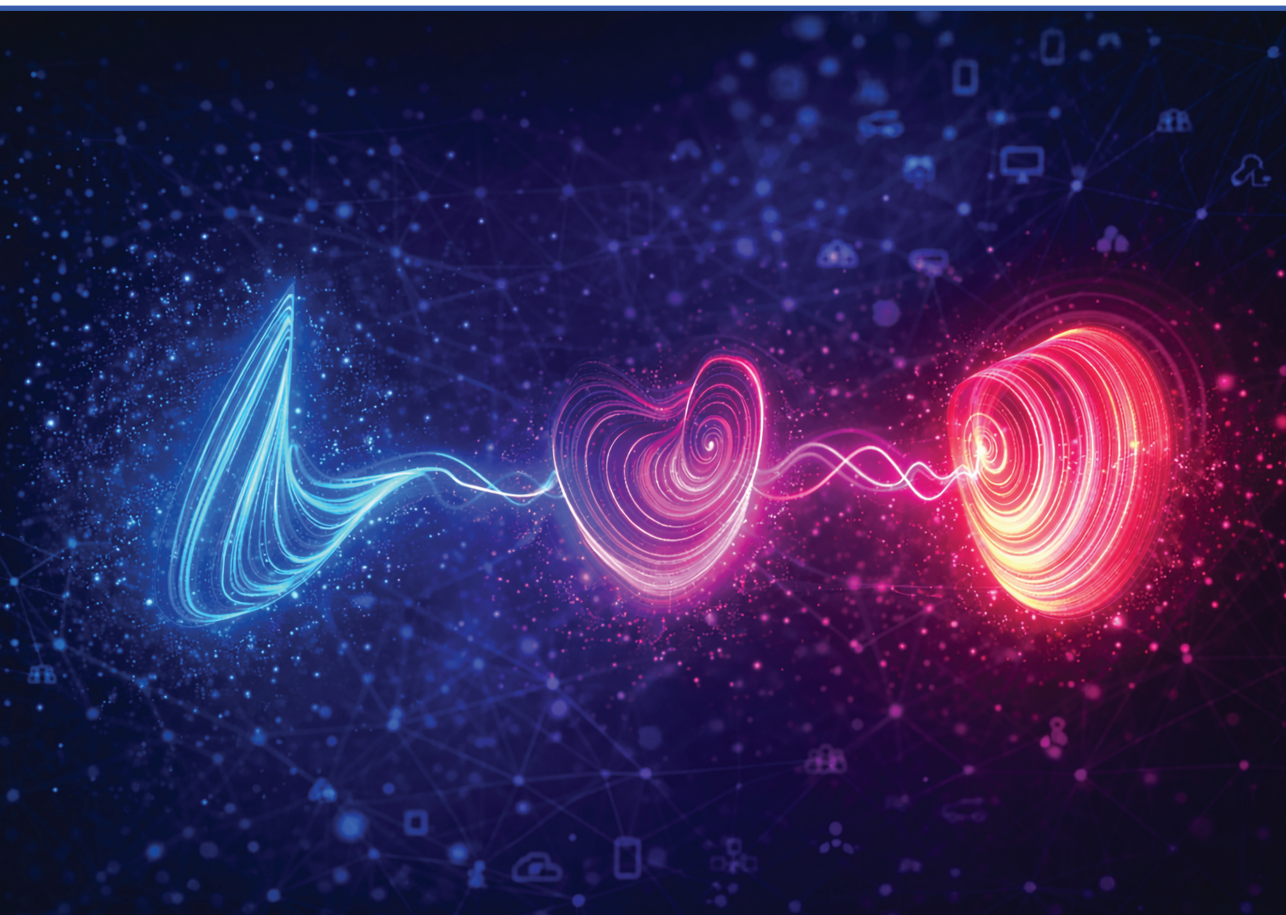


Darja Čirjuļina

# HAOSĀ BALSTĪTU SAKARU SISTĒMU PROJEKTĒŠANA UN VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA TROKŠŅA UN DIVSTARU IZPLATĪŠANĀS KANĀLOS

Promocijas darba kopsavilkums



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

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

**Darja Čirjuļina**

Doktora studiju programmas “Elektronika” doktorante

## HAOSĀ BALSTĪTU SAKARU SISTĒMU PROJEKTĒŠANA UN VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA TROKŠŅA UN DIVSTARU IZPLATĪŠANĀS KANĀLOS

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskie vadītāji:

asociētais profesors *Ph. D.*

DENISS KOLOSOVS

profesors *Dr. sc. ing.*

DMITRIJS PIKUĻINS

tenūrprofesors *Ph. D.*

XIAODAN PANG

RTU Izdevniecība

Rīga 2026

Čirjuļina, D. Haosā balstītu sakaru sistēmu projektēšana un veiktspējas novērtēšana trokšņa un divstaru izplatīšanās kanālos. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 50 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2026. gada 2. februāra lēmumu, protokols Nr. 47.



Promocijas darba pētījumu daļēji atbalstīja pētniecības un attīstības grants Nr. RTU-PA-2024/1-0064 ES RRF projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 ietvaros.

Vāka attēls radīts, izmantojot *ChatGPT*.

<https://doi.org/10.7250/9789934372780>

ISBN 978-9934-37-278-0 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 24. aprīlī plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Ipatovs  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr.* Christos Volos  
Saloniku Aristoteļa universitāte, Grieķija

Docents *Ph. D.* Lazaros Moysis  
Nova Goricas universitāte, Slovēnija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi 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.

Darja Čirjuļina \_\_\_\_\_

Datums: \_\_\_\_\_

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 51 attēls, astoņas tabulas, divi pielikumi, kopā 97 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 73 nosaukumi.

# SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS . . . . .	6
IEVADS . . . . .	7
Tēmas aktualitāte . . . . .	7
Mērķis un uzdevumi . . . . .	9
Pētījuma metodoloģija . . . . .	10
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti . . . . .	11
Aizstāvamās tēzes . . . . .	12
Aprobācija un praktiskā nozīme . . . . .	13
Darba struktūra . . . . .	17
1. HAOTISKIE OSCILATORI . . . . .	19
1.1. Kolpica haosa oscilators . . . . .	19
Matemātiskais modelis . . . . .	19
Pamatfrekvence . . . . .	21
Skaitliskā modelēšana un prototipa mērījumi . . . . .	21
1.2. Viļņas haosa oscilators . . . . .	23
Matemātiskais modelis . . . . .	23
Pamatfrekvence . . . . .	24
Skaitliskā modelēšana un prototipa mērījumi . . . . .	25
1.3. Diskusija un salīdzinošā analīze . . . . .	26
2. HAOTISKĀ SINHRONIZĀCIJA . . . . .	28
2.1. <i>Pecora–Carroll</i> sinhronizācija . . . . .	28
2.2. Haotisko oscilatoru sinhronizācijas trokšņu noturības pētījuma metodoloģija . . . . .	29
2.3. Haotisko oscilatoru sinhronizācijas trokšņu noturības pētījuma rezultāti . . . . .	30
2.4. Sinhronizācijas signāla izvēles metodoloģija . . . . .	31
3. PROJEKTĒŠANA UN SIGNĀLU APSTRĀDE HAOSĀ BALSTĪTĀS SAKARU SISTĒMĀS . . . . .	32
3.1. Sistēmas arhitektūra . . . . .	32
3.2. Haotiskās manipulācijas realizācija . . . . .	33
3.3. Detektēšana un sliekšņa noteikšana nepilnīgas sinhronizācijas apstākļos . . . . .	33
3.4. Sliekšņa izvēles ietekme uz <i>BER</i> . . . . .	34
3.5. Secinājumi . . . . .	35
4. PROGRESĪVAS MODULĀCIJAS METODES HAOSĀ BALSTĪTĀS SAKARU SISTĒMĀS . . . . .	36
4.1. Modulācijas shēmas . . . . .	36
Kvadratūras haotiskās manipulācijas sakaru sistēma . . . . .	36
Ar frekvences modulāciju realizēta haotiskās manipulācijas sakaru sistēma . . . . .	37

4.2.	<i>QCSK</i> sistēmas veiktspējas analīze pie dažādām sinhronizācijas signāla konfigurācijām . . . . .	38
4.3.	<i>QAM</i> un <i>FM</i> balstītu sakaru sistēmu veiktspēja vairākcēļu izplatīšanās kanālā	39
	Pētījuma metodoloģija . . . . .	39
	Veiktspējas analīze vairākcēļu izplatīšanās kanālā . . . . .	40
4.4.	Secinājumi . . . . .	41
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA . . . . .	45

## SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

**ADP3450** – *Digilent's Analog Discovery Pro* (Digilenta Analog Discovery Pro)

**AWGN** – *additive white Gaussian noise* (aditīvais baltais Gausa troksnis)

**BER** – *bit error rate* (bitu kļūdu intensitāte)

**BJT** – *bipolar junction transistor* (bipolārais tranzistors)

**CSK** – *chaos shift keying* (haotiskā manipulācija)

**DCSK** – *differential chaos shift keying* (diferenciālā haotiskā manipulācija)

**ETSI** – *European Telecommunications Standards Institute* (Eiropas Elektrosakaru standartizācijas institūts)

**FM** – *frequency modulation* (frekvences modulācija)

**FM-CSK** – *frequency modulated chaos shift keying* (frekvences modulēta haotiskā manipulācija)

**FSK** – *frequency shift keying* (frekvences manipulācija)

**HPF** – *high-pass filter* (augsto frekvenču filtrs)

**IF** – *intermediate frequency* (starpfrekvence)

**IoT** – *Internet-of-Things* (lietu internets)

**LPF** – *low-pass filter* (zemo frekvenču filtrs)

**PCB** – *printed circuit board* (iespiestā plate)

**PLS** – *physical layer security* (fiziskā slāņa aizsardzība)

**PSD** – *power spectral density* (jaudas spektrālais blīvums)

**QAM** – *quadrature amplitude modulation* (kvadratūrā amplitūdas modulācija)

**QCSK** – *quadrature chaos shift keying* (kvadratūrā haotiskā manipulācija)

**RF** – *radio frequency* (radiofrekvence)

**SNR** – *signal-to-noise ratio* (signāla un trokšņa attiecība)

**WSN** – *wireless sensor network* (bezvadu sensoru tīkls)

**ZITEST** – *0–1 test for chaos* (0–1 haosa tests)

# IEVADS

## Tēmas aktualitāte

Straujā lietu interneta (angļu val. *Internet-of-Things, IoT*) infrastruktūras paplašināšanās transformē tradicionālās savstarpēji savienotās viedās ekosistēmās, nodrošinot plašu lietojumu veselības aprūpē, viedajās pilsētās, industriālajā automatizācijā un vides monitoringa sistēmās. Saskaņā ar *Ericsson* mobilitātes ziņojuma [1] prognozēm *IoT* ierīču skaits turpmākajos gados ievērojami pieaugs, ko galvenokārt veicina 5G un nākamo paaudžu bezvadu sakaru tehnoloģiju attīstība. Šī tendence būtiski palielina bezvadu kanālos pārraidīto sensitīvo datu apjomu, vienlaikus palielinot prasības pēc drošiem, uzticamiem un resursu ziņā efektīviem sakaru risinājumiem.

*IoT* tīklu drošība pārsvarā tiek nodrošināta ar kriptogrāfiskiem mehānismiem augstākajos protokolu slāņos, tostarp datu posma, tīkla un lietojumslāņa šifrēšanas un autentifikācijas metodēm [2, 3]. Lai gan šīs metodes nodrošina augstu datu konfidencialitāti un integritāti pēc sakaru savienojuma izveides, tās nereti rada ievērojamu skaitļošanas un enerģijas patēriņa slodzi. Tas ir īpaši problemātiski resursu ierobežotām *IoT* ierīcēm [4, 5]. Papildinošas arhitektūras pieejas, piemēram, migldatošana un programmdefinēta tīklošana, ļauj veikt lokalizētu datu apstrādi un centralizētu datu plūsmu vadību, samazinot aiztures un uzlabojot sistēmas pārvaldāmību. Tomēr šīs pieejas palielina kopējo sistēmas sarežģītību un rada jaunus drošības riskus, kas saistīti ar vadības plaknes ievainojamībām un heterogēnām tīkla arhitektūrām [6, 7]. Turklāt augstāko protokolu slāņu drošības risinājumi pēc būtības nespēj efektīvi novērst uzbrukumus, kas vērsti pret pašu bezvadu pārraides vidi, piemēram, traucēšanu, pasīvu noklausīšanos vai starpnieka uzbrukumus signāla izplatīšanās laikā [8].

Lai mazinātu šos ierobežojumus, fiziskā slāņa aizsardzība (angļu val. *physical layer security, PLS*) ir attīstīta kā papildinoša drošības pieeja, kas izmanto sakaru vides fizikālās īpašības un ierīcēm raksturīgās signāla pazīmes, neaizstājot tradicionālo kriptogrāfisko aizsardzību [9, 10]. Izmantojot aparatūras nepilnības un signāla līmeņa raksturlielumus, *PLS* ļauj paaugstināt sakaru konfidencialitāti un noturību bez skaitļošanas ziņā sarežģītām kriptogrāfiskām operācijām, kas ir īpaši nozīmīgi mazjaudīgām un resursu ierobežotām *IoT* ierīcēm. Tādas metodes kā mākslīgā trokšņa injekcija un radiofrekvenču digitālnošpieduma noteikšana papildus pastiprina *PLS* efektivitāti, pasliktinot potenciālā noklausītāja uztveres kvalitāti vai nodrošinot ierīču autentifikāciju signāla līmenī [11, 12].

Viens no perspektīvākajiem *PLS* attīstības virzieniem ir haosa teorijas integrācija, kas balstās haotiskajiem signāliem raksturīgajā neparedzamībā. Haosā balstītas sakaru metodes piedāvā efektīvu risinājumu drošai datu pārraidei, īpaši *IoT* sensoru tīklos, kuros ierīces ir ierobežotas skaitļošanas sarežģītības un enerģijas patēriņa ziņā. Šādu sistēmu pamatā ir relatīvi vienkārši analogie haosa oscilatori, nevis tradicionālās, šifrēšanā balstītās drošības metodes [8]. Haotiskās sistēmas, piemēram, Lorenca un Čua shēmas, plaši izmanto haosā balstītās sakaru sistēmās drošas datu pārraides nodrošināšanai [13–15]. Šīs sistēmas ģenerē platjoslas, trokšņiem līdzīgus signālus, kas vienlaikus ir ļoti jutīgi pret sākotnējiem apstākļiem, padarot tos piemērotus informācijas drošības paaugstināšanai.

Koherentās haosā balstītās datu pārraides sistēmās precīzai datu detektēšanai ir nepieciešama precīza raidītāja un uztvērēja haotisko oscilatoru sinhronizācija, kas ievieš papildu drošības slāni, jo jebkura sinhronizācijas izjaukšana būtiski apgrūtina nesankcionētu signāla interpretāciju [16].

Haotisko signālu īpašību izmantošanai ir izstrādātas dažādas haosā balstītas modulācijas metodes, tostarp haotiskā manipulācija (angļu val. *chaos shift keying*, *CSK*), diferenciālā haotiskā manipulācija (angļu val. *differential chaos shift keying*, *DCSK*) un to paplašinājumi [16–19]. Šīs shēmas izmanto haotisko signālu dekoderācijas īpašības un platjoslas raksturu, kas palielina noturību pret noklausīšanos un šaurjoslas traucējumiem. Jaunākajos pētījumos haosā balstītā datu pārraide tiek integrēta arī daudznesēju un vairāku ieeju–vairāku izeju konfigurācijās, lai uzlabotu spektrālo efektivitāti un sistēmas noturību, saglabājot drošības īpašības [17, 20].

Lai pārvarētu esošo haosā balstīto sistēmu ierobežojumus, piemēram, augstu realizācijas sarežģītību un ierobežotu noturību pret troksni, tiek izstrādāti jauni un uzlaboti haotiskie modeļi. Tādas pieejas kā eksponenciālais haotiskais modelis ir ieviesušas noturīga haosa jēdzienu, ar to saprotot dinamisku režīmu, kas novērojama bifurkaciju diagrammās, kurā haotiskā uzvedība saglabājas nepārtrauktā sistēmas parametru diapazonā bez periodiskiem loģiem. Tādējādi nelielas parametru izmaiņas nenomāc haotisko uzvedību, kas ir īpaši nozīmīgi drošās sakaru sistēmās, kurās jāņem vērā komponentu tolerances un kanāla troksnis [21–23]. Papildus sakaru sistēmām haoss tiek izmantots arī multimediju drošībā un gadījumskaitļu ģenerēšanā [24–26]. Dinamiskās haotiskās sistēmās balstīti attēlu šifrēšanas algoritmi nodrošina noturību pret statistiskajiem un diferenciālajiem uzbrukumiem, kā arī datu integritāti *IoT* vidēs [12, 27–30].

Haotiskajiem signāliem raksturīgs platjoslas spektrs, tomēr tos iespējams raksturot arī ar pamatfrekvences vērtību. Šī frekvence galvenokārt ir atkarīga no shēmas projektēšanas laikā izvēlēto komponentu nominālajām vērtībām [31]. Atsevišķos gadījumos pamatfrekvenci iespējams regulēt, mainot operacionālā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientu [32]. Lielākajā daļā analogo haotisko oscilatoru realizāciju, kas veidotas no diskrētiem shēmu komponentiem, pamatfrekvence nepārsniedz megahercu diapazonu, un tās palielināšanu ierobežo izmantotais operacionālais pastiprinātājs (ja tāds ir ietverts shēmā) [31]. Pastāv arī pētījumi par haotisko oscilatoru realizācijām ultrašvīņu frekvenču diapazonā [33–35], tomēr to īstenošanai nepieciešamas progresīvākas augstfrekvences tehnoloģijas, piemēram, rezonanses tuneļdiodes un integrētas haotiskās shēmas. Haotiskā oscilatora frekvences regulēšanu haosā balstītās sakaru sistēmās var izmantot datu pārraides ātruma palielināšanai, vairāku lietotāju kanālu atdalīšanai vai frekvenču lēkšanas modulācijas shēmu realizācijai.

Vēl viens būtisks haosā balstītu sakaru sistēmu aspekts ir sinhronizācija, kas nodrošina uzticamu datu pārraidi un uztveršanu *IoT* un bezvadu sensoru tīklā (angļu val. *wireless sensor network*, *WSN*). Haotiskā sinhronizācija nodrošina, ka uztvērēja haotiskā oscilatora stāvokļa mainīgie atkarīgo raidītāja oscilatora dinamiku, tādējādi ļaujot korekti detektēt pārraidīto signālu. Sinhronizācijas nodrošināšanai plaši izmanto tādas metodes kā *Pecora–Carroll* metode [36] un adaptīvās vadības pieejas [37, 38], kuru pamatā ir noteikta stāvokļa mainīgā saite starp vadošo un vadāmo oscilatoru.

Pētījumi konsekventi uzsver sinhronizācijas stabilitātes būtisko nozīmi haosā balstīto sakaru sistēmu veiktspējā [39–41]. Piemēram, pētījumi par tādām sistēmām kā Viļņas haosa oscilators izceļ noturīgas sinhronizācijas metožu nozīmi trokšņa ietekmes, parametru noviržu un vides mainības apstākļos [42]. Tas ir īpaši svarīgi haosā balstītu sakaru lietojumos, kuros sinhronizācijas kvalitāte tieši nosaka sistēmas spēju droši un precīzi pārraidīt datus [43–45].

Praktiskos bezvadu sakaru scenārijos haosā balstītajai signalizācijai jābūt savietojamai ar radiofrekvenču (angļu val. *radio frequency, RF*) pārraidi un noturīgai pret vairākceļu izplatīšanos. Haotisko signālu integrācija ar tradicionālajām modulācijas metodēm, piemēram, kvadrātūrā amplitūdas modulācija (angļu val. *quadrature amplitude modulation, QAM*) un frekvences modulācija (angļu val. *frequency modulation, FM*), nodrošina darbību normatīvi noteiktajos frekvenču diapazonos un savietojamību ar esošo raiduztvērēju aparātūru. Vienlaikus vairākceļu izplatīšanās izraisītie frekvences selektīvie pamirumi saglabājas kā viens no dominējošajiem traucējumu faktoriem bezvadu sensoru tīklos, kas motivē salīdzinošus pētījumus starp haosā balstītām un tradicionālām sakaru shēmām reālistiskos izplatīšanās apstākļos [46].

## Mērķis un uzdevumi

Šī promocijas darba **mērķis** ir izpētīt haotisko oscilatoru dinamiskās un sinhronizācijas īpašības no haosā balstītu sakaru sistēmu projektēšanas skatpunkta. Darbā analizēta oscilatora pamatfrekvences ietekme uz datu pārraides ātrumu un izstrādāta sistemātiska metodoloģija haosā balstītu sakaru sistēmu arhitektūru veidošanai, kas nodrošina noturīgu un pret troksni izturīgu datu pārraidi aditīvā baltā Gausa trokšņa (angļu val. *additive white Gaussian noise, AWGN*) un divstaru izplatīšanās kanālos.

Mērķa sasniegšana pamatota ar haotiskās dinamikas, sinhronizācijas kvalitātes, korelācijas īpašību un bitu kļūdu intensitātes (angļu val. *bit error rate, BER*) raksturlīkņu kvantitatīvu analīzi gan simulācijās, gan eksperimentālās realizācijās.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, promocijas darbā noteikti šādi **uzdevumi**:

- izanalizēt pamatfrekvences ietekmi uz haotisko oscilatoru dinamiskajām īpašībām, tostarp spektrālajiem raksturlielumiem, oscilatoru signālu savstarpējo korelāciju un aperiodiskumu, izmantojot *LTspice* simulācijas un prototipus;
- izpētīt haotisko oscilatoru sinhronizācijas noturību pret troksni, ja kā sinhronizācijas signāli tiek izmantoti dažādi oscilatora stāvokļa mainīgie, kā arī kvantitatīvi novērtēt sinhronizācijas kvalitāti, izmantojot korelācijā balstītus rādītājus;
- izpētīt nevienādu korelācijas līmeņu ietekmi starp saņemtajiem un sinhronizēta oscilatora reģenerētajiem signāliem uz *CSK* balstītu sakaru sistēmu un novērtēt iegūto kļūdu varbūtības nelīdzsvarotību uz korelāciju balstītā datu detektēšanu;
- izstrādāt optimālas lēmuma sliekšņa aprēķina metodi, kas nodrošina līdzsvarotu simbolu de-

tektēšanu un kļūdu varbūtības minimizēšanu *CSK* sakaru sistēmās;

- projektēt un realizēt haosā balstītas sakaru sistēmas ar augstākā līmeņa modulācijas metodēm, tostarp *QAM* un *FM*, nodrošinot radiofrekvenču pārraides iespēju;
- novērtēt piedāvāto haosā balstīto sakaru sistēmu noturību pret *AWGN* un vairākkeļu izplatīšanās apstākļos, kā arī salīdzināt to veiktspēju ar tradicionālajām modulācijas shēmām.

Piedāvāto pieeju efektivitāte demonstrēta, veicot salīdzinošus simulāciju un eksperimentālos pētījumus, koncentrējoties uz sinhronizācijas kvalitāti, sasniedzamo datu pārraides ātrumu un bitu kļūdu intensitātes rādītājiem dažādos sakaru kanālu apstākļos.

## Pētījuma metodoloģija

Šajā promocijas darbā īstenotais pētījums balstīts sistemātiskā metodoloģijā, kuras pamatā ir skaitliskā modelēšana un prototipu mērījumi, kas vērsti uz haotisko oscilatoru dinamikas, sinhronizācijas īpašību un to lietojuma haosā balstītās sakaru sistēmās izpēti. Darbā apvienota teorētiskā modelēšana un eksperimentālā validācija, lai nodrošinātu iegūto rezultātu konsekveni un atkārtojamību.

Pētījuma sākuma posmā veikta padziļināta zinātniskās literatūras analīze par haotiskajiem oscilatoriem, haotisko sinhronizāciju un haosā balstītām datu pārraides metodēm. Šis apskats nodrošināja teorētisko pamatu atvērtu pētniecības jautājumu identificēšanai, kas saistīti ar oscilatoru parametru variēšanu, sinhronizācijas noturību un sistēmas līmeņa veiktspēju praktiskās sakaru vidēs.

Nelineāru un haotisku sistēmu analīzē būtiska nozīme ir precīzai modelēšanai, tādēļ pētījums uzsāks ar haotisko oscilatoru shēmu līmeņa modeļu izstrādi un validāciju. Lai nodrošinātu secinājumu vispārināmību, izvēlēti divi strukturāli atšķirīgi oscilatori – Kolpica un Viļņas haosa oscilatori. To darbība analizēta, mainot pamatfrekvenci, lai novērtētu spektrālo raksturlielumu izmaiņas, ģenerēto signālu savstarpējās korelācijas īpašības un laika nobīdes uzvedību, kas ir būtiska simbola ilguma izvēlē.

Metodoloģija ir balstīta strukturētā pētniecības sistēmā, kas integrē gan secīgus, gan paralēlus posmus:

- haotisko oscilatoru modeļu izstrāde un validācija, izmantojot shēmu līmeņa modelēšanu un eksperimentālus prototipus;
- oscilatoru dinamikas analīze pamatfrekvences variācijas apstākļos, tostarp spektrālo īpašību un ģenerēto signālu savstarpējās korelācijas uzvedības novērtējums;
- haotiskās sinhronizācijas īpašību izpēte vadošais – vadāmais konfigurācijā aditīva trokšņa klātbūtnē;
- vairāku shēmas mezglu izvērtēšana kā potenciālu sinhronizācijas signālu, izmantojot korelācijā balstītus rādītājus;
- sinhronizācijas kvalitātes noteikšana, izmantojot dažādus stāvokļa mainīgos kā sinhronizā-

cijas signālus, un sinhronizācijas kvalitātes ietekmes novērtēšana uz korelācijā balstītu datu detektēšanu;

- optimālā detektēšanas sliekšņa matemātiska izteikšana kļūdu varbūtības nesabalansētības kompensēšanai un līdzsvarotas simbolu detektēšanas nodrošināšanai;
- haotiskās pamatjoslas datu pārraides sistēmas integrācija ar progresīvām modulācijas metodēm, tostarp *QAM* un *FM*;
- haosā balstītu sakaru sistēmu veikspējas novērtēšana *AWGN* un divstaru izplatīšanās kanālos, izmantojot skaitlisko modelēšanu un eksperimentālus mērījumus.

## Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Šajā promocijas darbā iegūtie zinātniskie rezultāti balstās oriģinālā sistēmas līmeņa analizē un projektēšanas metodoloģijā, shēmu līmeņa skaitliskā modelēšanā, kā arī haosā balstītu sakaru sistēmu eksperimentālo izpētē. Vairākas no piedāvātajām metodēm un novērojumiem ieviestas pirmo reizi vai arī tās reprezentē jaunu nelineārās dinamikas un sinhronizācijas teorijas lietojumu praktisku sakaru sistēmu izstrādē. Galvenie darba zinātniskās novitātes elementi ir šādi:

- pirmo reizi kvantitatīvi noteikta sakarība starp analoga haotiskā oscilatora pamatfrekvenci un haosā balstītas sakaru sistēmas sasniedzamo datu pārraides ātrumu, izmantojot savstarpējās korelācijas funkciju analīzi, kas lietota gan skaitliski modelētiem, gan eksperimentāli izmērtiem signāliem;
- pirmo reizi eksperimentāli parādīts, ka viena un tā paša haotiskā oscilatora dažādi stāvokļa mainīgie pie identiskiem sinhronizācijas nosacījumiem var uzrādīt būtiski atšķirīgus korelācijas līmeņus, pat ja tiek izmantots viens sinhronizācijas signāls;
- parādīts, ka nevienādi korelācijas līmeņi starp informāciju nesošiem haotiskajiem signāliem izraisa sistemātisku nesabalansētību korelācijā balstītā detektēšanā, kas haosā balstītās sakaru sistēmās noved pie asimetriskām simbolu kļūdām;
- pirmo reizi iegūts optimāls lēmuma sliekšņa formulējums korelācijā balstītai detektēšanai ar savstarpēji korelētiem haotiskiem nesējiem, kas atjauno lēmumu simetriju, nemainot sinhronizācijas mehānismu;
- eksperimentāli demonstrēta un kvantitatīvi novērtēta sinhronizācijas signāla izvēles ietekme uz haosā balstītu sakaru sistēmu bitu kļūdu intensitāti aditīva trokšņa un vairākcēļu izplatīšanās apstākļos.

Papildus zinātniskajiem rezultātiem promocijas darbā iegūti arī vairāki būtiski praktiski un metodoloģiski rezultāti, kas atbalsta haosā balstītu sakaru sistēmu projektēšanu un novērtēšanu:

- izstrādāta atkārtoti izmantojama haosā balstītu sakaru sistēmu novērtēšanas darba plūsma, kas apvieno *LTspice* shēmu līmeņa skaitlisko modelēšanu, *MATLAB* signālu apstrādi un prototipa mērījumus, nodrošinot konsekventu haotisko oscilatoru dinamikas, sinhronizācijas un sakaru

veiktspējas analīzi. Izstrādātie modeļēšanas un signālu apstrādes kodi ir publiski pieejami vietnē [GitHub](#);

- izstrādāta sistemātiska metodoloģija sinhronizācijas signālu izvēlei haosā balstītās sakaru sistēmās, piedāvājot strukturētu pieeju, kuras pamatā ir trokšņa noturība, korelācijas īpašības un signālu praktiskā pieejamība, lai nodrošinātu noturīgu un līdzsvarotu haotisko sinhronizāciju;
- demonstrēta praktiska pieeja haotiskās manipulācijas integrācijai ar kvadrāturo amplitūdas modulāciju un frekvences modulāciju, nodrošinot, ka analogo oscilatoru ģenerētie haotiskie pamatjoslas signāli tiek pārnesti uz patvaļīgām nesējfrekvencēm, kas ir savietojamas ar konvencionālām *RF* sakaru sistēmām;
- piedāvāta eksperimentāla procedūra kvadrātūrās haotiskās manipulācijas (angļu val. *quadrature chaos shift keying, QCSK*) un frekvences modulētas haotiskās manipulācijas (angļu val. *frequency modulated chaos shift keying, FM-CSK*) sakaru sistēmu trokšņa noturības novērtēšanai *AWGN* apstākļos, ietverot signālu detektēšanu, bitu kļūdu intensitātes novērtēšanu un pēcapstrādi *MATLAB* vidē;
- izstrādāta skaitliskajā modeļēšanā balstīta metodoloģija haosā balstītu sakaru sistēmu novērtēšanai vairākceļu vidēs, izmantojot divstaru izplatīšanās kanāla modeli, kas ļauj tieši un korekti salīdzināt to veiktspēju ar tādām tradicionālām modulācijas shēmām kā *QAM* un frekvences manipulācija (angļu val. *frequency shift keying, FSK*) pie identiska joslas platuma un vienādiem kanāla nosacījumiem.

Kopumā iegūtie rezultāti paplašina izpratni par haotisko oscilatoru īpašību, sinhronizācijas signālu izvēles un modulācijas metožu ietekmi uz haosā balstītu sakaru sistēmu veiktspēju un uzticamību, nodrošinot strukturētu pamatu to lietošanai praktiskās bezvadu sakaru vidēs.

## Aizstāvamās tēzes

1. Haotiskās manipulācijas (*CSK*) sakaru sistēmās, kuru pamatā ir haotiskie oscilatori, simbolu pārraides ātruma regulēšana līdz 55 kb/s Viļņas haosa oscilatoram un līdz 166 kb/s Kolpica oscilatoram ir iespējama, mainot oscilatora pamatfrekvenci.
2. Haotiskās manipulācijas sakaru sistēmā ar nevienādiem korelācijas līmeņiem  $\beta_X$  un  $\beta_Y$  atbilstošajiem uztverto un sinhronizētā oscilatora atjaunoto haotisko signālu pāriem kļūdu varbūtību minimizējoša optimālā detektēšana tiek nodrošināta, ja lēmuma sliekšnis tiek noteikts kā

$$\beta_{X'} \geq \beta_Y + \frac{1}{2}(\beta_X - \beta_Y),$$

kur  $\beta_{X'}$ , un  $\beta_Y$ , ir simbolu informāciju nesošo haotisko impulsu korelācijas līmeņi.

3. *QCSK* un *FM-CSK* sakaru sistēmu, kuru pamatā ir Viļņas haosa oscilators, veiktspēja pārsniedz atbilstoši *4-QAM* un *2-FSK* sakaru sistēmu veiktspēju divstaru kanālā ar 3,25 dB ie-

liekumu spektrā pie nesējfrekvences, nodrošinot kļūdu varbūtību attiecīgi  $3,29 \times 10^{-3}$  un  $1,52 \times 10^{-3}$ .

## Aprobācija un praktiskā nozīme

Šajā promocijas darbā izklāstītie rezultāti ir iegūti lietišķo pētījumu un eksperimentālās izstrādes ietvaros, kurus autore doktora studiju laikā īstenojusi Rīgas Tehniskajā universitātē. Pētījums veikts ciešā sasaistē ar aktuāliem akadēmiskiem, industriāliem un lietišķiem pētniecības projektiem, tādējādi nodrošinot piedāvāto haosā balstīto sakaru metožu gan zinātnisko nozīmīgumu, gan praktisko lietojamību.

Promocijas darbā iegūtie zinātniskie rezultāti ir publicēti recenzētos starptautiskos zinātniskajos žurnālos un konferenču rakstu krājumos. Nozīmīgākās publikācijas, kas tieši atspoguļo šī darba galvenos ieguldījumus, ir uzskaitītas turpmāk. Publikācijas, kurās autore ir pirmā autore, ir izceltas **treknrakstā**. Vienā publikācijā ieguldījums veikts līdzvērtīgi ar norādīto pirmo autoru.

- [45] D. Cirjulina u. c. “Experimental Study on Frequency Modulated Chaos Shift Keying Communication System”. *2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2022. g. okt., 1.–4. lpp. ISBN: 978-1-6654-6439-0. DOI: [10.1109/MTTW56973.2022.9942593](https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942593).
- [46] R. Babajans u. c. “Performance Analysis of Vilnius Chaos Oscillator-Based Digital Data Transmission Systems for IoT”. en. *Electronics* 12.3 (2023. g. janv.). Number: 3, 709. lpp. ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics12030709](https://doi.org/10.3390/electronics12030709).
- [47] D. Cirjulina u. c. “Fundamental Frequency Impact on Colpitts Chaos Oscillator Dynamics”. *2023 Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2023. g. okt., 19.–23. lpp. ISBN: 9798350393491. DOI: [10.1109/MTTW59774.2023.10320021](https://doi.org/10.1109/MTTW59774.2023.10320021).
- [48] D. Cirjulina u. c. “Experimental Study on Colpitts Chaotic Oscillator-Based Communication System Application for the Internet of Things”. en. *Applied Sciences* 14.3 (2024. g. janv.), 1180. lpp. ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app14031180](https://doi.org/10.3390/app14031180).
- [49] D. Cirjulina, R. Babajans un D. Kolosovs. “Experimental Study on Quadrature Chaos Shift Keying Communication System”. *2024 IEEE Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2024. g. okt., 29.–32. lpp. ISBN: 979-8-3315-3317-5. DOI: [10.1109/MTTW64344.2024.10742187](https://doi.org/10.1109/MTTW64344.2024.10742187).
- [50] D. Cirjulina u. c. “Fundamental Frequency Impact on Vilnius Chaos Oscillator Dynamics”. en. *16th Chaotic Modeling and Simulation International Conference*. Izdevis C. H. Skia-das un Y. Dimotikalis. Series Title: Springer Proceedings in Complexity. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, 87.–101. lpp. ISBN: 978-3-031-60906-0 978-3-031-60907-7. DOI: [10.1007/978-3-031-60907-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60907-7_8).

[51] D. Čirjuļina, R. Babajans un D. Kolosovs. “Design Particularities of Quadrature Chaos Shift Keying Communication System with Enhanced Noise Immunity for IoT Applications”. en. *Entropy* 27.3 (2025. g. marts), 296. lpp. ISSN: 1099-4300. DOI: [10.3390/e27030296](https://doi.org/10.3390/e27030296).

Promocijas darba pētījumu rezultāti prezentēti starptautiskās zinātniskās konferencēs, darbnīcās un simpozijos, nodrošinot to aprobāciju un profesionālu izvērtējumu starptautiskajā pētniecības kopienā. Autore prezentēja promocijas darba rezultātus šādās starptautiskās zinātniskās konferencēs:

1. D. Čirjuļina. “QCSK Communication System Performance in Multipath Propagation Channel”, Days of Applied Nonlinearity and Complexity (DANOC 2026), Aristotle University of Thessaloniki, Saloniki, Grieķija, 2026. gada 23.–25. janvāris.
2. D. Čirjuļina. “Nonlinear Dynamics of the Colpitts Chaotic Oscillator Under Bias Voltage Tuning”, RTU 66. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 2025. gada 27. novembris.
3. D. Čirjuļina. “Synchronization Noise Immunity in the Vilnius Chaos Oscillator for Secure Communications in IoT”, RTU 66. studentu zinātniski tehniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 2025. gada 25. aprīlis.
4. D. Čirjuļina. “Experimental Study of a Quadrature Modulation Chaos Shift Keying-Based Data Transmission System”, RTU 65. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 2024. gada 11. oktobris.
5. D. Čirjuļina. “Experimental Study on Quadrature Chaos Shift Keying Communication System”, IEEE Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW 2024), IEEE Latvia COM/MTT/AP Joint Chapter, Rīga, Latvija, 2024. gada 2.–4. oktobris.
6. D. Čirjuļina. “Experimental Study on Colpitts Chaotic Oscillator-Based Communication System Application for the Internet of Things”, RTU 65. studentu zinātniski tehniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 2024. gada 29. aprīlis.
7. D. Čirjuļina. “Experimental Study on Quadrature Chaos Shift Keying Communication System”, Days of Applied Nonlinearity and Complexity (DANOC 2024), Aristotle University of Thessaloniki, Saloniki, Grieķija, 2024. gada 12.–14. janvāris.
8. D. Čirjuļina. “Fundamental Frequency Impact on Colpitts Chaos Oscillator Dynamics”, RTU 64. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 2023. gada 6. oktobris.
9. D. Čirjuļina. “Fundamental Frequency Impact on Colpitts Chaos Oscillator Dynamics”, IEEE Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW 2023), IEEE Latvia COM/MTT/AP Joint Chapter, Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija, 2023. gada 4.–6. oktobris.
10. D. Čirjuļina. “Fundamental Frequency Impact on Vilnius Chaos Oscillator Dynamics”, The 16th CHAOS 2023 International Conference, Technical University of Crete, Krēta, Grieķija,

2023. gada 13.–17. jūnijs.

11. D. Čirjuļina. “Experimental Study on Frequency Modulated Chaos Shift Keying Communication System”, IEEE Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW 2022), IEEE Latvia COM/MTT/AP Joint Chapter, Rīga, Latvija, 2022. gada 5.–7. oktobris.

Pētījums veikts paralēli dalībai vairākos nacionālos un institucionālos pētniecības projektos, kas nodrošināja eksperimentālo validāciju, prototipu izstrādi un lietišķos pētījumus, kuri analizēti promocijas darbā:

1. Digital Europe Programme (DIGITAL) projekts “Microchip Competence Centre of the Republic of Latvia” 0B000-3.5.2-e/3 | 101217976 (01.10.2025.–28.02.2026.).
2. Projekts “Implementation of consolidation and management changes at RTU, LiepU, Rēzekne Academy of Technology and Latvian Maritime Academy and Liepāja Maritime College for progress towards excellence in higher education, science and innovation”. Grants Nr. RTU-PA-2024/1-0064 ES RRF projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 ietvaros (01.01.2024.–31.01.2026.).
3. RTU iekšējais finansējums “Exploring cyber-secure IoT data-driven agricultural management” 04000-1.3-e/24 | ZI-2024/7 (02.01.2024.–31.12.2024.).
4. RTU iekšējais finansējums “Exploring the Next Generation IoT Network” 003000-3.1.2.1-e/14 | ZI-2023/3 (02.01.2023.–31.12.2023.).
5. SAM 8.2.2 projekts “Strengthening of Ph. D. students and academic personnel of Riga Technical University and BA School of Business and Finance in the strategic fields of specialization” projekta Nr. 03000-3.1.2.1-e/177 | 8.2.2.0/20/I/008 ietvaros (01.12.2022.–30.11.2023.).
6. RTU iekšējais finansējums “Frequency Modulated Chaos Manipulated Data Transmission System” 03000-3.1.1.1-e/145-1 | AM-2021/2 (07.06.2022.–30.11.2022.).
7. LZP fundamentālo un lietišķo pētījumu projekts “Advanced wireless power transmission techniques” 03000-3.1.2.1-e/4 | lzp-2021/1-0170 (03.01.2022.–30.12.2024.).

Būtisks šī promocijas darba praktiskais rezultāts ir integrētas skaitliskās modelēšanas un eksperimentālās izpētes ietvara izstrāde un lietošana haosā balstītām sakaru sistēmām. Izstrādātais ietvars apvieno haotisko oscilatoru shēmu līmeņa modelēšanu *LTspice* vidē ar signālu apstrādi, sinhronizācijas analīzi, modulāciju un detektēšanu MathWorks® *MATLAB* vidē. Šāda pieeja ļauj konsekventi novērtēt haotisko dinamiku, sinhronizācijas noturību un sakaru sistēmu veiktspēju aditīva trokšņa un vairākkeļu izplatīšanās apstākļos.

Izstrādātie modeļi un analīzes procedūras izmantoti gan zinātniskajiem pētījumiem, gan praktiskai validācijai, veicot prototipa mērījumus. Iegūtā zinātniskā un inženiertehniskā pieredze tieši izmantota autorens pedagoģiskajā darbībā Rīgas Tehniskajā universitātē. Studiju laikā izstrādātās metodoloģijas un iegūtie rezultāti integrēti studijuursos, kas saistīti ar signālu apstrādi, sakaru sistēmām un elektroniku, tādējādi veicinot studiju satura un praktisko darbu pilnveidi.

Doktora studiju laikā autore ir bijusi iesaistīta šādu studiju kursu docēšanā Rīgas Tehniskajā universitātē:

- DE0848 – Ciparu optiskās sakaru sistēmas (6 ECTS);
- RDE713 – Ciparu optiskās sakaru sistēmas (6 ECTS);
- SDD701 – Inovatīvu produktu izstrāde un uzņēmējdarbība (4 ECTS);
- RR713 – Diskrēto signālu apstrāde (studiju projekts) (3 ECTS);
- RTR825 – Viedā radio tehnoloģijas pamati (studiju projekts) (3 ECTS);
- ERA708 – Zinātniskie semināri elektronikas jomā (3 ECTS);
- RRI324 – Diskrēto signālu apstrāde (3 ECTS).

Promocijas darba izstrādi papildus atbalstīja starptautiskā akadēmiskā un pētniecības mobilitāte, kas nodrošināja sadarbību ar ārvalstu pētniecības institūcijām un pieļāva progresīvai eksperimentālajai infrastruktūrai. Doktora studiju laikā autore, saglabājot nodarbinātību Rīgas Tehniskajā universitātē, īstenoja šādas mobilitātes:

- *KTH Royal Institute of Technology*, Zviedrija (01.05.2023.–31.05.2023.).
- *Infineon Technologies Austria* (18.09.2023.–22.09.2023.).
- *Central European Student and Young Professionals Congress, Cracow University of Technology* (30.11.2023.–03.12.2023.).
- *Keysight Technologies GmbH*, Vācija (13.08.2024.–21.08.2024.).
- *Politecnico di Torino*, Itālija (18.11.2024.–22.11.2024.).
- *Keysight Technologies GmbH*, Vācija (18.02.2025.–27.02.2025.).
- *Keysight Technologies GmbH*, Vācija (13.06.2025.–20.06.2025.).
- *Keysight Technologies GmbH*, Vācija (26.08.2025.–04.09.2025.).
- *Aristotle University of Thessaloniki*, Grieķija (30.11.2025.–05.12.2025.).

Autores zinātniskie un akadēmiskie sasniegumi doktora studiju laikā ir novērtēti ar šādiem apbalvojumiem:

- *IEEE Student & Young Professional (SYP)* ceļa izdevumu grants, 19.08.2025.;
- Studenta labākās prezentācijas balva, *Days of Applied Nonlinearity and Complexity (DANOC'24)*, 14.01.2024.;
- RTU Bērnu un jauniešu universitātes pateicība, 24.05.2024.

Kopumā promocijas darba rezultāti ir aprobēti recenzētās publikācijās, starptautisku konferenču prezentācijās, eksperimentālos prototipos un lietišķos pētniecības projektos. Skaitliskās modelēšanas, prototipa mērījumu un sistēmas līmeņa validācijas kombinācija apliecina piedāvāto haosā balstīto sakaru metožu zinātnisko aktualitāti un praktisko lietojamību.

## Darba struktūra

Promocijas darbs ir izstrādāts pakāpeniskas pētniecības struktūras ietvaros, kur katra nodaļa balstīta iepriekšējos posmos iegūtajos rezultātos un secinājumos. Lai gan nepieciešamības gadījumā ieviesti atsevišķi vispārzināmi jēdzieni, kas saistīti ar haotiskajiem oscilatoriem un sakaru sistēmām, galvenā uzmanība veltīta oriģinālo pētījuma rezultātu izstrādei, analīzei un eksperimentālai validācijai. Fona materiāls ir iekļauts tikai tādā apmērā, kāds nepieciešams turpmākās analīzes un diskusijas nodrošināšanai.

Darba struktūra atspoguļo loģisku pāreju no atsevišķu haotisko oscilatoru izpēti uz pilnīgu haosā balstītu sakaru sistēmu novērtēšanu dažādos sakaru kanālu apstākļos. Katras nodaļas saturs ir apkopots turpmāk.

Pirmajā nodaļā analizētas haotisko oscilatoru īpašības, uzmanību sevišķi pievēršot pamatfrekvences ietekmei. Divi strukturāli atšķirīgi oscilatori – Kolpica un Viļņas haosa oscilatori – analizēti, izmantojot skaitlisko modelēšanu un prototipu mērījumus. Nodaļā pētīti spektrālie raksturlielumi, ģenerēto signālu savstarpējās korelācijas uzvedība un laika nobīdes īpašības, kas ir būtiskas simbola ilguma izvēlei haosā balstītās sakaru sistēmās.

Otrā nodaļā ir veltīta haotiskajai sinhronizācijai vadošais–vadāmais haotisko oscilatoru konfigurācijā. Sinhronizācijas noturība pret troksni analizēta, izmantojot dažādus shēmas mezglus kā sinhronizācijas signālus. Sinhronizācijas kvalitātes kvantitatīvai novērtēšanai aditīva trokšņa apstākļos izmantoti korelācijā balstīti rādītāji, kas ļauj sistemātiski salīdzināt potenciālos sinhronizācijas signālus abiem haotiskajiem oscilatoriem.

Trešajā nodaļā aplūkota nevienādas sinhronizācijas ietekme uz korelācijā balstītu datu detektēšanu. Parādīts, ka nesabalansēta sinhronizācija starp dažādiem signāliem izraisa nobīdītus simbolu lēmumus. Šīs ietekmes kompensēšanai ieviests detektēšanas sliekšnis, kas nodrošina līdzsvarotu lēmumu pieņemšanu haotiskās manipulācijas sakaru sistēmās.

Ceturtnajā nodaļā ir veltīta progresīvu modulācijas metožu integrācijai haosā balstītās sakaru sistēmās. Sākotnēji aprakstīta *QAM* un *FM* izmantošana haotisko signālu pārraidei noteiktā nesējfrekvencē, analizējot attiecīgās sistēmu arhitektūras un signālu apstrādes ķēdes. Pēc tam iegūto haosā balstīto sakaru sistēmu noturība pret troksni novērtēta, izmantojot gan skaitlisko modelēšanu, gan prototipa mērījumus, analizējot bitu kļūdu intensitāti *AWGN* apstākļos. Turpinājumā pētīta sinhronizācijas signāla izvēles un haotiskā oscilatora topoloģijas ietekme uz sistēmas veiktspēju. Nodaļu noslēdz veiktspējas analīze divstaru izplatīšanās kanālā, kurā *QCSK* un *FM-CSK* sistēmas novērtētas frekvences selektīvās vājināšanās apstākļos un salīdzinātas ar tradicionālām modulācijas shēmām, lai izvērtētu to noturību praktiskās bezvadu sakaru vidēs.

Piektajā nodaļā promocijas darbu noslēdz galveno pētījuma rezultātu apkopojums, to nozīmes apspriešana haosā balstītu sakaru sistēmu projektēšanas kontekstā, kā arī iezīmēti turpmāko pētījumu virzieni.

Kopumā darba nodaļas veido vienotu un savstarpēji saistītu ietvaru, kas sasaista haotisko oscila-

toru dinamiku, sinhronizācijas uzvedību, detektēšanas stratēģiju izstrādi un sakaru sistēmu veikspēju sistēmas līmenī. Šāda struktūra nodrošina skaidru pāreju no shēmu līmeņa analīzes uz praktiskiem sakaru scenārijiem un pilnībā atbalsta promocijas darba izvirzītos mērķus.

# 1. HAOTISKIE OSCILATORI

Šajā nodaļā analizēti divi reprezentatīvi nepārtrauktā laika haotiskie oscilatori – Kolpica un Viļņas shēmas –, izmantojot skaitlisko modelēšanu un prototipu mērījumus. Pētījums ir vērsts uz šo oscilatoru matemātiskajiem modeļiem, regulējamību, kā arī to spektrālo un laika raksturlielumu analīzi, kas veikta, izmantojot tādas metodes kā jaudas spektrālais blīvums (angļu val. *power spectral density, PSD*), 0–1 haosa tests (angļu val. *0–1 test for chaos, ZITEST*) un savstarpējās korelācijas funkcijas. Lai novērtētu frekvences mērogošanas ietekmi, aplūkotas zemas un augstas pamatfrekvences konfigurācijas (Kolpica oscilatoram pie  $f_0 \approx 96,86$  kHz un  $968,59$  kHz, Viļņas oscilatoram pie  $f_0 \approx 1,6$  kHz un  $160$  kHz). Izvēlētie oscilatori ir atlasīti, ņemot vērā to savstarpēji papildinošās arhitektūras. Kolpica oscilators reprezentē minimālu, tranzistorā balstītu haotisko shēmu, kurā pastiprinājums un nelinearitāte ir realizēti vienā aktīvajā elementā. Savukārt Viļņas oscilatorā šīs funkcijas ir nošķirtas, izmantojot operacionālo pastiprinātāju un diodi, tādējādi atspoguļojot divas dominējošās haotisko oscilatoru projektēšanas pieejas. Lai gan pastāv arī sarežģītākas haotiskās shēmas, tostarp risinājumi ar memristoriem [52], to darbība parasti ir ierobežota ar zemas frekvences diapazonu, kas padara tās mazāk piemērotas platjoslas sakaru sistēmām [47, 50].

Nodaļā demonstrētā tēze: haotiskā oscilatora pamatfrekvence tieši nosaka haosā balstītu sakaru sistēmu sasniedzamo datu pārraides ātrumu. Bitu ilgums definēts, pamatojoties uz dominējošā savstarpējās korelācijas maksimuma amplitūdas samazināšanos [45]. Palielinot pamatfrekvenci, samazinās augstas korelācijas laika apgabals, kas ļauj īstenot lielākus datu pārraides ātrumus. Šī sakarība tiek apstiprināta gan ar skaitliskās modelēšanas rezultātiem, gan ar prototipa mērījumiem.

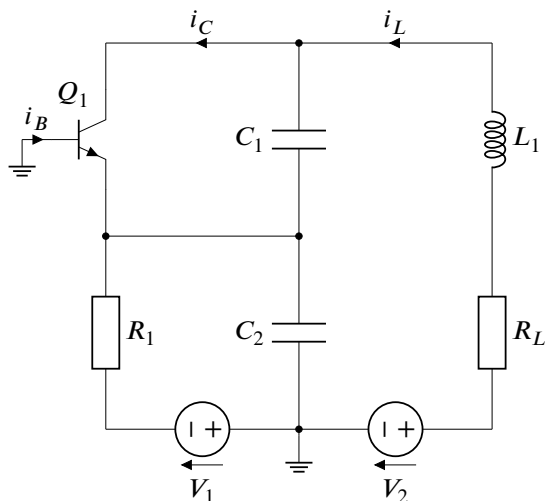
## 1.1. Kolpica haosa oscilators

Šajā apakšnodaļā aplūkota Kolpica haosa oscilatora nelineārā dinamika. Kolpica haosa oscilators šajā pētījumā ir izvēlēts tā vienkāršās shēmas uzbūves, pamatfrekvences regulēšanas iespēju, kā arī ģenerēto signālu izteiktās savstarpējās korelācijas funkcijas dēļ. Galvenais mērķis ir novērtēt Kolpica haosa oscilatora darbības noturību, izmantojot skaitlisko modelēšanu un prototipa mērījumus.

### *Matemātiskais modelis*

Šajā darbā aplūkotais Kolpica oscilators darbojas kā nelineāra dinamiska sistēma, kas spēj ģenerēt haotiskus signālus. 1.1. att. redzamā shēma sastāv no pasīvajiem elementiem (rezistoriem, kondensatoriem un induktora) un aktīva nelineāra elementa, kas realizēts, izmantojot bipolāro tranzistoru (angļu val. *bipolar junction transistor, BJT*). Pie atbilstošiem darba režīmiem un komponentu nominālvērtībām shēma uzrāda haotisku uzvedību [53]. Oscilatora topoloģiju veido *BJT*, induktors  $L_1$  un kapacitīvs sprieguma dalītājs, ko veido kondensatori  $C_1$  un  $C_2$ , kas nodrošina atgriezenisko saiti nepārtrauktu svārstību uzturēšanai. Shēmas rezonanses īpašības nosaka LC kontūrs, ko veido induktors  $L_1$  un kondensatoru  $C_1$  un  $C_2$  ekvivalentā kapacitāte, savukārt tranzistora nobīdi nodro-

šina sprieguma avoti  $V_1$  un  $V_2$ .



1.1. att. Kolpica haosa oscilatora shēma.

Kolpica haosa oscilatora dinamiku raksturo nelineāru diferenciālvienādojumu sistēma, kas iegūta, piemērojot Kirchofa likumus [54]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_L - i_C \\ C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{V_1 - v_{C2}}{R_1} - i_L - i_B \\ L_1 \frac{di_L}{dt} = V_2 - v_{C1} - v_{C2} - i_L R_L \end{cases}, \quad (1.1.)$$

kur  $v_{C1}$  un  $v_{C2}$  ir spriegumi uz kondensatoriem;  $C_1$  un  $C_2$ ,  $i_L$  ir induktora strāva, bet  $i_B$  un  $i_C$  ir attiecīgi tranzistora bāzes un kolektora strāvas.

Haotiskā uzvedība oscilatorā rodas tranzistora nelineāro īpašību dēļ. Bāzes-emitera pārejas sprieguma vadītā nelinearitāte aproksimēta ar šādu gaballineāru modeli:

$$i_B = \begin{cases} 0, & \text{ja } -v_{C2} \leq V_{TH} \\ -\frac{v_{C2} + V_{TH}}{R_{ON}}, & \text{ja } -v_{C2} > V_{TH} \end{cases}, \quad (1.2.)$$

$$i_C = \beta_F \cdot i_B, \quad (1.3.)$$

kur  $V_{TH}$  ir sliekšņa spriegums,  $R_{ON}$  ir bāzes-emitera mazsignāla pretestība, bet  $\beta_F$  ir tranzistora tiešais strāvas pastiprinājuma koeficients.

## Pamatfrekvence

Kolpica haosa oscilators ietver virknes RLC rezonanses kontūru, kuras pamatfrekvence  $f_0$  sakrīt ar rezonatora dabisko svārstību frekvenci. Šo frekvenci nosaka enerģijas apmaiņa starp induktoru un ekvivalentās kapacitātes elementiem, un tā ir izsakāma ar Tomsona formulu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_{eq}}}, \quad (1.4.)$$

kur ekvivalentā kapacitāte  $C_{eq}$  ir:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (1.5.)$$

Oriģinālajā pētījumā [54] Kolpica haosa oscilators realizēts ar parametriem  $R_L = 35 \Omega$ ,  $L_1 = 98,5 \mu\text{H}$ ,  $C_1 = C_2 = 54 \text{ nF}$ ,  $R_1 = 40 \Omega$ ,  $V_1 = V_2 = 5 \text{ V}$  un tranzistoru 2N2222. Šajā darbā induktora vērtība komponentu pieejamības dēļ tika tuvināta līdz  $L_1 = 100 \mu\text{H}$ , kā rezultātā iegūta pamatfrekvence  $f_0 = 96,86 \text{ kHz}$ .

Desmitkārtīgs pamatfrekvences pieaugums panākts, izmantojot reaktīvo elementu vērtības  $L_1 = 10 \mu\text{H}$  un  $C_1 = C_2 = 5,4 \text{ nF}$ , iegūstot  $f_0 = 968,59 \text{ kHz}$ . Turklāt haotiska uzvedība novērota arī konfigurācijā ar  $L_1 = 1 \mu\text{H}$  un  $C_1 = C_2 = 540 \text{ pF}$ , kas atbilst pamatfrekvencei  $f_0 = 9,69 \text{ MHz}$  [47].

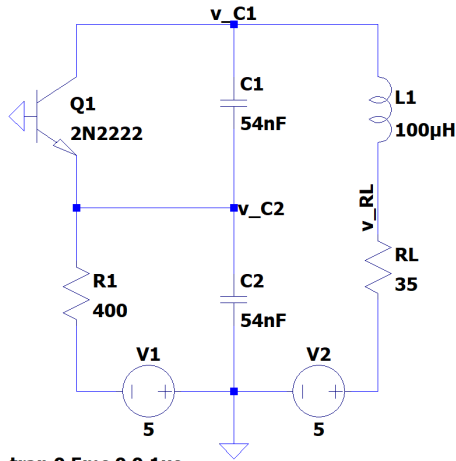
Šie rezultāti parāda, ka Kolpica haosa oscilators spēj darboties plašā pamatfrekvenču diapazonā, atbilstoši izvēloties reaktīvo komponentu vērtības, kas ir īpaši nozīmīgi haosā balstītām sakaru sistēmām ar dažādām nesējfrekvencēm.

### Skaitliskā modelēšana un prototipa mērījumi

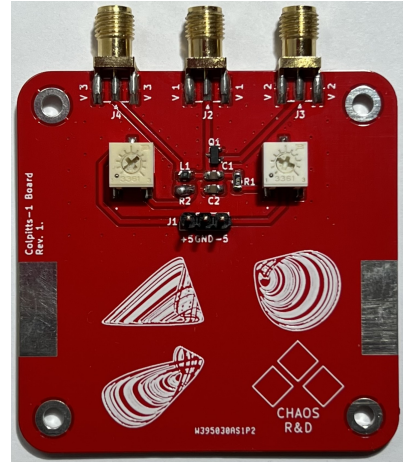
Kolpica haosa oscilatora modelis izstrādāts *LTspice* vidē, un modelēšanas laikā iegūtie signāli tika eksportēti un apstrādāti *MATLAB* vidē (skat. 1.2. (a) att.). Analizētas divas konfigurācijas ar pamatfrekvencēm 96,86 kHz un 968,59 kHz. Lai verificētu skaitliskās modelēšanas rezultātus, izstrādāts prototips, abām konfigurācijām izmantojot identisku iespīstās plātes (angļu val. *printed circuit board, PCB*) izkārtojumu un mainot tikai reaktīvo komponentu vērtības. Izgatavotā *PCB* parādīta 1.2. (b) att. Sprieguma signāli no izvēlētajiem shēmas mezgliem mērīti, izmantojot Digi-lenta *Analog Discovery Pro* (angļu val. *Digilent's Analog Discovery Pro, ADP3450*) portatīvo jaukto signālu osciloskopu, un pēc tam eksportēti un analizēti *MATLAB* vidē.

Haotiskā uzvedība verificēta, izmantojot *ZITEST* [55], abām konfigurācijām iegūstot vērtības virs 0,95. Jaudas spektrālā blīvuma analīze apstiprināja platjoslas spektrus ar centru pamatfrekvencē. Palielinot pamatfrekvenci no 96,86 kHz līdz 968,59 kHz, novērota izteikta joslas platuma palielināšanās, saglabājot spektra vispārējo formu, kas apliecina joslas platuma mērogojamību ar frekvenci.

Laika sakarības starp oscilatora mainīgajiem analizētas, izmantojot savstarpējās korelācijas fun-



(a)

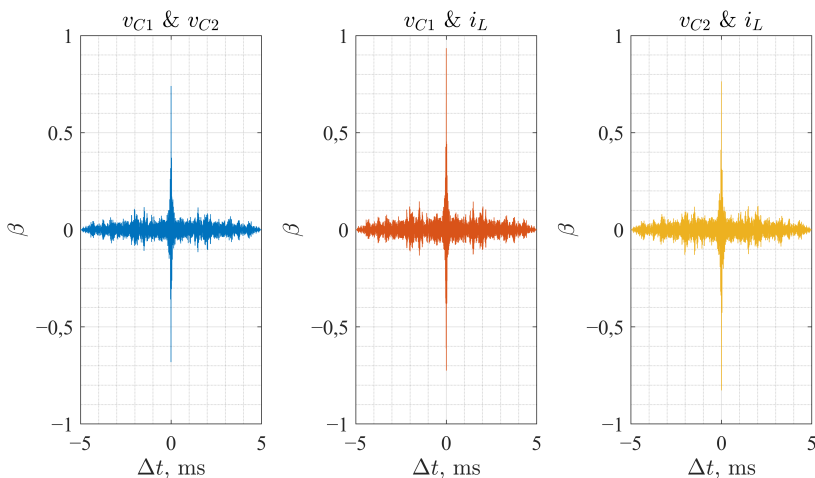


(b)

1.2. att. Kolpica haosa oscilatora (a) *LTspice* skaitliskās modelēšanas modelis un (b) izgatavotais *PCB* prototips.

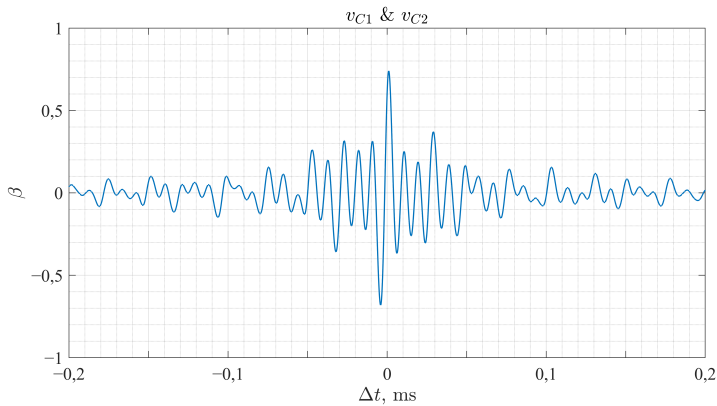
kcijas, lai novērtētu minimālo bita ilgumu [45]. Piemērs konfigurācijai ar  $f_0 = 96,86$  kHz parādīts 1.3. att. Visām signālu pāru kombinācijām savstarpējās korelācijas funkcijām raksturīgs dominējošs maksimums nulles laika nobīdes tuvumā, kam seko strauja amplitūdas samazināšanās, kas ir tipiska haotisku signālu īpašība.

Savstarpējās korelācijas funkcijas maksimālā vērtība netiek sasniegta precīzi pie nulles laika nobīdes, bet gan pie nelielas nobīdes, kā parādīts 1.4. att. Šāda uzvedība izskaidrojama ar fāžu attiecībām starp spriegumiem uz kondensatoriem un strāvu induktorā, kuras nosaka shēmas diferen-



1.3. att. Savstarpējās korelācijas funkcijas signālu pāriem  $v_{C1}$  un  $v_{C2}$ ,  $v_{C1}$  un  $i_L$ , kā arī  $v_{C2}$  un  $i_L$  Kolpica haosa oscilatorā pie  $f_0 = 96,86$  kHz.

ciālvienādojumi.



1.4. att. Pietuvināts savstarpējās korelācijas funkcijas fragments starp  $v_{C1}$  un  $v_{C2}$  Korpica haosa oscilatorā pie  $f_0 = 96,86$  kHz.

Savstarpējās korelācijas analīze veikta abām pamatfrekvences konfigurācijām un atkārtota, izmantojot eksperimentāli izmērītus prototipa signālus. Visos gadījumos pamatfrekvences palielināšana samazina augstas korelācijas laika apgabalu. Minimālais bita ilgums definēts kā laika nobīde, pie kuras korelācijas amplitūda pēc dominējošā maksimuma samazinās līdz nelielām svārstībām [45]. Skaitliskās modelēšanas rezultātos šī nobīde samazinās no aptuveni 60  $\mu\text{s}$  pie 96,86 kHz līdz aptuveni 6  $\mu\text{s}$  pie 968,59 kHz, savukārt prototipa mērījumos – no aptuveni 78  $\mu\text{s}$  līdz aptuveni 7,5  $\mu\text{s}$ .

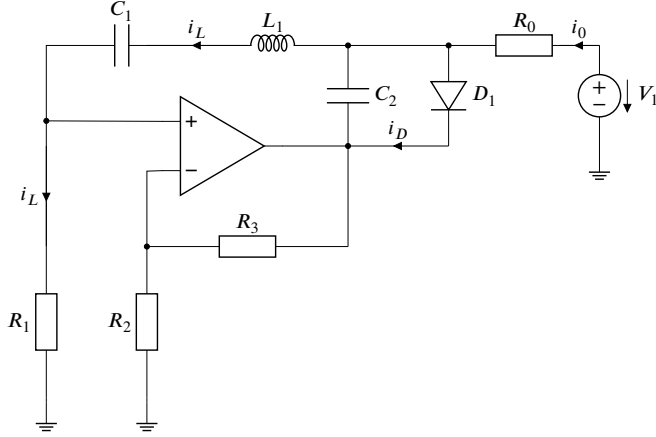
Iegūtie rezultāti apstiprina, ka pamatfrekvences palielināšana ļauj saīsināt bita ilgumu un palielināt sasniedzamo datu pārraides ātrumu, nodrošinot kvantitatīvu pamatojumu sakaru parametru izvēlei haosā balstītās datu pārraides sistēmās.

## 1.2. Viļņas haosa oscilators

Viļņas haosa oscilators [56] ir vienkārša un noturīga nelineāra shēma, ko plaši izmanto haotiskās dinamikas pētījumos, pateicoties tās stabilai darbībai un vienkāršai realizācijai [42, 50, 57, 58]. Tas izvēlēts šajā darbā, jo tā vienkāršā struktūra nodrošina labu sakritību starp skaitliskās modelēšanas un eksperimentālo mērījumu rezultātiem. Turklāt oscilators ļauj darboties dažādos frekvenču diapazonos, atbilstoši izvēloties reaktīvo komponentu vērtības, kas padara to piemērotu haosā balstītām sakaru sistēmām ar atšķirīgām joslas platuma prasībām.

### *Matemātiskais modelis*

Viļņas oscilatora shēma, kas parādīta 1.5. att., sastāv no operacionālā pastiprinātāja, RLC rezonanses kontūra pozitīvas atgriezeniskās saites ķēdē, papildu kondensatora un diodes, kas pilda nelineārā elementa funkciju. Šāda konfigurācija nodrošina haotisku dinamiku, izmantojot minimālu komponentu skaitu.



1.5. att. Viļņas haosa oscilatora shēma.

Viļņas haosa oscilatora uzvedību raksturo diferenciālvienādojumu sistēma, kas apraksta trīs stāvokļa mainīgo dinamiku:  $v_{C1}$  – spriegumu uz kondensatora  $C_1$ ,  $i_L$  – strāvu induktorā  $L_1$ , un  $v_{C2}$  – spriegumu uz papildu kondensatora  $C_2$ . Šī sistēma tiek iegūta, piemērojot Kirhoha likumus:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_L \\ C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = i_0 + i_L - i_D \\ L_1 \frac{di_L}{dt} = (k-1) \cdot R_1 \cdot i_L - v_{C1} - v_{C2} \end{cases}, \quad (1.6.)$$

kur  $i_D$  ir diodes  $D_1$  strāva,  $i_0$  – rezistora  $R_0$  strāva, bet  $k$  – neinvertējošā operacionālā pastiprinātāja slēgtās ķēdes pastiprinājuma koeficients.

Oscilatora nelinearitāte ieviesta ar diodes strāvas–sprieguma raksturlīkni, ko apraksta šāda izteiksme:

$$i_D = i_S \cdot \left( e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1 \right), \quad (1.7.)$$

kur  $v_D$  ir spriegums uz diodes (paralēlā savienojuma dēļ  $v_D = v_{C2}$ ),  $i_S$  ir diodes piesātinājuma strāva (aptuveni  $2 \times 10^{-14}$  A standarta 1N4148 diodei), bet  $v_T$  ir termiskais spriegums (aptuveni 25.8 mV istabas temperatūrā, 298 K).

#### Pamatfrekvence

Viļņas haosa oscilators, kas pirmoreiz aprakstīts darbā [56], ir balstīts RLC rezonanses kontūra topoloģijā. Tā sākotnējā konfigurācijā komponentu vērtības ir:  $C_1 = 100$  nF,  $C_2 = 15$  nF,  $L_1 = 100$  mH,  $R_1 = 1$  kΩ,  $R_2 = 10$  kΩ,  $R_3 = 6$  kΩ,  $R_0 = 20$  kΩ,  $V_1 = 5$  V un  $k = 1.6$ . Oscilatora

pamatfrekvenci  $f_0$  var tuvināti noteikt, izmantojot standarta RLC rezonanses izteiksmi:

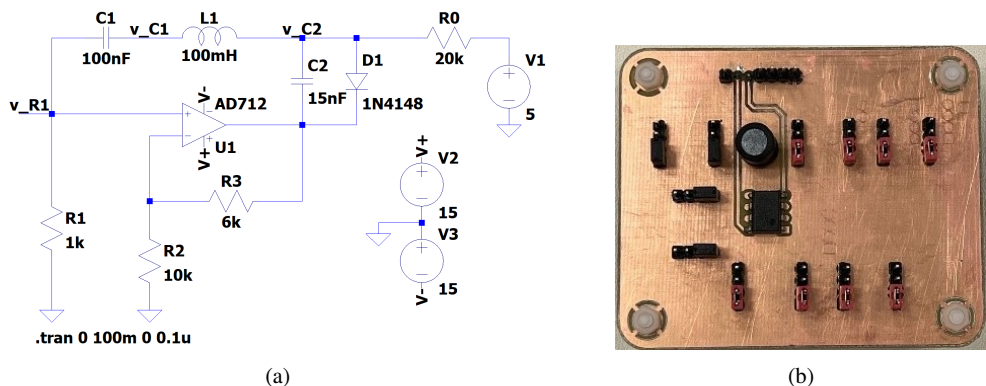
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}}. \quad (1.8.)$$

Pie šīm komponentu vērtībām pamatfrekvence ir aptuveni 1.6 kHz.

Pamatfrekvenci iespējams palielināt, proporcionāli samazinot reaktīvo elementu vērtības. Piemēram, samazinot  $C_1$ ,  $C_2$  un  $L_1$  vērtības 100 reizes līdz  $C_1 = 1$  nF,  $C_2 = 150$  pF un  $L_1 = 1$  mH, iegūst aptuveni 160 kHz pamatfrekvenci. Būtiski, ka, saglabājot šo elementu savstarpējās proporcionālās attiecības, tiek saglabāta arī oscilatora haotiskā uzvedība.

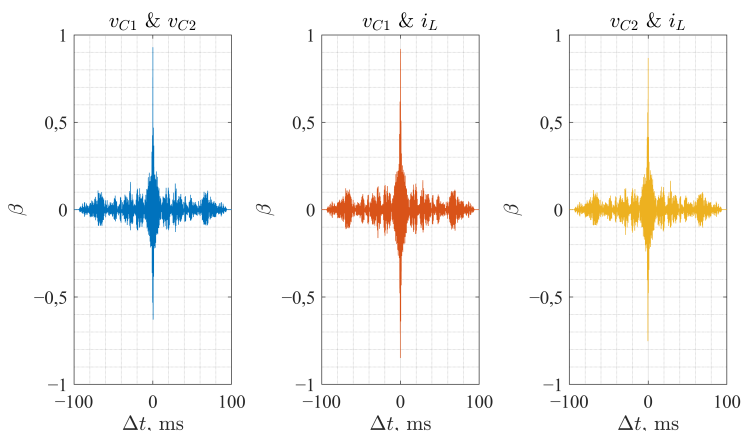
#### Skaitliskā modelēšana un prototipa mērījumi

Viļņas haosa oscilatora modelis realizēts *LTspice* vidē un analizēts pie pamatfrekvencēm 1,6 kHz un 160 kHz (skat. 1.6. (a) att.). Skaitliskās modelēšanas laikā iegūtie signāli eksportēti un apstrādāti *MATLAB* vidē. Rezultātu verificēšanai izgatavots prototips, izmantojot identisku *PCB* izkārtojumu abām konfigurācijām un mainot tikai reaktīvo komponentu vērtības. Sprieguma signāli izmērīti, izmantojot *ADP3450* jaukto signālu osciloskopu, un analizēti *MATLAB* vidē. Prototipa *PCB* augšskats parādīts 1.6. (b) att.



1.6. att. Viļņas haosa oscilatora (a) *LTspice* skaitliskās modelēšanas modelis un (b) izgatavotais *PCB* prototips (augšskats).

Frekvenču apgabala raksturlielumi novērtēti, izmantojot jaudas spektrālo blīvumu (*PSD*), kas gan skaitliskajā modelēšanā, gan prototipa mērījumos uzrāda platjoslas raksturu ar centru pamatfrekvences apkārtnē. Palielinot pamatfrekvenci, tiek novērots atbilstošs joslas platuma pieaugums. Haotisko signālu laika īpašības analizētas, izmantojot savstarpējās korelācijas funkcijas, lai raksturotu signālu savstarpējās attiecības un novērtētu minimālo bita ilgumu. 1.7. att. parādīts raksturīgs savstarpējās korelācijas piemērs, kas iegūts *LTspice* skaitliskajā modelēšanā pie  $f_0 = 1,6$  kHz.



1.7. att. Savstarpējās korelācijas funkciju piemērs signālu pāriem  $v_{C1}$  un  $v_{C2}$ ,  $v_{C1}$  un  $i_L$ , kā arī  $v_{C2}$  un  $i_L$  Viļņas haosa oscilatorā pie  $f_0 = 1,6$  kHz (skaitliskā modelēšana).

Visiem signālu pāriem un abām pamatfrekvencēm savstarpējās korelācijas funkcijām raksturīgs dominējošs maksimums nulles laika nobīdes tuvumā, kam seko strauja amplitūdas samazināšanās, kas liecina par īstermiņa korelāciju un aperiodisku, haotisku uzvedību. Gan skaitliskajā modelēšanā, gan prototipa mērījumos maksimālā korelācija tiek sasniegta pie nenulles laika nobīdēm. Minimālais bita ilgums definēts kā laika nobīde, pie kuras savstarpējās korelācijas amplitūda pēc dominējošā maksimuma samazinās līdz nelielām svārstībām. Skaitliskās modelēšanas rezultātos šī nobīde ir aptuveni 1,87 ms pie  $f_0 = 1,6$  kHz (535 b/s) un 18,1  $\mu$ s pie  $f_0 = 160$  kHz (55,2 kb/s), savukārt prototipa mērījumos attiecīgi 1,89 ms (529,1 b/s) un 18,81  $\mu$ s (53,2 kb/s).

### 1.3. Diskusija un salīdzinošā analīze

Gan Kolpica, gan Viļņas haosa oscilators skaitliskajā modelēšanā un prototipā uzrādīja stabilu haotisku dinamiku – *ZITEST* vērtības pārsniedza 0,90, iegūti platjoslas spektri, un savstarpējās korelācijas analīze apstiprināja strauju dekorelāciju. Prototipa mērījumos novērots neliels sasniedzamā datu pārraides ātruma samazinājums, ko nosaka shēmas nelinearitātes un parazitārie efekti.

Šajā darbā bita ilgums definēts kā laika nobīde, pie kuras savstarpējās korelācijas amplitūda samazinās no dominējošā maksimuma, tādējādi nodrošinot fizikāli pamatotu kritēriju simbolu atdalīšanai. Kā parādīts 1.1. tabulā, Kolpica oscilatora pamatfrekvences palielināšana no 96,86 kHz līdz 968,59 kHz samazina bita ilgumu un palielina datu pārraides ātrumu no 16,7 kb/s līdz 166,7 kb/s skaitliskajā modelēšanā un no 12,82 kb/s līdz 133,3 kb/s prototipa mērījumos.

1.1. tabula

Kolpica haosa oscilatora sasniedzamo datu pārraides ātrumu kopsavilkums				
$f_0$ , kHz	Skaitliskā modelēšana		Prototips	
	Bitu ilgums ( $\mu$ s)	Datu pārraides ātrums (kb/s)	Bitu ilgums ( $\mu$ s)	Datu pārraides ātrums (kb/s)
96,86	60	16,7	78	12,82
968,59	6	166,7	7,5	133,3

Līdzīga frekvences mērogošanas tendence novērota arī Viļņas haosa oscilatoram, kā apkopots 1.2. tabulā. Palielinot pamatfrekvenci no 1,6 kHz līdz 160 kHz, samazinās raksturīgā savstarpējās korelācijas laika nobīde un sasniedzamais datu pārraides ātrums pieaug no aptuveni 0,5 kb/s līdz vairāk nekā 50 kb/s gan skaitliskajā modelēšanā, gan prototipa mērtījumos.

1.2. tabula

Viļņas haosa oscilatora sasniedzamo datu pārraides ātrumu kopsavilkums				
$f_0$ (kHz)	Skaitliskā modelēšana		Prototips	
	Bitu ilgums	Datu pārraides ātrums (kb/s)	Bitu ilgums	Datu pārraides ātrums (kb/s)
1,6	1,87 ms	0,535	1,89 ms	0,529
160	18,1 $\mu$ s	55,2	18,81 $\mu$ s	53,16

Lai gan Kolpica oscilators nodrošina lielākus maksimālos datu pārraides ātrumus, Viļņas oscilators, izmantojot atšķirīgu shēmas topoloģiju, apstiprina to pašu fundamentālo sakarību starp oscilatora pamatfrekvenci, savstarpējās korelācijas laika nobīdi un bitu ilgumu. Iegūtie datu pārraides ātrumi atbilst vairāku plaši izmantotu *IoT* sakaru standartu darbības diapazoniem. Piemēram, LoRaWAN 868 MHz ISM joslā atbalsta datu pārraides ātrumus aptuveni no 0,3 kb/s līdz 50 kb/s atbilstoši *LoRa Alliance* definētajām konfigurācijām [59]. *Zigbee* sistēmas, kas balstītas *IEEE* 802.15.4 standartā, nodrošina datu pārraides ātrumus līdz aptuveni 20 kb/s pie 868 MHz un 40 kb/s pie 915 MHz [60]. Savukārt *Sigfox* sistēmas darbojas ar ievērojami zemākiem datu pārraides ātrumiem – aptuveni 100 bit/s 868 MHz joslā, kā noteikts Eiropas Elektrosakaru standartizācijas institūta (angļu val. *European Telecommunications Standards Institute, ETSI*) standartā EN 300 220-2 [61]. Šie salīdzinājumi norāda, ka haosā balstītās sakaru sistēmas var konfigurēt darbībai datu pārraides ātrumu diapazonos, kas ir aktuāli mūsdienu *IoT* un *WSN* lietojumos. Kopumā iegūtie rezultāti apstiprina, ka haotiskā oscilatora pamatfrekvence ir tiešs sasniedzamā datu pārraides ātruma regulēšanas parametrs, nodrošinot simbolu ātruma pielāgošanu, kas ir verificēta gan ar skaitlisko modelēšanu, gan eksperimentāli.

## 2. HAOTISKĀ SINHRONIZĀCIJA

Haotisko oscilatoru sinhronizācija ir būtiska haosā balstītu sakaru sistēmu darbībai, jo tā nodrošina uzticamu informācijas pārraidi arī trokšņainajā kanālā un aparatūras novirzes apstākļos. Starp esošajām pieejām *Pecora–Carroll* metodi [62] plaši izmanto tās vienkāršības un piemērojamības dēļ gan analogajām, gan digitālajām haotiskajām shēmām [51, 63].

Šajā nodaļā analizēta pirmajā nodaļā apskatīto Kolpica un Viļņas haotisko oscilatoru sinhronizācija, izskatot Kolpica oscilatoru ar 968,59 kHz pamatfrekvenci un Viļņas oscilatoru ar 160 kHz pamatfrekvenci. Analīzes uzmanības centrā ir sinhronizācijas konfigurācijas un to noturība pret *AWGN*, kas ir kritisks faktors drošu sakaru sistēmu projektēšanā. Nodaļā vispirms sniegts haotiskās sinhronizācijas teorētiskais pamatojums un eksperimentālā realizācija, kam seko abu oscilatoru trokšņu noturības analīze. Iegūtie rezultāti sniedz vadlīnijas sinhronizācijas signālu un konfigurāciju izvēlei noturīgām haosā balstītām sakaru sistēmām.

### 2.1. *Pecora–Carroll* sinhronizācija

Haotiskā sinhronizācija ļauj izmantot haotiskos oscilatorus drošās sakaru sistēmās, nodrošinot uzticamu informācijas pārraidi tikai starp savstarpēji sinhronizētām sistēmām [64]. Viena no sinhronizācijas pieejām ir substitūcijas metode, kas pazīstama arī kā *Pecora–Carroll* sinhronizācija [65]. Šo metodi tās vienkāršības dēļ plaši lieto gan analogajām, gan diskrētajām haotiskajām sistēmām.

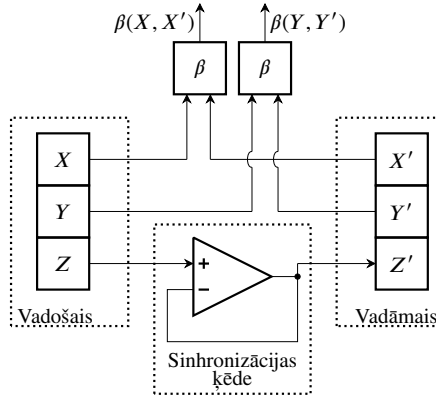
Šajā metodē viens no vadāmā oscilatora stāvokļa mainīgajiem tiek aizstāts ar atbilstošu signālu no vadošā oscilatora, tādējādi piespiežot vadāmo sistēmu sekot vadošās sistēmas dinamikai. Sinhronizācijas kvalitāti parasti novērtē, izmantojot Pīrsona korelācijas koeficientu  $\beta$ , kas definēts kā:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.1.)$$

kur  $x$  un  $y$  apzīmē attiecīgi vadošā un vadāmā oscilatora signālus. Koeficienta  $\beta$  vērtības, kas tuvas vienībai, norāda uz spēcīgu sinhronizāciju, savukārt  $\beta \approx 0$  raksturo nekorelētu uzvedību.

Sinhronizācijas shēma tiek realizēta, ievadot izvēlēto vadošo signālu vadāmajā oscilatorā, kā parādīts 2.1. att. Vienības pastiprinājuma operacionālais pastiprinātājs tiek izmantots kā buferis, lai izolētu vadošo un vadāmo shēmu un novērstu slodzes efektus [66, 67]. Sinhronizācijas mezgla izvēle nosaka sinhronizācijas konfigurāciju un virzienu. Tā kā haotiskie oscilatori parasti nodrošina vairākus pieejamus stāvokļa mainīgos, ir iespējamas vairākas sinhronizācijas konfigurācijas.

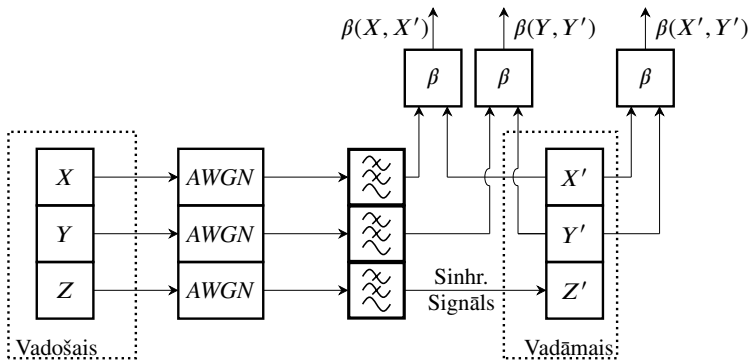
Kolpica haotiskajam oscilatoram (1.1. att.) sinhronizāciju var īstenot, izmantojot signālus  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$  vai  $v_{RL}$  [48], savukārt Viļņas oscilatoram (1.5. att.) atbilstošie signāli ir  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$  vai  $v_{R1}$ . Šī elastība ļauj izvēlēties vairākas sinhronizācijas konfigurācijas.



2.1. att. Haotisko oscilatoru sinhronizācijas blokshēma.

## 2.2. Haotisko oscilatoru sinhronizācijas trokšņu noturības pētījuma metodoloģija

Trokšņu noturības pētījums veikts saskaņā ar blokshēmu, kas parādīta 2.2. att., kur  $X$ ,  $Y$  un  $Z$  apzīmē vadošā haotiskā oscilatora stāvokļa mainīgos, bet  $X'$ ,  $Y'$  un  $Z'$  – atbilstošos vadāmā oscilatora mainīgos.



2.2. att. Haotiskā oscilatora sinhronizācijas trokšņu noturības izpētes blokshēma.

Šajā konfigurācijā signāls  $Z$  tiek izmantots kā sinhronizācijas signāls un aizstāj  $Z'$  vadāmajā oscilatorā, savukārt atlikušie vadošā oscilatora signāli tiek izmantoti CSK pārraidei. Signāli izplata caur AWGN kanālu, kur signāla un trokšņa attiecība (angļu val. *signal-to-noise ratio*, *SNR*) tiek mainīta diapazonā no  $-20$  dB līdz  $30$  dB, un uztvērējā tiek filtrēti ar zemo frekvenču filtru (angļu val. *low-pass filter*, *LPF*), kas paredzēts dominējošo spektrālo komponentu saglabāšanai. Sinhronizācijas kvalitāte tiek novērtēta, aprēķinot Pīrsona korelācijas koeficientus starp atbilstošajiem stāvokļa mainīgajiem, kvantitatīvi raksturojot kanāla trokšņa ietekmi.

Metodoloģiju piemēro gan Kolpica, gan Viļņas haotiskajam oscilatoram. Tā kā katrs oscila-

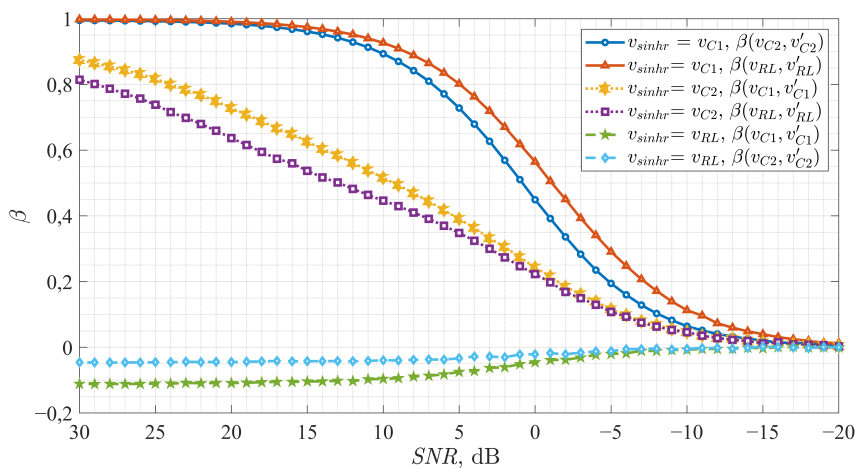
tors nodrošina trīs stāvokļa mainīgos, analizētas visas 2.1. tabulā apkopotās sinhronizācijas konfigurācijas. Kolpica oscilatoram sinhronizācija testēta, izmantojot  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$  un  $v_{RL}$ , savukārt Viļņas oscilatoram –  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$  un  $v_{R1}$ .

2.1. tabula

Kolpica un Viļņas haotisko oscilatoru sinhronizācijas konfigurācijas					
Kolpica haotiskais oscilators			Viļņas haotiskais oscilators		
$X$	$Y$	$Z$	$X$	$Y$	$Z$
$v_{C1}$	$v_{C2}$	$v_{RL}$	$v_{C1}$	$v_{C2}$	$v_{R1}$
$v_{RL}$	$v_{C1}$	$v_{C2}$	$v_{R1}$	$v_{C1}$	$v_{C2}$
$v_{C2}$	$v_{RL}$	$v_{C1}$	$v_{C2}$	$v_{R1}$	$v_{C1}$

### 2.3. Haotisko oscilatoru sinhronizācijas trokšņu noturības pētījuma rezultāti

Šajā apakšnodaļā novērtēta Kolpica un Viļņas haotisko oscilatoru sinhronizācijas trokšņu noturība dažādās vadošais–vadāmais konfigurācijās, lai identificētu sinhronizācijas signālus, kas nodrošina noturīgu darbību trokšņainos kanālos. 2.3. att. sniedz raksturīgu piemēru lietotajai analīzes metodoloģijai, parādot korelācijas koeficienta atkarību no  $SNR$ . Katra sinhronizācijas konfigurācija ir attēlota ar divām līknēm, kas atbilst korelācijām starp  $X$  un  $X'$  un starp  $Y$  un  $Y'$ , kā apkopots 2.1. tabulā.



2.3. att. Kolpica haotiskā oscilatora sinhronizācijas trokšņu noturība.

Kolpica oscilatoram sinhronizācijas veikspēja būtiski ir atkarīga no izvēlētā sinhronizācijas signāla. Izmantojot  $v_{RL}$ , sinhronizācija netiek panākta visā analizētajā  $SNR$  diapazonā. Signāls  $v_{C1}$  nodrošina abu vadāmā oscilatora signālu sinhronizāciju, tomēr ar atšķirīgiem korelācijas līmeņiem, savukārt  $v_{C2}$  nodrošina vājāku sinhronizāciju tikai pie lielākām  $SNR$  vērtībām. Šie rezultāti norāda

uz ierobežotu sinhronizācijas spēju, kas izriet no Kolpica oscilatora topoloģijas un spēcīgās saites starp stāvokļa mainīgajiem.

Pretstatā tam Viļņas haotiskais oscilators sinhronizējas visās pārbaudītajās konfigurācijās, ja trokšņa līmenis ir pietiekami zems. Konfigurācija ar  $v_{C2}$  izrāda visnoturīgāko uzvedību, nodrošinot līdzsvarotu sinhronizāciju un zemāko  $SNR$  sliekšni, savukārt  $v_{C1}$  un  $v_{R1}$  izraisa būtisku sinhronizācijas nelīdzsvarotību vadāmajā oscilatorā.

Abiem oscilatoriem kopīga novērojama parādība ir sinhronizācijas nelīdzsvarotība vadāmā oscilatora stāvokļa mainīgajos pie vienādām  $SNR$  vērtībām, kas var novest pie asimetriskas bitu detektēšanas un palielinātas kļūdu varbūtības. Šī iemesla dēļ sakaru lietojumos priekšroka tiek dota konfigurācijām, kas nodrošina līdzsvarotu korelāciju. Kopumā Viļņas oscilators nodrošina lielāku sinhronizācijas elastību un trokšņu noturību, savukārt Kolpica oscilators piedāvā uzticamu sinhronizāciju tikai atsevišķās konfigurācijās, kas motivē turpmāku savstarpējās korelācijas un datu detektēšanas veikspējas analīzi.

## 2.4. Sinhronizācijas signāla izvēles metodoloģija

Trokšņu noturības pētījums parāda, ka sinhronizācijas signāla izvēle ir izšķirošs faktors noturīgas sinhronizācijas nodrošināšanai haosā balstītās sakaru sistēmās. Atšķirtīgās shēmu topoloģijas un signālu saites dēļ gan Kolpica, gan Viļņas haotiskajiem oscilatoriem ir nepieciešama sistemātiska sinhronizācijas signāla izvēles metodoloģija.

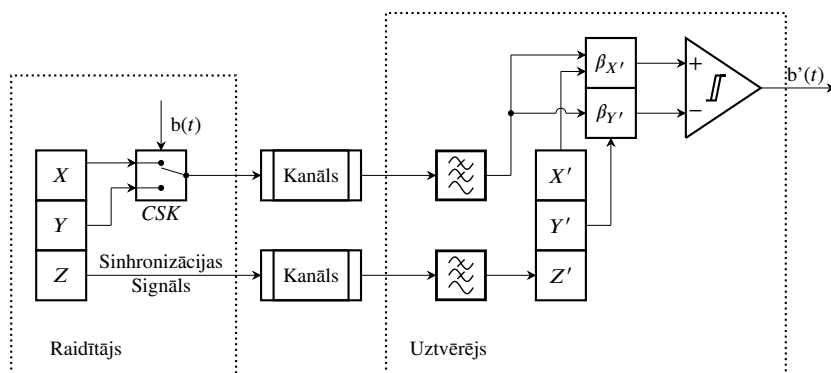
Sinhronizācijas signāls būtu jāizvēlas, pamatojoties uz šādiem kritērijiem: (i) augsta un stabila korelācija starp vadošo un vadāmo signālu plašā  $SNR$  diapazonā; (ii) līdzsvaroti sinhronizācijas līmeņi visiem datu pārraidei izmantotajiem vadāmā oscilatora signāliem, lai izvairītos no bitu detektēšanas asimetrijas; (iii) zema jutība pret trokšņu izraisītu degradāciju un (iv) zema savstarpējā korelācija starp datu signāliem simbolu diskriminācijas uzlabošanai. Papildus jāņem vērā arī praktiskie aspekti, piemēram, mezgla pieejamība, signāla amplitūda un noturība pret parazītiskiem efektiem. Izmantojot šos kritērijus eksperimentālajiem rezultātiem, tiek iegūtas skaidras vadlīnijas. Kolpica oscilatoram mezgls  $v_{C1}$  nodrošina vislabāko sinhronizācijas veikspēju, apvienojot augstu trokšņu noturību ar zemu savstarpējo korelāciju starp datu signāliem. Savukārt Viļņas oscilatoram optimālais sinhronizācijas signāls ir  $v_{C2}$ , kas nodrošina visstabilāko un līdzsvarotāko sinhronizācijas analizētajā trokšņa diapazonā. Praksē sinhronizācijas signāla izvēli var īstenot, analizējot shēmas mezglus vadošais–vadāmais konfigurācijā trokšņainos apstākļos un salīdzinot korelācijas un savstarpējās korelācijas rādītājus. Būtu jāizvēlas signāls, kas saglabā spēcīgu un līdzsvarotu sinhronizāciju ar minimālu jutību pret troksni. Šī metodoloģija nodrošina praktisku ieskatu sinhronizācijas signāla izvēlē un tieši pamato nākamajā nodaļā veikto detektēšanas nelīdzsvarotības un sliekšņa optimizācijas analīzi. Tāpat tā kalpo par pamatu 4. nodaļā veiktajai sinhronizācijas stratēģiju ietekmes uz haosā balstītu sakaru sistēmu veikspēju izvērtēšanai.

### 3. PROJEKTĒŠANA UN SIGNĀLU APSTRĀDE HAOSĀ BALSTĪTĀS SAKARU SISTĒMĀS

Haosā balstītas sakaru sistēmas ir piesaistījušas būtisku pētniecības interesi, pateicoties haotisko signālu platjoslas spektrālajām īpašībām, to neparedzamībai un drošības potenciālam [14, 15, 21, 22]. Šajā nodaļā aplūkoti galvenie sistēmas projektēšanas aspekti, tostarp arhitektūras izvēles, signālu apstrādes metodes un *CSK* ieviešana kā modulācijas shēma. Analizēti gan skaitliskās modelēšanas, gan prototipa realizācijas aspekti, īpašu uzmanību pievēršot sinhronizācijai, signālu apstrādei un sliekšņī balstītai detektēšanai uzticamai datu pārraidei.

#### 3.1. Sistēmas arhitektūra

Šī apakšnodaļa veltīta haosā balstītas sakaru sistēmas pamatkonceptijai, kurā haotiskie signāli izmantoti informācijas pārraidei un sinhronizācijai. 3.1. att. parāda šādas sistēmas vispārējo blokshēmu, ilustrējot galvenos funkcionālos blokus un signālu plūsmu.



3.1. att. Haosā balstītas sakaru sistēmas blokshēma.

Raidītājā analogais haotiskais oscilators darbojas vadošais–vadāmais konfigurācijā un ģenerē haotiskos stāvokļa mainīgos  $X$ ,  $Y$  un  $Z$ . Viens no stāvokļa mainīgajiem (parasti  $Z$ ) tiek izmantots sinhronizācijai, savukārt  $X$  un  $Y$  – informācijas pārraidei. Informāciju nesošais signāls tiek veidots, izmantojot ar bināro informācijas signālu vadītu bloku, kas pārslēdzas starp  $X$  un  $Y$ , atbilstoši bitu ‘1’ signālam  $X$  un bitu ‘0’ signālam  $Y$ , kas realizē *CSK* shēmu.

Uztvērējā vadāmais haotiskais oscilators sinhronizējas ar raidītāju, tādējādi rekonstruējot signālus  $X'$  un  $Y'$ . Informācijas detektēšana tiek veikta, salīdzinot Pīrsona korelācijas koeficientus starp saņemto signālu un vadāmā oscilatora signāliem  $X'$  un  $Y'$ , un detektētais bits tiek noteikts pēc lielākās korelācijas vērtības. Detektēšanas precizitāte ir tieši atkarīga no haotiskās sinhronizācijas kvalitātes un līdzsvara; nevienmērīga sinhronizācija starp stāvokļa mainīgajiem, īpaši trokšņainos

apstākļos, rada detektēšanas nobīdi, padarot precīzu sliekšņa izvēli būtisku uzticamai un līdzsvarotai detektēšanai.

### 3.2. Haotiskās manipulācijas realizācija

Piedāvātajā sistēmā *CSK* izmantota kā modulācijas shēma, nodrošinot digitālu datu pārraidi, izvēloties vienu no diviem haotiskajiem signāliem atbilstoši binārajam datu plūsmas signālam. Kā parādīts 3.1. att., *CSK* bloks saņem datu signālu un haotiskos signālus  $X$  un  $Y$  un veido informāciju nesošu signālu, pārslēdzoties starp  $X$  un  $Y$  atbilstoši ievades bita vērtībai.

Skaitliskajā modelēšanā *CSK* realizācija ir tieša, pateicoties skaitliskās signālu apstrādes elastīgumam. Haotiskajiem signāliem  $X$  un  $Y$  vispirms tiek atņemta vidējā vērtība, lai novērstu līdzstrāvas nobīdi. Pēc tam signāla  $Y$  amplitūda tiek pielāgota  $X$  amplitūdai, nodrošinot vienādus signālu līmeņus abiem bitu stāvokļiem. Pēc šīs priekšapstrādes *CSK* darbība tiek realizēta ar loģisku komutācijas funkciju, kuras izvade seko  $X$  vai  $Y$  atkarībā no binārā informācijas signāla. Šī pieeja vienkāršo signālu apstrādi un ļauj ātri novērtēt sistēmas darbību dažādos darbības režīmos.

Prototipā *CSK* realizācija veikta, izmantojot analogās signālu apstrādes un komutācijas mikroshēmas. Līdzstrāvas nobīde tiek novērsta, padodot signālus  $X$  un  $Y$  caur zemas nogriešanas frekvences augsto frekvenču filtriem (angļu val. *high-pass filter*, *HPF*), kas realizēti kā vienkārši RC filtri. Pēc tam signāli tiek pastiprināti ar neinvertējošiem pastiprinātājiem ar regulējamu pastiprinājumu, lai izlīdzinātu signālu amplitūdas. Komutācija tiek veikta ar analogo elektronisko slēdzi (ADG419), ko vada digitālā datu plūsma. Datu plūsma tiek ģenerēta ar *ADP3450* moduli un kontrolēta ar *Python* kodu, nodrošinot elastīgu un precīzu pārraidāmās informācijas modulāciju.

### 3.3. Detektēšana un sliekšņa noteikšana nepilnīgas sinhronizācijas apstākļos

Detektora ieejā saņemtais informāciju nesošais signāls katra bita intervālā tiek korelēts ar diviem signāliem, kurus ģenerē sinhronizētais vadāmais haotiskais oscilators, iegūstot korelācijas koeficientus, kas tiek izmantoti bitu lēmumu pieņemšanai un *BER* novērtēšanai. Ideālas, līdzsvarotas sinhronizācijas gadījumā detektēšanu var veikt, tieši salīdzinot šos koeficientus, tomēr, kā parādīts 2. nodaļā, trokšņa izraisīta sinhronizācijas nelīdzsvarotība un nenulles savstarpējā korelācija rada detektēšanas nobīdi un pasliktina veiktspēju. Lai kompensētu šos efektus, ir nepieciešams nenulles adaptīvs detektēšanas sliekšnis, kas nodrošina uzticamu un līdzsvarotu bitu detektēšanu.

Bitu detektēšanas sliekšni iespējams iegūt, izmantojot ticamības attiecības pieeju. Pieņemot *AWGN*, varbūtība, ka saņemtais signāls  $s(t)$  ir ģenerēts ar signālu  $X$ , ir:

$$\Lambda[X|s(t)] = \frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})^K} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \frac{(s_k - x_k)^2}{\sigma^2}\right), \quad (3.1.)$$

kur  $\sigma$  ir trokšņa standartnovirze, bet  $s_k$  un  $x_k$  apzīmē attiecīgi signālu  $s(t)$  un  $X$   $k$ -to nolasi. Tica-

mības attiecības logaritms ir:

$$\ln \Lambda[s(t)] = \frac{\Lambda[X|s(t)]}{\Lambda[Y|s(t)]} = \sum_{k=1}^K \frac{s_k}{\sigma^2} (x_k - y_k) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \frac{(x_k^2 - y_k^2)}{\sigma^2}. \quad (3.2.)$$

Lēmuma robeža ir definēta kā:

$$\sum_{k=1}^K s_k (x_k - y_k) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (x_k^2 - y_k^2) \geq 0. \quad (3.3.)$$

Pieņemot  $s(t) = X + n(t)$ , pirmā locekļa matemātiskā varbūtība ir:

$$E [(x_k + n_k)(x_k - y_k)] = \sum_{k=1}^K x_k^2 - \sum_{k=1}^K x_k y_k, \quad (3.4.)$$

kur  $n_k$  apzīmē trokšņa nolases. Ievietojot šo izteiksmi (3.3.), redzams, ka pieaugusi savstarpējā korelācija starp stāvokļa mainīgajiem  $X'$  un  $Y'$  samazina pareizas detektēšanas varbūtību.

Pārrakstot (3.3.), iegūst šādu detektēšanas noteikumu:

$$\sum_{k=1}^K s_k x_k \geq \sum_{k=1}^K s_k y_k + \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^K x_k^2 - \sum_{k=1}^K y_k^2 \right]. \quad (3.5.)$$

Izsakot to korelācijas koeficientu veidā, kritērijs iegūst formu  $\beta_{X'} \geq \beta_{Y'} + \frac{1}{2}(\beta_X - \beta_Y)$ , kur izpildīta nevienādība atbilst bita '1' detektēšanai, bet pretējā gadījumā – bita '0' detektēšanai.

Šāda formulācija ļauj aprēķināt adaptīvu detektēšanas sliekšni, kas ņem vērā sinhronizācijas nelīdzsvarotību, savstarpējo korelāciju un trokšņa ietekmi, tādējādi uzlabojot detektēšanas noturību un līdzsvaru haosā balstītās sakaru sistēmās.

### 3.4. Sliekšņa izvēles ietekme uz BER

AWGN apstākļos nepilnīga sinhronizācija starp vadošo un vadāmo haotisko oscilatoru rada nelīdzsvarotus korelācijas koeficientus, ieviešot detektēšanas nobīdi un palielinot bitu kļūdu intensitāti, dodot priekšroku vienam no simboliem. Lai kompensētu šo efektu, korelācijā balstītajā detektēšanas procesā ieviests nenulles detektēšanas sliekšnis. Tā efektivitāte novērtēta, analizējot BER plašā SNR diapazonā. 3.1. tabula apkopo iegūtās BER vērtības un kļūdaino lēmumu skaitu raksturīgai Viļņas oscilatora konfigurācijai, kur sinhronizācijas signāls ir  $\nu_{R1}$ .

3.1. tabula

Kļūdaino lēmumu skaits ar detektēšanas sliekšni un bez tā sistēmā, kuras pamatā ir Viļņas haotiskais oscilators, izmantojot  $v_{R1}$  kā sinhronizācijas signālu

SNR, dB	Bez sliekšņa			Ar sliekšni		
	BER	Viltus '0'	Viltus '1'	BER	Viltus '0'	Viltus '1'
-15	0,4407	2287	2120	0,4370	2168	2202
-10	0,3249	1761	1488	0,3195	1598	1597
-5	0,1134	702	432	0,1053	519	534
0	0,0121	79	42	0,0107	57	50
2	0,0048	34	14	0,0043	21	22
4	0,0019	12	7	0,0014	7	7

Kā redzams 3.1. tabulā, detektēšanas sliekšņa ieviešana uzlabo sistēmas veiktspēju plašā SNR diapazonā. Bez sliekšņa detektēšanas kļūdas starp simboliem tiek sadalītas nevienmērīgi sinhronizācijas nelīdzsvarotības dēļ, īpaši pie augstākām SNR vērtībām. Sliekšņa ieviešana līdzsvaro detektēšanas procesu, samazina kopējo BER un mazina nepilnīgas sinhronizācijas ietekmi, apstiprinot sliekšņa kompensācijas efektivitāti haosā balstītās sakaru sistēmās.

### 3.5. Secinājumi

Šajā nodaļā analizēti galvenie haosā balstītu sakaru sistēmu projektēšanas un signālu apstrādes aspekti, izceļot vadošā un vadāmā haotiskā oscilatora lomu, CSK modulācijas bloku un detektēšanas procesu. CSK realizācija aplūkota gan skaitliskajā modelēšanā, gan prototipa realizācijā, uzsverot pāreju no elastīgas skaitliskās apstrādes uz praktisku analogo realizāciju.

Analīze parādīja, ka sinhronizācijas nelīdzsvarotība starp haotiskajiem stāvokļa mainīgajiem izraisa nobīdītu korelācijā balstītu detektēšanu un palielinātu kļūdu varbūtību. Lai mazinātu šo efektu, atvasināts un lietots adaptīvs detektēšanas sliekšnis, kas tieši kompensē nevienādus korelācijas līmeņus. Rezultāti apliecina, ka sliekšnī balstīta detektēšana būtiski samazina bitu kļūdu intensitāti un līdzsvaro simbolu kļūdas, tādējādi apstiprinot šīs nodaļas tēzi. Iegūtie secinājumi uzsver adaptīvu detektēšanas stratēģiju nozīmi uzticamai CSK sakaru sistēmu darbībai praktiskos, nepilnīgas sinhronizācijas apstākļos.

## 4. PROGRESĪVAS MODULĀCIJAS METODES HAOSĀ BALSTĪTĀS SAKARU SISTĒMĀS

Haosā balstītas sakaru sistēmas ģenerē platjoslas pamatjoslas signālus, izmantojot haotisko manipulāciju. Lai gan šie signāli nodrošina drošu pārraidi, praktiskos *WSN* un *IoT* lietojumos ir nepieciešama darbība reglamentētās *RF* joslās, tādēļ ir vajadzīgs papildu modulācijas posms, kas pārnes haotiskos signālus uz nesējfrekvenci, saglabājot to signālu īpašības. Šī *RF* modulācija nosaka arī haotiskā signāla spektrālo novietojumu un tieši ietekmē noturību pret troksni, traucējumiem un daudzceļu izplatīšanos.

Šajā nodaļā ir ieviestas progresīvas modulācijas metodes haosā balstītu signālu pārnesei uz *RF* joslu un spektrālai formēšanai. Aplūkotas divas pieejas: *QAM* kā lineāra modulācijas metode un *FM* kā nelineāra pieeja, kas balstīta frekvences deviācijā. Abas metodes integrētas ar *CSK*, realizētas skaitliskajā modelēšanā un prototipos un novērtētas daudzceļu izplatīšanās apstākļos.

Attiecīgi šīs nodaļas tēze ir haotiskās manipulācijas apvienošana ar progresīvu *RF* modulāciju – *QCSK* un *FM-CSK* realizācijām, izmantojot Viļņas haotisko oscilatoru, – uzlabo noturību pret daudzceļu izplatīšanos, salīdzinot ar tradicionālām 4-*QAM* un 2-*FSK* sistēmām divstaru kanāla modelī.

### 4.1. Modulācijas shēmas

*Kvadratūras haotiskās manipulācijas sakaru sistēma*

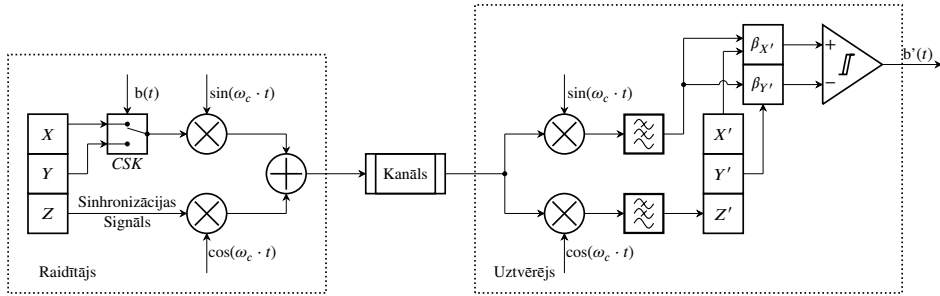
*QCSK* sakaru sistēma apvieno *CSK* un *QAM* principus, savienojot haotisko modulāciju ar lineāru kvadratūras modulāciju, lai nodrošinātu spektrāli efektīvu un koherentu haosā balstītu sakaru sistēmu. Šajā arhitektūrā tiek izmantotas divas ortogonālas nesējkomponentes: sinfāzes atzars pārraida sinhronizācijas signālu, bet kvadratūras atzars – informāciju nesošo haotisko signālu. Šāda struktūra ļauj vienlaikus pārraidīt sinhronizāciju un datus vienā un tajā pašā frekvences kanālā.

4.1. att. parādīta *QCSK* sistēmas blokshēma. Raidītājā vadošais haotiskais oscilators ģenerē stāvokļa mainīgos, kas veido sinhronizācijas signālu  $I(t)$  un informāciju nesošo haotisko signālu  $Q(t)$ . Šie signāli attiecīgi tiek padoti uz ortogonāliem nesējiem  $\cos(\omega_c t)$  un  $\sin(\omega_c t)$  un apvienoti vienā kvadratūras modulētā signālā. Pārraidītais signāls ir:

$$s(t) = I(t) \cos(\omega_c t) - Q(t) \sin(\omega_c t), \quad (4.1.)$$

kur  $\omega_c$  apzīmē nesējfrekvences leņķisko frekvenci. Pateicoties kvadratūras modulācijas lineārajai dabai, haotisko signālu spektrālās īpašības tiek saglabātas.

Uztvērējā ienākošais signāls tiek koherenti demodulēts, izmantojot sinhronizētus ortogonālos



4.1. att. QPSK sakaru sistēmas blokshēma.

nesējus. Reizināšana ar  $\cos(\omega_c t)$  un  $\sin(\omega_c t)$  dod:

$$s(t) \cos(\omega_c t) = \frac{I(t)}{2} - \frac{I(t)}{2} \cos(2\omega_c t) + \frac{Q(t)}{2} \sin(2\omega_c t), \quad (4.2.)$$

$$-s(t) \sin(\omega_c t) = \frac{Q(t)}{2} - \frac{I(t)}{2} \sin(2\omega_c t) - \frac{Q(t)}{2} \cos(2\omega_c t). \quad (4.3.)$$

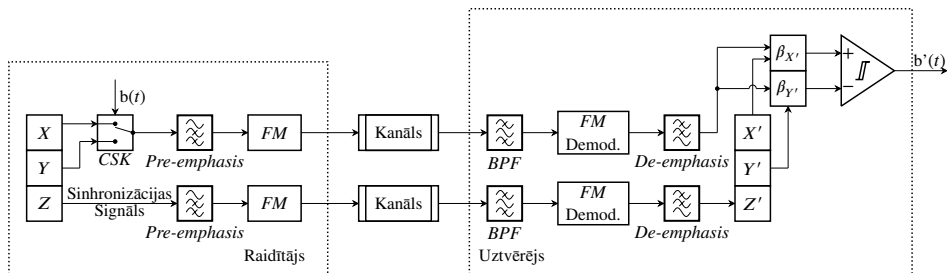
Zemfrekvences filtrēšana novāc augstfrekvences komponentes pie  $2\omega_c$ , rezultātā iegūstot atjaunos pamatjoslas signālus  $I'(t)$  un  $Q'(t)$ .

Atjaunotais sinhronizācijas signāls  $I'(t)$  tiek ievadīts vadāmajā haotiskajā oscilatorā, nodrošinot haotisko sinhronizāciju starp raidītāju un uztvērēju. Pēc tam rekonstruētie vadamā oscilatora signāli tiek izmantoti korelācijā balstītā detektēšanas procesā, lai atgūtu pārraidīto informāciju. Šī arhitektūra saglabā haosā balstītas modulācijas drošības īpašības, vienlaikus izmantojot kvadrātūras pārraides spektrālo efektivitāti un koherento uztveršanu.

*Ar frekvences modulāciju realizēta haotiskās manipulācijas sakaru sistēma*

*FM-CSK* sakaru sistēma apvieno *CSK* ar *FM*, lai nodrošinātu noturīgu haotisko signālu pārraidi. Šajā arhitektūrā vadošais haotiskais oscilators ģenerē vairākus stāvokļa mainīgos, no kuriem viens kalpo kā sinhronizācijas signāls, bet pārējie divi tiek izmantoti informāciju nesošā signāla veidošanai. Iegulstot haotiskos signālus frekvences modulētā nesējā, sistēma saglabā haotiskās modulācijas nelineārās īpašības, vienlaikus izmantojot *FM* noturību pret troksni.

4.2. att. parādīta *FM-CSK* sakaru sistēmas blokshēma. Raidītājā sinhronizācijas signāls un *CSK* veidotais informāciju nesošais haotiskais signāls tiek apstrādāti paralēlos atzaros un izmantoti nesējfrekvences modulācijai. Iegūtais signāls tiek pārraidīts sakaru kanālā. Tā kā informācija tiek pārraidīta momentānās frekvences izmaiņās, nevis amplitūdā, pārraidītais signāls ir noturīgāks pret aditīvu troksni un amplitūdas kropļojumiem.



4.2. att. FM-CSK sakaru sistēmas blokhēma.

Uztvērējā ienākošais signāls tiek filtrēts un demodulēts, lai atgūtu pamatjoslas sinchronizācijas un informāciju nesozo haotisko signālu. Atjaunotais sinchronizācijas signāls tiek ievadīts vadāmajā haotiskajā oscilatorā, lai nodrošinātu haotisko sinchronizāciju. Pēc sinchronizācijas rekonstruētie oscilatora signāli tiek salīdzināti ar saņemto informāciju nesozo signālu, izmantojot korelācijā balstītu detektēšanu, kas ļauj uzticami atgūt pārraidītos datus. Šī arhitektūra nodrošina drošu haosā balstītu sakaru sistēmu, vienlaikus uzlabojot noturību pret kanāla troksni un kropļojumiem.

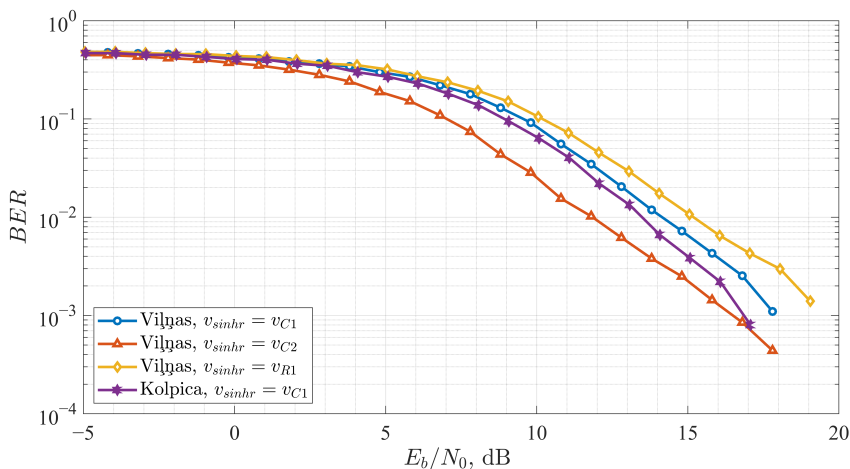
## 4.2. QCSK sistēmas veiktspējas analīze pie dažādām sinchronizācijas signāla konfigurācijām

QCSK sakaru sistēmas veiktspēja būtiski ir atkarīga no sinchronizācijas signāla izvēles, kas tiek izmantots haotisko oscilatoru sinchronizēšanai. Kā parādīts 2. nodaļā, sinchronizācijas līmenis dažādos ķēdes mezglos atšķiras, radot korelācijas nelīdzsvarotību, kas tieši ietekmē detektēšanas precizitāti un noturību pret troksni. Šajā apakšnodaļā novērtēta sinchronizācijas signāla izvēles ietekme uz QCSK veiktspēju. Viļņas haotiskajam oscilatoram kā sinchronizācijas signāli apskatīti visi trīs signāli, kas analizēti 2. nodaļā, nodrošinot tiešu dažādu konfigurāciju salīdzinājumu. Kolpica haotiskajam oscilatoram uzticama sinchronizācija tika iegūta tikai, izmantojot mezglu  $v_{C1}$ , tādēļ analīzē ir iekļauta tikai šī konfigurācija.

4.3. att. parāda BER atkarību no  $E_b/N_0$  visām pārbaudītajām QCSK konfigurācijām. Vislabāko veiktspēju sasniedz Viļņas haotiskais oscilators, izmantojot  $v_{C2}$  kā sinchronizācijas signālu, jo šī konfigurācija nodrošina līdzsvarotus korelācijas līmeņus starp  $X$  un  $Y$ , augstu noturību pret troksni un zemu savstarpējo korelāciju informāciju nesošajiem haotiskajiem signāliem, kā rezultātā iegūstot zemāko novēroto BER.

QCSK sistēma, kuras pamatā ir Kolpica haotiskais oscilators, uzrādīja otro labāko veiktspēju, kur sinchronizācija veikta, izmantojot mezglu  $v_{C1}$ . Lai gan šī konfigurācija demonstrēja sinchronizācijas noturību, kas ir salīdzināma ar  $v_{C2}$  sinchronizēto Viļņas oscilatora sistēmu, nevienādi korelācijas līmeņi starp  $X'$  un  $Y'$  ieviesa detektēšanas nelīdzsvarotību, kas uztvērējā būtu jākompensē.

Pārējās Viļņas oscilatora konfigurācijas uzrādīja tendences, kas atbilst sinchronizācijas noturības



4.3. att. BER atkarība no  $E_b/N_0$  QCSK datu pārraides sistēmai.

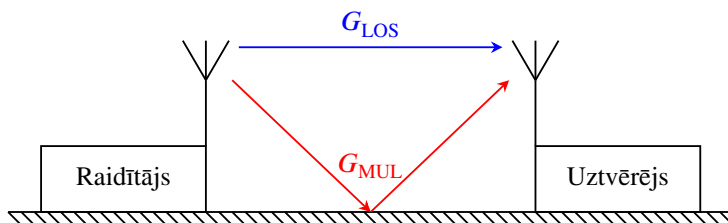
pret troksni pētījumā novērotajam. Vissliktākā veikspēja tika iegūta, ja kā sinhronizācijas signāls tika izmantots  $v_{R1}$ , jo paaugstināta jutība pret troksni pasliktināja BER veikspēju.

### 4.3. QAM un FM balstītu sakaru sistēmu veikspēja vairākceļu izplatīšanās kanālā

Šajā apakšnodaļā sniegta QCSK un FM-CSK sakaru sistēmu salīdzinošā analīze, lai novērtētu to veikspēju WSN. Tā kā šādām sistēmām ir jādabojas uzticami bezvadu vidē, īpaša uzmanība pievērsta daudzceļu izplatīšanās ietekmei, kas izraisa starpsimbolu interferenci un selektīvu vājināšanu. Balstoties iepriekšējā apakšnodaļā AWGN apstākļos iegūtajos rezultātos, sistēmu veikspēja novērtēta divstaru izplatīšanās kanālā, un pēc tam salīdzināta QCSK un FM-CSK noturība pret troksni daudzceļu izplatīšanās kanālā.

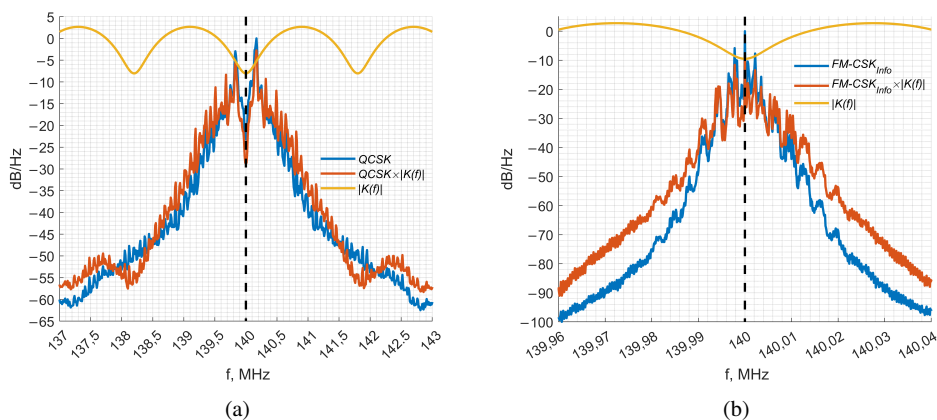
#### Pētījuma metodoloģija

Sistēmu veikspēja daudzceļu izplatīšanās kanālā novērtēta, izmantojot MATLAB balstītu skaitliskās modelēšanas metodoloģiju, kas ir izstrādāta haosā balstītām sakaru sistēmām, proti, QCSK un FM-CSK. Lai nodrošinātu korektu salīdzinājumu, abām arhitektūrām izmantots vienots skaitliskās modelēšanas uzstādījums. Frekvences selektīvas vājināšanās emulācijai izmantots divstaru kanāls. Modelis sastāv no tiešā ceļa un aizkavēta atstarotā ceļa, kas veido spektrālu iegriezumu, kura pozīcija ir atkarīga no ceļa aiztures. Šajā pētījumā aizture ir izvēlēta tā, lai iegriezums atrastos pie 140 MHz starpfrekvences (angļu val. *intermediate frequency, IF*). Divstaru daudzceļu kanāla modelis ir parādīts 4.4. att. Lai gan iegriezuma frekvence ir fiksēta, tā dziļums tiek mainīts, lai novērtētu sistēmas noturību dažādos vājināšanās apstākļos.



4.4. att. Emulētā divstaru kanāla modelis.

4.5. att. ilustrē divstaru kanāla ietekmi uz haosā balstīto pārraides shēmu spektriem. 4.5. (a) att. parāda *QCSK* signāla spektru, savukārt 4.5. (b) att. parāda atbilstošo rezultātu *FM-CSK* signālam. Abos gadījumos uz spektra ir attēlota kanāla amplitūdas frekvenču raksturliņķne  $|K(f)|$ , kas norāda spektrālā iegriezuma novietojumu un dziļumu.



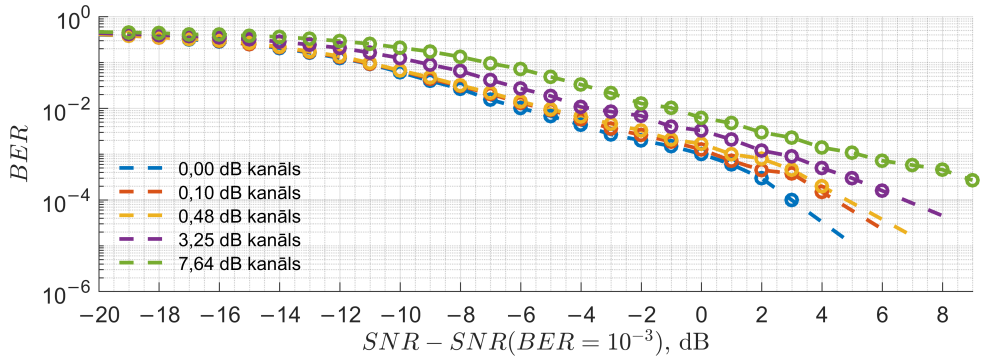
4.5. att. Divstaru kanāla ietekme uz haosā balstītu pārraidi (a) *QCSK* un (b) *FM-CSK*.

Pēc izplatīšanās daudzceļu kanālā saņemtajam signālam tiek pievienots *AWGN* ar kontrolētiem *SNR* līmeņiem. Saņemtie signāli tiek demodulēti, izmantojot iepriekš darbā definēto haosā balstīto uztvērēju, un iegūtais *BER* tiek novērtēts kā funkcija no *SNR* pie dažādiem iegriezuma dziļumiem.

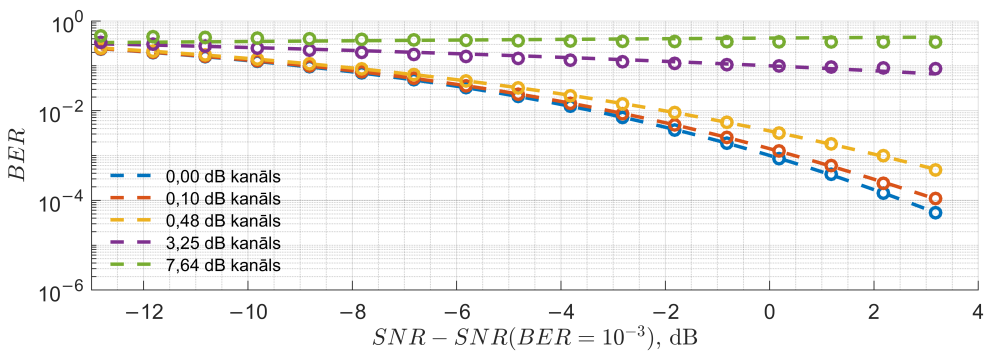
#### Veiktspējas analīze vairākkeļu izplatīšanās kanālā

4.6. att. un 4.7. att. salīdzina *QCSK* un *4-QAM* sistēmu *BER* veiktspēju divstaru izplatīšanās kanālā pie dažādiem spektrālā iegriezuma dziļumiem. *SNR* ass ir normalizēta tā, lai 0 dB iegriezums atbilstu  $BER 10^{-3}$ , nodrošinot tiešu salīdzinājumu starp dažādiem vājināšanās apstākļiem.

Pie sekla spektrālā iegriezuma dziļuma (zem aptuveni 0,5 dB) *QCSK* un *4-QAM* uzrāda salīdzināmu veiktspēju, ar nelielu priekšrocību *4-QAM*. Tomēr, palielinoties iegriezuma dziļumam, veiktspējas tendences atšķiras. Pie iegriezuma dziļuma 3,25 dB, kas atbilst vidēji izteiktai frekvences selektīvai vājināšanās ietekmei, *QCSK* saglabā zemu  $BER 10^{-3}$  līmeni, savukārt *4-QAM BER* palielinās gandrīz par divām kārtām. Pie dziļākiem iegriezumiem *4-QAM* degradācija kļūst izteikta,



4.6. att. *QCSK* sakaru sistēmas veiktspēja divsturu izplatīšanās kanālā.



4.7. att. 4-*QAM* sakaru sistēmas veiktspēja divsturu izplatīšanās kanālā.

kamēr *QCSK* uzrāda tikai pakāpenisku veiktspējas pasliktināšanos. Tas norāda uz būtiski augstāku haosā balstītas kvadrātūras pārraides noturību pret iegriezuma tipa vājināšanos.

Līdzīgs novērtējums veikts *FM-CSK* un binārajai *FSK* sistēmai, un tika novērotas līdzīgas tendences. Ap 3,25 dB iegriezuma dziļumu *FM-CSK* nedaudz pārspēj *FSK*, nodrošinot zemāku *BER* vidēji izteiktas selektīvās vājināšanās apstākļos. Pie dziļākiem iegriežumiem tradicionālā *FSK* kļūst noturīgāka nekā *FM-CSK*, bet *FM-CSK* saglabā priekšrocību pret 4-*QAM* salīdzināmos vājināšanās apstākļos.

Salīdzinot abas haosā balstītās sistēmas, *FM-CSK* nodrošina labāku noturību pie vidējiem iegriezuma dziļumiem, tostarp 3,25 dB gadījumā, savukārt *QCSK* dažos gadījumos uzrāda augstāku noturību pie lielākiem iegriezuma dziļumiem. Kopumā abas haosā balstītās shēmas demonstrē ievērojami lielāku toleranci pret frekvences selektīvu vājināšanos nekā tradicionālā lineārā modulācija, apstiprinot haotiskās modulācijas integrācijas priekšrocības *RF* pārraides arhitektūrās.

#### 4.4. Secinājumi

Šajā nodaļā pērtas divas haosā balstītās sakaru sistēmu arhitektūras, *QCSK* un *FM-CSK*, kā reprezentatīvi progresīvas *RF* modulācijas paplašinājumi, kas lietoti haotiskajiem pamatjoslas sig-

nāliem. Analizēta sistēmu modelēšana, prototipu validācija, sinhronizācijas īpašības, noturība pret troksni un uzvedība selektīvās vājināšanās apstākļos, lai novērtētu, kā katra modulācija ietekmē kopējo sistēmas veiktspēju.

*QCSK* sistēma demonstrēja uzticamu darbību, un tās veiktspēju būtiski ietekmēja sinhronizācijas signāla izvēle. Divstaru selektīvās vājināšanās apstākļos *QCSK* konsekventi pārspēja savu lineāro analogu *4-QAM*, īpaši pie dziļākiem spektrālajiem iegriezumiem, norādot, ka apvienotā *CSK*–kvadratūras struktūra saglabā haotisko dinamiku frekvences selektīvu kropļojumu apstākļos.

Savukārt *FM-CSK* arhitektūra uzrādīja paaugstinātu noturību pret troksni, jo informācija tiek pārraidīta momentānās frekvences deviācijas veidā. Skaitliskās modelēšanas rezultāti parādīja, ka, palielinoties *SNR* un iegriezuma dziļumam, *FM-CSK* nodrošina zemāku *BER* nekā *QCSK*, demonstrējot augstāku noturību pret ar amplitūdu saistītiem traucējumiem un daudzceļu izpalīšanās kanālā.

Kvantitatīvi divstaru kanālā ar 3,25 dB spektrālo iegriezumu pie nesējfrekvences abas haosā balstītās sistēmas pārspēja tradicionālos etalonus. *QCSK* sistēma sasniedza *BER*  $3,29 \times 10^{-3}$ , savukārt *FM-CSK* samazināja kļūdas varbūtību līdz  $1,52 \times 10^{-3}$ , pārspējot attiecīgi *4-QAM* un *2-FSK* veiktspēju. Šie rezultāti apstiprina, ka haotiskā modulācija nodrošina izmērāmu noturības priekšrocību daudzceļu izplatīšanās apstākļos.

Kopumā abas haosā balstītās arhitektūras demonstrē savas priekšrocības: *QCSK* ir piemērota vidēja trokšņa un vājināšanās apstākļos, ja tiek izvēlēts optimāls sinhronizācijas signāls, savukārt *FM-CSK* nodrošina augstāku noturību pie izteiktākas vājināšanās un mainīgiem kanāla apstākļiem. Kopumā rezultāti parāda, ka haosā balstīta modulācija var pārspēt tradicionālās lineārās shēmas *RF* joslās, kas ir aktuālas *IoT* un *WSN* lietojumiem, ja modulācijas stratēģija tiek pielāgota kanāla īpašībām.

## SECINĀJUMI

Šis promocijas darbs ir veltīts haosā balstītu sakaru sistēmu analīzei, projektēšanai un eksperimentālai novērtēšanai trokšņa un vairākceļu izplatīšanās apstākļos. Pētījumā galvenā uzmanība pievērsta haotiskā oscilatora pamatfrekvences ietekmei, sinhronizācijas noturībai, optimālai detektēšanai un progresīvu modulācijas metožu izmantošanai haosā balstītu sakaru sistēmu veiktspējas uzlabošanai. Piedāvātās metodes un sistēmu arhitektūras verificētas, izmantojot shēmu līmeņa skaitlisko modelēšanu un eksperimentālus mērījumus, apliecinot to praktisko realizējamību un atbilstību teorētiskajiem priekšnosacījumiem.

Darba galvenais mērķis – izpētīt un demonstrēt, kā haotisko oscilatoru raksturlielumi, sinhronizācijas metodes un modulācijas metodes ietekmē haosā balstītu sakaru sistēmu veiktspēju, – ir sasniegts. Visi ievadā formulētie pētījuma uzdevumi ir izpildīti. Promocijas darba ietvaros iegūtie galvenie rezultāti ir apkopoti turpmāk.

- Ir pierādīts, ka analoģu haotisko oscilatoru pamatfrekvences variēšana nodrošina praktisku mehānismu haosā balstītu sakaru sistēmu sasniedzamā datu pārraides ātruma regulēšanai. Laika nobīdē balstīta savstarpējās korelācijas funkciju analīze tika izstrādāta kā metode bita ilguma izvēlei, nodrošinot, ka secīgie simboli tiek pārraidīti, izmantojot pietiekami dekolerētus haotiskos signālus. Šī sakarība eksperimentāli apstiprināta diviem strukturāli atšķirīgiem haotiskajiem oscilatoriem.
- Detalizēts haotiskās sinhronizācijas pētījums aditīva trokšņa apstākļos parādīja, ka sinhronizācijas kvalitāte būtiski ir atkarīga no izvēlētajā shēmas mezgla, kas tiek izmantots vadošā un vadāmā oscilatora sasaistīšanai. Balstoties iegūtajos rezultātos, izstrādāta sistemātiska sinhronizācijas signālu izvēles metodoloģija, kas ļauj identificēt konfigurācijas ar paaugstinātu noturību un stabilitāti trokšņainā vidē.
- Parādīts, ka viena un tā paša haotiskā oscilatora dažādi stāvokļa mainīgie var uzrādīt nevienlīdzīgus korelācijas līmeņus identiskos sinhronizācijas apstākļos. Šis efekts izraisa nelīdzsvarotu korelācijā balstītu detektēšanu. Lai risinātu šo problēmu, piedāvāts kompensējošs detektēšanas sliekšnis, kas atjauno līdzsvarotu simbolu lēmumu pieņemšanu un uzlabo detektēšanas uzticamību.
- Novērtēta sinhronizācijas signāla izvēles ietekme uz haosā balstītu sakaru sistēmu kopējo veiktspēju. Rezultāti parādīja, ka neatbilstoša sinhronizācijas konfigurācija var būtiski pasliktināt bitu kļūdu intensitātes raksturlielumus.
- Progresīvas modulācijas metodes tika veiksmīgi integrētas haosā balstītās sakaru sistēmās. *QAM* un *FM* tika apvienotas ar *CSK*, nodrošinot pārraidi *RF* joslās, vienlaikus saglabājot haotiskās sinhronizācijas iespējamību. Izstrādātās sistēmas tika novērtētas *AWGN* un divstaru izplatīšanās kanālos.
- Salīdzinošā veiktspējas analīze parādīja, ka haosā balstītās sakaru sistēmas uzrāda paaugsti-

nātu noturību pret frekvences selektīvu vājināšanos, salīdzinot ar tradicionālām modulācijas shēmām, kas darbojas ar identiskiem joslas platuma ierobežojumiem, divstaru izplatīšanās apstākļos.

Visas pētījumā analizētās sistēmas realizētas, izmantojot kombinētu skaitliskās modelēšanas un eksperimentālās validācijas metodoloģiju, kurā haotiskie oscilatori modelēti shēmu līmenī, savukārt signālu apstrāde, detektēšana un veiktspējas novērtēšana veikta MATLAB vidē. Eksperimentālie prototipi, kas balstīti diskrētās un analogās shēmās un komerciāli pieejamos modulācijas moduļos, apstiprināja piedāvāto pieeju pamatotību.

Papildus teorētiskajai validācijai iegūtie rezultāti sniedz eksperimentāli apstiprinātu ieskatu haosā balstītu sakaru sistēmu praktiskajā īstenojamībā un darbības principos. Jo īpaši konstatētā sakarība starp haotiskā oscilatora pamatfrekvenci un sasniedzamo datu pārraides ātrumu veido skaidru saikni starp oscilatora parametriem un pārraides ātrumu, kas ir būtiska zema ātruma bezvadu sakaru scenārijiem, piemēram, sensoru un bāzes staciju savienojumiem. Parādīts, ka sasniegtie datu pārraides ātrumi ir salīdzināmi ar esošajās *IoT* sakaru tehnoloģijās izmantotajiem, apliecinot, ka haosā balstītas sistēmas var parametrizēt darbībai praktiski nozīmīgos pārraides režīmos. Turklāt veiktais sinhronizācijas signālu izvēles pētījums sniedz kvalitatīvus un kvantitatīvus secinājumus, ko var izmantot shēmu un sistēmu līmeņa projektēšanā, lai uzlabotu noturību trokšņa un daudzceļu izplatīšanās apstākļos.

Noslēgumā var secināt, ka šī promocijas darba rezultāti apstiprina iespēju haosā balstītas sakaru sistēmas sistemātiski projektēt un optimizēt, atbilstoši izvēloties oscilatoru parametrus, sinhronizācijas signālus, detektēšanas stratēģijas un modulācijas metodes. Iegūtie rezultāti demonstrē haosā balstītu sakaru sistēmu realizējamību un pielāgojamību darbībai trokšņainā un daudzceļu vidē. Līdz ar to promocijas darba mērķis ir sasniegts, izvirzītie pētījuma uzdevumi ir izpildīti un formulētās tēzes ir aizstāvētas.

Turpmākie pētījumi var paplašināt iegūtos rezultātus, analizējot haosā balstītu sakaru sistēmu darbību sarežģītākos un laikā mainīgos kanāla apstākļos, tostarp mobilitātes izraisītas vājināšanās un nestacionāru traucējumu klātbūtnē. Nozīmīgs attīstības virziens ir adaptīvu sinhronizācijas un detektēšanas algoritmu izstrāde, kas spēj dinamiski pielāgot sistēmas parametrus mainīgiem trokšņa un izplatīšanās apstākļiem. Tāpat būtu jāpēta integrētas un zemas jaudas haotisko oscilatoru un sinhronizācijas mezglu realizācijas, lai novērtētu to praktisko ieviešamību kompaktās bezvadu ierīcēs. Papildus tam haosā balstītas signalizācijas apvienošana ar spektrāli efektīvākām modulācijas un vairāku lietotāju piekļuves metodēm var paplašināt piedāvāto pieeju lietojumu nākamās paaudzes drošās un zema datu ātruma bezvadu sakaru sistēmās.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] P. Jonsson u. c. *Ericsson Mobility Report November 2025*. en. Tehn. ziņ. 2025. g. nov. URL: <https://www.ericsson.com/4aca6f/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2025/ericsson-mobility-report-november-2025.pdf> (aplūkots 28.11.2025.).
- [2] P. Sun u. c. “A Survey of IoT Privacy Security: Architecture, Technology, Challenges, and Trends”. en. *IEEE Internet of Things Journal* 11.21 (2024. g. nov.), 34567.–34591. lpp. ISSN: 2327-4662, 2372-2541.
- [3] N. M. Karie u. c. “A Review of Security Standards and Frameworks for IoT-Based Smart Environments”. en. *IEEE Access* 9 (2021), 121975.–121995. lpp. ISSN: 2169-3536.
- [4] K. K. S. Gautam u. c. “Investigation of the Internet of Things (IoT) Security and Privacy Issues”. en. *2023 5th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. Coimbatore, India: IEEE, 2023. g. aug., 1489.–1494. lpp. ISBN: 9798350321425.
- [5] M. S. Sharbaf. “IoT Driving New Business Model, and IoT Security, Privacy, and Awareness Challenges”. en. *2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. Yokohama, Japan: IEEE, 2022. g. okt., 1.–4. lpp. ISBN: 978-1-66549-153-2.
- [6] T. Sauter un A. Treytl. “IoT-Enabled Sensors in Automation Systems and Their Security Challenges”. en. *IEEE Sensors Letters* 7.12 (2023. g. dec.), 1.–4. lpp. ISSN: 2475-1472.
- [7] B. Omoniwa u. c. “Fog/Edge Computing-Based IoT (FECIoT): Architecture, Applications, and Research Issues”. *IEEE Internet of Things Journal* 6.3 (2019. g. jūn.), 4118.–4149. lpp. ISSN: 2327-4662.
- [8] J. M. Hamamreh, H. M. Furqan un H. Arslan. “Classifications and Applications of Physical Layer Security Techniques for Confidentiality: A Comprehensive Survey”. en. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21.2 (2019), 1773.–1828. lpp. ISSN: 1553-877X, 2373-745X.
- [9] P. Rojas, S. Alahmadi un M. Bayoumi. “Physical Layer Security for IoT Communications - A Survey”. en. *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2021. g. jūn., 95.–100. lpp. ISBN: 978-1-66544-431-6.
- [10] E. Illi u. c. “Physical Layer Security for Authentication, Confidentiality, and Malicious Node Detection: A Paradigm Shift in Securing IoT Networks”. en. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 26.1 (2024), 347.–388. lpp. ISSN: 1553-877X, 2373-745X.

- [11] Z. A. Traynor u. c. “Physical-layer security solutions for IoT devices using Radio Frequency Fingerprints”. en. *2024 International Conference on Computing, Internet of Things and Microwave Systems (ICCIMS)*. Gatineau, QC, Canada: IEEE, 2024. g. jül., 1.–4. lpp. ISBN: 9798350351736.
- [12] V. Mohan un A. Mathur. “Secrecy Analysis of DCSK-Based PLC Systems With Multiple Eavesdroppers”. en. *IEEE Systems Journal* 17.3 (2023. g. sept.), 3646.–3657. lpp. ISSN: 1932-8184, 1937-9234, 2373-7816.
- [13] F. Capligins u. c. “FPGA Implementation and Study of Synchronization of Modified Chua’s Circuit-Based Chaotic Oscillator for High-Speed Secure Communications”. 2021. ISBN: 978-1-66542-538-4.
- [14] F. Yu u. c. “CCII and FPGA Realization: A Multistable Modified Fourth-Order Autonomous Chua’s Chaotic System with Coexisting Multiple Attractors”. *Complexity* 2020 (2020), 1.–17. lpp. ISSN: 10990526.
- [15] J. Sun u. c. “A Memristive Fully Connect Neural Network and Application of Medical Image Encryption Based on Central Diffusion Algorithm”. en. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 20.3 (2024. g. marts), 3778.–3788. lpp. ISSN: 1551-3203, 1941-0050.
- [16] A. E. George u. c. “Real-World Secure Communication based on Synchronised Lorenz Chaotic Circuits”. en. *2024 13th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAS)*. Sofia, Bulgaria: IEEE, 2024. g. jün., 1.–6. lpp. ISBN: 979-8-3503-8542-7.
- [17] A. J. Michaels un C. Lau. “Generalized Multi-carrier Chaotic Shift Keying”. en. *2014 IEEE Military Communications Conference*. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2014. g. okt., 657.–662. lpp. ISBN: 978-1-4799-6770-4.
- [18] C. Bai u. c. “Double-Stream Differential Chaos Shift Keying Communications Exploiting Chaotic Shape Forming Filter and Sequence Mapping”. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 21.7 (2022. g. jül.), 4954.–4972. lpp. ISSN: 1536-1276, 1558-2248.
- [19] V. Mohan un A. Mathur. “Performance Evaluation of DCSK-Based PLC Systems Under Pulse Jamming Attacks”. en. *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*. Singapore, Singapore: IEEE, 2024. g. jün., 1.–6. lpp. ISBN: 9798350387414.
- [20] T. Bonny un W. Al Nassan. “Optimizing Security and Cost Efficiency in N-Level Cascaded Chaotic-Based Secure Communication System”. en. *Applied System Innovation* 7.6 (2024. g. okt.), 107. lpp. ISSN: 2571-5577.
- [21] Z. Hua un Y. Zhou. “Exponential Chaotic Model for Generating Robust Chaos”. en. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 51.6 (2021. g. jün.), 3713.–3724. lpp. ISSN: 2168-2216, 2168-2232.

- [22] T. I. Karimov u. c. “The Study on Multiparametric Sensitivity of Chaotic Oscillators”. en. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoN Rus)*. St. Petersburg un Moscow, Russia: IEEE, 2020. g. janv., 134.–137. lpp. ISBN: 978-1-72815-761-0.
- [23] M. Sadia u. c. “Robust Chaos With Novel 4-Transistor Maps”. en. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 70.3 (2023. g. marts), 914.–918. lpp. ISSN: 1549-7747, 1558-3791.
- [24] S. Ergun un S. Tanriseven. “Random Number Generator Based on Skew-tent Map and Chaotic Sampling”. en. *2020 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*. Ha Long, Vietnam: IEEE, 2020. g. dec., 224.–227. lpp. ISBN: 978-1-7281-9396-0.
- [25] S. Araki, J.-H. Wu un J.-J. Yan. “A Novel Design of Random Number Generators Using Chaos-Based Extremum Coding”. *IEEE Access* 12 (2024), 24039.–24047. lpp. ISSN: 2169-3536.
- [26] C.-C. Liu u. c. “Design of a Multiple Pseudorandom Number Generator Combined Chaotic System With RNS and Its Application to Secure Image Processing”. en. *IEEE Access* 12 (2024), 155246.–155258. lpp. ISSN: 2169-3536.
- [27] J. Arif u. c. “A Novel Chaotic Permutation-Substitution Image Encryption Scheme Based on Logistic Map and Random Substitution”. en. *IEEE Access* 10 (2022), 12966.–12982. lpp. ISSN: 2169-3536.
- [28] M.-A. Estudillo-Valdez, V.-A. Adeyemi un J.-C. Nuñez-Perez. “FPGA realization of an image encryption system using the DCSK-CDMA technique”. en. *Integration* 96 (2024. g. maijs), 102157. lpp. ISSN: 01679260.
- [29] H. Lu u. c. “Chip-Scale Random Number Generator Based On Self-Chaotic Dynamics Of Broad-Area VCSELs”. en. *2024 IEEE 29th International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2024. g. sept., 1.–2. lpp. ISBN: 9798350372991.
- [30] X. Hu u. c. “Color Image Encryption Algorithm Based on Dynamic Chaos and Matrix Convolution”. en. *IEEE Access* 8 (2020), 12452.–12466. lpp. ISSN: 2169-3536.
- [31] R. Kiliç un F. Yildirim. “A survey of Wien bridge-based chaotic oscillators: Design and experimental issues”. en. *Chaos, Solitons & Fractals* 38.5 (2008. g. dec.), 1394.–1410. lpp. ISSN: 09600779.
- [32] A. Elwakil un M. Kennedy. “A family of Colpitts-like chaotic oscillators”. en. *Journal of the Franklin Institute* 336.4 (1999. g. maijs), 687.–700. lpp. ISSN: 00160032.
- [33] E. V. Efremova. “Generation of Dynamic Chaos in a Range of 10–30 GHz”. en. *Journal of Communications Technology and Electronics* 63.4 (2018. g. apr.), 367.–373. lpp. ISSN: 1064-2269, 1555-6557.

- [34] K. Maezawa u. c. “Direct Observation of High-Frequency Chaos Signals from the Resonant Tunneling Chaos Generator”. en. *Japanese Journal of Applied Physics* 43.8R (2004. g. aug.), 5235. lpp. ISSN: 0021-4922, 1347-4065.
- [35] K. Maezawa. “A new generation of negative-resistance devices—New developments in ultrahigh-frequency applications based on resonant tunneling elements”. en. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)* 89.4 (2006. g. apr.), 29.–38. lpp. ISSN: 8756-663X, 1520-6432.
- [36] L. M. Pecora un T. L. Carroll. “Synchronization of chaotic systems”. *Understanding Complex Systems* 48 (2009), 101.–133. lpp. ISSN: 18600832.
- [37] A. A. Kekha Javan u. c. “Design of adaptive-robust controller for multi-state synchronization of chaotic systems with unknown and time-varying delays and its application in secure communication”. *Sensors (Switzerland)* 21.1 (2021), 1.–21. lpp. ISSN: 14248220.
- [38] A. Karimov u. c. “Adaptive Generalized Synchronization between Circuit and Computer Implementations of the Rössler System”. en. *Applied Sciences* 11.1 (2020. g. dec.), 81. lpp. ISSN: 2076-3417.
- [39] H. Xie u. c. “A Secure Communication Framework Based on Chaotic Synchronization via Approximate Nonlinear Model Predictive Control”. en. *IEEE Control Systems Letters* 8 (2024), 1559.–1564. lpp. ISSN: 2475-1456.
- [40] E. Ozpolat, V. Celik un A. Gulten. “A Novel Four-Dimensional Hyperchaotic System: Design, Dynamic Analysis, Synchronization, and Image Encryption”. en. *IEEE Access* 12 (2024), 126063.–126073. lpp. ISSN: 2169-3536.
- [41] X. Cui u. c. “A Chaotic Synchronization Method Based on Time-Synchronized Control”. en. *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*. Kunming, China: IEEE, 2024. g. jül., 335.–340. lpp. ISBN: 978-988-758-158-1.
- [42] D. Cirjulina u. c. “Experimental Study of the Impact of Component Nominal Deviations on the Stability of Vilnius Chaotic Oscillator”. *2020 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2020. g. okt., 231.–236. lpp. ISBN: 978-1-72819-398-4.
- [43] R. Babajans u. c. “Impact of the Chaotic Synchronization’s Stability on the Performance of QCPK Communication System”. *Electronics* 10.6 (2021), 640. lpp. ISSN: 2079-9292.
- [44] V. Rybin u. c. “Estimating Optimal Synchronization Parameters for Coherent Chaotic Communication Systems in Noisy Conditions”. *Chaos Theory and Applications* 5 (2023. g. jül.).

- [45] D. Cirjulina u. c. “Experimental Study on Frequency Modulated Chaos Shift Keying Communication System”. *2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2022. g. okt., 1.–4. lpp. ISBN: 978-1-6654-6439-0.
- [46] R. Babajans u. c. “Performance Analysis of Vilnius Chaos Oscillator-Based Digital Data Transmission Systems for IoT”. en. *Electronics* 12.3 (2023. g. janv.), 709. lpp. ISSN: 2079-9292.
- [47] D. Cirjulina u. c. “Fundamental Frequency Impact on Colpitts Chaos Oscillator Dynamics”. *2023 Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2023. g. okt., 19.–23. lpp. ISBN: 9798350393491.
- [48] D. Cirjulina u. c. “Experimental Study on Colpitts Chaotic Oscillator-Based Communication System Application for the Internet of Things”. en. *Applied Sciences* 14.3 (2024. g. janv.), 1180. lpp. ISSN: 2076-3417.
- [49] D. Cirjulina, R. Babajans un D. Kolosovs. “Experimental Study on Quadrature Chaos Shift Keying Communication System”. *2024 IEEE Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications (MTTW)*. Riga, Latvia: IEEE, 2024. g. okt., 29.–32. lpp. ISBN: 979-8-3315-3317-5.
- [50] D. Cirjulina u. c. “Fundamental Frequency Impact on Vilnius Chaos Oscillator Dynamics”. en. *16th Chaotic Modeling and Simulation International Conference*. Izdevis C. H. Skiadadas un Y. Dimotikalīs. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, 87.–101. lpp. ISBN: 978-3-031-60906-0 978-3-031-60907-7.
- [51] D. Cirjulina, R. Babajans un D. Kolosovs. “Design Particularities of Quadrature Chaos Shift Keying Communication System with Enhanced Noise Immunity for IoT Applications”. en. *Entropy* 27.3 (2025. g. marts), 296. lpp. ISSN: 1099-4300.
- [52] A. Ascoli u. c. “Edge of Chaos Induces a Hopf Bifurcation in a Bio-Inspired Thermally-Activated Memristor Oscillator”. *2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. London, United Kingdom: IEEE, 2025. g. maijs, 1.–5. lpp. ISBN: 979-8-3503-5683-0.
- [53] L. O. Chua u. c. “A Universal Circuit for Studying and Generating Chaos—Part II: Strange Attractors”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications* 40.10 (1993), 745.–761. lpp. ISSN: 10577122.
- [54] M. Kennedy. “Chaos in the Colpitts oscillator”. en. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications* 41.11 (1994. g. nov.), 771.–774. lpp. ISSN: 10577122.
- [55] G. A. Gottwald un I. Melbourne. “On the Implementation of the 0-1 Test for Chaos”. (2009).

- [56] A. Tamaševičius u. c. “A simple chaotic oscillator for educational purposes”. *European Journal of Physics* 26.1 (2004. g. nov.), 61. lpp.
- [57] A. Ipatovs u. c. “Complete Bifurcation Analysis of the Vilnius Chaotic Oscillator”. en. *Electronics* 12.13 (2023. g. jūn.), 2861. lpp. ISSN: 2079-9292.
- [58] D. Pikulins u. c. “Study of Nonlinear Dynamics of Vilnius Oscillator”. en. *Nonlinear Dynamics and Applications*. Izdevis S. Banerjee un A. Saha. Cham: Springer International Publishing, 2022, 1219.–1228. lpp. ISBN: 978-3-030-99791-5 978-3-030-99792-2.
- [59] *LoRaWAN™ 1.1 Specification*. 2017. g. nov. URL: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1> (aplūkots 26.03.2024.).
- [60] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10794632/> (aplūkots 15.01.2025.).
- [61] *ETSI EN 300 220-2*. 2025. g. marts. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300200\\_300299/30022002/03.03.01\\_60/en\\_30022002v030301p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.03.01_60/en_30022002v030301p.pdf) (aplūkots 19.09.2025.).
- [62] L. M. Pecora un T. L. Carroll. “Synchronization in chaotic systems”. en. *Physical Review Letters* 64.8 (1990. g. febr.), 821.–824. lpp. ISSN: 0031-9007.
- [63] R. Babajans, D. Cirjulina un D. Kolosovs. “Field-Programmable Gate Array-Based Chaos Oscillator Implementation for Analog–Discrete and Discrete–Analog Chaotic Synchronization Applications”. en. *Entropy* 27.4 (2025. g. apr.), 334. lpp. ISSN: 1099-4300.
- [64] B. Bilgehan un O. Sabuncu. “Synchronization and Analysis of Chaotic Circuit with Application to Communication in the internet of things (IoT) Services”. *2022 International Conference on Artificial Intelligence in Everything (AIE)*. Lefkosa, Cyprus: IEEE, 2022. g. aug., 674.–678. lpp. ISBN: 978-1-6654-7400-9.
- [65] L. M. Pecora u. c. “Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications”. eng. *Chaos (Woodbury, N.Y.)* 7.4 (1997. g. dec.), 520.–543. lpp. ISSN: 1089-7682.
- [66] Z. Yu u. c. “Compounding and Synchronization of Fractional Order Chaotic Systems With Prescribed Performance for Secure Communication”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 71.3 (2024. g. marts), 1335.–1345. lpp. ISSN: 1549-8328, 1558-0806.
- [67] Z. Liu u. c. “Stabilization and complete synchronization of a new time-reversed system”. *2023 IEEE International Conference on Memristive Computing and Applications (ICMCA)*. Jinan, China: IEEE, 2023. g. dec., 1.–5. lpp. ISBN: 9798350316230.



**Darja Čirjuļina** dzimusi 1999. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi inženierzinātņu akadēmisko bakalaura grādu elektrozinātnē (2020), profesionālo maģistra grādu elektronikā un vadošā elektronikas inženiera kvalifikāciju (2022). Kopš 2019. gada 1. marta strādā RTU, sākotnēji ieņemot zinātniskās asistentes amatu, kopš 2022. gada septembra ir Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētniece, iesaistās zinātniskajos projektos un ir docētāja.

Doktorantūras laikā autore piedalījies vairākās starptautiskās mobilitātēs un profesionālajās vizītēs, tostarp Karaliskā Tehnoloģiju universitātē (Zviedrijā), *Infineon Technologies Austria*, Krakovas Tehnoloģiju universitātē (Polijā), *Keysight Technologies GmbH* (Vācijā), Turīnas Politehniskā universitātē (Itālijā) un Saloniku Aristoteļa universitātē (Grieķijā). Doktora studiju laikā autores zinātniskie un akadēmiskie sasniegumi novērtēti ar vairākām balvām, tostarp IEEE *Student & Young Professional* ceļa grantu (2025) un studenta labākās prezentācijas balvu konferencē *Days of Applied Nonlinearity and Complexity (DANOC'24)*.

Pētniecības intereses ir saistītas ar haosā balstītām datu pārraides sistēmām *IoT* lietojumiem. Papildus doktorantūras laikā autore ir paplašinājusi savu pētniecības darbību fotonikas jomā, īpaši pievēršoties augstas ātrdarbības *IM/DD* pārraides sistēmām, kas ļāvis piedalīties starptautiskās konferencēs, tostarp *OFC*, *ECOC* un *IPC*.