RĪGAS
TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Sandis Migla

AUGSTAS IZŠĶIRTSPĒJAS IMPULSA POZĪCIJAS MODULĀCIJAS METOŽU IZSTRĀDE UN EKSPERIMENTĀLĀ VALIDĀCIJA INTEGRĒTĀS KOMUNIKĀCIJAS UN JUŠANAS PIELIETOJUMIEM

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2026

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

Sandis Migla
Doktora studiju programmas "Elektronika" students

AUGSTAS IZŠĶIRTSPĒJAS IMPULSA POZĪCIJAS MODULĀCIJAS METOŽU IZSTRĀDE UN EKSPERIMENTĀLĀ VALIDĀCIJA INTEGRĒTĀS KOMUNIKĀCIJAS UN JUŠANAS PIELIETOJUMIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. sc. ing.*
ARTŪRS ĀBOLTIŅŠ

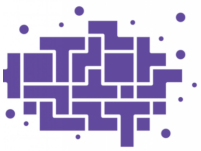
RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Migla S. Augstas izšķirtspējas impulsa pozīcijas modulācijas metožu izstrāde un eksperimentālā validācija integrētās komunikācijas un jušanas pielietojumiem.
Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 65 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-08" 2026. gada 14. septembra lēmumu, protokols Nr. 56.









Pētījums finansēts no Eiropas Savienības Atveseļošanās un noturības mehānisma projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 akadēmiskās karjeras doktorantūras granta (ID 1008), Latvijas Zinātnes padomes projekta Nr. lzp-2021/1-0475, "Pikosekunžu izšķirtspējas impulsa pozīcijas modulācija nepieredzēti augstas energoefektivitātes komunikācijām" un Eiropas Savienības Kohēzijas politikas fonda projekta Nr. 1.1.1.8/1/24/I/007 akadēmiskās karjeras doktorantūras granta (ID 8110) līdzekļiem.

Promocijas darba kopsavilkums tulkots no angļu valodas latviešu valodā, izmantojot GPT 5.6 lielo valodas modeli.

Vāka attēls no www.shutterstock.com.

https://doi.org/10.7250/9789934373701
ISBN 978-9934-37-370-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts RTU promocijas padomes sēdē 2026. gada 18. decembrī plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Jurģis Poriņš
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Ph. D.* Anna Baldycheva
Ekseteras Universitāte, Apvienotā Karaliste

Asociētais profesors *Dr. phys.* Jānis Alnis
Latvijas Universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Sandis Migla _____

Datums: _____

Promocijas darba kopsavilkums ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 31 attēls un četras tabulas; kopējais lappušu skaits 65. Literatūras sarakstā ir 175 nosaukumi.

SATURS

IEVADS 10
Tēmas pamatojums 10
Mērķis, uzdevumi un aizstāvāmās tēzes 12
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti 13
Aprobācija un publikācijas 14
Promocijas darba struktūra 15
1. PPM SIGNĀLU ĢENERĒŠANA UN DETEKTĒŠANA UN MODULATORA VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA 17
1.1. Impulsu pozīcijas modulācijas veidi 17
1.2. PPM signālu detektēšanas metodes 19
1.3. *Digital Discovery* balstīta eksperimentālā platforma 20
1.4. Diferenciālā PPM ar ultraīsu laika intervālu 22
1.5. Ciparu aiztures līnijā balstīts PPM modulators 23
1.6. Kļūdu analīze un labošanas metodes 27
1.7. Pirmās tēzes kopsavilkums 30
2. ULTRAĪSU IMPULSU PAPLAŠINĀŠANA PPM SISTĒMĀS 31
2.1. Elektriskā impulsu paplašināšana 31
2.2. Optiskā impulsu paplašināšana 34
2.3. Impulsu paplašināšanas metožu eksperimentālā validācija 35
2.4. Otrās tēzes kopsavilkums 37
3. PPM BALSTĪTAS ISAC SISTĒMAS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS AR AROF PĀRRAIDES TĪKLU 38
3.1. 28 GHz mikroviļņu un optiskās pārraides sistēmas ar PPM projektēšana un novērtēšana 38
3.2. PPM balstītas radaru sistēmas ar ISAC funkcionalitāti projektēšana un novērtēšana 41
3.3. Trešās tēzes kopsavilkums 47
SECINĀJUMI 48
LITERATŪRAS SARAKSTS 50

ATTĒLU SARAKSTS

1. Promocijas darba struktūras diagramma, kurā „P" apzīmē promocijas darbā iekļautās publikācijas. 16
1.1. Koherentā PPM signāla struktūras piemērs. 17
1.2. TR-PPM signāla struktūras piemērs. 18
1.3. DPPM signāla struktūras piemērs. ©2023 IEEE 19
1.4. Eksperimentālās platformas programmatūras slāņa diagramma. ©2022 IEEE . 21
1.5. BER atkarība no trokšņa RMS impulsiem ar 20 ns un 40 ns ilgumu. ©2022 IEEE 21
1.6. DPPM pārraides eksperimentālā shēma, ieskaitot PEXM. ©2023 IEEE 22
1.7. DDL balstīta modulatora realizācijas blokshēma. ©2024 IEEE 24
1.8. DPPM pārraides testa iekārtas blokshēma. ©2024 IEEE 24
1.9. Ar ESTT izmērītais modulatora džitera sadalījums. ©2024 IEEE 25
1.10. DPPM pārraides testu eksperimentālie rezultāti. ©2024 IEEE 25
1.11. PPM modulatora konceptuālā blokshēma. 26
1.12. Izstrādātā modulatora džitera testēšanas rezultāti: (a) džitera sadalījums; (b) impulsu novirze no ideālajām pozīcijām. 27
1.13. Simulācijas rezultāti bez takts signāla dreifa kļūdas. ©2024 IEEE 29
1.14. Simulācijas rezultāti ar pievienotu takts signāla dreifa kļūdu. ©2024 IEEE . . 29
2.1. Ar *Mini-Circuits* SLP-2400 filtru paplašināts impulss: (a) impulsu viļņformas; (b) normētie amplitūdas spektri. 32
2.2. Īpaši izstrādātie filtri: (a) pēc amplitūdas normētais filtrs un (b) klasiskais filtrs ar robežfrekvenci $f_c = 1{,}8$ GHz. 32
2.3. *Ansys* HFSS grupas aiztures simulācijas rezultāti un īpaši izstrādāto filtru mērījumu rezultāti. 33
2.4. Ar īpaši izstrādāto klasisko filtru paplašināts impulss: (a) impulsu viļņformas; (b) normētie amplitūdas spektri. 33
2.5. Ar īpaši izstrādāto pēc amplitūdas normēto filtru paplašināts impulss: (a) impulsu viļņformas; (b) normētie amplitūdas spektri. 33
2.6. Optisko impulsu paplašināšanas testa iekārtas blokshēma. 34
2.7. Ar noskaņojamu FBG paplašināts impulss: (a) reģistrētā viļņforma un (b) normētie amplitūdas spektri. 34
2.8. PPM pārraides savienojuma blokshēma ar notikumu taimeri demodulācijai. . . 35
2.9. BER atkarība no vidējās uztvertās optiskās jaudas, veicot optisko impulsu paplašināšanu ar FBG moduli. 36
2.10. BER atkarība no vidējās uztvertās optiskās jaudas, veicot elektrisko impulsu paplašināšanu ar LPF. 37
3.1. PPM balstītas ARoF sakaru sistēmas eksperimentālā iekārta. 39
3.2. Datu pārraides eksperimenta rezultāti B2B savienojumam. 40

3.3. Datu pārraides eksperimenta rezultāti savienojumam ar 20 km SMF. 40
3.4. PPM balstītas radaru sistēmas ar ISAC funkcionalitāti, kurā izmantota ARoF, eksperimentālās iekārtas blokshēma. 42
3.5. Izmērītā BER atkarība no laika intervāla ilguma: (a) bez Greja kodēšanas; (b) ar Greja kodēšanu. 45
3.6. Attāluma mērījumu kļūdu intervālu diagramma: (a) optiskais B2B savienojums; (b) optiskais savienojums ar 40 km SMF; (c) optiskais savienojums ar 40 km SMF un DCM. 46

TABULU SARAKSTS

1.1. DPPM pārraides eksperimentu parametri un rezultāti ©2023 IEEE 23
2.1. TR-PPM pārraides eksperimentu parametri 36
3.1. Galveno eksperimentālo parametru kopsavilkums 43
3.2. Attāluma mērījumu rezultāti 46

SAĪSINĀJUMI

ADC analogciparu pārveidotājs
ARoF analogā radio caur šķiedru
AWG patvaļīgu formu signālu ģenerators
B2B tiešais savienojums
BER bitu kļūdu īpatsvars
BPF joslas filtrs
C-RAN centralizēts radio piekļuves tīkls
CCSDS Kosmosa datu sistēmu konsultatīvā komiteja
CD hromatiskā dispersija
CO centrālais ofiss
CS kompresējošā izguve
CW nepārtrauktu viļņu
D-MIMO sadalīta vairāku ieeju vairāku izeju
DC līdzstrāva
DCM dispersijas kompensācijas modulis
DDL ciparu aiztures līnija
DPPM diferenciālā impulsa pozīcijas modulācija
DSO ciparu osciloskops
DTC ciparu laika pārveidotājs
ECC kļūdu labojošais kods
ED apliecējas detektors
EDFA ar erbiju leģēts šķiedru pastiprinātājs
ESA Eiropas Kosmosa aģentūra
ESTT Eventech straumes laikatzīmētājs
FBG šķiedras Brega režģis
FEC tiešā kļūdu labošana
FMCW frekvences modulēts nepārtraukta viļņa
FPGA programmējams loģisko elementu masīvs
FSO brīvās telpas optika
FWHM pilns platums pusmaksimumā
IC integrālā shēma
IoT lietu internets
IR impulsu radio
IR-UWB impulsu radio ultra platjoslas
ISAC integrētā jušana un komunikācija
LDPC zema blīvuma paritātes pārbaude
LPF zemfrekvenču filtrs

LVTTL zemsprieguma tranzistoru loģika
MZM Maha–Cendera modulators
NASA Nacionālā aeronautikas un kosmosa pārvalde
NOE nelineāri optiskie efekti
OOK ieslēgšanas un izslēgšanas manipulācija
PAM impulsu amplitūdas modulācija
PC personālais dators
PCB iespiedplate
PD fotodetektors
PEXM impulsu paplašināšanas modulis
PLC elektrolīniju sakari
PLL fāzes sinhronizācijas kontūrs
PON pasīvais optiskais tīkls
PPM impulsu pozīcijas modulācija
PRBS pseidonejauša binārā secība
PWM impulsu platuma modulācija
RAU attālais antenas bloks
RF radio frekvenču
RMS vidējā kvadrātiskā vērtība
RoF radio caur šķiedru
RS Rīda–Solomona
SDK programmatūras izstrādes komplekts
SDR programmvadāmais radio
SHF īpaši augsta frekvence
SLR satelītu lāzerlokācija
SMF vienmodas optiskā šķiedra
SNR signāla un trokšņa attiecība
SoC sistēma uz mikroshēmas
TDC laika ciparu pāveidotājs
ToA pienākšanas laiks
ToF izplatīšanās laiks
TR-PPM pārraidītās references impulsa pozīcijas modulācija
UAV bezpilota lidaparāts
UWB ultra platjoslas
V2V transportlīdzekļu savstarpējie
V2X transportlīdzeklis pret visu
VOA maināms optiskais vājinātājs
WGN baltais Gausa troksnis
WPAN bezvadu personālais tīkls

IEVADS

Tēmas pamatojums

Energoefektivitāte ir būtisks sakaru sistēmas aspekts, un tai ir izšķiroša nozīme lietojumos ar ierobežotu enerģijas budžetu, proti, kosmiskajos sakaros, sensoru tīklos un citās autonomās sistēmās, kurās informācijas pārraidīšanai izmanto ultraīsus impulsus, kā arī integrētās jušanas un komunikācijas (ISAC), radaru tehnoloģiju un sadalīto sensoru tīklu lietojumos [1]. Ultraplatjoslas (UWB) tehnoloģija nodrošina efektīvu līdzekli energoefektīvu radiosakaru un optisko sakaru sistēmu izveidei. Plaši pazīstamas impulsu radio ultraplatjoslas (IR-UWB) modulācijas shēmas, piemēram, IEEE 802.15.4a un tās atvasinājumi [2, 3], ir paredzētas maza darbības rādiusa bezvadu personālajiem tīkliem (WPAN) un nodrošina aptuveni 0,5 Mbit/s lielu datu pārraides ātrumu. Ir veikti daudzi pētījumi par IR-UWB shēmu un komerciālu ierīču izmantošanu transportlīdzekļu savstarpējos (V2V) sakaros [4], dzelzceļa nozarē [5], elektrolīniju sakaros (PLC) [6] un citur. Tomēr sasniedzamā bitu pārraides ātruma ierobežojumu dēļ impulsu radio (IR) nav guvis lielu popularitāti ātrdarbīgos zemes un kosmiskajos radiosakaru kanālos, un lielākā daļa pašreizējo pētījumu ir vērsti uz IR-UWB izmantošanu lokalizācijai un attāluma noteikšanai [7]. Tomēr līdz ar 6G mobilo tīklu ieviešanu, kuros, kā tiek prognozēts, ISAC būs viena no radiosakaru tīkla pamatfunkcijām, IR-UWB izcilās lokalizācijas iespējas var veicināt šīs tehnoloģijas izmantošanu arī sakariem [2].

Pēdējā desmitgadē pārraidīto datu apjoms un datu pārraides ātrums ir ievērojami palielinājies. Attiecīgi ir pieaugusi arī ar datu pārraidi saistītā enerģijas patēriņa problēmas aktualitāte. Mūsdienās sakaru sistēmās, kas paredzētas liela joslas platuma ātrdarbīgai datu pārraidei, plaši izmanto mikroviļņu un optisko frekvenču diapazonus, tādējādi to enerģijas patēriņš kļūst arvien lielāks. Pārejot uz milimetru viļņu nesējfrekvencēm, enerģijas patēriņam ir arvien nozīmīgāka loma [8]. No otras puses, spektra pieejamība milimetru viļņu diapazonā un iespēja pārraidīt fokusētus optisko vai radiosignālu starus padara UWB tehnoloģiju par pievilcīgu izvēli. Turklāt UWB signāli ļauj veikt ļoti precīzus signāla izplatīšanās laika (ToF) mērījumus un nodrošina precīzu lokalizāciju, kas ir ļoti pieprasīta īpašība.

Lai nodrošinātu īpaši augstu energoefektivitāti, pārraidītajiem impulsiem jābūt pēc iespējas īsākiem, un vienīgie ierobežojumi ir sakaru kanāla pieejamais joslas platums un raiduztvērēja iespējas. Radiosakaros joslas platumu nosaka radiofrekvenču (RF) daļa un antena. Mūsdienās radiosakaru kanāla joslas platums var sasniegt simtiem GHz. Tādēļ teorētiski var izmantot impulsus, kuru ilgums ir dažas pikosekundes. Optiskās pārraides gadījumā impulsu ilgums var būt mazāks par 1 ps.

Impulsu pozīcijas modulācija (PPM) ir UWB tehnoloģija, kurā informācija tiek kodēta signalizācijas impulsu absolūtajos vai relatīvajos laika momentos [9–12], ļaujot datu pārraidei izmantot ultraīsus impulsus un palielinot energoefektivitāti [13]. Tā kā PPM gadījumā impulsa ilgums nenes informāciju, pārraidītā signāla vidējā jauda un signāla un trokšņa attiecība (SNR)

tieši neietekmē bitu kļūdu īpatsvaru (BER). Tā vietā sakaru sistēmas veiktspējas noteikšanā būtiska nozīme ir signalizācijas impulsu momentānajai jaudai. Saīsinot signalizācijas impulsus, ir iespējams samazināt vidējo jaudu un SNR, būtiski neietekmējot BER [14]. Alternatīvi ir iespējams samazināt BER, saīsinot signalizācijas impulsus un palielinot momentāno jaudu. Abos gadījumos ieguvumi tiek panākti uz aizņemtā frekvenču spektra rēķina, tādēļ šeit nav pretrunas ar labi zināmo Šenona kanāla caurlaides spējas formulu.

PPM sniedz būtisku enerģijas ietaupījumu uz spektra aizņemtības rēķina, kas piedāvāto modulācijas paņēmienu padara īpaši saistošu lietotājiem ar ierobežotiem enerģijas resursiem un lieliem signāla jaudas zudumiem sakaru kanālā, piemēram, tālā kosmosa sakaros, zemes un zemūdens optiskajos bezvadu sensoru tīklos un citur. Tas varētu būt nozīmīgi arī citiem lietotājiem, jo piedāvātās modulācijas metodes izmantošana var samazināt kopējo enerģijas patēriņu [15, 16].

Lai gan PPM sākotnēji tika izmantota analogajās zemfrekvences radio un mikroviļņu sistēmās [17], vēlāk tā tika izmantota arī ciparu sakaros [18–20] un mikroviļņu lietojumos. Optisko frekvenču diapazonā PPM izmanto brīvās telpas optiskajos sakaros un vadu sakaros [21–23]. Turklāt PPM joprojām izmanto pusanalogās radiovadības sistēmās [24].

Pārskats par PPM priekšrocībām, trūkumiem un lietojumiem ir sniegts [25]. Galvenā PPM priekšrocība ir tā, ka tā nodrošina augstāku energoefektivitāti nekā citi modulācijas paņēmieni un ir noturīga pret nelineāriem kropļojumiem [26–28]. Kā norādīts [17, 29, 30], šīs īpašības veido stabilu pamatu PPM turpmākai izmantošanai. PPM tehnikas attīstības rezultātā ir radušies jauni hibrīdi modulācijas veidi, piemēram, vairāku impulsu pozīcijas modulācija [31], kurā simbolu veido vairāki impulsi. Jāatzīmē, ka PPM var kombinēt ar impulsu amplitūdas modulācijas (PAM) un impulsu platuma modulācijas (PWM) tehnikām, lai palielinātu pārraides spektrālo efektivitāti.

PPM izmanto arī kosmiskajos sakaros [32–37], un pētījumā [34] ir aprakstīta PPM modema realizācija, kas tālā kosmosa sakaru eksperimentā spēj izmantot tikai 0,5 ns platu laika intervālu.

UWB modulācijas shēmas [38, 39] izmanto arī optisko sakaru sistēmās ar analogo radio caur šķiedru (ARoF) [40–42] un brīvās telpas optisko (FSO) sakaru fizikālajiem slāņiem, ļaujot sasniegt konkurētspējīgus bitu pārraides ātrumus [43, 44], kas ir piemēroti kosmiskajiem sakariem, lietu interneta (IoT) lietojumiem un zemūdens optiskajiem sakariem [45]. Šādās sakaru sistēmās plaši izmanto PPM tehniku [46–48].

Nozīmīgākie izaicinājumi pārejā uz optiskajiem sakariem ir augstas tēmēšanas precizitātes nodrošināšana un atmosfēras turbulences ietekmes mazināšana [49, 50]. Jaunākie optiskie ISAC risinājumi kosmosa un zemes lietojumiem ir aplūkoti darbā [51]. PPM izmantošana optisko sakaru sistēmās ir īpaši pievilcīga, jo optiskās sistēmas dabiski darbojas lielā frekvenču joslas platumā un optiskajām šķiedrām parasti ir ļoti mazs signāla vājinājums. Vienlaikus tradicionālās ieslēgšanas un izslēgšanas manipulācijas (OOK) metodes nodrošina efektīvāku optiskās jaudas izmantošanu un mazāku jutību pret nelineāriem kropļojumiem.

ISAC sistēmas paver plašas perspektīvas saistībā ar 6G tīklu ieviešanu [52, 53]. Tiek progno-

zēts, ka šie tīkli neaprobežosies tikai ar sakaru nodrošināšanu, bet izmantos esošo infrastruktūru jauniem lietojumiem, piemēram, transportlīdzekļu sakariem ar visu (V2X) [54, 55], IoT [56] un novērošanai ar bezpilota lidaparātiem (UAV) [57]. ISAC ir sevi pierādījusi kā vērtīgu metodi IR-UWB sistēmu energoefektivitātes un spektrālās efektivitātes uzlabošanai, un to izmanto attāluma un Doplera nobīdes noteikšanai, kā arī datu pārraidei [58–60].

PPM ir arī viens no modulācijas formātiem, ko izmanto ISAC lietojumos, piemēram, vienlaicīgiem sakariem un LiDAR mērījumiem [61, 62] vai radaru mērījumiem, kuru pamatā ir čirksta secības [63]. Tā galvenās priekšrocības ir augsta energoefektivitāte un noturība [64]. Pētījums [65] parāda energoefektivitātes uzlabojumu par 45,2 % salīdzinājumā ar OOK.

Vēl viens PPM lietojums ir integrētajos radaru un sakaru risinājumos [63], kas tiek pētīti šajā promocijas darbā. Šī PPM sakaru sistēma ar radara funkcionalitāti var darboties kā ISAC sistēma, kurā PPM raiduztvērēja uztverošās antenas bloks darbojas kā radara uztvērējs. Šādā realizācijā pārraidīto signālu var lokāli izmantot uztvertās signāla formas simbolu sinhronizācijai. Atkarībā no uztvertajiem atstarojumiem un citu raidītāju impulsiem var izmērīt objektu un uztvērēju attālumus un ātrumus.

Mērķis, uzdevumi un aizstāvāmās tēzes

Promocijas darba mērķis

Projektēt un eksperimentāli validēt PPM balstītu integrētu radara un sakaru sistēmu ar ISAC funkcionalitāti, izmantojot ARoF tehnoloģiju, īpaši izstrādātu PPM modulatoru un komerciālu notikumu laikatzīmētāju kā demodulatoru. Sistēma kalpotu par eksperimentālu platformu turpmākiem UWB sensoru, kā arī kosmisko sakaru pētījumiem.

Definētie uzdevumi mērķa sasniegšanai

- Analizēt un izpētīt dažādu PPM modulācijas shēmu priekšrocības un trūkumus.
- Izpētīt un novērtēt satelītu lāzerlokācijai paredzēta notikumu laikatzīmētāja izmantošanu par demodulatoru PPM sistēmās.
- Projektēt, izstrādāt un eksperimentāli validēt ciparu aiztures līnijā balstītu PPM modulatoru.
- Izpētīt kļūdu labošanas metodes PPM sistēmās.
- Izpētīt elektriskos un optiskos impulsu paplašināšanas paņēmienus sistēmās, kurās par demodulatoru izmanto notikumu taimeri.
- Projektēt, izstrādāt un testēt optiskajā šķiedrā balstītu PPM sakaru sistēmu.
- Izstrādāt un validēt PPM balstītas integrētās sensorikas un sakaru koncepciju radaru sistēmā.
- Izpētīt PPM signālu pārraidi, izmantojot radio caur šķiedru tehnoloģiju.
- Izpētīt un novērtēt dažāda garuma optisko šķiedru ietekmi uz PPM datu pārraides un sensorikas sistēmām.

Aizstāvāmās tēzes

1. Ar programmējamu aiztures elementu un multipleksoru balstītu DDL IC tehnoloģiju īstenots PPM modulators spēj ģenerēt PPM impulsu secību ar RMS laika džiteru, kas ir mazāks par 10 ps.
2. Laikatzīmētājā balstītās PPM sistēmās impulsu ar platumu 50–100 ps var pasīvi paplašināt ar elektriskiem un optiskiem līdzekļiem līdz vairāk nekā divkāršam tā sākotnējam FWHM ilgumam, vienlaikus pietiekami saglabājot impulsa formu stabilai detektēšanai.
3. Optiskās PPM balstītās ISAC sistēmās, izmantojot augstas kārtas PPM un SLR lietojumiem paredzētu laikatzīmētāju kā uztvērēju, var sasniegt BER, kas ir mazāks par 1×10^{-6}, un vienlaikus nodrošināt attāluma noteikšanas precizitāti, kas ir labāka par 5 cm vismaz 4 m attālumā, optiskās pārraides attālumam pārsniedzot 40 km.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Promocijas darba galvenie zinātniskie ieguldījumi

1. Eksperimentāli demonstrēta ciparu aiztures līniju integrālo shēmu izmantošanas koncepcija augstas kārtas augstas precizitātes PPM impulsu secību ģenerēšanai.
2. Eksperimentāli pierādīta augstas precizitātes laikatzīmētāja, kas paredzēts satelītu lāzerlokācijas lietojumiem, izmantošanas koncepcija augstas kārtas PPM signālu demodulēšanai.
3. Eksperimentāli pierādītas elektriskās un optiskās impulsu paplašināšanas metodes izmantošanai PPM sakaru sistēmās.
4. Pirmo reizi eksperimentāli demonstrēta apvienota radiolokācijas sensorika un sakari, izmantojot PPM sistēmu ar analogo radio pār šķiedru tehnoloģiju un gariem optiskās šķiedras posmiem.

Promocijas darba galvenie rezultāti izmantoti trijos zinātniskajos projektos

1. Eiropas Savienības Atveseļošanās un noturības mehānisma projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 akadēmiskās karjeras doktorantūras grants (ID 1008).
2. Latvijas Zinātnes padomes projekts Nr. lzp-2021/1-0475, “Pikosekunžu izšķirtspējas impulsa pozīcijas modulācija nepieredzēti augstas energoefektivitātes komunikācijām”.
3. Eiropas Savienības Kohēzijas politikas fonda projekta Nr. 1.1.1.8/1/24/I/007 akadēmiskās karjeras doktorantūras grants (ID 8110).

Aprobācija un publikācijas

Šajā promocijas darbā izklāstītie galvenie rezultāti ir publicēti trijos recenzētos starptautiskos žurnālos, kas pēc citējamības indeksa ierindojas augstākajā 25 % kvartilē (Q1), kā arī četros recenzētu starptautisku konferenču rakstu krājumos.

Rezultātu izplatīšana starptautiskajās konferencēs

1. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 14.–18. novembris, 2022, Harkiva, Ukraina.
2. 2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 27.–29. aprīlis, 2023, Viļņa, Lietuva.
3. 2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), 3.–6. jūnijs, 2024, Antverpene, Beļģija.
4. 2024 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS), 9.–11. jūlijs, 2024, Telaviva, Izraēla.

Publikācijas konferenču rakstu krājumos

[66] Migla, S., Selis, O., Sics, P. E., Pudzs, M., Zeltins, M. un Aboltins, A. „A Design of UWB Communication Testbed with Event Timer-based PPM Demodulator". *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. 2022, 691.–694. lpp. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037100

[67] Selis, O., Migla, S., Sics, P. E., Zeltins, M., Spolitis, S. un Aboltins, A. „Demonstration of 50 ps Per-Position Differential Pulse Position Modulation Data Transmission". *2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*. 2023, 1.–4. lpp. DOI: 10.1109/AIEEE58915.2023.10134802

[68] Sics, P. E., Tihomorskis, N., Migla, S., Ratners, J., Kurtenoks, V. un Aboltins, A. „Implementation of Reconfigurable 149Mbps TDC-Based PPM Transceiver". *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. 2024, 706.–710. lpp. DOI: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597124

[69] Migla, S., Selis, O., Sics, P. E. un Aboltins, A. „Error Analysis and Correction Techniques for PPM Communication Links with Jitter and Clock Drift". *2024 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS)*. 2024, 1.–4. lpp. DOI: 10.1109/COMCAS58210.2024.10666259

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

[70] Aboltins, A., Solovjova, T., Semenako, J., Kusnins, R., Migla, S., Sics, P. E., Selis, O., Tihomorskis, N., Prigunovs, D., Ostrovskis, A. un Spolitis, S. „Passive Electrical and Optical Methods of Ultra-Short Pulse Expansion for Event Timer-Based TDC in PPM Receiver". *Electronics* 12.22 (2023). DOI: 10.3390/electronics12224634

[71] Migla, S., Rubuls, K., Tihomorskis, N., Salgals, T., Ozolins, O., Bobrovs, V., Spolitis, S. un Aboltins, A. „Ultra-Wideband Analog Radio-over-Fiber Communication System Employing Pulse-Position Modulation". *Applied Sciences* 15.8 (2025). DOI: 10.3390/app15084222

[72] Migla, S., Tihomorskis, N., Rubuls, K., Cirjulina, D., Murans, I., Kurtenoks, V., Braunfelds, J., Spolitis, S., Ozolins, O., Vovchuk, D., Salgals, T., Ginzburg, P., Bobrovs, V. un Aboltins, A. „Demonstration of Integrated Sensing and Communications in an ARoF-Based Radar System Utilizing Pulse Position Modulation". *IEEE Access* 14 (2026), 76251.–76264. lpp. DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3693952

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs ir veidots kā tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopsavilkums. Katra nodaļa ir veltīta attiecīgajai aizstāvamajai tēzei.

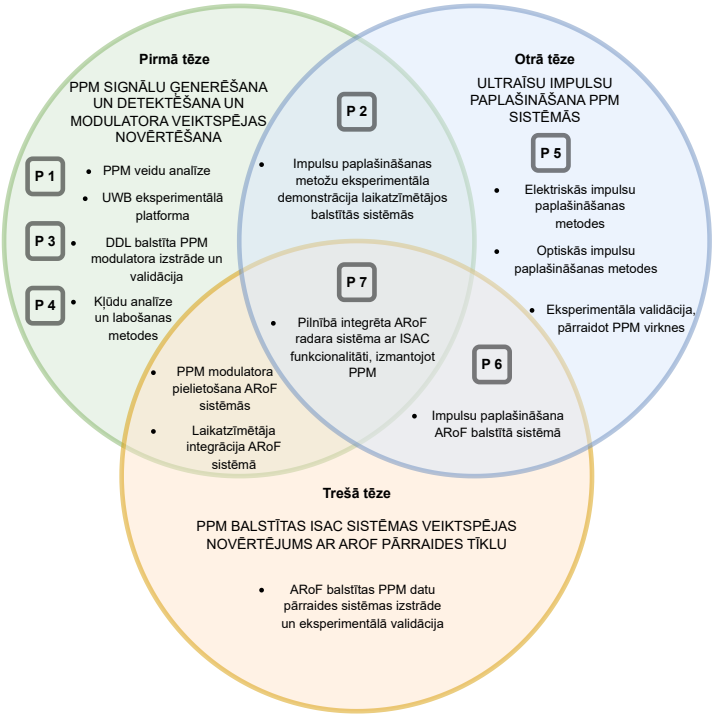
1. nodaļā ir aprakstīti izmantotie PPM veidi un detektēšanas paņēmieni. Tajā ir prezentēts *Digital Discovery* balstīts eksperimentālais stends, kas kalpo par šā pētījuma pirmo atskaites punktu. Šajā nodaļā ir ieviesta koncepcija, kurā komerciāls laikatzīmētājs (pazīstams arī kā notikumu taimeris), kas paredzēts SLR lietojumiem, tiek izmantots kā PPM demodulators. Nodaļā galvenā uzmanība ir pievērsta digitālās aiztures līnijas integrālajā shēmā balstīta PPM modulatora izstrādei un veiktspējas novērtēšanai. Nodaļas noslēgumā ir aplūkotas sistemātisko kļūdu un džitera mazināšanas metodes PPM sakaru sistēmās.

2. nodaļa ir veltīta elektriskajām un optiskajām impulsu paplašināšanas metodēm PPM sakaru sistēmās. Tajā ir prezentēti individuāli izstrādāti, filtros un FBG balstīti optisko impulsu paplašināšanas eksperimentālie stendi. Nodaļas noslēgumā ir sniegts abu metožu eksperimentāls novērtējums optiskajā šķiedrā balstītā PPM sakaru sistēmā, pārraidot PRBS.

3. nodaļā ARoF ir ievesta kā piemērota metode ar RF modulētu PPM signālu pārraidīšanai lielos attālumos. Tajā ir prezentēts acrshortARoF balstītas sakaru sistēmas eksperimentālais stends, kurā izmantota PPM. Nodaļas noslēgumā ir sniegta eksperimentāla ISAC demonstrācija, izmantojot PPM ARoF balstītā radaru sistēmā, kā arī prezentēti BER mērījumi un attāluma noteikšanas precizitātes mērījumi.

Promocijas darba noslēgumā ir apkopoti minētajās nodaļās izklāstītie galvenie rezultāti un secinājumi par katru pierādāmo tēzi, kā arī apspriestas UWB balstītu ISAC pētījumu turpmākās perspektīvas.

Šajā promocijas darbā iekļauto publikāciju pārskats un to saistība ar nodaļām un pētījuma mērķiem ir parādīta 1. attēlā.



1. att. Promocijas darba struktūras diagramma, kurā „P" apzīmē promocijas darbā iekļautās publikācijas.

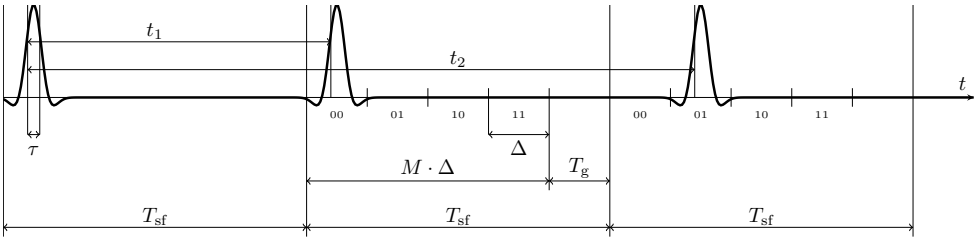
1. PPM SIGNĀLU ĢENERĒŠANA UN DETEKTĒŠANA UN MODULATORA VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA

1.1. Impulsu pozīcijas modulācijas veidi

Pastāv daudzi impulsu pozīcijas modulācijas (PPM) veidi, piemēram, koherentā PPM, diferenciālā PPM, pārraidītās references impulsu pozīcijas modulācija (TR-PPM) [73, 74], mainīgā PPM [75], pārklājošā PPM un citi [76]. Promocijas darbā turpmākajās sadaļās galvenā uzmanība ir pievērsta koherentajai PPM, TR-PPM un diferenciālajai PPM.

Koherentā PPM

Šajā apakšsadaļā aplūkota koherentā PPM saskaņā ar Kosmosa datu sistēmu konsultatīvās komitejas (CCSDS) ieteikto standartu 142.0-B-1 "Optisko sakaru kodēšana un sinhronizācija" [77]. Signāla struktūras piemērs ir parādīts 1.1. attēlā.



1.1. att. Koherentā PPM signāla struktūras piemērs.

Koherentajā PPM impulsu secība, ko sauc par PPM pārraides kadru, sastāv no sākuma impulsa, attiecībā pret kuru tiek aprēķinātas visas laika atzīmes, un N PPM apakškadriem, kas satur datu impulsus. PPM simbolā, kas ir apakškadra daļa, impulss var atrasties vienā no M laika intervāliem, kuru ilgums ir Δ. Laika intervālu skaitu M nosaka vienā PPM simbolā kodēto bitu skaits: $M = 2^b$, kur b ir bitu skaits simbolā. Kopējais simbola ilgums ir $M \cdot \Delta$. Kopā ar aizsargintervāla ilgumu T_g simbols veido apakškadru, kura ilgums ir [64]:

$$T_{sf} = M \cdot \Delta + T_g \,, \tag{1.1.}$$

kur T_{sf} ir apakškadra ilgums, M ir modulācijas kārta, Δ ir laika intervāla ilgums un T_g ir aizsargintervāla ilgums.

Aizsargintervāls kompensē aparatūrai raksturīgo neaktīvo laiku, kas ietver signāla izplatīšanās aiztures un signāla apstrādei nepieciešamo laiku, kā aplūkots 1.2. nodaļā. Aizsargintervāls tiek pievienots apakškadra beigās, kā noteikts [77], lai saglabātu skaidru apakškadra sākumu pozīcijā "0". Jāatzīmē, ka uz impulsu pozīcijas modulācija (PPM) balstītās integrētā jušana un komunikācija (ISAC) sistēmās aizsargintervāls nav paredzēts atstarotā atbalss signāla pārklāšanās novēršanai, jo saņemtā signāla relatīvā laika skala tiek aprēķināta attiecībā pret tā sākuma

impulsu. Tomēr, ja tiek ņemta vērā daudzceļu izplatīšanās, šis aspekts kļūst nozīmīgs, jo aizkavēta impulsa kopija var parādīties nākamajā apakškadrā, izraisot bitu kļūdas un nepareizu attāluma aprēķinu.

Katra secības impulsa laika atzīmes [77] attiecībā pret PPM pārraides kadra sākuma impulsu var aprēķināt šādi:

$$t_{\mathrm{k}} = k \cdot T_{\mathrm{sf}} + K \cdot \Delta \,, \tag{1.2.}$$

kur t_{k} ir laika atzīme ar indeksu k (no 1 līdz N), bet K ir apakškadrā kodēto datu decimālā vērtība (no 0 līdz $M-1$).

Šim modulācijas formātam maksimālo sasniedzamo nepārtrauktās datu pārraides ātrumu var aprēķināt, izmantojot vienādojumu (1.3.):

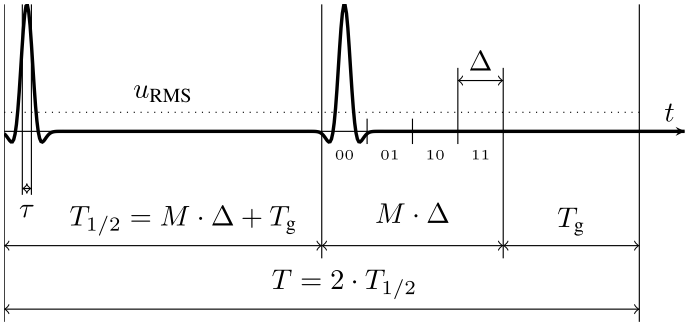
$$R_{\mathrm{b}} = \frac{N \cdot \log_2 M}{(N+1) \cdot T_{\mathrm{sf}} + T_{\mathrm{break}}} \,, \tag{1.3.}$$

kur R_{b} ir bitu pārraides ātrums, M ir modulācijas kārta, N ir simbolu skaits PPM pārraides kadrā un T_{break} ir laiks starp secīgiem PPM pārraides kadriem.

Īpaši izstrādāts PPM modulators, kurā izmantota šī metode, ir aprakstīts 1.5. nodaļā, savukārt pilnīga sistēma ar integrētās jušanas un komunikācijas (ISAC) funkcionalitāti ir aprakstīta 3.2. nodaļā.

Pārraidītās atsauces PPM

Šajā apakšsadaļā aplūkota TR-PPM, kurā izmanto to pašu iepriekš aprakstīto pamatprincipu, taču katra kadra sākumā papildus iekļauj atsauces impulsu, kas palīdz aprēķināt uztverto simbolu vērtības. Pirmais laika intervāls sākas $\mathrm{M} \cdot \Delta + T_{\mathrm{g}}$ sekundes pēc atsauces impulsa. TR-PPM kadra piemērs ir parādīts 1.2. attēlā.

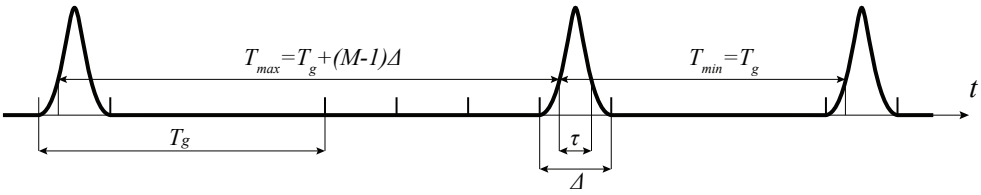


1.2. att. TR-PPM signāla struktūras piemērs.

Galvenā TR-PPM priekšrocība ir tās stabilitāte, īpaši pārraidē lielos attālumos, jo laika mērījums tiek veikts starp katru secības atsauces impulsa un datu impulsa pāri. Tomēr tas samazina efektivitāti, jo tāda paša datu apjoma kodēšanai ir nepieciešams divreiz vairāk impulsu.

Diferenciālā PPM

Šajā apakšsadaļā galvenā uzmanība ir pievērsta diferenciālajai impulsu pozīcijas modulācijai (DPPM), kas ir viens no efektīvākajiem un vienkāršākajiem PPM modulācijas veidiem. Tā nodrošina lielāku kanāla caurlaides spēju nekā modulācijas veidi ar fiksēta garuma simboliem [14]. Izmantojot DPPM, katrā simbolā vienā no laika intervāliem var pārraidīt datu impulsu. Atšķirība starp abiem impulsu pozīcijas modulācijas paņēmieniem ir tāda, ka koherentā PPM un TR-PPM pārraida fiksēta garuma simbolus, savukārt DPPM saīsina simbola daļu, kas atrodas aiz impulsa. DPPM signāla struktūras piemērs ir parādīts 1.3. attēlā.



1.3. att. DPPM signāla struktūras piemērs. ©2023 IEEE

DPPM vidējo datu pārraides ātrumu var aprēķināt, ņemot vērā, ka tiek izmantotas M pozīcijas. Aizsargintervāls būtiski palielina laiku starp impulsiem, īpaši tad, ja laika intervāls Δ ir ievērojami īsāks par T_g. DPPM signāla datu pārraides ātrumu, ja tam tiek piemērots aizsargintervāls T_g, var aprēķināt, izmantojot formulu (1.4.):

$$R_{\text{b,guard}} = \frac{2log_2 M}{2T_g + \Delta(M-1)}. \tag{1.4.}$$

Ar katru impulsu pārraidīto datu bitu skaitu nosaka modulācijas shēmā izmantoto laika intervālu skaits. Piemēram, ja impulss ir kodēts ar N bitiem, pastāv $M = 2^N$ iespējamie laika intervāli, kuros impulsu var novietot simbola robežās.

1.2. PPM signālu detektēšanas metodes

Ir piedāvātas vairākas PPM signālu demodulācijas metodes [17, 23, 30, 63, 78, 79]. Korelācijas uztvērēji ir viena no visbiežāk izmantotajām ultra platjoslas (UWB) radiofrekvenču (RF) signālu demodulācijas pieejām [80–84], un tā ir īpaši piemērota nekoherentās TR-PPM gadījumā [80, 84–86]. Ir izstrādātas arī sarežģītākas pieejas, tostarp iteratīvas demodulācijas metodes [87] un pat metodes, kas balstītas haotiskajā sinhronizācijā [88]. PPM signālu demodulācijai, izmantojot zema ātruma analogciparu pārveidotāju (ADC), var lietot tādas progresīvas metodes kā kompresējošās izguves (CS) teorija [89].

Viens no elegantākajiem veidiem, kā realizēt augsti efektīvu PPM demodulatoru, ir izmantot laika-ciparu pārveidotāju (TDC) [14, 90, 91]. TDC izmanto notikumu taimeros, kas pazīstami arī kā laikatzīmētāji un ko plaši izmanto laika mērīšanas lietojumos, kuros precīziem laika un

līdz ar to arī attāluma mērījumiem ir izšķiroša nozīme, īpaši signāla izplatīšanās laika (ToF) mērījumos [92–97].

Šajā promocijas darbā ir izmantoti divi laikatzīmētāji (notikumu taimeri): *Eventech* A033-ET un *Eventech* straumes laikatzīmētājs (ESTT) 7 *Series*. A033-ET spēj detektēt notikumus ar viena mērījuma vidējās kvadrātiskās vērtības (RMS) izšķirtspēju, kas ir labāka par 5 ps, vienlaikus nodrošinot augstu mērījumu ātrumu līdz 20 miljoniem notikumu paketē un 50 ns neaktīvo laiku. Ienākošie notikumi tiek reģistrēti zemsprieguma tranzistoru loģikas (LVTTL) signāla augošajā frontē. Šo taimeri var izmantot augstas kārtas ciparu PPM signālu demodulācijai. Pirmais mēģinājums izmantot šo taimeri PPM vajadzībām tika veikts 2015. gadā [98].

ESTT ir divas ieejas, tādējādi nodrošinot iespēju veikt ToF un attāluma aprēķinus ISAC vajadzībām. Notikuma ierosināšanai izmanto programmatiski iestatītu sprieguma sliekšņvērtību diapazonā no -2 V līdz 3 V ar 1,2 mV soli. Abām ieejām var iestatīt atšķirīgas sliekšņvērtības, tādējādi ļaujot izmantot signālus ar atšķirīgām amplitūdām. ESTT viena mērījuma RMS precizitāte ir 1,5 ps, un tā neaktīvais laiks ir 40 ns. Tas bija galvenais ierobežojošais faktors, izvēloties PPM parametrus, īpaši apakškadra ilgumu T_{sf}. Tā kā ESTT nostrādā impulsa augošajā frontē, ir būtiski nodrošināt pēc iespējas īsāku frontes kāpuma laiku. Impulsa ilgumam nav izšķirošas nozīmes, ja vien tas pārsniedz minimālo nepieciešamo ilgumu 150 ps.

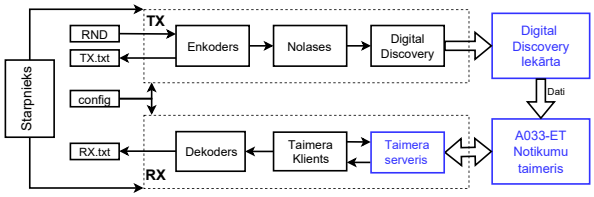
Aplūkotajos darbos PPM demodulācija un attāluma datu apstrāde tika veikta reāllaikā personālajā datorā (PC), izmantojot īpaši izstrādātu programmatūru. Abu kanālu laika atzīmes tika saglabātas PC kā atsevišķi faili, nodrošinot iespēju tās vēlāk apstrādāt un veikt attāluma novērtēšanu. Programmatūra ļāva saglabāt arī uztvertos datus bitu kļūdu īpatsvara (BER) aprēķināšanai.

1.3. *Digital Discovery* balstīta eksperimentālā platforma

Šajā sadaļā ir aprakstīta pirmā izstrādātā programmatūras struktūra un eksperimentālā platforma PPM sakaru izpētei, izmantojot īsus elektriskos impulsus ar ilgumu no 20 līdz 40 ns un augstas precizitātes notikumu taimeri PPM demodulācijai.

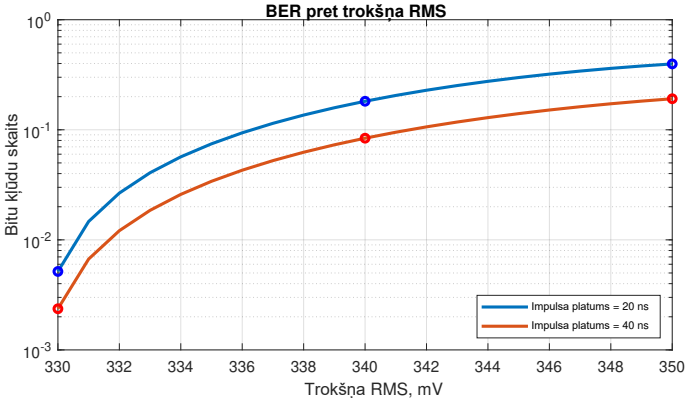
Eksperimenta aparatūru veido *Digital Discovery* ierīce ar papildu shēmām pie ciparu izejas kontaktiem, kas nodrošina pietiekamu signāla spriegumu, lai notikumu taimeris uztvertu ienākošo signālu, *Eventech* A033-ET notikumu taimeris un baltā Gausa trokšņa (WGN) avots. *Digital Discovery* signāls tiek summēts ar WGN ģeneratora signālu un padots notikumu taimera ieejā.

Python skripts nodrošina saziņu ar *Digital Discovery* ierīci, izmantojot *WaveForms* programmatūras izstrādes komplektu (SDK), un ar A033-ET notikumu taimeri, izmantojot TCP/IP ziņojumus. Programmatūras diagramma ir parādīta 1.4. attēlā.



1.4. att. Eksperimentālās platformas programmatūras slāņa diagramma. ©2022 IEEE

Eksperimentālās platformas pārbaude veikta, pārraidot pseidonejaušu bināro secību (PRBS), kas kodēta, izmantojot TR-PPM shēmu ar $\Delta = \tau$ un $M = 32$. Impulsa platumu un pozīcijas platumu ierobežo *Digital Discovery* diskretizācijas frekvence. Simbolu skaits paketē izvēlēts, ņemot vērā notikumu taimera ierobežojumus. Tas vienlaikus spēj detektēt 64 impulsus, tādēļ var pārraidīt ne vairāk kā 31 simbolu, ņemot vērā tukšo simbolu ar vienu impulsu un derīgās slodzes simbolus ar diviem impulsiem. Aizsarglaiks bija 40 ns. Aditīvais WGN tika regulēts manuāli ar 10 mV RMS soli. Eksperimentālie rezultāti ir parādīti 1.5. attēlā.



1.5. att. BER atkarība no trokšņa RMS impulsiem ar 20 ns un 40 ns ilgumu. ©2022 IEEE

Pirmās kļūdas parādās pie 330 mV RMS, un, palielinoties trokšņa intensitātei, to skaits turpina pieaugt. Izmantojot 40 ns impulsus, tiek iegūts mazāks bitu kļūdu īpatsvars nekā ar 20 ns impulsu secību. Izmantojot 20 ns impulsus, signāla RMS ir aptuveni 730 mV, savukārt ar 40 ns impulsiem tas ir 980 mV. Turklāt signāla viļņforma nav ideāla un tajā novērojamas svārstības.

Impulsu džiteris palielinās, samazinoties signāla un trokšņa attiecībai (SNR). Pie SNR = 13 dB džiteris ir 1,1 ns, bet pie SNR = 7 dB tas ir 2,6 ns. Galvenais BER pieauguma iemesls ir taimera aptuveni 1,2 V sliekšņspriegums, pie kura tas reaģē uz ienākošajiem impulsiem. Augošās frontes džiteris nepārsniedz 2.8 ns. Tādēļ aplūkotajā eksperimentālajā iekārtā džiteris neietekmē taimera lēmumus un nepalielina BER.

Aplūkotā eksperimentālā platforma bija nozīmīgs sākumpunkts PPM pētījumos, un **pilna publikācija ir pieejama [66] ©2022 IEEE.**

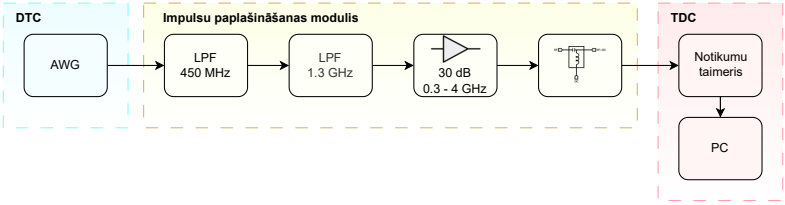
1.4. Diferenciālā PPM ar ultraīsu laika intervālu

Šajā sadaļā aplūkota DPPM modulācijas shēma un demonstrētas DPPM demodulācijas iespējas, izmantojot augstas precizitātes A033-ET notikumu taimeri, kā arī laboratorijas apstākļos demonstrēta datu pārraide ar augstas kārtas DPPM signālu.

DPPM signāla ģenerēšanai izmantots *Keysight* M8195A patvaļīgas signāla formas ģenerators (AWG) ar 25 GHz analogo joslas platumu un 65 GSa/s diskretizācijas frekvenci, kas ir būtisks uzlabojums salīdzinājumā ar iepriekšējā sadaļā aplūkoto *Digital Discovery* ierīci. AWG ļauj samazināt PPM ilgumu līdz 100 ps, būtiski palielinot pārraides kanāla energoefektivitāti. A033-ET notikumu taimeris tika izmantots kā PPM demodulators. Tā kā notikumu taimeris nespēj detektēt tik īsus impulsus, tika izmantots īpaši izstrādāts impulsu paplašināšanas modulis (PEXM), kurā norādītajā secībā ietilpst šāda aparatūra:

1) 6 dB RF vājinātājs, lai novērstu iespējamu atpakaļatstarošanos no īpaši izstrādāta zemfrekvenču filtra (LPF);
2) laboratorijā izgatavots īpaši izstrādāts LPF [99];
3) komerciāls VLFX-1300+ LPF;
4) 30 dB RF pastiprinātājs ar 30–4000 MHz joslas platumu;
5) platjoslas SHF BT45 līdzstrāvas nodalītājs ar 20 kHz līdz 45 GHz joslas platumu.

Pilna eksperimentālā iekārta, tostarp PEXM, ir parādīta 1.6. attēlā.



1.6. att. DPPM pārraides eksperimentālā shēma, ieskaitot PEXM. ©2023 IEEE

Izmantota 1.3. nodaļā aprakstītā programmatūras struktūra. Notikumu taimeris uztvēra signālu secību ar DPPM impulsiem noteiktos absolūtajos laika momentos, kas pazīstami arī kā laika atzīmes. No katras laika atzīmes tika atņemts aizsarglaiks T_g, un iegūtais laiks dalīts ar laika intervāla ilgumu Δ, iegūstot relatīvās laika atzīmes, kas pārveidotas impulsu pozīcijās. Visbeidzot pozīcijas pārveidotas atpakaļ binārajos datos.

Eksperimentālā validācija veikta, pārraidot PRBS ar 1.1. tabulā norādītajiem parametriem. Katrs eksperiments ietvēra vienu pārraidītu datu paketi ar 63 datu impulsiem. Lai nodrošinātu derīgu izejas signālu, pirms datu pārraides tika pārraidīta periodiska 100 ps impulsu secība. Katram eksperimentam atbilstošais fails tika atsevišķi ielādēts AWG. Vienlaikus notikumu taimeris tika konfigurēts notikumu mērīšanai. AWG ģenerētais impulss ar PEXM tika paplašināts līdz aptuveni 750 ps, kas ir optimāls un derīgs signāla platums notikumu detektēšanai.

1.1. tabulā ir apkopoti dekodēto DPPM testa signālu rezultāti, un katram testam ir aprēķināts BER. Testā netika konstatēta neviena bitu kļūda, ja laika intervāla ilgums bija $\Delta = 200$ ps. Pie 100 ps un 50 ps kļūdu īpatsvars būtiski palielinājās, sasniedzot attiecīgi $1{,}781 \cdot 10^{-2}$ un $7{,}935 \cdot 10^{-4}$.

1.1. tabula

DPPM pārraides eksperimentu parametri un rezultāti ©2023 IEEE

Testa nr.	τ, **ps**	Δ, **ps**	**M**	T_g, **ns**	**Bitu skaits**	**BER**
1	100	200	128	50	4410	0
2	100	100	256	50	5041	$7.935 \cdot 10^{-4}$
3	100	50	512	50	5670	$1.781 \cdot 10^{-2}$

Realizētā DPPM pārraides testa iekārta uzrādīja teicamus rezultātus, par ko liecina novērotais zemais bitu kļūdu īpatsvars. Neraugoties uz džiteri un sistemātisko laika kļūdu, testa sistēma spēja precīzi detektēt impulsus ar kļūdu, kas nepārsniedza vienu pozīciju.

Pilna publikācija ir pieejama [67] ©2023 IEEE.

1.5. Ciparu aiztures līnijā balstīts PPM modulators

Spējīgāka PPM ģenerēšanas līdzekļa izstrāde bija loģisks nākamais solis aplūkotajā pētījumā. Šajā sadaļā aprakstīta ciparu aiztures līnijas (DDL) tehnoloģijā balstītu īpaši izstrādātu PPM modulatoru projektēšana un validācija. Šiem modulatoriem ir priekšrocības salīdzinājumā ar PPM signālu ģenerēšanai plaši izmantotajiem programmējamo loģisko elementu masīviem (FPGA) [100] un citiem aparatūrā realizētiem impulsu ģeneratoriem [3], kurus ierobežo pieejamais PPM laika intervāla platums un precizitāte.

DPPM modulators

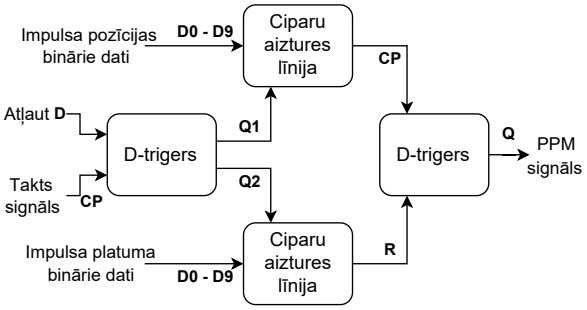
Šajā apakšsadaļā galvenā uzmanība ir pievērsta DPPM lietojumiem paredzēta modulatora projektēšanai, realizācijai un testēšanai. Piedāvātā modulatora novitāte ir DDL balstīta laika-ciparu pārveidotāja (DTC) izmantošana PPM signāla modulācijai. Šīs tehnoloģijas izmantošana ļauj integrēt programmvadāmā radio (SDR) koncepcijas [101, 102] UWB sistēmās, tādējādi nodrošinot iespēju vienkārši pārslēgties starp dažādiem PPM modulācijas formātiem un joslas platumiem.

PPM signālu ģenerēšanai ir izstrādāta īpaša iespiedplates (PCB), ko vada ar PC. Modulatora galvenās sastāvdaļas ir augstas precizitātes programmējamā MC100EP196B DDL, SI5394J-A fāzes sinhronizācijas kontūra (PLL) džitera vājinātājs un *Cyclone* IV FPGA sistēma uz mikroshēmas (SoC).

Altera Cyclone IV FPGA SoC vada modulatoru un izpilda tam dotās komandas. FPGA izvēlēts tā ātrdarbīgās ciparu loģikas iespēju dēļ. Tas interpretē komandas un darbojas kā saskarne starp PC un pārējo modulatora plati. Modulatora FPGA SoC daļas programmatūras arhitektūra ir realizēta kā *Nios* II virtuālais procesors ar īpaši izstrādātām VHDL valodā rakstītām ievades un izvades procedūrām.

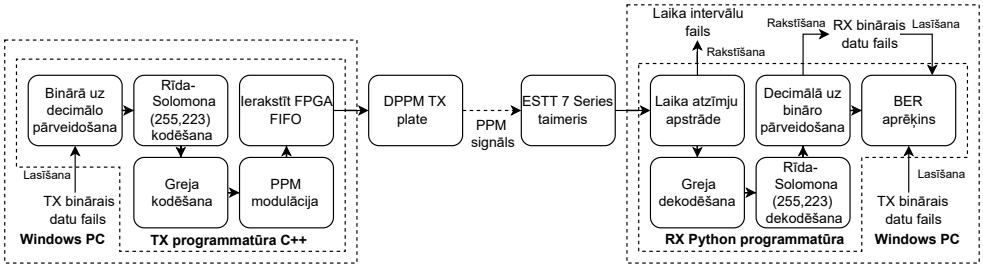
Augstas precizitātes programmējamās MC100EP196B DDL maksimālā laika izšķirtspēja ir 10 ps, bet programmējamais diapazons, izmantojot visas datu ieejas no D0 līdz D9, ir 10450 ps. Kopējais DTC aiztures diapazons ir no 2,2 ns līdz 12,4 ns, ieskaitot minimālo fiksēto aizturi.

Katram PPM simbolam impulss tiek ģenerēts, izmantojot 10 MHz atsauces takts signālu. To var aizturēt ar 10 ns soli, nodrošinot rupjo aizturi, un papildus aizturēt ar DDL, lai precīzi kontrolētu impulsa atrašanās vietu laikā, tādējādi nodrošinot precīzo aizturi.



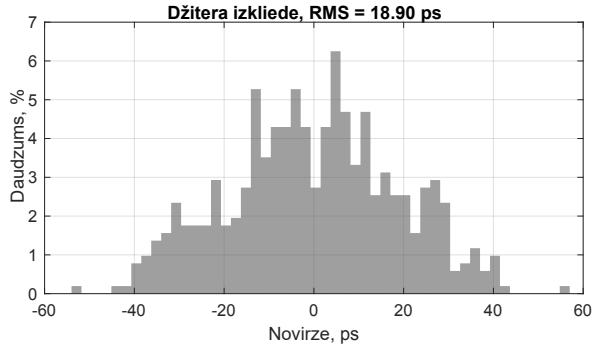
1.7. att. DDL balstīta modulatora realizācijas blokshēma. ©2024 IEEE

Modulatora testēšana veikta, tā izeju tieši savienojot ar ESTT 7 *Series* notikumu taimeri. Savienojuma scenārija un pilna programmatūras steka blokshēma ir parādīta 1.8. attēlā.



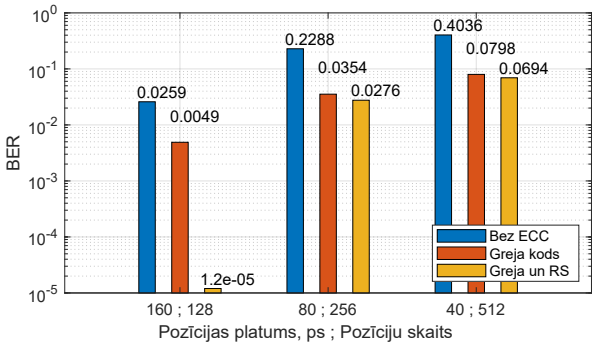
1.8. att. DPPM pārraides testa iekārtas blokshēma. ©2024 IEEE

1.9. attēlā parādītais džitera sadalījums tika iegūts, analizējot izmērīto impulsu pozīciju novirzes no paredzamajām pozīcijām. Iegūtā impulsu pozīciju novirzes RMS vērtība bija 18,9 ps. Tā kā džitera sadalījums ir tuvs normālsadalījumam, 99,7 % noviržu ietilpst 3σ diapazonā, proti, 56,7 ps.



1.9. att. Ar ESTT izmērītais modulatora džitera sadalījums. ©2024 IEEE

Datu pārraides testiem izmantota vienu miljonu bitu gara PRBS, kas kodēta, izmantojot DPPM, ar $t_g = 50$ ns un $\tau = 150$ ps. Izpētīta dažādu laika intervāla ilgumu un pozīciju skaita ietekme, izmantojot dažādus tiešās kļūdu labošanas (FEC) kodus, un katram gadījumam aprēķināts BER. Eksperimentālie rezultāti ir parādīti 1.10. attēlā.



1.10. att. DPPM pārraides testu eksperimentālie rezultāti. ©2024 IEEE

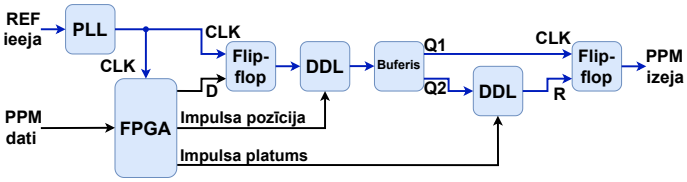
Rezultāti parāda, ka izstrādātais modulators nodrošina datu pārraidi reāllaikā un realizētie kļūdu labošanas algoritmi darbojas atbilstoši paredzētajam. Visbūtiskākais BER samazinājums tiek panākts, izmantojot Greja kodu, kura darbību vēl vairāk uzlabo Rīda-Solomona (RS) kļūdu labošanas algoritms. Apvienojot šīs kļūdu labošanas shēmas, pie 160 ps laika intervāla ilguma tiek sasniegts BER $1{,}2 \cdot 10^{-5}$. Pat tad, ja laika intervāla ilgums ir ārkārtīgi mazs, proti, 40 ps, izmantojot kļūdu labošanas kodus (ECC), BER var samazināt līdz 0,07. To var samazināt vēl vairāk, izmantojot sarežģītākus kodus, piemēram, zema blīvuma paritātes pārbaudes kodus (LDPC).

Ņemot vērā aizsarglaiku, aplūkotais modulators ar DPPM shēmu teorētiski var sasniegt datu pārraides ātrumu līdz 149 Mbit/s, izmantojot 512 pozīcijas un 40 ps laika intervāla ilgumu. Praksē izstrādātais raiduztvērēja prototips PC programmatūras ierobežojumu dēļ sasniedza aptuveni 10 Mbit/s lielu reāllaika pārraides ātrumu.

Pilna publikācija ir pieejama [68] ©2024 IEEE.

Koherentās PPM modulators

Šajā apakšsadaļā ir aprakstīta nākamās paaudzes uz DTC balstīta PPM modulatora konstrukcija, kurā izmantota tā pati galvenā sastāvdaļa, proti, DDL. DTC konceptuālā diagramma ir parādīta 1.11. attēlā. Ierīce atbilst CCSDS ieteiktajam standartam 141.0-B-1 "Optisko sakaru fizikālais slānis" [103].

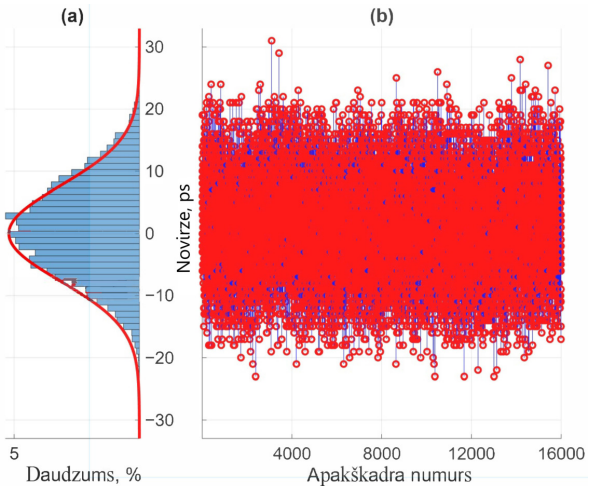


1.11. att. PPM modulatora konceptuālā blokshēma.

DTC pamatā ir programmējama MC100EP196B DDL ar programmējamu aiztures diapazonu 0 – 10,24 ns un 10 ps soli. Visā aiztures diapazonā tās linearitāte ir ±11 ps. DDL uzdevums ir aizturēt tās ieejā padoto impulsu par noteiktu laika intervālu, ko iestata ar 10 bitu ieejas kopni, tādējādi nodrošinot 1024 unikālas aiztures vērtības.

DTC vada *Altera Cyclone* IV FPGA, kas ar PC ir savienots, izmantojot USB 3.0 saskarni. Katrs pārraides kadra PPM simbols tiek saglabāts atsevišķā atmiņas adresē kā 24 bitu binārs skaitlis, kurā 10 biti nosaka impulsa aizturi no pašreizējā takts cikla sākuma, bet 14 biti nosaka takts ciklu skaitu līdz nākamajam secības impulsam. PPM pārraides kadra sākumā tiek ģenerēts sākuma impulss, no kura tiek skaitīti takts cikli. Šajā brīdī FPGA jau sagatavo un izvada arī nākamā secības impulsa 10 bitu aiztures vērtību. Kad FPGA ir saskaitījis noteikto takts ciklu skaitu, kas atmiņas adresē norādīts ar 14 bitiem, tas ģenerē vienu impulsu, kuru aiztur par DDL jau iestatīto vērtību. Pēc tam FPGA pāriet uz nākamo atmiņas adresi, kurā glabājas nākamā secības impulsa dati, un šo procesu atkārto līdz PPM pārraides kadra beigām.

Ierīce vienā reizē var pārraidīt 16000 simbolu garu PPM pārraides kadru, un laiks starp PPM pārraides kadriem ir aptuveni 20 ms. Tas ir programmatūras ierobežojums, ko iespējams turpmāk samazināt, būtiski palielinot nepārtrauktās datu pārraides ātrumu. Piemēram, ja $M = 16$ un $\Delta = 100$ ps, modulators var sasniegt 2 Gbit/s datu pārraides ātrumu, ja aizsargintervāla ilgums un pārtraukums starp kadriem tiek gandrīz pilnībā novērsti.



1.12. att. Izstrādātā modulatora džitera testēšanas rezultāti: (a) džitera sadalījums; (b) impulsu novirze no ideālajām pozīcijām.

Modulatora testēšana tika veikta, modulatoru ar koaksiālo kabeli tieši savienojot ar ESTT elektriskā tiešā savienojuma (B2B) konfigurācijā. Džitera sadalījums un impulsu pozīciju novirzes no paredzamajām vērtībām 16000 simbolu garā PPM pārraides kadrā ir parādītas 1.12. attēlā. Sarkanā līnija 1.12. (a) attēlā parāda džitera sadalījumu. Kā redzams, impulsu pozīciju džiteris ir sadalīts aptuveni atbilstoši normālsadalījumam, un tā RMS vērtība ir 7,65 ps.

Aplūkotais modulators ir izmantots pētījumā, kas publicēts [72].

1.6. Kļūdu analīze un labošanas metodes

FEC plaši izmanto uz PPM balstītās sakaru sistēmās, kurās pārraides kanāli ir trokšņaini un var būt neuzticami. Turklāt, tuvojoties kanāla datu pārraides kapacitātes robežai, uztvertās informācijas kļūdu skaitam ir tendence palielināties. FEC algoritms jāizvēlas atbilstoši lietojumam un sakaru modema skaitļošanas iespējām.

Šī sadaļa ir veltīta īpaši izstrādātu kļūdu labošanas algoritmu teorētiskai izpētei un simulācijai kopā ar FEC, lai uzlabotu TR-PPM pārraides savienojumus [104]. Šajā sadaļā pētīti galvenie PPM savienojuma kvalitātes pasliktināšanās iemesli un atbilstošās to ietekmes mazināšanas metodes. Īpaša uzmanība ir pievērsta FEC metodēm un to piemērotībai PPM sakaru savienojumiem. Ir izstrādāta teorētiska struktūra, kas apraksta džitera un sistemātisko kļūdu, piemēram, takts signāla dreifa, ietekmi uz PPM savienojuma veiktspēju. Izmantojot datorsimulāciju, tika noteikts Greja kodēšanas un RS kodēšanas ieguldījums BER samazināšanā TR-PPM sakaru savienojumā ar notikumu taimerī balstītu demodulatoru.

Teorētiskais pamatojums

Iekārtās, kurās izmanto PPM laika intervāla ilgumu, kas ir mazāks par 100 ps, ir sarežģīti saglabāt precizitāti dažādu apstākļu dēļ, kas var izraisīt pozīcijas kļūdas. Piemēram, temperatūra var ietekmēt iekšējās shēmas, kas ģenerē takts signālus, tādējādi radot pozīcijas kļūdas. Kļūdas var rasties arī tad, ja ģenerators nespēj nodrošināt precīzu takts frekvences dalītāju, izraisot nelielas impulsu laika nobīdes.

Šīs kļūdas var rasties arī tad, ja signālā tiek ieviests džiteris, kura dēļ uztvērējs nosaka impulsa pozīciju atšķirīgi no paredzētās. Iepriekšējie testi [105] un šā promocijas darba 1.5. nodaļa parādīja, ka džitera vērtības ir sadalītas aptuveni atbilstoši normālsadalījumam. PPM datu pārraides BER var noteikt, aprēķinot varbūtību, ka impulss parādīsies dažādās pozīcijās, izmantojot formulu (1.5.).

$$P(\sigma,\mu) = 1 - \int_{-\frac{1}{2}\Delta}^{\frac{1}{2}\Delta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}\, dx, \tag{1.5.}$$

kur x ir novirze no ideālās pozīcijas, μ ir takts signāla dreifa izraisītā sistemātiskā kļūda un σ ir džitera standartnovirze. Normālsadalījuma funkcijai 99,73 % gadījumu ietilpst $\pm 3\sigma$ intervālā. Ja džiteris ir ierobežots diapazonā $(-t_j/2, t_j/2)$, izmantojot 3σ likumu, standartnovirzi var noteikt kā $\sigma = t_j/6$, kur t_j ir džitera amplitūda.

Ja izmanto PPM signāla struktūru, kurā bitu skaits simbolā ir $N = 8$, un rodas pozīcijas kļūda, kuras laika nobīde nepārsniedz $\frac{3}{2}\Delta$, 8 bitu simbolā tiks konstatēta viena bita kļūda. Ja novirze x nepārsniedz vienu pozīciju un izraisa tikai viena bita kļūdu, BER B var aprēķināt, izmantojot formulu (1.6.):

$$B(\sigma,\mu) = \frac{P(\sigma,\mu)}{N} = \frac{1}{N} - \frac{1}{N}\int_{-\frac{1}{2}\Delta}^{\frac{1}{2}\Delta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} dx. \tag{1.6.}$$

Tā kā pozīcijas kļūdas varbūtība ir augsta, ja $t_j \geq \Delta$, ir jāizmanto piemēroti FEC kodi. Ja PPM impulss tiek detektēts citā pozīcijā, simbola binārais kods mainās atbilstoši jaunajai pozīcijai. Izmantojot Greja kodēšanu PPM pozīcijām, vienas pozīcijas nobīde izraisa viena bita kļūdu.

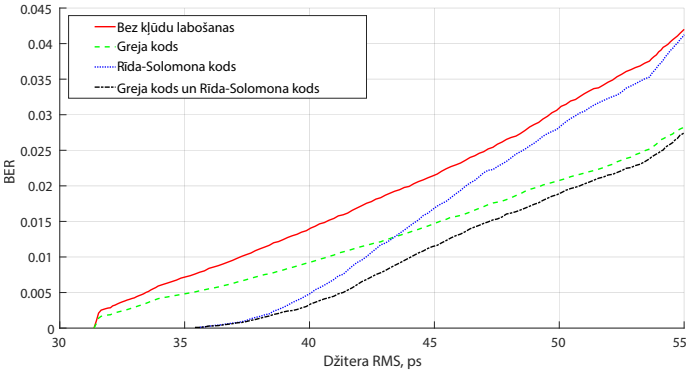
Kļūdu labošanas algoritmu validācija

Simulācija tika veikta MATLAB vidē, izmantojot eksperimentāli noteiktās džitera un takts signāla dreifa vērtības īpaši izstrādātajiem modulatoriem, kas aplūkoti 1.5. nodaļā. Aparatūras prototipos datu impulsu novirzes no paredzamajām pozīcijām bija sadalītas tuvu normālsadalījumam. Savukārt takts signāla dreifa radītās kļūdas viena PPM kadra laikā bija gandrīz nemainīgas. Tā kā PPM secības laikā takts signāla dreifs būtiski nepalielinās, to var modelēt kā nemainīgu nobīdi no paredzamajām datu impulsu pozīciju vērtībām.

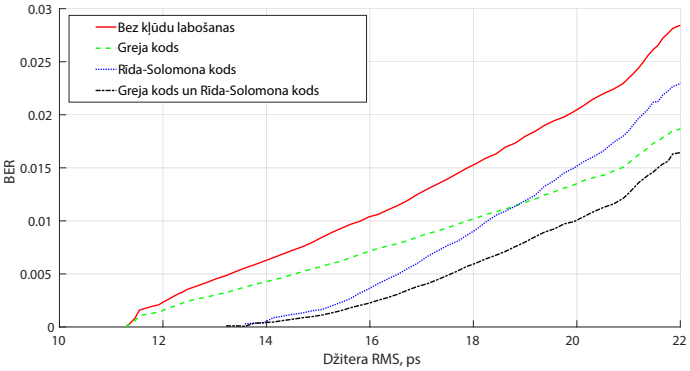
Simulācijā realizēts RS kļūdu labošanas algoritms. Izmantots RS(255, 223) kods, kurā bloks sastāv no 223 datu bitiem un kopumā satur 255 bitus. Simulētie RMS džitera diapazoni bija 10–22 ps un 30–55 ps. Pozīciju skaits visos eksperimentos bija 256, bet laika intervāla ilgums

bija 155 ps. Pārraidāmie dati tika ģenerēti kā 255 simbolu gara PRBS ar 8 bitiem simbolā un kopumā 1784 bitiem un kodēti, izmantojot RS(225, 223) kodu un, ja tas bija paredzēts konkrētajā eksperimentā, Greja kodu.

Notikumu taimeris simulēts, simulētajiem uztvertajiem datiem pievienojot 3 ps RMS džiteri. Eksperimentāli iegūtā BER atkarība no RMS džitera iepriekš minētajām kļūdu labošanas shēmām bez takts signāla dreifa kļūdas ir parādīta 1.13. attēlā, savukārt rezultāti ar pievienotu takts signāla dreifa kļūdu ir parādīti 1.14. attēlā.



1.13. att. Simulācijas rezultāti bez takts signāla dreifa kļūdas. ©2024 IEEE



1.14. att. Simulācijas rezultāti ar pievienotu takts signāla dreifa kļūdu. ©2024 IEEE

Rezultāti parāda, ka RS kļūdu labošanas shēma darbojas efektīvi līdz aptuveni 45 ps lielam RMS džiterim. Greja kods nodrošina visbūtiskāko BER samazinājumu, jo gadījumā, kad datu impulss ir nobīdīts par vērtību, kas ir vienāda ar viena laika intervāla ilgumu vai mazāka par to, PPM simbolā rodas tikai viena bita kļūda.

RS kodā balstīta FEC ļauj samazināt gan džitera, gan takts signāla dreifa izraisītās bitu kļūdas. Tomēr, pārsniedzot noteiktu robežu, RS kods vairs nespēj izlabot džitera izraisītās bitu kļūdas, jo RS(255,223) kods vienā blokā var izlabot 16 bitu kļūdas. Šā iemesla dēļ dati jākodē arī ar Greja kodu, jo tas uzlaboja BER visā RMS džitera diapazonā.

Pilna publikācija ir pieejama [69] ©2024 IEEE.

1.7. Pirmās tēzes kopsavilkums

Pirmā tēze bija veltīta tam, lai pierādītu, ka PPM modulators, kas realizēts, izmantojot programmējamu loģisko elementu un multipleksoru tehnoloģijā balstītas DDL integrālās shēmas (IC), spēj ģenerēt PPM impulsu secības ar RMS laika džiteri, kas ir mazāks par 10 ps. Lai sasniegtu šo mērķi, izstrādāta eksperimentālā platforma PPM datu pārraidē izmantoto koncepciju pētīšanai, kā arī testēti un validēti augstas precizitātes laikatzīmētāji izmantošanai PPM sistēmās. Pirmo reizi veikts datu pārraides eksperiments, izmantojot PPM un satelītu lāzerlokācijas (SLR) lietojumiem paredzētu laikatzīmētāju. Izstrādāti divi augstas precizitātes programmējamās MC100EP196B DDL balstīti modulatori un testēti, izmantojot ESTT. Pirmais modelis sasniedza 18,9 ps RMS džiteri, bet otrais modelis sasniedza 7,65 ps, tādējādi pierādot tēzi. Izstrādātais modulators vienā reizē var pārraidīt 16000 simbolu garu PPM pārraides kadru ar aptuveni 20 ms intervālu starp pārraides kadriem, izmantojot laika intervāla ilgumu līdz pat 10 ps un modulācijas kārtu, kas pārsniedz 256.

Datu pārraides eksperimentos, izmantojot Greja un RS kodu, sasniegts BER līdz pat 1.2×10^{-5}. Testēšanā konstatēts, ka džiteris ir sadalīti aptuveni atbilstoši normālsadalījumam. Noslēgumā tika analizētas sistemātiskās kļūdas un piedāvātas to labošanas metodes.

Pilnas publikācijas, kurās ietverti šajā nodaļā aplūkotie rezultāti, ir pieejamas [66], [67], [68], [69] un [72].

2. ULTRAĪSU IMPULSU PAPLAŠINĀŠANA PPM SISTĒMĀS

PPM signāla demodulācija, izmantojot ārkārtīgi īsus impulsus, ir sarežģīta, jo tai nepieciešamas ātrdarbīgas elektroniskās shēmas, piemēram, komparatori un trigeri ar desmitiem gigahercu lielu joslas platumu. Tā kā PPM impulsa platums nenes informāciju, šo problēmu var risināt, tieši pirms demodulācijas palielinot uztverto impulsu platumu. Tas, ka viens ienākošais paplašinātais impulss aizņem vairākas laika pozīcijas, nerada problēmas PPM demodulācijā, jo informāciju nes tikai impulsa augošā fronte. Tāpat nav stingras prasības maksimāli saglabāt ģenerētā impulsa formu, tam pārraides kanālā nonākot līdz uztvērēja blokam, ja vien impulsa formas izmaiņas starp impulsiem būtiski neatšķiras. Ir tikai jānodrošina, lai impulsa formas izmaiņas nebūtu tik lielas, ka tās traucētu pareizu demodulāciju.

Šajā nodaļā galvenā uzmanība ir pievērsta 50–100 ps īsu impulsu paplašināšanas metodēm, izmantojot pasīvas elektriskās un optiskās ierīces to turpmākai izmantošanai PPM demodulatoros. Demonstrēts, ka pasīvas metodes var sekmīgi izmantot liela joslas platuma impulsu paplašināšanai gan optiskajā, gan elektriskajā vidē. Pētīta elektrisko LPF un optisko metožu, proti, šķiedras Brega režģa (FBG), izmantošana impulsa ilguma palielināšanai.

2.1. Elektriskā impulsu paplašināšana

Daudzās modernās elektriskajās un optiskajās sistēmās, piemēram, UWB sakaru ierīcēs, signālu apstrādes shēmās, radaru sistēmās un citās sistēmās, tiek veikta īsu impulsu pārraide, mērīšana un apstrāde [106, 107]. Šajās darbībās bieži ir jāpaplašina vai jāsaspiež impulss, minimāli kropļojot tā viļņformu. Impulsu paplašināšanai plaši izmanto dažādas aiztures līnijas [108–112], citas ierīces, kas darbojas frekvenču apgabalā un to pārveido, piemēram, filtrus [113–123], kā arī aiztures līniju un filtru kombinācijas. Tiek izmantotas gan ciparu, gan analogās signālu apstrādes metodes, un katrai no tām ir savas priekšrocības un trūkumi.

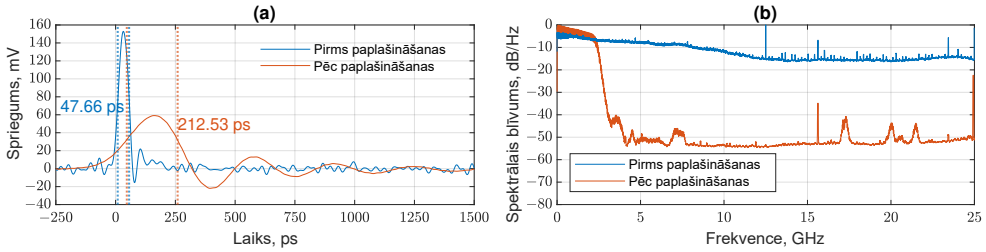
Viena no impulsu formas veidošanas iespējām ir tādu filtru izmantošana, kas ietekmē impulsa amplitūdas spektru. Šim nolūkam var izmantot pasīvos un aktīvos filtrus [124, 125]. Vienkāršāko aktīvo filtru pamatkomponenti ir tranzistoru un operacionālo pastiprinātāju shēmas [126], lai gan lielākajā daļā gadījumu šādi filtri mēdz būt sarežģītāki [127]. Aktīvie filtri nodrošina lielāku elastību, ļaujot pārkonfigurēt joslas platumu no šaurjoslas vai vidējas joslas stāvokļa līdz ultraplatjoslas stāvoklim, kā aprakstīts [128].

Lai nodrošinātu nepārprotamu notikumu taimera reakciju, minimālu iespējamo džiteri laika intervālu detektēšanā, kā arī stabilu notikumu taimera darbību un sākotnējā stāvokļa atjaunošanu, sākotnējais impulss ir jāpagarina līdz aptuveni 150 ps. Turklāt filtrētajam impulsam nedrīkst būt izteiktu pulsāciju vai garas astes, un tā augošajai frontei vēlams būt pēc iespējas stāvākai.

Analītiskie izvedumi un skaitliskā modelēšana [99] apstiprināja, ka no visiem filtru veidiem impulsu paplašināšanai vispiemērotākais ir Beseļa tipa filtrs, jo tam ir maksimāli plakana grupas aiztures un maksimāli lineāra fāzes raksturlīkne. Šīs īpašības nodrošina nenozīmīgas svārstības impulsa reakcijā [129] un samazina pārsviedienus paplašināto PPM impulsu pirmspārejas un

pēcpārejas kropļojumu apgabalos.

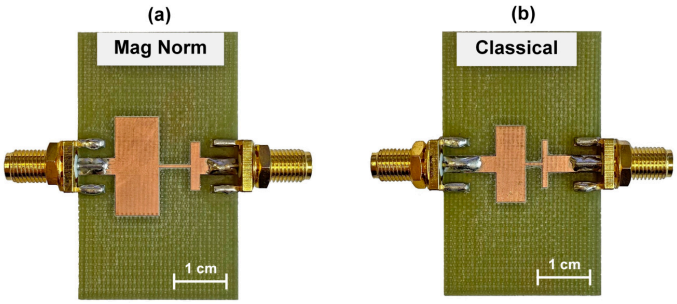
Veikti eksperimenti ar komerciāli pieejamiem LPF, lai noteiktu, vai impulsu paplašināšanai var izmantot gatavu komerciālu filtru. Impulsa paplašināšanas piemērs, izmantojot *Mini-Circuits* SLP-2400+ filtru [130], ir parādīts 2.1. attēlā. Komerciālais filtrs pēcpārejas apgabalā izraisīja izteiktas svārstības. Turklāt tas būtiski samazināja impulsa augošās frontes stāvumu, palielinot taimera jutību pret aditīvo troksni.



2.1. att. Ar *Mini-Circuits* SLP-2400 filtru paplašināts impulss: (a) impulsu viļņformas; (b) normētie amplitūdas spektri.

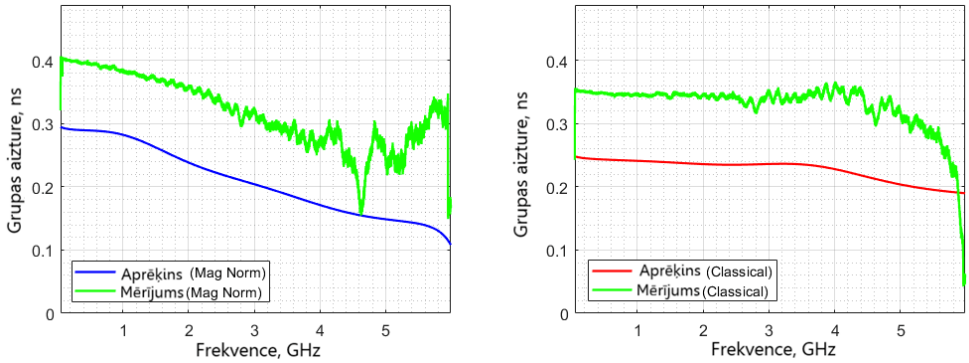
Īpaši izstrādāti elektriskie impulsu paplašinātāji

Izstrādāti divi mikroslokšņu LPF, lai palielinātu impulsa ilgumu no 50 ps līdz aptuveni 170 ps, kas nedaudz pārsniedz notikumu taimera minimālo impulsa ilguma slieksni 150 ps, tādējādi nodrošinot garantētu taimera reakciju. Analītiskie un skaitliskie aprēķini, datormodelēšana un mērījumi parādīja, ka šim paplašināšanas uzdevumam vispiemērotākais ir trešās kārtas Beseļa LPF kondensatora–spoles–kondensatora filtrs, kas normēts pēc grupas aiztures un turpmāk tekstā saukts par klasisko filtru. Otrā filtra, kas turpmāk tekstā saukts par pēc amplitūdas normētu filtru, normēšana tika veikta, izmantojot tradicionālo amplitūdas normēšanas metodiku, kurā virziendarbība pie robežfrekvences ir -3 dB. Filtri ir parādīti 2.2. attēlā.



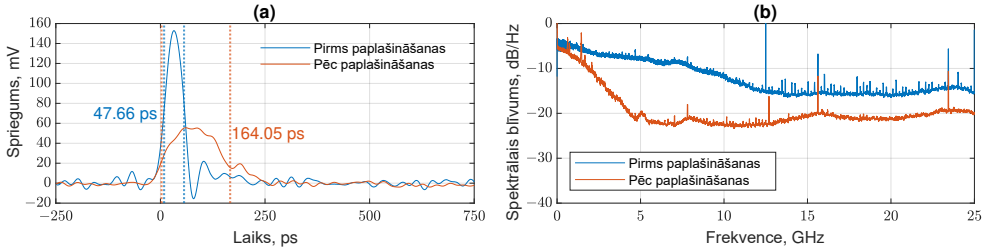
2.2. att. Īpaši izstrādātie filtri: (a) pēc amplitūdas normētais filtrs un (b) klasiskais filtrs ar robežfrekvenci $f_c = 1{,}8$ GHz.

Abu filtru simulētās un izmērītās grupas aiztures līknes ir parādītas 2.3. attēlā. Salīdzinot līkņu slīpumus, simulācijā iegūtās grupas aiztures līknes labi sakrīt ar eksperimentāli iegūtajām līknēm.

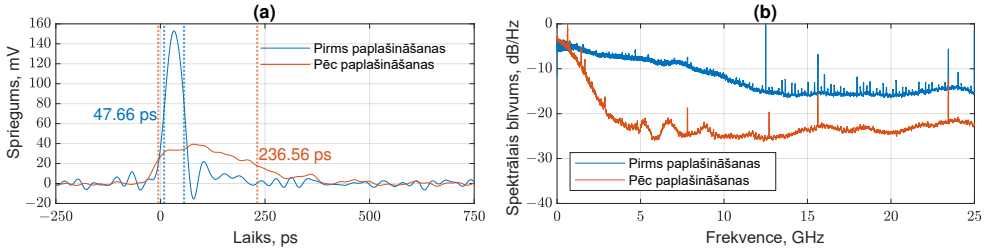


2.3. att. *Ansys* HFSS grupas aiztures simulācijas rezultāti un īpaši izstrādāto filtru mērījumu rezultāti.

Klasiskā LPF filtra 50 ps ieejas impulsa paplašināšanas rezultāti ir parādīti 2.4. attēlā, savukārt pēc amplitūdas normētā LPF filtra rezultāti ir parādīti 2.5. attēlā.



2.4. att. Ar īpaši izstrādāto klasisko filtru paplašināts impulss: (a) impulsu viļņformas; (b) normētie amplitūdas spektri.



2.5. att. Ar īpaši izstrādāto pēc amplitūdas normēto filtru paplašināts impulss: (a) impulsu viļņformas; (b) normētie amplitūdas spektri.

Redzams, ka ar klasisko filtru līdz 146 ps paplašinātais impulss ir tuvs vēlamajai impulsa viļņformai, jo tas atbilst noteiktajām viļņformas prasībām. Pēc amplitūdas normētais filtrs paplašina impulsu līdz 237 ps, taču šā impulsa viļņformai ir pārāk ilgs pirmais pārejas process, gara aste un pulsācijas astes daļā.

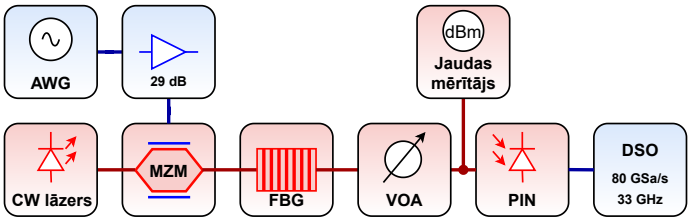
2.2. Optiskā impulsu paplašināšana

Īstenojot signāla pārraidi pa optisko šķiedru, PPM impulsus var paplašināt ne tikai elektriskajā, bet arī optiskajā vidē. Optisko impulsu ilguma palielināšanai izmanto tā sauktos optisko impulsu paplašinātājus vai impulsu paplašināšanas metodes [131–134].

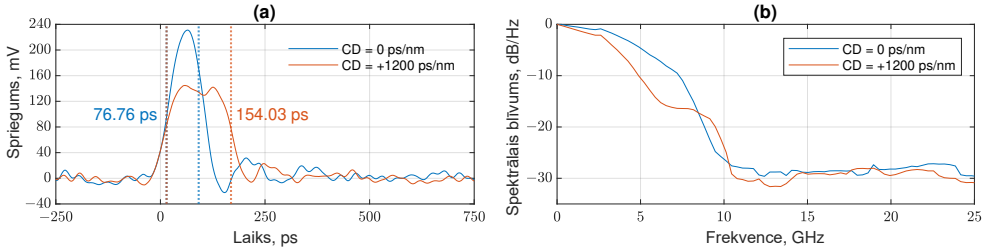
Kopumā impulsu paplašinātājus var iedalīt divās kategorijās: koherentajos un nekoherentajos paplašinātājos. Koherentie impulsu paplašinātāji, piemēram, difrakcijas režģu impulsu paplašinātāji, paplašina impulsu tā, lai šo procesu vēlāk varētu pavērst pretējā virzienā. Tie nodrošina pozitīvu vai negatīvu grupas aiztures dispersiju un parasti ir balstīti uz dispersīviem elementiem, piemēram, difrakcijas režģu pāriem, režģa un prizmas kombinācijām, FBG, čirkstotiem Brega režģiem vai gredzenveida rezonatoriem. Savukārt nekoherentie impulsu paplašinātāji impulsu paplašina neatgriezeniski [131, 132, 135]. Aplūkotajos eksperimentos izmantots noskaņojams FBG, lai ieviestu pozitīvu dispersiju un paplašinātu optiskos PPM ieejas impulsus, kā parādīts 2.6. attēlā.

Šā eksperimenta mērķis bija paplašināt 50 ps optiskos PPM impulsus vismaz līdz 150 ps. Tas ir nepieciešams, jo notikumu taimera ieejā pienākošā PPM impulsa ilgumam jābūt vismaz 150 ps, lai nodrošinātu stabilu darbību.

Noskaņojamajam FBG tika iestatīta hromatiskās dispersijas (CD) vērtība +1200 ps/nm, kas aptuveni atbilda dispersijai, ko rada 75 km gara standarta ITU T G.652 vienmodas optiskā šķiedra (SMF). Rezultātā FBG, kuram bija iestatīta šāda CD vērtība, paplašināja PPM impulsus līdz 154.03 ps, kā parādīts 2.7. attēlā. Var secināt, ka FBG darbojās kā vājš joslas sprostfiltrs ar aptuveni 6 GHz centrālo frekvenci.



2.6. att. Optisko impulsu paplašināšanas testa iekārtas blokshēma.



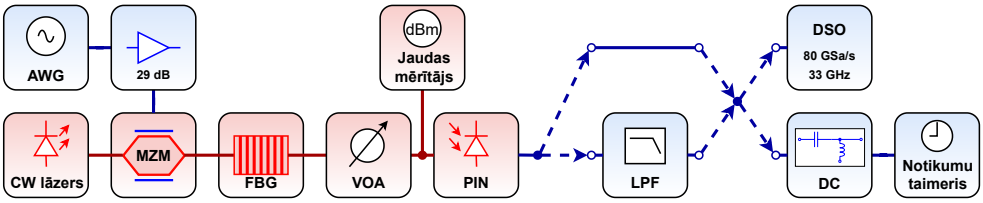
2.7. att. Ar noskaņojamu FBG paplašināts impulss: (a) reģistrētā viļņforma un (b) normētie amplitūdas spektri.

Eksperimentā sekmīgi demonstrēta noskaņojamā FBG moduļa spēja optiski paplašināt impulsus.

2.3. Impulsu paplašināšanas metožu eksperimentālā validācija

PPM pārraides eksperimenti veikti, izmantojot optiskās un elektriskās impulsu paplašināšanas metodes ar TR-PPM viļņformām. Lai demonstrētu energoefektīvu pārraidi, PPM impulsi tika saglabāti pēc iespējas īsāki.

PPM pārraides sistēmas blokshēma ir parādīta 2.8. attēlā. Sistēmas galvenie komponenti ir impulsu paplašināšanas modulis, proti, optiskais FBG vai elektriskais LPF, un augstas precizitātes notikumu taimeris, ko izmanto demodulācijai. AWG darbojas kā PPM raidītājs, ģenerējot nepieciešamo signāla viļņformu atbilstoši ielādētajiem diskretizētajiem datiem. Izmantoti unipolāri PPM impulsi ar 50 ps ilgumu. Ja impulsu paplašināšana tika veikta ar LPF, FBG CD vērtība tika iestatīta uz 0 ps/nm.



2.8. att. PPM pārraides savienojuma blokshēma ar notikumu taimeri demodulācijai.

Eksperiments veikts, izmantojot TR-PPM viļņformas [74] ar 2.1. tabulā norādītajiem parametriem un lietojot optisko vai elektrisko impulsu paplašināšanas metodi. Abos gadījumos BER mērījumi veikti atkarībā no vidējās optiskās jaudas, kas uztverta pirms fotodetektora (PD). BER atkarība no vidējās uztvertās optiskās jaudas, izmantojot optisko impulsu paplašināšanu un vairākas laika intervāla ilguma vērtības, ir parādīta 2.9. attēlā, savukārt elektriskās impulsu paplašināšanas rezultāti ir parādīti 2.10. attēlā. Vidējās uztvertās optiskās jaudas vērtību diapazons izvēlēts tā, lai ietvertu apgabalu, kurā datu pārraide pāriet no bezkļūdu pārraides uz pilnībā neinterpretējamu pārraidi ar BER vērtību 0,5. Šis diapazons konkrētajai sistēmai noteikts eksperimentāli un atbilst elektriskā impulsa amplitūdas vērtībām notikumu taimera detektēšanas sliekšņa tuvumā.

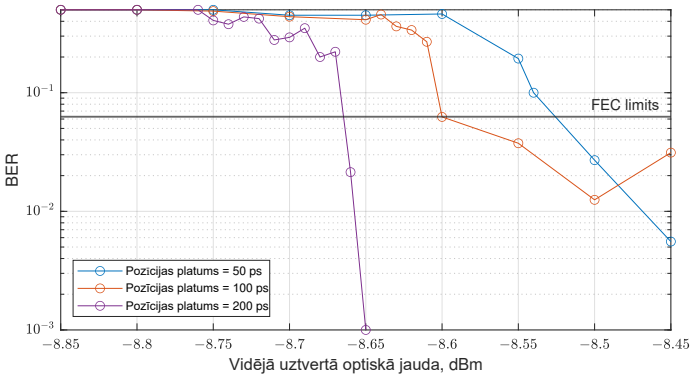
2.1. tabula

TR-PPM pārraides eksperimentu parametri

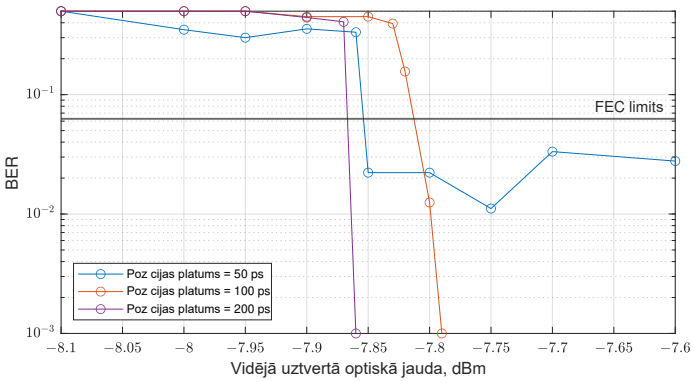
Pozīciju skaits, N	**Pozīcijas platums Δ, ps**	**Impula platums τ, ps**	**Paplašināšanas metode**
512	50	50	Optiskā
256	100	50	Optiskā
128	200	50	Optiskā
512	50	50	Elektriskā
256	100	50	Elektriskā
128	200	50	Elektriskā

FEC robeža apzīmē BER slieksni, pie kura Rīda–Solomona RS(255, 223) FEC algoritms spēj izlabot uztvertajā datu secībā esošās kļūdas. Šī BER vērtība ir $6{,}27 \times 10^{-2}$, jo RS(255, 223) algoritms vienā blokā spēj izlabot līdz 16 kļūdainiem simboliem.

Eksperimentu, kas veikti ar 200 ps laika intervāla ilgumu, rezultāti uzrāda skaidri izteiktu punktu, kurā datu pārraide kļūst bezkļūdu. Tas notiek, kad ienākošais PPM signāls notikumu taimera ieejā būtiski pārsniedz ar līdzsprieguma (DC) nobīdi iestatīto slieksni, tādēļ tādi nelabvēlīgi faktori kā troksnis un džiteris vairs būtiski neietekmē BER. Turpretī, ja ienākošo impulsu amplitūda, kas atbilst noteiktai vidējai uztvertajai optiskajai jaudai, ir zemāka par notikumu taimera sprieguma slieksni, visos gadījumos novērotas ļoti zemas BER vērtības. Sliekšņa efekts ir novērojams pie 200 ps laika intervāla ilguma. Savukārt eksperimentos ar 50 ps un 100 ps laika intervāla ilgumu ir novērojama kļūdu grīda, īpaši optiskās impulsu paplašināšanas gadījumā. Šāda darbība ir sagaidāma, jo mazāks laika intervāla ilgums prasa precīzāku modulāciju raidītājā un demodulāciju uztvērējā. Tādi nelabvēlīgi faktori kā džiteris un aditīvais troksnis visos sistēmas komponentos būtiski ietekmē PPM signālu ar mazāku laika intervāla ilgumu. Samazinoties PPM impulsu laika intervāla ilgumam, palielinās iespējamība, ka džiteris izraisīs uztvērējā novērtētās impulsa pozīcijas nobīdi uz citu pozīciju, kas atšķiras no modulatora ģenerētās pozīcijas.



2.9. att. BER atkarība no vidējās uztvertās optiskās jaudas, veicot optisko impulsu paplašināšanu ar FBG moduli.



2.10. att. BER atkarība no vidējās uztvertās optiskās jaudas, veicot elektrisko impulsu paplašināšanu ar LPF.

Rezultāti apstiprina gan elektriskās, gan optiskās impulsu paplašināšanas metodes koncepcijas piemērotību izmantošanai ar notikumu taimeri, jo BER vērtības ir pieņemamas pat pie ļoti maza laika intervāla ilguma 50–100 ps. Zemākas BER vērtības elektriskās impulsu paplašināšanas gadījumā pie līdzīgas vidējās uztvertās optiskās jaudas var izskaidrot ar izcilo impulsa formu īpaši izstrādātā LPF izejā. Tā nodrošina precīzāku notikumu taimera nostrādi un līdz ar to pārraidi ar mazāku kļūdu iespējamību. Jaunu impulsu paplašināšanas metožu izmantošana kopā ar veiktspējīgāku TDC ļāva sasniegt ievērojami zemāku BER nekā rezultātos, kas izklāstīti [104].

2.4. Otrās tēzes kopsavilkums

Otrā tēze bija veltīta tam, lai pierādītu, ka laikatzīmētājā balstītās PPM sistēmās impulsu ar platumu 50–100 ps var pasīvi paplašināt ar elektriskiem un optiskiem līdzekļiem līdz vairāk nekā divkāršam tā sākotnējam pilnā platuma pusmaksimumā (FWHM) ilgumam, vienlaikus pietiekami saglabājot impulsa viļņformu stabilai detektēšanai. Šajā nodaļā tika aplūkotas divas pasīvās impulsu paplašināšanas metodes: elektriskā un optiskā. Pārbaudīts komerciāls *Mini-Circuits* SLP-2400 LPF un konstatēts, ka tas paplašina 47,66 ps impulsu līdz 212,53 ps, taču impulsa krītošajā frontē rodas izteiktas pulsācijas. Aprakstīti un pārbaudīti divi īpaši izstrādāti filtri, ar kuriem tika panākta impulsu paplašināšana attiecīgi līdz 164,05 ps un 236,56 ps. Tomēr otrajā gadījumā impulsa krītošā fronte bija ievērojami izstiepta. Optiskā impulsu paplašināšana ar FBG pārbaudīta eksperimentāli, paplašinot impulsu līdz 154,03 ps un saglabājot izcilu viļņformas kvalitāti. Abas metodes validētas datu pārraides eksperimentos optiskā PPM sakaru sistēmā, sasniedzot BER vērtības, kas ir zemākas par 1×10^{-3}.

Pilna publikācija, kurā ietverti šajā nodaļā izklāstītie rezultāti, ir pieejama [70].

3. PPM BALSTĪTAS ISAC SISTĒMAS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS AR AROF PĀRRAIDES TĪKLU

Sadalītajai sensorikai, jo īpaši PPM lietojumos, nepieciešamo stingro, par nanosekundi mazāko laika pielaižu sasniegšana ir sarežģīta. Šīs problēmas risināšanai optisko šķiedru tehnoloģijas nodrošina fiziskos savienojumus ar mazu džiteri un lielu pārraides attālumu, izmantojot vispāratzītu funkcionālo modeli: radio caur šķiedru (RoF) [136, 137]. RoF ir guvusi ievērojamu popularitāti, jo tiek ieviesti optisko šķiedru savienojumi un pasīvo optisko tīklu (PON) infrastruktūra, lai apvienotu šīs tehnoloģijas centralizēts radio piekļuves tīkls topoloģijās [138–140]. Turklāt RoF jau ir pierādījusi sevi kā vērtīgu savstarpēji savienotu radaru arhitektūru papildinājumu [141], vienkāršojot radaru datu pārraidi [142–144]. RoF atzars ARoF vēl vairāk vienkāršo sistēmu, analogo signālu tieši pārraidot pa optisko šķiedru bez analogciparu pārveidošanas. Šī pieeja saglabā signāla nepārtraukto formu un analogo raksturu, kas var būt noderīgi turpmākai signālu apstrādei un sinhronizācijai, īpaši uz PPM balstītās sistēmās, kurās nepieciešama augsta laika precizitāte. Tādēļ jaunākajos pētījumos ARoF tehnoloģija ir pētīta milimetru viļņu [145, 146] un terahercu savienojumiem [147, 148]. Turklāt ARoF tiek apsvērta izmantošanai nākotnes sadalītajās vairāku ieeju un vairāku izeju (D-MIMO) sistēmās 6G tīklos [140, 149–153], kā arī bezvadu sakaros, sadalīto sensoru tīklos, radaros, kosmisko sakaru sistēmās un daudzos citos lietojumos [154–157].

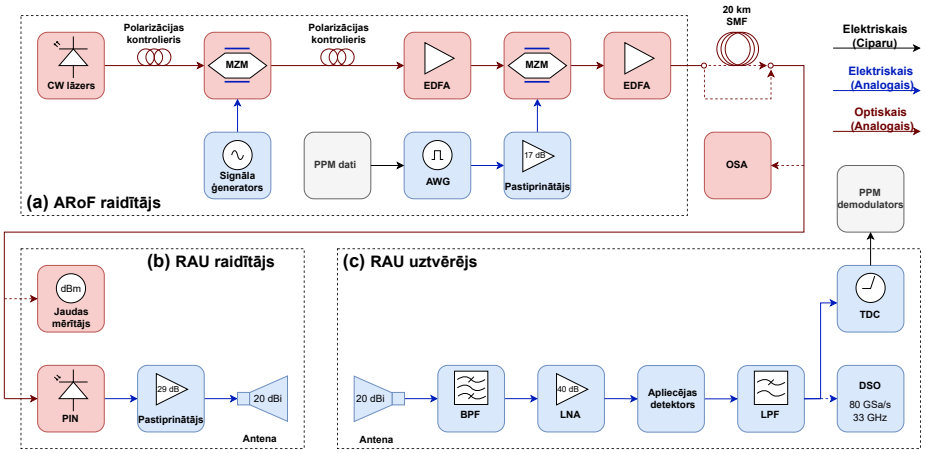
Šajā nodaļā galvenā uzmanība ir pievērsta PPM balstītu sakaru sistēmu projektēšanai, realizācijai un novērtēšanai, izmantojot ARoF tehnoloģiju optisko signālu pārraidei lielos attālumos, kā arī attāluma mērīšanas iespēju izpētei ISAC sistēmā, kurā par demodulatoru izmanto laikatzīmētāju.

3.1. 28 GHz mikroviļņu un optiskās pārraides sistēmas ar PPM projektēšana un novērtēšana

Šajā sadaļā ir aprakstīta jauna, eksperimentāli validēta sakaru sistēma, kurā izmantota TR-PPM pārraide pa ARoF. Šajā realizācijā centrālais birojs ir aprīkots ar lokālu analogo RoF raidītāju, savukārt bāzes stacija sastāv no attālinātā antenas bloka (RAU), kas piekļuves tīklā darbojas kā RF raidītājs. PPM signāla demodulāciju veic TDC, kura pamatā ir komerciāls notikumu taimeris. Piedāvātā sistēma darbojas kā eksperimentālā platforma IR-UWB sakaru un turpmāko UWB ISAC lietojumu izpētei.

Eksperimentālā iekārta

Eksperimentālā sistēma galvenokārt sastāv no trim daļām: (a) ARoF raidītāja, (b) RAU raidītāja un (c) RAU uztvērēja, kā parādīts 3.1. attēlā.



3.1. att. PPM balstītas ARoF sakaru sistēmas eksperimentālā iekārta.

Eksperimentālajā iekārtā nepārtraukta viļņa (CW) lāzera optiskā izeja ar 1550 nm viļņa garumu vispirms tika tieši savienota ar Maha–Zendera modulatoru (MZM). Nobīdes punkts tika noregulēts tuvu tā nulles līmenim. Sinusoidāla signāla ģenerators, kas ģenerēja 14 GHz sinusoidālu elektrisko signālu, tika tieši savienots ar pirmā MZM elektriskā signāla ieeju. Rezultātā pirmā MZM izejā optiskajā vidē starp ģenerētajām spektrālajām komponentēm iegūta nepieciešamā 28 GHz RF. Pirmā MZM izejas signāls, ko veidoja divas vienādas optiskās spektrālās komponentes jeb nesēji ar 28 GHz savstarpējo frekvenču atstatumu, pēc tam tika pastiprināts, izmantojot ar erbiju leģētu optiskās šķiedras pastiprinātāju (EDFA), un modulēts ar TR-PPM viļņformu, izmantojot otru MZM. TR-PPM viļņforma ģenerēta ar *Keysight* M8195A AWG.

Pirms optiskā signāla ievadīšanas 20 km garā, ITU-T G.652 rekomendācijai atbilstošā SMF posmā veikta optiskā signāla priekšpastiprināšana ar otru EDFA, kam bija optimizēta virziendarbība. Optiskajā uztvērējā izmantots PD, kas fotodetektēšanas procesā no optisko spektrālo komponenšu sitienu signāla ģenerēja RF. Pirms pārraides uz Ka joslas rupora antenu PD izejas RF signāla jauda tika palielināta.

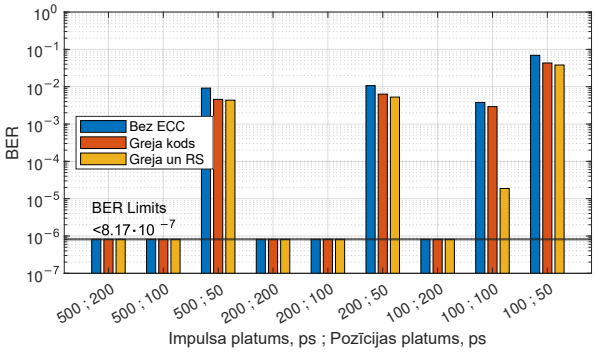
Uztvērējs atradās 5 m attālumā no RAU raidītāja. Pārraidītais milimetru viļņu signāls tika uztverts ar identisku Ka joslas antenu un filtrēts, izmantojot joslas filtru (BPF). Pēc filtrēšanas signāls pastiprināts un padots aploces detektoram, kas veica 28 GHz starpfrekvences signāla frekvences lejupkonvertēšanu.

Lejupkonvertētais pamatjoslas signāls analīzei tika padots ciparu osciloskopam (DSO) un ESTT notikumu taimerim, izmantojot īpaši izstrādātu LPF ar joslas platumu līdz 1,8 GHz. Šis konkrētais LPF (sk. 2. nodaļu) tika mērķtiecīgi izmantots uztverto impulsu paplašināšanai, lai nodrošinātu to precīzu detektēšanu ar ESTT, jo šā filtra grupas aizture saglabājas gandrīz nemainīga frekvencēm līdz 3 GHz, tādējādi samazinot impulsa formas kropļojumus. Pēc LPF RAU uztvērējā impulsi tiek paplašināti līdz aptuveni 500 ps, atvieglojot to detektēšanu ar ESTT. Tomēr paplašināšana samazina impulsa viļņformas amplitūdu.

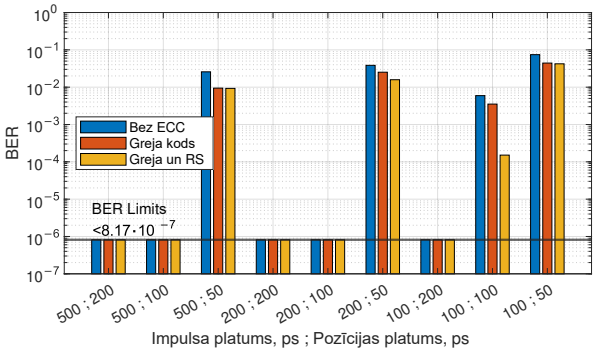
Datu pārraides eksperimenti

Pārraidāmie dati ģenerēti kā 1.224×10^6 bitu gara PRBS, izmantojot 623. kārtas Mersena virpuļa pseidonejaušo skaitļu ģeneratoru, tādējādi nosakot minimālo detektējamo BER vērtību 8.17×10^{-7}. Dati saglabāti vēlākai salīdzināšanai ar demodulētajiem datiem. TR-PPM viļņformas ģenerētas bezsaistes režīmā MATLAB vidē ar impulsa ilgumu no 500 ps līdz 100 ps un laika intervāla ilgumu no 200 ps līdz 50 ps, izmantojot ECC un bez tā. Kļūdu labošana realizēta, izmantojot tikai Greja kodu vai Greja kodu kopā ar RS ECC.

Veiktas divas eksperimentu kopas ar 20 km SMF savienojumu un bez tā, un BER mērījumi veikti, izmantojot ECC un bez tā. Rezultāti ir parādīti 3.2. un 3.3. attēlā.



3.2. att. Datu pārraides eksperimenta rezultāti B2B savienojumam.



3.3. att. Datu pārraides eksperimenta rezultāti savienojumam ar 20 km SMF.

Visi mērījumi ar 200 ps laika intervāla ilgumu uzrāda bezkļūdu pārraidi. Bezkļūdu pārraide sasniegta arī ar 500 ps un 200 ps impulsu ilgumu, izmantojot 100 ps laika intervāla ilgumu.

Redzams, ka Greja koda izmantošana, kas nodrošina tikai viena bita izmaiņu, ja uztvertais impulss atrodas blakus esošajā laika intervālā, nedaudz samazina BER. To vēl vairāk samazina RS (255, 223) koda izmantošana. RS koda izmantošana būtiski samazina BER mērījumos ar 100 ps impulsa ilgumu un 100 ps laika intervāla ilgumu. Visos mērījumos ar 50 ps laika intervāla

ilgumu RS koda ietekme ir nenozīmīga. To var izskaidrot ar lielo kļūdaini mainīto bitu skaitu tajos TR-PPM kadros, kuros tiek pārraidīti paritātes baiti.

Salīdzinot mērījumus ar 20 km SMF un bez tās, B2B mērījumos kopumā tiek iegūts zemāks BER. BER pasliktināšanos var izskaidrot ar dispersiju optiskajā šķiedrā, kas pasliktina impulsa formu un samazina augošās frontes stāvumu. Tas savukārt palielina jutību pret aditīvo troksni, izraisot kļūdas impulsa pozīcijas mērījumos ar ESTT.

Galvenais ARoF TR-PPM sakaru sistēmas veiktspēju ietekmējošais faktors ir laika intervāla ilgums, kas tieši nosaka sistēmas noturību pret džiteri. Rezultāti apstiprina realizēto kodēšanas algoritmu efektivitāti, jo ECC izmantošana samazina BER gan 20 km SMF, gan B2B eksperimentālajā iekārtā.

Pilna publikācija ir pieejama [71].

3.2. PPM balstītas radaru sistēmas ar ISAC funkcionalitāti projektēšana un novērtēšana

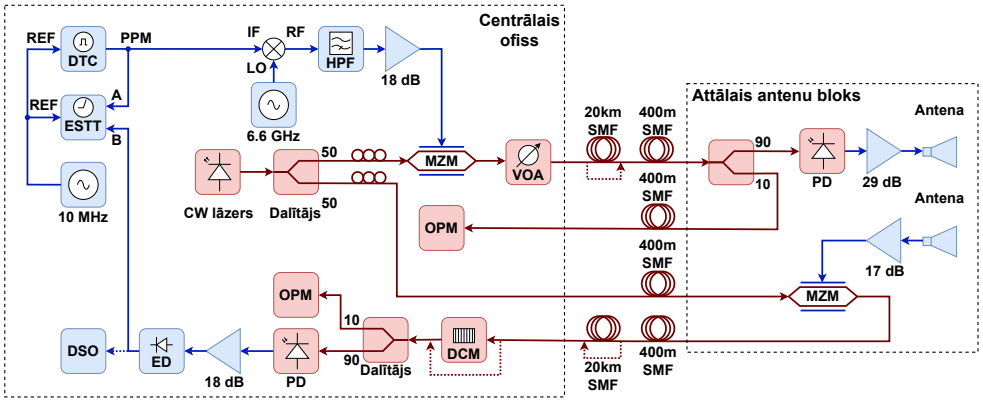
Šajā sadaļā ir aprakstīta pirmā ARoF balstītas radaru sistēmas ar ISAC funkcionalitāti realizācija, kurā izmantota PPM, īpaši izstrādāts modulators un augstas precizitātes laikatzīmētājs ESTT 7 *Series* [158]. Tas nodrošina par nanosekundi īsākus PPM laika intervālus un pārraidi pa garu SMF posmu.

Salīdzinājumā ar plaši izmantotajiem radaru sensorikas risinājumiem, piemēram, autonomajā transportlīdzekļu vadībā, gaisa un zemes objektu uzraudzībā un laikapstākļu novērošanā izmantotajiem risinājumiem [159–162], proti, frekvences modulēta nepārtrauktā viļņa (FMCW) un impulsu Doplera radariem, kas abi nodrošina attāluma un ātruma mērīšanas iespējas, piedāvātā arhitektūra novērš vairākus ierobežojumus. FMCW radariem parasti ir samērā liels enerģijas patēriņš nepārtrauktās raidīšanas un uztveršanas dēļ, un tiem nepieciešams sarežģīts RAU. Savukārt impulsu Doplera radaru iespējas veikt precīzus absolūtā attāluma mērījumus un detektēt lēni kustīgus mērķus ir ierobežotas, jo tie balstās Doplera nobīdēs [163, 164]. Piedāvātā arhitektūra nodrošina precīzus attāluma mērījumus, tieši mērot impulsa pienākšanas laiku (ToA) pat lēni kustīgiem vai nekustīgiem mērķiem. Apvienojumā ar ARoF izmantotā PPM viļņforma mazina fāzes trokšņa uzkrāšanās problēmu optiskajās FMCW sistēmās [165–167].

Realizēts 6,6 GHz impulsu radars, jo ir plaši pieejama īpaši augsto frekvenču (SHF) infrastruktūra [168, 169], ko var viegli pielāgot ISAC sistēmām. Pētīta garu SMF posmu ietekme uz PPM signāla kvalitāti, izmērīto BER un attāluma noteikšanas precizitāti. Novērtēta arī optiskās šķiedras izraisītās hromatiskās dispersijas kompensācijas ietekme optiskajā apakšsistēmā, ņemot vērā, ka PON sistēmas tiek projektētas un novērtētas, ietverot dispersijas ietekmi.

Eksperimentālās sistēmas apraksts

Eksperimentālo sistēmu veidoja centrālais ofiss (CO), kurā tika ģenerēts un detektēts optiskais nesējs un RF signāli, un RAU, kas izstaroja un uztvēra RF signālu, kā parādīts 3.4. attēlā.



3.4. att. PPM balstītas radaru sistēmas ar ISAC funkcionalitāti, kurā izmantota ARoF, eksperimentālās iekārtas blokshēma.

Pārraidāmā PRBS ģenerēta MATLAB programmatūrā, izmantojot 623. kārtas Mersena virpuļa pseidonejaušo skaitļu ģeneratoru. Kopumā tika ģenerēti 5.12×10^6 biti, kas tika saglabāti 40 datu failos, no kuriem katrs saturēja 16000 PPM simbolu. Viens simbols bija 8 bitus garš, tādēļ modulācijas kārta bija $M = 256$. Faili tika ielādēti modulatora vadības programmatūrā PC.

CO pamatjoslas PPM viļņforma ģenerēta, izmantojot īpaši izstrādāto PPM modulatoru. PPM viļņforma tika sajaukta ar 6,6 GHz RF nesēju. Filtrētais signāls tika pastiprināts un padots MZM RF ieejas portā. Optiskā nesēja viļņa garums bija 1550 nm, bet lāzera optiskā izejas jauda bija +12 dBm.

MZM optiskā izeja tika savienota ar maināmu optisko vājinātāju (VOA), kas izmantots, lai precīzi regulētu optisko jaudu, kas nonāca uz PD RAU, visos savienojuma scenārijos saglabājot nemainīgu −15 dBm līmeni. Optiskais signāls uz RAU tika pārraidīts pa 400 m garu SMF posmu ar iespēju pievienot vēl 20 km SMF. RAU signāls ar PD tika pārveidots elektriskajā vidē. PD elektriskā izeja ar maiņstrāvas sasaisti tika pastiprināta un pēc tam izstarota ar rupora antenu.

Uztvērēja pusē izmantota tāda paša veida antena kā raidītājā. Antenas atradās blakus, un izmērītā izolācija starp tām bija 40 dB. Uztvertais signāls tika pastiprināts un padots cita MZM RF ieejā, kurš saņēma optisko nesēju no CO. MZM optiskā izeja tika padota dispersijas kompensācijas modulim (DCM), ko varēja apiet un aizstāt ar 3 dB optisko vājinātāju.

Abu 20 km SMF spoļu, kuru kopējais garums bija 40 km, kopējā izmērītā dispersija pie 1550 nm bija 681 ps/nm. Pēc tam optiskais signāls tika padots PD, un iegūtais elektriskais signāls tika pastiprināts un lejupkonvertēts, izmantojot īpaši izstrādātu apliecējas detektoru (ED). Uztvertais un lejupkonvertētais signāls tika padots ESTT ieejā "B", savukārt ESTT ieeja "A" tika savienota ar modulatoru, lai reģistrētu pārraidīto impulsu laika atzīmes, kas nepieciešamas attāluma novērtēšanai.

Eksperimenta parametri

Apakškadra ilgums $T_{\text{sf}} = 300$ ns izvēlēts tā, lai nevienai testētajai laika intervāla ilguma Δ vērtībai impulsi nepienāktu ESTT neaktīvā laika logā. Laika intervāla ilguma diapazons 10–1000 ps izvēlēts tādēļ, ka $\Delta = 10$ ps ir īsākais laika intervāls, ko var ģenerēt ar īpaši izstrādāto modulatoru. Laika intervāla ilguma augšējā robeža 1000 ps izvēlēta tādēļ, ka tā atbilst mūsdienīgās reālās PPM datu pārraides sistēmās izmantoto tipisko laika intervālu ilgumu diapazona apakšējai robežai, piemēram, Amerikas Savienoto Valstu Nacionālās aeronautikas un kosmosa pārvaldes (NASA) un Eiropas Kosmosa aģentūras (ESA) izmantotajās sistēmās [33, 34, 170]. Pie šāda laika intervāla ilguma aplūkotā sistēma var sasniegt tik zemu kļūdu īpatsvaru, ka tas nav detektējams.

Maksimālais bitu pārraides ātrums šai ierobežojumu kopai ($T_{\text{sf}} = 300$ ns, $T_{\text{break}} = 20$ ms, $N = 16000$) ir aptuveni 5 Mbit/s. Tādējādi bitu pārraides ātrums ir pieņemams un tuvs citām praktiski realizētām sistēmām [171]. Pilns eksperimenta parametru saraksts ir sniegts 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Galveno eksperimentālo parametru kopsavilkums

Parametrs	**Vērtība**
Modulācijas veids	PPM
Pozīcijas platums Δ	10 – 1000 ps
Modulācijas kārta M	256
Bitu skaits simbolā	8
PPM virknes garums N	16000 simboli
Apakškadra garums T_{sf}	300 ns
Pārraidīto kadru skaits	40
Pārraidīto bitu skaits	5.12×10^6
Impulsa FWHM τ	2.5 ns
RF nesējfrekvence	6.6 GHz
Attālums līdz statiskam atstarotājam	4 m
Optiskā B2B distance	800 m
Kopējā distance ar SMF	40.8 km
Optiskais viļņa garums	1550 nm
DCM vērtība	−681 ps/nm

Eksperimenta konfigurācijas

Mērījumi veikti ar nekustīgu metālisku atstarotāju, kas atradās 4 m attālumā no RAU. Datu pārraides eksperimenti ar Greja kodēšanu un bez tās veikti četrās sistēmas savienojuma konfigurācijās:

1) elektriskais tiešais savienojums (B2B) savienojums, kurā modulators ar koaksiālo kabeli tika tieši savienots ar ESTT;

2) optiskais B2B savienojums, kurā optiskās pārraides tīkls bija savienots tikai ar 800 m garu SMF, proti, 400 m katrā virzienā;
3) optiskais savienojums ar 40 km SMF, kurā optiskajiem atzariem, kas pārraidīja PPM signālu katrā virzienā, tika pievienotas 20 km spoles;
4) optiskais savienojums ar 40 km SMF un DCM.

Attāluma mērījumi veikti visiem trim optiskā savienojuma scenārijiem, mērot impulsu ToA abos ESTT kanālos un aprēķinot ToF. Vidējais ToF aprēķināts katram PPM pārraides kadram, lai novērstu samērā lielās attāluma mērījumu atšķirības, kas var rasties, atsevišķi analizējot katru pārraidīto un uztverto impulsu. Attālums d tika aprēķināts, zinot izplatīšanās ātrumu, proti, gaismas ātrumu:

$$d = \frac{(t_{\mathrm{m}} - t_0)}{2} \cdot c \,, \tag{3.1.}$$

kur t_{m} ir izmērītā vidējā laika starpība starp pārraidītajiem un uztvertajiem impulsiem, t_0 ir izplatīšanās aizture sistēmā un c ir gaismas ātrums.

Lai gan ESTT nodrošina pikosekunžu līmeņa laika precizitāti, kas ļauj sasniegt centimetru līmeņa attāluma noteikšanas precizitāti, tā spēja izšķirt vairākus mērķus ir ierobežota 40 ns neaktīvā laika dēļ, kas atbilst aptuveni 6 m attālumam starp detektējamiem mērķiem. Ja ESTT neaktīvo laiku varētu novērst, attāluma izšķirtspēju ΔR ierobežotu formula $\Delta R = c \cdot \tau/2$, kur c ir gaismas ātrums un τ ir impulsa ilgums.

Rezultāti

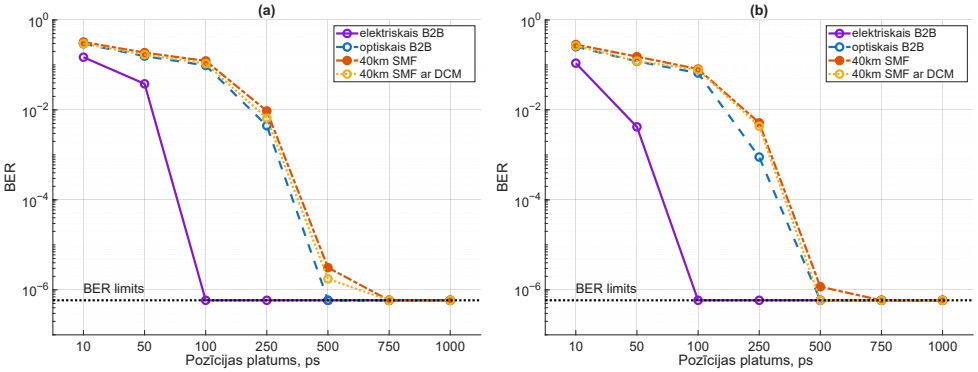
Datu pārraides mērījumu rezultāti bez Greja kodēšanas ir parādīti 3.5. (a) attēlā, savukārt rezultāti ar Greja kodēšanu ir parādīti 3.5. (b) attēlā. Ņemot vērā pārraidīto bitu skaitu, novērtētā BER apakšējā robeža ar 95 % ticamības līmeni ir 5.86×10^{-7}.

Kā redzams iegūtajos rezultātos, elektriskajā B2B konfigurācijā, pārraidot 5.12×10^6 bitus pie $\Delta = 100$ ps, netika novērota neviena kļūda. Tas nozīmē, ka modulators nodrošināja bezkļūdu pārraidi gan ar Greja kodēšanu, gan bez tās. Savukārt pie $\Delta = 50$ ps laika intervāla ilguma Greja kods būtiski samazināja BER. Optiskās pārraides tīkls būtiski pasliktināja BER, un bezkļūdu pārraide tika sasniegta tikai pie $\Delta = 500$ ps optiskā B2B savienojuma gadījumā un pie $\Delta = 750$ ps konfigurācijās ar 40 km SMF. Optiskajās konfigurācijās uzlabojumi tika novēroti pie laika intervālu ilgumiem $\Delta \geq 750$ ps. Visos gadījumos, kad BER netuvojas noteiktajai robežai, 95 % ticamības intervāls ir mazāks par 6 %.

Redzams, ka 40 km SMF posma pievienošana nedaudz pasliktina veiktspēju salīdzinājumā ar optiskā B2B savienojuma scenāriju. Šī ietekme nav būtiska, jo sistēma sasniedz bezkļūdu pārraidi pie $\Delta \geq 750$ ps. Šī pasliktināšanās atbilst novērotajai frontes paplašināšanai, kur uzkrātā hromatiskā dispersija samazināja frontes slīpumu un palielināja džiteri, tādējādi šajā gadījumā nedaudz palielinot BER.

Rezultāti, kas iegūti ar 40 km SMF un DCM vērtību -681 ps/nm, kura nomināli kompen-

sēja uzkrāto otrās kārtas dispersiju pie nesēja viļņa garuma, uzrāda nelielu BER uzlabojumu. Atlikušās augstāko kārtu dispersijas un praktisko ierīču ierobežojumu dēļ veiktspēja pilnībā neatgriezās optiskajā B2B konfigurācijā novērotajā līmenī.



3.5. att. Izmērītā BER atkarība no laika intervāla ilguma: (a) bez Greja kodēšanas; (b) ar Greja kodēšanu.

Attāluma mērījumos, kuru rezultāti ir parādīti 3.2. tabulā un 3.6. attēlā, optiskā B2B savienojuma gadījumā absolūtā attāluma novirze bija aptuveni 0,6741 cm. Pievienojot 40 km SMF, novirze nedaudz palielinājās līdz 0,8610 cm, savukārt DCM izmantošana samazināja novirzi līdz 0,6144 cm, taču šajā gadījumā starpkvartiļu diapazons bija lielāks. Rezultāti atbilst iepriekš aprakstītajiem apsvērumiem un parāda, ka dispersijas kompensācija var nedaudz uzlabot precizitāti. Vismaz testētajā attālumā dispersijas ietekme SMF ir neliela, un galvenie attāluma noteikšanas precizitāti ietekmējošie faktori ir ESTT precizitāte un citas aparatūras, piemēram, PD un aploces detektora, radītais džiteris. Lai noteiktu attālumu, ir jāizmēra tikai relatīvais ToA starp pārraidītajiem un uztvertajiem impulsiem, un to neietekmē ģenerētās impulsu secības kvalitāte. Turpretī pārraides sistēmā esošais džiteris pasliktina mērījumu precizitāti, tādēļ nav iespējams sasniegt ToF mērījumu precizitāti, kas būtu tuva norādītajai ESTT RMS precizitātei aptuveni 1,5 ps.

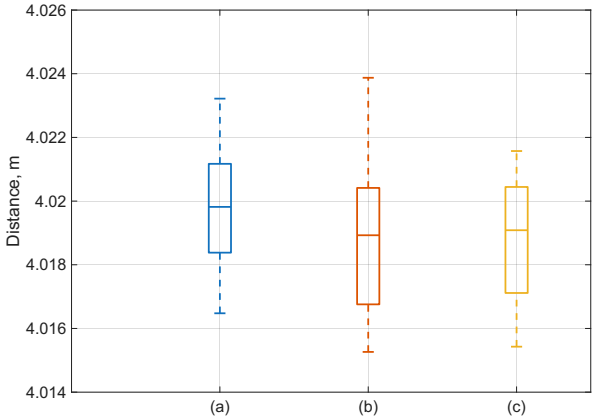
Piedāvātā arhitektūra nodrošina augstāku precizitāti nekā esošie sarežģītākie un dārgākie risinājumi [172–174]. Savukārt jaunākās eksperimentālās terahercu sistēmas, kurās izmantoti interferometriski ToF mērījumi, sasniedz par mikrometru mazāku precizitāti [175].

Platākā un nedaudz lēzenākā impulsa augošā fronte, kas rodas SMF dispersijas ietekmē, ietekmē BER un attāluma noteikšanas precizitātes mērījumus, jo ESTT nostrādā pie iestatītas sprieguma sliekšņvērtības. Tādēļ aditīvais troksnis impulsa viļņformā var izraisīt taimera nostrādi nedaudz agrāk vai vēlāk par paredzēto laiku.

3.2. tabula

Attāluma mērījumu rezultāti

Savienojums	**Vidējais attālums, m**	**Absolūtā novirze, cm**	**Standarta novirze, cm**	**Starpkvartiļu distance, cm**
Optiskais B2B	4.0198	0.6741	0.1803	0.2789
40 km SMF	4.0189	0.8610	0.2405	0.3657
40 km SMF ar DCM	4.0188	0.6144	0.1858	0.3330



3.6. att. Attāluma mērījumu kļūdu intervālu diagramma: (a) optiskais B2B savienojums; (b) optiskais savienojums ar 40 km SMF; (c) optiskais savienojums ar 40 km SMF un DCM.

Kopumā, izmantojot optiskās pārraides tīklu, bezkļūdu pārraide tika sasniegta pie 500 ps laika intervāla ilguma, bet, pievienojot 40 km SMF, pie 750 ps. Sistēma pārspēj esošos risinājumus gan BER, gan minimālā izmantojamā laika intervāla ilguma ziņā un nodrošina ISAC funkcionalitāti. Greja kodēšana samazināja iegūto BER, tādējādi apliecinot tās efektivitāti PPM datu pārraidē.

Attāluma noteikšanas precizitāte optiskā B2B savienojuma gadījumā bija 0,6741 cm, bet konfigurācijā ar 40 km SMF tā nedaudz palielinājās līdz 0,8610 cm. Tika pārbaudīta dispersijas kompensācijas ietekme un konstatēts, ka tā samazina BER un nedaudz uzlabo attāluma noteikšanas precizitāti. Uzlabojums ir neliels un var neattaisnot papildu sarežģītību un izmaksas. Ar laikatzīmētāju sasniegtā attāluma noteikšanas precizitāte būtiski pārsniedz plaši izmantoto radaru sistēmu precizitāti un nodrošina precīzu attāluma un ātruma novērtēšanu ar mazāku enerģijas budžetu nekā FMCW radaram, turklāt nav jāizmanto Doplera efekta izraisītās frekvences nobīdes. Galvenais attāluma izšķirtspēju ierobežojošais faktors, kas vairāku mērķu scenārijos pašlaik ir 6 m, ir TDC neaktīvais laiks. Lai gan PPM impulsa ilgums nenes informāciju, tā samazināšana ir būtiska energoefektivitātei un attāluma izšķirtspējai ISAC sistēmās, ja TDC neaktīvais laiks tiek saglabāts mazs.

Pilna publikācija ir pieejama [72].

3.3. Trešās tēzes kopsavilkums

Trešā tēze bija veltīta tam, lai pierādītu, ka optiskajās PPM balstītajās ISAC sistēmās, izmantojot augstas kārtas PPM un SLR lietojumiem paredzētu laikatzīmētāju kā uztvērēju, var sasniegt BER, kas ir mazāks par 1×10^{-6}, un attāluma mērījumu precizitāti, kas ir labāka par 5 cm vismaz 4 m attālumā, ja optiskās pārraides attālums pārsniedz 40 km. Izstrādāta un testēta ARoF balstīta sakaru sistēma, kurā izmantota PPM, 20 km SMF, 5 m garš 28 GHz RF savienojums un līdz 100 ps īsi impulsi. Eksperimentālā validācija pierādīja, ka PPM viļņforma ir ļoti noturīga pret pārraides tīkla izraisītajiem kropļojumiem, sasniedzot BER vērtības līdz pat 8.17×10^{-7}. Šī sistēma izmantota kā eksperimentālā platforma PPM balstītas ISAC impulsu radaru sistēmas izstrādei, kurā par uztvērēju izmantots laikatzīmētājs. Pirmo reizi eksperimentāli demonstrēta integrēta radaru sensorika un sakari, izmantojot 6,6 GHz PPM balstītu sistēmu ar līdz pat 40 km SMF. Eksperimentālajos rezultātos, izmantojot 10–1000 ps laika intervāla ilgumu, PPM modulācijas kārtu 256 un 300 ns apakškadra ilgumu, tika sasniegtas BER vērtības līdz pat 5.86×10^{-7} ar 95 % ticamības līmeni gan ar Greja kodēšanu, gan bez tās. Attāluma mērījumos novērota absolūtā novirze, kas bija mazāka par 0,861 cm. Datu pārraides un attāluma mērījumu testu rezultāti būtiski pārsniedza šajā tēzē izvirzīto mērķi, tādējādi to pierādot. Papildus tika pētīta hromatiskās dispersijas ietekme uz PPM viļņformu un konstatēts, ka tā būtiski neietekmē BER un attāluma noteikšanas precizitāti.

Pilnas publikācijas, kurās ietverti šajā nodaļā izklāstītie rezultāti, ir pieejamas [71] un [72].

SECINĀJUMI

Promocijas darbs ir izstrādāts kā tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopsavilkums, un tas ir veltīts PPM balstītu sakaru sistēmu projektēšanai, realizācijai un eksperimentālai validācijai. Darba galvenais mērķis ir projektēt, izstrādāt un testēt PPM balstītu integrētu radara un sakaru sistēmu ar ISAC funkcionalitāti, izmantojot ARoF tehnoloģiju, īpaši izstrādātu PPM modulatoru un komerciālu laikatzīmētāju kā demodulatoru. Šī sistēma var kalpot par eksperimentālu platformu turpmākiem UWB sensorikas un kosmisko sakaru pētījumiem. Turpmāk uzskaitīti promocijas darba galvenie rezultāti un secinājumi.

1. Izstrādāta eksperimentāla AWG balstīta platforma, lai pētītu PPM signālu detektēšanu ar augstas precizitātes laikatzīmētāju SLR lietojumiem. Parādīts, ka PPM signāla formas aditīvais troksnis var būtiski ietekmēt BER sistēmās, kas balstītas laikatzīmētājā, jo detektēšanas sliekšņa līmenis ir fiksēts, potenciāli blakus laika intervālā var tikt reģistrēta kļūdaina laika atzīme. Tomēr tika demonstrēts, ka laikatzīmētājs ir robusts un ļoti precīzs līdzeklis PPM signālu demodulācijai pētījuma apstākļos.
2. Izstrādāti un eksperimentāli validēti divi programmējamā ciparu aiztures līnijā balstīti PPM modulatori. Testu rezultāti liecina par stabilu PPM virkņu ģenerēšanu ar RMS džiteri līdz pat 7,65 ps. Jaunākais izstrādātais modulators spēj ģenerēt 16 000 simbolu garu PPM virkni ar laika intervāla ilgumu līdz pat 10 ps un pārkonfigurējamu modulācijas kārtu. DDL balstīta modulatora koncepcija tika pārbaudīta un turpmākajos eksperimentos pierādīta kā izcili stabils līdzeklis PPM signālu ģenerēšanai.
3. Analizēts džitera sadalījums un konstatēts, ka tas ir aptuveni normālsadalījums, tādējādi ļaujot izmantot ECC algoritmus. Analizētas sistemātiskās kļūdas, tostarp takts signāla dreifs un raidītāja un uztvērēja sinhronizācija. Konstatēts, ka takts signāla dreifs izpaužas kā nemainīga nobīde no paredzamajām impulsu pozīcijām PPM secībā, savukārt sinhronizācijas kļūdas izraisa pastāvīgi pieaugošu nobīdi. Šo problēmu mazināšanai var izmantot tādus paņēmienus kā sinhronizācijas preambula impulsu secībā.
4. Konstatēts, ka Greja kodēšana nodrošina visbūtiskāko BER samazinājumu, jo šis kods pieļauj viena bita kļūdu, ja impulss tiek uztverts blakus esošajā laika intervālā, kas ir visbiežākais kļūdu cēlonis. Pārraidīto datu bitu kļūdu labošanai piedāvāts RS kods, un simulāciju rezultāti parādīja, ka tas sniedz vislielāko ieguvumu gadījumos, kad pastāv takts signāla dreifa kļūda.
5. Piedāvāti elektriski un optiski impulsu paplašināšanas paņēmieni, jo laikatzīmētājam ir noteikts minimālais nepieciešamais impulsa ilgums. Eksperimentālie rezultāti parāda, ka impulsu var elektriski paplašināt, izmantojot LPF, un optiski paplašināt, izmantojot FBG, līdz 2–3 reizēm no tā sākotnējā ilguma, vienlaikus saglabājot signāla formu stabilai detektēšanai ar laikatzīmētāju.

6. Projektēta un eksperimentāli validēta ARoF balstīta PPM sakaru sistēma, sasniedzot BER vērtības līdz pat 8.17×10^{-7}, izmantojot 200 ps laika intervāla ilgumu, 20 km garu SMF posmu un 5 m garu RF savienojumu. Parādīts, ka NOE būtiski neietekmē PPM signāla formu, tādējādi apliecinot, ka PPM ir efektīvs un robusts datu pārraides paņēmiens optisko sakaru sistēmās.
7. Izstrādāta un eksperimentāli validēta ARoF balstīta 6.6 GHz integrēta radaru un sakaru sistēma ar ISAC funkcionalitāti. Sistēma sasniedza BER vērtības līdz pat 5.86×10^{-7} ar 95 % ticamības līmeni gan ar Greja kodēšanu, gan bez tās, kā arī absolūto attāluma mērījumu novirzi, kas nepārsniedza 0,861 cm, izmantojot SMF ar kopējo garumu 40 km un 4 m attālumu līdz mērķim. Galvenais sekmīgo rezultātu veicinošais faktors bija augstas precizitātes laikatzīmētāja izmantošana, kas šajā promocijas darbā pirmo reizi eksperimentāli demonstrēta. Tomēr laikatzīmētāja neaktīvais laiks būtiski ierobežo šādas sistēmas attāluma izšķirtspēju.
8. Hromatiskās dispersijas ietekme novērtēta, izmantojot pārskaņojamu DCM, un konstatēts, ka vismaz testētajos SMF posmu garumos tā ir nenozīmīga. Lai gan dispersijas kompensācija nedaudz samazināja BER un uzlaboja attāluma mērījumu precizitāti, šie nelielie uzlabojumi neatsver papildu izmaksas un sarežģītību.

Šajā promocijas darbā izklāstītie galvenie rezultāti ir publicēti trīs recenzētos starptautiskos zinātniskajos žurnālos, kas pēc citējamības indeksa ierindojas augstākajā 25 procentu kvartilē (Q1), kā arī četros recenzētu starptautisku konferenču rakstu krājumos.

Šā promocijas darba rezultāti sniedz nozīmīgu ieguldījumu UWB balstītu sistēmu ar ISAC funkcionalitāti jomā, un tos var izmantot arī tālā kosmosa sakaros, kuros tāldarbīgu, robustu un energoefektīvu datu pārraides savienojumu nodrošināšanai arvien plašāk izmanto laikatzīmēšanas tehnoloģiju un PPM. Turpmākajos lietojumos ir jāsamazina laikatzīmētāja neaktīvais laiks, kas ESTT gadījumā ir 40 ns, jo tas ir galvenais attāluma izšķirtspēju ierobežojošais faktors. Šajā pētījumā attāluma izšķirtspēja bija aptuveni 6 m. Tāpat, pievēršot uzmanību šādu sakaru sistēmu lielākai caurlaidspējai, ir jānovērš būtiski programmatūras ierobežojumi, jo pārtraukumi starp pārraides kadriem ievērojami ierobežo praktiski sasniedzamo datu pārraides ātrumu, lai gan izstrādātais modulators aparatūras līmenī spēj nodrošināt datu pārraides ātrumu vairākus gigabitus sekundē.

LITERATŪRAS SARAKSTS

[1] Yang, L. un Giannakis, G. „Ultra-wideband communications: an idea whose time has come". *IEEE Signal Processing Magazine* 21.6 (2004), 26.–54. lpp. DOI: 10.1109/MSP.2004.1359140.

[2] Yajnanarayana, V. un Handel, P. „Joint Estimation of TOA and PPM Symbols Using Sub-Nyquist Sampled IR-UWB Signal". *IEEE Communications Letters* 21.4 (2017. g. apr.), 949.–952. lpp. ISSN: 1089-7798. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2650231.

[3] Jajodia, B., Mahanta, A. un Ahamed, S. R. „IEEE 802.15.6 WBAN Standard Compliant IR-UWB Time-Hopping PPM Transmitter using SRRC signaling pulse". *AEU – International Journal of Electronics and Communications* 117 (2020. g. apr.), 153119. lpp. ISSN: 1434-8411. DOI: 10.1016/J.AEUE.2020.153119.

[4] Youssef, A. A. „Adaptive LDPC coded high data rate based IR-UWB combined with VMIMO system for vehicular communication links". *AEU – International Journal of Electronics and Communications* 169 (2023. g. sept.), 154747. lpp. ISSN: 16180399. DOI: 10.1016/j.aeue.2023.154747.

[5] Somov, A. un Baraev, A. „Consist-to-Consist communications in the trains: Is it time to use ultra wide-band?" *Computers & Electrical Engineering* 72 (2018. g. nov.), 965.–975. lpp. ISSN: 0045-7906. DOI: 10.1016/J.COMPELECENG.2018.02.023.

[6] Salmento, M. L. G. u. c. „An enhanced receiver for an impulsive UWB-based PLC system for low-bit rate applications". *Digital Signal Processing* 70 (2017. g. nov.), 145.–154. lpp. ISSN: 1051-2004. DOI: 10.1016/J.DSP.2017.08.003.

[7] Duan, S. u. c. „Ultra-Wideband Radio Channel Characteristics for Near-Ground Swarm Robots Communication". *IEEE Transactions on Wireless Communications* 19.7 (2020. g. jūl.), 4715.–4726. lpp. ISSN: 1536-1276. DOI: 10.1109/TWC.2020.2986446.

[8] Rendevski, N. un Cassioli, D. „Potentials of low-complexity Rake receivers for 60 GHz UWB wireless communication systems". *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry, RTSI 2015 – Proceedings* (2015), 94.–99. lpp. DOI: 10.1109/RTSI.2015.7325077.

[9] Ghavami, M., Michael, L. B. un Kohno, R. *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004. DOI: 10.1002/0470867531.

[10] Nguyen, C. un Miao, M. *Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers*. Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-53107-6.

[11] Chandrakasan, A. P. u. c. „Low-Power Impulse UWB Architectures and Circuits". *Proceedings of the IEEE* 97.2 (2009. g. febr.), 332.–352. lpp. DOI: 10.1109/jproc.2008.2008787.

[12] Black, H. S. u. c. „A Multichannel Microwave Radio Relay System". *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 65.12 (1946. g. dec.), 798.–806. lpp. DOI: 10.1109/t-aiee.1946.5059251.

[13] Mahdiraji, G. A. un Zahedi, E. „Comparison of Selected Digital Modulation Schemes (OOK, PPM and DPIM) for Wireless Optical Communications". *2006 4th Student Conference on Research and Development*. 2006. g. jūn., 5.–10. lpp. DOI: 10.1109/SCORED.2006.4339297.

[14] Barnwell, N. u. c. „The miniature optical communication transceiver-A compact, power-efficient lasercom system for deep space nanosatellites". *Aerospace* 6.1 (2019). ISSN: 22264310. DOI: 10.3390/aerospace6010002.

[15] Elganimi, T. Y. „Studying the BER performance, power- and bandwidth- efficiency for FSO communication systems under various modulation schemes." *2013 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AEECT 2013. IEEE Computer Society.* (2013). DOI: 10.1109/AEECT.2013.6716426.

[16] Cui, S., Goldsmith, A. un Bahai, A. „Energy-Efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 22.6 (2004. g. aug.), 1089.–1098. lpp. DOI: 10.1109/jsac.2004.830916.

[17] Hamkins, J. *Pulse Position Modulation*. 2007. g. nov. DOI: 10.1002/9781118256053.ch32.

[18] Dai, L. u. c. „Research on the Pulse-position Modulation in the Digital Communication System". *2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG)*. 2021, 8.–12. lpp. DOI: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00009.

[19] Huan, L. „Simulation on the design of digital pulse position modulation system". *International Conference on Neural Networks, Information, and Communication Engineering (NNICE 2022)*. Izdevis Tiwari, R. SPIE, 2022. g. jūl. DOI: 10.1117/12.2640677.

[20] Proakis, J. un Salehi, M. *Digital Communications, 5th edition*. McGraw-Hill Higher Education, 2008.

[21] Karp, S. un Gagliardi, R. „The Design of a Pulse-Position Modulated Optical Communication System". *IEEE Transactions on Communications* 17.6 (1969. g. dec.), 670.–676. lpp. DOI: 10.1109/tcom.1969.1090162.

[22] Jing, M., Li-ying, T. un Siyuan, Y. „Technologies and applications of free-space optical communication and space optical information network". *Journal of communications and information networks* (2016. g. jūn.). DOI: 10.11959/j.issn.2096-1081.2016.005.

[23] Wilson, B. un Ghassemlooy, Z. „Pulse time modulation techniques for optical communications: a review". *IEE Proceedings J Optoelectronics* 140.6 (1993), 346. lpp. DOI: 10.1049/ip-j.1993.0055.

[24] Saeed, R. u. c. „Ultra Wide Band (UWB) Ad-hoc Networks: Review and Trends". *Journal of Computer Science* 1.1 (2005. g. janv.), 35.–39. lpp. DOI: 10.3844/jcssp.2005.35.39.

[25] *Pulse Position Modulation : Block Diagram, Circuit, Working, Generation with PWM & Its Applications*. URL: https://www.elprocus.com/pulse-position-modulation/.

[26] Green, R. J. „Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications". *Optical Engineering* 46.6 (2007. g. jūn.), 65001. lpp. DOI: 10.1117/1.2746010.

[27] Ai-ping, H. u. c. „A differential pulse position width modulation for optical wireless communication". *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2009, 1773.–1776. lpp. DOI: 10.1109/ICIEA.2009.5138501.

[28] Sacko, D. un Kéïta, A. A. „Techniques of Modulation: Pulse Amplitude Modulation, Pulse Width Modulation, Pulse Position Modulation". *IJEAT* 7.2 (2017. g. dec.), 9. lpp. URL: https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v7i2/B5251127217.pdf.

[29] Jahid, A., Alsharif, M. H. un Hall, T. J. „A contemporary survey on free space optical communication: Potentials, technical challenges, recent advances and research direction". *Journal of Network and Computer Applications* 200 (2022. g. apr.), 103311. lpp. DOI: 10.1016/j.jnca.2021.103311.

[30] Fu, X. u. c. „Research and Simulation of PPM Modulation and Demodulation System on Spatial Wireless Optical Communication". *2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics*. IEEE, 2010. g. jūn. DOI: 10.1109/sopo.2010.5504142.

[31] Tang, W. u. c. „The Research Process, Application, and the Future Development of Pulse-Position Modulation". *Journal of Physics: Conference Series* 2384.1 (2022. g. dec.), 12026. lpp. DOI: 10.1088/1742-6596/2384/1/012026.

[32] Wang, Y. u. c. „Research on PPM Modulation Performance of Deep Space Optical Communication". *2021 International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS)*. 2021, 5.–8. lpp. DOI: 10.1109/EIECS53707.2021.9588043.

[33] Simon, W. P. u. c. „Field-Programmable Gate Array Implementation of a Single Photon-Counting Receive Modem". *Free-Space Laser Communications XXXVI*. Izdevis Hemmati, H. un Robinson, B. S. San Francisco, United States: SPIE, 2024. g. marts, 58. lpp. DOI: 10.1117/12.3001097.

[34] Jhaidri, M.-A. u. c. „Implementation of High-Photon-Efficiency Optical Modem for ESA's Technology Demonstration of Deep-Space Optical Communication with the NASA Psyche Spacecraft". *International Conference on Space Optics – ICSO 2024*. Antibes Juan-les-Pins, France: SPIE, 2025. g. jūl., 211. lpp. DOI: 10.1117/12.3075346.

[35] Sodnik, Z., Furch, B. un Lutz, H. „Free-space laser communication activities in Europe: SILEX and beyond." *Conference Proceedings – Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS (pp. 78–79).* (2006). DOI: 10.1109/LEOS.2006.278845.

[36] Cryan, R. A. un Unwin., R. T. „Optical Employing Space Communications Pulse Position Modulation". *IEE Colloquium on Advanced Modulation and Coding Techniques for Satellite Communications.* (1992).

[37] Guelman, M. u. c. „Acquisition and Pointing Control for Inter-Satellite Laser Communications". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 40.4 (2004. g. okt.), 1239.–1248. lpp. ISSN: 1557-9603. DOI: 10.1109/TAES.2004.1386877.

[38] Al Zaman, A. un Islam, N. „Modulation Schemes and Pulse Shaping in Ultra-Wideband". *IEEE SoutheastCon 2008*. 2008. g. apr., 142.–146. lpp. DOI: 10.1109/SECON.2008.4494274.

[39] Huo, X. u. c. „C-Band 200 Gbit/s/λ PS-PAM-8 Transmission Over 2-km SSMF for Optical Interconnections". *IEEE Photonics Journal* 16.3 (2024), 1.–7. lpp. DOI: 10.1109/JPHOT.2024.3381232.

[40] Pan, S. un Yao, J. „UWB-Over-Fiber Communications: Modulation and Transmission". *Journal of Lightwave Technology* 28.16 (2010), 2445.–2455. lpp. DOI: 10.1109/JLT.2010.2043713.

[41] Pan, S. un Yao, J. „Performance evaluation of UWB signal transmission over optical fiber". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 28.6 (2010), 889.–900. lpp. DOI: 10.1109/JSAC.2010.100813.

[42] Abraha, S. T. u. c. „Performance Evaluation of IR-UWB in Short-Range Fiber Communication Using Linear Combination of Monocycles". *Journal of Lightwave Technology* 29.8 (2011), 1143.–1151. lpp. DOI: 10.1109/JLT.2011.2120595.

[43] Edwards, B. L. „Latest Status of the CCSDS Optical Communications Working Group". *2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, ICSOS 2022*. IEEE, 2022. g. marts, 1.–6. lpp. ISBN: 9781665434393. DOI: 10.1109/ICSOS53063.2022.9749734.

[44] Kim, M.-J. u. c. „Performance Analysis and Implementation of Biased MC-PPM for Optical Energy Transfer and Communication System". *Physical Communication* 71 (2025. g. aug.), 102684. lpp. ISSN: 1874-4907. DOI: 10.1016/j.phycom.2025.102684.

[45] Huang, J. u. c. „Real-Time and High-Speed Underwater Photon-Counting Communication Based on SPAD and PPM Symbol Synchronization". *IEEE Photonics Journal* 13.5 (2021. g. okt.), 1.–9. lpp. ISSN: 1943-0655. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3113659.

[46] Kaszubowska-Anandarajah, A. u. c. „An IR-UWB Photonic Distribution System". *IEEE Photonics Technology Letters* 20.22 (2008. g. nov.), 1884.–1886. lpp. ISSN: 1941-0174. DOI: 10.1109/LPT.2008.2004989.

[47] Fujiwara, Y. „Self-Synchronizing Pulse Position Modulation With Error Tolerance". *IEEE Transactions on Information Theory* 59.9 (2013. g. sept.), 5352.–5362. lpp. ISSN: 1557-9654. DOI: 10.1109/TIT.2013.2262094.

[48] Mietzner, J. un Lampe, L. „Nested PPM for Visible Light Communication With Heterogeneous Optical Receivers". *IEEE Photonics Journal* 16.4 (2024), 1.–12. lpp. DOI: 10.1109/JPHOT.2024.3406156.

[49] Dix-Matthews, B. P. u. c. „Ultra-Wideband Free-Space Optical Phase Stabilization". *IEEE Communications Letters* 25.5 (2021. g. maijs), 1610.–1614. lpp. ISSN: 1089-7798. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3053943.

[50] Landolsi, T. un Elrefaie, A. F. „Effects of pointing errors and channel fading on the performance of free-space optically-preamplified PPM systems". *International Journal of Communication Systems* 29.15 (2016. g. okt.), 2313.–2324. lpp. ISSN: 1074-5351. DOI: 10.1002/dac.3166.

[51] Wen, Y. u. c. „Free Space Optical Integrated Sensing and Communication Based on LFM and CPM". *IEEE Communications Letters* 28.1 (2023. g. janv.), 43.–47. lpp. ISSN: 15582558. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3332658.

[52] Qaisar, M. U. F. u. c. „The Role of ISAC in 6G Networks: Enabling Next-Generation Wireless Systems". *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 13 (2026), 7825.–7861. lpp. DOI: 10.1109/TNSE.2026.3666665.

[53] Perez Santacruz, J. „Analog Radio-over-Fiber for 5G/6G Millimeter-Wave Communications". Ph. D. Thesis. Eindhoven University of Technology, 2022.

[54] Singh, G. u. c. „Toward 6G-V2X: Aggregated RF-VLC for Ultra-Reliable and Low-Latency Autonomous Driving". *IEEE Communications Standards Magazine* 8.4 (2024), 80.–87. lpp. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2300005.

[55] Colson, S. un Hoff, H. „Ultra-Wideband Technology for Defence Applications”. *2005 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*. 2005. g. sept., 615.–620. lpp. DOI: 10.1109/ICU.2005.1570059.

[56] Kaushik, A. u. c. „Integrated Sensing and Communications for IoT: Synergies with Key 6G Technology Enablers”. *IEEE Internet of Things Magazine* 7.5 (2024), 136.–143. lpp. DOI: 10.1109/IOTM.001.2400052.

[57] Campbell, S. P. *Integrated Sensing and Communications (ISAC) Report*. Tehn. ziņ. Findings from the National ISAC Workshop, April 9–10, 2025. George Mason University, Office of Research, Innovation, un Economic Impact, 2025. g. maijs. URL: https://rt.cto.mil/wp-content/uploads/2025/07/ISAC-Report-from-Apr-2025-Workshop.pdf.

[58] Liu, F. u. c. „ISAC With UWB: Reliable Decoupling and Target Sensing”. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 23.11 (2024), 15957.–15972. lpp. DOI: 10.1109/TWC.2024.3435070.

[59] Wang, X. u. c. „Fundamental Limits on Joint Delay and Doppler Characterization in UWB ISAC Systems”. *2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall)*. 2023, 1.–6. lpp. DOI: 10.1109/VTC2023-Fall60731.2023.10333549.

[60] Cai, S. u. c. „Pulse-Based ISAC: Data Recovery and Ranging Estimation for Multi-Path Fading Channels”. *IEEE Transactions on Communications* 71.8 (2023), 4819.–4838. lpp. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3277039.

[61] Yu, M. u. c. „FPGA-Based Dual-Pulse Anti-Interference Lidar System Using Digital Chaotic Pulse Position Modulation”. *IEEE Photonics Technology Letters* 33.15 (2021), 757.–760. lpp. DOI: 10.1109/LPT.2021.3093109.

[62] Yeo, J. u. c. „A Flash LiDAR with SA-Based Pulse Position Modulation for Multi-user Interference Cancellation”. *2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2025, 1.–5. lpp. DOI: 10.1109/ISCAS56072.2025.11044208.

[63] Alabd, M. B. u. c. „Modified Pulse Position Modulation for Joint Radar Communication Based on Chirp Sequence”. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 32.10 (2022), 1247.–1250. lpp. DOI: 10.1109/LMWC.2022.3169287.

[64] Shi, X. u. c. „BER Performance Analysis of Non-Coherent Q-Ary Pulse Position Modulation Receivers on AWGN Channel”. *Sensors* 21.18 (2021). DOI: 10.3390/s21186102.

[65] Pulkkinen, M. u. c. „45.2% Energy efficiency improvement of UWB IR Tx by use of differential PPM in 180nm CMOS". *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2016, 193.–196. lpp. DOI: 10.1109/ISCAS.2016.7527203.

[66] Migla, S. u. c. „A Design of UWB Communication Testbed with Event Timer-based PPM Demodulator". *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. 2022, 691.–694. lpp. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037100.

[67] Selis, O. u. c. „Demonstration of 50 ps Per-Position Differential Pulse Position Modulation Data Transmission". *2023 IEEE 10th Jubilee Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*. 2023, 1.–4. lpp. DOI: 10.1109/AIEEE58915.2023.10134802.

[68] Sics, P. E. u. c. „Implementation of Reconfigurable 149Mbps TDC-Based PPM Transceiver". *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. 2024, 706.–710. lpp. DOI: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597124.

[69] Migla, S. u. c. „Error Analysis and Correction Techniques for PPM Communication Links with Jitter and Clock Drift". *2024 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS)*. 2024, 1.–4. lpp. DOI: 10.1109/COMCAS58210.2024.10666259.

[70] Aboltins, A. u. c. „Passive Electrical and Optical Methods of Ultra-Short Pulse Expansion for Event Timer-Based TDC in PPM Receiver". *Electronics* 12.22 (2023). DOI: 10.3390/electronics12224634.

[71] Migla, S. u. c. „Ultra-Wideband Analog Radio-over-Fiber Communication System Employing Pulse-Position Modulation". *Applied Sciences* 15.8 (2025). DOI: 10.3390/app15084222.

[72] Migla, S. u. c. „Demonstration of Integrated Sensing and Communications in an ARoF-Based Radar System Utilizing Pulse Position Modulation". *IEEE Access* 14 (2026), 76251.–76264. lpp. DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3693952.

[73] Li, L. un Townsend, J. K. „M-Ary PPM for Transmitted Reference Ultra-Wideband Communications". *IEEE Transactions on Communications* 58.7 (2010. g. jūl.), 1912.–1917. lpp. ISSN: 1558-0857. DOI: 10.1109/TCOMM.2010.07.080675.

[74] Luo, X. un Giannakis, G. B. „Achievable rates of transmitted-reference ultra-wideband radio with PPM". *IEEE Transactions on Communications* 54 (9 2006. g. sept.), 1536.–1541. lpp. ISSN: 00906778. DOI: 10.1109/TCOMM.2006.881203.

[75] Aliaberi, A., Sofotasios, P. C. un Muhaidat, S. „Modulation Schemes for Visible Light Communications". *2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*. 2019. g. apr., 1.–10. lpp. DOI: 10.1109/COMMNET.2019.8742376.

[76] Dahri, F. A., Ali, S. un Jawaid, M. M. „A Review of Modulation Schemes for Visible Light Communication". *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security* 18.2 (2018), 117.–125. lpp.

[77] *Optical communications coding and synchronization*. 1. izdev. Recommended Standard CCSDS 142.0-B-1. Consultative Committee for Space Data Systems. Washington, DC, USA, 2019. g. aug. URL: https://ccsds.org/Pubs/142x0b1.pdf.

[78] Urkowitz, H. „Energy detection of unknown deterministic signals". *Proceedings of the IEEE* 55.4 (1967), 523.–531. lpp. DOI: 10.1109/proc.1967.5573.

[79] Dillard, G. „Pulse-Position Modulation Based on Energy Detection". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-9.4 (1973. g. jūl.), 499.–503. lpp. DOI: 10.1109/taes.1973.309631.

[80] Durisi, G. un Benedetto, S. „Comparison between coherent and noncoherent receivers for UWB communications". *Eurasip Journal on Applied Signal Processing* 2005.3 (2005), 359.–368. lpp. ISSN: 11108657. DOI: 10.1155/ASP.2005.359.

[81] Hussein, S. S., youssif, A. un M., G. H. H. „Performance Analysis and Evaluation of TH-PPM and TH-BPSK under Dynamic Channel Environment". *International Journal of Future Computer and Communication* (2012), 352.–355. lpp. ISSN: 20103751. DOI: 10.7763/IJFCC.2012.V1.94.

[82] Khani, H. „Improved Detection Schemes for Non-coherent Pulse-Position Modulation". *Wireless Personal Communications* 131.3 (2023. g. aug.), 2173.–2192. lpp. ISSN: 0929-6212. DOI: 10.1007/s11277-023-10537-7.

[83] Cassioli, D. u. c. „Low Complexity Rake Receivers in Ultra-Wideband Channels". *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6.4 (2007. g. apr.), 1265.–1275. lpp. ISSN: 1536-1276. DOI: 10.1109/TWC.2007.348323.

[84] Zheng, Y. u. c. „A 0.18 um CMOS Dual-Band UWB Transceiver". *2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers*. IEEE, 2007. g. febr., 114.–590. lpp. ISBN: 1-4244-0852-0. DOI: 10.1109/ISSCC.2007.373614.

[85] Munirathinam, R. u. c. „Chaotic Non-Coherent Pulse Position Modulation Based Ultra-Wideband Communication System". *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. IEEE, 2021, 52.–57. lpp. DOI: 10.1109/mttw53539.2021.9607075.

[86] Lee, F. un Chandrakasan, A. „A 2.5nJ/b 0.65V 3-to-5GHz Sub banded UWB Receiver in 90nm CMOS". *Int. Solid State Circuits Conference (ISSCC 07)*. 2007, 116.–117. lpp.

[87] Shariat, M. u. c. „Comparison Between Several Methods of PPM Demodulation Based on Iterative Techniques". *Telecommunications and Networking – ICT 2004*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, 554.–559. lpp. DOI: 10.1007/978-3-540-27824-5_75.

[88] Sushchik, M. u. c. „Chaotic pulse position modulation: a robust method of communicating with chaos". *IEEE Communications Letters* 4.4 (2000. g. apr.), 128.–130. lpp. DOI: 10.1109/4234.841319.

[89] Wang, W. u. c. „Under-Sampling of PPM-UWB Communication Signals Based on CS and AIC". *Circuits, Systems, and Signal Processing* 34.11 (2015. g. nov.), 3595.–3609. lpp. ISSN: 0278-081X. DOI: 10.1007/s00034-015-0026-4.

[90] Kalisz, J. „Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution". *Metrologia* 41.1 (2003. g. dec.), 17.–32. lpp. DOI: 10.1088/0026-1394/41/1/004.

[91] Mahjoubfar, A. u. c. „Time stretch and its applications". *Nature Photonics* 11.6 (2017. g. jūn.), 341.–351. lpp. DOI: 10.1038/nphoton.2017.76.

[92] Jonass, J., Bespal'ko, V. un Lapkovskis, V. „Precision Time Meters for Ground and Space Applications". *Space-Based Lidar Remote Sensing Techniques and Emerging Technologies*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, 309.–318. lpp. DOI: 10.1007/978-3-031-53618-2_27.

[93] Steindorfer, M. A. u. c. „Space Debris and Satellite Laser Ranging Combined Using a Megahertz System". *Nature Communications* 16.1 (2025. g. janv.), 575. lpp. ISSN: 2041-1723. DOI: 10.1038/s41467-024-55777-8.

[94] Piedra, M. A. S. u. c. „First Results from the Newly Modernized San Fernando Laser Station: Commemorating 45 Years of Service". *9th European Conference on Space Debris*. 9. sējums. Bonn, Germany, ESA Space Debris Office, 2025. g. apr.

[95] Merz, R., Botteron, C. un Farine, P.-A. „A novel low complexity data demodulation algorithm for pulse position modulation". *Digital Signal Processing* 22.3 (2012. g. maijs), 535.–543. lpp. DOI: 10.1016/j.dsp.2011.08.008.

[96] Kim, J. un Clerckx, B. „Wireless Information and Power Transfer for IoT: Pulse Position Modulation, Integrated Receiver, and Experimental Validation". *IEEE Internet of Things Journal* 9.14 (2022. g. jūl.), 12378.–12394. lpp. DOI: 10.1109/jiot.2021.3135712.

[97] ScioSense B.V. *Datasheet of TDC-GPX2*. 2018. URL: https://www.sciosense.com/wp-content/uploads/documents/TDC-GPX2-Datasheet.pdf.

[98] Mezerins, A. un Bespal'ko, V. „Estimation of analog-to-time and time-to-digital conversion efficiency in analog optical communication system testbed". *Proceedings – 2015 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2015*. IEEE, 2015. g. nov., 211.–214. lpp. ISBN: 9781467374316. DOI: 10.1109/RTUWO.2015.7365754.

[99] Solovjova, T. u. c. „Picosecond Pulse Expansion Using The Low-Pass Filter in Event Timer-Based PPM Communication System". *Proceedings of 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications, MTTW 2022*. IEEE, 2022. g. okt., 29.–34. lpp. DOI: 10.1109/MTTW56973.2022.9942566.

[100] Hamil, H. u. c. „Design and FPGA real-time implementation of PWM and PPM modulation for Ultra Wide Band applications". *2019 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)*. 2019, 1.–5. lpp. DOI: 10.1109/ISPA48434.2019.8966916.

[101] Roche, R. J. u. c. „Reconfigurable, intelligently-adaptive, communication system, an SDR platform". *34th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2016*. 2016. ISBN: 9781624104572. DOI: 10.2514/6.2016-5718.

[102] Schlemmer, H. u. c. „Results from a CCSDS-compliant High Photon Efficiency Downlink SDR Platform". *2019 8th International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC)*. IEEE, 2019. g. sept., 1.–5. lpp. ISBN: 978-1-7281-3700-1. DOI: 10.1109/TTC.2019.8895458.

[103] *Optical communications physical layer*. 1. izdev. Recommended Standard CCSDS 141.0-B-1. Consultative Committee for Space Data Systems. Washington, DC, USA, 2019. g. aug. URL: https://ccsds.org/Pubs/141x0b1.pdf.

[104] Spolitis, S. u. c. „Demonstration of 512-TR-PPM Fiber Optical Transmission Link". *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. 2023, 1416.–1422. lpp. DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221307.

[105] Sics, P. E. u. c. „Programmable Delay Line Based High-speed PPM Modulator with 50 ps Time Resolution". *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. 2023, 1779.–1786. lpp. DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221245.

[106] Barrett, T. W. „History of Ultra Wideband Communications and Radar: Part I, UWB Communications". *Microwave Journal* (2001. g. janv.), 22.–56. lpp.

[107] Barrett, T. W. „History of Ultra Wideband Communications and Radar: Part II, UWB Radars and Sensors". *Microwave Journal* (2001. g. febr.), 22.–52. lpp.

[108] O'Meara, T. R. „The synthesis of band-pass, all-pass time delay networks with graphical approximation techniques". *Research Rept. 114* (1959).

[109] Hoffswell, R. A. „A Microstrip Line Stretcher". *Review of Scientific Instruments* 41.9 (2003. g. nov.), 1330.–1331. lpp. DOI: 10.1063/1.1684808.

[110] Caputi, W. J. „Stretch: A Time-Transformation Technique". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-7.2 (1971), 269.–278. lpp. DOI: 10.1109/TAES.1971.310366.

[111] Ishii, M., Yamada, G. un Miyatake, H. „US Patent No. US20130141148A1, Pulse stretching circuit and method". 2011. URL: https://patents.google.com/patent/US20130141148A1/en.

[112] Xiang, B. u. c. „An integrated Ku-band nanosecond time-stretching system using improved dispersive delay line (DDL)". *2012 IEEE 12th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*. 2012, 151.–154. lpp. DOI: 10.1109/SiRF.2012.6160140.

[113] Zverev, A. I. *Handbook of Filter Synthesis*. John Wiley un Sons, Inc., 1967.

[114] Monti, G. un Tarricone, L. „Negative Group Velocity in a Split Ring Resonator-Coupled Microstrip Line". *Progress In Electromagnetics Research* 94 (2009), 33.–47. lpp. DOI: 10.2528/PIER09052801.

[115] Regalia, P., Mitra, S. un Vaidyanathan, P. „The digital all-pass filter: a versatile signal processing building block". *Proceedings of the IEEE* 76.1 (1988), 19.–37. lpp. DOI: 10.1109/5.3286.

[116] Caloz, C. u. c. „Analog Signal Processing: A Possible Alternative or Complement to Dominantly Digital Radio Schemes". *IEEE Microwave Magazine* 14.6 (2013), 87.–103. lpp. DOI: 10.1109/MMM.2013.2269862.

[117] Elamien, M. B. u. c. „Synthesis of Wideband High-Quality Factor Delay- Tunable Fully Differential All-Pass Filters". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 68.10 (2020), 4348.–4360. lpp. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3011723.

[118] França Ferreira, J. A. de u. c. „Design and Synthesis of Arbitrary Group Delay Filters for Integrated Analog Signal Processing". *2018 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. 2018, 613.–616. lpp. DOI: 10.1109/ICECS.2018.8617912.

[119] Zhang, Q., Gupta, S. un Caloz, C. „Synthesis of Narrowband Reflection-Type Phasers With Arbitrary Prescribed Group Delay". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 60.8 (2012), 2394.–2402. lpp. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2198486.

[120] Zhang, Q., Sounas, D. L. un Caloz, C. „Synthesis of Cross-Coupled Reduced-Order Dispersive Delay Structures (DDSs) With Arbitrary Group Delay and Controlled Magnitude". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 61.3 (2013), 1043.–1052. lpp. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2241785.

[121] Gupta, S. u. c. „Group-Delay Engineered Noncommensurate Transmission Line All-Pass Network for Analog Signal Processing". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 58.9 (2010), 2392.–2407. lpp. DOI: 10.1109/TMTT.2010.2058933.

[122] Avignon-Meseldzija, E., Anastasov, J. un Milic, D. „A linear group delay filter with tunable positive slope for analog signal processing". *International Journal of Circuit Theory and Applications* 49.5 (2021), 1307.–1326. lpp. DOI: https://doi.org/10.1002/cta.2995.

[123] Mondal, I. un Krishnapura, N. „Expansion and Compression of Analog Pulses by Bandwidth Scaling of Continuous-Time Filters". *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 65.9 (2018), 2703.–2714. lpp. DOI: 10.1109/TCSI.2018.2799080.

[124] Pactitis, S. A. *Active Filters: Theory and Design*. CRC Press, 2007.

[125] Rauscher, C. „Microwave Active Filters Based on Transversal and Recursive Principles". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 33.12 (1985), 1350.–1360. lpp. DOI: 10.1109/TMTT.1985.1133225.

[126] Xia, J., Law, C. L. un Jiang, J. „A Novel 3–5 GHz Active Matched Filter for Impulse Radio Ultra-Wideband". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 19.7 (2009), 458.–460. lpp. DOI: 10.1109/LMWC.2009.2022133.

[127] Jarjar, M. un Ouazzani, N. P. el. „Three branch microwave channelized active bandpass filter". *2019 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. 2019, 1.–5. lpp. DOI: 10.1109/WINCOM47513.2019.8942576.

[128] Gomez-Garcia, R. u. c. „Flexible Filters: Reconfigurable-Bandwidth Bandpass Planar Filters with Ultralarge Tuning Ratio". *IEEE Microwave Magazine* 15.5 (2014), 43.–54. lpp. DOI: 10.1109/MMM.2014.2321094.

[129] Thomson, W. „Delay networks having maximally flat frequency characteristics". English. *Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering* 96 (44 1949. g. nov.), 487–490(3). ISSN: 0369-8947. URL: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/pi-3.1949.0101.

[130] Mini-circuits. *Low Pass Filter SLP-2400+*. URL: https://www.minicircuits.com/pdfs/SLP-2400+.pdf.

[131] Paschotta, R. *Pulse Stretchers*. URL: https://www.rp-photonics.com/pulse_stretchers.html.

[132] Steed, R. *Modelling of Optical Pulse Stretching using Circulating Cavities*. 2015. g. febr. DOI: 10.13140/2.1.3310.4169.

[133] Ulyanov, I., Przhiialkovskii, D. V. un Butov, O. V. „Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers". *Results in Physics* 32 (2022), 105101. lpp. ISSN: 2211-3797. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.105101.

[134] Williamson, A. P. un Kiefer, J. „Polarization-controlled optical ring cavity (PORC) tunable pulse stretcher". *Optics Communications* 372 (2016), 98.–105. lpp. ISSN: 0030-4018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.03.091.

[135] Saraceno, C. „Pulse stretching and compressing using grating pairs". *Photonics and Ultrafast Laser Science*. Ibsen Photonics A/S, 2017, 1.–8. lpp. URL: https://ibsen.com/wp-content/uploads/White-paper-Pulse-stretching-and-compressing-using-grating-pairs_v1.pdf.

[136] Lim, C. u. c. „Evolution of Radio-Over-Fiber Technology". *Journal of Lightwave Technology* 37.6 (2019), 1647.–1656. lpp. DOI: 10.1109/JLT.2018.2876722.

[137] Beas, J. u. c. „Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey". *IEEE Communications Surveys &amp Tutorials* PP (2013. g. marts), 1.–27. lpp. DOI: 10.1109/SURV.2013.013013.00135.

[138] ITU-R. *Report ITU-R M.2516-0: Future technology trends of terrestrial International Mobile Telecommunications systems towards 2030 and beyond*. 2022. g. nov.

[139] Wikström, G. u. c. „Challenges and Technologies for 6G". *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. 2020, 1.–5. lpp. DOI: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083880.

[140] Puerta, R. u. c. „Analog Mobile Fronthaul for 6G and Beyond". *Journal of Lightwave Technology* (2024), 7458.–7467. lpp. DOI: 10.1109/JLT.2024.3435770.

[141] Podbregar, L. u. c. „Advances in and Applications of Microwave Photonics in Radar Systems: A Review". *Photonics* 12.6 (2025). ISSN: 2304-6732. DOI: 10.3390/photonics12060529.

[142] Nakamura, K. u. c. „Verification of Applicability of 90 GHz Band Millimeter-Wave for Obstacle Detection to Railway". *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 18.6 (2022), 960.–969. lpp. DOI: https://doi.org/10.1002/tee.23766.

[143] Kohmura, A. u. c. „Optical fiber connected millimeter-wave radar for FOD detection on runway". *2013 European Radar Conference*. 2013, 41.–44. lpp.

[144] Kawanishi, T. u. c. „Optical fiber network-connected distributed mm-wave radar system". *2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM)*. 2017, 197.–198. lpp. DOI: 10.1109/PHOSST.2017.8012718.

[145] Ostrovskis, A. u. c. „Experimental Demonstration of Hybrid Photonics-BasedARoF System for 5G and B5G Networks". *2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. 2022, 1.–5. lpp. DOI: 10.23919/SoftCOM55329.2022.9911478.

[146] Jiang, W. un Schotten, H. D. „Full-Spectrum Wireless Communications for 6G and Beyond: From Microwave, Millimeter-Wave, Terahertz to Lightwave". *2023 IEEE 3rd International Conference on Computer Communication and Artificial Intelligence (CCAI)*. 2023, 353.–357. lpp. DOI: 10.1109/CCAI57533.2023.10201316.

[147] Li, W. u. c. „Over 100 Gb/s mm-wave delivery with 4600 m wireless distance based on dual polarization multiplexing". *Science China Information Sciences* 66.224301 (2023), 1869.–1919. lpp. DOI: 10.1007/s11432-023-3834-5.

[148] Jia, S. u. c. „Integrated Dual-Laser Photonic Chip for High-Purity Carrier Generation Enabling Ultrafast Terahertz Wireless Communications". *Nature Communications* 13.1 (2022. g. marts), 1388. lpp. ISSN: 2041-1723. DOI: 10.1038/s41467-022-29049-2.

[149] Jiang, T. u. c. „Photonics-Enabled 6G Distributed MIMO: Experimental Study in an Indoor Environment". *2024 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. 2024, 1.–5. lpp. DOI: 10.1109/MWP62612.2024.10736285.

[150] Anes, B. un Riad, B. A. „A new bidirectional analog radio over fiber transmission for 5G millimeter wave communication systems". *2022 International Conference of Advanced Technology in Electronic and Electrical Engineering (ICATEEE)*. 2022, 1.–6. lpp. DOI: 10.1109/ICATEEE57445.2022.10093741.

[151] Perez-Galacho, D., Sartiano, D. un Sales, S. „Analog Radio over Fiber Links for Future 5G Radio Access Networks". *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2019, 1.–4. lpp. DOI: 10.1109/ICTON.2019.8840516.

[152] Delmade, A. u. c. „Expanded Gain-Switched Comb Source for 180 – 260 GHz Sub-THz Analog Radio-over-Fiber 6G Wireless System". *2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2024, 1.–3. lpp.

[153] de Souza Lopes, C. H., Saia Lima, E. un Sodré Junior, A. C. „RoF/FSO-based Fronthaul for 5G Systems and Beyond". *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. 2021. g. okt., 1.–3. lpp. DOI: 10.1109/IMOC53012.2021.9624921.

[154] Yao, J. „Microwave Photonics". *Journal of Lightwave Technology* 27.3 (2009. g. febr.), 314.–335. lpp. ISSN: 1558-2213. DOI: 10.1109/JLT.2008.2009551.

[155] Nguyen, D.-N. u. c. „Optical Hybrid Fiber/Free-Space and 25 GHz Wireless Transmission Using LTE M-QAM Signals". *2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. 2019. g. nov., 1.–6. lpp. DOI: 10.1109/WPMC48795.2019.9096169.

[156] Azizpour, R. u. c. „Multi-Channel Radio-Over-Fiber Communication Systems Through Modulation Instability Phenomenon". *IEEE Photonics Journal* 16.5 (2024), 1.–13. lpp. DOI: 10.1109/JPHOT.2024.3446314.

[157] Jia, Z., Yu, J. un Chang, G.-K. „A Full-Duplex Radio-over-Fiber System Based on Optical Carrier Suppression and Reuse". *IEEE Photonics Technology Letters* 18.16 (2006. g. aug.), 1726.–1728. lpp. ISSN: 1941-0174. DOI: 10.1109/LPT.2006.879946.

[158] Eventech LTD. *ESTT 7 Series*. URL: https://eventechsite.com/products/%5C#estt7series.

[159] Srivastav, A. un Mandal, S. „Radars for Autonomous Driving: A Review of Deep Learning Methods and Challenges". *IEEE Access* 11 (2023), 97147.–97168. lpp. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312382.

[160] Enayati, J., Asef, P. un Wilson, P. „Resilient Multi-Range Radar Detection System for Autonomous Vehicles – A New Statistical Method". *Journal of Electrical Engineering and Technology* 19 (2023. g. maijs), 15. lpp. DOI: 10.1007/s42835-023-01567-z.

[161] Ruiz-Carregal, G. u. c. „Ku-Band SAR-Drone System and Methodology for Repeat-Pass Interferometry". *Remote Sensing* 16.21 (2024). DOI: 10.3390/rs16214069.

[162] Nandana, V. u. c. „Characterization of Drop Size Distribution in Urban Heavy Rainfall Event Using Doppler Weather Radar and Laser Precipitation Monitor". *Remote Sensing in Earth Systems Sciences* 9 (2025. g. nov.). DOI: 10.1007/s41976-025-00251-2.

[163] Gini, F. „Grand Challenges in Radar Signal Processing". *Frontiers in Signal Processing* 1 (2021. g. marts). DOI: 10.3389/frsip.2021.664232.

[164] Yuksekkaya, F., Franchi, N. un Lubke, M. „On the Detection of Vulnerable Road Users—Simulating Limits of an FMCW Radar". *Electronics* 13 (2024. g. jūn.), 2547. lpp. DOI: 10.3390/electronics13132547.

[165] Santacruz, J. P. u. c. „Analysis and Compensation of Phase Noise in FMCW LiDAR Sensors". *J. Lightwave Technol.* 43.12 (2025. g. jūn.), 5636.–5644. lpp.

[166] Bauduin, M. un Bourdoux, A. „Impact of Phase Noise on FMCW and PMCW Radars". *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*. 2023, 1.–6. lpp. DOI: 10.1109/RadarConf2351548.2023.10149598.

[167] Tschapek, P. u. c. „Detailed Analysis and Modeling of Phase Noise and Systematic Phase Distortions in FMCW Radar Systems". *IEEE Journal of Microwaves* 2.4 (2022), 648.–659. lpp. DOI: 10.1109/JMW.2022.3195574.

[168] Liu, F. u. c. „Seventy Years of Radar and Communications: The road from separation to integration". *IEEE Signal Processing Magazine* 40.5 (2023), 106.–121. lpp. DOI: 10.1109/MSP.2023.3272881.

[169] *Super High Frequency (SHF) Communication Market Report, Industry and Market Size & Revenue, Share, Forecast 2024–2030*. Published August 2025; Report ID: 12970351; Historical Data: 2017–2023. Strategic Market Research, 2025. URL: https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/super-high-frequency-communication-market.

[170] Rieländer, D. u. c. „ESA Ground Infrastructure for the NASA/JPL PSYCHE Deep-Space Optical Communication Demonstration". *International Conference on Space Optics – ICSO 2022*. Izdevis Minoglou, K., Karafolas, N. un Cugny, B. Dubrovnik, Croatia: SPIE, 2023. g. jūl., 13. lpp. DOI: 10.1117/12.2688805.

[171] Khatri, F. I. u. c. „Space-to-Ground Optical Interface Verification for the Orion Artemis II Optical (O2O) Communications Demonstration". *2023 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*. 2023. g. okt., 26.–30. lpp. DOI: 10.1109/ICSOS59710.2023.10491223.

[172] Chen, P. u. c. „Range-Velocity Measurement Accuracy Improvement Based on Joint Spatiotemporal Characteristics of Multi-Input Multi-Output Radar". *Remote Sensing* 16.14 (2024. g. jūl.). ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs16142648.

[173] Jacobs, L. u. c. „On the Accuracy of Automotive Radar Tracking". *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. 2023. g. jūn., 1.–6. lpp. DOI: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200523.

[174] Singh, P. u. c. „Comprehensive Survey on Radar Systems and Its Target Classification Techniques". *Journal of Electronics and Electrical Engineering* (2025. g. febr.), 234.–269. lpp. ISSN: 2972-3280. DOI: 10.37256/jeee.4120255934.

[175] Blanche, P.-A. u. c. „A 300 THz Tabletop Radar Range System with Sub-Micron Distance Accuracy". *Scientific Reports* 8.1 (2018. g. sept.), 14443. lpp. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-018-32846-9.



Sandis Migla dzimis 1999. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis bakalaura grādu elektrozinātnē (2021) un maģistra grādu elektronikā un vadošā elektronikas inženiera kvalifikāciju (2023). Kopš 2020. gada strādā Rīgas Tehniskajā universitātē, šobrīd ieņemot pētnieka un lektora amatus. Zinātniskās intereses ir saistītas ar integrēto jušanu un komunikāciju, kosmosa sakariem un radara sistēmām.