

УДК 356.168; 629.78; 621.39

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.18-27>

А.О. Дзюба, Ю.І. Бударецький, І.В. Петлюк

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: 03 February 2025; Revised 24 February 2025; Accepted 04 March 2025

МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ УНІФІКОВАНОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ РУХУ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ І БОЄПРИПАСІВ ПІД ЧАС СТРІЛЬБИ

Матеріальну основу ударної потужності сухопутних угрупівань провідних країн складають високо-маневрені вогневі об'єкти (пускові установки тактичних і оперативно-тактичних ракет, батареї, взводи, секції причіпних і самохідних гармат, реактивні системи залпового вогню, міномети). За оціночними даними, на ракетні війська і артилерію (РВ і А) у протистоянні з росією припадає від 70 до 80% всіх втрат, які зазнали сторони конфлікту.

Ефективність вогню РВ і А досягається: своєчасним отриманням точних даних про місцезнаходження, розміри та характер цілі; правильним вибором засобів ураження; доцільним порядком виконання вогневого завдання та способом обстрілу цілі.

Важливим показником є точність виконання вогневих завдань. Тому в практиці бойового застосування РВ і А актуальними завданнями є:

- точний вимір параметрів руху, а саме пройденого шляху, швидкості і прискорення руху, а також поточної зміни кутового положення повздовжньої осі артилерійських систем (АС), засобів бойового управління та інструментальної артилерійської розвідки для розрахунку їх місцезнаходження на марші і при розгортанні артилерійських підрозділів на вогневій позиції (спостережному пункті) для скорочення часу топогеодезичної підготовки;

- точне визначення початкової швидкості вильоту снаряда для балістичної підготовки стрільби.

Всепогодним і цілодобовим інструментом комплексного системотехнічного вирішення цих завдань є радіолокаційні вимірювачі, що засновані на використанні доплерівського ефекту. При цьому чутливість вимірювачів суттєво залежить від частоти роботи приймально-передавальних модулів максимум якої досягається в міліметровому діапазоні частот.

У статті розглядається сучасна надвисокочастотна елементна база для створення уніфікованих радіолокаційних засобів забезпечення топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби артилерійських систем. Наведена структурна схема уніфікованого слідкуючого вимірювача на основі системи фазової автопідстройки частоти. Запропонована методика створення уніфікованого радіолокаційного вимірювача параметрів руху артилерійських систем і боєприпасів під час стрільби.

Ключові слова: уніфікований радіолокаційний вимірювач параметрів руху; фазова автопідстройка частоти; завадозахищеність; радіолокаційний комплекс розвідки вогневих позицій; безпілотний літальний апарат; фазова автоматична настройка частоти.

Постановка проблеми

Досвід бойових дій у ході російсько-Української війни переконливо свідчить, що в сучасних умовах успіх має той, хто своєчасно забезпечений інформацією про противника та цілефонову обстановку [1].

Озброєння та військова техніка (ОВТ) розвиваються з використанням набутого досвіду ведення бойових дій, вимог щодо високої маневреності підрозділів, автономності їх дій та дальнього вогневого ураження противника.

Враховуючи вищевказані обставини, а також порівняно високу ціну радіолокаційної апаратури,

яка встановлена на ОВТ, важливою науково-практичною проблемою є максимальна уніфікація технічних рішень щодо побудови вимірювачів, а саме: схемотехніки; елементної бази і матеріалів; методології випробувань; складу та характеристик, запасних частин і приладів; експлуатаційної документації.

Виробничо-технологічною основою вирішення такої проблеми є уніфікація: єдине схемотехнічне і конструкторське застосування твердотільних передавальних і приймальних пристроїв; єдине схемотехнічне й алгоритмічне виконання процесорної частини.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю розв'язання суперечностей – між точним виміром параметрів руху (пройденого шляху, швидкості і прискорення руху, поточної зміни кутового положення повздовжньої осі артилерійських систем) артилерійських (розвідувальних) систем у ході їх маневру і засобами бойового управління для розрахунку їх місцезнаходження на марші і при розгортанні артилерійських (розвідувальних) підрозділів на вогневій позиції (спостережному пункті, позиції) для скорочення часу топогеодезичної підготовки; точним визначенням початкової швидкості вильоту снаряда та врахуванням її під час стрільби.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [1–3] розглянуті та проаналізовані наукові і прикладні аспекти методології конструктивно-функціонального об'єднання для підвищення бойової ефективності артилерійської розвідки шляхом конструктивно-функціональної інтеграції повітряних та наземних засобів спостереження різних ділянок спектра електромагнітних хвиль (ЕМХ).

У роботі [4] розглянуто просторово-спектральні методи підвищення ефективності артилерійської розвідки. Однак за межами аналізу з'ясувались роботи з оптимізації побудови завадозахищеного зв'язку.

У роботах [5, 6] розглянуто питання пристроїв фазової автопідстройки частоти.

У роботах [7, 8] проведено дослідження питань щодо моделювання стежних траєкторних вимірювачів і багатопараметричної моделі пристрою стеження за частотою та інтерфейсом програми для її аналізу.

У роботах [9, 10] проведено дослідження траєкторних вимірювачів сантиметрового та міліметрового діапазонів і дослідження затухання Wi-Fi сигналів у частотному діапазоні 5 ГГц. Перспективним напрямком у розвитку систем зв'язку є використання частотних діапазонів вище 5 ГГц. При цьому стає можливим передавання великого обсягу даних корисного навантаження в режимі реального часу (наприклад, це можуть бути зображення з давачів випромінювання різних діапазонів довжин хвиль). Факторами, що різко обмежують радіус дії радіосистеми зв'язку при використанні цих діапазонів, є значна залежність умов поширення електромагнітних хвиль від погодних умов, необхідність прямої видимості і вплив багатоприменовості.

Не всі сучасні АС, засоби бойового управління та інструментальної артилерійської розвідки мають на борту автоматику, здатну перехопити управління у випадку втрати або порушення сигналу від оператора. Також слід зазначити й інший момент: при втраті зв'язку з оператором стає неможливим і передавання розвідувальної інформації [11–18].

Проведені дослідження спонукали авторів статті розглянути сучасну надвисокочастотну елементну базу для створення уніфікованих радіолокаційних засобів забезпечення топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби артилерійських систем.

Формування мети статті

Метою роботи є проведення аналізу сучасної елементної бази для створення уніфікованого радіолокаційного вимірювача параметрів руху артилерійських систем у ході їх маневру і боєприпасів під час стрільби.

Виклад основного матеріалу

Сучасний розвиток елементної бази надвисоко-частотного (НВЧ) діапазону надає розробникам широкий спектр уніфікованих інтегральних приймально-передавальних модулів. Одним із таких модулів є радар, який є важливим елементом засобів топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби. Сигнали, що випромінюються радаром, можуть бути імпульсними і безперервними. Радари CW (режим безперервної хвилі) використовують безперервний сигнал постійної частоти. Для підвищення завадозахищеності радіолокаційного вимірювача і його роздільної здатності за дальністю широко використовують широко-смугові сигнали з частотною модуляцією несінного колювання - FMCW. Таким чином, для точних вимірювань частіше використовують FMCW радари, у яких сигнал модулюється за частотою. Частотна модуляція в FMCW радарх зазвичай має лінійний характер (рис. 1).

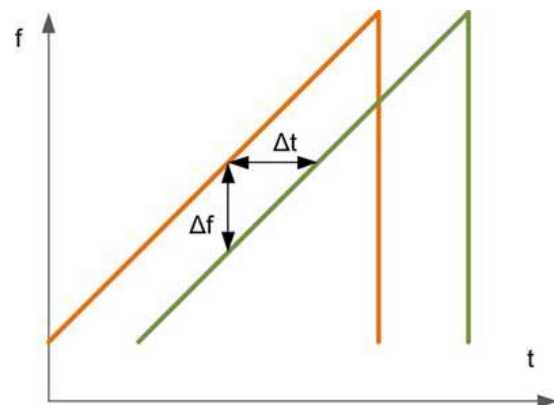


Рис. 1. Зміна лінійної частоти в FMCW радарх

Сигнал, відбитий від об'єкта і прийнятий приймачем, зміщений щодо вихідного сигналу як за часом, так і за частотою, що забезпечує підвищену точність вимірювання відстані.

Розглянемо пропозиції основних виробників інтегрованих радіолокаційних модулів.

Радари компанії Silicon Radar доцільно використовувати не тільки для виявлення і супроводу

снарядів. Вони також використовуються для визначення параметрів руху високочастотних об'єктів РВіА.

Для отримання високого ступеня відбиття необхідно використовувати високочастотні електромагнітні хвилі (десятки і сотні ГГц). Очевидно, що розробка високочастотних пристроїв є складним завданням. Тому компанія Silicon Radar пропонує готові рішення у вигляді інтегрованих радіолокаційних мікросхем, таких як, наприклад, TRX_120_001 і TRX_120_002.

Радари використовують властивість об'єктів відображати електромагнітні хвилі високої частоти. Принцип роботи радара досить простий. Спочатку передавач посилає в простір прямий високочастотний сигнал (десятки і сотні ГГц). Сигнал, відбиваючись від об'єкта, повертається назад на радар. Приймач, що входить до складу РЛС, фіксує відбитий сигнал. Швидкість руху визначається шляхом оцінки доплерівського зміщення частоти відбитого сигналу. Знаючи час розповсюдження прямого і відбитого сигналу, крім швидкості руху, можна визначити відстань до об'єкта.

У реальних додатках об'єкти мають складну форму і неоднорідну структуру, що неминує призводить до появи різних повторних відображень. В результаті приймач вловлює безліч відбитих сигналів, накладених один на одного, що, звичайно ж, ускладнює процес вимірювання (рис. 2).

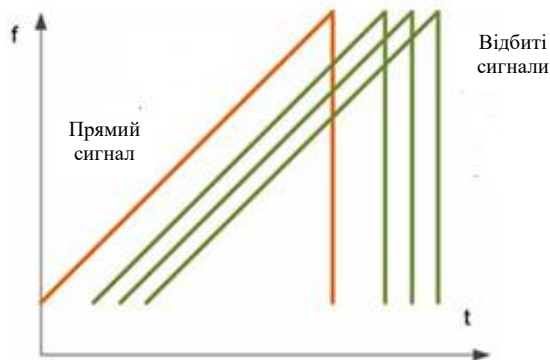


Рис. 2. Зондуючі і відбиті сигнали

Для обробки таких сигналів необхідний частотний аналіз, який зазвичай виконується за допомогою цифрових процесорів і методів DSP.

Таким чином, для створення радара необхідно вирішити ряд апаратно-програмних завдань. Найбільшою складністю в цьому випадку буде реалізація високочастотної схемотехніки і друкованої плати. Для цього будуть потрібні висококласні забудовники і значні грошові вкладення. Однак вже є рішення, які спрощують життя розробникам. Йдеться про готові інтегровані радіолокаційні чипи TRX_120_001 і TRX_120_002 від Silicon Radar (рис. 3).



Рис. 3. Зовнішній вигляд TRX_120_001 (зверху) і TRX_120_002 (знизу)

Ці мікросхеми містять найскладніші елементи схеми, включаючи приймач, передавач, генератор частоти і підсилювачі.

Мікросхеми TRX_120_001 і TRX_120_002 є інтегральними приймачами, виготовленими за кремній-германієвою технологією BiCMOS SG13S від компанії INP GmbH. Обидва приймачі мають робочу частоту 120 ГГц. Вони здатні працювати як в режимі CW, так і в режимі FMCW з шириною модуляції 7 ГГц. Як вже говорилося вище, TRX_120_001 і TRX_120_002 значно спрощують конструкцію, оскільки в них вже присутні самі високочастотні елементи схеми (рис. 4): малошумні підсилювачі (LNA), квадратурні змішувачі, поліфазні фільтри, VCO-генератор з управлінням напругою, дільник 1/32, приймально-передавальна антена. Сигнал, відбитий від об'єкта, проходить через буфер, посилюється за допомогою LNA і підсумовується аналоговим радіочастотним сигналом, що налаштовується за допомогою мікшера.

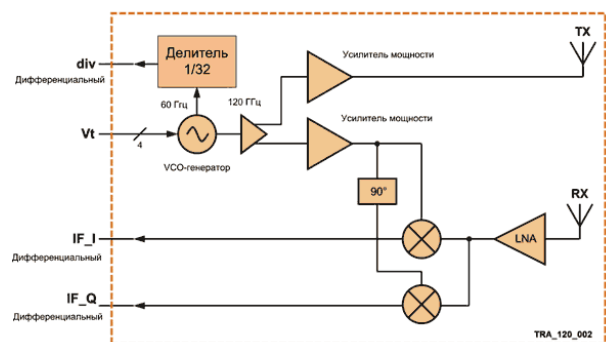


Рис. 4. Структурна схема мікросхеми TRX_120_001 і TRX_120_002

Аналоговий радіочастотний сигнал коригується за допомогою чотирьох аналогових входів. Аналогові входи, дільник і зовнішня схема PLL дозволяють чипам працювати в режимі FMCW. Якщо використовується сигнал фіксованої частоти, то чип працює в режимі CW. Типова схема включення

TRX_120_001 і TRX_120_002 наведена на рис. 5. На думку інженерів silicon Radar, практично всі радіочастотні сигнали залишаються прихованими всередині чипа приймача, і розробникам доведеться мати

справу з сигналами частотою не більше 2 ГГц, а отже, для РЛС можуть використовуватися друковані плати зі звичайного скловолокна FR4.

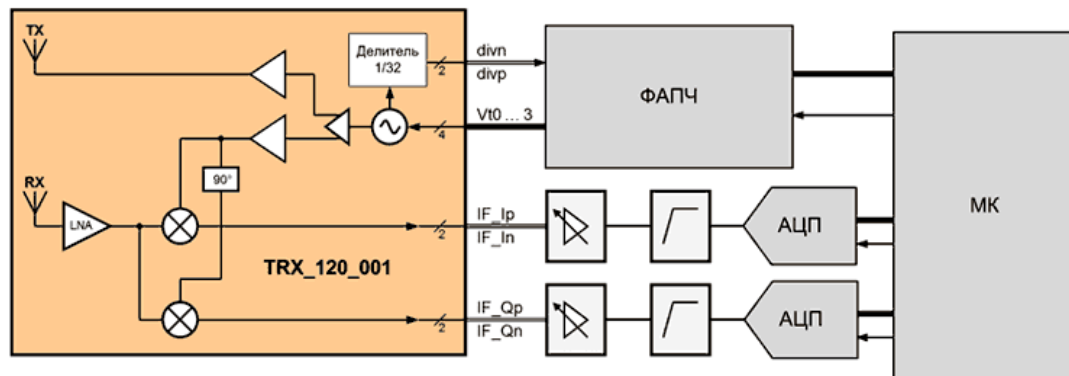


Рис. 5. Типова схема підключення мікросхеми TRX_120

Однією з особливостей цільових застосувань для чипів TRX_120_001 та TRX_120_002 в засобах топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби є те, що такі прилади повинні бути з автономним живленням. Очевидно, що такі особливості використання вимагають мінімального рівня споживання. У робочому режимі TRX_120_001 і TRX_120_002 чипи мають типове споживання близько 112 мА і 128 мА відповідно. Для зниження середнього струму і збільшення терміну служби акумулятора рекомендується використовувати імпульсний режим з перемиканням живлення чипів. Це цілком прийнятний варіант, оскільки час пробудження для TRX_120_001 і TRX_120_002 становить 10 ... 100 мкс. При цьому слід враховувати важливу особливість: забороняється подавати напругу на клеми мікросхем перед подачею живлення. Також варто зазначити, що струм споживання слабо залежить від температури (рис. 6).

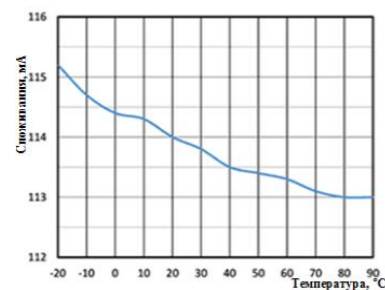


Рис. 6. Струм споживання мікросхеми TRX_120_001

Приймачі TRX_120_001 і TRX_120_002 орієнтовані на досягнення високої точності при вимірюванні відстаней і швидкості руху об'єктів. Тому радіус їх дії за замовчуванням становить «всього» 10 метрів, що цілком достатньо для вирішення задач топогеодезичної підготовки і не задовольняє вимогам балістичної підготовки. Діаграма спрямованості TRX_120_001 показана на рис. 7.

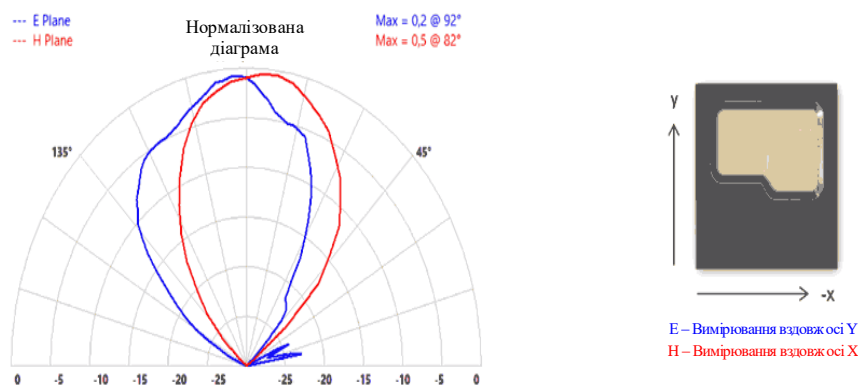


Рис. 7. Діаграма спрямованості TRX_120_001

Для рішення задач балістичної підготовки мікросхема вимагає встановлення додаткових лінз для

формування вузької діаграми спрямованості. При додаванні зовнішніх лінз дальність вимірювання швидкості

боєприпасів може бути збільшена до 100 м. При побудові датчиків також слід враховувати напрямок випромінювання радіолокаційних чипів.

На рис. 8 показані частотні характеристики приймача і передавача TRX_120_001.

Щоб швидко ознайомитися з особливостями використання приймально-передавальних пристроїв для створення експериментальних зразків радіолокаційних вимірювачів параметрів руху підсистем топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби, компанія Silicon Radar пропонує використовувати налагоджувальні набори: SiRad Easy Evaluation Kit і SiRad Simple Evaluation Kit. SiRad Easy Evaluation Kit містить наступний набір елементів: дві радарні плати 24 ГГц і 120 ГГц, материнську плату з Wi-Fi, об'єктив (для радару 120 ГГц) і плату Nucleo64 від ST Microelectronics (рис. 9).

Використання популярних плат Nucleo64 з мікроконтролерами STM32 має забезпечити легкий і

швидкий доступ до радіолокаційних чипів широкому колу розробників.

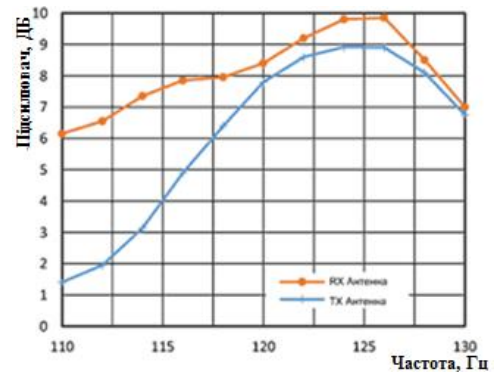


Рис. 8. Частотна характеристика TRX_120_001

Налагоджувальний набір передбачає не тільки дротовий зв'язок з ПК, але і обмін даними по Wi-Fi.

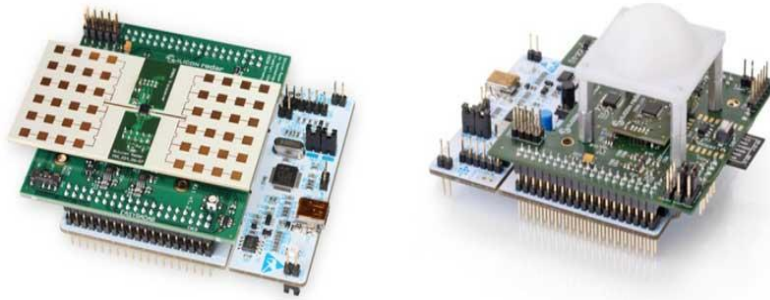


Рис. 9. Налагоджувальний набір SiRad Easy® Evaluation Kit постачається з двома типами радарів: 24 ГГц (ліворуч) і 122 ГГц (праворуч)

У нашому випадку, для створення засобів топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби пропонується застосовувати радари 120 ГГц. При цьому буде використовуватися конфігурація, наведена на рис. 10. Детальну інструкцію з установки плат і установки програмного забезпечення можна знайти в докладному керівництві користувача.

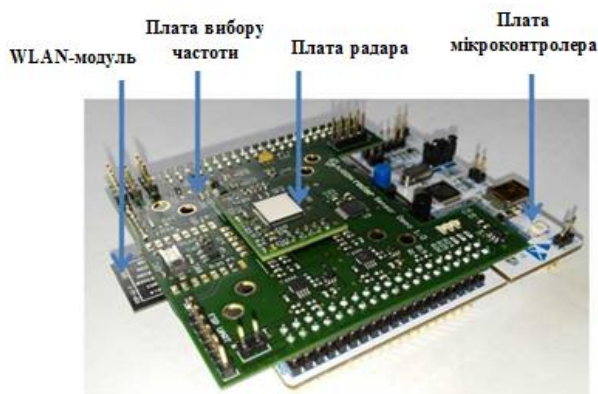


Рис. 10. Конфігурація налагоджувального набору SiRad Easy Evaluation Kit для радарів 122 ГГц

Якщо розробник орієнтується на контролер іншого типу, то для нього більше підійде набір SiRad Simple® Evaluation Kit, в який входять тільки радарна плата і об'єктив (рис. 11).



Рис. 11. Простий набір для оцінки можливостей SiRad

Для порівняння габаритів складових набору, що пропонується, на рис. 11 наведена монета 1 Євро.

Варто зазначити, що в комплекті з налагоджувальними наборами йде прикладне програмне забезпечення (ПЗ) з графічним інтерфейсом, що робить взаємодію з радаром максимально наочним і

простим. Це дає підставу для рекомендації цього набору при створенні уніфікованих радіолокаційних засобів топогеодезичної і балістичної підготовки стрільби.

Для вибору варіантів побудови радіолокаційних вимірювачів параметрів руху наземних об'єктів РВ і А та їх боеприпасів фірма забезпечує наступні характеристики уніфікованих радарів.

Характеристики мікросхеми радара TRX_120_001:
робоча частота: 120 ГГц;

діапазон регулювання частоти: 119.1... 125,9 ГГц;
режим роботи: FMCW / CW;
технологія виробництва: SG13S SiGe BiCMOS;
напруга живлення: 3.3V;
споживання: 112 мА (типовий);
діапазон робочих температур: -40... 85 °C;
корпус: QFN56 8 x 8 мм.

Інтегровані радары від компанії ANALOG DEVICES [14]. Мікросхема ADF5902 має функціональну блок-схему, що наведена на рис. 12.

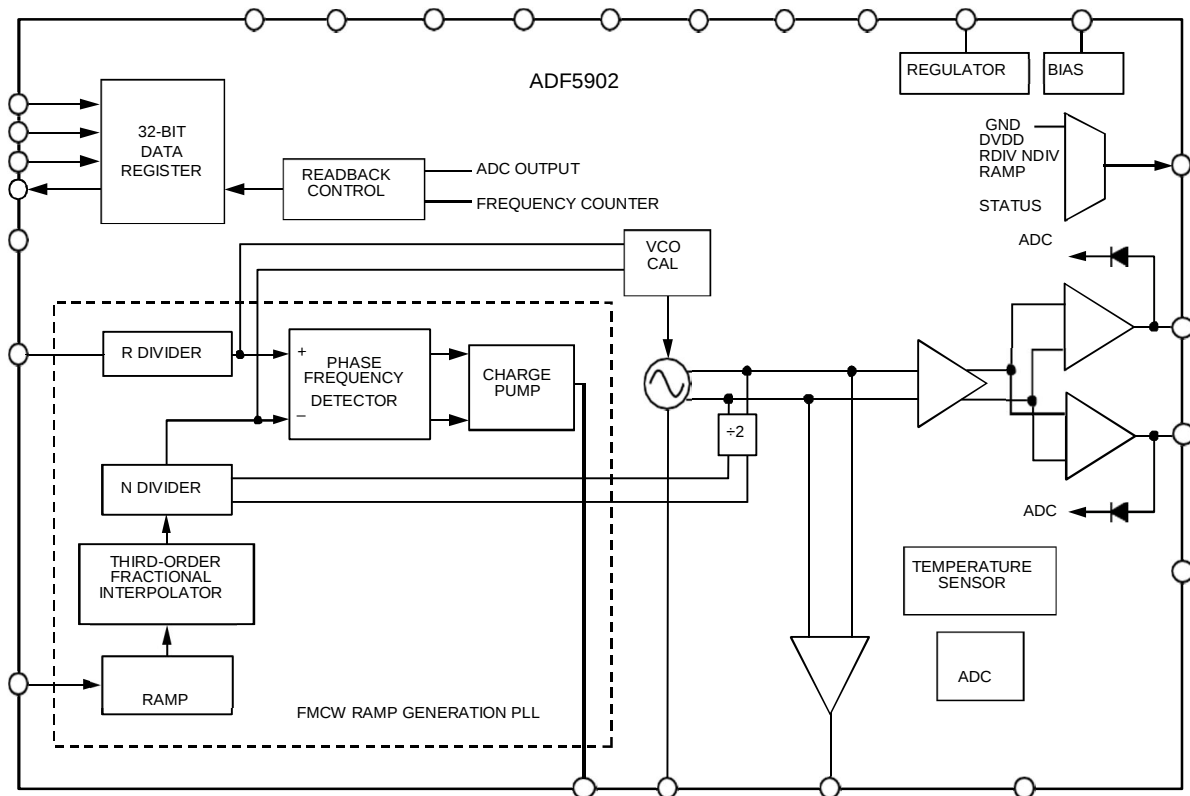


Рис. 12. Функціональна блок-схема ADF590

Багатоканальний радіолокаційний передавач FMCW діапазону 24 ГГц (ISM) має наступні особливості:
робоча частота – від 24 ГГц до 24,25 ГГц VCO (промисловий, науковий і медичний (ISM) радіодіапазон);

2-канальний підсилювач потужності 24 ГГц з вихідним сигналом 8 дБм. Несиметричні виходи;

2-канальні мультиплексовані виходи з функцією відключення звуку;

програмована вихідна потужність;

LO вихідний буфер;

радіочастотний діапазон: від 24 до 24,25 ГГц;

детектор керування потужністю;

допоміжний 8-розрядний АЦП;

високошвидкісна і низька швидкості FMCW;

25-бітний фіксований модуль дозволяє субгерцову частотну роздільну здатність частот PFD до 110 МГц;

нормований рівень фазового шуму – 222 дБн/Гц.

Програмовані струми накручування заряду;

датчик температури ± 5 °C;

4-провідний SPI;

ефективність ESD;

HBM: 2000 В;

CDM: 250 В.

Модуль ADF5902 рекомендований для застосування в наземних рухомих об'єктах і може використовуватися в радарх балістичної та топогеодезичної підготовки стрільби.

Загальний опис. ADF5902 – це монолітна мікрохвильова інтегральна схема (MMIC) передавача (Tx) із частотою 24 ГГц із вбудованим генератором з керуванням напругою (VCO) на 24 ГГц. VCO оснащений синтезатором дробової частоти N з можливістю генерації сигналу з програмованою сітковою матрицею (PGA) і двома каналами передавача для радіолокаційних систем. Вбудований у

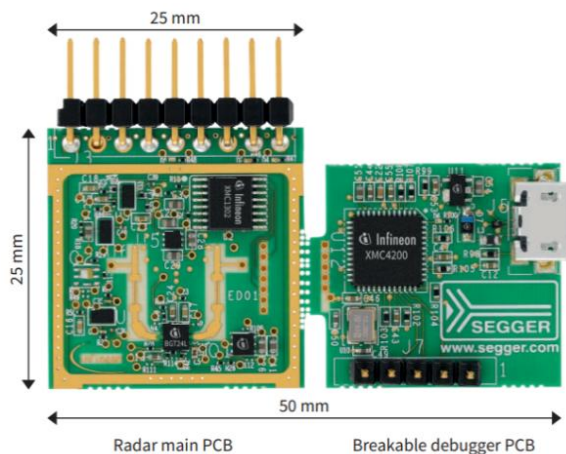


Рис. 14. Апаратна реалізація інтегрованого радіолокаційного модуля на основі BGT24LTR11N16

Подальша обробка радіолокаційних сигналів і оцінка параметрів руху високодинамічних об'єктів відбувається шляхом реалізації слідуючих вимірювачів, ключовим елементом системотехнічної реалізації яких для обох варіантів вимірювачів є система фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ), структура якої інваріантна до призначення вимірювача, а коефіцієнти передачі петльових фільтрів, що формують смуги захоплення й утримання вхідної частоти і еквівалентну шумову смугу, можуть реалізовуватись, в тому числі і програмним шляхом.

Особливості реалізації основних складових частин передавального та приймального пристроїв диктуються суперечливістю вимог до швидкості та завадостійкості передавання даних. Звуження смуги пропускання демодулятора дає можливість встановити і підтримувати зв'язок за значно меншого рівня відношення сигнал-завада на вході, тобто вимагає меншої потужності передавача. Але таке звуження призводить до зменшення швидкості передавання даних і звуження смуг захоплення та утримання частоти вхідного сигналу. Навпаки, розширення шумової смуги забезпечує вищу швидкість передавання і менший час перехідних процесів, але вимагає більшої потужності сигналу.

Ця суперечливість розв'язана шляхом структурної модифікації системи на основі ФАПЧ [17, 18]. Структурна схема системи ФАПЧ наведена на рис. 15.

З модифікованої системи ФАПЧ використовується квадратурний фільтр перед фазовим детектором, що редукує шумові зриви синхронізації, та коригувальний фільтр верхніх частот після фазового детектора, що відновлює динамічні властивості.

Модифікована система ФАПЧ стала основою для розробки вимірювачів параметрів руху високодинамічних наземних об'єктів [18].

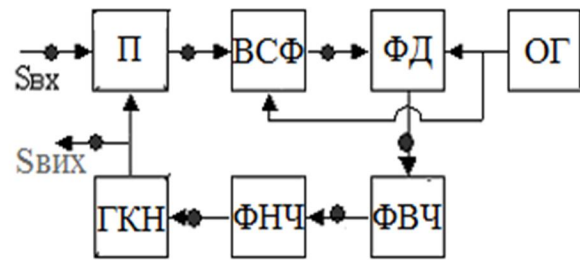


Рис. 15. Структурна схема ФАПЧ:

ВСФ – вузькосмуговий фільтр; ФНЧ – фільтр нижніх частот;
ФВЧ – активний фільтр верхніх частот;
ФД – фазовий детектор; ОГ – опорний генератор;
ГКН – генератор, керований напругою.

Шляхом подальших досліджень є створення експериментальних зразків вимірювачів параметрів руху високодинамічних об'єктів та їх польові випробування.

Висновок

Дослідження показало, що сучасна елементна база і відпрацьовані алгоритми обробки сигналів стежних пристроїв дозволяють створити уніфікований малогабаритний радіолокаційний вимірювач параметрів руху артилерійських систем під час їх маневру та їх боєприпасів під час стрільби для забезпечення прецизійних вимірювань протягом проведення заходів балістичної і топогеодезичної підготовки стрільби.

Список літератури

1. Кривошеев А. М., Приходько А. І., Петренко В. М. Основи артилерійської розвідки: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2014. 393 с.
2. Зубков А.М., Щерба А.А. Підвищення ефективності артилерійської розвідки шляхом конструктивно-функціональної інтеграції повітряних та наземних засобів спостереження. Журнал "Радіоелектроніка, автоматика, управління". Львів. 2014. № 2. С. 29–32.
3. Патент України на винахід № 112997 13/00, GOLS 13/28 (2006.01) МПК G-015: "Спосіб артилерійської розвідки і комплекс для його реалізації": заявл. 07.07.2014; опубл. 12.01.2016. Бюл. № 1. 3 с.
4. Зубков А.М., Каменцев С.Ю., Красник Я.В., Прокопенко В.В., Щерба А.А. Просторово-спектральні методи підвищення ефективності артилерійської розвідки. Військово-технічний збірник. Львів : НАСВ, 2023 № 28. С. 77–87.
5. Gorbatty I.V. Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, Vol. 48, Issue 1, pp. 47–55.

6. Патент України на винахід № 66435. H03L7/00 / Бондарев А.П., Мартинів М.С. "Пристрій фазової автопідстройки частоти". Заявка № 4869869 від 01.10.90; Опубл.: Бюл. № 5, 2004. 4 с.

7. Бондарев А.П., Бударецький Ю.І., Олійник М.Я. Дослідження та моделювання стежних траєкторних вимірювачів. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Національний університет "Львівська політехніка": Львів. 2021. № 1(1). С. 105–111. DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2021.01.10511>

8. Бондарев А.П., Бударецький Ю.І., Стрихалюк Б.М., Олійник М.Я. Багатопараметрична модель пристрою стеження за частотою та інтерфейс програми для її аналізу. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Національний університет "Львівська політехніка": Львів. 2021. № 1(2). С. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2021.02.114>

9. Бобало Ю.А., Бондарев А.П., Бударецький Ю.І., Стрихалюк Б.М., Олійник М.Я. Дослідження траєкторних вимірювачів сантиметрового та міліметрового діапазонів *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Національний університет "Львівська політехніка": Львів. 2023. № 3(2). С. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2023.02.150>

10. Ганін О.І., Ципоренко В.Г. Дослідження затування Wi-Fi сигналів у частотному діапазоні 5 ГГц. *Технічна інженерія*. Львів, 2023. № 1. С. 249–255.

11. Цимбалюк І.Р., Горбатий І.В. Підхід до обробки радіосигналів з амплітудною модуляцією багатьох компонентів за допомогою одновимірної згортової нейронної мережі *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*. 2023. № 9(126), ст. 14–22.

12. Хоменко Ж.М. Особливості систем зв'язку БПЛА. *Інформаційно-комп'ютерні технології* : зб. тез доп. наук.-практ. конф., Житомирська політехніка, Житомир 2021. С. 205.

13. Analog Devices / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF5902.pdf>

14. Infineon Technologies AG / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Infineon_Technologies

15. Silicon Radar: новые, сверхширокополосные / [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://efo.ru/storage/articles/SiR_UWB.pdf

16. Бондарев А.П., Мартинів М.С. Пристрій фазової автопідстройки частоти. Патент України на винахід № 66435, бюл. № 5, 2004.

17. Бобало Ю.А., Бондарев А.П., Бударецький Ю.І., Стрихалюк Б.М., Олійник М.Я. Порівняльний аналіз траєкторних вимірювачів сантиметрового та міліметрового діапазонів. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Національний університет "Львівська політехніка":

Львів. 2023. № 3(2). 2023. С. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2023.02.150>.

18. Bondarev A., Altunin S., Horbatiy I., Maksymiv I. Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, № 5/9 (95), pp. 17–25.

References

1. Kryvosheev A. M., Prykhodko A. I. and Petrenko V. M. (2014), "Osnovy artyleriys'koyi rozvidky" [Fundamentals of Artillery Reconnaissance]: Teaching. Manual, Sumy State University, Sumy, 393 p. [in Ukrainian].

2. Zubkov A.M. and Shcherba A.A. (2014), "Pidvyshchennya efektyvnosti artyleriys'koyi rozvidky povitryanykh ta nazemnykh zasobiv sposterezheniya" [Increasing shlyakhom konstruktivno-funktsional'noyi intehtatsiyi the effectiveness of artillery reconnaissance through structural and functional integration of air and ground surveillance equipment]. *Radio electronics, automation, control*. № 2. pp. 29–32. [in Ukrainian].

3. Patent of Ukrainian (2016), "Sposib artyleriys'koyi rozvidky i kompleks dlya yoho realizatsiyi" [The method of artillery reconnaissance and the complex for its implementation]. Patent 112997 Ukraine, IPC G–015 13/00, GOLS 13/28 (2006.01) : stated 07.07.2014; published 12.01.2016. Bulletin № 1, 3 p. [in Ukrainian].

4. Zubkov A.M., Kamentsev S.Yu., Krasnyk Y.V., Prokopenko V.V. and Shcherba A.A. (2023), "Prostorovo-spektral'ni metody pidvyshchennya efektyvnosti artyleriys'koyi rozvidky" [Spatial-spectral methods of improving the effectiveness of artillery reconnaissance]. *Military and technical collection*. Lviv: NASV. №. 28. pp. 77–87. [in Ukrainian].

5. Gorbatiy I.V. (2014), Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power. *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 48, Issue № 1. pp. 47–55.

6. Patent of Ukraine (2004), "Prystriy fazovoyi avtopidstroyky chastoty" [Device for phase auto-adjustment of frequency]. Patent 66435. H03L7/00 Ukraine : stated 01.10.1990; published 2004. Bulletin № 5, 4 p. [in Ukrainian].

7. Bondarev A.P., Budaretskyi Yu.I. and Oliinyk M.Ya. (2021), "Doslidzhennya ta modelyuvannya stezhnykh trayektornykh vymiryuvachiv" [Research and modeling of track trajectory meters]. *Information communication technologies and electronic engineering*. National University "Lviv Polytechnic". Issue № 1(1). pp. 105–111. [in Ukrainian].

DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2021.01.10511>

8. Bondarev A.P. Budaretskyi Yu.I. and Oliinyk M.Ya. (2021), "Bahatoparametrychna model' prystroyu stezhennya

za chastotoyu ta interfeys prohramy dlya yiyi analizu” [Multi-parameter model of frequency monitoring device and program interface for its analysis]. *Information communication technologies and electronic engineering*. National University "Lviv Polytechnic". Issue № 1(2). pp. 114–122. [in Ukrainian].

DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2021.02.114>

9. Bobalo Yu.A., Bondarev A.P., Buderetskyi Yu.I., Strykhalyuk B.M. and Oliynyk M.Ya. (2023), “Doslidzhennya trayektoriykh vymiryuvachiv santymetrovoho ta milimetrovoho diapazoniv” [Research of trajectory meters of centimeter and millimeter ranges]. *Information Communication Technologies and electronic engineering*. National University "Lviv Polytechnic". Issue № 3(2). pp. 150–157. [in Ukrainian].

DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2023.02.150>

10. Ganin O.I. and Tsyporenko V.G. (2023), “Doslidzhennya zatukhannya Wi-Fi syhnaliv u chastotnomu diapazoni 5 HHts” [Study of attenuation of Wi-Fi signals in the 5 GHz] frequency range. *Technical engineering magazine*. Lviv. Issue № 1. pp. 249–255. [in Ukrainian].

11. Tymbaliuk I.R. and Horbatiy I.V. (2023), “Pidkhd do obrobky radiosyhnaliv z amplitudnoyu modulyatsiyeu bahat’okh komponentiv za dopomohoyu odnovymirnoyi zhorkovoyi neyronnoyi merezhi” [Approach to processing radio signals with amplitude modulation of many components using one-dimensional convolutional neural network]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Issue № 9(126), pp. 14–22. [in Ukrainian].

12. Khomenko Zh.M. (2021), “Osoblyvosti system zv’yazku BPLA” [Peculiarities of UAV communication systems]. *Information and computer technologies: coll. theses add. science and practice conference*, Zhytomyr Polytechnic, Zhytomyr 2021. 205 p. [in Ukrainian].

13. Analog Devices / [Electronic resource] - Access mode: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF5902.pdf>

14. Infineon Technologies AG / [Electronic resource] - Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Infineon_Technologies

15. Silicon Radar: новые, сверхшарочикополосные / [Electronic resource] – Access mode: https://efo.ru/storage/articles/SiR_UWB.

16. Bondarev A.P. and Martynov M.S. *Device for phase automatic frequency tuning*. Patent of Ukraine for invention No. 66435, Bulletin No. 5, 2004. [in Ukrainian].

17. Bobalo Yu.Ya., Bondarev A.P., Buderetskyi Yu.I., Strykhalyuk B.M. and Oliynyk M.Ya. (2023), Comparative analysis of trajectory meters of centimeter and millimeter ranges. *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*. National University "Lviv Polytechnic". No. 3 (2). pp. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.23939/istee2023.02.15> [in Ukrainian].

18. Bondarev A., Altunin S., Horbatiy I. and Maksymiv I. (2018), Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 5/9 (95), pp. 17–25. [in Ukrainian].

METHODOLOGY FOR CREATING A UNIFIED RADAR MEASUREMENT DEVICE OF THE PARAMETERS OF THE MOTION OF ARTILLERY SYSTEMS AND AMMUNITION DURING FIRING

Artem Dzyuba, Yuriy Budaretskyi, Ivan Petlyuk

The material basis of the strike power of the ground forces of leading countries is made up of highly maneuverable fire objects (tactical and operational-tactical missile launchers, batteries, platoons, sections of towed and self-propelled guns, multiple launch rocket systems, mortars).

According to estimates, missile forces and artillery (MFA) in the confrontation with Russia account for 70 to 80% of all losses suffered by the parties to the conflict.

The effectiveness of the fire of the RV and A is achieved by: timely obtaining accurate data on the location, size and nature of the target; the correct choice of means of destruction; the appropriate order of execution of the fire task and the method of firing at the target.

An important indicator is the accuracy of fire tasks. Therefore, in the practice of combat use of RV and A, the relevant tasks are:

- accurate measurement of movement parameters, namely the distance traveled, speed and acceleration of movement, as well as the current change in the angular position of the longitudinal axis of artillery systems (AS),

combat control and instrumental artillery reconnaissance means to calculate their location on the march and when deploying artillery units to a firing position (observation point) to reduce the time for topographic and geodetic preparation;

- accurate determination of the initial velocity of the projectile for ballistic shooting training.

Radar meters based on the Doppler effect are an all-weather and round-the-clock tool for a comprehensive system-technical solution to these tasks. The sensitivity of the meters significantly depends on the operating frequency of the transceiver modules, the maximum of which is achieved in the millimeter frequency range.

The article considers a modern ultra-high-frequency element base for creating unified radar means for providing topographic and ballistic preparation of artillery systems' firing. The structural diagram of a unified tracking meter based on a phase-locked frequency system is presented. A methodology for creating a unified radar measuring device for the movement parameters of artillery systems and ammunition during firing is proposed.

Keywords: unified radar motion parameter meter; phased automatic frequency tuning; interference immunity; radar complex for reconnaissance of firing positions; unmanned aerial vehicle; phased automatic frequency tuning.