



RIGA TECHNICAL
UNIVERSITY

Riga Technical University

Institute of Telecommunications

Faculty of Electronics
and Telecommunications

«Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes
veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators izstrāde un
tā pielietojumi telekomunikācijās» (1.1.1.1/18/A/155)

Prof. Jurgis Poriņš

2021. Gada 13. aprīlī

Projekta mērķis ...

- **Projekta vispārējais mērķis:** Veikt pētniecību, kas veicina Latvijas viedās specializācijas stratēģijas mērķu sasniegšanu, cilvēkkapitāla attīstību zinātnē un tehnoloģijās un jaunu zināšanu radīšanu, lai uzlabotu konkurētspēju tautsaimniecībā.
- **Projekta mērķis ir:** Iegūt jaunas zināšanas par čukstošo galeriju modu rezonatoru optiskajām frekvenču ķemmēm (WCOMBs) un izstrādāt, konstruēt un testēt ķemmes ģenerators prototipu telekomunikāciju pielietojumiem.

1.6.1. Iznākuma rādītāji							
Nr.	Rādītāja nosaukums	Sākotnējā vērtība		Plānotā vērtība		Mērvienība	
		gads	vērtība	gads	starpvērtība		gala vērtība
1	Jaunu pētnieku skaits atbalstītajās vienībās (pilnas slodzes ekvivalents)	2019	0	2021	1	1,72	Pilnslodzes ekvivalents
2	Zinātnisko rakstu skaits, kuru izstrādei un publicēšanai sniegts atbalsts projekta ietvaros	2019	0	2021	0	5	zinātnisko rakstu skaits
3	Oriģināli zinātniskie raksti, kas publicēti žurnālos vai konferenču rakstu krājumos, kuru citēšanas indekss sasniedz vismaz 50 procentus no nozares vidējā citēšanas indeksa			2021	0	2	zinātnisko rakstu skaits
4	Oriģināli zinātniskie raksti, kas publicēti Web of Science vai SCOPUS (A vai B) datubāzēs iekļautos žurnālos vai konferenču rakstu krājumos			2022	0	5	zinātnisko rakstu skaits
5	Jaunu produktu un tehnoloģiju skaits, kas ir komercializējamas un kuru izstrādei sniegts atbalsts projekta ietvaros	2019	0	2021	0	1	Produktu un tehnoloģiju skaits
6	Jauna produkta vai jaunas tehnoloģijas prototips			2021	0	3	prototipu skaits
7	Jaunas ārstniecības un diagnostikas metodes (tai skaitā nekomercializējama metode)			2021	0	0	metožu skaits
8	Intelektuālā īpašuma licences līgumi			2021	0	1	līgumu skaits
9	Privātās investīcijas, kas papildina valsts atbalstu inovācijām vai pētniecības un izstrādes projektiem	2019	0	2021	15000	38880	EUR
10	Komersantu skaits, kuri sadarbojas ar pētniecības organizāciju	2019	0	2021	1	1	komersanti
11	Citi pētījuma specifiskai atbilstoši projekta rezultāti (tai skaitā dati)			2021	1	9	skaits
12	Tehnoloģiju tiesības - patenti			2021	0	1	patentu skaits
13	Tehnoloģiju tiesības - citi nemateriālie aktīvi			2021	0	3	nemateriālo aktīvu skaits

Projekta realizācija ...

2. Portatīva WCOMB izstrāde, izveide un testēšana pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās:



2.1. Eksistējošo WCOMB ģeneratoru veidu, risinājumu un realizāciju izpēte šķiedru optiskajās sakaru sistēmās (M6);



2.2. Portatīva WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās (M15);



2.3. Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana (M18); **(Pagarināts)**



2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā (M24) **(Pagarināts)**



3.1. Portatīva WCOMB prototipa pielāgošana lauka testa vajadzībām komerciālā šķiedru optisko sakaru sistēmas infrastruktūrā



4.1. Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu publicēšana Web of Science vai SCOPUS (A vai B) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos

2.1. Eksistējošo WCOMB ģeneratoru veidu, risinājumu un realizāciju izpēte šķiedru optiskajās sakaru sistēmās

Paveiktais: Ir veikta starptautisku zinātnisko rakstu, tai skaitā konferenču pilna teksta zinātnisko rakstu, un žurnālu analīze un izpēte (kopumā 22 zinātniskās publikācijas), kas ļāva novērtēt ČGM rezonatoru pielietojumu telekomunikāciju risinājumos un uz ČGM rezonatoru bāzes veidotu optiskās frekvenču ķemmes ģeneratora realizāciju. Izstrādāta detalizēta zinātniskā atskaite (M06) par pieejamajiem dažāda veida WCOMB ģeneratora risinājumiem un to izmantošanu šķiedru optiskajās sakaru sistēmās.

Scopus®

IEEE
Xplore®
Digital Library

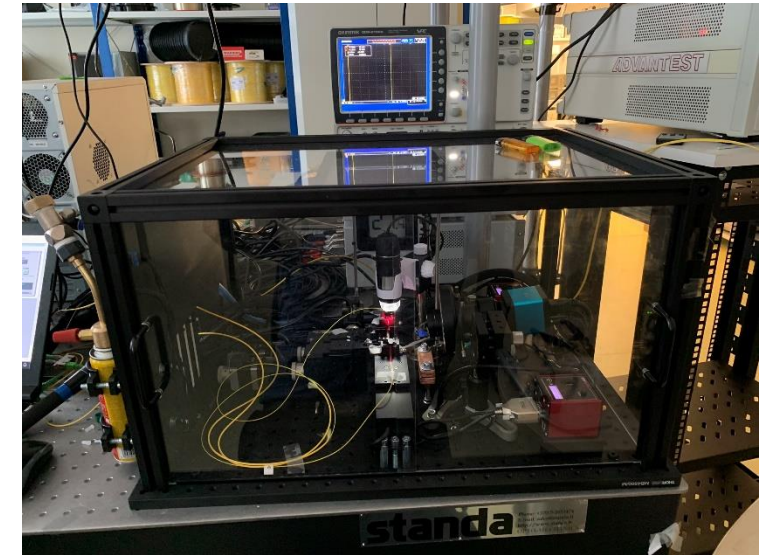
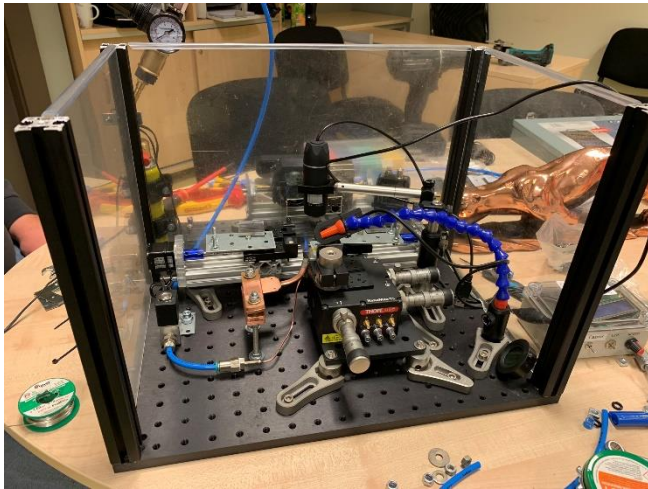
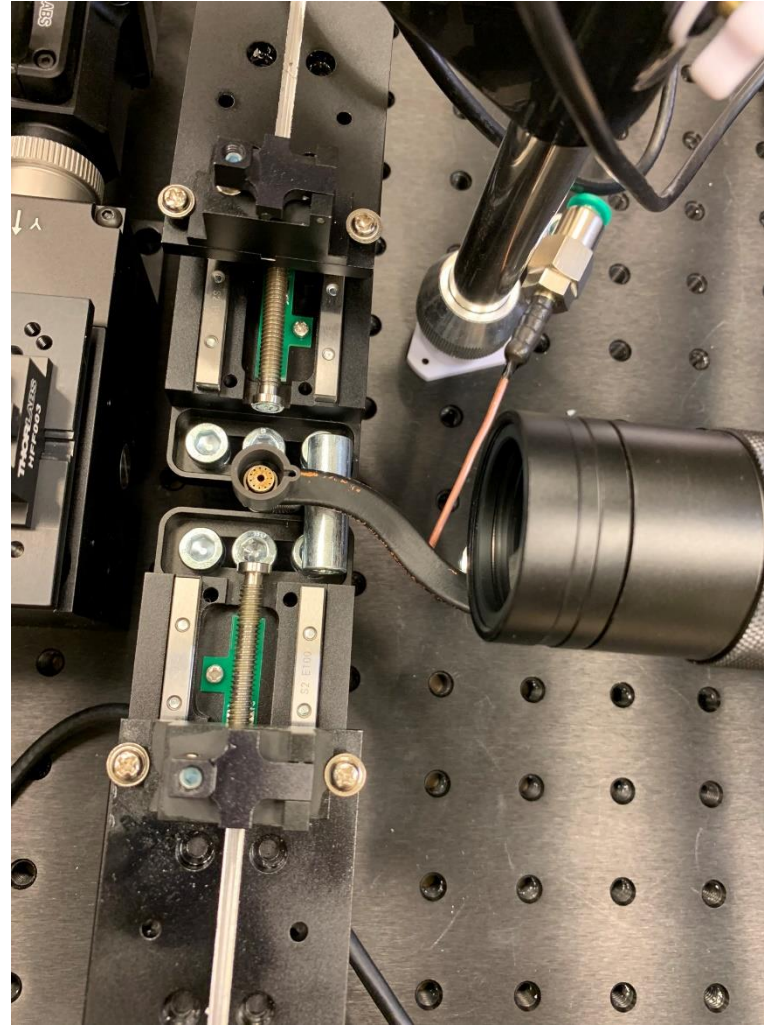
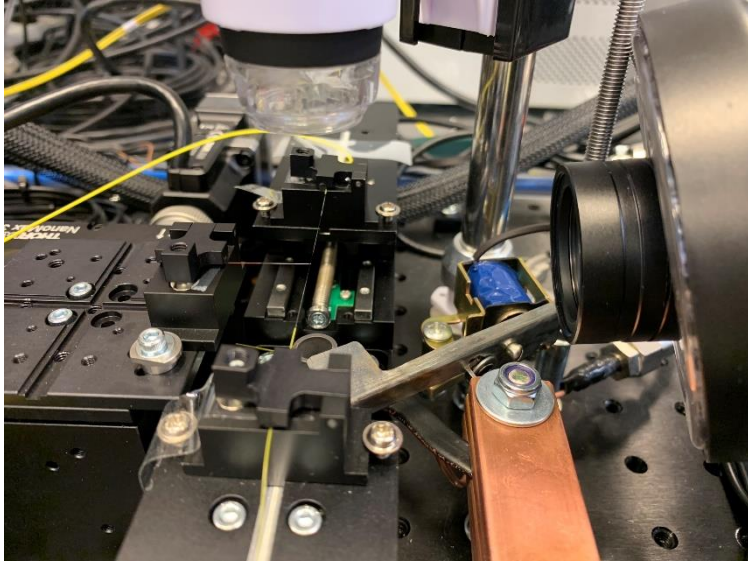
2.1.	Eksistējošo WCOMB ģeneratoru veidu, risinājumu un realizāciju izpēte šķiedru optiskajās sakaru sistēmās	<p>Šajā <u>apakšdarbībā</u> tiks pētīti ČGM rezonatoru frekvenču ķemmes ģeneratora realizācijas risinājumi telekomunikāciju pielietojumiem, attiecīgi optisko sakaru sistēmās.</p> <p>Lai to sasniegtu, tiks veiktas sekojošas darbības:</p> <ul style="list-style-type: none">•izpētīti eksistējoši rezonatoru tipi, realizācijas, risinājumi;•novērtēti ČGM rezonatoru pielietojumi telekomunikāciju risinājumos;•izpētīta realizācija uz ČGM rezonatoru balstītam frekvenču ķemmes ģeneratoram (turpmāk - WCOMB). <p><u>Apakšdarbības</u> gala rezultāts: 1 atskaite par pieejamajiem dažāda veida WCOMB ģeneratora risinājumiem un to izmantošana šķiedru optiskajās sakaru sistēmās.</p> <p>Plānotais darbības ilgums ir no Cet1* līdz Cet2 (kopā 2 ceturkšņi). Rezultāti projekta <u>vidusposmā</u> (projekta 24. mēnesis): <u>apakšdarbība</u> ir beigusies un iegūti gala rezultāti.</p>	1 atskaite par pieejamajiem dažāda veida WCOMB ģeneratora risinājumiem un to izmantošana šķiedru optiskajās sakaru sistēmās	1	atskaite
------	---	--	---	---	----------

2.2. Portatīva WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās (1/5)

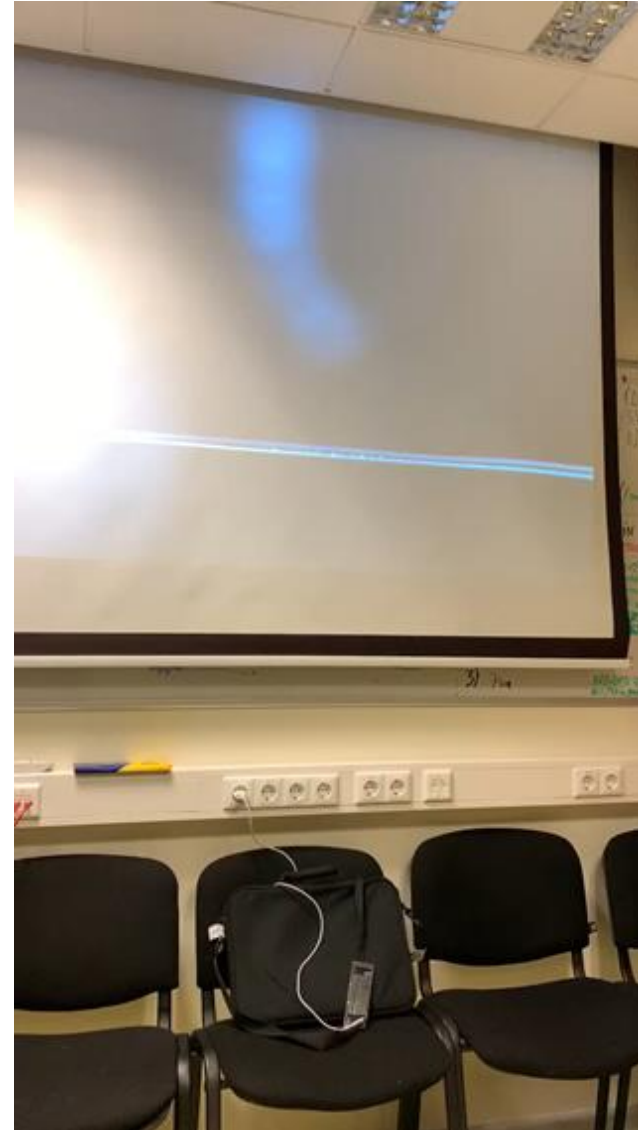
Paveiktais: Tika noteikts, ka šķiedru optisko sakaru sistēmās testēšanai ir izmantojama WCOMB sistēma, kurā ierosmes lāzera fiksētais monohromatiskais starojumstiek ievadīts rezonatorā caur trapecveida šķiedru. Šī WCOMB nodrošina stabilas frekvenču ķemmes ģenerēšanu. Tika optimizēta WCOMB sistēma, lai tā būtu kompakta un mobila. Tika izstrādāts kompakts trapecveida šķiedras turēšanas modulis. Tika testēti vairāki WCOMB sistēmas nosacījumi (rezonatoru izmērs, rezonatoru pozīcija pie trapecveida šķiedras, ierosmes lāzera viļņa garums, intensitāte), lai izvēlētos optimālākos nosacījumus WCOMB sistēmai, kas testējama šķiedru optisko sakaru sistēmās.

2.2.	Portatīva WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās	Šīs apakšdarbības ietvaros eksperimentāli šķiedru optiskajās sakaru sistēmu (ŠOPS) laboratorijā tiks izstrādāts WCOMB, kas pielāgots izmantošanai ŠOPS kā daudzviļņu gaismas avota risinājums. Izveidotais WCOMB atbildīs sekojošām prasībām: <ul style="list-style-type: none">•nodrošinās frekvenču ķemmi optiskajā C – joslā (1530-1565 nm), kanālu skaits atbildīs reālos ŠOPS risinājumos izmantotajiem $2n$ (n – vesels skaitlis), kā piemēram, 8, 16 kanāli;•starpkanāla intervāls starp (ČGM) rezonatora frekvenču ķemmes maksimumiem atbildīs ŠOPS viļņgarumdales (WDM) risinājumos izmantotiem starpkanālu intervāliem starp pārraides datu kanāliem (ITU-T G.694.1), kā piemēram, 100 un 50 GHz. Apakšdarbības gala rezultāts: atskaite par izveidoto portatīvo WCOMB ģeneratoru. Plānotais darbības ilgums ir no Cet1 līdz Cet5 (kopā 5 ceturkšņi). Rezultāti projekta vidusposmā (projekta 24. mēnesis): apakšdarbība ir beigusies un iegūti gala rezultāti.	1 atskaite par izveidoto portatīvo WCOMB
------	--	--	--

2.2. Portatīvā WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās (2/5)



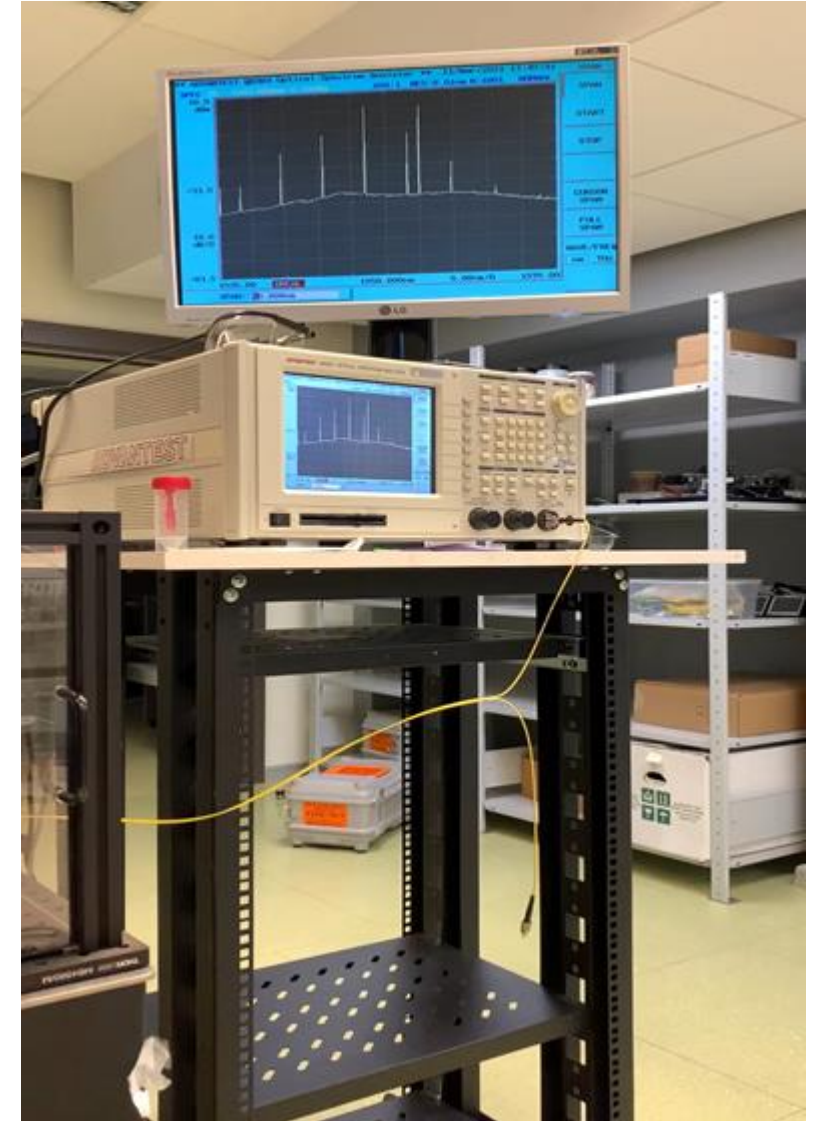
2.2. Portatīvā WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās (3/5)



2.2. Portatīvā WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās (4/5)



2.2. Portatīvā WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās (5/5)

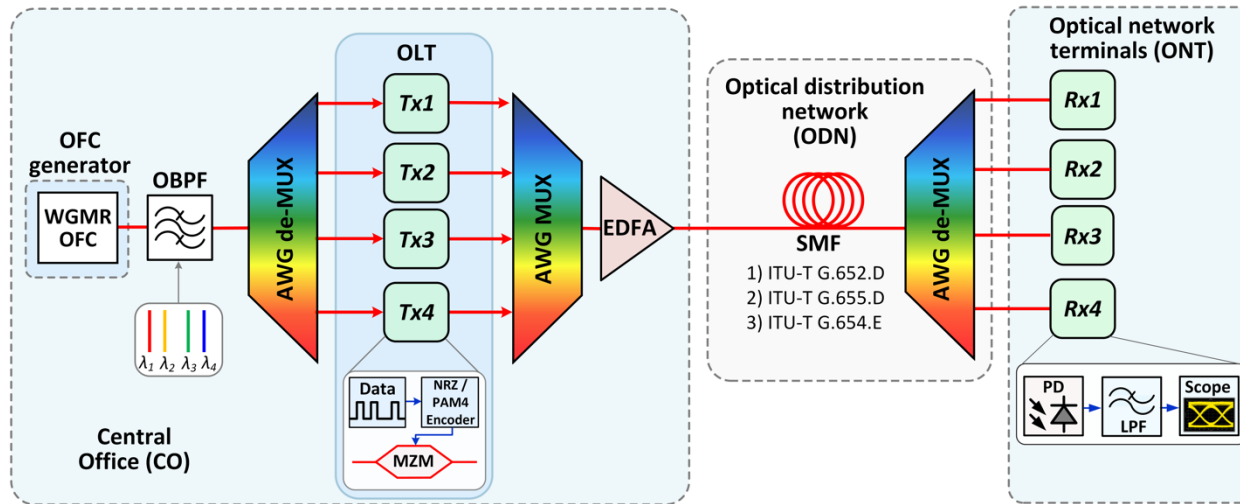


2.3. Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana (1/4)

Paveiktais: VPI Photonics VPItransmissionMakersimulācijas programmatūras vidē ir izstrādāts matemātiskais modelis. Tajā ir iespējams integrēt WCOMB daudzviļņa gaismas avota elementu ar laboratorijas apstākļos eksperimentāli nomērītām parametru raksturlīknēm un novērtēt sistēmas darbību pie tipiskiem metro-piekļuves optiskā tīkla attālumiem ar datu pārraides ātrumu līdz 10Gbit/s kanālā pielietojot NRZ-OOK un 20 Gbit/s kanālā pielietojot PAM-4 optiskā signāla impulsa amplitūdas modulācijas formātus.

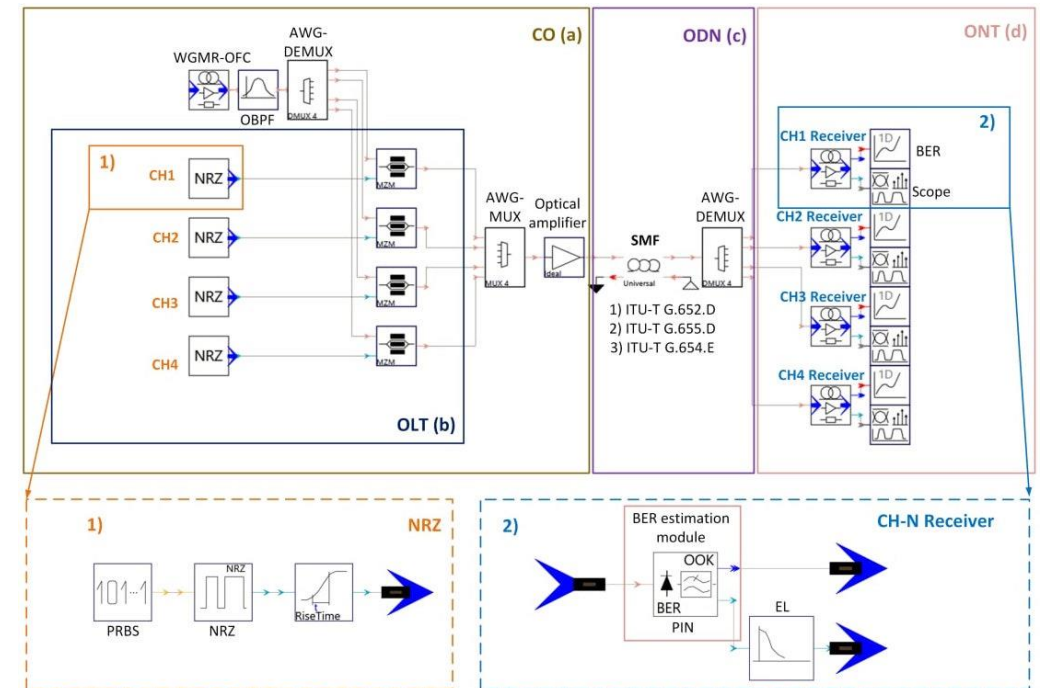
2.3.	Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana	<p>Šīs apakšdarbības mērķis ir optisko pārraides sistēmu simulācijas programmā (OptSim, VPIphotonics, Matlab vai līdzvērtīgā) novērtēt frekvenču ķemmes ģeneratora pielietojumu šķiedru optiskajā sakaru sistēmā kā daudzviļņu gaismas avotu ar dažādiem nesējsignālu modulācijas formātiem, kā piemēram, NRZ-OOK, PAM-4, Duobinary, u.c.</p> <p>Lai to sasniegtu, tiks veiktas sekojošas darbības:</p> <ul style="list-style-type: none"> • izstrādāts šķiedru optiskās sakaru sistēmas matemātiskās simulācijas modeļi, kurā iespējams integrēt daudzviļņa gaismas avota elementu ar eksperimentāli nomērītām parametru raksturlīknēm; • laboratorijā nomērīti un matemātiskā simulācijas modeļi ielādēti/integrēti WCOMB raksturojošie parametri, to raksturlīknes; • novērtēt sistēmas darbību pie tipiskiem metro-piekļuves optiskā tīkla attālumiem un datu pārraides ātrumiem (piemēram, 2,5, 10, 25 Gbit/s; u.c.). <p>Izveidotais matemātiskais simulācijas modelis atbilst tehnoloģiju gatavības līmenim – TRL 3, kas sevi ietver koncepcijas eksperimentālu pārbaudi pielietojot analītiskus pētījumus, lai apstiprinātu prognozes par tehnoloģijas komponentēm.</p> <p>Apakšdarbības gala rezultāts: viens matemātiskais simulācijas modelis</p> <p>Plānotais darbības ilgums ir no Cet2 līdz Cet6 (kopā 5 ceturkšņi). Rezultāti projekta vidusposmā (projekta 24. mēnesis): apakšdarbība ir beigusies un iegūti gala rezultāti.</p>	1 matemātiskais modelis	1	modelis	1, 2
------	--	--	-------------------------	---	---------	------

2.3. Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana (2/4)



4-kanālu WDM-PON pārraides sistēmas simulācijas modelis ar integrētu WGMR-OFC gaismas avotu nodrošinot 393 GHz starpkanālu intervālu.

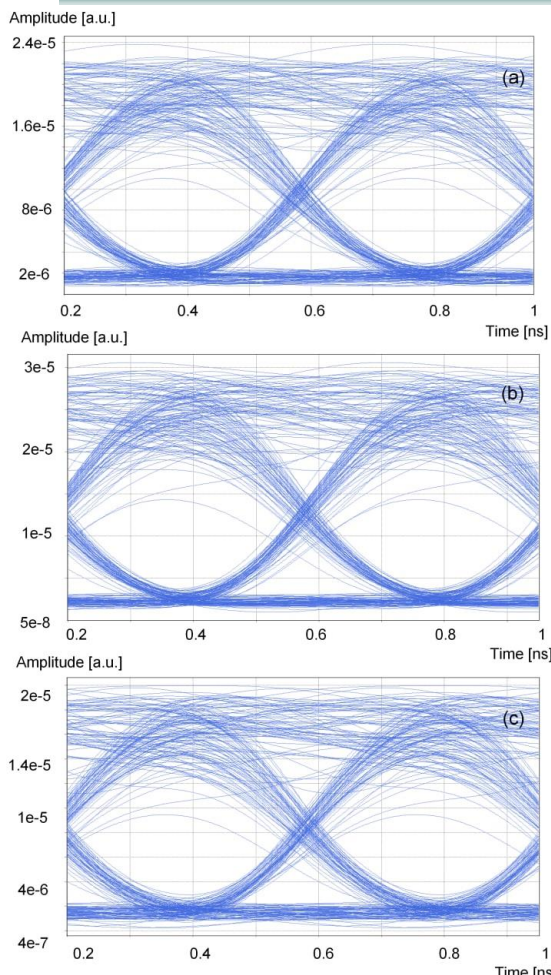
Parameter	Fiber type	Standard SMF	NZ-DSF	CSF
Attenuation coefficient (dB/km)		0.20	0.19	0.17
Dispersion coefficient (ps/nm/km)		18	4	23
Dispersion slope (ps/(nm ² km))		0.086	0.108	0.070
Effective area (μm ²)		85	72	125
Nonlinear index (m ² /W)		2.21×10 ⁻²⁰	2.31×10 ⁻²⁰	2.14×10 ⁻²⁰



VPI transmission Maker simulācijas shēma 4-kanālu WDM-PON pārraides sistēmas simulācijas modelim ar integrētu WGMR-OFC gaismas avotu nodrošinot 393 GHz starpkanāla intervālu nodrošinot 2.5 Gbit/s un 10 Gbit/s NRZ-OOK modulētu datu pārraides ātrumu kanālā.

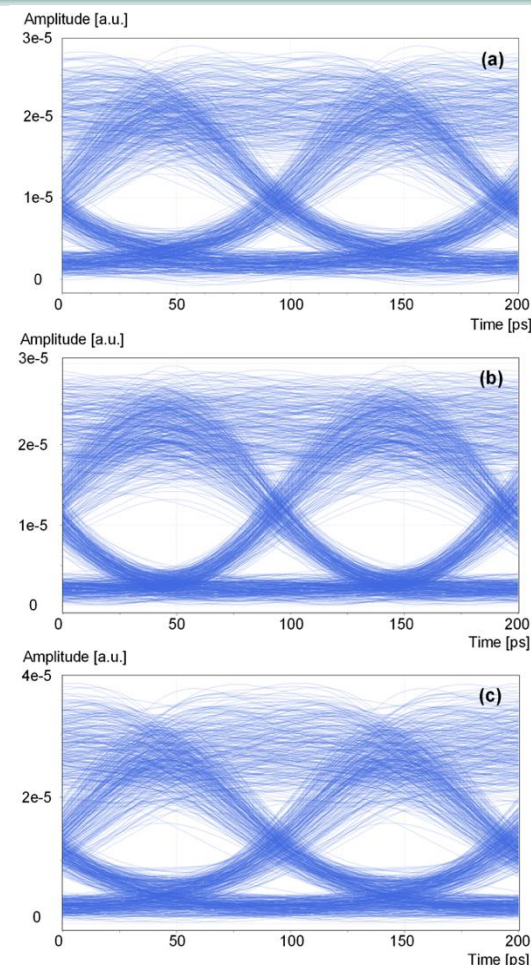
2.3. Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana (3/4)

Uztvertā signāla BER vērtības izmantojot SMF, NZ-DSF un CSF šķiedras ir zem FEC sliekšņa - $2,5 \times 10^{-10}$, $4,9 \times 10^{-11}$, $7,2 \times 10^{-10}$



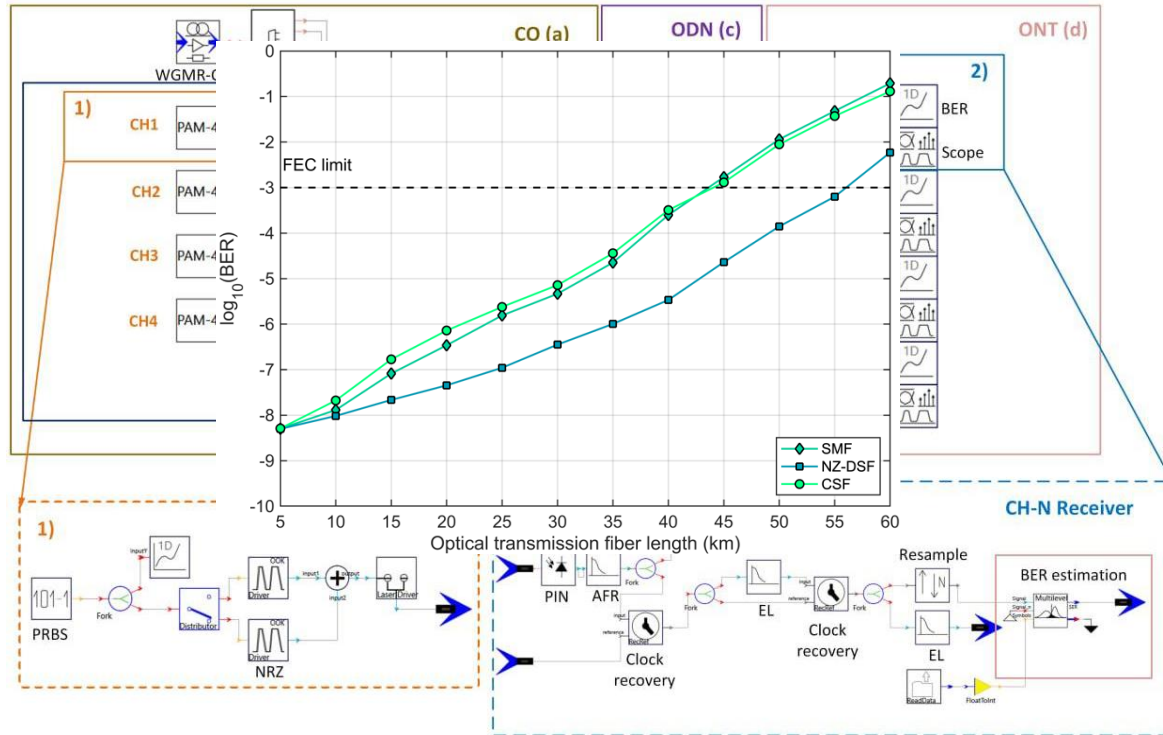
Uztvertā signāla acu diagrammas pēc 60 km pārraides caur (a) SMF, (b) NZ-DSF un (c) CSF optisko šķiedru 4-kanālu WDM-PON pārraides sistēmai ar integrētu WGMR-OFC gaismas avotu nodrošinot 393 GHz starpkanāla intervālu un **2.5 Gbit/s** pārraides ātrumu kanālā.

BER pēc 40 km pārraides ir zemāks par FEC sliekšni - 2×10^{-5} , $4,8 \times 10^{-7}$ un $2,3 \times 10^{-5}$, ja SMF, NZ-DSF vai CSF šķiedra tiek izmantota ODN sadalā.

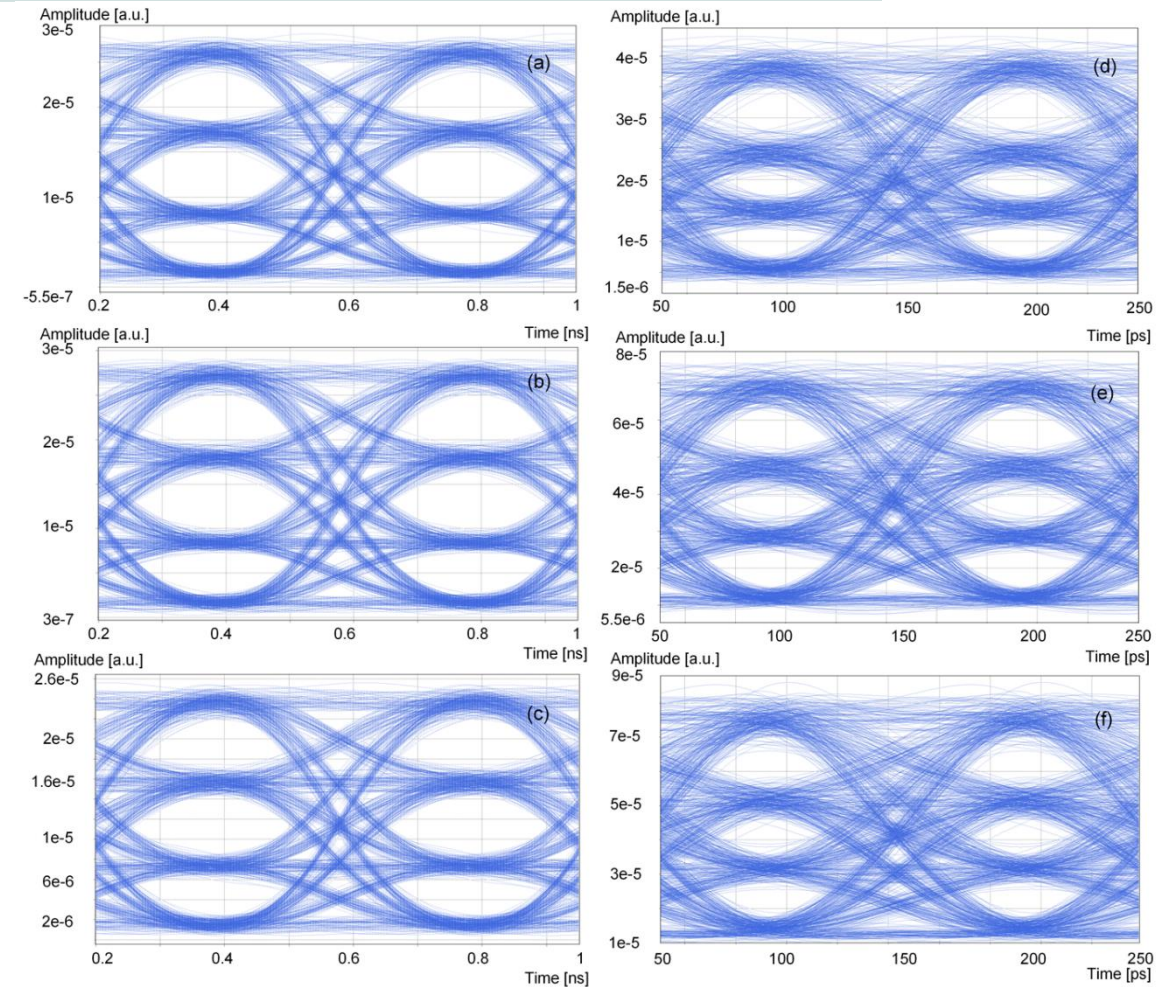


Uztvertā signāla acu diagrammas pēc 40 km pārraides caur (a) SMF, (b) NZ-DSF un (c) CSF optisko šķiedru 4-kanālu WDM-PON pārraides sistēmai ar integrētu WGMR-OFC gaismas avotu nodrošinot 393 GHz starpkanāla intervālu un **10 Gbit/s** pārraides ātrumu kanālā.

2.3. Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana (4/4)



VPI transmission Maker simulācijas shēma 4-kanālu WDM-PON pārraides sistēmas simulācijas modelim ar integrētu WGMR-OFC gaismas avotu nodrošinot 393 GHz starpkanāla intervālu nodrošinot 1.25 Gbaud/s un 10 Gbaud/s PAM-4 modulētu datu pārraides ātrumu kanālā.



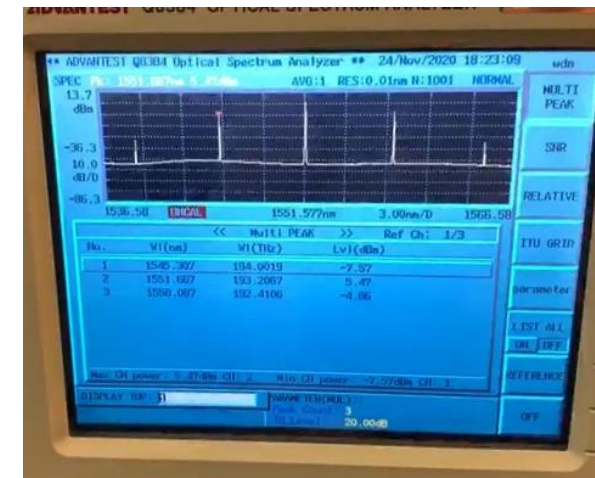
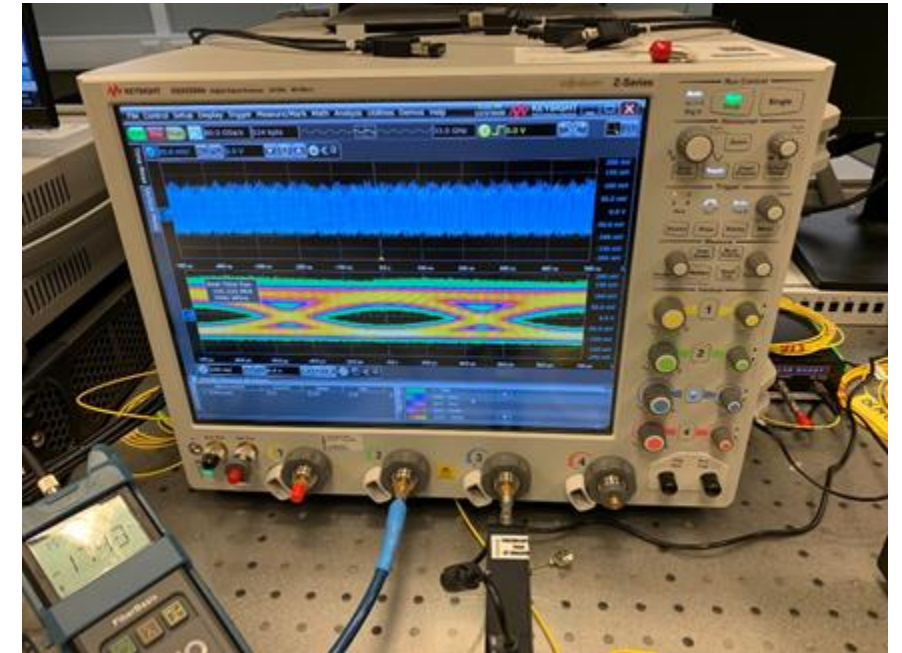
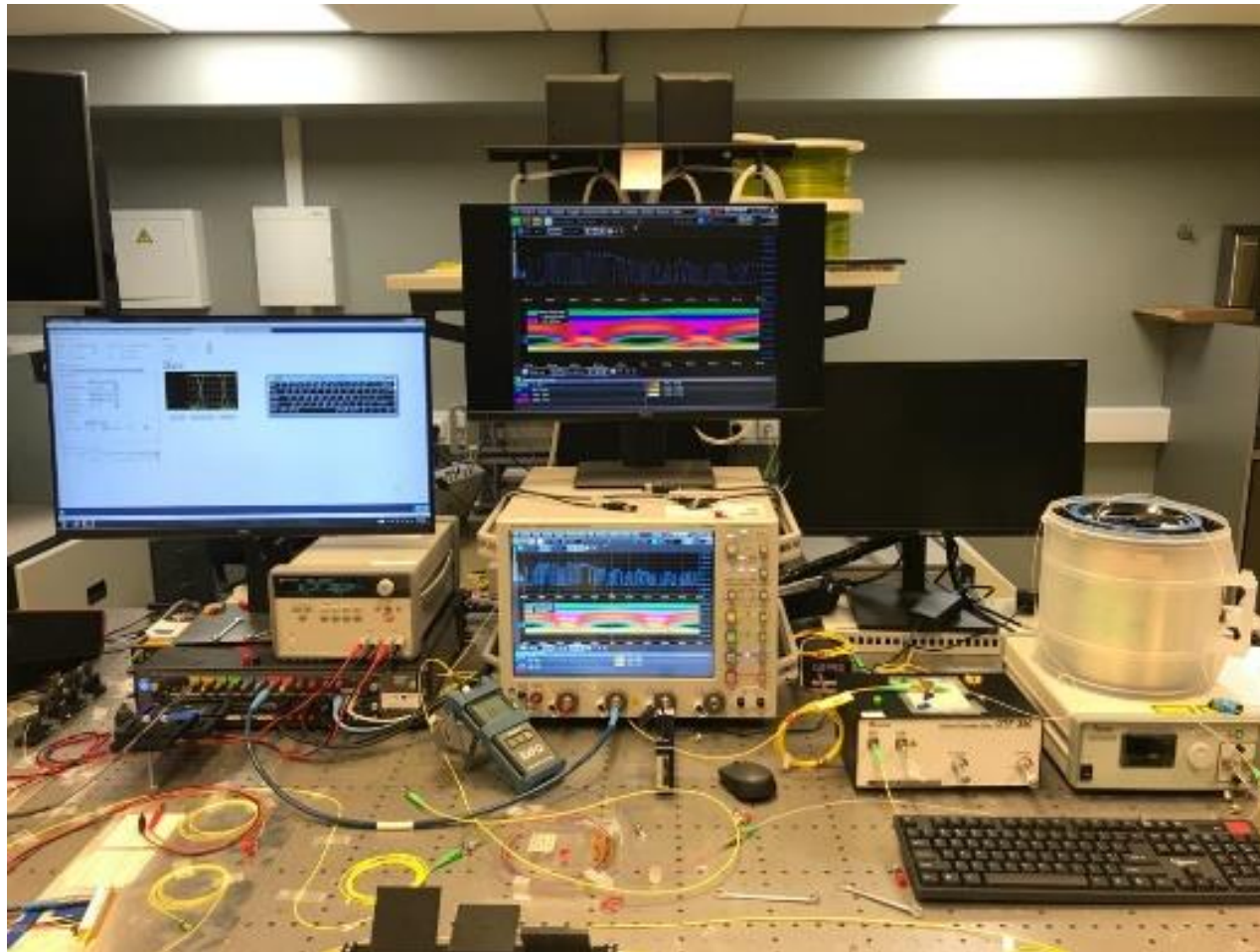
Uztvertā signāla acu diagrammas pēc 40 km (1.25 Gbaud/s) pārraides caur (a) SMF, (b) NZ-DSF un (c) CSF ODN un pēc 40 km (10 Gbaud/s) pārraides caur (d) SMF, (e) NZ-DSF un (f) CSF PAM-4 modulētai WDM-PON pārraides sistēmai ar integrētu WGMR-OFC gaismas avotu.

2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā (1/5)

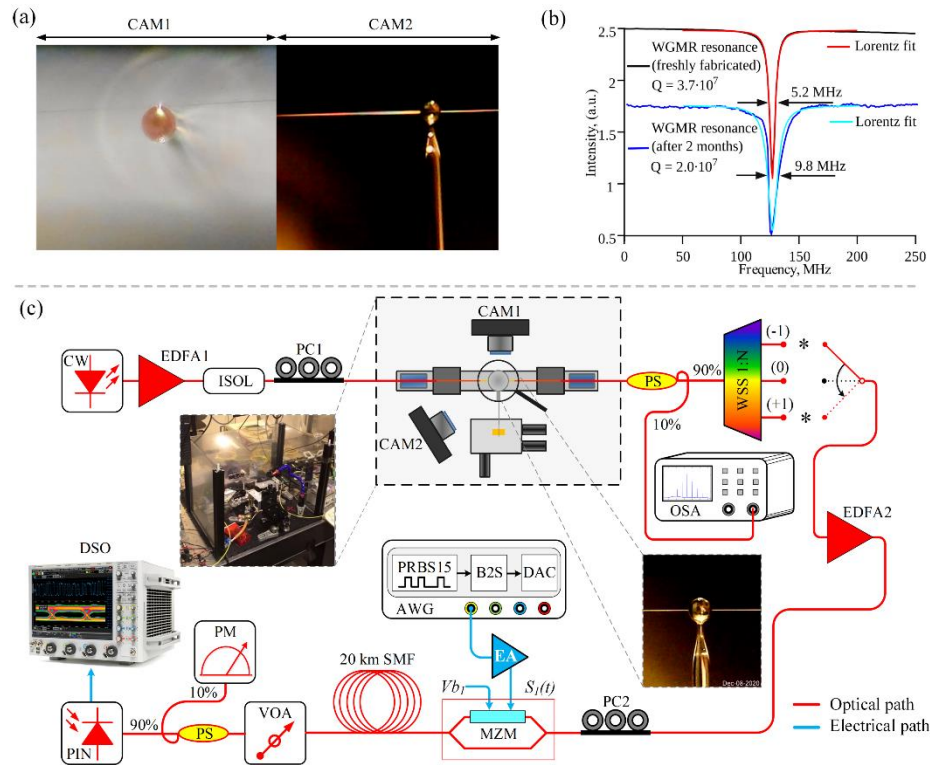
Paveiktais: Laboratorijas vidē ir veikta šķiedru optiskās pārraides sistēmas slēguma shēmas izstrāde ar 10Gbit/s pārraides ātrumu kanālā, pielietojot NRZ-OOK nesējsignālu modulācijas formātu. Slēguma shēmā ir integrēts eksperimentāli izstrādātais WCOMB avots, ir veikta modeļa elektrisko, opto-elektrisko un optisko komponentu galveno parametru analītiska un eksperimentāla pirmējā salāgošana, turpinās darbs pie datus saturoša pārraidāmā signāla kvalitātes novērtējuma atkarībā no optiskās pārraides līnijas garuma un signāla polarizācijas stāvokļa.

2.4.	Lab tests of WCOMB integrated in fiber optical communication system	<p>In this sub-activity WCOMB will be tested in the FOTS laboratory in an optical fiber communication system tested with data rates up to 32 Gbps NRZ-OOK and different modulation format (PAM-4, Duobinary).</p> <p>The following activities will be carried out:</p> <ul style="list-style-type: none"> development of optical transmission circuit models (NRZ-OOK, PAM-4, Duobinary modulation formats) with parameters to be installed on circuit-based electrical, opto-electrical, optical equipment; evaluation of WCOMB performance in fiber optical communication system at different data transmission rates (e.g. 2.5, 10, 25, 32 Gbps) and modulation formats. The quality of the data transmission will be evaluated according to the bit error ratio (BER) and the eye diagram. the developed prototype version will meet the technology readiness level – TRL4, which will include technology validation in laboratory environment of Fiber Optical Transmission Systems laboratory at RTU Institute of Telecommunications. <p>Final result of sub-activity - 1 report on WCOMB generator test results.</p> <p>The planned sub-activity duration is from Q4 to Q8 (5 quarters in total).</p> <p>Results at the midterm of the project (Month 24 of the project): sub-activity will be finished and final result will be achieved.</p>	1 report on test results	1	report	1, 2
------	---	--	--------------------------	---	--------	------

2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā (2/5)



2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā (3/5)



Acronyms: CW – Continuous wave laser, EDFA – erbium-doped fiber amplifier, ISOL – fiber optical isolator, PC – polarization controller, CAM – microscope with zoom camera, PS – power splitter, OSA – optical spectrum analyzer, WSS – wavelength selective switch, MZM – Mach-Zehnder modulator, AWG – arbitrary waveform generator, B2S – bits to symbol mapping, DAC – digital-to-analog converter, EA – electrical amplifier, SMF – single mode fiber, VOA – variable optical attenuator, PM – optical power meter, PIN – photodiode, DSO – digital storage oscilloscope, DSP – digital signal processing.

Fig. 1 (a) Silica microsphere and tapered fiber position state captured by microscopes with zoom cameras: side view and top view during the experiment where OFC carrier generation was observed. (b) Experimentally observed Q-factor degradation in terms of a 2-month life cycle (freshly fabricated and after 2 months) while it resided inside the cover box. (c) Experimental setup of the designed silica microsphere WGM-OFC as a light source where 400 GHz spaced carriers provide NRZ-OOK modulated 2.5 and 10 Gbps data transmission over 20 km SMF fiber. Insets show tapered fiber and silica microsphere resonator positions of coupling conditions and WGM-OFC reduced humidity and dust prevention cover box.

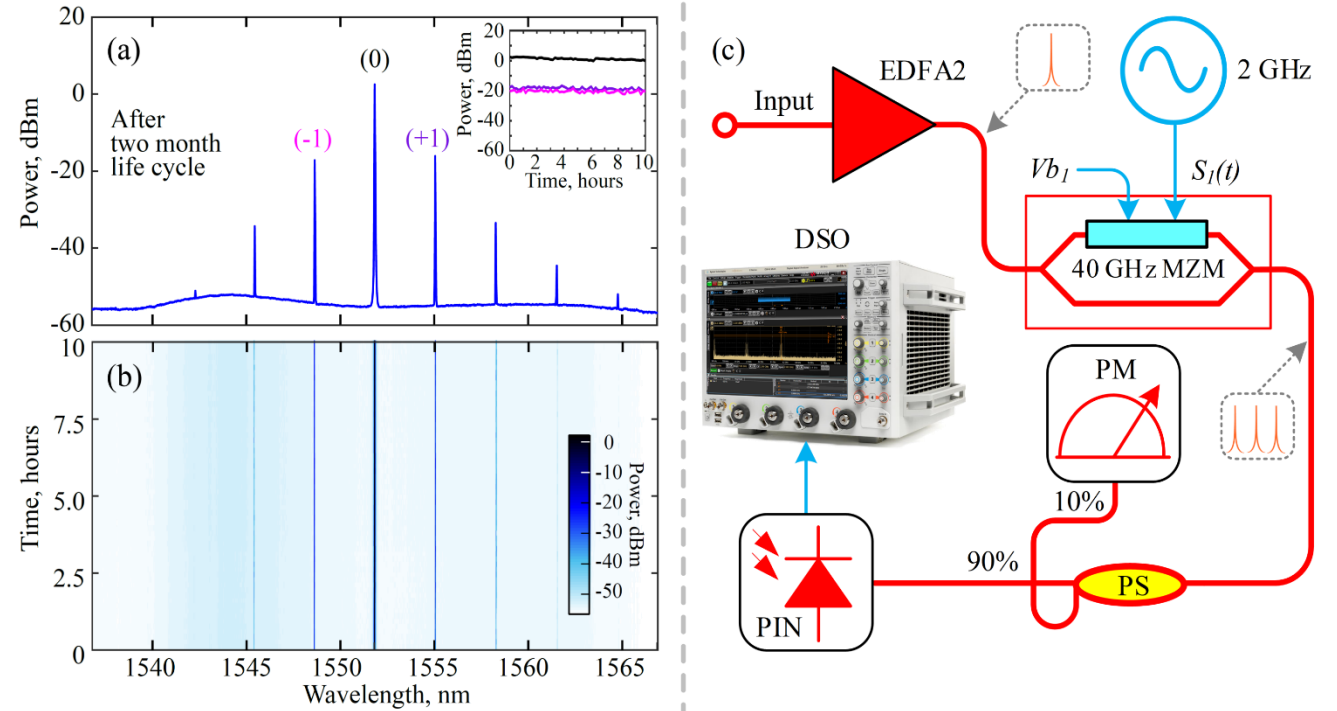
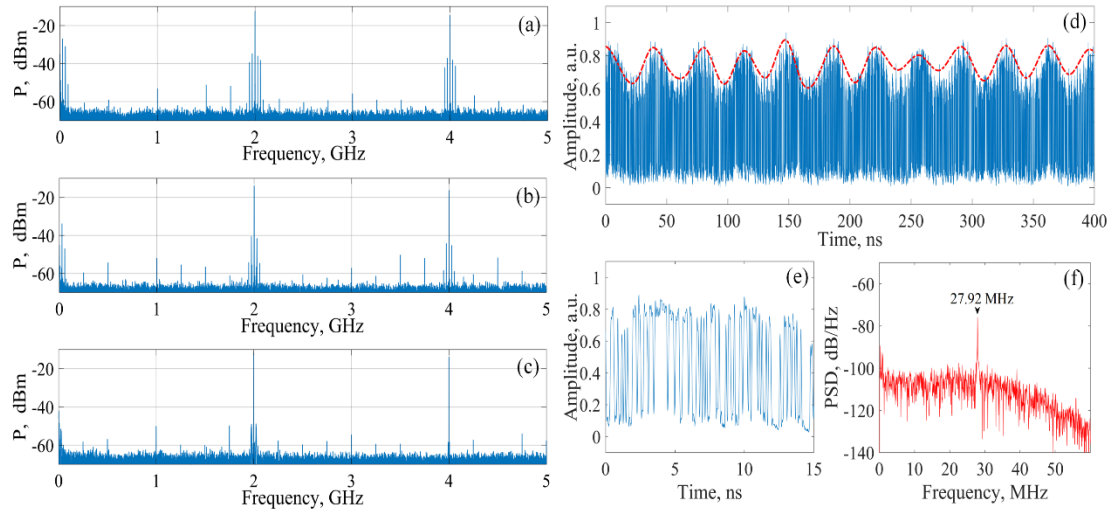
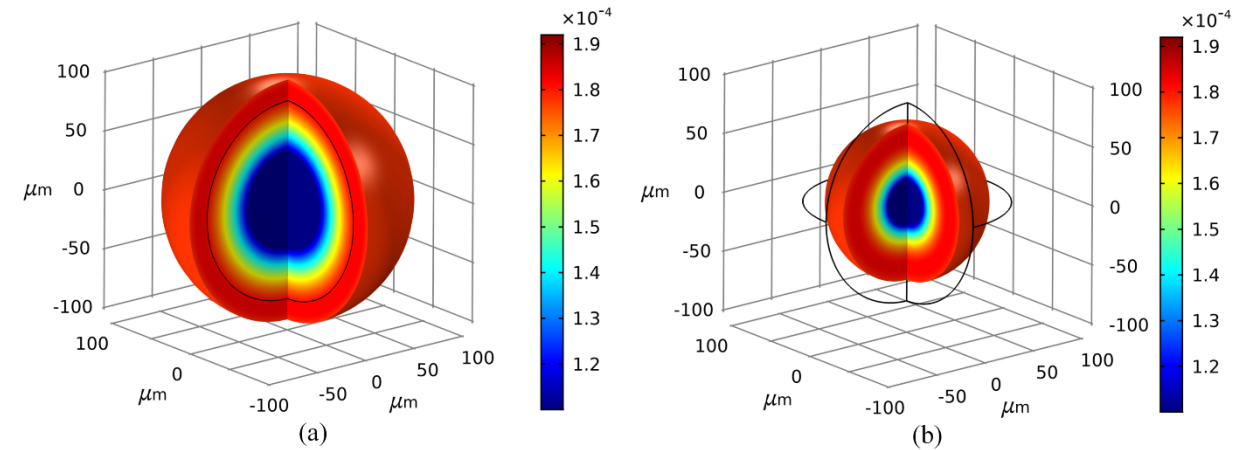


Fig. 2 Measured OFC performance over a 10-hour period: (a) optical spectrum with inset representing captured power stability, and (b) power distribution stability over the wavelength. (c) The experimental measurement setup, where one WGM-OFC optical carrier (+1) is fed into an MZM modulator driven by a 2 GHz sinusoidal tone to assess the impact of optical signal polarization on the spectral purity of generated optical carriers

2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā (4/5)

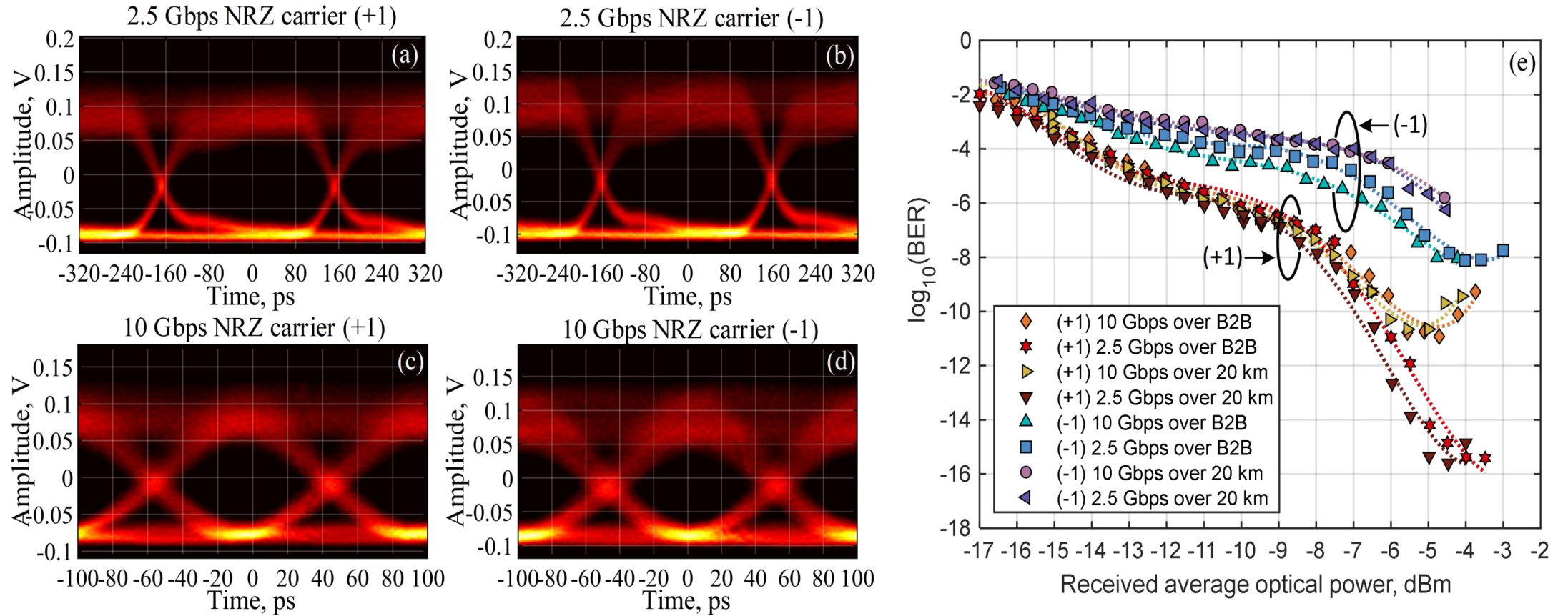


Measured effect of polarization, by received electrical signal IF after optical heterodyne up-conversion on photodiode in different polarization states: (a) polarization state with large amplitude modulation, (b) intermediate state, and (c) the optimized polarization state for lowest amplitude modulation showing the highest spectral purity of the generated OFC optical carrier. (d) Part of the received and normalized 10 Gbps NRZ-OOK signal waveform after 20 km transmission with applied upper envelope function, highlighting the periodic waveform fluctuations, (e) 15 ns insight of the normalized waveform showing received bit sequence, and (f) power spectral density of the calculated envelope signal.



COMSOL simulation of mechanical oscillations at nm scale for silica microsphere of 170 μm in diameter indicating the strongest eigenfrequency at about 27 ± 1 MHz that can be excited by a radiation pressure causing periodic detuning from resonance and back manifesting as an amplitude modulation of comb lines, where (a) represents microsphere at its diameter maximal expansion, and (b) represents the diameter maximal contraction. For a better visual representation, the deformation in simulation is exaggerated 100 000 times. The black surrounding line indicates the unperturbed microsphere size. Color scale represents the absolute value of deformation in micrometers.

2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā (5/5)



Eye diagrams of the received signal after 20 km transmission over SMF fiber at a data rate of 2.5 Gbps for (a) carrier “+1” and (b) carrier “-1”, and at a data rate of 10 Gbps for (c) carrier “+1” and (d) carrier “-1”, and (e) the plots of BER vs. average received optical power in B2B and after 20 km transmission of the NRZ-OOK modulated signal with bitrates of 2.5 and 10 Gbps for “+1” and “-1” carriers.

2.4. Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu publicēšana Web of Science vai SCOPUS(A vai B) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos (1/2): RTU un Affoc darbinieki



Atbilstoši projekta laika grafikam, veikta projekta ietvaros radīto rezultātu izplatīšana (dalība zinātniskās konferencēs un sagatavoti zinātniskie raksti).

Rakstiaugstas ietekmes žurnālos ar citēšanas indeksu vismaz 50% no nozares vidējā rādītāja:

- OSA OpticsExpress. Salgals T., Alnis J., Murnieks R., Brice I., Porins J., Andrianov A.V., Anashkina E.A., Spolitis S., Bobrovs V. «*Demonstration of fiber optical communication system employing silica microsphere-based OFC source*», pp. 1-10, OSA Opt. Express, 2021 (**publicēts**)
- IEEE Access. Spolitis S., Murnieks R., Skladova L., Salgals T., Andrianov A.V., Marisova M.P., Leuchs G., Anashkina E.A., Bobrovs V. «*IM/DDWDM-PON communication system based on optical frequency comb generated in silica whispering gallery mode resonator*», pp. 1-11, IEEE Access, 2021 (**iesniegts**)



2.4. Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu publicēšana Web of Science vai SCOPUS (A vai B) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos (2/2): RTU un Affoc darbinieki

Scopus®

Raksti konferenču rakstu krājumos:

- SPIE Proceedings I.Brice, K.Grundsteins, A.Sedulis, T.Salgals, S.Spolitis, V.Bobrovs, J.Alnis, "Frequency comb generation in whispering gallery mode silica microsphere resonators", pp. 1-9, SPIE Proc., 2021, (**publicēts**)

2021.gada 12.februāris. Latvijas Universitātes 79. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija "Atomfizika, optiskās tehnoloģijas un medicīniskā fizika" Zoom vidē:

- I.Brice, K.Grundsteins, T.Salgals, J.Alnis "Silikas mikrosfēras lodītē ģenerētas optiskā frekvenču ķemme WDM datu pārraides sistēmām«

Pieteikumi dalībai konferencēs:

- 2021.gada 6.-11.marts. Photonics West 2021 Digital Forum. I.Brice, K.Grundsteins, A.Sedulis, T.Salgals, S.Spolitis, V.Bobrovs, J.Alnis «Frequency comb generation in whispering gallery mode microsphere resonators» 2021.gada 20.-24.jūnijs.
- CLEO/Europe-EQEC 2021. K.Draguns, I.Brice, T.Salgals, J.Porins, V.Bobrovs, J.Alnis «Silica WGM microresonator comb engineering for WDM data transmission». Quantum Optics and Photonics 2021", kura notiks 22-23 Aprīlī 2021.
- Salgals T., Alnis J., Murnieks R., Brice I., Porins J., Andrianov A.V., Anashkina E.A., Spolitis S., Bobrovs V. «Microsphere-based OFC-WGMR multi-wavelength source and its applications in telecommunications».



Paldies par uzmanību!