, fast moving consumer goods and teaching, he landed in ICT sector by founding his own company in 2007. He has

been working since then on issues related to broadband coverage in rural areas. He participated in the preparation and execution of several rural projects in Slovenija. He now owns and runs an infrastructure provider, that operates an open access network in the south-western part of Slovenija. He is currently working on multiple levels, organizing future broadband projects in rural areas in Slovenija, neighbouring countries and in a broader Central and Easter Europe.

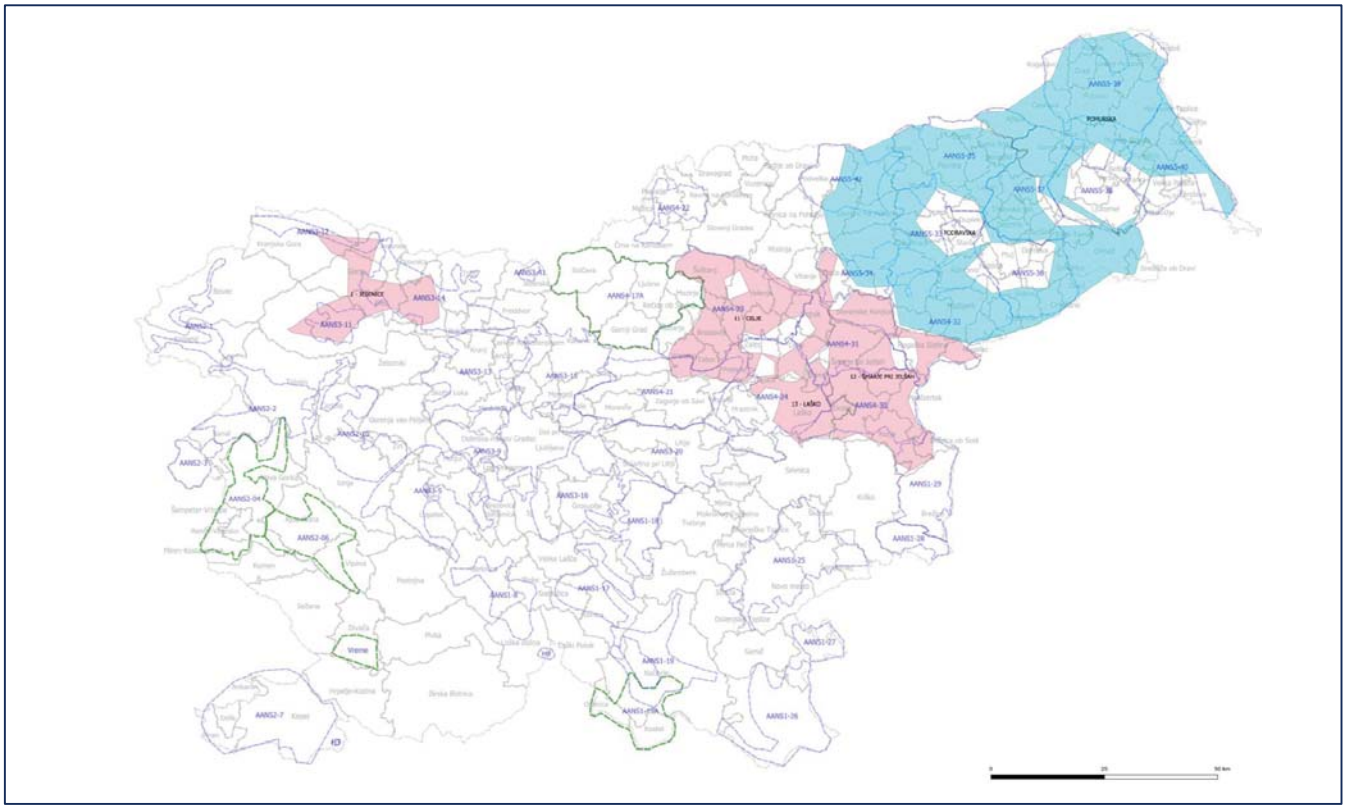


SOK 2021
RUNE

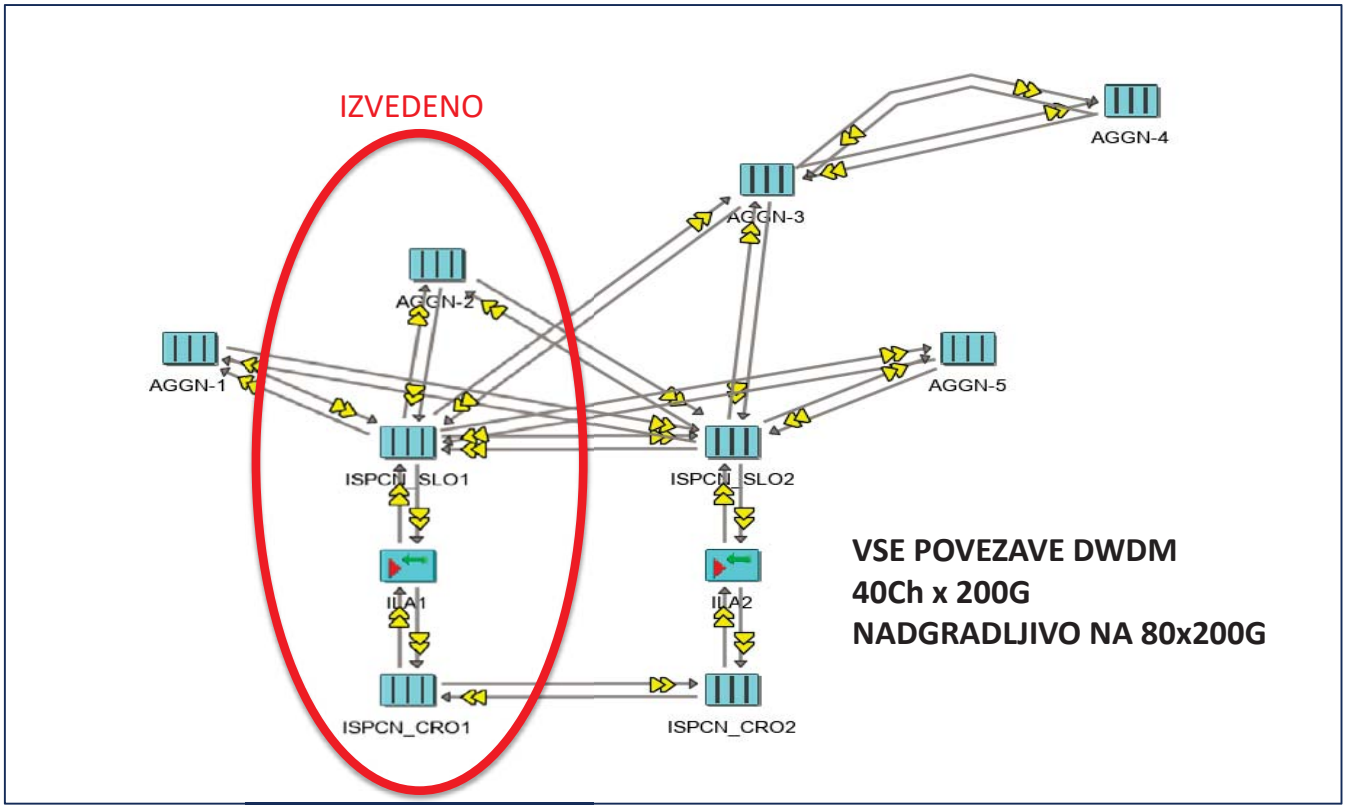
februar 2021

RUNE Rural Networks

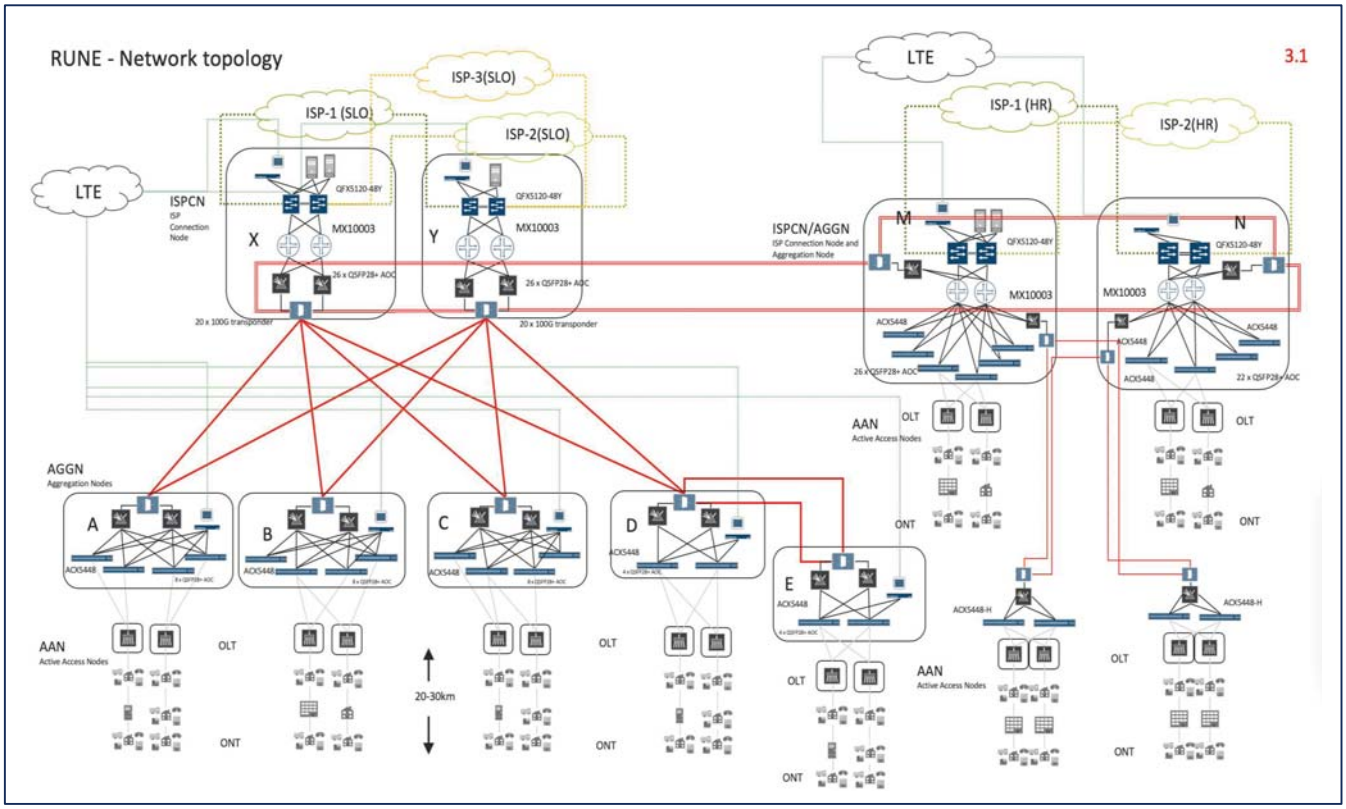
Introduction



Aggregation and Core I



Aggregation and Core II



Dimenzioniranje agregacijskih povezljivosti

- ZARADI:
  - Spremembe v načinu uporabe omrežij/vsebin
  - Always-on storitev
  - XGS-PON (tudi sicer PON) topologije
  - Koncepta wholesale-only infrastrukturni operater

JE POTREBNA SPREMEMBA KONCEPTA PROJEKTIRANJA!

Oversubscription / statistični multiplex

- Pri PON tehnologijah povezujemo na isti fizični dostopovni vmesnik (preko pasivnih optičnih spliterjev) večje število uporabnikov (odvisno od delilnega razmerja, tipično do 64);
- Zmogljivost dostopovnega vmesnika se dinamično deli med uporabnike, ki v določenem trenutku rabijo pasovno širino;
- PON dostopovni vmesnik je dejanska točka v infrastrukturi, kjer se ista zagotovljena zmogljivost deli med več uporabniki, torej točka, kjer se zgodi oversubscription.
- Primer (zagotovljena hitrost):
  - Pri P2P Ethernet se je tipično 24x100Mbps uporabničkih vmesnikov povezalo na 1G uplink (1G/24=41Mbps)
  - Pri GPONu 2,5G na do 64 uporabnikov (2,5/64=39Mbps)
  - Pri XGS-PON 10G/64=156Mbps

Dejanska zmogljivost PON omrežja

- Pri PON omrežju bi morali govoriti o obeh hitrostih, najvišji in zagotovljeni;
- Ob pogoju, da v topologiji nimamo (poleg samega dostopovnega vmesnika) nobene druge točke, ki bi predstavljala ozko grlo, je možno zagotoviti hitrost end-to-end (od UNI do NNI);
- Dejanska razpoložljiva zmogljivost pri končnem uporabniku ob navedenem pogoju je v praksi vedno nad 2/3 najvišje možne hitrosti.

ŠPEKULIRANJE S STATISTIČNIMI MULTIPLEKSI VIŠJE V OMREŽJU DEGRADIRA STORITEV PRENOSA PODATKOV.

NOVA OMREŽJA JE POTREBNO PROJEKTIRATI BREZ OZKIH GRL OD DOSTOPOVNEGA VMESNIKA DO JEDRA.

Kontakt

- goran.zivec@ruralnetwork.eu

Prostozračne optične zveze

Free-space optical communications

Luka Mustafa
IRNAS
musti@irnas.si

Povzetek

Prispevek se osredotoča na brezžični optični sistem KORUZA. KORUZA Pro je prvi cenovno ugodni in odprtokodni prostozračni optični komunikacijski sistem, ki omogoča naslednjo generacijo »last-mile« povezljivosti ter vsestranske možnosti namestitve. Podatki se varno prenašajo od točke do točke (»point-to-point«) preko okolju varnega kolimiranega žarka svetlobe, s prepustnostjo 1 Gbit/s ali 10 Gbit/s na razdalji do 150 m. Ta sistem, ki ne potrebuje licence, je odporen na radijske frekvence ali prenatrpanost pasov in je 10-krat cenejši v primerjavi z obstoječimi rešitvami na osnovi optičnih vlaken. Sistem KORUZA Pro je zasnovan za profesionalne uporabnike, a njegova odprta zasnova omogoča vsestranske možnosti za prilagoditve, eksperimentiranje in raziskovanje. Projekt KORUZA je leta 2020 prejel sredstva v okviru razpisa NGI Pointer (“Next Generation Internet Pointer”), namenjena nadaljnjemu razvoju sistema v sledečem letu, ter sodeluje pri pobudi COST Action NEWFOCUS.

Abstract

Presentation focuses on the KORUZA wireless optical system. KORUZA Pro is the first affordable and open source free-space optical communication system, enabling next generation last-mile connectivity and versatile installation options. Data is securely transmitted point-to-point over an eye-safe collimated beam of light with 1 Gbps or 10 Gbps throughput at distances up to 150 m. This license-free internet access system is immune to RF or band over-crowdeness and is 10-times cheaper compared to existing fiber-based solutions. KORUZA Pro is designed for professional users, but not only – its open design enables versatile options for modifications, experimentation and research. KORUZA project has been granted “Next Generation Internet Pointer” (NGI Pointer) funding in 2020, to take the technology further over the course of the next year, and is participating in the COST Action NEWFOCUS call.

Biografija avtorja

Luka Mustafa je izvršni direktor in tehnični vodja Inštituta IRNAS, ki ga je ustanovil leta 2014 v Sloveniji, ter alumni fundacije Shuttleworth Foundation. V IRNAS-u vodi multidisciplinarno ekipo inženirjev, ki razvijajo odprtokodne in odprtostrojne sisteme, od CNC strojev, do elektronike in optičnih sistemov (FSO), kot je brezžični optični sistem KORUZA, promovira in uporablja odprta brezžična omrežja v okviru projekta *WLAN Slovenija*, ter upravlja tako nacionalne kot mednarodne brezžične hrbtenice (»backbones«). Sodelovanje z mednarodnimi partnerji je njega in njegovo ekipo uveljavilo kot razvojnega partnerja na področju interneta stvari (IoT), zlasti na področju naprav za varovanje živali (npr. sledilnikov divjih

živali), industrije, senzorike okolja in celo tehnologije IoT za vesolje.

Author's biography

Luka Mustafa is the CEO and tech lead of Institute IRNAS, which he founded in 2014 in Slovenia, and a Shuttleworth Foundation alumni. At IRNAS, he leads a multidisciplinary team of engineers, developing open-source and open-hardware systems ranging from CNC machines, to electronics and fibre optic systems (FSO) like wireless optical system KORUZA, promotes and deploys open wireless networks in WLAN Slovenija project, and manages national as well as international wireless backbones. Collaboration with international partners has made him and his team a well-known development partner in the IoT field, especially in the field of animal conservation tech (e.g. wild animal trackers), industry, environmental sensing and even IoT technology for space.

irnas

KORUZA

Wireless free space optical communication system

Luka Mustafa, IRNAS Founder & CEO

www.irnas.eu

The Story of IRNAS.

2013

Interest in exploring KORUZA FSO & new ideas, lacking a development partner.

2014

FOUNDED INSTITUTE IRNAS

irnas







2016

STARTED IRNAS INNOVATION LAB

TODAY

Crossdisciplinary team of 16, taking your idea to a finished product.

irnas

KORUZA

First affordable 5g light-speed wireless optical communication system for urban environments.

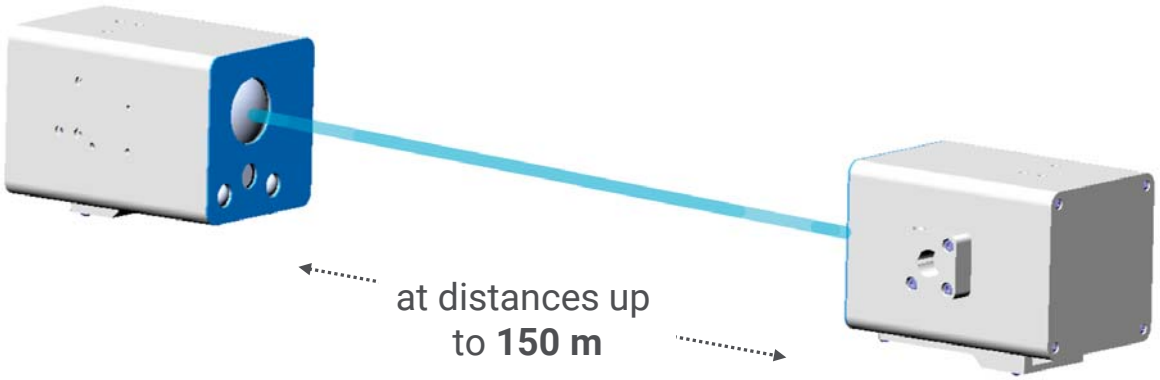
1. Secure point-to-point bridging
2. Increasing the cappacity of WiFi and VDSL networks
3. Expanding the reach of FTTH
4. Last-mile mesh network
5. Open-source



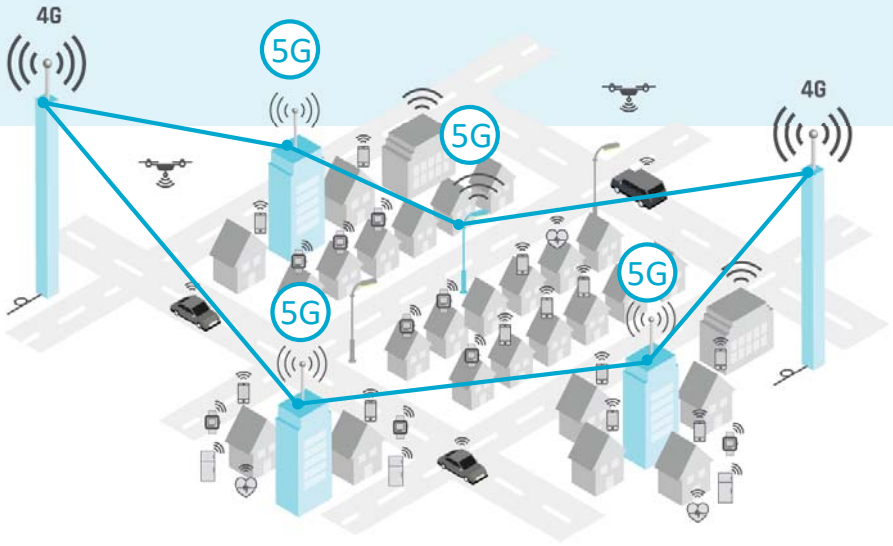
KORUZA offers **secure** point-to-point transmission over an **eye-safe** collimated beam of infra-red light.

1 Gbps

10 Gbps



APPLICATIONS - 5G NETWORKING



Healthcare monitoring systems

Driverless cars navigation

Drones/robotics applications

Connected consumers devices

Applications with custom KORUZA integration

✓Smart cities

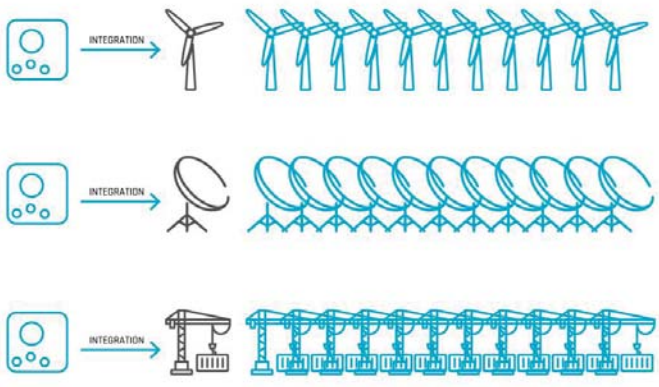
an alternative internet access infrastructure.

✓Radio astronomical observatories

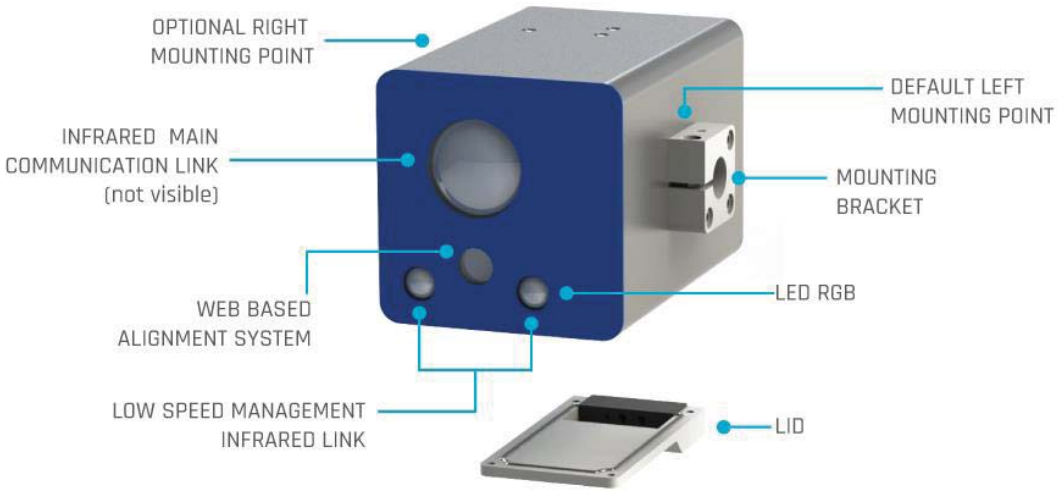
management of radio telescopes.

✓Transportation and logistics

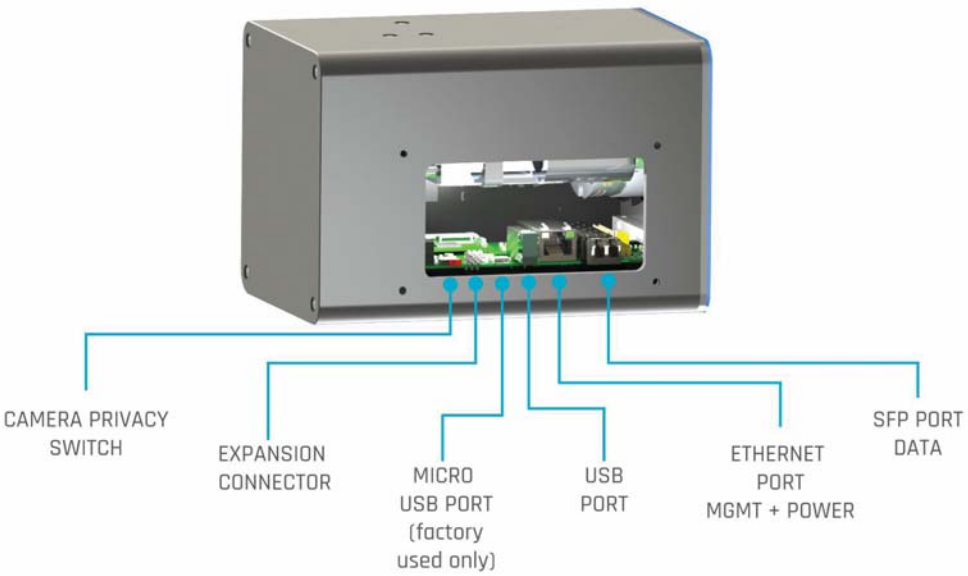
management of communication between harbour cranes, trains etc.



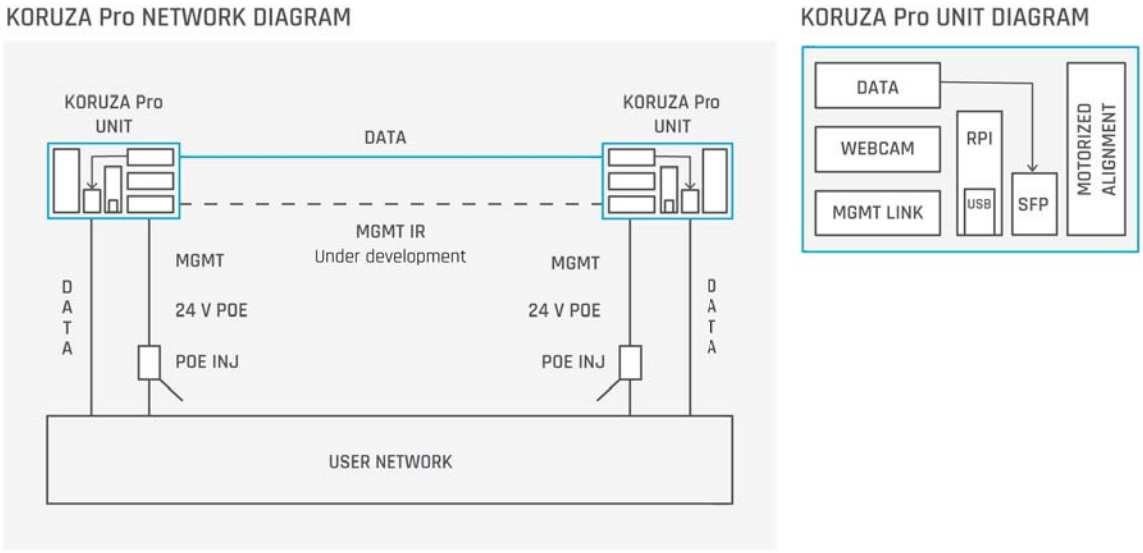
Unit Description



Unit Description

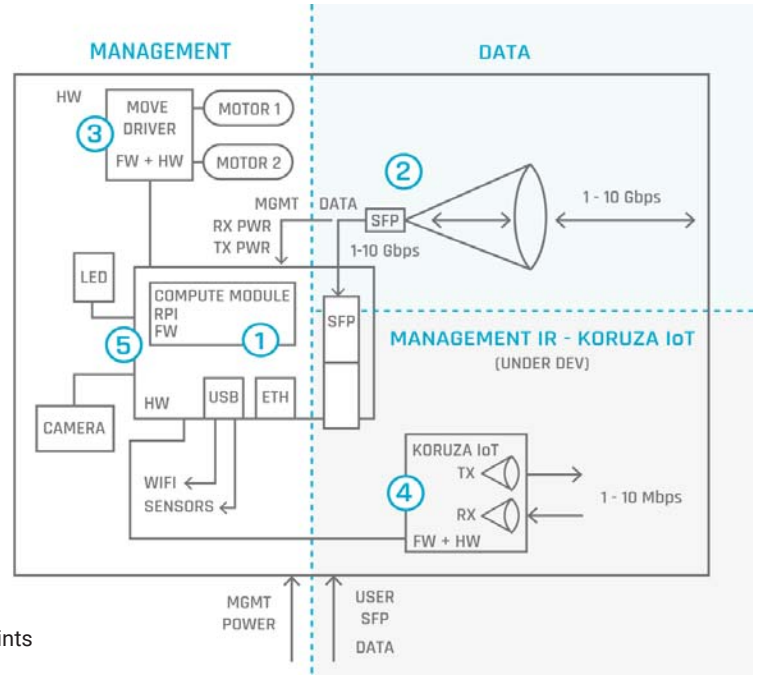


Link Diagram



Block Diagram

1. COMPUTE MODULE
   - → Main processor with RPi compute module – Linux
   - → High-speed data transmission
   - → Alignment algorithms + management
   - → FW +HW
2. OPTICAL ARM
   - → Lens to SFP transceiver
   - → Alignment webcam
   - → HW
3. MOVE DRIVER
   - → Controls two motors for alignment
   - → FW+ HW
4. KORUZA IoT
   - → Unit-unit management communication
   - → Under development
   - → FW+HW
5. ENCLOSURE AND MAIN STRUCTURE
   - → IP57 enclosure with mounting options and cable entry points
   - → HW

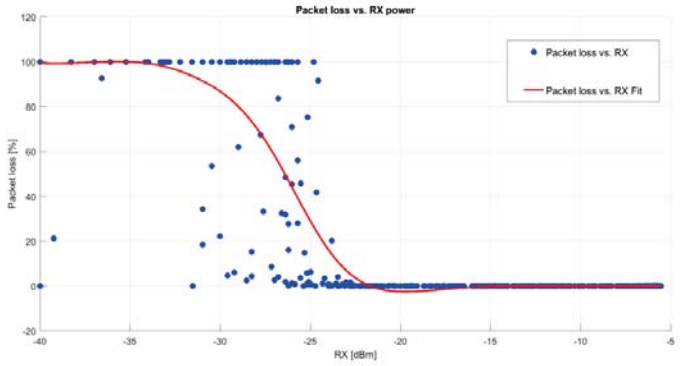



✓ Immune to RF or band over-crowdedness.
✓ License regulation and permission-free.
KORUZA


SNOW
RAIN
FOG
KORUZA is WEATHER-PROOF!
KORUZA

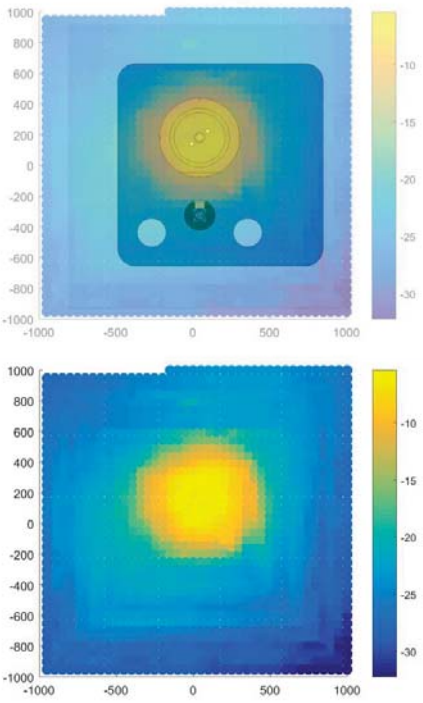
Packet Loss as a Function of Optical Power

- 40km SFP transceiver (now used)
  - Max RX power -3dBm
  - LOS de-assert -24dBm
  - LOS assert -35dBm
  - Margin: 21dB
- 120km SFP transceiver (available)
  - Max RX power +5dBm
  - LOS de-assert -31dBm
  - LOS assert -35dBm
  - Margin: 36dB



Misalignment Evaluation

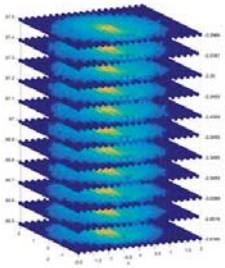
- Received local optical power as a function of remote unit movement (x,y in motor steps, power in dBm)
- @50 m 1 step = 0.093 mm movement.
- Movement for 1000 steps (~0.1deg) from center causes complete signal loss, equal to 93 mm displacement on the unit.
- **Rule of thumb, beam must not move off the face of the unit.**



Beam Analysis

- Analyzing an optical beam in 3D
- Evaluation of beam divergence
- Profiling optical power distribution
- Automatically optimize the placement of optical receivers and transmitters behind the lens or other optical elements





KORUZA & NGI Pointer

- NGI (Next Generation Internet) Pointer grant received in 2020
- Next generation system with **optimized** user experience
- **Custom applications** for industry and privacy
- **Hardware upgrade** and open-source release
- **Testbed** and networking demonstration
- **KORUZA technology** as a set of **open modules** for next gen development



KORUZA & NEWFOCUS WG4 call



Collaboration topics:

- 1) Data-collection, analysis and experimental roll-out of the KORUZA Pro system and ingestion of data for channel modelling.
- 2) 10 Gbps long-range link design based on off-the-shelf components, focus:
  a. Using EDFA or other readily available amplification sources at 1550 nm as a source for FSO transmission.
  b. Determining price-performance ratio of available telescopes for 1 km app.
  c. Experimentally evaluating coupling efficiency of SFP and other transceivers as FSO receivers.
- 3) Next gen test-bed for FSO validation and setup in SLO with multi-hop architecture.

Need engineering expertise for your next challenge?

Let’s connect.

info@irnas.eu
@institute_irnas

Komunikacije z vidno svetlobo

Visible Light Communications

Žiga Pušelc in Boštjan Batagelj
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
zigapuselc@gmail.com

Povzetek

V prispevku so predstavljene komunikacije z vidno svetlobo (ang. visible light communications - VLC) in njihova uporaba. Komunikacija z vidno svetlobo je različica podatkovne brezvrvične komunikacije, ki za prenos informacij uporablja vidno svetlobo. V širšem pomenu spada VLC med tehnologije optične brezvrvične komunikacije (angl. optical wireless communications – OWC). Predstavljene bodo naslednje teme: kaj je VLC, značilnosti VLC, koncept VLC, Li-Fi, splošna uporaba VLC in uporaba VLC v 5G omrežjih.

Abstract

The presentation explains visible light communication - VLC and its use. Visible light communication is a version of wireless data communication that uses visible light to transmit information. In a broader sense, VLC is one of the optical wireless communications – OWC technologies. The following topics will be presented: what is VLC, VLC features, VLC concept, Li-Fi, VLC applications in a broader sense, applying VLC in 5G networks.

Biografija predavatelja

Žiga Pušelc je absolvent prvostopenjskega visokošolskega strokovnega študijskega programa Aplikativna elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani Univerze v Ljubljani. Zaposlen je v Šolskem centru Celje, na Srednji šoli za kemijo, elektrotehniko in računalništvo, kot profesor informatike in elektrotehnike. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo mobilna omrežja in brezvrvične optične komunikacije. Trenutno pod mentorstvom izr. prof. dr. Boštjana Batagelja pripravlja zaključno nalogo z naslovom »Komunikacije z vidno svetlobo in njihove uporabe«.

Lecturer's biography

Žiga Pušelc is a graduate of the study program "applied electrical engineering« at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana, University of Ljubljana. He is employed at the School Center Celje, at the Secondary School of Chemistry, Electrical Engineering and Computer Science as a professor of informatics and electrical engineering. His research interest includes mobile networks and wireless optical communications. He is currently under the mentorship of prof. dr. Boštjan Batagelj preparing a research project entitled "Visible light communications and their use".

Komunikacije z vidno svetlobo

Žiga Pušelc, Boštjan Batagelj

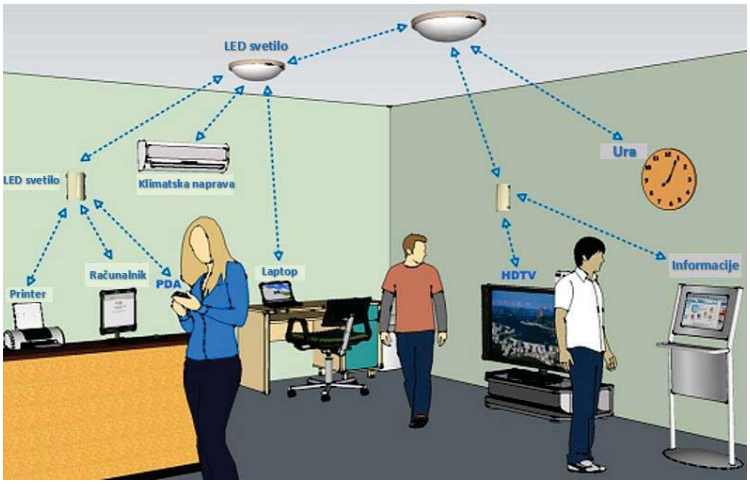
5. februar 2021

Pregled vsebine

- VLC
  - Kaj so komunikacije z vidno svetlobo
  - Značilnosti VLC
  - Delovanje VLC
  - Li-Fi
  - Komunikacijska arhitektura v VLC
    - Oddajniki
    - Sprejemniki
  - Uporaba VLC
- **Uporaba VLC v 5G omrežjih**

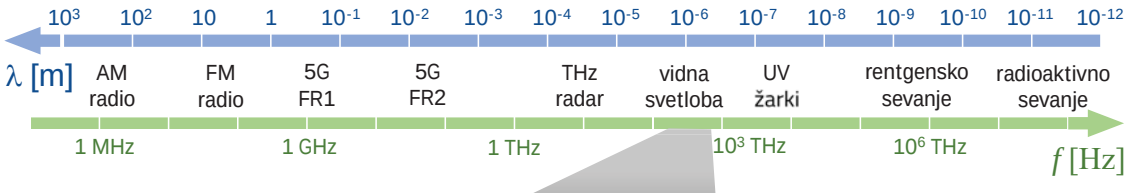
Kaj je VLC?

- Visible light communication
- Uporaba vidne svetlobe za prenos informacij
- Združitev osvetlitve in optične komunikacije
- Svetila LED bi naj do leta 2030 v celoti prevzela osvetlitev notranjih prostorov
- VLC tehnološki kandidat za 5G



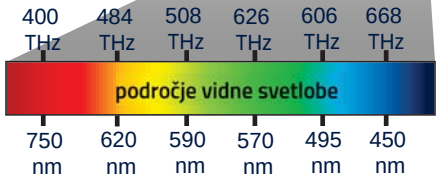
Značilnosti VLC

- **Velik razpoložljiv spekter**
- 10.000 – krat večji od radiofrekvenčnega in mikrovalovnega spektra
- Rešitev omejitve pasovne širine
- Li-Fi ima na razpolago milijonkrat večji spekter kot Wi-Fi



$$f = \frac{c_0}{\lambda_0}$$

$c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s



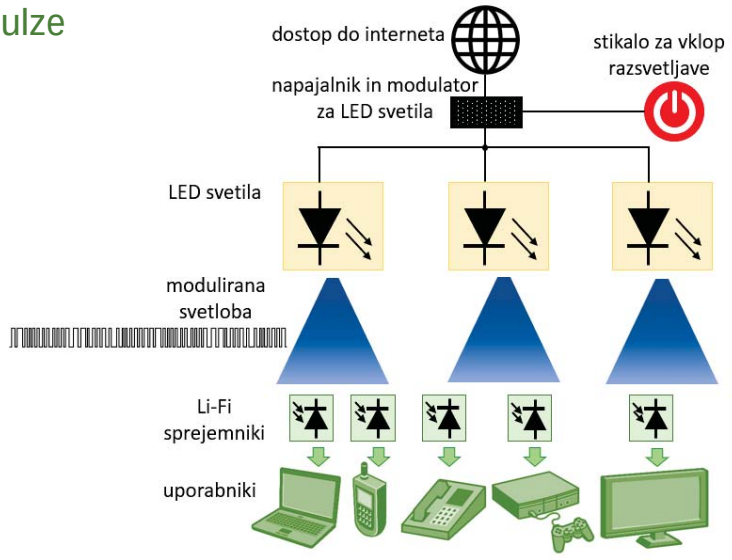
vir: Žiga Pušelc, Boštjan Batagelj, "Kaj nam prinaša komunikacija z vidno svetlobo?". Avtomatika: revija za avtomatizacijo procesov, profesionalno elektroniko in telekomunikacije. 2020, št. 187, str. 11-16. http://avtomatika.com/ARHIV-AVTOMATIKA/A187.pdf

- Ponovna uporaba spektra
- Omejitev komunikacije v zaprtih prostorih
- Prostorska večkratna uporaba optičnega spektra

- **Brezplačen spekter**
- Nereguliran del elektromagnetnega spektra
- Nelicenčni spekter

Delovanje VLC

- Preprostejša oprema za komunikacijo
- Neposredne modulacije
- Svetlobni vir proizvaja kratke svetlobne impulze
- Spreminjanje jakosti električnega toka
- Signal sprejemajo detektorji



vir: Žiga Pušelc, Boštjan Batagelj, "Kaj nam prinaša komunikacija z vidno svetlobo?". Avtomatika: revija za avtomatizacijo procesov, profesionalno elektroniko in telekomunikacije. 2020, št. 187, str. 11-16.
http://avtomatika.com/ARHIV-AVTOMATIKA/A187.pdf

Li-Fi

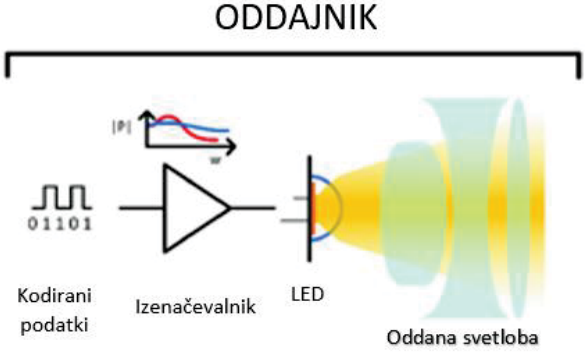
- Uporaba svetlobnega valovanja
- Proizvajanje hitrih svetlobnih impulzov
- Tvorjenje brezžičnega omrežja s pomočjo več svetil
- Brezhibno delovanje tako kot pri drugih radijskih sistemih
- Večja kibernetska varnost kot pri Wi-Fi



Oddajniki

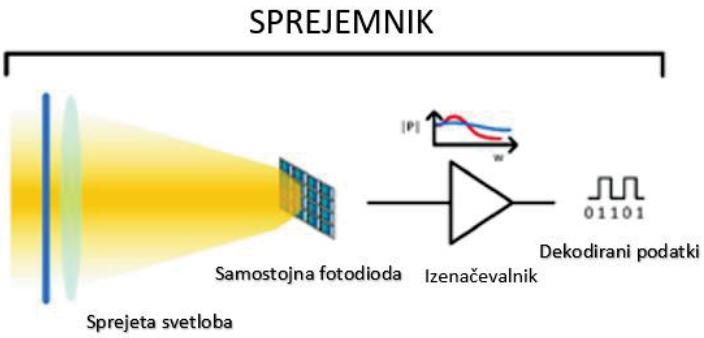
- Splošni viri oddajanja svetlobe
- svetila LED
- Električni tok
- Prednosti uporabe svetil LED

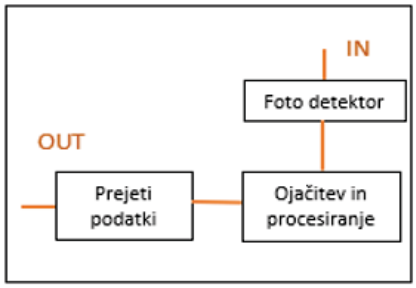




Sprejemniki

- Splošni viri sprejemanja svetlobe
- Pretvorba svetlobe v električni tok
- Fotodiode
- LED diode



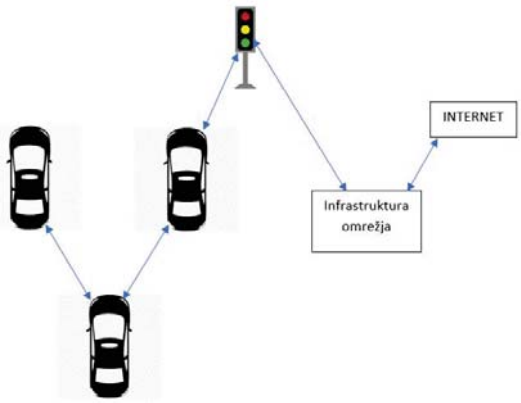


Notranjost Li-Fi sprejemnikov

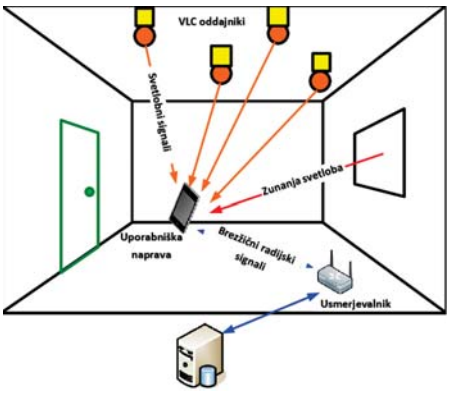
Uporaba VLC

- Široka uporabnost na različnih področjih
- Tridimenzionalni sistem za določanje položaja

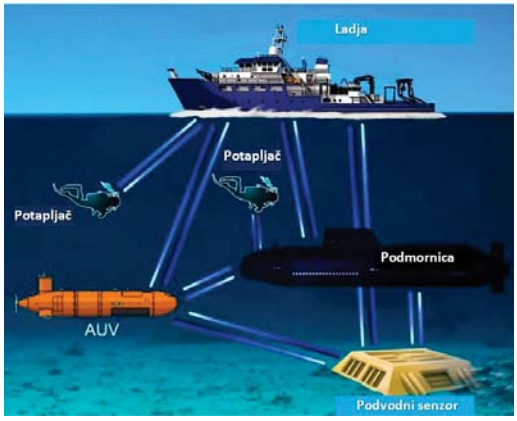
- Komunikacija med vozili
- Nizki stroški
- Dinamično okolje
- Komunikacija med avtomobili
- Bogat ekosistem sestavnih delov in virov svetlobe



- VLC notranji sistemi
- Uporaba osvetlitve
- Izzivi VLC
- Obetavna prihodnost



- Podvodna komunikacija



Uporaba VLC v 5G omrežjih

- mmW
- Naslednja generacija v mobilnih telekomunikacijah
- Boljša uporabniška izkušnja
- 80 % uporabe omrežja znotraj zaprtih prostorov
- Primerjava mmW in VLC



	spekter	licenca	varnost	poraba energije	cena	domet
mmW	30 – 300 GHz	delno brezplačno	srednja	visoka	visoka	100 – 200 m
VLC	385 – 790 THz	povsem brezplačno	visoka	nizka	nizka	< 10 m

Zelena tehnologija

- VLC je obetaven kandidat za zeleno komunikacijo
- Nižji stroški kot pri radijski komunikaciji
- Uporaba obstoječe infrastrukture
- Poraba električne energije pri VLC za 60 % nižja v primerjavi z radijskimi rešitvami

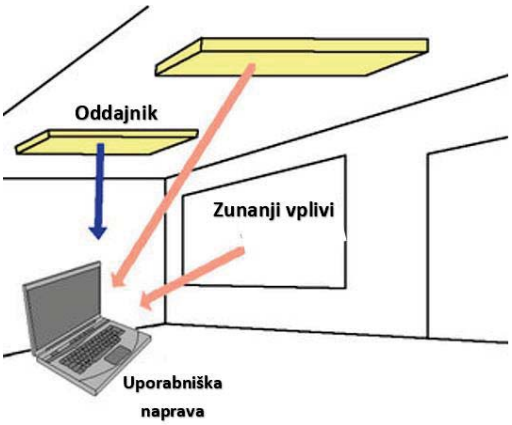


Zdravstveni vidiki

- VLC je alternativa infrardečim komunikacijskim sistemom
- Elektromagnetni spekter VLC sistema je povsem varen za človeške oči
- Odpravljanje oziroma blaženje utripanja svetlobe
- Utripanje hitrejše od 200 Hz

Odprti izzivi

- Omejena mobilnost
- Vzdrževanje neposredne vidljivosti
- Občutljivost na motnje
- Uporaba svetlobnih sit za zmanjšanje motenj



Optične tehnologije na sodobnih ladjah

Optical technologies on modern ships

Mladen Radovanović in Boštjan Batagelj
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
mlaki@yahoo.com

Povzetek

V prispevku so predstavljeni izzivi optičnih tehnologij na potniških ladjah, kjer je bil avtor nekaj let zaposlen kot vodilni elektroinženir. Obdelani so izzivi z optičnimi elementi, ki so vključeni v različne ladijske sklope. To so pogonski sklop, optični žiroskop, optične zanke v porazdeljenem sistemu avtomatizacije, kamor spadajo tudi meritve napetosti trupa in temperature ladijskega pogonskega elektromotorja z uporabo Bragg-ovega rešetkastega svetlobnega vlakna (FBG - Fiber Bragg Granting).

Abstract

This article discusses the challenges of optical technologies on passenger ships where author was employed several years as a Chief electrical engineer. Issues of optical technologies on propulsion, optical gyroscopes, optical loops in a distributed automation system and measurements of hull stress and temperature of a ship's propulsion electric motor using FBG Bragg optical lattice fiber are presented.

Biografija predavatelja

Mladen Radovanović je bil po končanem študiju elektrotehnike v Ljubljani 20 let zaposlen na potniških ladjah, kot glavni inženir elektrotehnike. Na ladjah je bil zadolžen za različne tehnologije, od klasičnega motornega pogona na zadnji potniški ladji na parni pogon, zadolžen pa je bil tudi za razne tehnologije na ladjah z dizelskimi pogoni. Pri svojem delu se je srečal z mnogimi tehnološkimi izzivi. Vodil je projekte za posodobitev avtomatike pogonskih sistemov, varnostnih, navigacijskih in komunikacijskih sistemov ter izpeljal projekt vgradnje in integracije prvega "solid state" radarja na komercialnih ladjah. Na ladjah se je srečal s pomanjkljivo načrtovanimi in izvedenimi sistemi. Leta 2019 se je vpisal na doktorski študij na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer v Laboratoriju za sevanje in optiko raziskuje področje implementacije milimetrskih radarjev na ladje.

Lecturer's biography

Mladen Radovanović was employed on passenger ships for 20 years as a chief electrical engineer. He worked on various technologies, from conventional motor drives, the last steam-powered passenger ship and worked for years on diesel-powered ships and faced various technical challenges. He led projects for modernization of propulsion systems, automation, security, navigation and communication systems, and carried out a project for integration of the first solid state radar on commercial ship. On ships, he encountered poorly designed and implemented systems. In 2019, he enrolled in a doctoral study at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. His research topic in the Laboratory of radiation and optics is related to the implementation of millimeter radars on vessels.



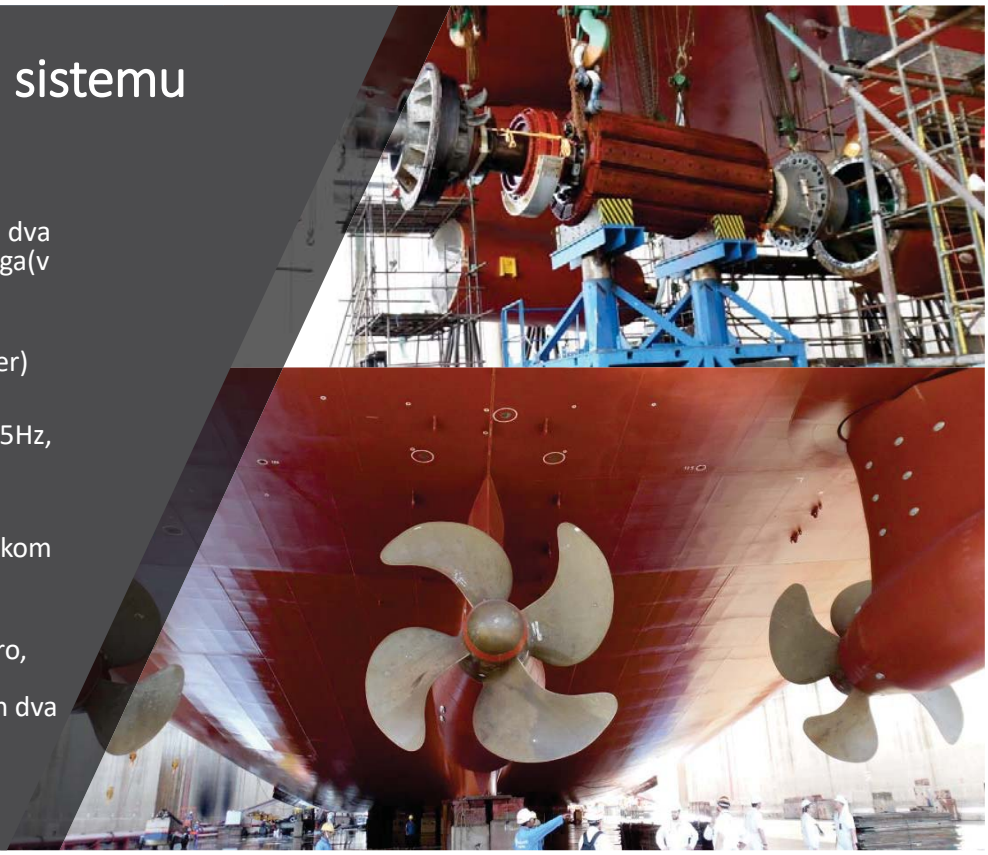
Izzivi optičnih tehnologij na potniški ladji

- Zanesljivost delovanja pogona ladje : povratna informacija pozicije rotorja sinhronega motorja v kontroler ciklokonverterja
- Triosni optični giroskop na principu Sagnacovog efekta: vpliv staranja SLD (Ang.SuperLuminiscentn Diod) na delovanje giroskopa
- Optična zanka v porazdeljenem sistemu avtomatike
- Merjenje temperature sinhronskega motorja električnega pogona ladje z uporabo FBG Braggovog optičnoga rešetkastog vlakna (Ang. Fiber Bragg Gratting)
- Meritve naprezanja trupa z uporabo FBG Braggovog optičnoga rešetkastog vlakna

2

Uporaba optike na sistemu propulzorjev

- Slika tri 15 MW POD propulzora, dva se obračajo 360° in enega fiksnega(v sredini)
- Sinhrone motorje poganja PSR (Programmierbar Schnell Rechner) ciklokonverter proizvajalca ABB
- deluje v področju 0..1570 V, 0..15Hz, z delovnim območjem -150..150 obrtov/min, nazivnim tokom 2x2626A in vodnim hlajenjem močnostne elektronike z iskoristkom 96,7%.
- Vsak propulzor ima šest polni sinhroni motor z dvojno armaturo, dve trifazni navitji sta mehansko zamaknjena za 60°, poganjata jih dva električna pogona z električnim zamikom 120°



Povratna informacija pozicije rotorja

- Povratna informacija pozicije, kota λ rotorja elektromotorja propelerja v ciklokonverterju se uporablja za tranformacijo koordinatnih sistemov iz 3 osnega R,S,T statorskega v dvoosni rotorski d,q vektorski sistem. Rezolucija 13 bitnega Gray code encoderja TR HE-65-S LWL je 0.044°. Greyev kod se uporablja ker so spremembe med dvemi koti prisotne samo na enem bitu tako da se zmanjša možnost napake pri prenosu kota.



4

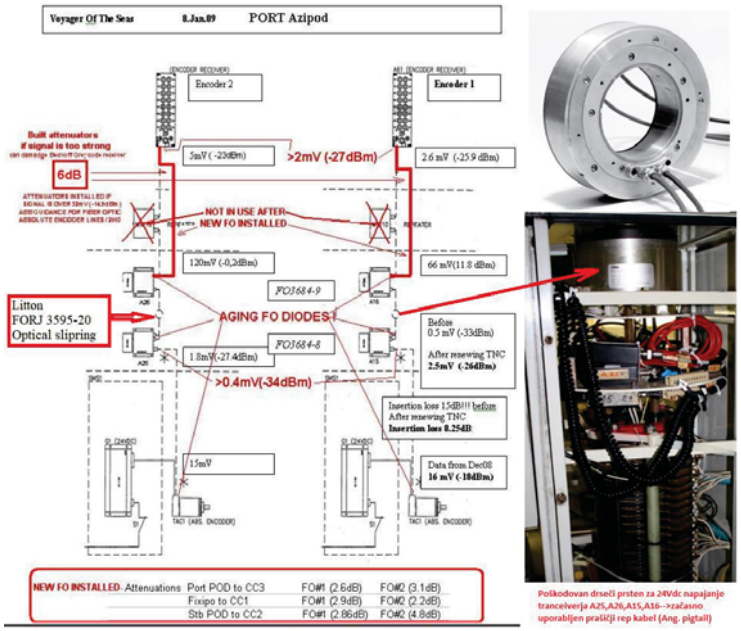


Izpad propulzorja zaradi napake na prenosni poti

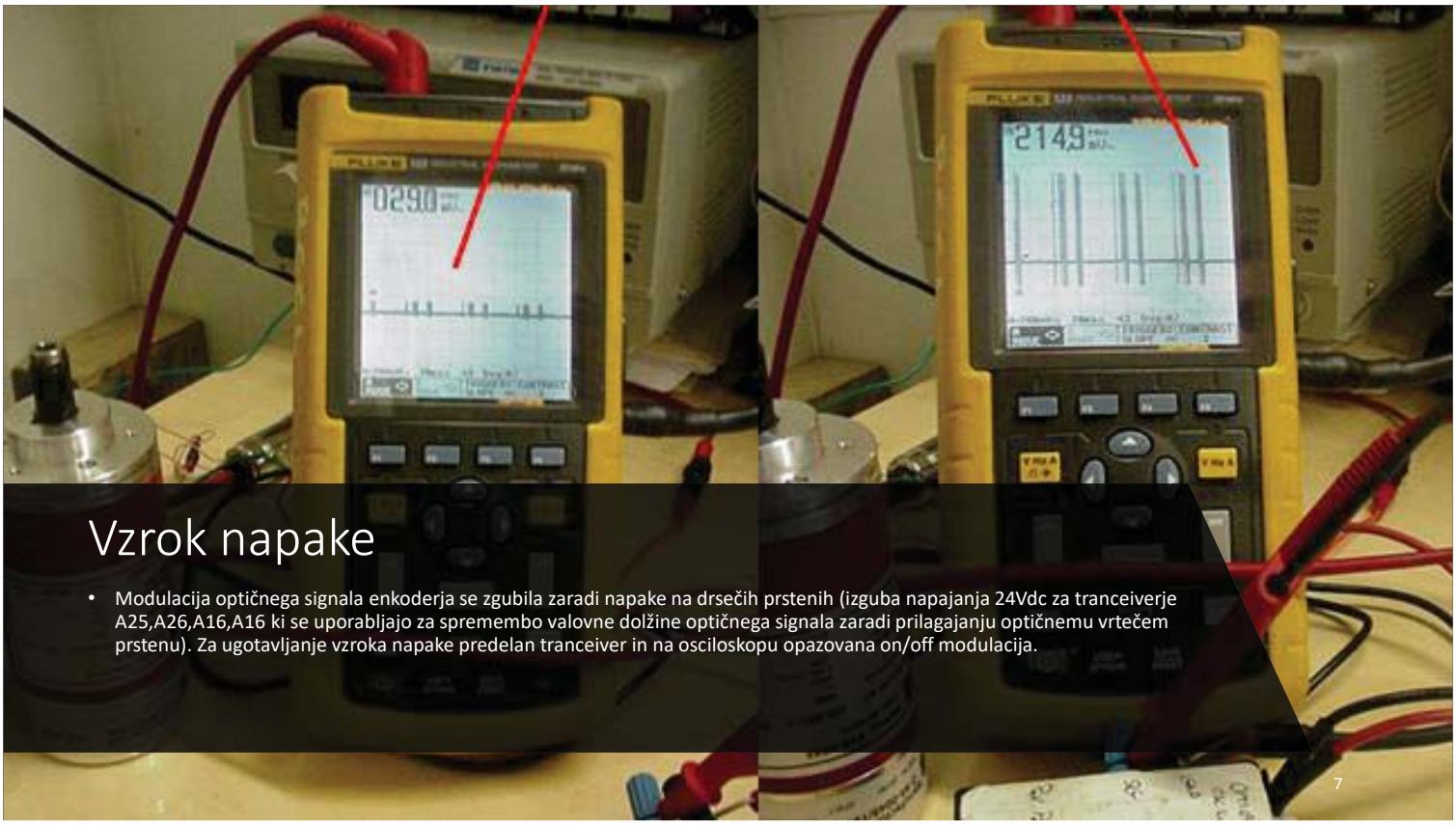
- Če je informacija o kotu rotorja nedostopna, pride do izklopa propulzije. Največkrat se to zgodi zaradi napake na prenosni poti od enkodjerja rotorja do Beckhoff M110 dekoderja v ciklokonverterju. Izklop pogona je izredno nevaren navigacijski dogodek, posebej če je ladja v manovri (navigacija v rekah, prekopih, vstop ali iztop v luko, ozki navigacijski koridorji z veliko prometa).

5

Optična pot od pozicijskog koderja do dekoderja v kontrolerju električnega pogona ciklokonverterja



6



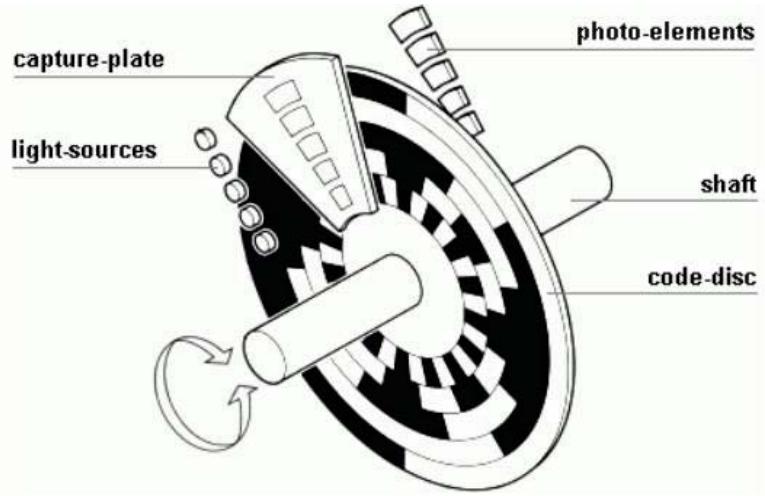
Vzrok napake

- Modulacija optičnega signala enkoderja se zgubila zaradi napake na drsečih prstenih (izguba napajanja 24Vdc za tranceiverje A25,A26,A16,A16 ki se uporabljajo za spremembo valovne dolžine optičnega signala zaradi prilagajanju optičnemu vrtečem prstenu). Za ugotavljanje vzroka napake predelan tranceiver in na osciloskopu opazovana on/off modulacija.

7

Kotni enkoder zgradba

- Napaka meritve kota je lahko tudi posledica staranja ležajev ali vibracij enkoderja, ki je izveden kot optični disk z 13 Grey kodnimi obroči.

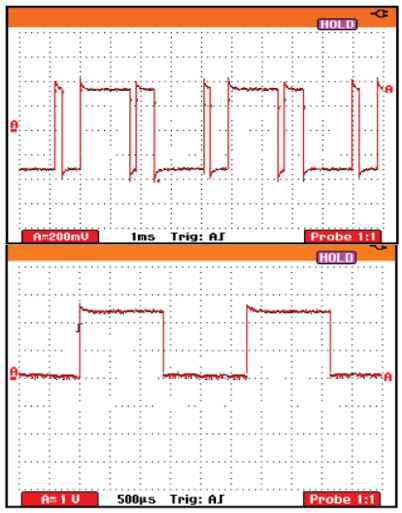


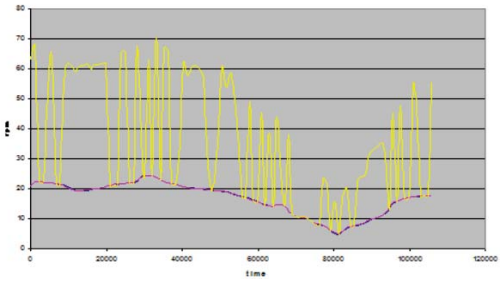
(https://tams-www.informatik.uni-hamburg.de)

8

Napaka na enkoderju

- Perioda petega bita je enaka rotacijski periodi rotorja sinhronskega motorja in se zato uporablja kot povratna informacija o brzini motorja , skupaj z petim bitom drugega enkoderja in periodo napetosti ciklokonverterja (Propulzor ima dva navitja mehansko zamaknjena za 60 stopinj, oziroma dva sinhrona motorja ki ih poganja dva električna pogona z električnim zamikom 120 stopinj)
- Napaka na enkoderju bit 5 in enkoder brez napake
- Zaradi napake na bitu 5 pride do napačne meritve rotacijske periode in zaradi tega v najslabšem primeru do isklopa pogona.
- Pravočasno zaznavanje napake je del vzdrževalnega dela in v tem primerju se nepravilan enkoder zamenja. Po zamenjavi enkoderja se izvrši začetna kalibracija, oziroma vzbujanje sinhronega motorja z sunki istosmernega toka dokler se rotor ne ustavi, dejanski kot med mehansko in električno nulo ki ga izmeri novi enkoder se zapiše v kontroler ciklokonverterja.





9

		ENCODER OUT (mV)	ENCODER OUT in dBm	BEFORE REPEATER IN (mV)	BEFORE REPEATER IN dBm	AFTER REPEATER IN (mV)	AFTER REPEATER IN dBm	BECKHOFF INPUT IN (mV)	BECKHOFF INPUT IN dBm	DATE WHEN MEASURED		ENCODER OUT (mV)	ENCODER OUT in dBm	BEFORE REPEATER IN (mV)	BEFORE REPEATER IN dBm	AFTER REPEATER OUT (mV)	AFTER REPEATER IN dBm	BECKHOFF INPUT IN (mV)	BECKHOFF INPUT IN dBm	DATE WHEN MEASURED	
FIXIPOD	LINE 1	16,0	-18,0		#NUM!		#NUM!	1,0	-30,0		LINE 2	12,4	-19,1		#NUM!		#NUM!		#NUM!		
		16,0	-18,0	2,3	-26,4	114,0	-9,4	8,5	-20,7	26.Sep.09		12,4	-19,1	1,3	-28,9	28,2	-15,5	2,4	-26,2	26.Sep.09	
			#NUM!	2,1	-26,8	76,0	-11,2	8,1	-20,9	28.vlj.10			#NUM!	1,2	-29,2	22,4	-16,5	2,0	-27,0	28.vlj.10	
			#NUM!	1,0	-30,0	37,0	-14,3	2,5	-26,0	23.lip.12			#NUM!		#NUM!	22,4	-16,5	13,5	-18,7	28.vlj.10	
			#NUM!	1,0	-30,0	31,0	-15,1	11,1	-19,5	23.lip.12		16,0	-18,0	1,3	-28,9	20,9	-16,8	4,2	-23,8	23.lip.12	
			#NUM!	1,0	-30,0	27,0	-15,7	8,0	-21,0	1.vlj.14			#NUM!	1,3	-28,9	17,9	-17,5	1,0	-30,0	1.vlj.14	
			#NUM!		#NUM!	22,5	-16,5	5,6	-22,5	19.July 14			#NUM!		#NUM!	164,0	-7,9	4,2	-23,8	1.vlj.14	
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!		#NUM!	14,6	-18,4	3,8	-24,2	19.July 14	Polished connectors line 2
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!		

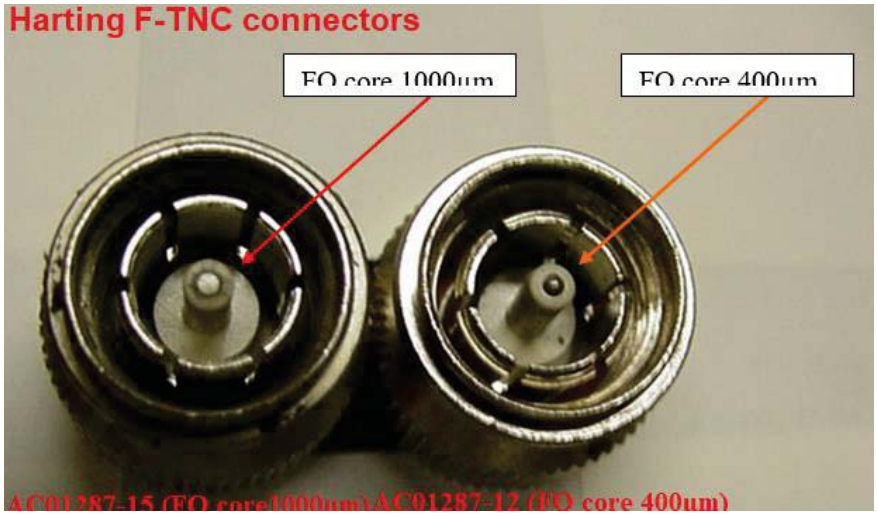
		ENCODER OUT (mV)	ENCODER OUT in dBm	BEFORE SLIPRING IN (mV)	BEFORE SLIPRING IN dBm	AFTER SLIPRING IN (mV)	AFTER SLIPRING IN dBm	BECKHOFF INPUT IN (mV)	BECKHOFF INPUT IN dBm	DATE WHEN MEASURED		ENCODER SE 231 OUT (mV)	ENCODER OUT in dBm	BEFORE SLIPRING IN (mV)	BEFORE SLIPRING IN dBm	AFTER SLIPRING IN (mV)	AFTER SLIPRING IN dBm	BECKHOFF INPUT IN (mV)	BECKHOFF INPUT IN dBm	DATE WHEN MEASURED	
AZIPOD 1 STB	LINE 1	10,0	-20,0	1,0	-30,0	36,0	-14,4		#NUM!		LINE 2	12,1	-19,2		#NUM!	49,0	-13,1	13,8	-18,6		
			#NUM!	0,9	-30,5	29,0	-15,4	1,3	-28,9	22.sep.09		12,1	-19,2	0,6	-32,2	19,0	-17,2	0,9	-30,5	22.Sep.09	
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!	0,6	-32,2	150,0	-8,2	6,1	-22,1	22.Sep.09	Replaced A26 due to low signal
			#NUM!	1,0	-30,0	20,1	-17,0	1,0	-30,0	1.tra.10			#NUM!	0,5	-33,0	86,0	-10,7	2,7	-25,7	1.tra.10	New fiber#1 connected
		17,0	-17,7	3,0	-25,2	9,1	-20,4	3,6	-24,4	19.lip.12			#NUM!	0,7	-31,5	25,0	-16,0	6,7	-21,7	19.lip.12	
		17,0	-17,7	3,0	-25,2	70,0	-11,5	10,3	-19,9	13.pro.13			#NUM!	0,5	-33,0	13,1	-18,8	3,9	-24,1	13.pro.13	
		22,5	-16,5	2,5	-26,0		#NUM!		#NUM!	5.tra.14		17,0	-17,7	0,9	-30,5	13,1	-18,8	3,9	-24,1	6.vlj.14	Need to polish both connectors in POD and LV slipring on line#2
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!			16,5	-17,8	0,6	-32,2		#NUM!	3,1	-25,1	15.tra.14	Polished connector before slipring, 3cracks found(cut 3cm)
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!		

		ENCODER OUT (mV)	ENCODER OUT in dBm	BEFORE SLIPRING IN (mV)	BEFORE SLIPRING IN dBm	AFTER SLIPRING IN (mV)	AFTER SLIPRING IN dBm	BECKHOFF INPUT IN (mV)	BECKHOFF INPUT IN dBm	DATE WHEN MEASURED		ENCODER SE 331 OUT (mV)	ENCODER OUT in dBm	BEFORE SLIPRING IN (mV)	BEFORE SLIPRING IN dBm	AFTER SLIPRING IN (mV)	AFTER SLIPRING IN dBm	BECKHOFF INPUT IN (mV)	BECKHOFF INPUT IN dBm	DATE WHEN MEASURED	
AZIPOD 2 PORT	LINE 1	16,0	-18,0	2,5	-26,0	66,0	-11,8	2,6	-25,9	8.Jan.09	LINE 2	15,0	-18,2	1,8	-27,4	120,0	-9,2	5,0	-23,0	8.Jan.09	
		14,5	-18,4	2,2	-26,6	38,0	-14,2	1,4	-28,5	27.Sep.09		14,8	-18,3	1,7	-27,7	93,0	-10,3	2,5	-26,0	27.Sep.09	
			#NUM!	1,9	-27,2	28,0	-15,5	3,3	-24,8	30.ožu.10			#NUM!	1,5	-28,2	52,0	-12,8	2,5	-26,0	30.ožu.10	
		15,0	-18,2	2,4	-26,2	11,4	-19,4	4,0	-24,0	24.lip.12			#NUM!	0,9	-30,5	18,0	-17,4	7,3	-21,4	24.lip.12	
			#NUM!	2,6	-25,9	7,6	-21,2	2,3	-26,4	6.vlj.14			#NUM!	0,8	-31,0	9,2	-20,4	3,9	-24,1	6.vlj.14	
			#NUM!		#NUM!	19,5	-17,1	5,5	-22,6	10.Feb.2015			#NUM!		#NUM!	19,6	-17,1	6,5	-21,9	10.Feb.2015	
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!		
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!		
			#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!				#NUM!		#NUM!		#NUM!		#NUM!		

Do izpada optične povezave, ki vodi do ciklokonverterja lahko pride:
zaradi staranja p-i-n fotodiod (v povprečju 3dB / 6 mesecov)

povečanega stičnega slabljenja zardi vzdolžnega premika na konektorjih optičnih vlaken, ki se razmaknejo zaradi vibracij (1mm vzdolžnega premika približno 3dB slabljenja)

10



Postavljeno narobno optično vlakno z jedrom 400 µm namesto 1000 µm

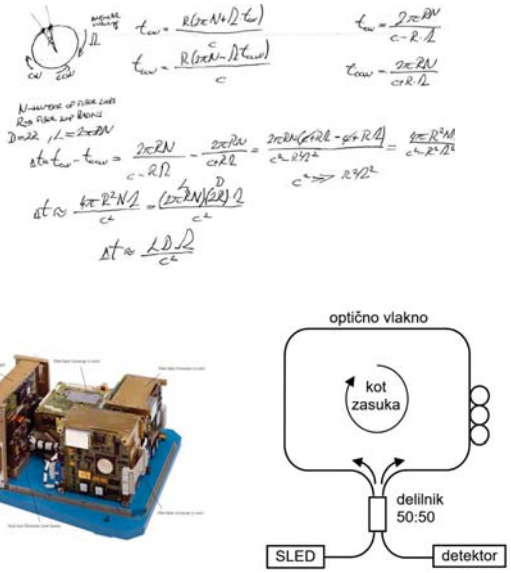
Optična vlakna so bila postavljena skozi isti prostor. V primeru požara ali mehanske poškodbe (trka ladje), lahko istočasno izpadejo vsi trije propulzorji. Na spodnji sliki optični kabli od STB (desneg če se gleda proti premcu ladje) in fixipoda grejo skozi tehnično sobo PS propulzorja (levega če se gleda proti premcu ladje).



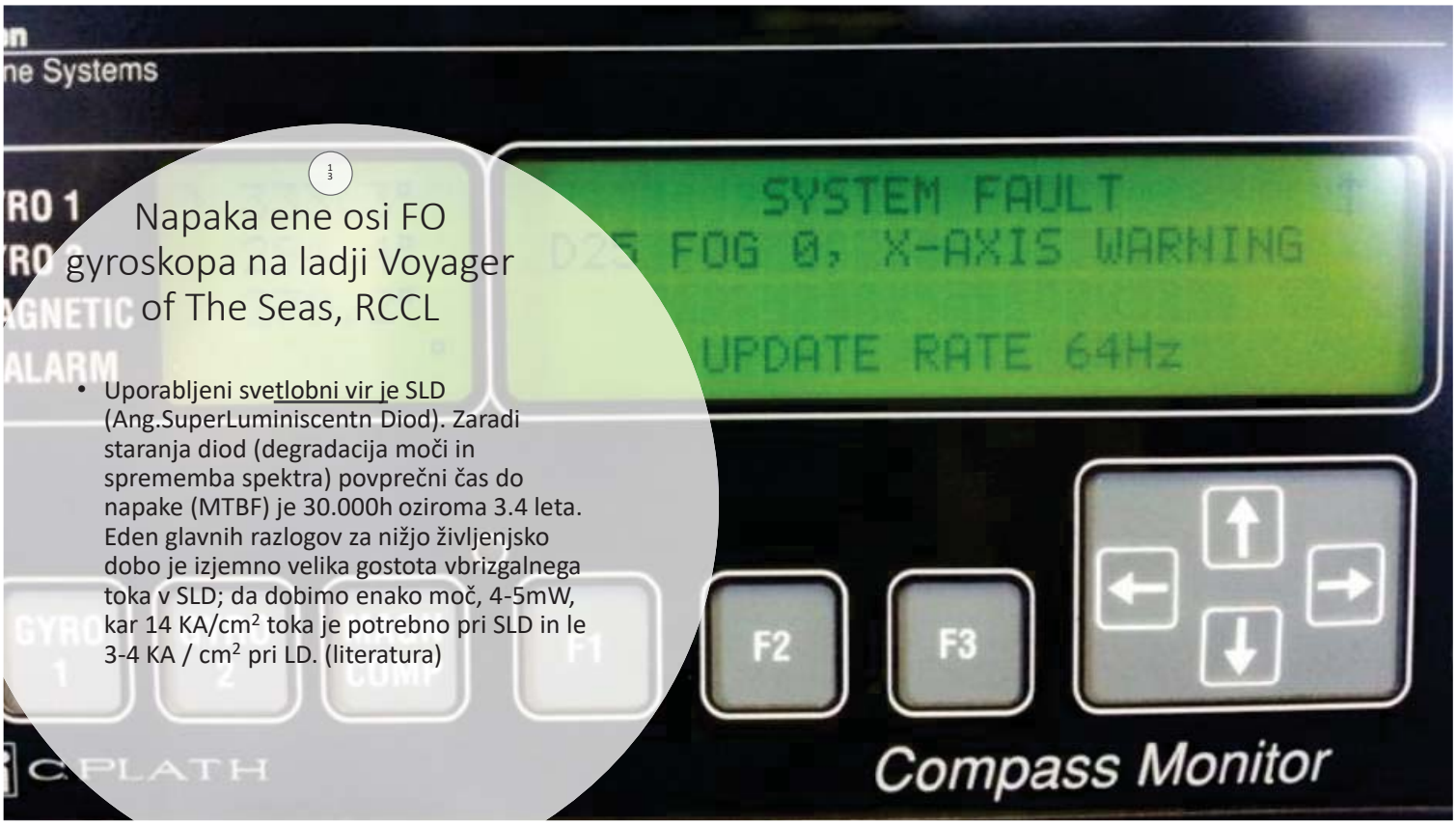
11

Triosni optični giroskop na principu Sagnacovog efekta

- Triosni giroskop Sperry Navigat 2100
- Starejše mehanske žiroskope, ki so sestavljeni iz vrtečega se kolesa v giroskopski tekočini, izrabljajo načelo ohranitve vrtilne količine, so že pred leti začeli zamenjevati moderni optični žiroskopi, ki merijo spremembo faze svetlobnega signala zaradi potovanja svetlobe v smeri vrtenja ali nasprotni smeri vrtenja iz česar se izračuna kot zasuka. Optični žiroskopi ne rabijo letnega servisiranja kot mehanski, menjavo giroskopske tekočine in umerjanju giroskopa.



12

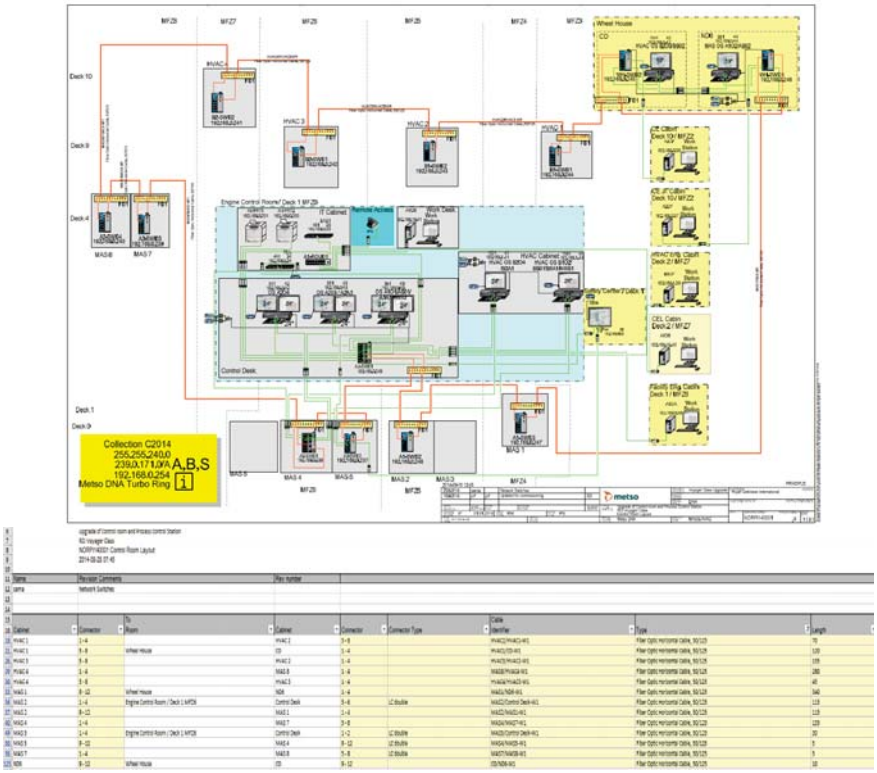


Napaka ene osi FO gyroskopa na ladji Voyager of The Seas, RCCL

- Uporabljeni svetlobni vir je SLD (Ang.SuperLuminiscentn Diod). Zaradi staranja diod (degradacija moči in sprememba spektra) povprečni čas do napake (MTBF) je 30.000h oziroma 3.4 leta. Eden glavnih razlogov za nižjo življenjsko dobo je izjemno velika gostota vbrizgalnega toka v SLD; da dobimo enako moč, 4-5mW, kar 14 KA/cm^2 toka je potrebno pri SLD in le 3-4 KA / cm^2 pri LD. (literatura)

Optična zanka v porazdeljenom sistemu avtomatike

- Na ladji Voyager of The Seas, porazdeljen sistem avtomatike Valmarine Damatic XD z 15200 vhodno/izhodnih kanalov je bil leta 2014 zamenjan z sistemom proizvajalca Metso. Avtor je vodil projekt v vseh fazah. Zamenjano je jedro sistema, oziroma prenosne poti, industrijski računalniki, indujstrijski usmerjevalniki, delovne postaje in programska oprema. Preklop med dvemi sistemi je narejen brez izpada pogona (Angl.blackout)



- shema optične zanke sestavljene iz 13 sekcij optičnega kabla z štirimi multi mode vlakni (Tx/Rx +2 vlakna rezerve) proizvajalca Drake *G4-50/125 AICI-I/O/RM-W* skupne dolžine 1405m

15

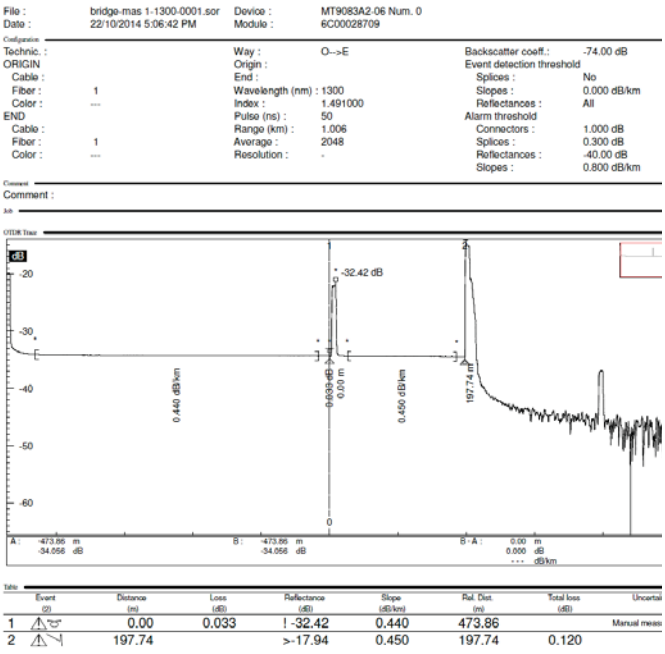


- najbolj pomembni procesi kot so PMS (Ang. Power Management) upravljajo redundančni računalniki. Porazdeljenih fieldbus vhodno/izhodnimi kabineti, kje je povezana večina analogno/digitalnih vhodno/izhodnih kanalov, so prek industrijskega etherneta povezani z procesnimi računalniki, oz. jedrom sistema. Prek serijskih vodila so industrijski računalniki povezani dodatno z: kontrolerji 3 propulzorja, Navigacijskim sistemom, AWP sistemom za čiščenje odpadne vode (Angl. Adwance Waste Treatment plant), incineratorjem, Računalnikom za stabilitet ladje, VDR črnom škatlom (Angl. Voyage Data Recorder), Kontrolerjem za meritev vibracij propelerjev

16

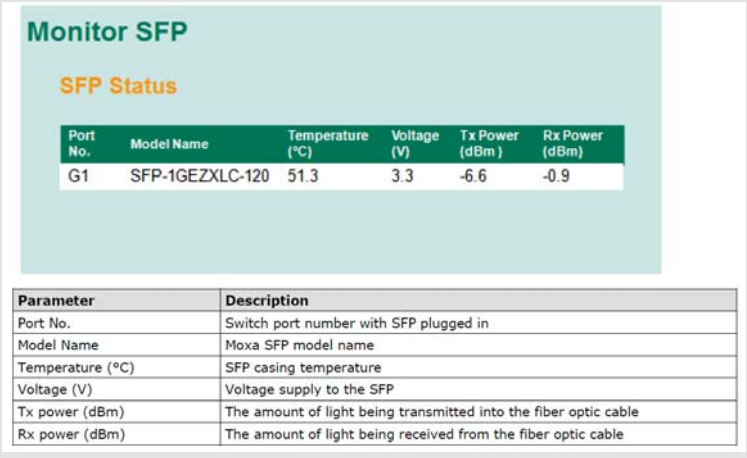
OTDR meritve (Angl. Optical Time Domain Reflectometer)

- Kritična faza projekta je po polaganju kablov in montaži konektorjev OTDR meritve (Angl. Optical Time Domain Reflectometer): Meritve dušenja, disperzije, numeričke aperture, mesta eventualnih poškodb ali prekinitve vlakna so bile opravljene z inštrumentom Anritsu MT9083A2-06 na dveh valovnih dolžinah 850nm in 1300nm.
- Izmerjene vrednosti se uporabljajo kot referenca v nadaljnih meritvah pri zagonu sistema in bodočim vzdrževalnim delom.



17

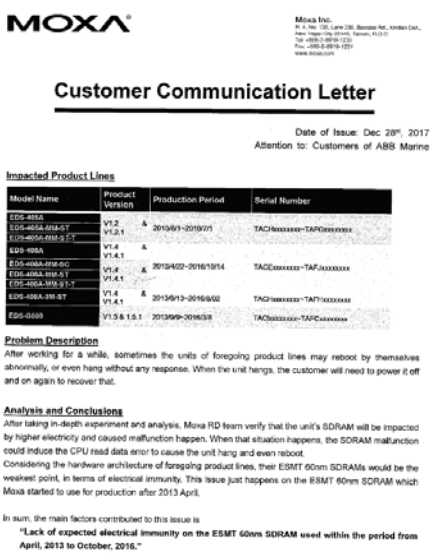
Vgrajene meritve v industrijskih stikalih Moxa



Parameter	Description
Port No.	Switch port number with SFP plugged in
Model Name	Moxa SFP model name
Temperature (°C)	SFP casing temperature
Voltage (V)	Voltage supply to the SFP
Tx power (dBm)	The amount of light being transmitted into the fiber optic cable
Rx power (dBm)	The amount of light being received from the fiber optic cable

- Zaradi iskušenj z staranjem laserskih virov, je pomembno spremljati moči v vlaknu. Za to se uporablja vgrajena SPF opcija meritve nivoja signala Rx/Tx (dBm) v industrijskih stikalih Moxa

18



MOXA

Moxa Inc.

Customer Communication Letter

Date of Issue: Dec 28th, 2017
Attention to: Customers of ABB Marine

Impacted Product Lines

Model Name	Product Version	Production Period	Serial Number
EDS-405A EDS-405A-MM-ST EDS-405A-MM-ST-CT	V1.2 & V1.2.1	2013/6/1~2016/7/1	TACHxxxxxxxx~TAFExxxxxxxx
EDS-408A	V1.4 & V1.4.1		
EDS-408A-MM-SC EDS-408A-MM-ST EDS-408A-MM-ST-CT	V1.4 & V1.4.1	2013/4/22~2016/10/14	TACExxxxxxxx~TAFJxxxxxxxx
EDS-408A-3M-ST	V1.4 & V1.4.1	2013/9/13~2016/8/22	TAGHxxxxxxxx~TAFIxxxxxxxx
EDS-G509	V1.5 & 1.5.1	2013/9/9~2016/3/8	TACSxxxxxxxx~TAFExxxxxxxx

Problem Description

After working for a while, sometimes the units of foregoing product lines may reboot by themselves abnormally, or even hang without any response. When the unit hangs, the customer will need to power it off and on again to recover that.

Analysis and Conclusions

After taking in-depth experiment and analysis, Moxa RD team verify that the unit's SDRAM will be impacted by higher electricity and caused malfunction happen. When that situation happens, the SDRAM malfunction could induce the CPU read data error to cause the unit hang and even reboot.
Considering the hardware architecture of foregoing product lines, their ESMT 60nm SDRAMs would be the weakest point, in terms of electrical immunity. This issue just happens on the ESMT 60nm SDRAM which Moxa started to use for production after 2013 April.

In sum, the main factors contributed to this issue is

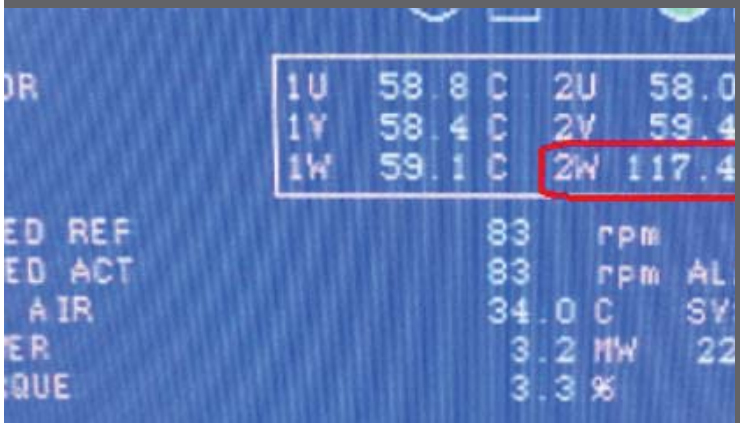
"Lack of expected electrical immunity on the ESMT 60nm SDRAM used within the period from April, 2013 to October, 2016."

Nezanesljivost MOXA stikala zaradi 60nm SDRAMa

- MOXA stikala izdelana v periodu od Aprila 2013 do Oktobra 2016 lahko sama naključno izklapljajo vhode/izhode stikal, nenadoma znova zaženejo ali se celo obesijo brez kakršnega koli odziva. Vzrok so interne EM motnje na 60nm SDRAMu ki pripeljejo do napake ciklov branja/pisanja Centralne Procesne enote.
- Avtor je doživel ispade ladijske komande propulzorja, nezanesljivo delovanje in izpade varnostnih sistemov (sistema protupožarnih vrat, naključno vklapljanje sistema za gašenje požara <Angl. Sprinkler sistema>), integriranega navigacijskega sistema ECDIS, blackout izpade PMS sistema (Ang. Power Management System)
- Na eni ladji je zamenjal več kot 130 industrijskih stikal v različnih sistemih

19





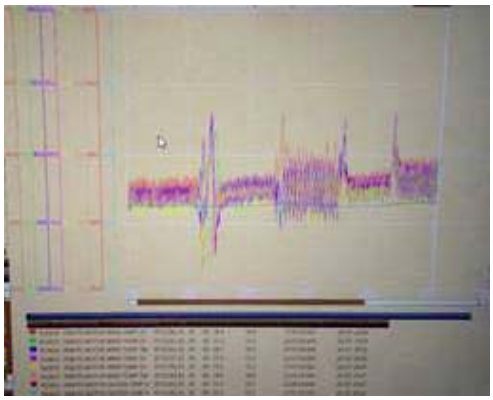
Merjenje temperature sinhronskega motorja električnega pogona ladje

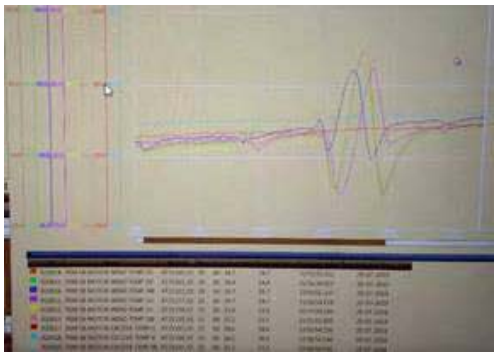
- Zanesljivost nadzora temperaturje sinhronskega motorja električnega propulzorja je pomembna zaradi informacije o termalnem stanju pogona ladje in pravočasnim navigacijskim ukrepom v primeru bližanja temperaturah navitja proboju izolacije ko se pogon izklopi.
- Napačne meritve temperature so izredno nevarne. Avtor je doživel dvig meritev temperaturje zaradi nezanesljivog ZMC-MIL konektorja v ABB POD propulzorju in preprečil ispad pogona z aktivacijom blokad varnostnega izklopa (Angl. Safety Overide) v reki Jang Ceng Jang v oskem navigacijskem koridorju. Izpad enega od propulzorjev zamakne ladjo z načrtovane poti zaradi izgube potiska propelerja.

20

Nihanje temperaturje na 8.5MW pogonu SAM electronics

- Na pogonu SAM electronics/Wartzila je zaznano nihanje temerature PEM elektičnega motorja (Ang. Propulsion Electrical Motor) ±30°C z periodo nekaj minut ki je posledica sistemske napake zaradi rekalibracije modula WAGO 750-461 ki se pojavlja pri spremembi hitrosti električnega motorja in vpliva EM motenj v PT100 tri žičnih meritvah
- Na sliki Nihanje temperature motorja in nihanje temperature z implementiranim digitalnim filterjem 60 s v kontrolerju pogona

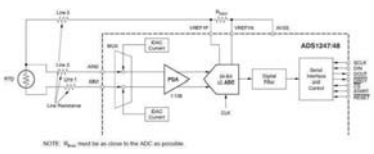




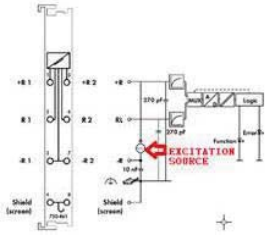
21

Izvedba tri žične meritve z TI ADS1247

22

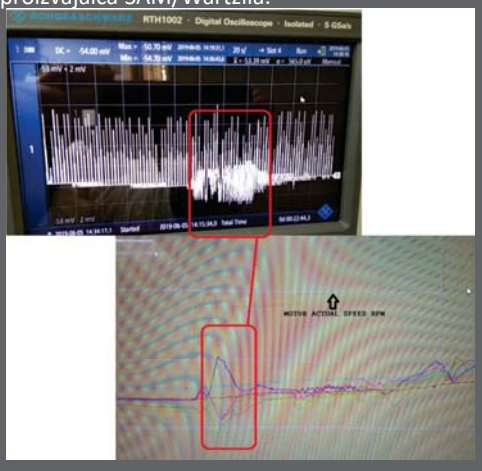


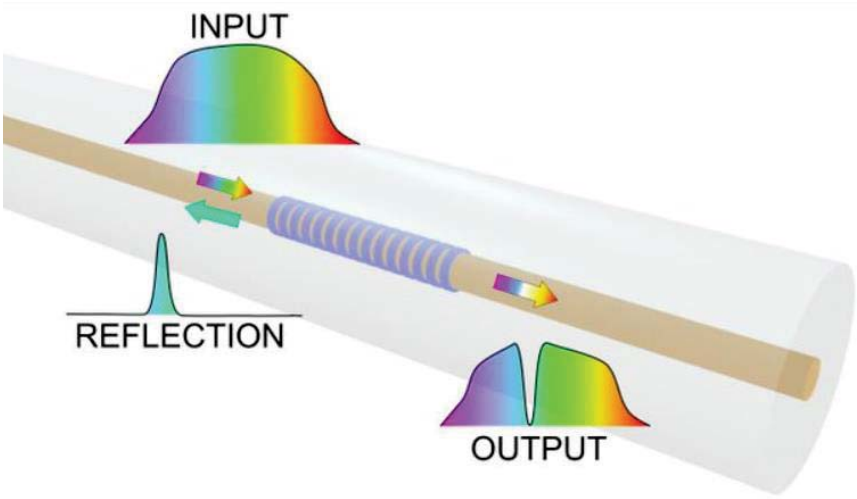




modul WAGO 750-461

Z meritvijo padca napetosti na terminalih 2/3 se pokaže da se kontroler modula rekalibrira ob spremembi hitrosti rotorja in vpliva EM motenj. Žal se rekalibracija ne more isklopiti, tako da je problem še vedno prisoten na nizu propulzorjev proizvajalca SAM/Wartzila.





Braggovo vlakno

- Da se izognemo EM motnjam v sinhronskem stroju, se lahko uporabi meritev temperaturje z optičnimi meritvami na osnovi FBG Braggovog optičnoga rešetkastog vlakna (Ang. Fiber Bragg Gratting).
- Fibre Bragg rešetka (FBG) je vrsta porazdeljenega Bragg reflektorja, izdelanega v kratkem segmentu optičnih vlaken, ki odseva določene valovne dolžine svetlobe in prenaša vse ostale. To dosežemo z dodajanjem periodične spremembe indeksa loma jedra vlakna, ki ustvarja dielektrično ogledalo, specifično za valovno dolžino

23

Braggovo vlakno

- Vlaknasto Braggovo rešetko lahko zato uporabimo kot vgrajeni optični filter za blokiranje določenih valovnih dolžin ali kot odsevnik, specifičen za valovno dolžino. Z spremembo periodičnih lastnosti jedra zaradi temperature ali skrčitve/natega se lahko optično vlakno z Braggovo strukturo uporablja kot senzor za meritev temperature, npr navitja sinhronskega stroja ali naprezanja trupa ladje
- V primerjavi z PT100 senzorji klase AA **[** ± (0,1+0,0017 * t), ±0,1 °C (0 °C), ±0,27 °C (100 °C), definiran v območju -50…+250 °C (upor z žičnim navitjem), 0…+150 °C (tankoslojni upor)] imajo FBG vlakna dvakrat temperaturno rezolucijo ±0.05 °C in širše merilno območje -270 ÷300 °C

Specifications

Parameter	Standard				Options
Centre Wavelength	1528 to 1608 nm				Alternative wavelength range
FBG Length	1 mm	2 mm	5 mm	10 mm	
Peak Reflectivity	>50 %	>50 %	>70 %	>80 %	
3 dB Bandwidth	<1.5 nm	<1.2 nm	<0.7 nm	<0.3 nm	
SLSR Single Sensor	15 dB				>15 dB
Strain Range	± 9,000 µstrain				> ± 9,000 µstrain
Strain Sensitivity	1.2 pm/µstrain				
Strain Resolution[1]	0.4 µstrain				

Temperature Sensitivity[1]	11 pm/°C		
Temperature Resolution[1]	0.05 °C		
Fibre Type	Single Mode SMF-28, 9/125 µm		
Fibre Coating and FBG Recoating Options[2]	Acrylate	Polyimide	High temperature acrylate Other custom coatings
Temperature Range[1]	-270 to +85 °C	-270 to +300 °C	
Cable and Connections	To suit application		



FBG Sensor in Acrylate Coated Fibre

24

Naprezanje trupa ladje in digitalni dvojček

- Naprezanje trupa ladje posledica
- Koncept digitalnega dvojčka ladje se uporablja za spremljanje stanja ladje v realnem času
- Vhod v model so lahno stanje Sistema za upravljanje napajanja na ladji (Angl. Power Management Sistem), 3D stanje morja okrog ladje (uporaba mmwave radarjev) in strukturnega odziva oziroma naprezanja trupa ladje, stanja varnostnih sistemov (protupožarnega sistema, vodonepropusnih vrat), stabiliteta ladje, vremenskih pogojev, trenutne hitrosti, smeri vetra, dinamike nihanja ladje in podobno. Z upoštevanjem dinamičkog modela ladje, stanja morja (pred ladjo z obdelavo odbojev od površja mora X band radarja čas lahko zamaknemo vnaprej in predvidimo obnašanje ladje v bližnji prihodnosti, tako se pravočasno izognemo nevarnostim kot so poškodbe ali zlom trupa zaradi prevelikih obremenitvah ladij, nevarna ekstremna nihanja levo desno (Angl. Parametric roll), in podobno

Image Credits: fiveoceansalvage / Hasan Saad

25



Meritev valov z optičnimi vlakni

- lahko uporablja tudi optično vlakno z distribuirani FBS senzorji okrog ladje ki merijo silo potiska vzgona morja na optično vlakno ki je odvisna od višine vala, informacijo uporabimo kot vhod v model digitalnega dvojčka
- pogosti pojav parametarskega nihanja ladij, v zadnjem dogotku v Decembru 2020 je zgubljenih 1900 kontenerjev od tega 40 z nevarnim tovorom
- Spremljanje naprezanja trupa ladje v realnem času doprinese bolj varni plovbi, hkrati z zajetimi informacijami o stanju morja, podatke lahko uporabijo za izboljšave pri načrtovanju ladij, ter pravočasnih ukrepih ob velikih naprezanjih trupa (inšpekcije ter popravila).



POVZETEK

- Spremljanje naprezanja trupa ladje v realnem času doprinese bolj varni plovbi, hkrati z zajetimi informacijami o stanju morja, podatke lahko uporabijo za izboljšave pri načrtovanju ladij, ter pravočasnih ukrepih ob velikih naprezanjih trupa (inšpekcije ter popravila).
- Predstavljena uporaba optičnih vlaken za meritve temperature v okolju z močnim EM motnjam, kjer se nove tehnologije iskažejo za nezanesljive
- Staranje laserskih virov je glavna omejitev zanesljivosti delovanja sodobnih offshore sistemih, neinformiranost klasifikacijskih društev (DNV GL, RINA, etc...), proizvajalcev sistemov, lastnikov in posadke je še večji problem
- Nezadostno testiranje komponent in sistemov pred vgraditvijo (primer MOXA stikal), hitro zastaranje komponent, omejena potpora zaradi pritiska trga
- Rešitev je standardizacija strojnih in programskih vmesnikov podobno kot v avto industriji, ki omogoča hitre nadgradnje zastarelih komponent in sistemov
- Za dvig varnosti na morju je pomembno boljše deljenje informacij o tehničnih napakah in incidentih, obstoječi AIRTS (Angl. Accident Incident ReporTing System) je nezadosten oziroma ni zaživel

LIDAR

Lidar

Jernej Mušič in Boštjan Batagelj
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
music.jernej@gmail.com

Povzetek

V sklopu predavanja o sistemu LIDAR bodo predstavljeni nekateri vidiki njegove uporabe, in sicer na področju avtonomnih vozil in varnosti. Predstavljene bodo možnosti združevanja oz. souporabe LIDAR-ja z drugimi senzorji, kar omogoča bolj učinkovito rabo, zmanjšuje stroške izdelave in v primeru avtonomnih sistemov podaljša njihovo avtonomijo. Predavanje bomo sklenili z ogledom izzivov s katerimi se soočamo v primeru združevanja senzorjev v primeru LIDAR-ja.

Abstract

The lecture will include the possibilities to use LIDAR in the field of autonomous vehicle design and some security applications. The focus will include sensor fusion and the challenges which we will be facing when fusing LIDAR with other sensors. The possibilities of fusing LIDAR with other sensors are limitless because they enable a more reliable sensing system which is reduced in size and cost with an improved autonomy.

Biografija avtorja

Jernej Mušič je diplomiral in magistriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru na področju informatike in tehnologij komuniciranja. Trenutno je doktorski študent na doktorskem študiju tretje stopnje elektrotehnika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2015 je zaposlen v Slovenski vojski kot častnik specialist s činom poročnika, kjer je poveljnik centra in deluje na področju vojaških zvez in informatike.

Lecturer's biography

Jernej Mušič obtained his bachelors and master's degree at the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering of the University of Maribor in the field of informatics and communications technologies. He is currently a doctoral student at the Faculty of Electrical Engineering of the University of Ljubljana. Since 2015, he has been employed in the Slovenian Army as an officer specialist with the rank of 2nd lieutenant, where he holds the position as a center commander in the field of military signals and information systems.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

LIDAR

25. Seminar optične komunikacije

5. februar 2021

Jernej Mušič, Boštjan Batagelj

Vsebina

- Tipi LiDAR
- Uporaba LiDAR na področju avtonomnih vozil
- Souporaba LiDAR z drugimi senzorji
- Izzivi

LiDAR

- LiDAR lahko razdelimo na štiri kategorije po principu delovanja, in sicer:
  - **Princip optičnega prožnega sipanja**, kjer se ohranja energija in valovna dolžina fotona v procesu medtem ko se spremeni le njegova smer. Uporabljajo se za izvajanje meritev aerosolov in oblakov v atmosferi in določanju razdalje.
  - **Princip neprožnega optičnega sipanja,** ki omogočajo določanje kemičnega sestava medija oz. objekta na podlagi spremembe valovne dolžine od oddajane.
  - **Diferencialni absorpcijski LiDAR (DIAL),** ki oddaja svetlobni snop na dveh valovnih dolžinah, kjer je eden od teh snopov v veliki meri absorbiran v tarčno kompozicijo. Razmerje energije med sprejetima svetlobnima snopoma sorazmerno molekularni koncentraciji tarčnega objekta.
  - **Dopplerjev LiDAR,** ki se uporablja za merjenje hitrosti gibanja aerosolov v atmosferi. Zaradi gibanja aerosolov od katerih se odbija snop pride pri sprejemu povratnega snopa do frekvenčnega zamika, ki je sorazmeren hitrosti premikajočih se aerosolov.

Uporaba LiDAR na področju avtonomnih vozil - Navdih

- Uporaba v namene zagotavljanja pomoči vozniku/potniku med vožnjo v neznanih okoliščinah,
- Izboljšanje situacijskega zavedanja za uporabnika z namenom zagotavljanja večje varnosti uporabnika vozila in drugih udeležencev,
- Omogočiti starejšim ali invalidnim osebam varno uporabo vozila
- Medsebojno povezovanje vozil v prometu z namenom stremenja k skupni varnosti.
- Namen je izničiti negativne vplive človeka med vožnjo.

Cilj

- Cilj je seveda vzpostaviti čim višjo stopnjo avtonomnosti.
- 5 stopenjska lestvica avtonomije vozil objavljena s strani „The Society of Automotive Engineers“
- Proizvajalci avtonomnih vozil se v vedno večji meri spogledujejo z uporabo LiDAR, ki pa je trenutno omejena s ceno.

Souporaba LiDAR z drugimi senzorji

- Potreba bo integraciji več tehnologij, in sicer:
  - Umetna inteligenca -
  - LiDAR - izmeri razdaljo in oriše okolico (prepoznavanje objektov) - DRAG
  - RADAR - merjenje hitrosti in razdalje vendar ima nizko resolucijo
  - Kamere - prikaz okolice, ki je vozniku nevidna (mrtvi koti…itd)
  - Ultrazvočni senzorji - kratek doseg (bolj primeren za zaznavanje bližnjih objektov)
  - Termalne kamere - komplementarne optičnim kameram v okolju s slabšo svetlobo

SWOT Umetna inteligenca

Prednosti	Slabosti
• Generiranje ustreznih odločitev/predlogov med vožnjo, ki pomagajo vozniku,	• Algoritmi globokega učenja niso primerni za generiranje odločitev ampak za zaznavanje • Veliko število drugačnih omrežnih struktur, ki so namenjene za različne aplikacije pri avtomatizacije vozil
Priložnosti	**Grožnje**
• Razvoj rešitev za popolnoma avtomatizirano vožnjo in s tem posledično zmanjšanje negativnega vpliva človeškega faktorja.	• Pomanjkanje standardov in interoperabilnosti • Nezadovoljiva zanesljivost

SWOT LiDAR

Prednosti	Slabosti
• Oriše okolico do 200 metrov od vozila • Kot komplementarni senzor optični kameri pri prepoznavanju objektov in RADAR-ju pri merjenju razdalje	• Visoka cena rotacijskih LiDAR senzorjev • Drage komponente
Priložnosti	**Grožnje**
• Razvoj kompaktnih modulov in solid-state LiDAR za namene avtonomnosti vozil	• Ločena strojna oprema za procesiranje signalov, ki lahko vpliva na avtonomnost izključno baterijskih sistemov • Pri manjši valovni dolžini 905 nm in veliki impulzni moči ogroža očesno mrežnico

SWOT RADAR

Prednosti	Slabosti
• Merjenje hitrosti in razdalje ostalih udeležencev v prometu • Kot komplementarni senzor LiDAR-ju pri merjenju razdalje	• Nizka resolucija
Priložnosti	**Grožnje**
	• Nevarnost frekvenčnih motenj (medfrekvenčni konflikti)

SWOT Optične kamere

Prednosti	Slabosti
• Zagotavlja sliko območij okoli vozila, ki so zaradi mrtvih kotov nedostopni uporabniku • Omogoča prepoznavanje prometne signalizacije	• Kratek doseg
Priložnosti	**Grožnje**
• Možnost razvoja algoritmov za prepoznavanje vzorcev, ki omogočajo zaznavanje prometne signalizacije	• Napake pri prepoznavanju vzorcev, lahko vodijo do napačnih odločitev.

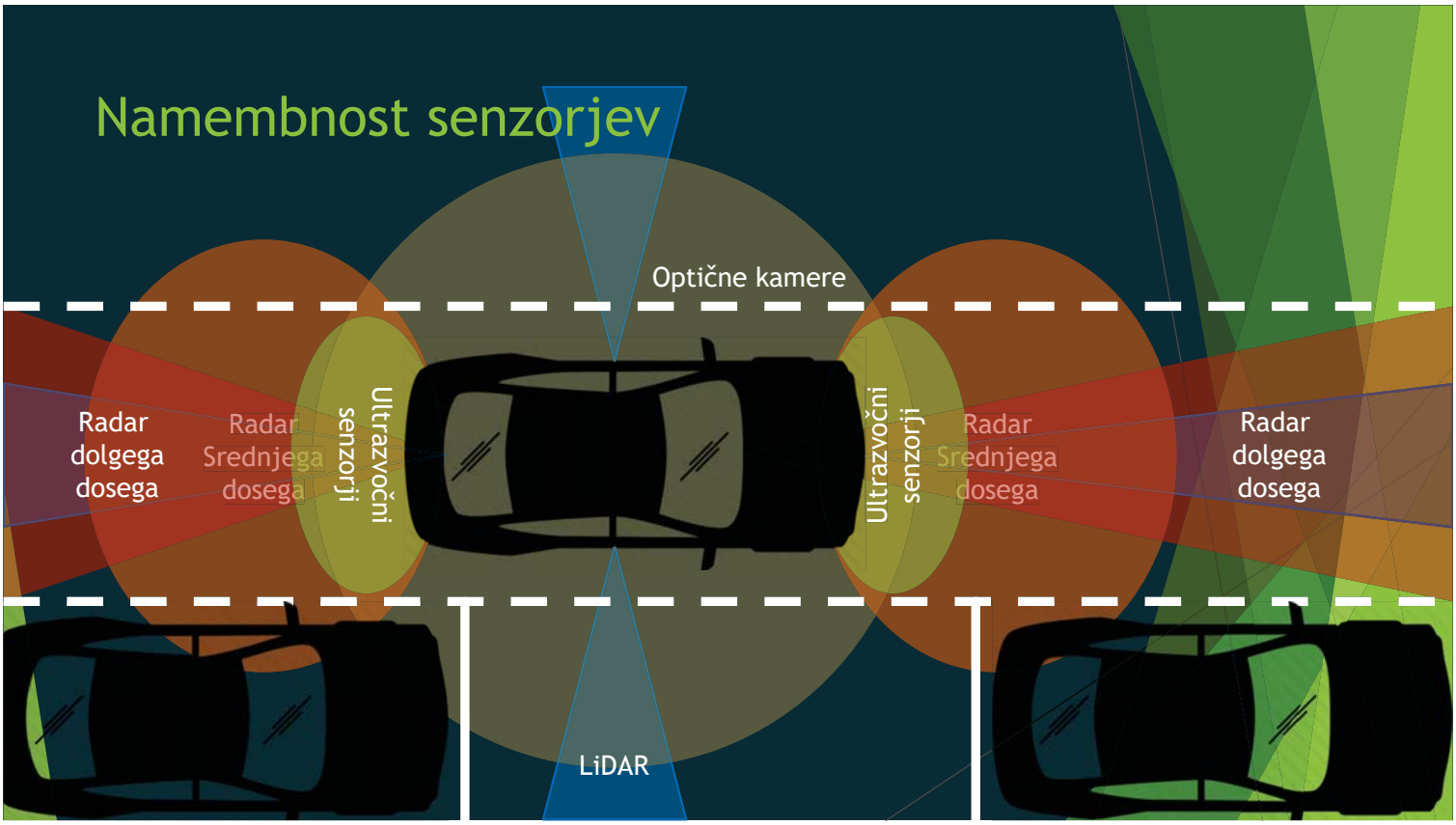
SWOT Ultrazvočni senzorji

Prednosti	Slabosti
• Zaznavanje bližnjih objektov in oseb kot pomoč pri parkiranju oz. vožnjo v tesnem urbanem okolju.	• Kratek doseg • Odvisnost hitrosti zvoka od temperature.
Priložnosti	**Grožnje**
• Razvoj zmogljivosti, ki avtomatizirajo manevre vozila v omejenem prostoru.	• Napačne meritve zaradi odvisnosti hitrosti zvoka od temperature.

SWOT integracija senzorjev

Prednosti	Slabosti
• Redundančnost • Večja natančnost pri zaznavanju okolja • Izboljšanje situacijskega zavedanja	• Nezadostna natančnost nekaterih senzorjev • Velike količine podatkov, ki jih je potrebno obdelati v realnem času.
Priložnosti	**Grožnje**
• Vzpodbujanje razvoja učinkovitejših senzorjev in pripadajočih algoritmov za prepoznavanje vzorcev in analizo signalov	• Nevarnost elektromagnetnih motenj • Ni enotnega oz. standardiziranega pristopa

Namembnost senzorjev



Omejitve

- Uporaba cenejših laserskih diod z valovno dolžino 905 nm,
- Omejevanje impulzne moči z namenom preprečevanja poškodb mrežnice,
- Posledično zmanjšamo doseg med 30 in 100 metrov (odvisno od odbojnosti objekta),
- Visoka cena rotacijskega LiDAR-ja Velodyne.

Rešitve

- Uporaba večjega števila stacionarnih LiDAR na vozilu z omejenim lokom (solid state LiDAR),
- Sestavljena skupna slika okolica in možnost merjenja razdalje z izračunom časa potovanja žarka od trenutka oddajanja in sprejema.
- Manjša cena od rotacijskega LiDAR, in sicer iz okoli 60.000 Dolarjev na <1.000 Dolarjev na enoto,
- Uporaba LiDAR-ja z valovno dolžino 1550 nm.

Delitev različnih konceptov LiDAR

- Skenirani LiDAR
  - Rotacijski z
  - Premičnimi ogledali in prizmami
    - Rotacijska/oscilacijska makro-ogledala/prizme
    - Oscilacijska MEMs ogledala
  - Faznega antenskega niza
- Staring LiDAR
  - Fixed – Multibeam
  - Difuse light cone

FMCW LiDAR

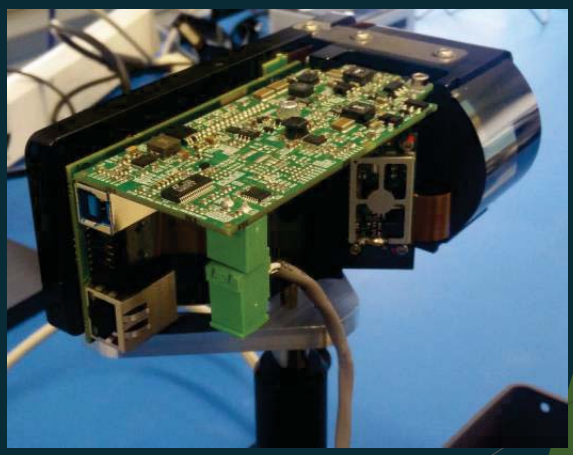
- Izboljšana resolucija dosega omogoča ločevanje ploskev, ki so si prostorsko blizu,
- Izboljšan dinamični razpon, ki omogoča istočasno merjenje svetlih in zatemnjenih objektov,
- Omogoča zaznavanje gibanja objektov (hitrost) in izboljša doseg delovanja.
- Implementacija LiDAR-ja na čipu lahko zmanjša ceno posameznega modula za 99 %

LiDAR z uporabo faznega antenskega niza

- Souporaba MEMS stikal in optičnih valovodov razporejenih v niz, ki usmerjajo žarke v prostor (na podlagi območja interesa).
- Implementacija različice kratkega (905 nm) in dolgega (1550 nm) dosega.
- Različica s kratkim dosegom bi omogočala skeniranje 170° horizontalno in 60° vertikalno, ki bi bila namenjena nadzoru bližnjih objektov,
- Različica za dolgim dosegom pa bi omogočala skeniranje 50° horizontalno in 20° vertikalno, z namenom nadziranja okolja do 200 m

MEMs LiDAR

- Quasi solid-state implementacija LiDAR senzorja (mehanični skenirni LiDAR),
- Ogledala velikosti ~2x2 mm, ki usmerjajo laserski žarek v željeno smer so edini premični del sistema,



MEMS LiDAR [2]

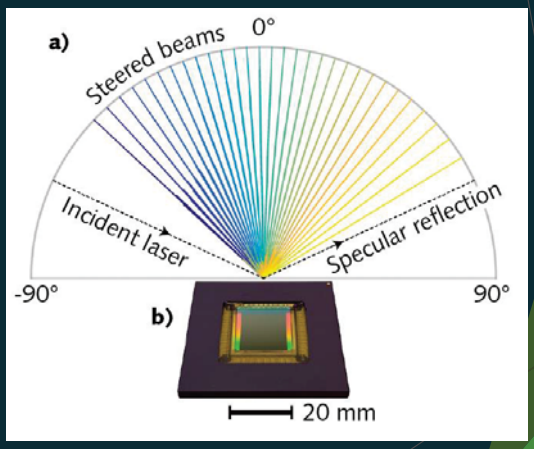
- Tipična velikost MEMS LiDAR, ki je v uporabi na brezpilotnih letalih je 70 x 60 x 60 mm pri teži okoli 45 gramov.
- Potrebna imuniteta pred tresljaji, ki so tipični med vožnjo. Resonanca MEMS ogledala višja od 0,8 kHz



Mitsubishi MEMS LiDAR [3]

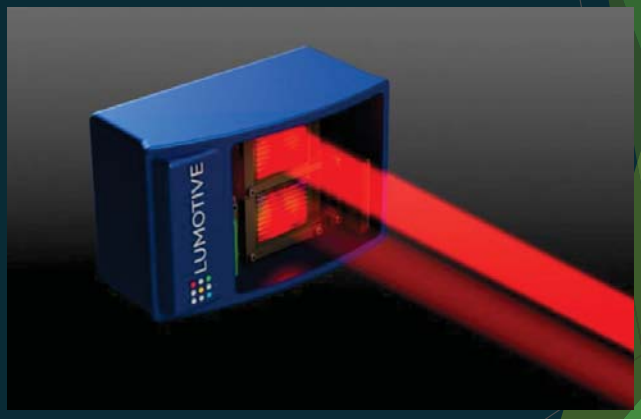
Meta-površine z uporabo tekočih kristalov

- Arhitektura je podobna principu MEMS vendar je namesto ogledala uporabljena meta-površina, ki usmerja laserske žarke s pomočjo tekočih kristalov.
- Fazni zamik je sorazmeren napetosti, ki je dovajana resonatorju kjer ta posledično rotira lokalni tekoči kristal in s tem povzroči zamik



Princip meta-površin z uporabo tekočih kristalov [4]

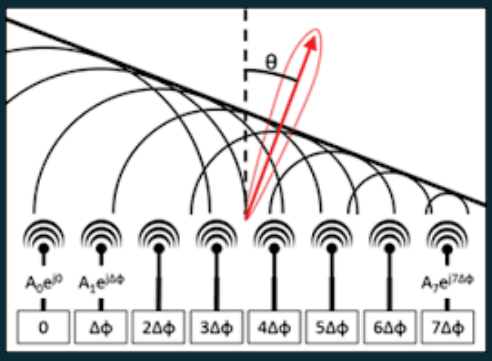
- Usmerjanje žarkov na meta-površini se izvaja na eni osi, medtem ko se na pravokotni osi omenjena površina uporablja kot ogledalo.
- Lumotive Lidar sistem uporablja dve metapovršini in sicer eno za oddajanje in eno za sprejemanje laserskih žarkov.



LiDAR z uporabo metapovršin proizvajalca LUMOTIVE [5]

Optični valovodi razporejeni v niz

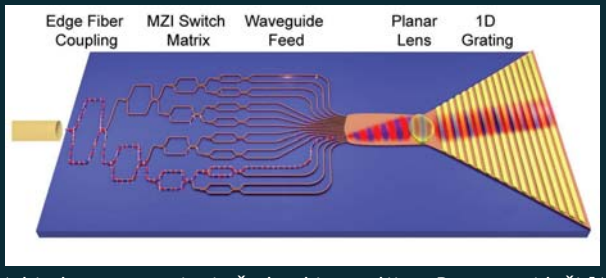
- Uporabljen je niz optičnih anten, pri katerih se krmili fazni zamik laserskega signala z namenom usmerjanja.



Optical Phased Array LiDAR [6]

LiDAR na vezju

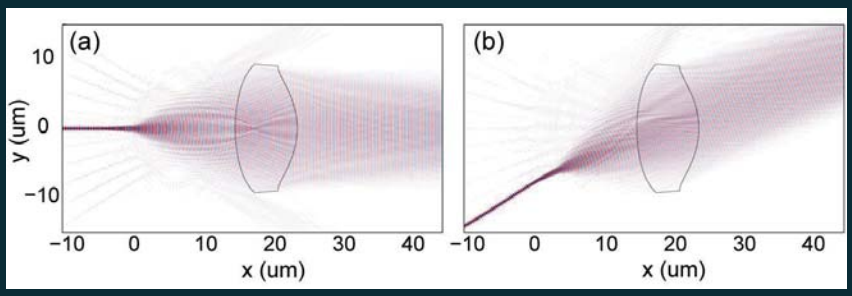
- Ob prenosu željenega signala v valovod na vezju, ki usmerja svetlobo po željeni optični poti. Ta se nato usmeri v stikalno matrico v obliki vzorca drevesa, ki je sestavljen iz Mach-Zehner interferometrov. Ta ustvari več valovodov, ki se pretakajo v lečo pod različnimi koti ki se nato s pomočjo leče tudi usmeri. Horizontalna smer žarka je odvisna od tega, pod katerim kotom je ta oz. s katerega valovoda je ta prispel v lečo.



Arhitektura usmerjanja žarka, ki temelji na Rotmanovi leči [1]

Vertikalna smer

- Vertikalna smer se krmili s pomočjo uklonske mreže kjer je vertikalni uklonski kot odvisen od valovne dolžine žarka.
- Torej z uravnavanjem frekvence laserja lahko določamo vertikalni kot žarka.



Odvisnost smeri izhodnega žarka na podlagi vhodnega valovoda [1]

Doseg

- Kompleksnost sistema se zmanjša za dvakratnik v primerjavi z OPA arhitekturo. Medtem se horizontalni FoV (Field ov view) poveča za dvakratnik.
- LiDAR na čipu potrebuje le 10 valovodov za usmerjanje žarka, medtem ko OPA arhitektura potrebuje okoli 100 aktivnih komponent za fazni zamik, ki delujejo istočasno.
- Za doseganje pogoja v avtomobilski industriji, kjer kot zahtevan doseg določa 200 metrov je bila določena shema zaznavanja, ki temelji na FMCW saj naj bi bila bolj učinkovita od ToF (time of flight).

Projekt CLARIFIER

- Hibridni RADAR-LiDAR senzor implementiran s pomočjo fotoničnega integriranega vezja.
- Namen je zmanjšati velikost, težo in porabo, kar zviša avtonomijo gostujoče platforme.
- Souporaba obeh senzorjev omogoča končnemu uporabniku večjo situacijsko zavedanje.
- Optimizacija energijske porabe z namenom večanja baterijske avtonomije sistema

Vprašanja?

Literatura

[1] J. J. López, T. Mahony and S. Kim, *MIT Spinoff Building New Solid-State Lidar-on-a-Chip System*, 01 December 2020, IEEE Spectrum, dostopno na: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/design/kyber-photonics-solid-state-lidar-on-a-chip-system, Dostopano: 31. 1. 2021.

[2] N. Druml, I. Maksymova, T. Thurner, D. van Lierop, M. Hennecke, A. Foroutan, *1D MEMS Micro-Scanning LiDAR*, The Ninth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/326632441_1D_MEMS_Micro-Scanning_LiDAR, Dostopano: 31. 1. 2021.

[3] *Mitsubishi Electric introduces MEMS LiDAR solution for autonomous vehicles*, Green Car Congress, dostopno na: https://www.greencarcongress.com/2020/03/20200312-mec.html, Dostopano: 31. 1. 2021.

- [4] G. M. Akselrod, *Optics for Automotive Lidar: Metasurface beam steering enables solid-state, high-performance lidar,* Laser Focus World, dostopno na: https://www.laserfocusworld.com/optics/article/14036818/metasurface-beam-steering-enables-solidstate-highperformance-lidar, Dostopano: 31. 1. 2021.
- [5] *Lumotive unveils LiDAR with LCM beam-steering technology for autonomous vehicles*, Green Car Congress, dostopno na: https://www.greencarcongress.com/2019/03/20190321-lumotive.html, Dostopano: 31. 1. 2021.
- [6] M. Dahlem, *OPTICAL PHASED ARRAYS FOR AUTOMOTIVE SOLID-STATE LIDAR SYSTEMS*, IMEC, dostopno na: http://epic-events.eu/epic/2019/lidar2019/191030_EPIC_LIDAR2019_P46.pdf, Dostopano: 31. 1. 2021.

Uporaba optičnih kasnilnih linij

Use of optical delay lines

Uroš Dragonja[1,2], Boštjan Batagelj[1]

[1]Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
[2]Instrumentation Technologies

uros.dragonja@gmail.com

Povzetek

V prispevku so predstavljeni osnovni koncepti zakasnitev v optičnih vlaknih. Nadalje so predstavljeni praktični koncepti za spremembo in kontrolo (regulacijo) zakasnitev ter pogosti primeri uporabe, kot so: sita in resonatorji, sistemi za prenos časovno kritičnih signalov in oscilatorji.

Abstract

In the presentation the basic mechanism behind delay and delay change in optical fibers is presented. Furthermore the practical concepts for changing and controlling delay are presented together with common usage which spans from resonators and filters to oscillators and systems for transfering time-critical signals.

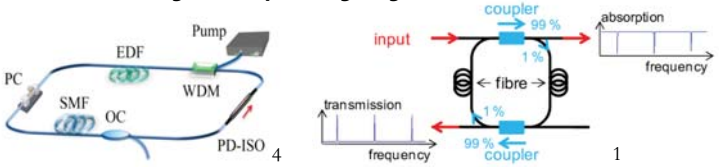
Use of optical delay lines
Uporaba optičnih kasnilnih linij

Uroš Dragonja[1,2], Boštjan Batagelj[1]

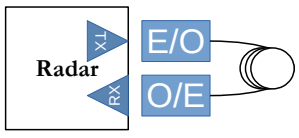
Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana[1]
Head of Product Implementation & Quality @ Instrumentation Technologies[1,2]

Basics of usage – all optical & RoF

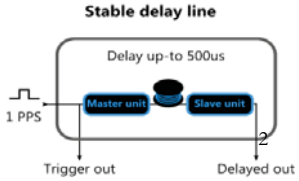
Cavities & Resonators
(Filtering, RF & Optical signal generators (lasers)



Radar Testing



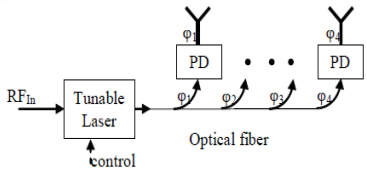
Stable delay line



Signal Distribution
(Time& Frequency Critical)



Tunable phase-delay antenna arrays



3

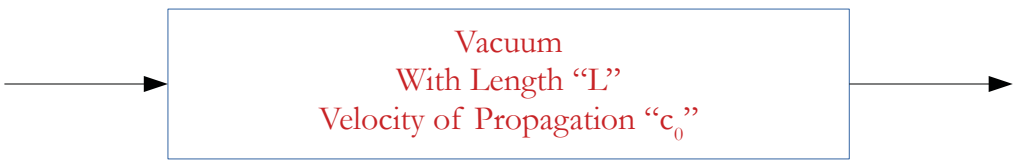
1: Merrer, P.: High-Q Optical Resonators for Stabilization of High Spectral Purity Microwave Oscillators, Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE International
2: More info: https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_eurametctcp_project%5bproject%5d=1064
3: Udvary E., Kobor D.: Photonic Approaches to Millimeter Wave True Time Delay line, Budapest University of Technology and Economics
4_ Song Hu: Gain-guided soliton fiber laser with high-quality rectangle spectrum for ultrafast time-stretch microscopy, Optics Express Vol. 24, Issue 10, pp. 10786-10796 (2016)

RF over Fiber (RoF) Delay Lines

Main Benefits of RoF (Radio over Fiber) delay implementation:

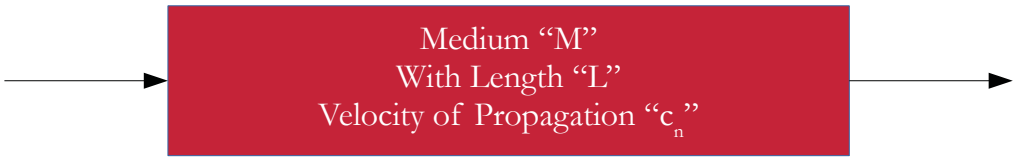
- Real radio channel (in contrast with digital delay lines)
- Very broadband (in terms of RF – 1nm ~ 100 GHz (@ cca 1550nm) (easily available O/E components with 10GHz+)
- Almost "True Time Delay" = Group delay almost 0:
  - 17ps/nm/km @ 0.1nm (10 GHz channel) ~1ps/km = ~0.2ps/us
- Low attenuation (<0.3 dB/km) <–> (COAX > 1dB/100m→10dB/km)

Delay in Optics (Electromagnetics)



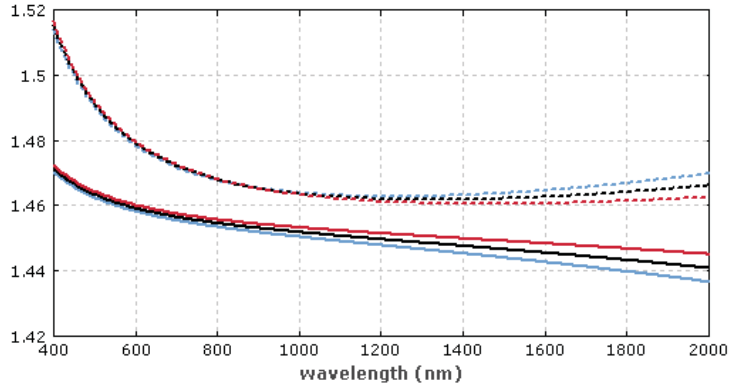
Propagation Delay in vacuum: $t_{dV} = \frac{L}{c_0}$

Delay in Optics



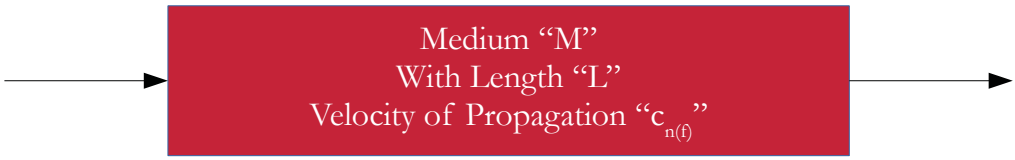
Propagation Delay in "simple" linear medium: $t_{dV} = \frac{L \cdot n}{c_0}$

Is Propagation Velocity Constant ?



Refractive index (solid lines) and group index (dotted lines) of silica versus wavelength at temperatures of 0 C (blue), 100 C (black) and 200 C (red). Source: www.rp-photonics.com

Delay in Optics



Propagation Delay in linear medium: $t_{dV} = \frac{L \cdot n(f)}{c_0}$

Refraction index change with frequency = Velocity change with frequency !!
=> Delay change with frequency

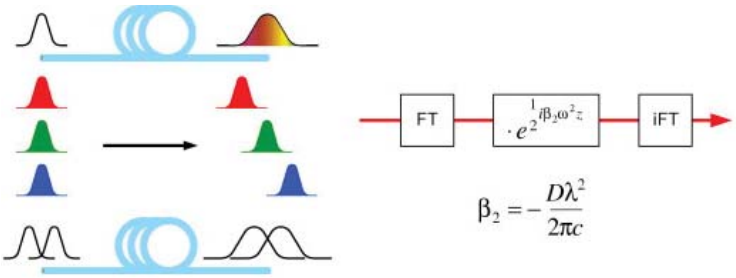
Phase & Group Delay in Optical Fibers

Phase velocity:

$$V_{PH} = \frac{\omega}{k} = \frac{c_0}{n}$$

Group velocity:

$$V_G = \frac{\Delta \omega}{\Delta k}$$

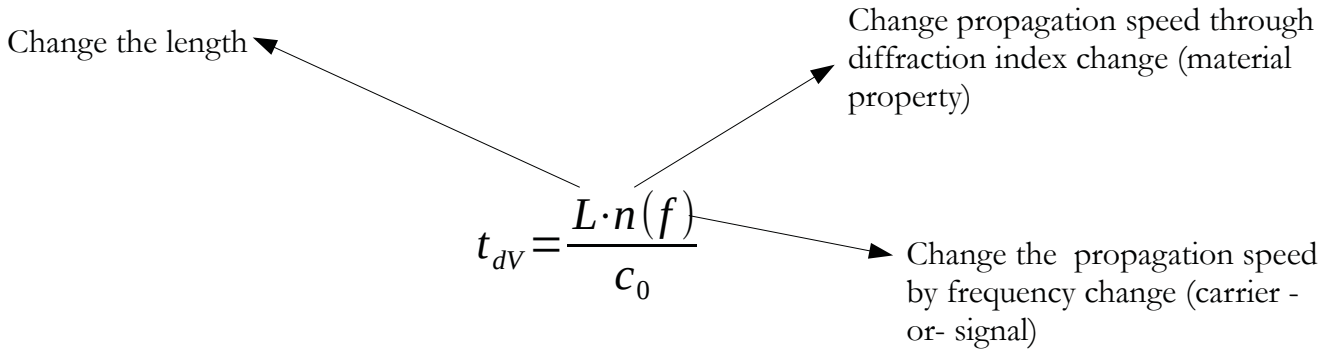


Pulse broadening due to group velocity dispersion and dispersion compensation in the Fourier domain. β2 is the group velocity dispersion parameter, ω is the angular frequency of the carrier, z is the fiber length, λ is the wavelength of the carrier, D is the dispersion parameter and c is the speed of light.

True time delay (TTD) = time delay (velocity) is independent of the frequency!

Jin-xing Cai, Georg Mohs: Modern Undersea Transmission Technology, in Optical Fiber Telecommunications (Sixth Edition), 2013

Practical Mechanisms for the Change of Delay (propagation delay – phase delay) I.

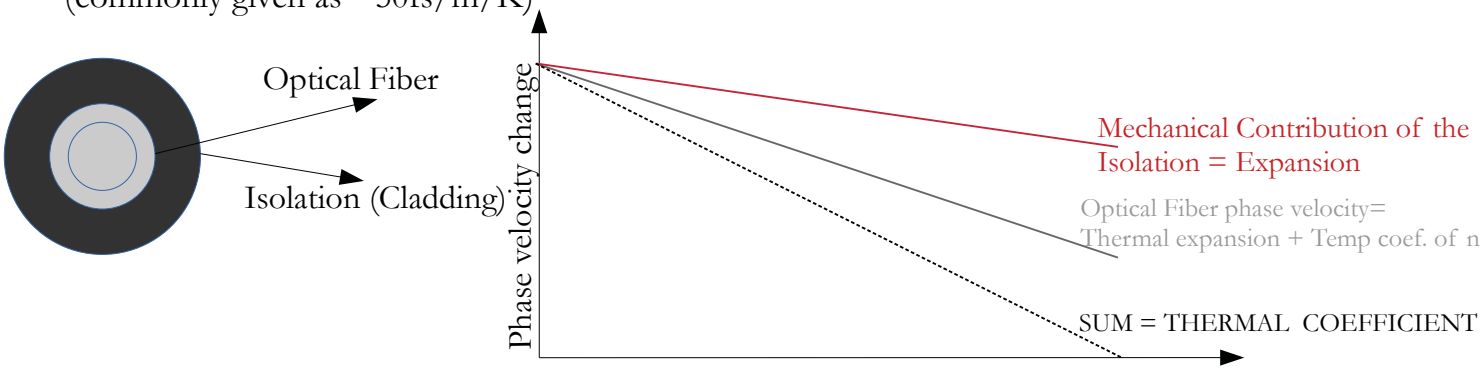


Polarization mode dispersion and modal dispersion also influences propagation speed, but it is hard to control or predict in optical fibers (or other media).

Thermal Coefficient of the Delay in Uncompensated Fiber

- Thermal expansion coefficient of silica glass: ~1 ppm/K
- Temperature coefficient of the effective refractive index: ~10 ppm/K
- => Uncompensated fibers have thermal coefficient of the delay: **~10 ppm/K**

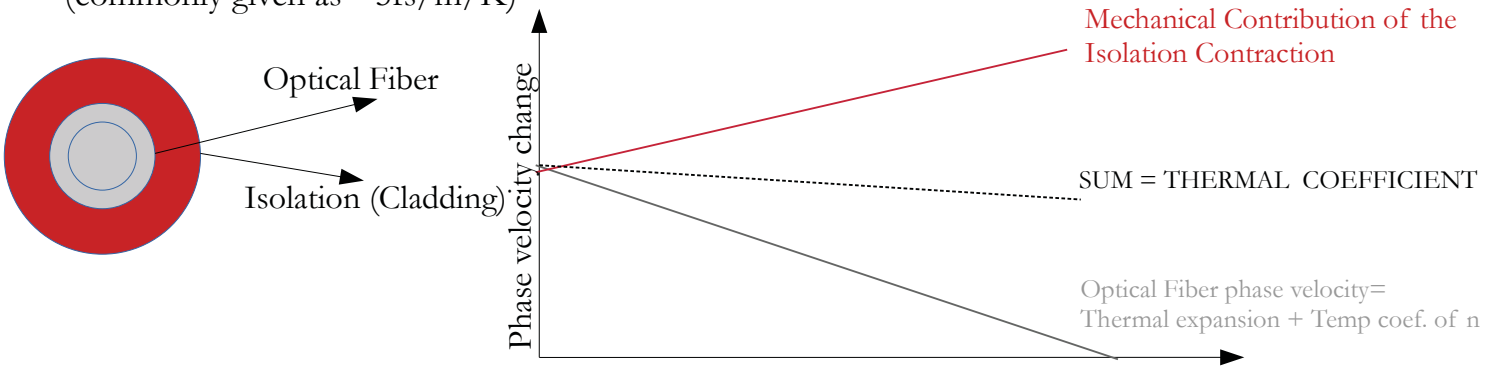
(commonly given as ~50fs/m/K)



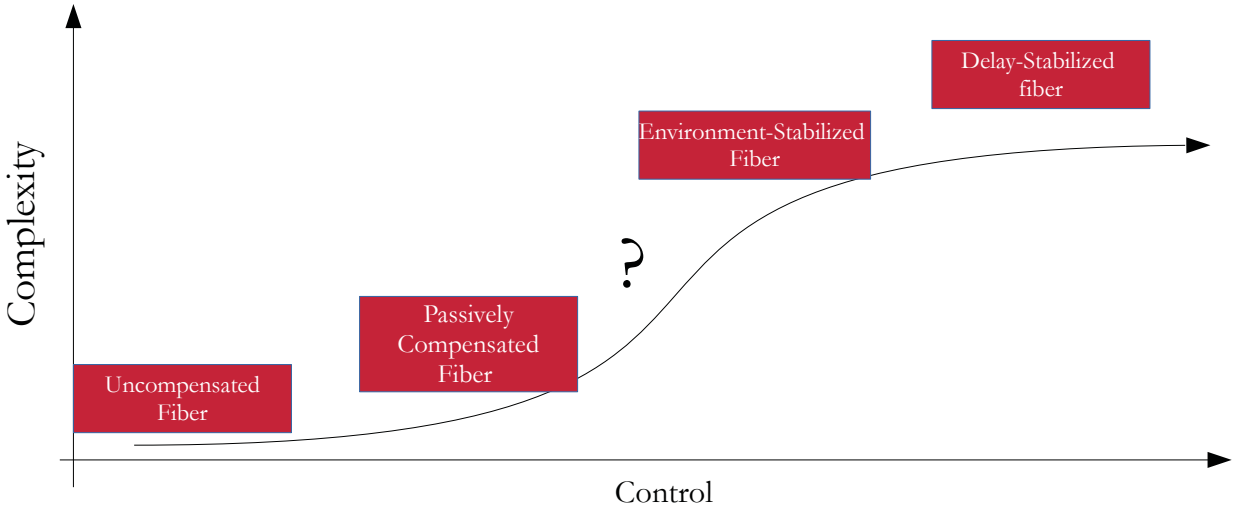
Thermal Coefficient of the Delay in Compensated Fiber

- Thermal expansion coefficient of the isolation: ~**(-) 9** ppm/K
- Temperature coefficient of the effective refractive index: ~10 ppm/K
- => Uncompensated fibers have thermal coefficient of the delay: **~ 1 ppm/K**

(commonly given as ~5fs/m/K)

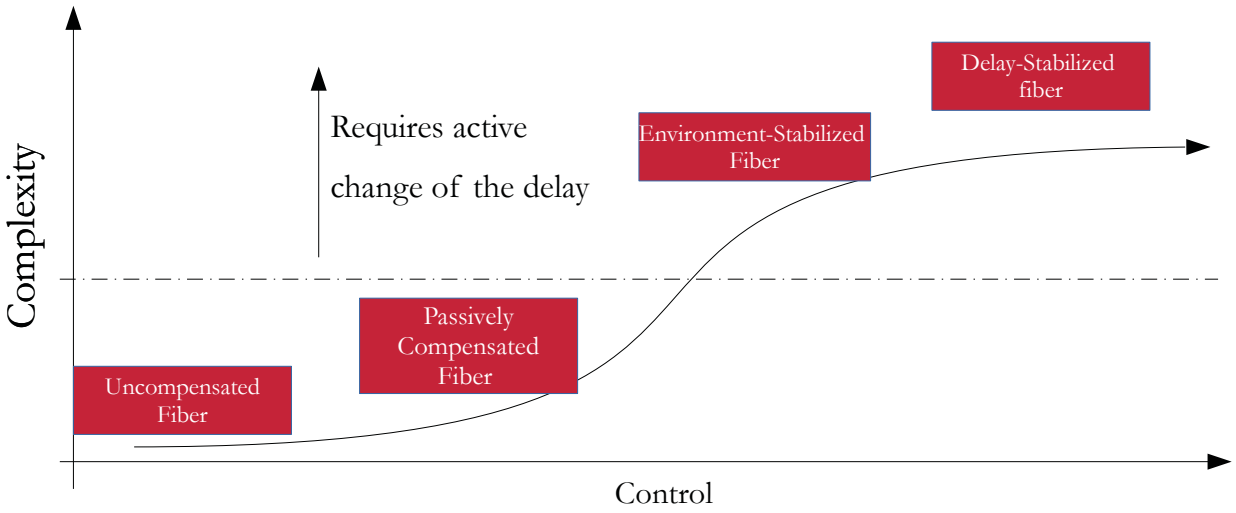


Control & Compensation of the Delay



(Range of compensation & precision)

Control & Compensation of the Delay



(Range of compensation & precision)

Practical Mechanisms for the Change of Delay (propagation delay – phase delay) II.

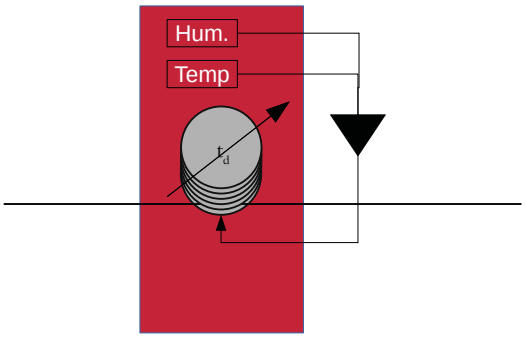
Change the length:
- Stretching (Mechanical expansion)
- Thermal expansion
- Discrete

Refractive index change in material:
- Temperature
- Thermal expansion

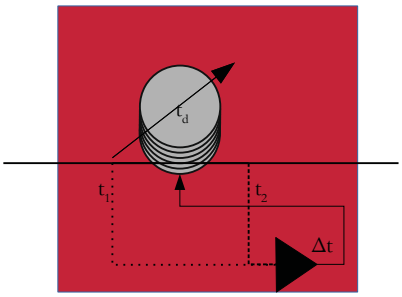
$$t_{dV} = \frac{L \cdot n(f)}{c_0}$$

Signal based refractive index change:
- Changing the carrier (f or λ)
- Changing the signal (f or λ)

Environment-stabilized vs. Delay-stabilized optical path

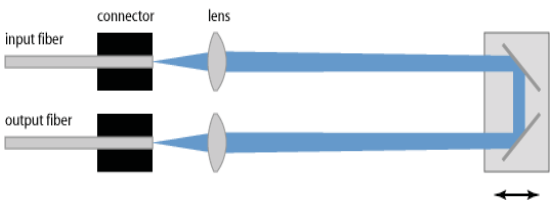


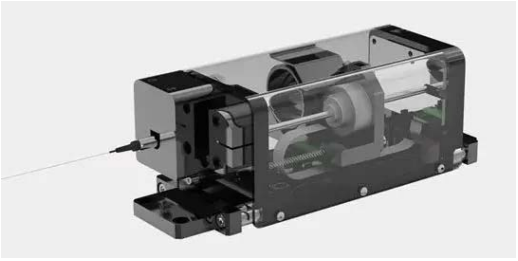
The environment stabilized to provide constant (1) Length, (2) Refraction Index, (3) Wavelenght, etc.



Delay measured and corrected based on the error (Regulation).

Practical implementation of changeable delay in optics – Mechanical



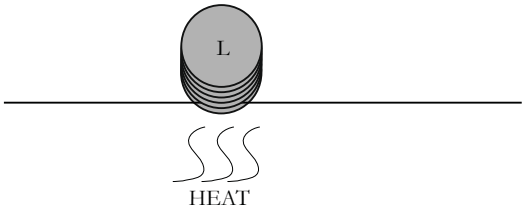


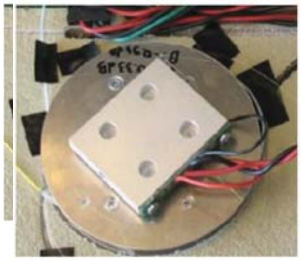
Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 1 ps – 1 ns	"100 %"	< 10 Hz

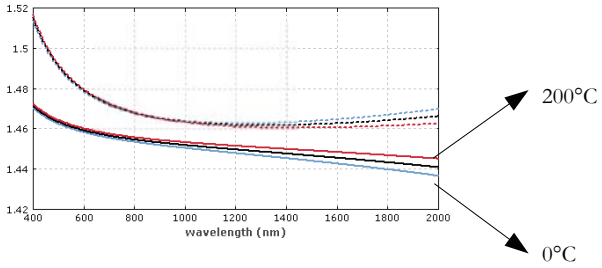
Usually has high insertion loss

* Small signal BW (~10%)

Practical implementation of changeable delay in optics





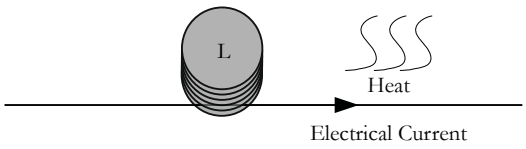


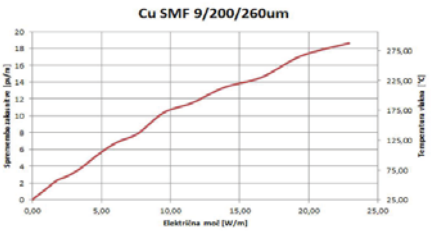
Refractive index (solid lines) and group index (dotted lines) of silica versus wavelength at temperatures of 0 C (blue), 100 C (black) and 200 C (red). Source: www.rp-photonics.com

Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 10ns – 100 us	< 0.1 %	< 100 mHz

* Small signal BW (~10%)

Practical implementation of changeable delay in optics – Copper-coated fiber







Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 10ns – 1 us	< 0.5 %	< 10 Hz

Higher thermal expansion coefficient (dominated by copper cladding) (17 ppm/K)
Higher temperature resistance (up to 400°C)

* Small signal BW (~10%)

U. Dragonja, J. Tratnik, B. Batagelj, »Use of copper-coated fiber as a tunable optical time-delay line in precise timing systems«, Opt Quant Electron 45, 1229–1235 (2013). https://doi.org/10.1007/s11082-013-9743-8

Practical implementation of changeable delay in optics – Piezo Stretcher





"Piezo strecher"

Range of Delay	Tuning Range	BW*
~ 10ns – 10 us	< 0.1 %	< 1 kHz

* Small signal BW (~10%)

Stretching the fiber
Radial stretching increases insertion loss

Practical implementation of changeable delay in optics – Wavelength tuning (RoF)

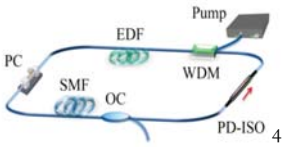
Type	Range of Delay	Tuning Range	BW*
Laser Temperature λ(T)	N/A	~100ps/km* ~20ppm	< 10 Hz
Laser Current λ(I)	N/A	~20ps/km** ~5ppm	< 10 kHz

Assuming chromatic dispersion of a Single-mode optical fiber 17ps/nm/km
*cca. ~5nm change (~100K)
**cca. ~0.5nm change (~30mA)

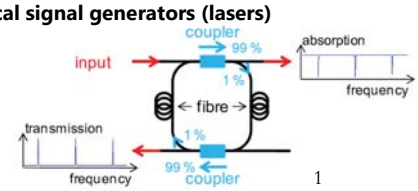
* Small signal BW (~10%)

Selected Applications

Cavities & Resonators
(Filtering, RF & Optical signal generators (lasers)

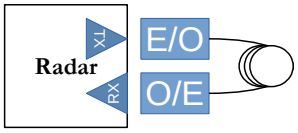


4

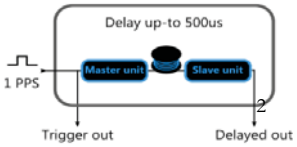


1

Radar Testing



Stable delay line

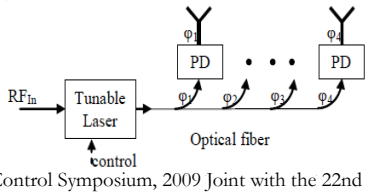


2

Signal Distribution
(Time& Frequency Critical)



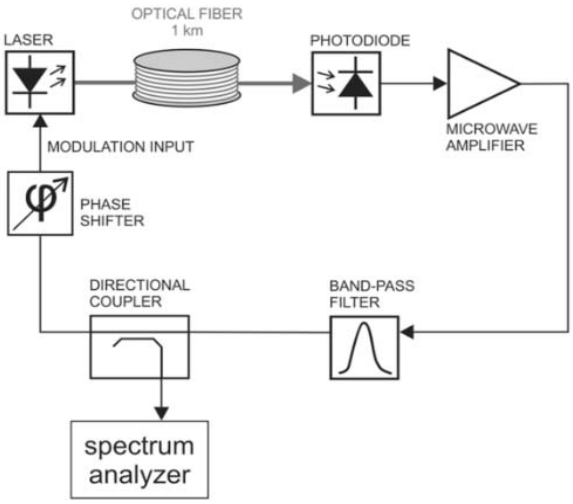
Tunable phase-delay antenna arrays

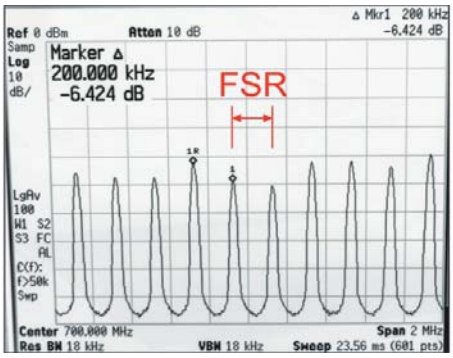


3

1: Merrer, P.: High-Q Optical Resonators for Stabilization of High Spectral Purity Microwave Oscillators, Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE International
2: More info: https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_eurametctcp_project%5bproject%5d=1064
3: Udvary E., Kobor D.: Photonic Approaches to Millimeter Wave True Time Delay line, Budapest University of Technology and Economics
4_ Song Hu: Gain-guided soliton fiber laser with high-quality rectangle spectrum for ultrafast time-stretch microscopy, Optics Express Vol. 24, Issue 10, pp. 10786-10796 (2016)

Opto-electronic Oscillator

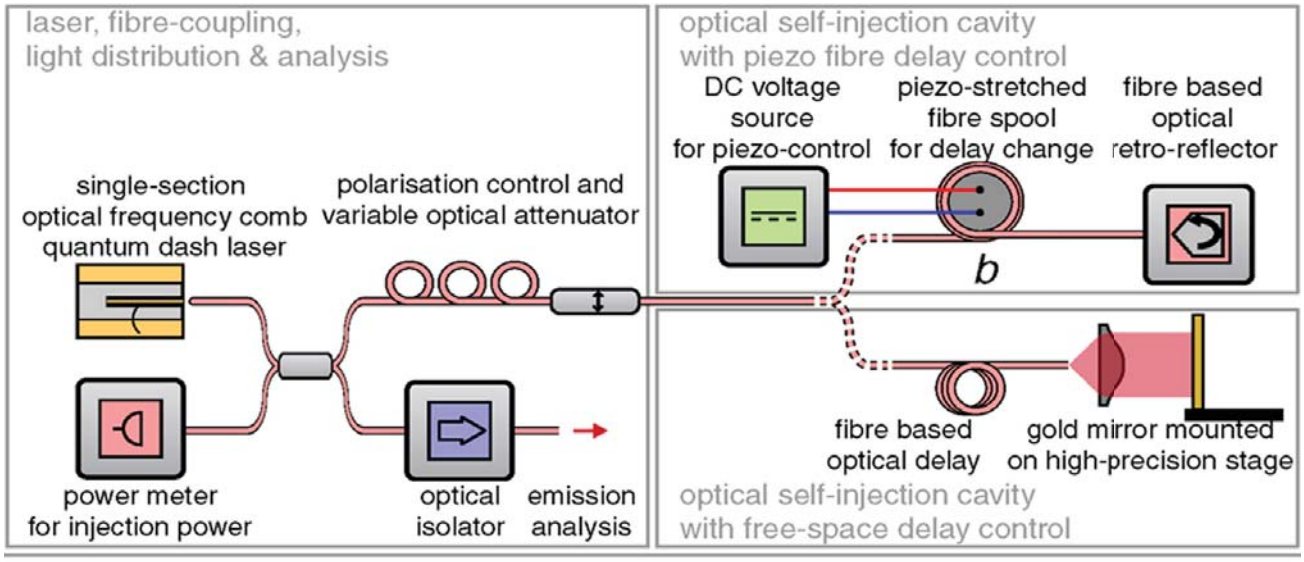




$$FSR = \frac{1}{\Delta t_{\Sigma}}$$

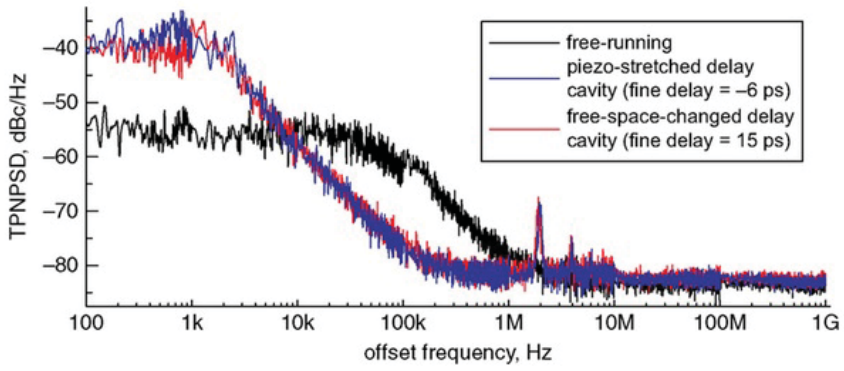
1 Bogataj L., Vidmar M., Batagelj B.: "A Feedback Control Loop for Frequency Stabilization in an Opto-Electronic Oscillator", Journal of Lightwave Technology, Vol.32, No.20, OCT.15. 2014.
2 L. Bogataj, J. Tratnik, B. Batagelj and U. Dragonja, "A highly stable OEO using a multi-purpose optical-delay stabilization system," 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Besancon, 2017, pp. 486-488, https://ieeexplore.ieee.org/document/8088935

External Cavity – I.



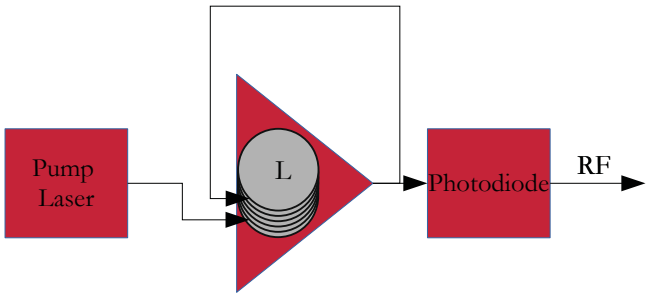
C. Weber, B. Batagelj, P. Fiala, D. Auth, U. Dragonja, Q. Gaimard, A. Ramdane, S. Breuer
»Quantum dash frequency comb laser stabilisation by optical self-injection provided by an all-fibre based delay-controlled passive external cavity«, Electronics Letters, 01 September 2019, https://doi.org/10.1049/el.2019.2016

External Cavity – II.

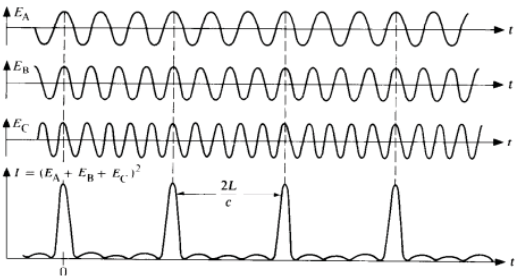


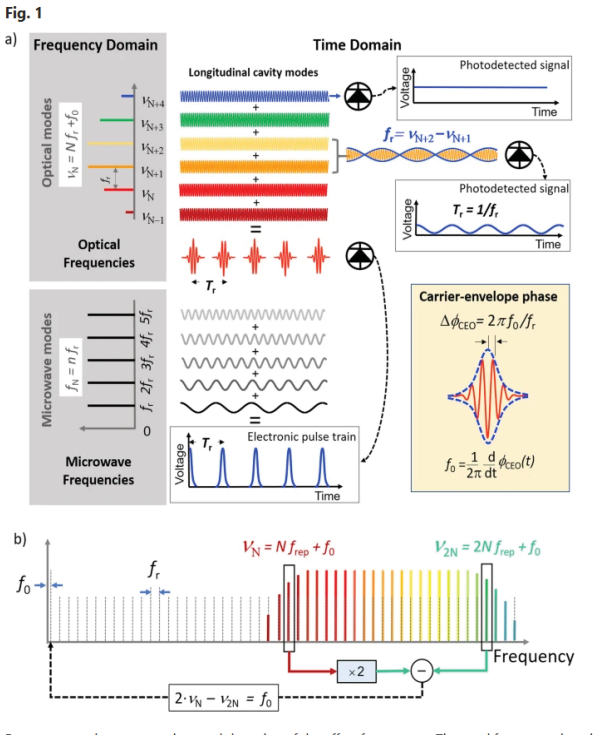
C. Weber, B. Batagelj, P. Fiala, D. Auth, U. Dragonja, Q. Gaimard, A. Ramdane, S. Breuer
»Quantum dash frequency comb laser stabilisation by optical self-injection provided by an all-fibre based delay-controlled passive external cavity«, Electronics Letters, 01 September 2019, https://doi.org/10.1049/el.2019.2016

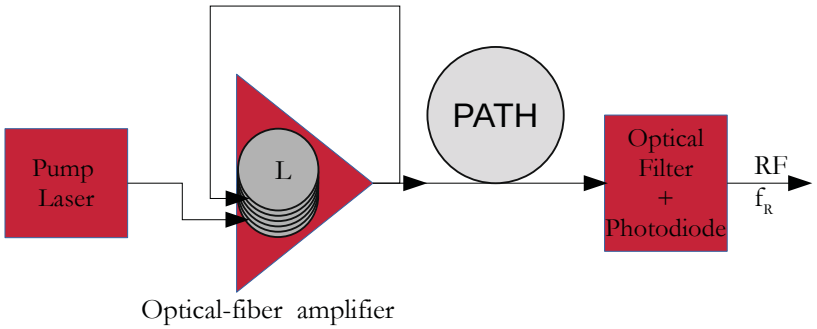
Mode-locked Laser



Optical-fiber amplifier





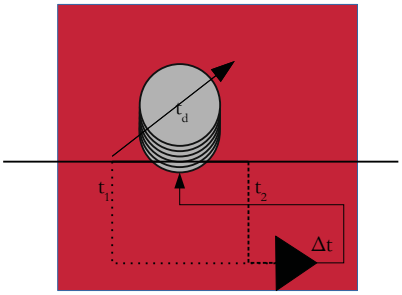


Optical-fiber amplifier

- Stability of the delay is critical for repetition frequency!
- Once generated, change of delay does not critically influence the repetition frequency (provided chromatic dispersion is low!)

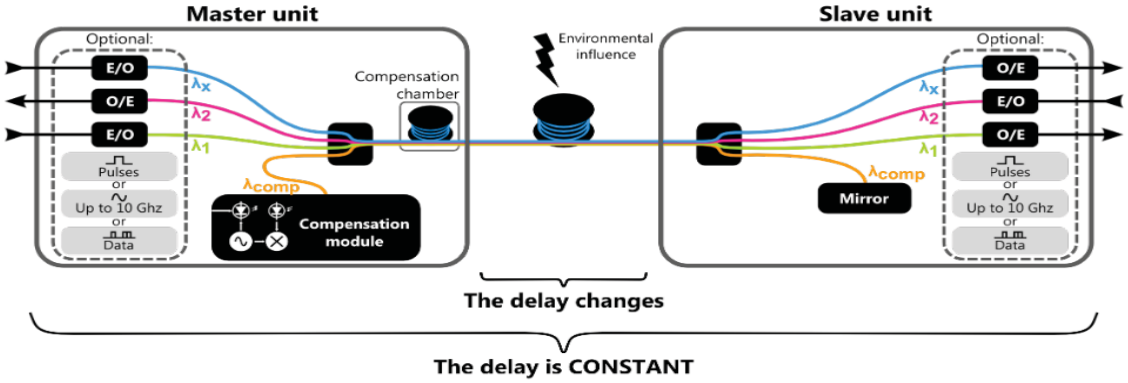
Source: Fortier Tara, Baumann Esther: 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications, Communications Physics volume 2, Article number: 153 (2019)

Signal Distribution
Time & Frequency Transfer



Delay-stabilized optical path: Delay measured and corrected based on the error (Regulation).

Signal Distribution
Time & Frequency Transfer



Absolute stabilization of delay <1ps @ 1km over 48 hours
Useful transfer of time and frequency reference signals in research facilities (atomic clocks)

J. Tratnik, U. Dragonja and B. Batagelj, "Multi-purpose constant-delay optical link," 2014 European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, 2014, pp. 333-335, doi: 10.1109/EFTF.2014.7331502. https://ieeexplore.ieee.org/document/7331502

O seminarju
The seminar

Strokovni seminar Optične komunikacije se je razvil iz izobraževalne dejavnosti, ki jo je pod okriljem projekta TEMPUS JEN-04202 v letih 1993 do 1997 izvajala Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Seminar je namenjen strokovnemu izpopolnjevanju strokovnjakov optičnih komunikacij in drugih, ki jih to področje zanima. Vključen je v program izvajanja vseživljenjskega izobraževanja na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegov namen je osveževanje, razširjanje izpopolnjevanje in poglabljanje znanja ter dvig strokovnosti zaposlenih strokovnjakov na področju optičnih komunikacij. Seminar obsega uvodni del, namenjen obnavljanju in razširjanju znanja, ter strokovni del, namenjen seznanjanju in poglabljanju v strokovna vprašanja o sistemih in njihovih sestavnih delih. Izvedenski del seminarja, ki ga izvajajo priznani vabljeni strokovnjaki, obsega nekatera pomembnejša razvojna vprašanja.

Seminar on Optical Communications evolved from the activities running at the Faculty of Electrical Engineering University of Ljubljana, during the period from 1993 to 1997 under the auspices of the European project TEMPUS JEN-04202 granted for the same period. The seminar si intended to communication professionals and other involved into the field of optical communications. It is part of the continuing education programme at the Faculty of Electrical Engineering in Ljubljana. Its primer porpuse is to enhance the expertise of professionals in the field of optical communications. The seminar consists of two parts: one part is dedicated to basic technical topics aiming to refresh fundamental knowledge in optical communications, and the second part is intended to the latest research and development achievements and trends from spectrum regulation, standardization, systems and solutions, all from international and national experts.

Ključna gesla
Keywords

200 Gbit/s prenosni sistemi, 5G, 6G, digitalna družba, dostopovno omrežje, DWDM, fotonska integrirana vezja, FTTH, integrirana mikrovalovna fotonika, komunikacija z vidno svetlobo, Lidar, lomni količnik svetlovoda, metamateriali, optična infrastruktura, optična transportna omrežja, optične kasnilne linije, optične tehnologije na sodobnih ladjah, prostozračne optične zveze, svetlobno vlakno, VLC, XGS-PON

200 Gbps transport systems, 5G, 6G, access network, digital society, DWDM, fibre effective refractiv index, fibre optics, fibre sensing, free-space optical communications, FTTH, integrated microwave photonics, Lidar, metamaterials, optical communications on modern ships, optical delay lines, optical infrastructure, optical transport networks, photonic integrated circuits, visible light communications, VLC, XGS-PON

Avtorji
Authors

Aleksander Sešek, Andraž Debevc, Andrej Lavrič, Boštjan Batagelj, Bruno Cacovich, Eran Inbar, Goran Živec, Ioannis Tomkos, Janez Krč, Janez Trontelj, Jernej Mušič, Katja Mohar Bastar, Klaus Samardžić, Kristjan Vuk Baliž, Luka Mustafa, Marko Topič, Matjaž Vidmar, Miha Cacovich, Mitja Golja, Mladen Radovanović, Rok Čotić, Uroš Dragonja, Žan Knafelc, Žiga Pušelc