

**БЕЗДРОТОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО
ТА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНІВ**

Ільченко М.Ю., Кравчук С.О., Наритник Т.М.

*НТУУ "Київський політехнічний інститут"
пр-т Перемоги, 37, Солом'янський р-н, Київ, Україна, 03056
director@mitris.com*

**БЕСПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО
И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ**

Ільченко М.Е., Кравчук С.А., Нарытник Т.М.

*НТУУ "Киевский политехнический институт"
пр-т Победы, 37, Соломенский р-н, Киев, Украина, 03056,
director@mitris.com*

**WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS SUBTERAHERTZ
AND TERAHERTZ RANGES**

Ilichenko M.Ye., Kravchuk S.O., Narytnik T. M.

*NTUU "Kiev polytechnic institute"
37, Prosp. Peremohy, Solomyanskyi district, Kyiv, Ukraine, 03056
director@mitris.com*

Анотація. Наведено аналітичний огляд теоретичних і експериментальних досліджень та розробок телекомунікаційних систем в суб- та терагерцовому діапазоні із застосуванням елементів, пристроїв, ідей, методів і технологій оптики (фотоніки) та мікрохвильових технологій (електроніки), а також перспективних досліджень у цьому напрямку телекомунікацій, зокрема, розвитку транспортних розподільчих мереж (Mobile backhaul) і створення безпроводових ліній зв'язку з шумовим носієм у субтерагерцовому діапазоні частот.

Ключові слова: Транспортна розподільча система, телекомунікації, терагерцовий діапазон, субтерагерцовий діапазон

Аннотация. Представлен аналитический обзор теоретических и экспериментальных исследований та разработок телекоммуникационных систем в суб- и терагерцовом диапазоне с использованием элементов, устройств, идей, методов и технологий оптики (фотоники) и микроволновой технологии (электроники), а также перспективных исследований в этом направлении телекоммуникаций, в частности, развития транспортных распределительных систем (Mobile backhaul) и создание беспроводных линий связи с шумовым носителем в субтерагерцовом диапазоне частот.

Ключевые слова: Транспортная распределительная система, телекоммуникации, терагерцовый диапазон, субтерагерцовый диапазон

Abstract. The analytic review of theoretical and experimental research and development of telecommunication systems in the sub-terahertz elements, devices, ideas, methods and technologies of optics (Photonics) and microwave technology (electronics), as well as promising research in this area of telecommunications, in particular the development of transport and distribution networks (Mobile backhaul) and the establishment of wireless communication lines with a noise carrier in subterahertz frequency range.

Keywords: Distribution networks, telecommunications, terahertz range, subterahertz range

Розвиток елементної бази радіотехнічних 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. Освоєння суб- та терагерцового діапазоні саме по собі викликає значний інтерес у зв'язку з наступним:

1. Слабка завантаженість даних цього діапазону порівняно з сантиметровим діапазоном.
2. Можливість виділення широких смуг частот (до 5 ГГц).

3. Спрощена процедура виділення частот у багатьох країнах світу.

4. Істотне зниження габаритів антенних систем, які забезпечують при цьому формування вузької діаграми напрямленості.

5. Швидке загасання радіохвиль у поєднанні з вузьконапрямленими антенами усуває проблему інтерференції різних джерел сигналу, що спрощує задачу частотного планування.

6. Екологічна безпечність.

Зазначені обставини роблять цей діапазон унікальним для побудови персональних, локальних і міських транспортних бездротових мереж, а також радіоканалів “точка-точка” (радіорелейних ліній). Терагерцові хвилі (частотний діапазон від 100 ГГц до 3000 ГГц) в електромагнітному спектрі (рис. 1) знаходяться між надвисокочастотними хвилями (частотний діапазон від 3 ГГц до 30 ГГц) та інфрачервоними хвилями (частотний діапазон від 300 ГГц до 430000 ГГц). Тобто терагерцовий діапазон (в довжинах хвиль – від 3 мм до 0,1 мм) включає у себе короткохвильову частину міліметрового діапазону, весь субміліметровий і далекий (довгохвильовий) інфрачервоний діапазони довжини хвиль. Між довгохвильовою окраїною інфрачервоного діапазону та короткохвильовою ділянкою надвисокочастотного діапазону не встановлена чітка межа. На інфрачервоній ділянці спектра від 0,74 мкм до 1000 мкм, в основному, припадає теплове випромінювання – передача енергії від одних тіл до інших у вигляді електромагнітних хвиль за рахунок їх теплової енергії.

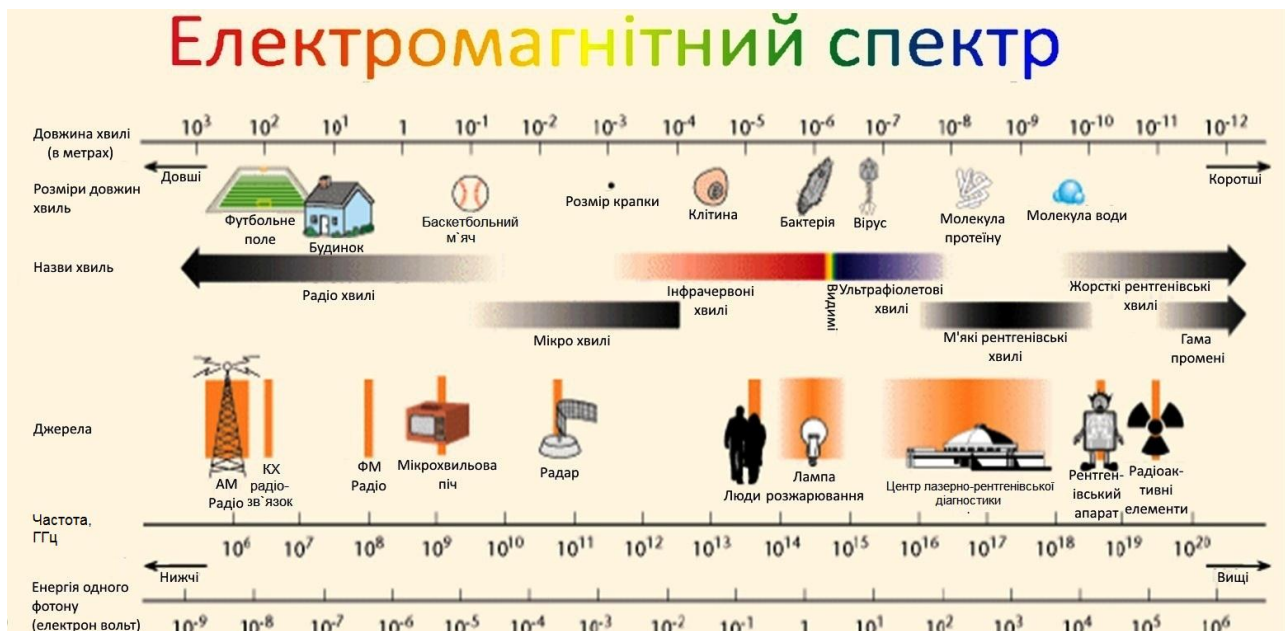


Рисунок 1 – Електромагнітний спектр



Рисунок 2 – Розміщення терагерцового діапазону в електромагнітному спектрі

Таким чином, у спектрі електромагнітних випромінювань у короткохвильовій частині терагерцові хвилі межують з інфрачервоними, а в довгохвильовій – з міліметровими хвилями, що, природно, надає їм властивості як оптичних, так і радіохвиль (рис. 2). Тому розробка

систем та застосування терагерцових хвиль базуються на взаємопроникненні елементів, пристроїв, ідей та методів оптики (фотоніки) і радіотехніки (електроніки).

Можна зробити висновок, що розробка надширококутних систем суб- та терагерцового діапазону є актуальною задачею для розвитку теорії та техніки телекомунікаційних систем. Проте протягом останнього десятиліття не було опубліковано робіт, які би давали загальне уявлення про основні досягнення у даному напрямку досліджень та окреслювали коло перспективних задач.

Зробити аналітичний огляд існуючих телекомунікаційних систем передачі цифрової інформації в суб- та терагерцовому діапазоні перспективних досліджень у цьому напрямку – мета даної статті.

Високошвидкісна безпроводова лінія зв'язку в діапазоні 120 ГГц на базі фотонних технологій. Згідно зі схемою [1] складових частин бездротової лінії зв'язку субтерагерцового діапазону на базі технологій фотоніки надано на рис. 3...6. Передавач складається з генератора, фотонного модулятора і субтерагерцового генератора (рис.1). Фотонний генератор, який налаштовується за допомогою звичайної схеми DSB-SC (Double-sideband suppressed-carrier transmission), виробляє дві сильно корельовані світлові хвилі з різницею за довжиною хвиль, що відповідає необхідній частоті субтерагерцового діапазону. Світлові хвилі потрапляють до модулятора, де модулюються даними. Після фотозміщення модульовані субтерагерцові хвилі генеруються на субтерагерцовому генераторі і випромінюються у вільний простір.

Фотонний генератор складається з оптичного джерела, модулятора оптичної інтенсивності, гетеродина LO (local oscillator), і волоконно-оптичного підсилювача, легованого ербієм EDFA (erbium-doped fiber amplifier), як показано на рис. 4, зі своїм модулем перевірки.

На рис. 5 подано схему модулятора і субтерагерцового генератора передавача. Модулятор модулює DSB-SC-сигнали за допомогою амплітудної маніпуляції (ASK). Модулятор складається із джерела електроенергії постійного струму, модулятора оптичної інтенсивності зі стабілізатором зміщення, цифро-аналогового перетворювача і EDFA, який використовується для компенсації внесених втрат. Субтерагерцовий генератор складається з фотозмішувача, джерела постійного струму, вентиля антени. Модульований вихідний сигнал з модулятора надходить до фотозмішувача, а потім – до антени.

На рис. 6 подано структурну блок-схему приймального модуля, який складається з приймальної антени, малошумного підсилювача, підсмугового фільтра з детектором, попереднього і заключного підсилювачів.

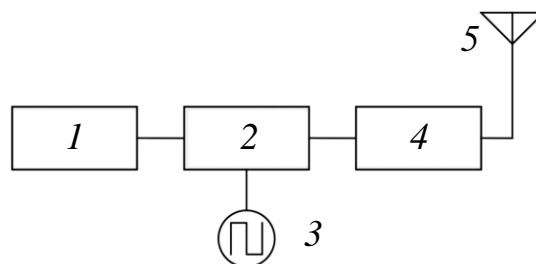


Рисунок 3 – Структурна схема передавача:

- 1 – фотонний генератор; 2 – модулятор; 3 – джерело даних;
4-субтерагерцовий генератор; 5 - антена

Безпроводова лінія зв'язку на базі мікрохвильових технологій електроніки. Безпроводова лінія зв'язку в діапазоні 300 ГГц. Передавач та приймач безпроводової лінії зв'язку в діапазоні 300 ГГц на базі мікрохвильового обладнання показані на рис. 7 [2]. Для перетворення вгору сигналу частот 0...10 ГГц використовується субгармонічний змішувач. У якості гетеродину використовується генератор на основі діелектричного резонатора з фазовим автопідстроюванням частотою 16,66 ГГц (опорним сигналом є кварцовий генератор на 10 МГц). Коли-

вання гетеродину декілька раз потроюються до частоти 150 ГГц. На боці приймача використовуються ті самі компоненти, що і в передавачі, за винятком того, що гетеродин налаштований на 16,38 ГГц. Це призводить до перетворення з пониженням частот до ПЧ 5...15 ГГц.

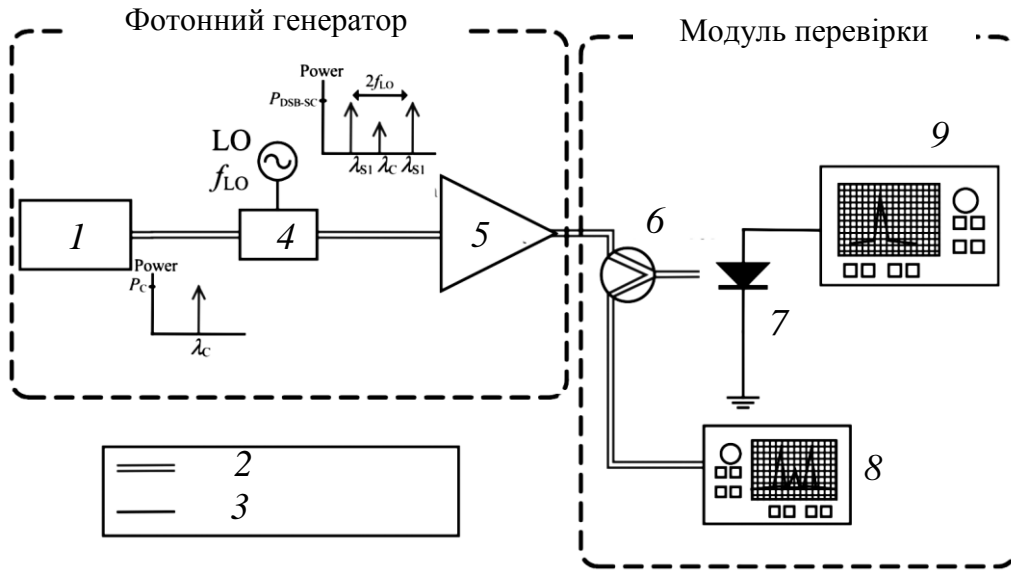


Рисунок 4 – Структурна схема фотонного генератора:

1 – джерело оптичного випромінювання; 2 - оптична сигнальна частина; 3 – мікрохвильова сигнальна частина; 4 – модулятор оптичної інтенсивності; 5 – волоконно-оптичний підсилювач, легований ербієм; 6 – 3-дБ розгалужувач; 7 – фотозмішувач; 8 – оптичний спектр-аналізатор; 9 – електричний спектр-аналізатор

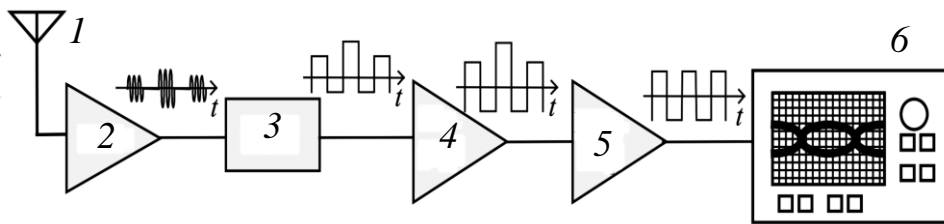


Рисунок 5 – Структурна схема приймача:

1 – високочастотна антена; 2 – малошумливий лінійний підсилювач; 3 – підсмуговий фільтр з детектором; 4, 5 – підсилювач; 6 – осцилограф

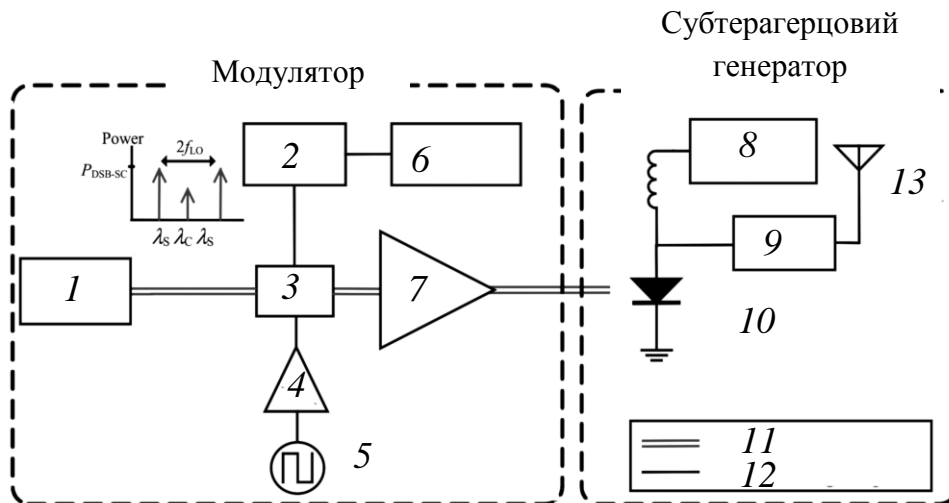


Рисунок 6 – Структурна схема :Модулятор і субтрагерцовий генератор:

1 – оптичне джерело; 2 – стабілізатор зміщення по постійному струму; 3 – модулятор оптич-

ної інтенсивності; 4 – цифро-аналоговий перетворювач; 5 – джерело даних; 6, 8 – джерело потужності постійного струму; 7 – волоконно-оптичний підсилювач на оптичному волокні, легуваному іонами ербію; 9 – вентиль; 10 – фотозмішувач; 11 – оптична сигнальна частина; 12 – мікрохвильова сигнальна частина; 13 – антена

Системні характеристики радіолінії, що розглядається, наведені нижче.

Системні характеристики

Центральна частота, ГГц	120
Смуга пропускання за рівнем -3 дБ, МГц	0,2
Модуляційна схема	амплітудна маніпуляція
Дані модуляції	0,8 В NRZ PRBS довжиною $2^{31}-1$
Швидкість передавання даних, Гбіт/с	10
Вихідна потужність (max), дБм	-10
Приймальна та передавальна антени:	
тип	Кассегрена
коефіцієнт підсилення, дБі	46,5
рівень бокових пелюстків, дБ	18
ширина діаграми направленості за рівнем -3 дБ, град	0,57
Ширина смуги частот приймача, ГГц	10
Напруга на виході приймача, В	0,4
Чутливість приймача при 10 Гбіт/с і BER= 10^{-12} , дБм	-37

На рис. 8 надано результати вимірювань потужності сигналу приймача в діапазоні проміжних частот для чотирьох різних відстаней між антенами передавача і приймача. Температури шуму змішувачів у передавачі і приймачі при односмуговому режимі роботи складають 960 К і 980 К відповідно.

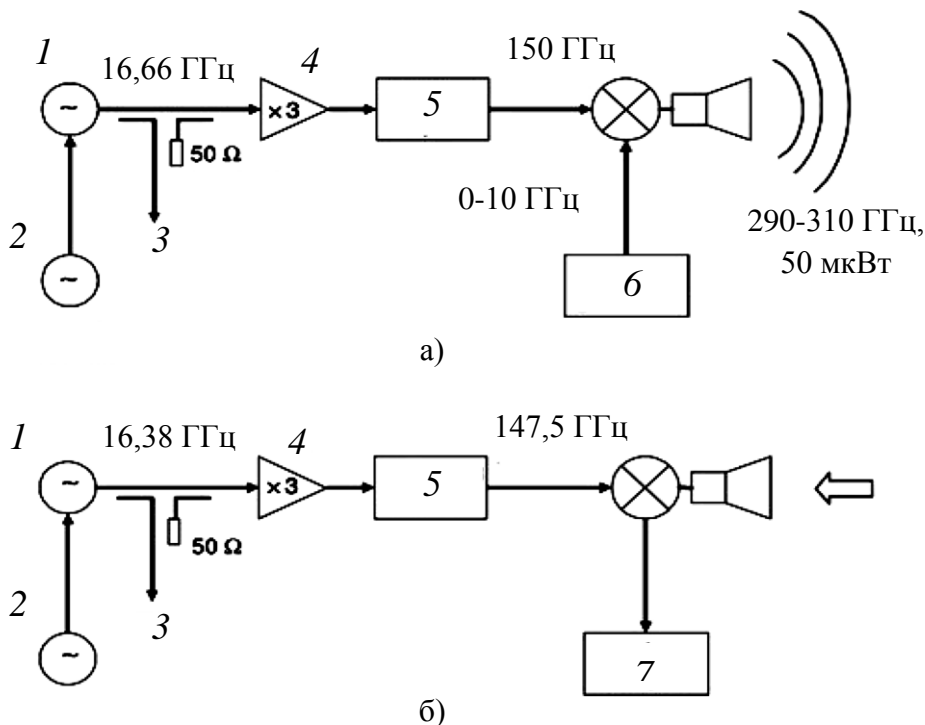


Рисунок 7 – Структурні схеми: Передавач (а) та приймач (б) радіолінії на 300 ГГц:

1 – генератор на основі діелектричного резонатора з фазовим автопідстроюванням;
 2 – твердотільний генератор; 3 – контрольна точка виміру; 4 – підсилювач та повторювач;
 5 – потроювач на хвилевод WR 6,5; 6 – генератор сигналу, 7 – спектроаналізатор

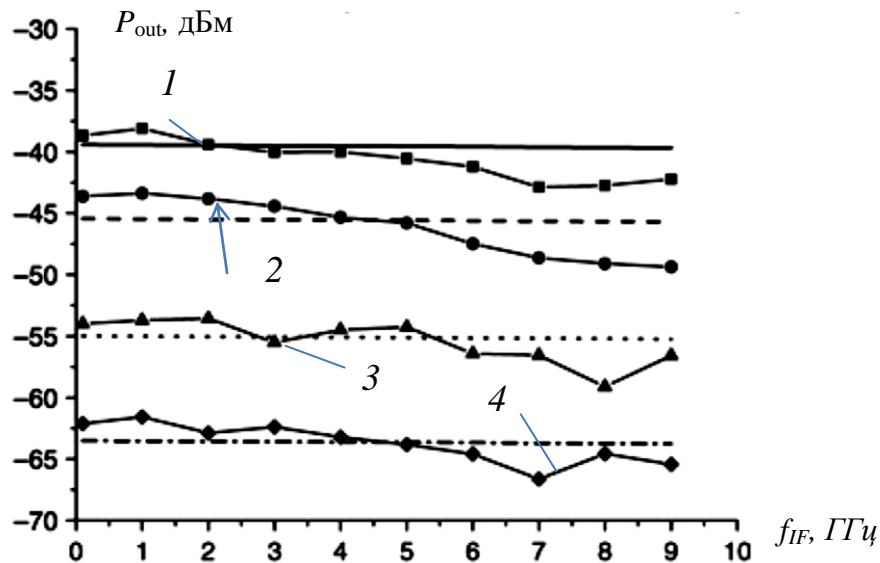


Рисунок 8 – Частотна залежність вихідної потужності по ПЧ приймача для чотирьох відстаней між антенами:

1 – 5 см; 2 – 10 см; 3 – 30 см; 4 – 80 см (вхідна потужність складає -10 дБм)

Безпроводова лінія зв'язку в діапазоні 625 ГГц. Використано комерційно доступне джерело терагерцового діапазону з вихідною потужністю близько 1 мВт при роботі в режимі безперервної генерації [14]. Джерело складається з чотирьохкаскадних каскадних подвоювачів частоти з подальшим потроєнням частоти. Всі каскади сформовані на діодах Шоттки. Вихід сигналу у вільний простір забезпечує рупорна антена з апертурою 2,4 мм (рис. 9).

Вхідний сигнал в частотній смузі 12,2...13,6 ГГц через вхідний двохватний підсилювач перетворюється з підвищенням у діапазон частот 585...653 ГГц. Дві ідентичні терагерцові лінзи з короткою фокальною довжиною (діаметр променя близько 20 мм), що дозволяє переорієнтувати промінь на стороні приймача в рупорній антені, ідентичні тій, яка використовується на стороні передавача. Приймальний рупор підключено до діода Шоттки із нульовим зміщенням, який функціонує в режимі низької потужності (вхідна потужність < 10 мкВт) як квадратний детектор з великою пропускну здатністю смуги частот і чутливістю близько 2500 В/Вт.

Загальна потужність, що приймається, вимірюється разом із відповідним їй BER з і без порога оптимізації (рис. 10). Після оптимізації прийнятих даних поріг BER (рівень BER, який може бути скорочений до $\sim 1 \cdot 10^{-15}$ при прямому кодуванні з корекцією помилок з 7 % накладних витрат) призводить до менших BER від значень $1 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-7}$. Підвищення надалі потужності не зменшує кількості помилок протягом тривалої псевдовипадкової послідовності (ПВП).

Плазмонний нанотрансивер на основі графена терагерцового діапазону. У роботі [3] запропонована архітектура плазмонного нанотрансивера на основі графену для широкомугових комунікацій діапазону 0,1...10 ТГц. Архітектура нанотрансивера представлена на рис. 11. Нанопередавач складається з двох блоків: електричного генератора сигналів і плазмонного передавача. Генератор електричного сигналу модулює електричний сигнал відповідно до бітового потоку, якого має бути передано. Цей сигнал потім вводять у плазмонний нанопередавач, який перетворює сигнал у вигляді модульованої поверхневої плазмонно поляризованої хвилі SPP (Surface Plasmon Polariton).

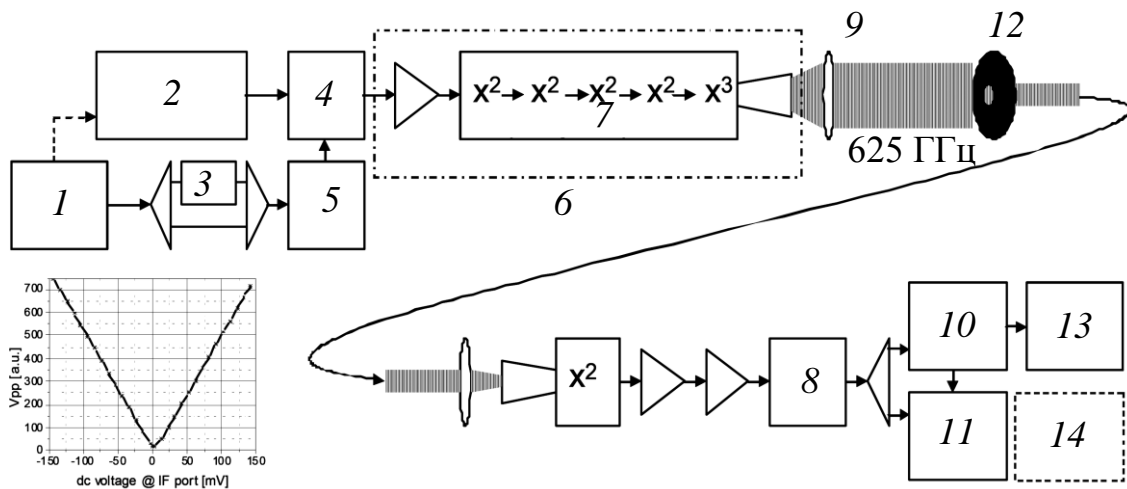


Рисунок 9 – Схема терагерцової безпроводової лінії передавання та характеристика балансного змішувача (графік):

1 – генератор імпульсних кодів PPG на 2,5 Гбіт/с; 2 – частотний синтезатор на 13 ГГц; 3 – вентиль; 4 – балансний змішувач; 5 – фільтр нижніх частот ФНЧ-1; 6 – терагерцове джерело; 7 – ланцюг частотних помножувачів; 8 – фільтр нижніх частот ФНЧ-2; 9 – лінза; 10 – приймальне навантаження; 11 – вимірювач коефіцієнту бітової помилки; 12 – канал зв’язку; 13 – осцилограф; 14 – джерело живлення

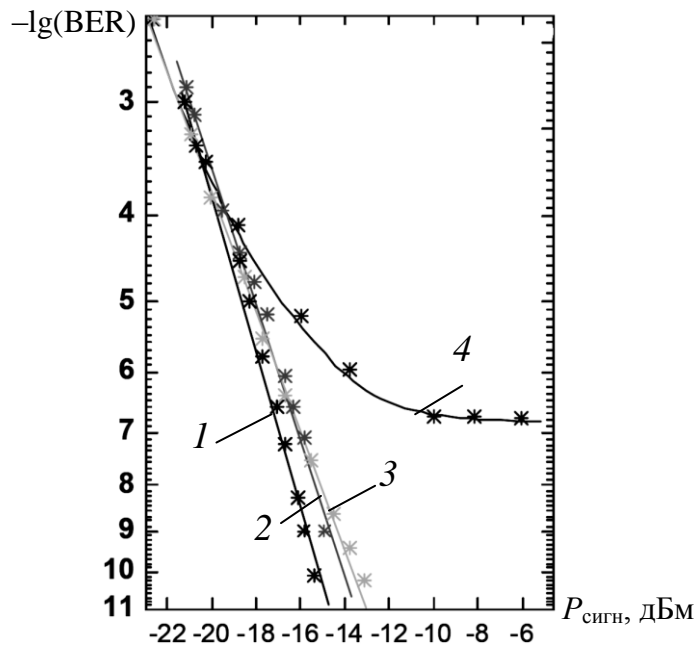


Рисунок 10 – Залежність BER від потужності сигналу для довгої та короткої псевдовипадкової послідовності (ПВП) з і без порога прийняття рішення на оптимізацію: 1 – $2^7 - 1$ з оптимізованим порогом; 2 – $2^7 - 1$ з фіксованим порогом; 3 – $2^{31} - 1$ з оптимізованим порогом; 4 – $2^{31} - 1$ з фіксованим порогом

Потім SPP-хвиля випромінюється через плазмонну наноантену [4], яка перетворює SPP-хвилю в електромагнітну хвилю, що розповсюджується до наноантени приймача, де електромагнітна хвиля перетворюється в SPP-хвилю. Наноприймач також складається з двох блоків, а саме – з плазмового приймача і електричного детектору сигналу. Плазмонний наноприймач перетворює SPP-хвилю в електричний сигнал, який потім демодулює детектор сигналу.

Зауважимо, що плазмонний ефект, що застосовується у даному випадку відомий давно при дослідженнях поверхневих хвиль у металах. Плазмон-поляритони формуються на межі діелектрика і матеріалу з від'ємною діелектричною проникністю. У якості такого матеріалу може бути як метал, так і плазма з понадкритичною густиною електронів. Привабливість плазми полягає в тому, що в ній можна легко міняти параметри, густину електронів серед них, і вона може бути отримана з на початку непровідного діелектричного середовища шляхом його іонізації.

Плазмонний передавач (рис. 12) складається з транзистора з високою рухливістю електронів HEMT (High Electron Mobility Transistor), який побудований з III-V напівпровідників і затвору на основі графена [5]. Коли напруга між стоком і джерелом HEMT позитивна, $U_{DS} > 0$, електрони прискорюються від джерела до стоку. Як вперше було описано в [6, 7] і експериментально підтверджено у ряді робіт [8, 9, 10], електрони, що рухаються в HEMT-каналі, створюють плазмову хвилю через нестабільності Дьяконова-Шура (Dyakonov-Shur). При довжині каналу порядку ста нанометрів, плазмова хвиля в двовимірному електронному газі (2DEG) резонує в терагерцовому діапазоні. Це справедливо за умови, що напруга на затворі U_G буде вище порогової напруги HEMT, $U_G > U_T$.

На відміну від існуючих джерел терагерцового діапазону, в пропонованій конструкції, плазмова хвиля безпосередньо не випромінюється, але використовується, щоб викликати поширення SPP-хвилі на межі з графеновим шаром. Коливний дзеркальний заряд, створений на кордоні графен-напівпровідник у відповідь на обмеження коливань плазмових хвиль в 2DEG, є поєднанням коливного розподілу заряду поблизу частоти, за якої система управляється [11]. Завдяки комплексній провідності графену на терагерцових частотах це глобальне коливання заряду на інтерфейсі графен-напівпровідник викликає SPP-хвилі [12, 13]. Безперервне поширення SPP-хвилі, яка може бути налаштована шляхом зміни хімічного потенціалу графенового шару, визначає довжину поширення хвилі. Нарешті, SPP-хвилю можна використовувати для формування (чого?) на основі графена плазмонних наноантен.

Навзаєм, та ж архітектура HEMT може бути використана і на прийманні (рис. 13). Ін'єкція SPP-хвиль у графеновому перетворювальному каналі HEMT, наприклад, в плазмонну наноантену на основі графена, призводить до плазмової хвилі в 2DEG. Рух електронів фактично створює напругу між стоком і виток, $U_{DS} > 0$, за умови, що $U_G > U_T$. Останні роботи показують, що плазмонні детектори на основі HEMT забезпечують добру чутливість особливо при дуже низьких температурах. Проте, при кімнатній температурі, продуктивність знижується. Реакція наноприймача на SPP-хвилю в терагерцовому діапазоні може бути підвищена при кімнатній температурі шляхом використання графену. З одного боку, використання одного й того ж наноматеріалу, як і в наноантені, спрощує з'єднання двох нанокомпонентів і зводить до мінімуму втрати через невідповідність імпедансів. З іншого боку, прекрасні можливості зондування графена у зв'язку з тим, що всі його атоми впливають на середовище, призводить до значно більш низької чутливості.

Ультраширококутні приймачі з використанням полімерної підкладки для багатосмугових терагерцових комунікацій. В [15] розроблено ультраширококутний приймач терагерцового діапазону, що використовує полімерну підкладку для багатосмугової безпроводової комунікації. Продемонстровано із застосуванням одного й того ж приймача передачі даних зі швидкістю 1,5 Гбіт/с на частотах 120 і 300 ГГц (рис. 14). Це стало можливим завдяки використанню ширококутної плоскої щільової антени з плавним переходом на основі полімерної підкладки з низькою діелектричною постійною (рис. 15). Коефіцієнт підсилення щільової антени становить 9,73 і 12,44 дБі на частотах 120 і 300 ГГц, відповідно.

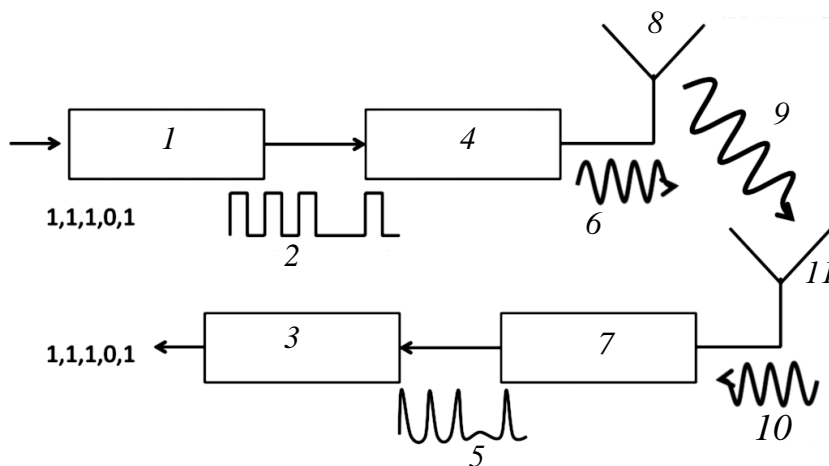


Рисунок 11 – Концептуальна архітектура нанотрансивера: 1 – генератор електричного сигналу; 2, 5 – напруга сигналу; 3 – детектор електричного сигналу; 4 – плазмон ний передавач; 6, 10 – поверхню поляризовані (SPP) хвилі плазмонів; 7 – плазмонний приймач; 8, 11 – плазмонна наноантена; 9 – електромагнітна хвиля

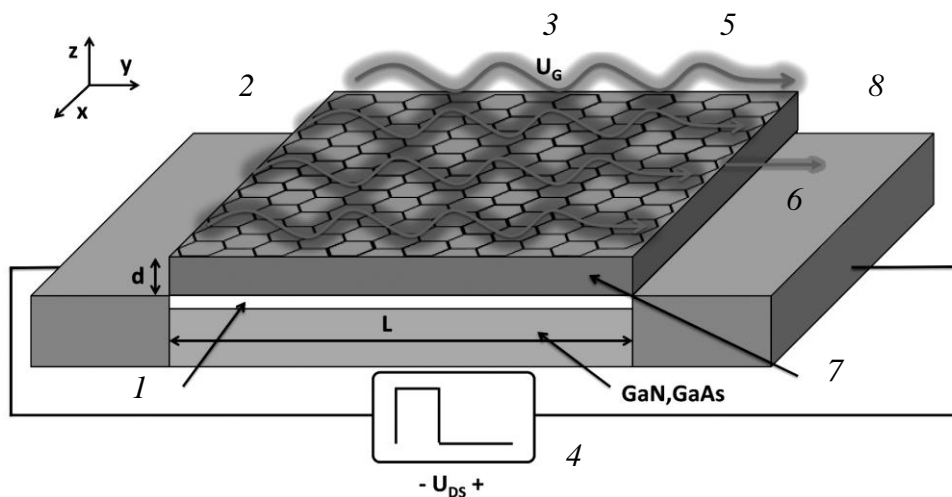


Рисунок 12 – Плазмонний нанопередавач: 1 – двомірний електронний газ 2DEG; 2 – джерело; 3 – графеновий затвор U_G ; 4 – генератор напруги; 5 – поверхню поляризовані (SPP) хвилі плазмонів; 6 – до наноантени; 7 – ізолятор затвору InGaAs; 8 – стік

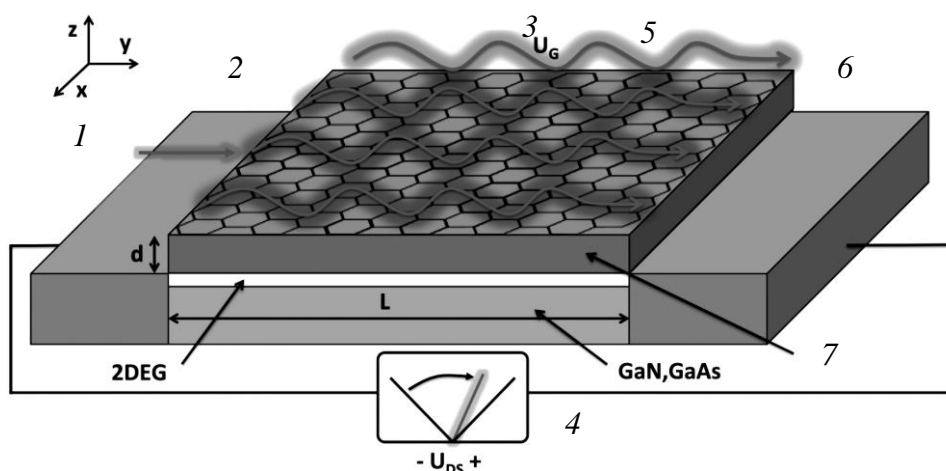


Рисунок 13 – Плазмонний наноприймач: 1 – від наноантени; 2 – джерело; 3 – графеновий затвор; 4 – детектор сигналу; 5 – поверхню поляризовані (SPP) хвилі плазмонів; 6 – стік; 7 – ізолятор затвору InGaAs

Ультраширокопasmові приймачі з використанням полімерної підкладки для багатосmових терагерцових комунікацій. В [15] розроблено ультраширокопasmовий приймач терагерцового діапазону, що використовує полімерну підкладку для багатосmової безпроводової комунікації. Продемонстровано із застосуванням одного й того ж приймача передачі даних зі швидкістю 1,5 Гбіт/с на частотах 120 і 300 ГГц (рис. 14). Це стало можливим завдяки використанню широкопasmової плоскої щільової антени з плавним переходом на основі полімерної підкладки з низькою діелектричною постійною (рис. 15). Коефіцієнт підсилення щільової антени становить 9,73 і 12,44 дБі на частотах 120 і 300 ГГц, відповідно.

Конфігурація терагерцової безпроводової системи передачі на основі приймача з щільовою антеною показано на рис. 16. Передача даних з $BER < 10^{-11}$ була продемонстрована в двох діапазонах 120 і 300 ГГц з використанням підсилювачів з коефіцієнтом підсилення 50 дБ у смuzі 1,5 ГГц.

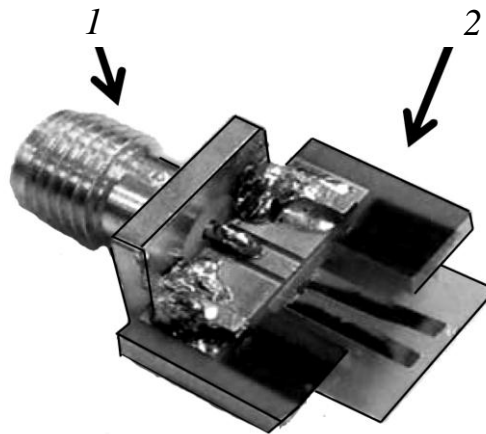


Рисунок 14 – Приймальний модуль зі щілинною антеною на полімерній плівці:
1 – коаксіальний роз'єм; 2 – жорсткий конструктивний утримувач полімерної підкладки

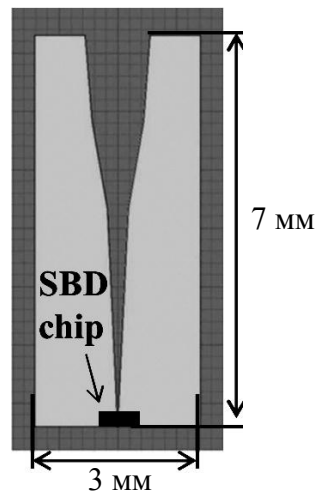


Рисунок 15 – Щілинна антена з плавним переходом (SBD – schottky barrier diode), діод з бар'єром Шоттки

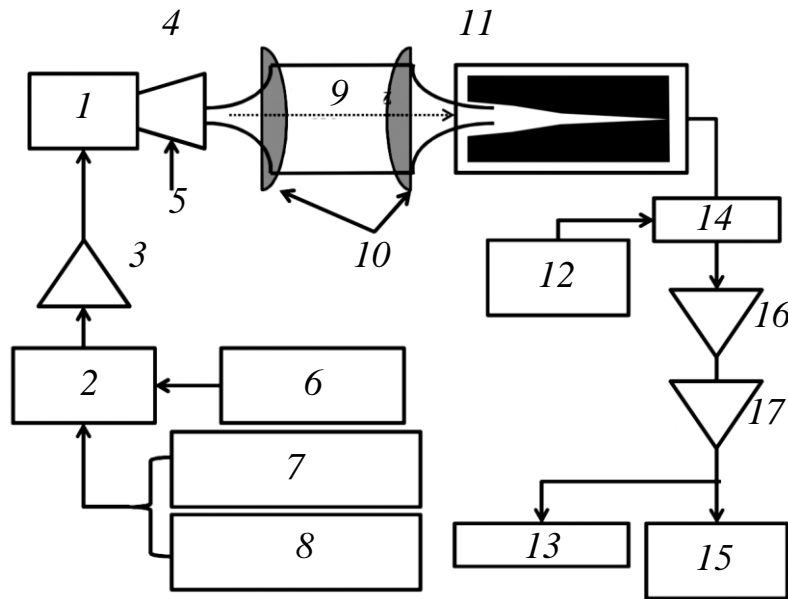


Рисунок 16 – Конфігурація терагерцової безпроводової системи передачі:

1 – фотодіод; 2 – оптичний модулятор; 3 – оптичний підсилювач; 4 – передавач; 5 – рупорна антена; 6 – імпульсний генератор даних; 7, 8 – лазер, що підстроюється по довжині хвилі; 9 – терагерцові хвилі; 10 – діелектричні лінзи; 11 – приймач; 12 – джерело енергії постійного струму; 13 – осцилограф; 14 – ланцюг зміщення; 15 – вимірювач BER; 16-передпідсилювач; 17 – підсилювач з обмеженням

Безпроводові лінії зв'язку з шумовим носієм у субтерагерцовому діапазоні частот. Одним із перспективних напрямів розвитку теорії і техніки широкосмугового зв'язку є розробка систем передачі цифрової інформації, які використовують в якості носія шумовий (стохастичний) сигнал. Такі системи на фізичному рівні забезпечують неперевершені показники структурної скритності та криптостійкості, оскільки сигнал передавача системи для неуповноваженого спостерігача не відрізняється за своїми характеристиками від флуктуаційних шумів.

Шумовий сигнал за своєю природою має широкосмуговий характер, тому передавач системи не потребує наявності у своїй структурі пристроїв розширення спектра, а випромінювання має низьку спектральну щільність [16].

Непередбачувана форма шумового сигналу не дозволяє здійснювати його когерентний прийом, тому методи внесення інформації в шумовий сигнал орієнтовані на енергетичний або автокореляційне приймання сигналу [17].

Найбільш цікавими для забезпечення конфіденційності зв'язку є методи модуляції шуму, що передбачають автокореляційне приймання. Із них найбільш перспективними з точки зору технічної реалізації є, на наш погляд, кореляційно-часова [16] та фазова маніпуляція шумового сигналу [18].

Автокореляційний приймач безумовно програє класичному взаємно-кореляційному за потенційною завадостійкістю. Проте він допускає значні спрощення у своїй структурі, оскільки не потребує точної фазової і частотної синхронізації, відтворення опорного сигналу на приймальній стороні, аналізу каналу зв'язку тощо.

Слід зазначити, що переваги систем зв'язку з шумовим носієм проявляються повною мірою лише за умов достатньо широкої смуги частот сигналу. У цьому зв'язку надзвичайно перспективним виглядає використання шумового носія при освоєнні субтерагерцового діапазону частот [19-20].

Максимально просту структуру мають приймально-передавальні пристрої систем, в

яких формування й оброблення сигналу повністю відбуваються в основному діапазоні частот. Даний напрям реалізації систем є надзвичайно цікавим як з практичної, так і з наукової точки зору.

На рис. 17,а наведено структурну схему передавача системи з кореляційно-часовою маніпуляцією шумового сигналу діапазону 130...134 ГГц. Генератор шуму NG випромінює неперервний шумовий сигнал відповідної смуги частот $x(t)$, який надходить на подільник потужності PD. Перший вихід подільника PD безпосередньо з'єднаний із першим входом суматора PC і призначений для формування опорного сигналу. Другий і третій виходи PD з'єднані з лініями затримки DL_1 та DL_0 відповідно і призначені для формування інформаційного сигналу. Двопозиційний керований комутатор Sw_2 протягом бітового інтервалу тривалістю $T = 200$ нс подає на другий вхід суматора PC один із двох сигналів $x(t-\tau_1)$ чи $x(t-\tau_0)$, де $\tau_1 = 20$ нс – затримка лінії DL_1 , а $\tau_0 = 10$ нс – затримка лінії DL_0 , залежно від знака сигналу на вході керування. Керувальний сигнал формується кодером Enc відповідно до поточного інформаційного біта (“+” при передачі “1” і “-” при передачі “0”). Смуговий фільтр BPF придушує позасмугові викиди сигналу, пов'язані із перехідними процесами у комутаторі Sw_2 . Масштаб часу у системі встановлюється за допомогою генератора тактових імпульсів Clc.

Таким чином, передавач випромінює суму опорного й інформаційного сигналу, а внесення інформації в шумовий сигнал відбувається шляхом зміни значення часової затримки між опорним та інформаційним сигналом за законом вхідної послідовності біт.

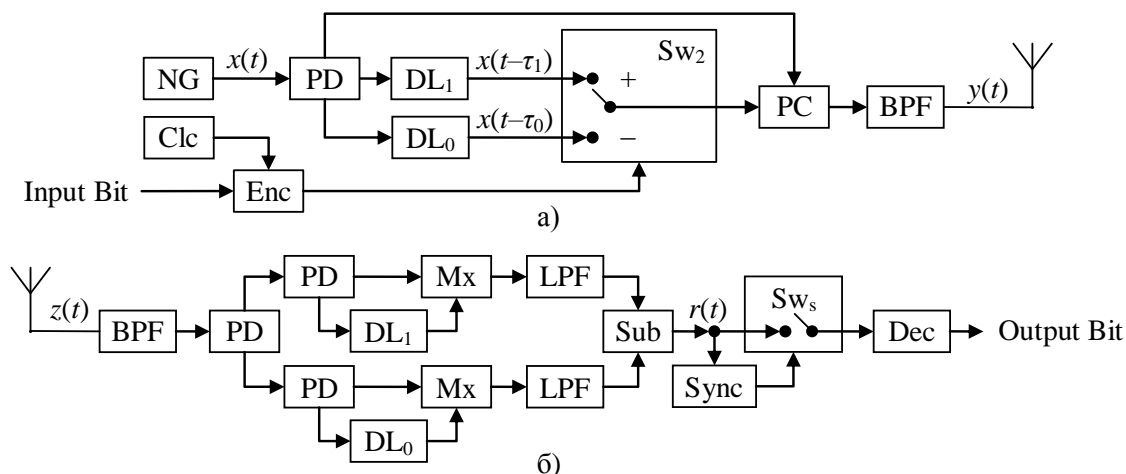


Рисунок 17 – Структурна схема передавача (а) та приймача (б) системи з кореляційно-часовою маніпуляцією шумового сигналу

Приймач відновлює передану інформацію автокореляційними методами.

На рис. 17,б наведено структурну схему приймача. Вхідний сигнал $z(t)$ через смуговий фільтр BPF та подільник потужності надходить до двох паралельних автокореляційних фільтрів, кожен з яких складається із подільника потужності PD, лінії затримки DL, змішувача Mx та фільтра нижніх частот LPF. Один фільтр налаштований на затримку τ_1 , а інший – τ_0 .

Сигнал $r(t)$ зі схеми віднімання Sub надходить до пристрою тактової синхронізації Sync та стробувального комутатора Sw_s . Пристрій синхронізації забезпечує вибірку значення функції $r(t)$ у кінці кожного бітового інтервалу. Відповідно до знака числа $r(kT)$ декодер Dec подає на вихід приймача біт “1” або “0”.

Досить високий рівень внутрішніх системних завад стає на перепоні підвищенню швидкості передавання даних при використанні кореляційно-часової маніпуляції шумового сигналу.

Ця проблема може бути усунена шляхом застосування фазової маніпуляції шумового сигналу (ФМШС) (рис. 18). Структурна схема передавача у даному випадку (рис. 18,б) ускладнюється наявністю широкосмугового фазообертача PS із фіксованим зсувом фази на 180° .

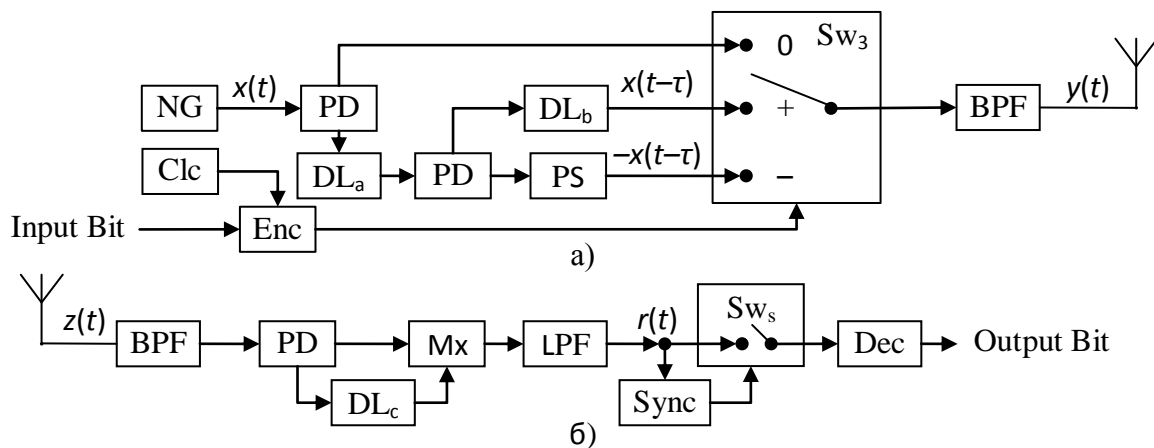


Рисунок 18 – Структурна схема передавача (а) та приймача (б) системи з ФМШС

Протягом часу $\tau = 20$ нс, що дорівнює половині бітового інтервалу $T = 40$ нс, кодер Enc подає на вхід керування трипозиційного комутатора Sw_3 нульовий сигнал. При цьому комутатор поєднує із вихідним смуговим фільтром генератор шуму NG. У такий спосіб формується опорний сигнал.

Лінії затримки DL_a та DL_b забезпечують сумарну затримку τ , рівну половині бітового інтервалу, при цьому лінія DL_b урівноважує затримку, що вноситься фазообертачем.

У другій половині бітового інтервалу кодер формує сигнал, знак якого залежить від поточного інформаційного біта. Комутатор перемикається в положення “+” або в положення “-” відповідно. В результаті на вихід передавача надходить маніпульований по фазі інформаційний сигнал: $x(t-\tau)$, при передаванні “1”, та $-x(t-\tau)$, при передачі “0”.

Приймач даної системи (рис. 18,а) містить один автокореляційний фільтр із лінією затримки DL_c на час τ .

Оскільки опорний та інформаційний сигнал рознесені в часі, то вони не створюють взаємних завад. Розрахунки і комп’ютерне моделювання показують, що за рахунок цього можна отримати вигоду за швидкості передавання даних у 5-7 разів при тій самій потужності випромінювання.

Проте на шляху реалізації вказаної концепції побудови систем зв’язку з шумовим носієм є низка невирішених проблем. Насамперед, не достатньо розвинена елементна база для роботи у діапазоні частот вище 100 ГГц. Особливо критичними задачами є розробка таких вузлів, як лінія затримки, швидкісний комутатор та широкосмуговий фазообертач.

Альтернативний варіант побудови широкосмугових систем з шумовими сигналами полягає в наступному. Ядро системи розробляється у більш низькочастотному діапазоні (наприклад, 3,1..4,1 ГГц). При цьому вихідний тракт передавача та вхідний тракт приймача доповнюється пристроями перетворення частоти вгору і вниз відповідно.

Ця концепція добре опрацьована [19] і більш проста для реалізації на існуючій елементній базі. Однак смуга частот сигналу отримується в чотири рази меншою порівняно з прямою шумовою модуляцією. Отже, і швидкість передавання зменшується, при цьому складність приймально-передавальних пристроїв зростає.

Обидва напрями, розглянуті вище, орієнтовані на аналогові методи формування і обробки сигналу. Проте розвиток техніки цифро-аналогового та аналогово-цифрового перетворення сигналів, а також цифрового оброблення сигналів зі смугою частот багато більше 100 МГц виводить в розряд актуальних питань проблему розробки систем, в яких формування стохастичного сигналу, внесення в нього інформації, демодуляція і детектування здійснюються цифровими методами. При цьому на аналогові тракти покладається лише задача

перетворення частоти і фільтрації сигналу.

Такий підхід дозволяє застосовувати складні розвинені методи модуляції та максимально ефективно використовувати інформаційну ємність шумового сигналу.

Змішувачі частоти на діоді з бар'єром Шоттки діапазону 874 ГГц. В роботі [21] розроблено балансний змішувач на основі мембранного діоду Шоттки діапазону 874 ГГц (рис. 19, 20). Змішувач включає у себе інтегрований ланцюг зміщення постійного струму, щоб зменшити величину потужності гетеродину, необхідну для накачки діодів. При кімнатній температурі кращими характеристиками змішувача є: температура шуму в двосмуговому режимі (DSB) 2660 К на частоті 865,8 ГГц і втрати перетворення в DSB 8,02 дБ на частоті 862,2 ГГц (рис. 21). При охолодженні до 120 К найкраща шумова температура DSB змішувача знижується до 1910 К. Розв'язки між сигнальним та гетеродинним входами склали 29...33 дБ в діапазоні частот 830...900 МГц.

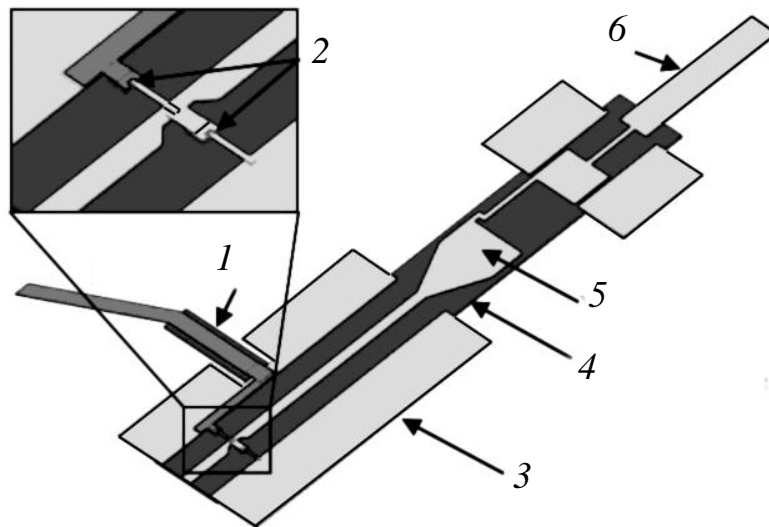


Рисунок 19 – Загальний вигляд топології GaAs-монолітної схеми балансного змішувача діапазону 874 ГГц: 1 – ланцюг зміщення постійним струмом; 2 – повітряні містки планарних діодів Шоттки; 3 – земляна металізація; 4 – GaAs-мембрана; 5 – гетеродинна смужка-збудник; 6 – смужка проміжної частоти

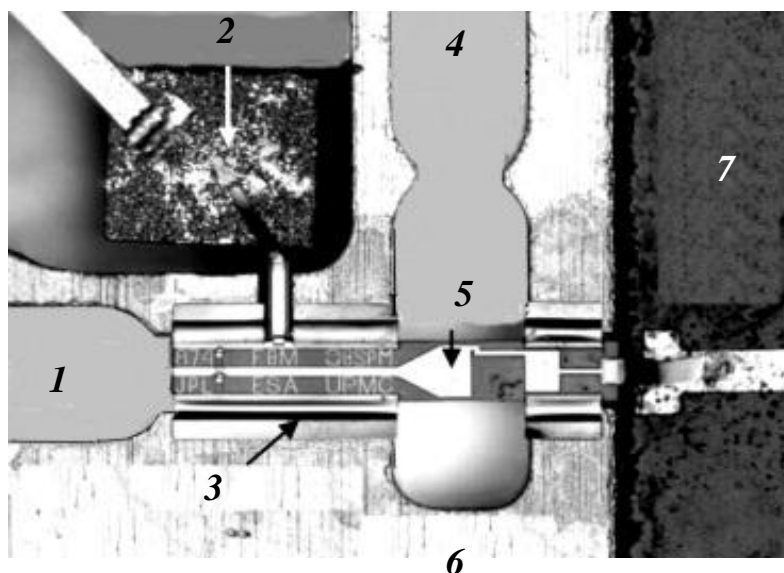


Рисунок 20 – Конструктив змішувача діапазону частот 835...900 ГГц:

1 – високочастотний вхід; 2 – чіп конденсатора для зміщення постійним струмом; 3 – монолітна мікросхема змішувача на GaAs-мембрані; 4 – гетеродинний вхід; 5 - гетеродинна смужка-збудник і відвід проміжної частоти; 6 – підстроювальна смужка по гетеродинному входу; 7 – імпедансний трансформер по проміжній частоті

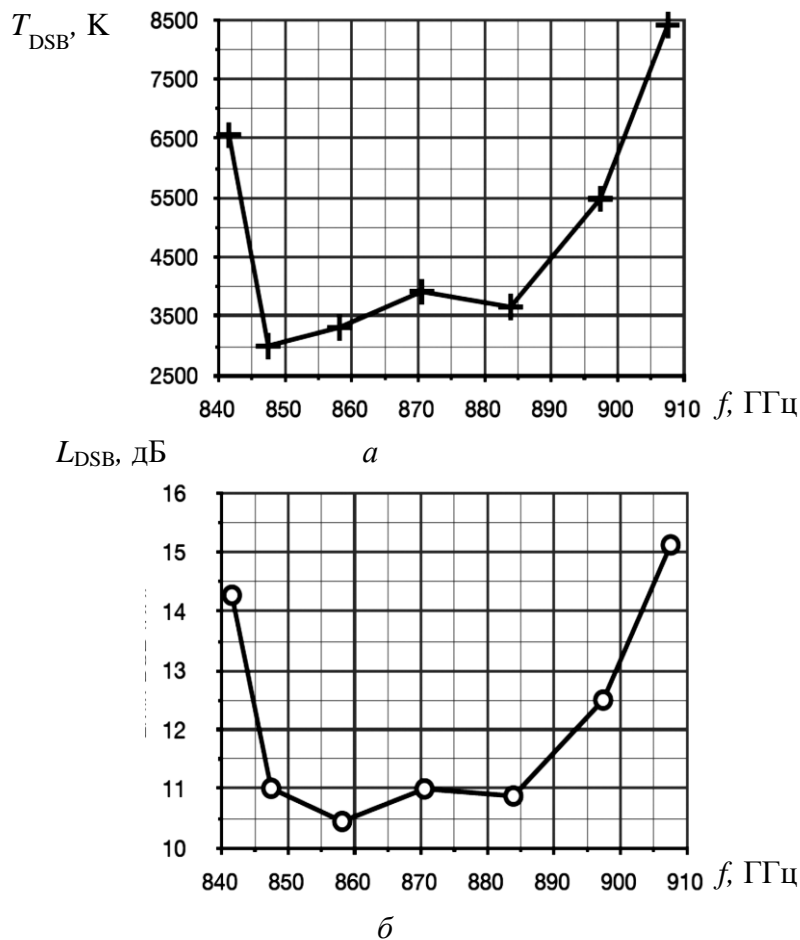


Рисунок 21 – Частотні характеристики шумової температури (а) і втрат перетворення (б) змішувача в двосмуговому режимі DSB роботи

GaAs монолітна мембранно-діодна MOMED (monolithic membrane-diode) структура була розроблена і реалізована у вигляді змішувача на основі діода Шоттки діапазону 2,5 ТГц [22] (рис. 22). Змішувач об'єднує традиційний металевий хвилевід з мікрOMEХАНІЧНОЮ монолітною GaAs-схемою (рис. 23). Розроблений змішувач разом з 150-К комерційним Miteq-підсилювачем має шумову температуру в двосмуговому режимі 16500 К на проміжній частоті 8,4 ГГц. Втрати перетворення змішувача при цьому склали 16,9 дБ на вхідній частоті сигналу 2514 ГГц.

В [23] представлено широкосмуговий субгармонійний змішувач діапазону частот 200...240 ГГц (рис. 24). Змішувач базується на антипаралельній парі GaAs діодів Шоттки, що вироблені в Rutherford Appleton Laboratory (RAL). Найкращі втрати на перетворення 5,9 дБ були досягнуті при потужності гетеродину 5 мВт на частоті 207 ГГц. В діапазоні частот сигналу 200...240 ГГц втрати на перетворення були нижче 10 дБ.

Таким чином, розробка і побудова телекомунікаційних систем субтерагерцового діапазону [24-27] висуває низку цікавих науково-технічних завдань, вирішення яких відкриває перспективи розвитку нового напрямку екологічно безпечних бездротових широкосмугових систем зв'язку нового покоління, що забезпечують надійну передачу надшвидкісних гігабітних потоків при забезпеченні високого рівня захищеності інформації.

У даному огляді показано, що історія теоретичних і експериментальних досліджень у галузі систем зв'язку суб- та терагерцового діапазону сягає кінця ХХ-го століття. За цей час накопичено значний арсенал методів передавання інформації в суб- та терагерцовому діапазоні та приймання таких сигналів. Серед бінарних методів маніпуляції одним із найбільш перспективних вбачається фазова маніпуляція сигналу як найбільш завадостійка.

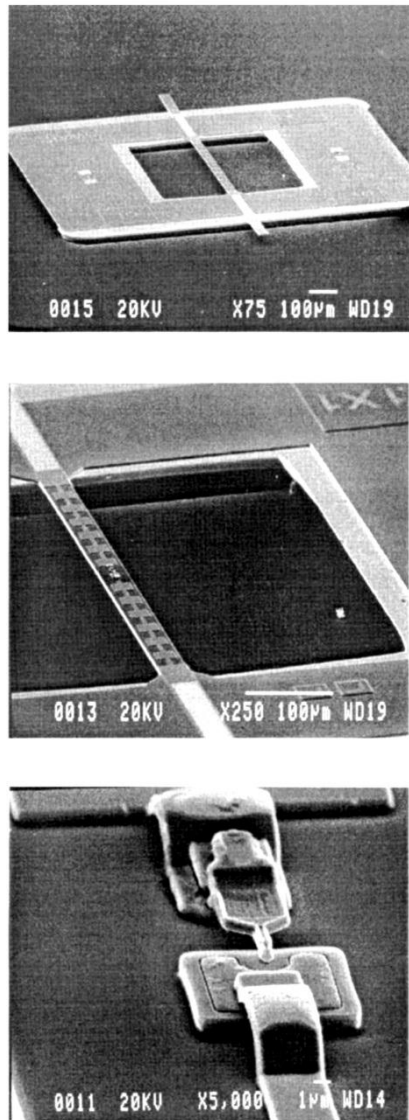


Рисунок 22 – Мікрофотографії мембранного змішувача на діоді Шоттки діапазону 2,5 ГГц.
Розмір мембрани: 36 мкм x 600 мкм x 3 мкм (фотографії зверху вниз – відповідають масштабованому збільшенню)

Основними напрямками застосування телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазону є наступні:

- транспортні розподільчі мережі мобільного зв'язку (Mobile backhaul), які потребують постійного збільшення пропускної здатності і підвищення швидкості передавання даних;
- системи широкосмугового радіодоступу із гігабітною пропускною здатністю для організації надвисокошвидкісних (одиниці ГБіт/с і більше) локальних комп'ютерних мереж та безпроводового передавання телевізійних програм високої та надвисокої чіткості, які потребують цифрових каналів з пропускною здатністю до 6 Гбіт/с;
- комунікації всередині будівлі для забезпечення безпроводового з'єднання комп'ютерів і периферійних пристроїв в межах декількох приміщень;
- супутникові лінії для радіоастрофізичних досліджень, які дозволять вивчати холодні космічні об'єкти;
- системи конфіденційного зв'язку, де пріоритетними є задачі захисту переданої інформації від перехоплення та захисту каналу від інжектування сторонньої інформації та інші.

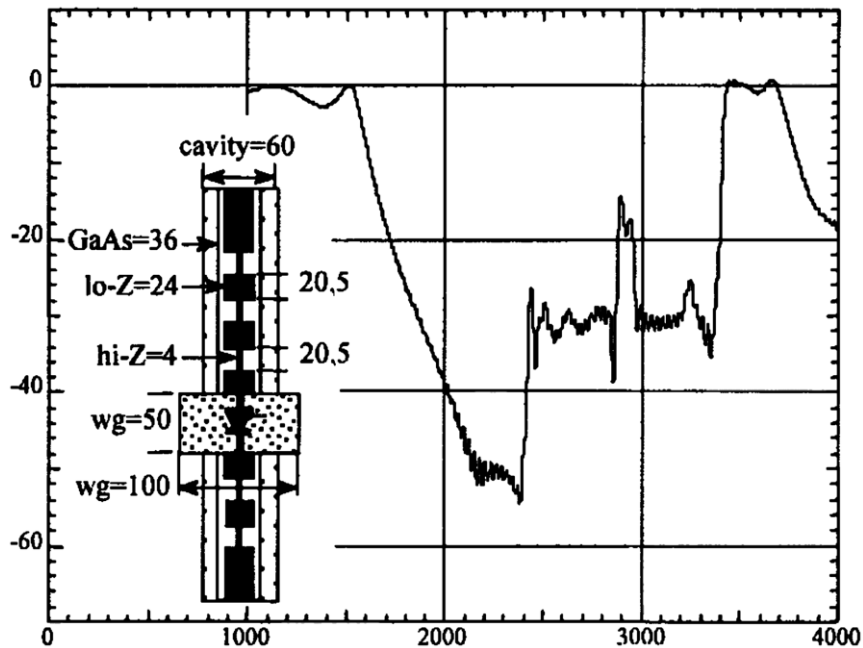


Рисунок 23 – Характеристика чотирисекційної високочастотної мікросхеми утримувача діодного чіпа-змішувача. Розміри в мкм

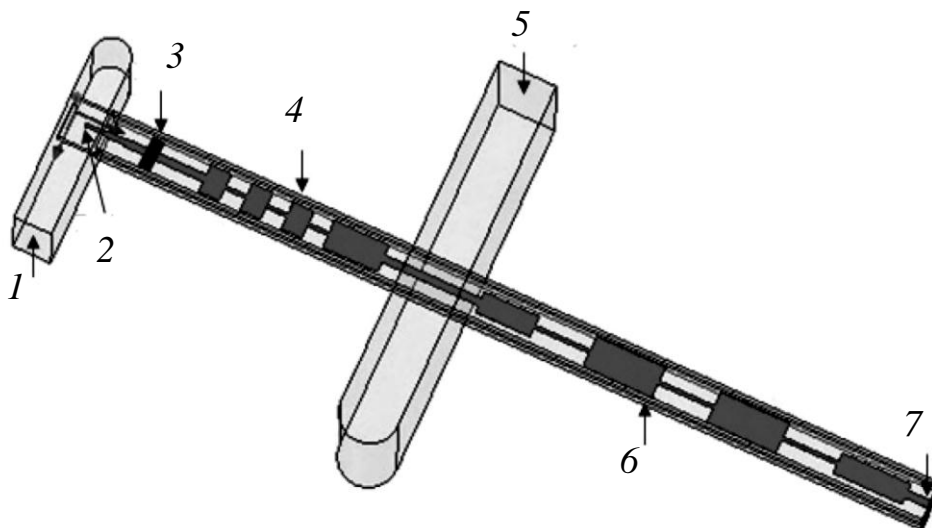


Рисунок 24 – Топологія субгармонійного змішувача:

1 – високочастотний вхід сигналу (хвилевід WR-4); 2 – смужковий зонд; 3 – діодна пара; 4 – високочастотний фільтр; 5 – вхід гетеродину (хвилевід WR-8); 6 – фільтр гетеродину; 7 – вихід проміжної частоти

Крім того, такі телекомунікаційні системи суб- та терагерцового діапазонів дозволяють простими технічними засобами вирішувати проблему забезпечення стійкого зв'язку у складних умовах розповсюдження сигналу, зокрема у багатопроменевих радіоканалах.

Подальша перспектива застосування телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазонів вбачається у створенні швидкодіючих широкосмугових радіоелектронних компонентів, включаючи підсилювачі потужності та малощумні підсилювачі і розвиток на цій основі методів побудови систем множинного доступу та інших телекомунікаційних систем суб- та терагерцового діапазонів нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kim S., Ahn S.-H., Park S. S. Design and Experiment Results of High-Speed Wireless Link Using Sub-terahertz Wave Generated by Photonics-Based Technology // ETRI Journal. – 2013. – Vol. 35, Number 4. – P. 578–586
2. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Münter, R. Piesiewicz, T. Kürner, M. Koch and T. Kleine-Ostmann // Electronics Letters. – 2008. – Vol. 44, No. 3. – P. 75–77
3. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Graphene-based Plasmonic Nano-transceiver for Terahertz Band Communication // in Proc. of the 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), The Hague, The Netherlands, April 2014. – P.134–137
4. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks // IEEE JSAC, Special Issue on Emerging Technologies for Communications. – 2013. – Vol. 12, No. 12. – P. 685–690
5. Graphene gate electrode for MOS structure-based electronic devices / J. K. Park, S. M. Song, J. H. Mun, and B. J. Cho // Nano letters, Vol. 11, No. 12, P. 5383–5386, 2011
6. Dyakonov M., Shur M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current // Phys. Rev. Lett., Vol. 71, P. 2465–2468, Oct. 1993
7. Crowne F. J. Contact boundary conditions and the dyakonov-shur instability in high electron mobility transistors // Journal of Applied Physics, Vol. 82, No. 3, P. 1242–1254, 1997
8. Terahertz emission by plasma waves in 60 nm gate high electron mobility transistors // W. Knap, J. Lusakowski, T. Parenty, S. Bollaert, A. Cappy, V. Popov, and M. Shur // Applied Physics Letters. – 2004. – Vol. 84, No. 13. – P. 2331–2333
9. Plasma wave oscillations in nanometer field effect transistors for terahertz detection and emission / W. Knap, F. Teppe, N. Dyakonova, D. Coquillat, and J. Lusakowski // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – Vol. 20, No. 38. – P. 384205
10. Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in iii-v semiconductors and graphene T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – pp. 63–71
11. Role of bias voltage and tunneling current in the perpendicular displacements of freestanding graphene via scanning tunneling microscopy / P. Xu, S. D. Barber, M. L. Ackerman, J. Kevin Schoelz, and P. M. Thibado // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, Vol. 31, No. 4, P. 04D103–04D103, 2013
12. Graphene plasmonics: a platform for strong light matter interactions / F. H. L. Koppens, D.E. Chang, and F.J. Garcia de Abajo // Nano Letters, vol. 11, no. 8, pp. 3370–3377, Aug. 2011
13. Grigorenko A.N., Polini M., Novoselov K.S. Graphene plasmonics // Nature Photonics, vol. 6, no. 11, pp. 749–758, 2012
14. Moeller L., Federici J., Su K. THz Wireless Communications: 2.5 Gb/s Error-free Transmission at 625 GHz using a Narrow-bandwidth 1 mW THz Source // General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, 13.08.2011. - P. 1–4
15. Ultra-broadband Receivers using Polymeric Substrate for Multiband Terahertz Communications / M. Inoue, M. Hodono, S. Horiguchi, K. Arakawa, M. Fujita, and T. Nagatsuma // Proc. of the “2013 International Symposium on Electromagnetic Theory”. – 2013. – P. 211–214.
16. Ilchenko M.Ye., Kalinin V.I., Narytnik T.N. and Cherepenin V.A. Wireless UWB Ecological Safety Communications at 70 Nanowatt Radiation Power, 21st Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2012), Conf. Proceedings. – Sevastopol: Weber Publishing Co., 2011. – P. 355–356
17. Дидковський Р.М. Базові методи модуляції стохастических сигналів / Р.М. Дидковський, С.М. Первунінський, Н.І. Бокла // Доклади БГУІР. – Минск, 2013. – № 4(74). – С. 50–55
18. Первунінський С.М., Дідковський Р.М., Метелап В.В., Тобілевич Ю.Є. Математичне моделювання систем зв'язку з кореляційно-часовою модуляцією / С.М. Первунінський, Р.М. Дідковський, В.В. Метелап, Ю.Є. Тобілевич // Вісник Черкаського університету. (Серія : прикладна математика). – Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2006. – Вип. 83. – С. 112–123
19. Ilchenko M.Ye., Kalinin V.I., Narytnik T.N., Chapursky V.V., Cherepenin V.A. Wireless terahertz low power UWB communications. 22nd Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2012), Conf. Proceedings. – Sevastopol: Weber Publishing Co., 2012, – P. 302–303
20. Ilchenko M.Ye., Kalinin V.I., Narytnik T.N., Chapursky V.V., Cherepenin V.A. Wireless Terahertz Communications with spectral modulation of ultra-wideband Noise Signals // Telecommunication Sciences.

– 2012. – Vol. 3, No 2. – P. 39–44

21. An 874 GHz fundamental balanced mixer based on MMIC membrane planar Schottky diodes / B. Thomas, A. Maestrini, J. Gill, C. Lee, R. Lin, I. Mehdi and P. de Maagt // 21ST International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, 23-25 March, 2010. – P. 155-158

22. 2.5-THz GaAs Monolithic Membrane-Diode Mixer / P. H. Siegel, R. P. Smith, M. C. Gaidis, S. C. Martin // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 47, No. 5. – P. 596-604.

23. The Design of a 200-240-GHz Sub-Harmonic Mixer Based on RAL's Planar Schottky Diodes / B. Zhang, B. Alderman, Z. Chen, Y. Fan, X. Yang and X. Yang // Terahertz Science and Technology. – 2011. - Vol. 4, No. 3. – P. 90–94

24. Narytnik T.N. Possibilities of Using THz-Band Radio Communication // Telecommunications and Radio Engineering, 73 (15):1361–1371 (2014)

25. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.M., Ali Abdalla Ibrahim Idris, Didkowsky R.M., Osama Turabi Theoretical and practical aspects of the use of stochastic signals in telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering. – Vol. 73 (20), pp. 58–1817.

26. Наритник Т.М. Принципи побудови надширокопasmової системи радіозв'язку в суб-терагерцовому діапазоні частот / Т.М. Наритник, Р.М. Дідковський // Проблеми телекомунікацій. – 2014. - №3 (15). – Режим доступу http://pt.journal.kh.ua/2014/3/1/143_ilchenko_wireless.pdf

27. Патент на корисну модель № 88917, (Україна). Телекомунікаційна система багатоканальної передачі цифрової інформації шумовими сигналами / Згуровський М.З., Ільченко М.Ю., Наритник Т.М., Дідковський Р.М., Кравчук С.О. – Опубл. 10.04.2014 р. Бюл. № 7

REFERENCES

1. Kim S., Ahn S.-H., and Park S. S. "Design and Experiment Results of High-Speed Wireless Link Using Sub-terahertz Wave Generated by Photonics-Based Technology." *ETRI Journal* 35.4 (2013): 578-86. Print. C. Jastrow, K. Mu'nter, R. Piesiewicz, T. Ku'mner, M. Koch, and T. Kleine-Ostmann. "300 GHz Transmission System." *Electronics Letters* 44.3 (2008): 75-77. Print.

2. Jornet J.M., and Akyildiz I.F. "Plasmonic Nano-transceiver for Terahertz Band Communication." *Proc. of the 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (2014): 134-35. Web. The Hague, The Netherlands, April

3. Jornet J.M., and Akyildiz I.F. "Graphene-based Plasmonic Nano-antenna for Terahertz Band Communication in Nanonetworks." *IEEE JSAC, Special Issue on Emerging Technologies for Communications* 12.12 (2013): 685-94. Print.

4. J. K. Park, S. M. Song, J. H. Mun, and B. J. Cho. "Graphene Gate Electrode for MOS Structure-based Electronic Devices." *Nano Letters* 11.12 (2011): 5383-386. Print.

5. Dyakonov M., and Shur M. "Shallow Water Analogy for a Ballistic Field Effect Transistor: New Mechanism of Plasma Wave Generation by Dc Current." *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993): 2465-468. Print.

6. Crowne F. J. "Contact Boundary Conditions and the Dyakonov-Shur Instability in High Electron Mobility Transistors." *Journal of Applied Physics* 82.3 (1997): 1242-254. Print.

7. W. Knap, J. Lusakowski, T. Parenty, S. Bollaert, A. Cappy, V. Popov, and M. Shur. "Terahertz Emission by Plasma Waves in 60 nm Gate High Electron Mobility Transistors." *Applied Physics Letters* 84.13 (2004): 2331-333. Print.

8. W. Knap, F. Teppe, N. Dyakonova, D. Coquillat, and J. Lusakowski. "Plasma Wave Oscillations in Nanometer Field Effect Transistors for Terahertz Detection and Emission." *Journal of Physics: Condensed Matter* 20.38 (2008): 384205. Print.

9. T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, , W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii. "Emission and Detection of Terahertz Radiation Using Two-dimensional Electrons in Iii-v Semiconductors and Graphene." *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 3.1 (2013): 63-71. Print.

10. P. Xu, S. D. Barber, M. L. Ackerman, J. Kevin Schoelz, and P. M. Thibado. "Role of Bias Voltage and Tunneling Current in the Perpendicular Displacements of Freestanding Graphene via Scanning Tunneling Microscopy." *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 31.4 (2013): 04D103. Print.

11. F. H. L. Koppens, , D.E. Chang, and F.J. Garcia de Abajo. "Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light Matter Interactions." *Nano Letters* 11.8 (2011): 3370-377. Print.

12. Grigorenko A.N., Polini M., and Novoselov K.S. "Graphene Plasmonics." *Nature Photonics* 6.11 (2012): 749-58. Print.

13. Moeller L., Federici J., and Su K. "THz Wireless Communications: 2.5 Gb/s Error-free Transmission at 625 GHz Using a Narrow-bandwidth 1 MW THz Source." *General Assembly and Scientific Symposium*, 2011

XXXth URSI (2011): 1-4. Print.

14. M. Inoue, M. Hodono, S. Horiguchi, K. Arakawa, M. Fujita, and T. Nagatsuma. "Ultra-broadband Receivers Using Polymeric Substrate for Multiband Terahertz Communications."// Proc. of the "2013 International Symposium on Electromagnetic Theory" (2013): 211-14. Print.

15. Ilchenko M.Ye., Kalinin V.I., Narytnik T.N., and Cherepenin V.A. "Wireless UWB Ecological Safety Communications at 70 Nanowatt Radiation Power." 21st Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2012), Conf. Proceedings (2011): 355-56. Print.

16. Didkovskij R.M., Pervuninskij S.M., and Bokla N.I. "Bazovye Metody Moduljacji Stohasticheskikh Signalov." Doklady BGUIR. 4.74 (2013): 50-55. Print.

17. Pervuninskij S.M., Didkovskij R.M., Metelap V.V., and Tobilevich Ju.Ye. "Matematichne Modeljuvannja Sistem Zv'jazku z Koreljacijno-Chasovoju Moduljacieju." Visnyk Cherkas'kogo Universitetu. (Serija: Prikladna Matematika). 83 (2006): 112-13. Print.

18. Ilchenko M.Ye. Kalinin V.I, Narytnik T.N., Chapursky V.V., and Cherepenin V.A. "Wireless Terahertz Low Power UWB Communications." 22nd Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2012), Conf. Proceedings (2012): 302-30. Print.

19. Ilchenko M.Ye., Kalinin V.I, Narytnik T.N., Chapursky V.V., and Cherepenin V.A. "Wireless Terahertz Communications with Spectral Modulation of Ultra-wideband Noise Signals." Telecommunication Science 3.2 (2012): 39-44. Print.

20. B. Thomas, A. Maestrini, J. Gill, C. Lee, R. Lin, , I. Mehdi, and P. De Maagt. "An 874 GHz Fundamental Balanced Mixer Based on MMIC Membrane Planar Schottky Diodes." 21st International Symposium on Space Terahertz Technology (2010): 155-58. Print.

21. B. Thomas, A. Maestrini, J. Gill, C. Lee, R. Lin, , I. Mehdi, and P. De Maagt. "An 874 GHz Fundamental Balanced Mixer Based on MMIC Membrane Planar Schottky Diodes." 21st International Symposium on Space Terahertz Technology (2010): 155-58. Print.

22. B. Zhang, B. Alderman, Z. Chen, Y. Fan, X. Yang, and X. Yang. "The Design of a 200-240-GHz Sub-Harmonic Mixer Based on RAL's Planar Schottky Diodes." Terahertz Science and Technology 4.3 (2011): 90-94. Print.

23. Narytnik T.N. "Possibilities of Using THz-Band Radio Communication // Telecommunications and Radio Engineering." 73.15 (2014): 1361-371. Print.

24. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.M., Ali Abdalla Ibrahim Idris, Didkovsky R.M., and Osama Turabi. "Theoretical and Practical Aspects of the Use of Stochastic Signals in Telecommunication Systems." Telecommunications and Radio Engineering 73.20 (n.d.): 1791-817. Print.

25. Naritnik T.M., and R.M. Didkovskij. "Principy Pobudovy Nadshirokosmugovoï Sistemi Radioz-v'jazku v Sub-teragercovomu Diapazoni Chastot." Problemi Telekomunikacij 3.15 (2014): n. pag. Web. <http://pt.journal.kh.ua/2014/3/1/143_ilchenko_wireless.pdf>.

26. Zgurovs'kij M.Z., Il'chenko M.Ju., Naritnik T.M., Didkovs'kij R.M., and Kravchuk S.O. "Telekomunikacijna Sistema Bagatokanal'noï Peredachi Cifrovoï informacii Shumovimi Signalami." (n.d.): n. pag. Print. Patent na korisnu model' № 88917, (Ukraina). – opubl.10.04.2014r. Bjul.№7