

**ПЕРЕДАВАЛЬНИЙ ТА ПРИЙМАЛЬНИЙ РАДІОТРАКТИ РАДІОРЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

*Ільченко М.Ю., Наритник Т. М., Радзіховський В.М., Кузьмін С.Є., Лутчак О.В.*

*Національний технічний університет України «КПІ»*

*Київ, Україна*

*director@mitris.com*

**ПЕРЕДАЮЩИЙ И ПРИЕМНЫЙ РАДИОТРАКТЫ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

*Ільченко М.Ю., Наритник Т. М., Радзіховський В.М., Кузьмін С.Є., Лутчак А.В.*

*Национальный технологический университет Украины «КПИ»*

*Киев, Украина*

*director@mitris.com*

**TRANSMITTING AND RECEIVING RADIO PATHS OF RADIO-RELAY SYSTEMS IN THE TERAHERTZ BAND**

*Ilchenko M. Ye., Narytnik T. M., Radzihovsky B. M., Kuzmin S. E., Lutcak O.V.*

*National technical University of Ukraine "KPI",*

*Kiev, Ukraine*

*director@mitris.com*

**Анотація.** Наведено результати проектування та експериментальних досліджень приймального і передавального трактів телекомунікаційної системи із гігабітною пропускну здатністю в діапазоні частот 130...134 ГГц у складі: частотні перетворювачі з субгармонічною накачкою, гетеродин, що використовує високостабільний задавальний кварцовий генератор, смуго-пропускний хвилеводний (канал 1,6 × 0,8 мм) septum-фільтр, рупорна конічна антена.

Уперше в практичному плані проведено дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону на дальність зв'язку в нормальних умовах у межах

1 км при значеннях імовірності бітових помилок BER не більше ніж  $10^{-6}$  у складі: приймальний та передавальний радіотракти в діапазоні частот 130...134 ГГц та цифровий модем з пропускну каналною здатністю до 1200 Мбіт/с

**Ключові слова:** терагерцовий діапазон, приймальний та передавальний радіотракти, частотні перетворювачі, гетеродин, смугопропускний фільтр, рупорна антена, цифровий модем, пропускна канална здатність, радіорелейна система.

**Аннотация.** Приведены результаты проектирования и экспериментальных исследований приёмного и передающего трактов телекоммуникационной системы с гигабитной пропускной способностью в диапазоне частот 130...134 ГГц в составе: частотные преобразователи с субгармонических накачкой, гетеродин, использующий высокостабильный задающий кварцевый генератор, полосно-пропускающий волноводный (канал 1,6 × 0,8 мм) septum-фильтр, рупорная коническая антенна.

Впервые в практическом плане проведено исследование лабораторного образца цифровой симплексной радиорелейной системы терагерцового диапазона на дальность связи в нормальных условиях в пределах 1 км при значениях вероятных битовых ошибок BER не более  $10^{-6}$  в составе: приёмный и передающий радиотракты в диапазоне частот 130...134 ГГц и цифровой модем с пропускной каналной способностью до 1200 Мбит / с.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, приёмный и передающий радиотракты, частотные преобразователи, гетеродин, полосовой фильтр, рупорная антенна, цифровой модем, пропускная каналная способность, радиорелейная система.

**Abstract.** The results of the design and experimental studies of receiving and transmitting paths telecommunication systems with Gigabit bandwidth in the frequency range 130–134 GHz, comprising: frequen-

cy converters with sub-harmonic pumped, the local oscillator that uses highly stable sets crystal oscillator, bandpass waveguide filter (channel 1,6 x0,8 mm) septum filter, conical horn antenna.

Firstly, in practical terms, the study laboratory sample digital simplex radio relay system terahertz band communication range under normal conditions within 1 km when the possible value of bit errors BER of no more than  $10^{-6}$  comprising: receiving and transmitting radio paths in the frequency range 130-134 GHz and digital modem with a channel bandwidth of up to 1200 MB/s.

**Key words:** terahertz band, receiving and transmitting paths, frequency converters, oscillator, band-pass filter, horn antenna, digital modem, channel bandwidth, relay system.

## ВСТУП

Однією із перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи зв'язку і телекомунікацій [4, 9]. Зокрема, передбачається створення принципово нових за габаритами, заводо захищеності та енергоефективності пристроїв суб- та терагерцового діапазону для високошвидкісного передавання відеосигналів, для радіорелейних систем прямої видимості, для транспортних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) та радарів для високоточного виявлення і розпізнавання малорозмірних швидкісних цілей. Розробка нових типів сенсорів на базі терагерцових технологій дозволять отримувати більш точну та детальну оперативну інформацію про стан контрольованого об'єкта або місцевості. Такі розробки ведуться в США під егідою DARPA, в Англії, Німеччині, Китаї для застосування у військових і цивільних цілях. Розвиток елементної бази радіоелектронних пристроїв, широке впровадження цифрової техніки формування та оброблення сигналів дозволяє по-новому підійти до розв'язування багатьох задач, які раніше стримували втілення розробок телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазонів.

Зазначені обставини роблять цей діапазон унікальним для побудови телекомунікаційних систем і мереж, зокрема радіорелейних систем прямої видимості для транспортних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) [4, 9]. У зв'язку з цим задача розробки передавального та приймального трактів радіорелейної системи терагерцового діапазону є надзвичайно актуальною.

### 1 СТРУКТУРНІ СХЕМИ ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ТА ПРИЙМАЛЬНОГО ТРАКТІВ

Передавальний та приймальний тракти складають аналогову (лінійну) частину радіорелейної системи. Ці тракти побудовані за гетеродинною схемою і забезпечують передавання сигналів на трасі в терагерцовому діапазоні частот у межах 130...134 ГГц. Діапазон проміжних частот складає 2...4 ГГц.

Структурна схема передавального тракту показана на рис. 1 і містить у своєму складі наступні функціональні вузли: підсилювач проміжної частоти (ППЧ) (за необхідності); частотний перетворювач угору; гетеродин; смуго-пропускний фільтр (СПФ); вихідний підсилювач потужності (ПП) (за можливості придбання компонентів); передавальна антена.

На вхід передавального тракту сигнал надходить від формувача групових радіосигналів і в разі, якщо потужність цього сигналу достатня для отримання необхідного рівня сигналу на виході перетворювача, схема не потребує використання ППЧ.

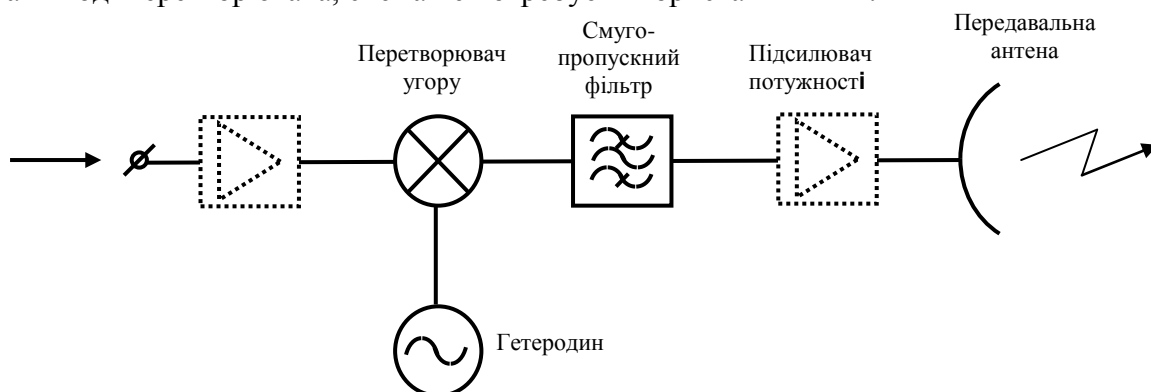


Рисунок 1 – Структурна схема передавального тракту

Структурна схема приймального тракту наведена на рис. 2 і складається з наступних вузлів: приймальна антена; вхідний малошумний підсилювач (МШП) (за можливості придбання компонентів); смуго-пропускний фільтр; змішувач; гетеродин; підсилювач проміжної частоти.

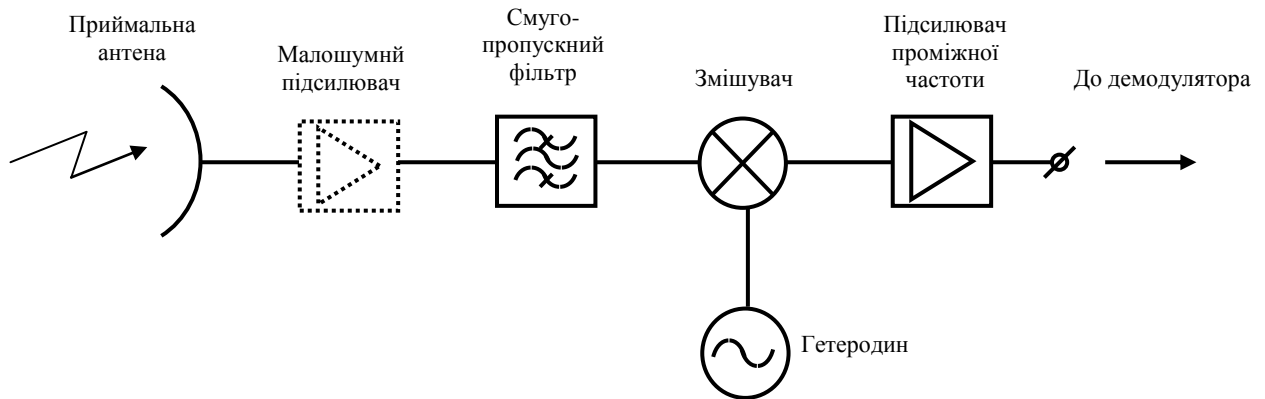


Рисунок 2 – Структурна схема приймального тракту

Реалізація малошумного підсилювача на вході приймального тракту складає таку саму проблему, як і з підсилювачем потужності на виході передавача.

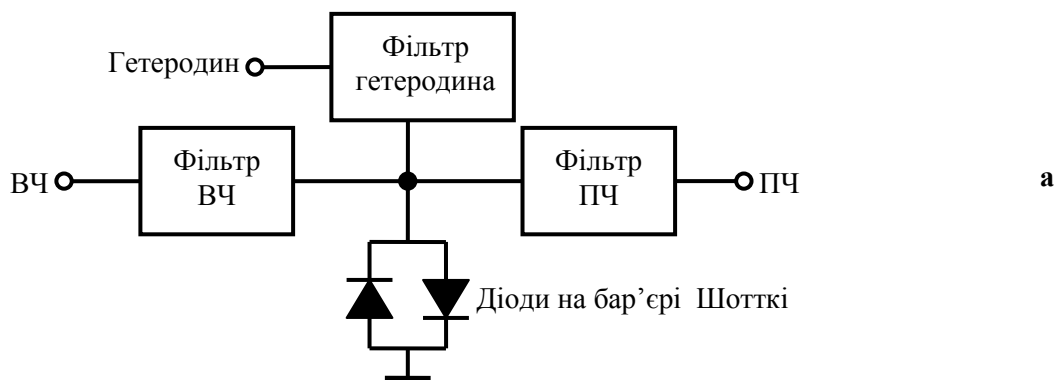
## 2 МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ПРИЙМАЛЬНОГО ТА ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ТРАКТІВ

### 2.1 Частотні перетворювачі сигналу

Частотний перетворювач угору та змішувач, що працюють у різних режимах і виконують різні функції, проте мають однакові уніфіковані схему та конструкцію.

Перетворювачі були побудовані на базі безкорпусних арсенід-галієвих діодів Шотткі з балочними виводами вітчизняного виробництва (НВП «Сатурн»). Гранична частота цих діодів становить 2,5 ГГц, що дозволяє їм працювати принаймні в нижній ділянці терагерцового діапазону. За електричними і конструктивними параметрами розроблені діоди не поступаються зарубіжним сучасним аналогам, наприклад, арсенід-галієвим діодам фірми Hewlett Packard.

З метою реалізації субгармонійної схеми перетворювача з накачкою на половинній частоті в якості нелінійного елемента застосовані два діоди, що включені зустрічно-паралельно. Таке включення формує N-образну результуючу вольтамперну характеристику, симетричну щодо початку координат. Дана обставина зумовлює зміну параметрів нелінійного елемента з частотою удвічі більшою ніж частота гетеродина. Структурна і конструктивна схеми перетворювача показані на рис. 3.



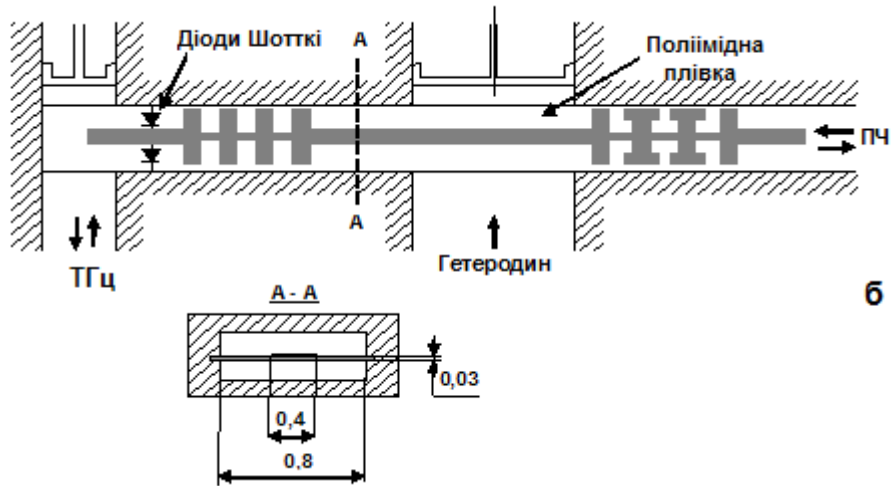


Рисунок 3 – Структурна (а) і конструктивна (б) схеми перетворювача

Конструкція перетворювача містить два хвильових тракти, пов'язаних симетричною смужковою лінією, на якій змонтована пара безкорпусних діодів Шотткі. Діоди підібрані за параметрами, щоб забезпечити симетричність результуючої вольтамперної характеристики для якісного зменшення інтенсивності непарних гармонік частоти гетеродина.

Хвильовий тракт з перетином каналу  $1,6 \times 0,8$  мм є частиною ланцюга високочастотного сигналу. Цей хвильовий канал є позамежним для частот гетеродина і ПЧ.

Сигнал гетеродина надходить на діоди через хвильовий канал перетином  $3,6 \times 1,8$  мм. Канал є позамежовим для сигналу ПЧ, а розв'язку гетеродина від ВЧ сигналу забезпечує фільтр нижніх частот (ФНЧ) з частотою зрізу 67 ГГц, виконаний на ділянці смужкової лінії між хвильовими каналами.

Ланцюг сигналу ПЧ повністю реалізований на симетричній смужковій лінії з підвішеною підкладкою. В якості підкладки використана поліамідна плівка товщиною 30 мкм, підвішена в прямокутному каналі перетином  $0,8 \times 0,4$  мм, що запобігає виникненню вищих хвильових мод. Вихідний ФНЧ в ланцюзі ПЧ з частотою зрізу 30 ГГц перешкоджає проникненню сигналів гетеродина і ВЧ в тракт проміжної частоти. Короткозамикачі поршні у хвильових каналах дозволяють здійснювати підстроювання відповідних ланцюгів перетворювачів.

На рис. 4 показана конструкція перетворювача частоти (змішувача) зі знятою верхньою частиною.

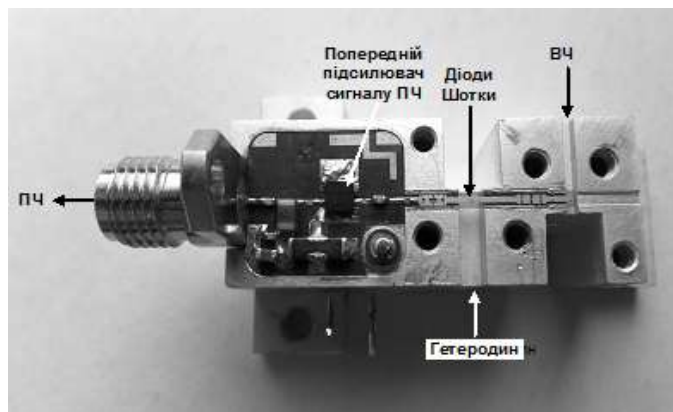


Рисунок 4 – Конструкція перетворювача частоти

Діоди з балочними виводами включені у смужкову лінію за допомогою електропровідного клею. На фото (рис. 5) відсутні короткозамикаючі поршні. Конструкція змішувача мі-

стить у своєму складі попередній підсилювач сигналу проміжної частоти. На виході ланцюга ПЧ застосований рознім SMA приладного типу. Потужність гетеродина, яка необхідна для нормальної роботи змішувача, не перевищувала 15 мВт. Вимірне значення втрат перетворення складає – 11 дБ, що відповідає кращим досягненням зарубіжних аналогів.

## 2.2 Високочастотні підсилювачі

Підсилювач потужності (ПП) на виході передавача і малошумний підсилювач (МШП) на вході приймача є тими функціональними вузлами, які головним чином визначають енергетичний потенціал усієї системи.

Проблеми реалізації таких підсилювачів у терагерцовому діапазоні обумовлені високими робочими частотами. Успіхи напівпровідникової технології в останні роки і створення відповідної елементної бази відкривають перспективи для реалізації високочастотних якісних підсилювачів. Створений малошумний підсилювач в 3 мм діапазоні довжин хвиль реалізовано на монолітній PIn мікросхемі в частотному діапазоні 87...100 ГГц при забезпеченні підсилення сигналу на 27дБ та коефіцієнта шуму 5,5 дБ. Зовнішній вигляд цього підсилювача приведений на рис. 5.



Рисунок 5 – Зовнішній вигляд підсилювача 3 мм діапазону довжин хвиль

Існують лабораторні розробки ПП і МШП аж до 300 ГГц [1]. У найближчі роки очікується поява комерційних підсилювальних мікросхем в усьому міліметровому діапазоні, що стане реальною базою для побудови підсилювачів у терагерцовому діапазоні. Використання цих підсилювачів у схемі приймача-передавача забезпечить надійне і якісне передавання інформаційного сигналу на більших дуальностях зв'язку.

## 2.3 Гетеродин

Гетеродин є найбільш складним пристроєм при розробці цифрових телекомунікаційних систем у терагерцовому діапазоні частот. Це пояснюється як труднощами досягнення достатнього рівня потужності на досить високих частотах, так і необхідністю забезпечення високої стабільності гетеродина та низького рівня його фазових шумів.

Субгармонійна схема частотних перетворювачів дозволяє знизити необхідну частоту гетеродина, що до деякої міри полегшує розробку гетеродинного ланцюга, проте зберігаються жорсткі вимоги до стабільності гетеродина і рівня фазових шумів, особливо в цифрових системах передавання даних зі складними видами модуляції.

Для цифрової радіорелейної системи діапазону частот 130...134 ГГц був спроектований ланцюг гетеродина на частоту 64,8 ГГц. Побудова гетеродина базувалась на використанні високостабільного задавального кварцового генератора з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилювальних каскадів. Рівень підсилення встановлювався таким, щоб забезпе-

чити оптимальний режим роботи помножувальних каскадів і необхідну потужність на виході гетеродина.

Даний принцип побудови гетеродина набагато дешевше розробки частотного синтезатора, а фільтрація сигналу після кожного помножувального каскаду усуває наявність паразитних гармонік і комбінаційних частот. Структурна схема ланцюга гетеродина показана на рис. 6.

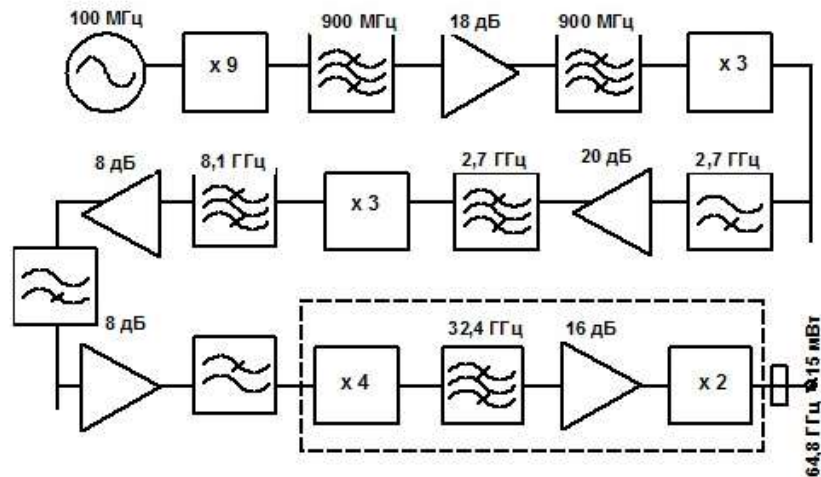


Рисунок 6 – Структурна схема гетеродинного ланцюга

В якості задавального був використаний кварцовий генератор на 100 МГц типу ССНD-950Х-25-100 фірми Crystek Crystals із рівнем фазових шумів не вище – 143 дБ при відстроєнні від центральної частоти на 1 кГц. Параметри задавального генератора в основному і визначають стабільність частоти і фазові шуми гетеродина.

Особливість даної схеми полягає в тому, що виконаний на транзисторі перший помножувальний каскад дозволяє відразу використовувати дев'яту гармоніку частоти задавального генератора, а саме: 900 МГц. Сигнал з цією частотою підсилюється на 18 дБ мікросхемою SPF5043Z і селектується фільтрами на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) типу FAR-F5KA-897M50.

Подальше підвищення частоти до 8,1 ГГц здійснюється двома каскадами потроювачів. Перший каскад з вихідною частотою 2,7 ГГц побудовано на транзисторі, а другою частотою 8,1 ГГц на монолітній мікросхемі НМС916LP3. На частоті 2,7 ГГц здійснюється підсилення сигналу на 20 дБ за допомогою мікросхеми TQR3M9008 і його фільтрація за допомогою фільтрів верхніх та нижніх частот (ФВЧ та ФНЧ) на зосереджених елементах, а також смуго-пропускнуго фільтра (СПФ) на виході підсилювача. СПФ виконано на півхвильових резонаторах на підкладці із дюрюїда (RT/Duroid 5880) товщиною 0,25 мм.

На частоті 8,1 ГГц також здійснюється підсилення сигналу двома каскадами мікросхем NLV 300 і його фільтрація за допомогою ФНЧ та ФВЧ на зосереджених елементах, а також СПФ, що виконано на півхвильових елементах на підкладці із дюрюїда товщиною 0,125 мм. Результати розрахунку цього фільтра показані на рис. 7.

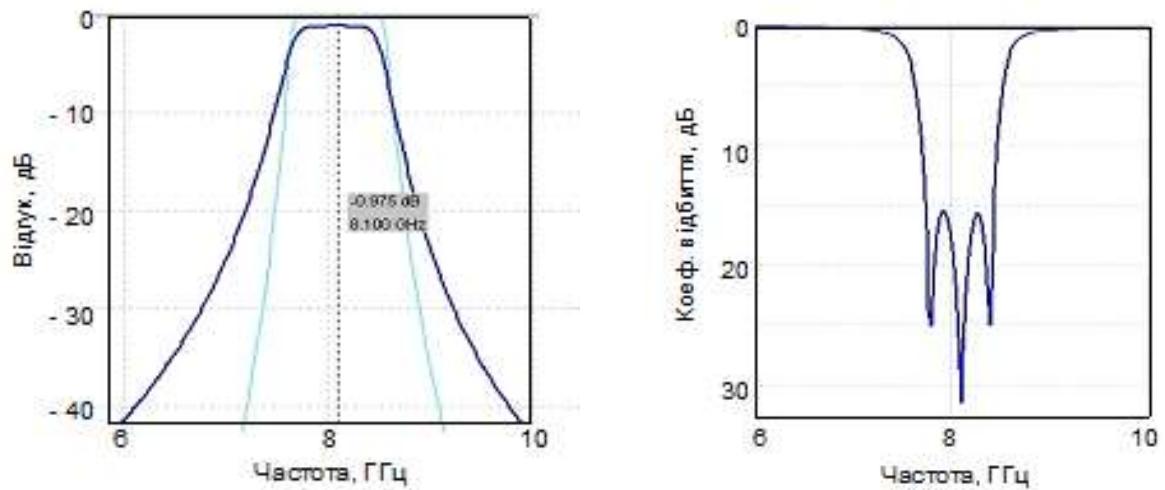


Рисунок 7 – Розраховані АЧХ та КСВН фільтра на 8,1 ГГц

Монтаж елементів описаної частини ланцюга гетеродина показано на рис. 8.

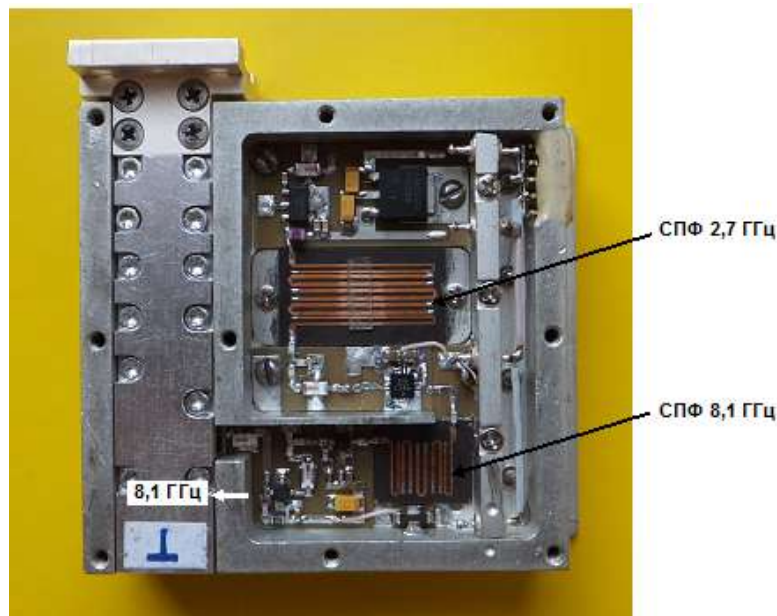
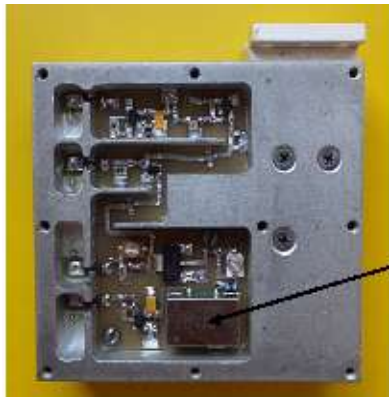


Рисунок 8 – Монтаж елементів вхідної частини помножувального ланцюга в корпусі гетеродина

На протилежній стороні корпусу змонтований задавальний кварцовий генератор зі схемами живлення (рис. 9).

Після кожного помножувального каскаду перевірялася якість сигналу на достатній рівень потужності, відсутність близько розташованих паразитних гармонік і низький рівень фазових шумів. Для прикладу на рис. 10 представлений обмірений спектр сигналу на виході помножувального модуля в області частоти 8,1 ГГц.



Задавальний генератор

Рисунок 9 – Задавальний генератор, змонтований на зворотній стороні корпусу гетеродина

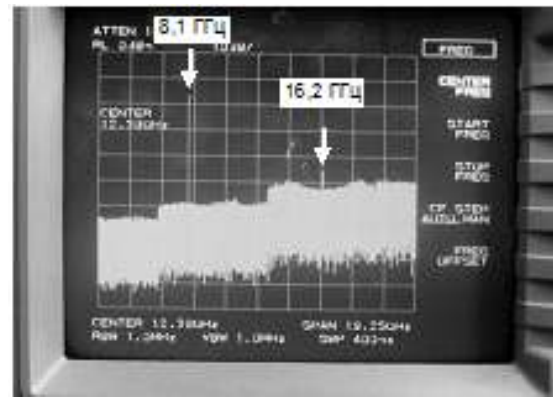


Рисунок 10 – Спектр сигналу гетеродина в області частоти 8,1 ГГц (розмах спектра на екрані 19 ГГц)

З рис. 13 видно, що поблизу вихідного сигналу з частотою 8,1 ГГц відсутні помітні паразитні гармоніки задавального генератора, а друга гармоніка вихідного сигналу послаблена на більш ніж 40 дБ. Вихідна потужність складає 7 мВт, а рівень фазових шумів не перевищує 107 дБ при відстройці від центральної частоти на 100 кГц і 94 дБ при відстройці на 10 кГц.

Сигнал з частотою 8,1 ГГц і потужністю 11 дБм подається на вихідні більш високочастотні каскади ланцюга гетеродина, що змонтовані в окремому корпусі, який, у свою чергу, вмонтований в загальний корпус гетеродина. Конструкція вихідної частини гетеродина показана на рис. 11.

Конструкція містить помножувач частоти на чотири, СПФ на частоту 32,4 ГГц, підсилювальний каскад на цю частоту, вихідний подвоювач частоти та перехід з мікросмужкової лінії на хвилепровідний канал з перетином  $7,2 \times 3,4$  мм. Помножувачі та підсилювач побудовані на основі безкорпусних монолітних мікросхем в якості помножувача на чотири застосована мікросхема СНХ2092, підсилювач виконано на базі мікросхеми СНА3093, а вихідний подвоювач побудовано на мікросхемі СНХ2192.

Монолітні мікросхеми помножувачів і підсилювача сигналу включені в мікросмугові лінії на підкладці з діюроїда товщиною 0,125 мм. На цій же підкладці виконано хвилеводно-мікросмужковий перехід.

Семирезонаторний мікросмужковий СПФ розроблено на полікоровій підкладці товщиною 0,2 мм. Для кращого узгодження фільтра з мікросхемами використані фіксовані поглинаючі 3 дБ атенюатори у вигляді чипів включених з двох сторін СПФ. Виміряна АЧХ фільтра показана на рис. 12.

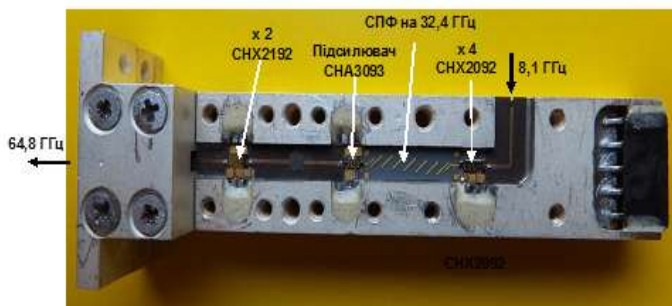


Рисунок 11 – Конструкція вихідних каскадів гетеродина

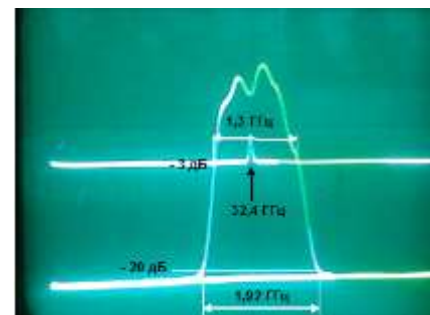


Рисунок 12 – Частотна характеристика фільтра на частоті 32,4 ГГц

Зовнішній вигляд гетеродина в загальному корпусі показано на рис. 13.





Рисунок 13 – Зовнішній вигляд гетеродина

Виміряні значення вихідних потужностей гетеродина для трактів приймання і передавання перевищували 15 мВт, що цілком достатньо для нормальної роботи частотних перетворювачів приймального та передавального трактів.

Таким чином, в результаті проведених досліджень спроектовано, виготовлено та випробувано гетеродин, який за своїми показниками, зокрема, по вихідній потужності, не поступається зарубіжним аналогам.

#### 2.4 Підсилювач проміжної частоти

Схема підсилювача проміжної частоти (ППЧ) містить у собі попередній підсилювач, побудований на мікросхемі TQP3M9037, а також головний підсилювач, який розроблено на базі транзистора FPD6836P70 та мікросхеми НМС313. Крім підсилювальних мікросхем схема ППЧ містить монолітні керамічні фільтри верхніх і нижніх частот для формування необхідної смуги пропускання тракту проміжної частоти, резистивний атенюатор для узгодження вихідного фільтра з передавальною лінією, а також вторинні джерела живлення, що формують стабілізовану напругу для мікросхем.

Попередній підсилювач конструктивно інтегрований із змішувачем, щоб мінімізувати втрати слабкого сигналу перед підсиленням. Шумова температура цього підсилювача дорівнює близько 50 К і значною мірою визначає чутливість усього приймача. Саме тут здійснюється головне підсилення сигналу. Повний коефіцієнт підсилення ППЧ складає 47 дБ.

#### 2.5 Високочастотний смуго-проникний фільтр

Високочастотні смуго-проникні фільтри (СПФ) на виході передавального та вході приймального трактів мають забезпечити розв'язку сигналів даних трактів, а також достатнє придушення дзеркальних каналів і сигналів гетеродинів. Низька величина проміжної частоти ( $f_{пч} = 2...2,5$  ГГц) обумовлює жорсткі вимоги до високочастотних СПФ за вибірковістю. Найбільш прийнятними в 2 мм діапазоні довжин хвиль з точки зору малих втрат і високої вибіркової є хвилеводні septum-фільтри. Саме такий фільтр було розроблено в рамках даного проекту.

Конструктивно фільтр являє собою тонку металеву пластину, вставлену в Е-площину хвилеводного каналу. Пластина містить резонансні вікна, зв'язок між якими визначається шириною смужок, що їх розділяють. Було вибрано 6-резонаторний фільтр для забезпечення достатньої вибіркової. Розраховані розміри пластинчастої вставки з резонансними вікнами показані на рис. 14.

На рис. 15 наведено розраховані S-параметри 6-резонаторного СПФ, а також показана виміряна частотна характеристика виготовленого фільтра.

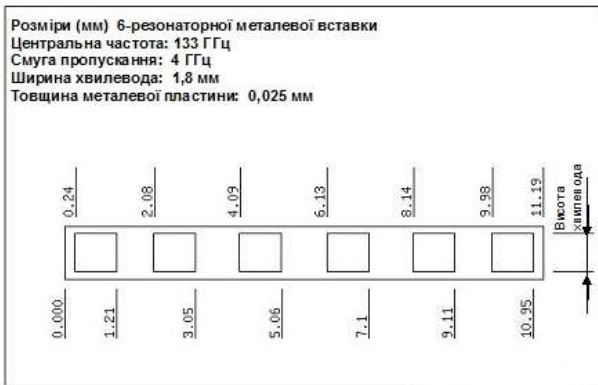


Рисунок 14 – Конфігурація і розміри металевої вставки, що монтується в Е-площині хвилеводного каналу

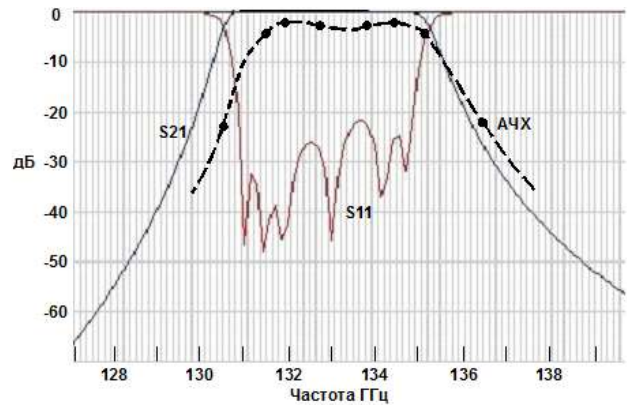


Рисунок 15 – Розраховані S-параметри і виміряна АЧХ септім-фільтра

Отримані експериментальні результати показують, що фільтр задовольняє вимогам вибірковості, з метою забезпечення достатнього (на 20 дБ) придушення дзеркального каналу та другої гармоніки сигналу гетеродина (129,6 ГГц).

Втрати фільтра в терагерцовому частотному діапазоні передавача не перевищують 4 дБ, що є задовільним результатом для таких високих частот. Нерівномірність АЧХ по плоскій частині не перевищує 2 дБ.

## 2.6 Конічна рупорна антена

Як в передавальному, так і в приймальному трактах була використана конічна рупорна антена із діелектричним лінзовим концентратором. Конструкція антени показана на рис. 16.

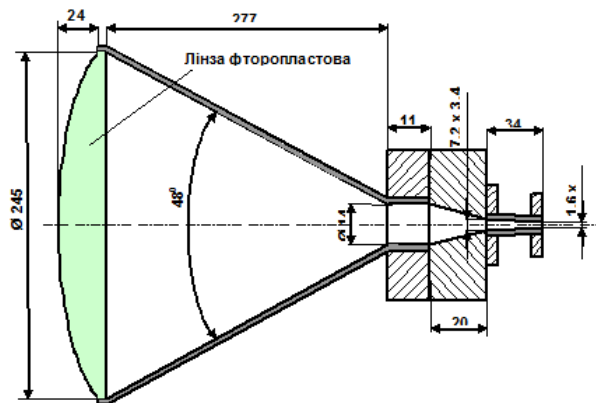


Рисунок 16 – Конструкція рупорної антени

Крім конічного рупора конструкція містить перехід з круглого хвилеводу на прямокутний із перетином  $7,2 \times 3,4$  мм. З'єднання антени з передавальним або приймальним трактом здійснювалось за допомогою хвилеводного переходу з перетину  $7,2 \times 3,4$  мм на перетин  $1,6 \times 0,8$  мм. Апертура антени складає 245 мм. В якості концентратора використана фторопластова лінза.

Розрахунки дають наступні характеристики антени:

- діапазон робочих частот – 130 – 134 ГГц;
- вхід – хвилеводний канал з перетином  $1,6 \times 0,8$  мм<sup>2</sup> ( $\lambda = 2$  мм);
- коефіцієнт підсилення – не менше 47 дБ;
- ширина діаграми спрямованості – не більше  $0,6^\circ$
- КСВН входу – в межах 1,15.

## 2.7 Дослідження та випробовування радіорелейної системи терагерцового діапазону 130–134 ГГц

На базі розроблених функціональних вузлів, що описані вище, були побудовані приймальний та передавальний тракти радіорелейної системи. Приймач та передавач системи мають однакову конструктивну побудову. Модульне виконання окремих вузлів з максимальним використанням монолітних мікросхем забезпечує компактність конструкції, а також зручність її збирання і монтажу, як показано на рис. 17.

Тракти мають коаксіальні вхід (вихід) з рознімами SMA на проміжних частотах і хвильоводний вхід (вихід) в каналі  $1,6 \times 0,8$  мм на терагерцових частотах. Зовнішній вигляд приймального (передавального) трактів показано на рис. 18.

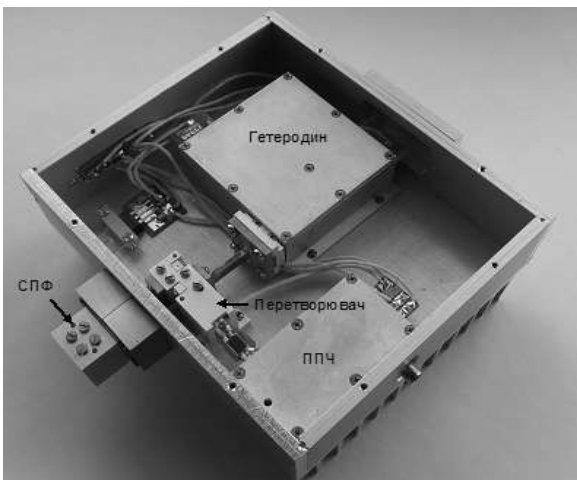


Рисунок 17 – Розташування вузлів у складі приймального (передавального) трактів

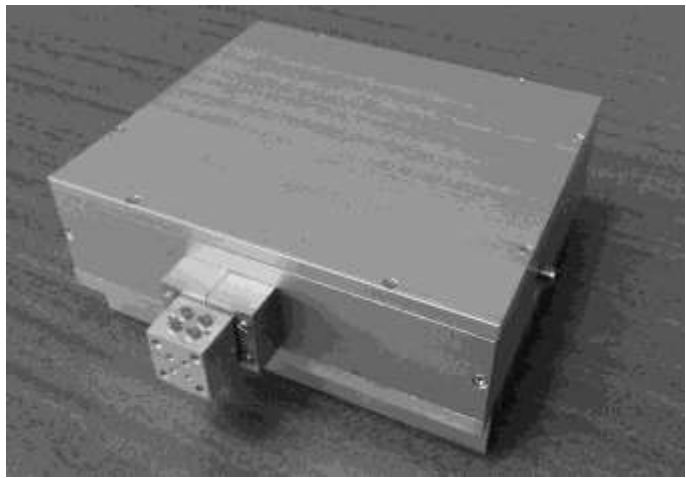


Рисунок 18 – Зовнішній вигляд приймального (передавального) трактів

Для забезпечення якісної роботи приймача та передавача було розроблено вторинні джерела живлення, які формують необхідні високостабільні напруги для всіх вузлів трактів.

Виміряна наскрізна частотна характеристика коефіцієнта передавання  $K(f)$  показана на рис. 19.

Як видно з вимірної частотної залежності  $K(f)$ , приймально-передавальний тракт терагерцового діапазону має сумарний коефіцієнт передавання не менше 18 дБ, при цьому нерівномірність коефіцієнта передавання в робочому діапазоні частот не перевищує 3 дБ.

Проведено експериментальні дослідження коефіцієнта передавання приймально-передавального тракту радіорелейної системи в цілому (рис. 20). Експериментальні дослідження трактів радіорелейної системи показали наступні значення головних характеристик у робочому діапазоні частот:

- шумова температура приймального тракту  $T_{ш} = 5000$  К;
- вихідна потужність передавального тракту  $P_{вих} = 40$  мкВт.

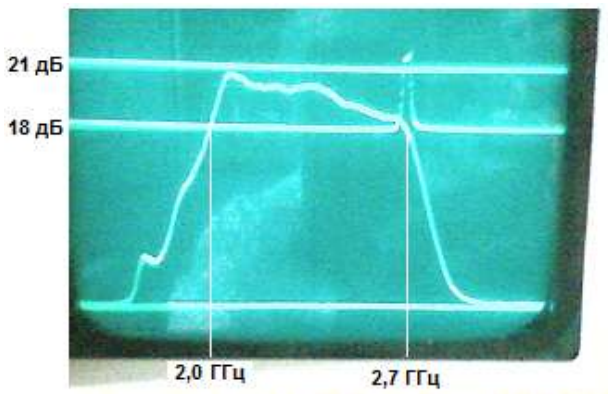


Рисунок 19 – Наскрізна частотна характеристика коефіцієнта передачі приймально-передавального тракту



Рисунок 20 – Зовнішній вигляд приймального (передавального) тракту

Проведено експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону (рис. 21) у складі: приймальний та передавальний радіотракту в діапазоні частот 130...134 ГГц, цифрові модеми.

Випробування системи на відповідність вимогам технічного завдання було проведено згідно зі схемою, що показана на рис. 22.

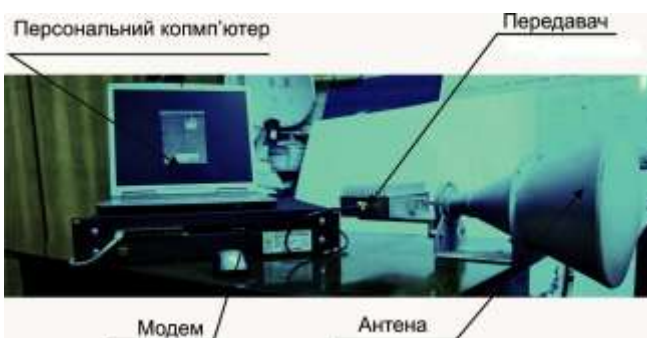


Рисунок 21 – Зовнішній вигляд лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону

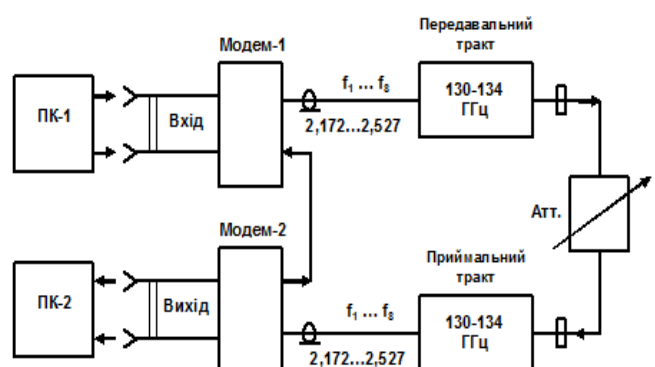


Рисунок 22 – Схема випробувань телекомунікаційної системи

Отримано наступні результати:

- пропускна канална здатність до 1200 Мбіт/с;
- значення ймовірних бітових помилок BER не більше ніж  $10^{-6}$ ;
- дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км;
- коефіцієнт підсилення системи на рівні 50 дБ;
- вид модуляції - КАМ-64.

Таким чином, вперше в практичному плані виготовлено та проведено експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону у складі: приймальний та передавальний радіотракту в діапазоні частот 130...134 ГГц, цифрові модеми з пропускною каналною здатністю до 1200 Мбіт/с .

## ВИСНОВКИ

Визначені та обґрунтовані параметри основних вузлів приймально-передавального тракту радіорелейної системи в діапазоні частот 130–134 ГГц. Розроблена структурна схема радіорелейної лінії в терагерцовому діапазоні з пропускною здатністю до 2,4 Гбіт/с та досліджені розрахункові характеристики її приймально-передавального тракту.

На основі узагальнення результатів, аналізу наявної радіорелейної елементної бази та теоретичних досліджень проведено проектування основних вузлів і всього приймально-передавального тракту телекомунікаційної системи із гігабітною пропускною здатністю в діапазоні частот 130...134 ГГц у складі: частотні перетворювачі з субгармонійною накачкою, гетеродин, що використовує високостабільний задавальний кварцовий генератор з подальшим ланцюгом помножувальних і підсилювальних каскадів, смуго-пропускний фільтр з використанням тонкої металеві пластили в Е-площині хвилеводного каналу 1,6×0,8 мм.

Уперше в практичному плані виготовлено та проведено експериментальні дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону у складі: приймальний та передавальний радіотракти в діапазоні частот 130...134 ГГц, цифровий модем з пропускною каналною здатністю до 1200 Мбіт/с.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону: Монографія / С.О. Кравчук, Т.М. Наритник . – Житомир, 2014. – 394 с.
2. M.Ye. Ilchenko Transceiver for 130-134 GHz band and digital radio relay system. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, S.Ye. Kuzmin, A.I. Fisun, O.I. Belous, V.N. Radzikhovskiy // Telecommunications and Radio Engineering. – Volume 72. – Number 17. – 2013. – P.1623–1638.
3. Ильченко М.Е. Моделирование функциональных узлов радиорелейной системы терагерцового диапазона / М.Е. Ильченко, Т.Н. Нарытник, С.Е. Кузьмин, В.Н. Радзиховский // Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2013. – №2 (11). – С. 95–113.
4. Ильченко М.Е. Приёмо-передатчик для цифровой радиорелейной системы терагерцового диапазона. М.Е. Ильченко, С.Е. Кузьмин, Т.Н. Нарытник, В.Н. Радзиховский // Telecommunication sciences.– Volume 72, Number 18, 2013.-P.1651–1663.
5. Ильченко М.Е. Моделирование функциональных узлов радиорелейной системы терагерцового диапазона / М.Е. Ильченко, С.Е. Кузьмин, Т.Н. Нарытник, В.Н. Радзиховский // Электронное научное специализированное издание – :Журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2013.. – №2 (11) . – С. 95–113.
6. Ильченко М.Е. Приемо-передатчик для цифровой радиорелейной системы терагерцового диапазона / М.Е. Ильченко, С.Е. Кузьмин, Т.Н. Нарытник, В.Н. Радзиховский // Матеріали 23-ї Міжнародної Кримської конф. (КриМіко-2013) [«СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»]. – 2013. – Т.1. – С. 318–319.
7. Нарытник Т.Н. Исследование радиоканала связи для перспективных телекоммуникационных систем терагерцового диапазона / Т.Н. Нарытник, М.Е. Ильченко, В.Н. Радзиховский // Матеріали восьмої міжнародної наук.-техн. конф. [Проблеми телекомунікацій]. – К.:НТУУ «КПІ», 2014. – С.137–140.
8. Пат. 84923 Україна, МПК H04B 7/165 (2006/0). Приймально-передавальний формувач інформаційного потоку для каналу зв'язку із підвищеною спектральною ефективністю та пропускною здатністю. Ильченко М.Ю., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Войтенко О.Г., Радзіховський В.В., Свириденко В.В. Заявник і патентовласник Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № u2013 03679; заявл. 26.03.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. – 4 с: іл.
9. Пат. 93139 Україна, МПК H04B 7/165 (2006.01). Канал передавання даних в терагерцовому діапазоні з пропускною здатністю більше 1 Гбіт/с / Ильченко М.Ю., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Радзіховський В.В., Кузьмін С.Є. Заявник і патентовласник Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № u20140189, заявл. 25.02.2014; опубл. 25.09.2014. Бюл. № 8. – 5с: іл.

REFERENCES

1. Kravchuk, S., and T. Narytnyk. "Telekomunikatsiyi Systemy Terahertsovoho Diapazonu: Monohrafiya." *Zhytomyr* (2014): 394. Print.
2. Ilchenko, M. "Transceiver for 130-134 GHz Band and Digital Radiorelay System." *Telecommunications and Radio Engineering* 72.17 (2013): 1623-638. Print.
3. Ilchenko, M., T. Narytnyk, S. Kuz'myn, and V. Radzykhovskyy. "Modelyrovanye Funktsyonal'nykh Uzlov Radyoreleynoy Systemy Terahertsovoho Dyapazona." *Problems of Telecommunications* 11.2 (2013): 95-113. Print.
4. Ilchenko, M. "Pryemo-peredatchyk Dlya Tsyfrovoy Radyoreleynoy Systemy Terahertsovoho Dya Pazona." *Telecommunication Sciencest* 72.18 (2013): 1651-663. Web.
5. Ilchenko, M., S. Kuz'myn, T. Narytnyk, and V. Radzykhovskyy. "Modelyrovanye Funktsyonal'nykh Uzlov Radyoreleynoy Systemy Terahertsovoho Dyapazona." *Problems of Telecommunications* 11.2 (n.d.): 95-113. Print.
6. Ilchenko, M., S. Kuz'myn, T. Narytnyk, and V. Radzykhovskyy. "Pryemo-peredatchyk Dlya Tsyfrovoy Radyoreleynoy Systemy Terahertsovoho Dya Pazona." *KryMiko-2013 1* (2013): 318-19. Print.
7. Narytnyk, T., M. Ilchenko, and V. Radzykhovskyy. "Yssledovanye Radyokanala Svyazy Dlya Perspektyvnykh Telekommunikatsyonykh System Terahertsovoho Dyapazona." *Problemy Telekomunikatsiy: NTUU «KPI»* (2015): 137-40. Print.
8. Ilchenko, M., T. Narytnyk, V. Kazimirenko, O. Voytenko, V. Radzykhovskyy, V. Svyrydenko, and V. Zayavnyk. "Pryymal'no-peredaval'nyy Formuvach Infor-matsiynoho Potoku Dlya Kanalu Zv'yazku Iz Pidvyshchenoyu Spektral'noyu Efektyvnistyu Ta Propusknoyu Zdatnistyu." Pat. 84923 Ukrayina, MPK H04B 7/165 (2006/0) 21st ser. (2013): n. pag. Print. # u2013 03679; zayavl. 26.03.2013; opubl.11.11.2013, Byul. #21. – 4 s: il.
9. Ilchenko, M., T. Narytnyk, V. Kazimirenko, V. Radzykhovskyy, and S. Kuz'min. "Kanal Peredachi Danykh v Terahertsovomu Diapazoni Z Propusknoyu Zdatnistyu Bil'she 1 Hbit/s." Pat. 93139 Ukrayina, MPK H04B 7/165 (2006.01) (2014): n. pag. Print. # u20140189, zayavl. 25.02.2014; opubl. 25.09.2014. Byul. # 8.–5s: il.