

УДК 621.396.96

Передавальний модуль радару прихованої зброї на тілі рухомої людини

Козачук М. А., Найденко В. І.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: firemax777@gmail.com, victor_naydenko@ukr.net

В статті приведено результати розробки передавальної частини радару для пошуку зброї на тілі людини. Розглянуто декілька варіантів антен Вівальді, які використовуються для передачі та прийому сигналів у радарній системі, яка здійснює повне поляриметричне вимірювання. В системі використовуються 4 антени – по дві для передачі та прийому сигналу з різними поляризаціями. Для забезпечення точного виявлення зброї, антени повинні мати рівномірну діаграму спрямованості і мінімальні бокові пелюстки. Антени Вівальді мають широкую смугу частот та високий рівень підсилення. Вони знижують крос-поляризацію та мають вузьку діаграму спрямованості. Розроблено кілька варіантів таких антен, які відповідають технічним вимогам для CWD (Concealed Weapon Detection) радару. Досліджені антени перекривають необхідний діапазон частот 0,5-5 ГГц. Також приведені результати вимірювань їх коефіцієнтів стоячої хвилі за напругою, діаграми спрямованості та коефіцієнтів підсилення. Розроблений генератор сигналів призначений для створення ультраширокопasmових (УШС, Ultra-Wideband (UWB)) імпульсів, які охоплюють діапазон частот від 0,5 до 3,75 ГГц по рівню -10 дБ їх спектра. Головним завданням генератора є створення моноімпульсних сигналів тривалістю 150 пс. Імпульси рознесені в часі таким чином, що їх час повторення значно перевищує тривалість самого імпульсу. З метою забезпечення стабільності і низького джиттеру, ці імпульси синхронізуються з приймачем. Структурно генератор складається з драйвера, схеми формування імпульсу та диференціатора. Драйвер генерує сигнал, початок якого пов'язаний з імпульсом запуску, що надходить від транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ, transistor-transistor logic (TTL)). Схема формування імпульсу використовує SRD (Step Recovery Diode) діод для створення гаусового імпульсу. Диференціатор формує остаточний моноцикл-імпульс. Описано переваги та обмеження різних систем пошуку зброї. Попередні результати аналізу показали, що розроблений передавальний модуль у складі готового радару має високу ефективність на відстанях до 2 м та може використовуватись для пошуку зброї на тілі людини в реальних умовах.

Ключові слова: генератор; антена Вівальді; УШС; радар; імпульс типу гауса; моноцикл; виявлення прихованої зброї

DOI: [10.20535/RADAR.2023.92.12-22](https://doi.org/10.20535/RADAR.2023.92.12-22)

Вступ

На сьогоднішній день безпека населення є однією з найважливіших задач кожної держави. Важливим елементом безпеки є запобігання тероризму в місцях великого скупчення людей, таких як аеропорти, вокзали, стадіони тощо. Тому існує великий інтерес до нових методів та пристроїв, які дозволяють виявляти приховану зброю на тілі людини [1].

Існуючі методи перевірки великого потоку пасажирів в аеропортах є недосконалими, оскільки після виявлення небезпеки прохідною рамкою або сканером всього тіла, слід додатково зробити ретельний ручний обшук або обшук за допомогою ручного металощукача [2–4]. Це потребує додаткового часу, а також є незручним як для пасажирів, так і для працівників пунктів перевірки.

Одним із способів вирішення цієї проблеми є радар для виявлення прихованої зброї на тілі рухомої людини [5–8]. Радар використовує ефект резонансу, який спостерігається у коливних системах, щоб виявляти та вимірювати властивості об'єктів. Такий радар дозволяє виявляти пістолети, ножі і гранати без спеціального огляду. Також можна виявляти мобільні телефони, планшети, ноутбуки та іншу електронну техніку. Найкраща чутливість такого радару є до металевих предметів, розміри яких від кількох сантиметрів до одного метра. Це залежить типу антени, її смуги частот, кількості антен і їх розташування по відношенню до людини, яка перевіряється.

1 Загальні принципи побудови систем виявлення загрози

На сьогодні найбільш поширеними системами виявлення зброї на тілі людини є сканер всього тіла, прохідний детектор або ручний металодетектор, і радар прихованої зброї CWD (Concealed Weapon Detection) [1].

Прохідний детектор формує низькочастотне магнітне поле (3-20 кГц) і аналізує вторинне магнітне поле, випромінене індукованими струмами в металевому об'єкті. Магнітне поле не чутливе до людського тіла або одягу, але система чутлива до металевих частин одягу (блискавки, застібки), а також до безпечних кишенькових речей (ключі, пряжки ременів, монети, мобільні телефони тощо). Ці предмети викликають помилкові тривоги, через що існує вимога до всіх пасажирів прибирати ці речі перед проходженням через детектор.

Цієї проблеми не існує з радаром CWD, оскільки його частотний діапазон і принцип виявлення налаштовані таким чином, щоб зробити радар нечутливим до об'єктів розміром менше 3 см, тоді як більші об'єкти ідентифікуються та класифікуються як небезпечні.

Сканери всього тіла використовують набагато вищу ділянку електромагнітного спектра – міліметрові хвилі. Принцип виявлення відрізняється від принципу виявлення металодетектором чи CWD радаром. Він заснований на реконструкції зображення поверхні тіла, де може бути прихований сторонній предмет. У системі є необхідність чіткої видимості об'єкта, а отже, вимога до того, щоб обстежувана людина стояла нерухомо, розставивши ноги і піднявши руки.

Також є знижена проникаюча здатність хвиль міліметрового діапазону, тому потрібно знімати верхній одяг. Існує також занепокоєння щодо конфіденційності, викликане зображеннями тіла людей. Жоден із цих обмежень не стосується радару CWD.

Окрім того, приймач CWD здатний вловлювати сигнали стільникового телефону або передачу даних по Bluetooth та Wi-Fi, тому можливо точно ідентифікувати активні мобільні пристрої. У випадку, коли ці пристрої вимкнуті, вони розпізнаються завдяки специфічній радіолокаційній сигнатурі/ехо-сигналу.

Таким чином, при порівнянні цих систем можна виділити такі загальні залежності:

1. На відміну від великих прохідних рамок, CWD є невеликим та легким, він може бути як портативним, так і стаціонарним.
2. CWD не формує зображення, а виявляє загрозу шляхом аналізу радіолокаційного відбиття від особи, яка перевіряється, як у часовій, так і у спектральній областях. Отже, така систе-

ма більше схожа на металодетектор, а ніж на сканер всього тіла.

3. На відміну від металодетекторів та сканерів всього тіла, CWD визначає наявність пристроїв з бездротовим зв'язком, через те, що обмін сигналами в них знаходиться в робочому діапазоні частот радару. Бездротові пристрої також можуть бути знайдені навіть у вимкненому стані, якщо в пам'яті радару записано спектр його ехо-сигналу.
4. На відміну від сканерів всього тіла та ручного обшуку, CWD не вимагає від людини, яка перевіряється, стояти на одному місці. Тут він схожий на прохідну рамку. Також не потрібна пряма видимість предмету для його знаходження.
5. Система CWD використовує принципи машинного навчання, тобто вона постійно вивчає своє середовище та адаптує обробку сигналів для оптимального виявлення загроз в цьому середовищі.

Зазначені вище переваги CWD радару роблять його актуальним для використання за призначенням.

2 Опис запропонованої системи

Даний радар розробляється для запобігання збройним атакам в громадських місцях проти цивільних осіб та органів безпеки. Його завдання — забезпечити непомітне виявлення зброї, прихованої на тілі рухомої людини, і цілодобове спостереження з автоматичним попередженням і активацією визначеної користувачем відповідної дії. Також необхідно забезпечити низьку вартість, щоб мати доступний, широко розгорнутий захист цивільного населення.

Принцип побудови радару засновано на випромінюванні радіочастотного імпульсу в широкому діапазоні частот (0,5–5 ГГц) і прийманні відбитого сигналу. Оскільки відбитий сигнал залежить від предмету, який формує відбиття, то будуть отримані сигнали з різними спектральними та часовими особливостями. Найвищий рівень відбитого сигналу буде спостерігатись від металевих предметів, під що підходять пістолети, рушниці, ножі, гранати тощо.

Оскільки різні об'єкти мають різне відбиття, то можлива їх ідентифікація. Таким чином, створюється спеціальна база даних, на основі якої система навчається відрізняти людей без зброї від людей з нею, до того ж ця зброя може бути різною. В результаті роботи системи, після обробки сигналів, майже в реальному часі ми отримуємо ймовірність загрози в просторі, що сканується радаром.

Система CWD має такі основні блоки: передавальні та приймальні антени, блок генерації ши-

рокосмугового сигналу, та блок обробки прийнятого сигналу, що видає сповіщення про ймовірність небезпеки (Рис. 1). Розглянемо кожний з блоків детальніше.

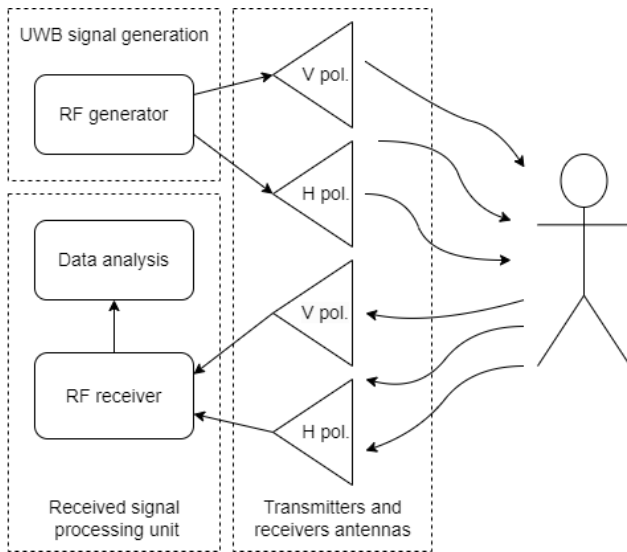


Рис. 1. Схема CWD радара

2.1 Антени CWD

Мінімально в CWD використовується 2 антени, по одній на передачу та прийом. В наведеній системі одночасно йде робота з двома поляризаціями, тому використовується 4 антени, дві для передачі сигналу та дві для прийому. Радар виконує повне поляриметричне вимірювання, де реєструються чотири типи сигналів: V-V, V-H, H-H і H-V. Тут перша буква позначає поляризацію переданої хвилі, що освітлює ціль (V – для вертикалі та H – для горизонталі), а друга літера позначає поляризацію прийнятої хвилі, розсіяної цілью. Таким чином, передаються та приймаються всі можливі комбінації поляризацій. Для такого випадку антена типу Вівальді підходить найбільше [9].

Для роботи CWD радара вибрано частотний діапазон 0,5–5 ГГц. Оскільки антена Вівальді добре узгоджена з фідером 50 Ом або 100 Ом в цій смузі частот, то її вибір дозволяє приймати найбільшу частину енергії імпульсів, які випромінюються. Окрім того, в цій смузі знаходяться домінуючі резонансні частоти стрілецької зброї, яку можна переносити на тілі. Кожен вид зброї має унікальний набір резонансних частот, і цей набір є важливою характеристи-

кою, за якою вона може бути розпізнана радарною системою [10].

Діаграма спрямованості антени повинна бути широкою і водночас мати мінімальні бокові пелюстки. Через те, що в системі використовується передача та прийом відбитого сигналу на різних поляризаціях, для більш точного виявлення зброї необхідно мати високий рівень розв'язки між поляризаціями.

Авторами досліджені різні типи антен, які можуть випромінювати та приймати ультра-короткі електромагнітні імпульси (100 пс) без спотворень. Такі короткі імпульси мають широкий спектр і дають більше інформації про об'єкт дослідження. Додатково вимогою до антени є значення коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) менше 2, що забезпечує низькі втрати і призводить до кращого співвідношення сигнал-шум. Низький рівень бокових пелюсток антени є необхідним для радіолокаційної системи взагалі, і для CWD також, зокрема для мінімізації ймовірності хибного виявлення по бічним пелюсткам.

Зосередимося на антенах Вівальді, які з деякими доопрацюваннями можуть задовольнити вказаним технічним вимогам. Збалансована антена Вівальді знижує рівень крос-поляризації завдяки структурі з трьома шарами міді, серед яких два зовнішні шари розташовані на двох зовнішніх сторонах діелектричних підкладок і центральний шар між двома діелектричними підкладками [11].

Антени Вівальді відрізняє широка смуга частот, простота конструкції, високий коефіцієнт підсилення та низький КСХН [12–17]. Даний тип антени часто використовується в радіолокації та радіозв'язку. Авторами створено та випробувано декілька таких антен [18]. Всі вони мають широкий частотний діапазон, який задовольняє необхідним вимогам, низькі значення КСХН, та вузьку діаграму спрямованості (Рис. 2).

Деякі виготовлені антени Вівальді мають як копланарні, так і антиподальні патчі, що дає певні переваги перед класичними антенами Вівальді [9]. Така конструкція, забезпечує більш низький рівень кросполяризації, оскільки симетричні структури мають більш високу перехресну ізоляцію поляризації. Даний факт є перевагою для CWD, що розробляється, оскільки дозволить підвищити чутливість системи.

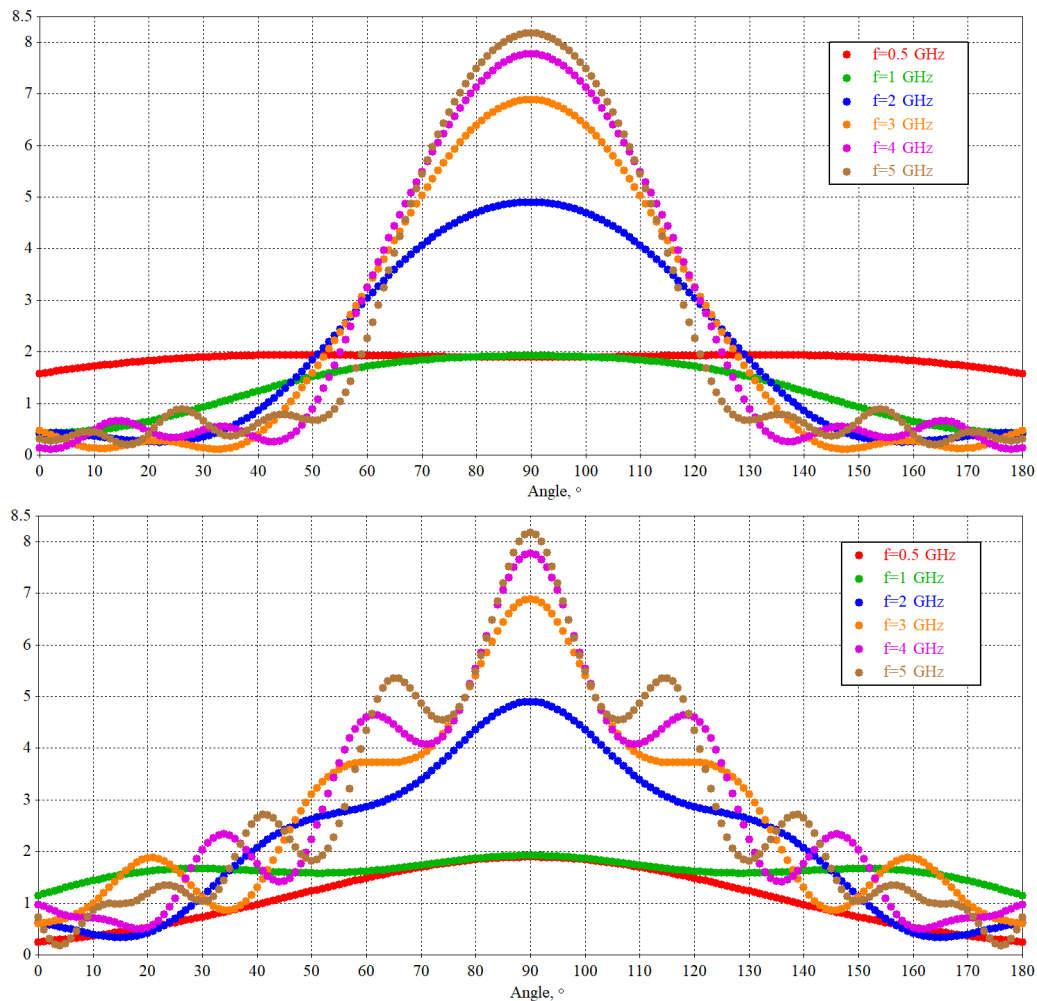


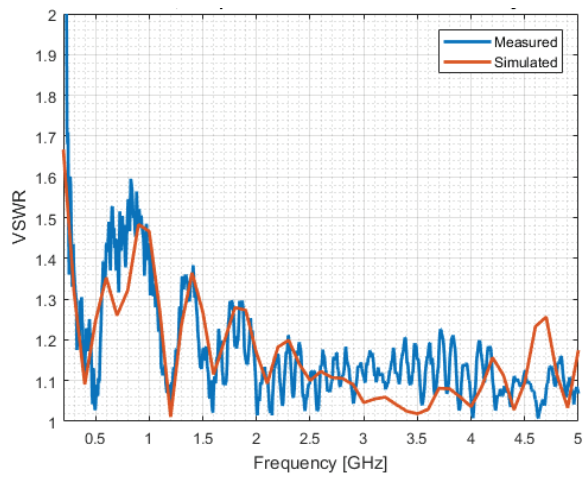
Рис. 2. Діаграми спрямованості в декартовій системі координат копланарно-антиподальної антени в Н-площині (вгорі) та Е-площині (внизу) на різних частотах

На Рис. 3 зображено антени, які були виготовлені для перевірки даного радара. Для всіх антен КСХН < 2 в діапазоні частот 0,5–5 ГГц. Перший варіант антени (Рис. 3а) має 50-Омний вхід, та може одразу підключатися до коаксіального кабелю. Другий та третій варіанти антени є симетричними (Рис. 3б, в), та мають вхідний опір 100 Ом. Для цих антен необхідно додатково використовувати плавний перехід (балун) з 100 Ом симетричної лінії в 50 Ом несиметричної, до якого буде під'єднуватися SMA роз'єм. Даний балун виконано за допомогою довгої лінії (Рис. 3в).

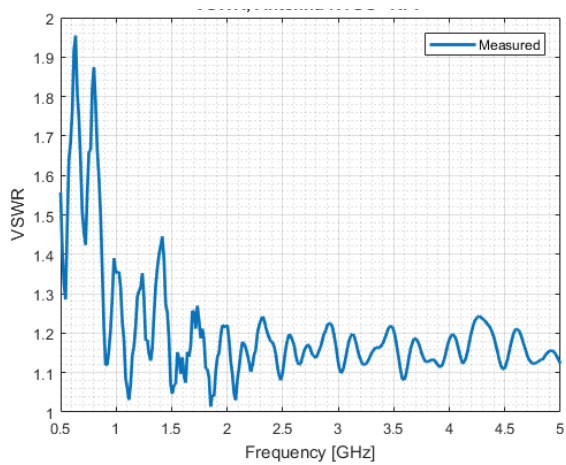
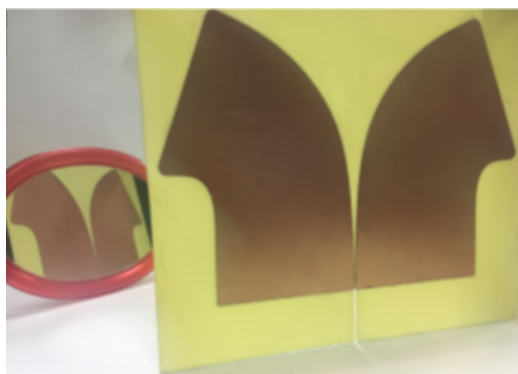
Всі антени мають більш широкую діаграму спрямованості (ДС) на самих низьких частотах. В Н-

площині розкриття досягає 180° по рівню -3 дБ від максимуму, і 130° в Е-площині. Починаючи з 1 ГГц ширина ДС звужується до $60\text{--}90^\circ$ в Е-площині, і до $50\text{--}120^\circ$ в Н-площині. Також всі ДС мають осьовий напрямок (за винятком 0,5 ГГц), де спостерігається невелике відхилення напрямку максимального підсилення від осі антени.

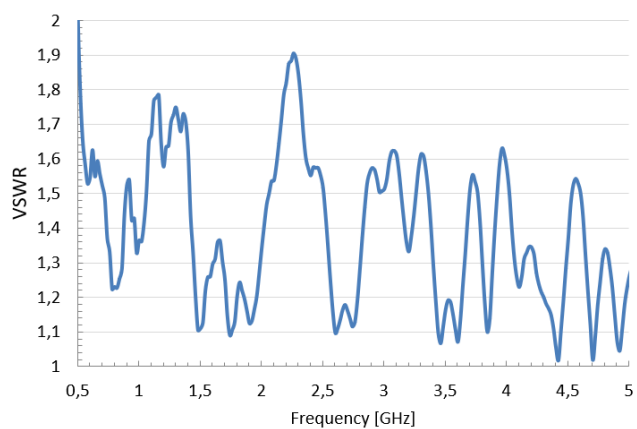
Перший зразок антени (Рис. 3а) має розміри 300×400 мм та робочий діапазон від 250 МГц. Друга та третя антени (Рис. 3б, в) мають розміри 210×300 мм, через що нижня робоча частота складає 500 МГц. Для третього варіанту конструкції антени (Рис. 3в) максимальне підсилення зростає з частотою від 2,5 до 8 дБі (Рис. 4).



(a)



(b)



(b)

Рис. 3. Приклади зовнішнього вигляду антен та їх КСХН

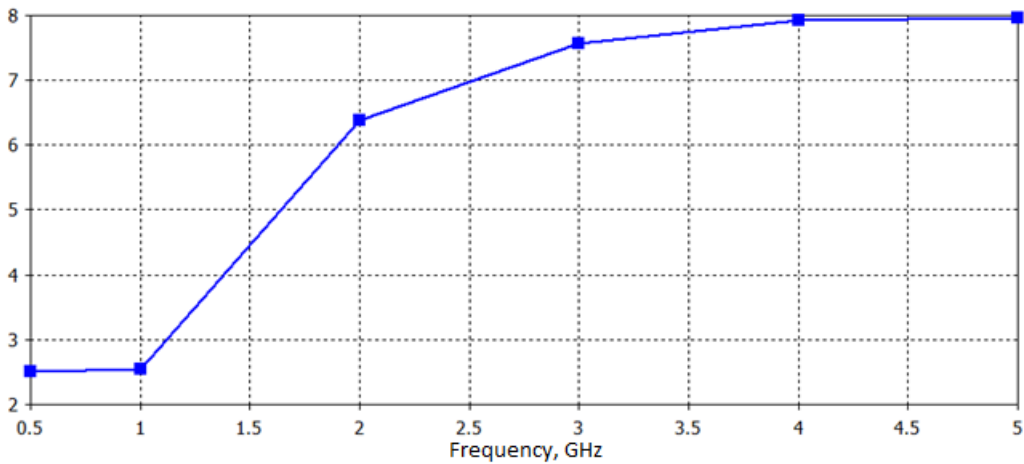


Рис. 4. Коефіцієнт підсилення антени з Рис. 3в

2.2 Генератор UWB сигналу

Генератор має генерувати UWB імпульси, які перекривають смугу 0,5–5 ГГц. Для цього необхідно отримати моноімпульсний сигнал тривалістю 150 пс, амплітуда якого впливає на дальність виявлення цілі, а самі імпульси рознесені між собою на значно більший час ніж тривалість самого імпульсу. Оскільки цей імпульс синхронізується з CWD приймачем, сигнал на виході генератора має бути стабільним та мати низький джиттер.

Для генерації короткого імпульсу необхідної тривалості використано генератор, що складається з трьох частин: драйвера, блоку формування гаусового імпульсу та блоку формування моноцикл-імпульсу (Рис. 5) [19]. Спочатку від TTL схеми (transistor–transistor logic) подається на вхід IN імпульс запуску, з якого драйвер формує сигнал необхідний для наступного блоку. В схемі створення гаусового імпульсу використовується SRD діод (step

recovery diode). В останньому блоці диференціатора формується остаточний моноцикл-імпульс.

Сигнал на виході драйвера (Рис. 6а) сформовано таким чином, що ширина вихідного імпульсу визначається елементами схеми. Це дозволяє зменшити джиттер та сформувати Гаусів і моноцикл-імпульси (Рис. 6б) з необхідною шириною спектра.

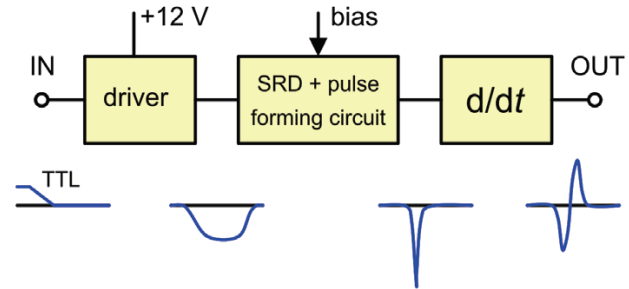
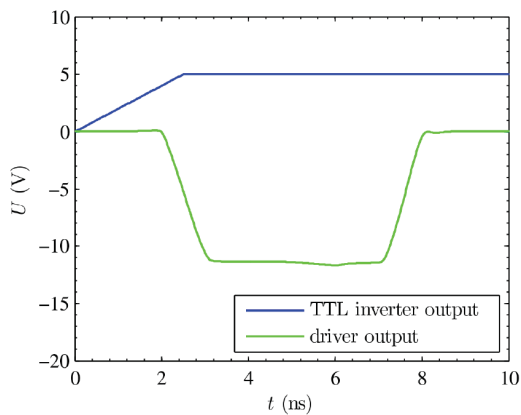
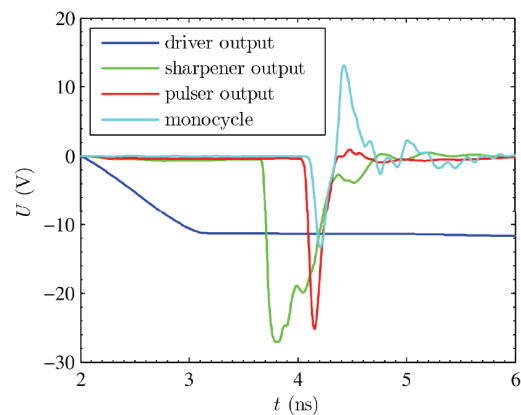


Рис. 5. Структурна схема генератора надшироко-смужових імпульсів [19]



(а)



(б)

Рис. 6. Симульовані сигнали на виходах різних блоків CWD радара [19]

Зовнішній вигляд генератора представлений на Рис. 7.

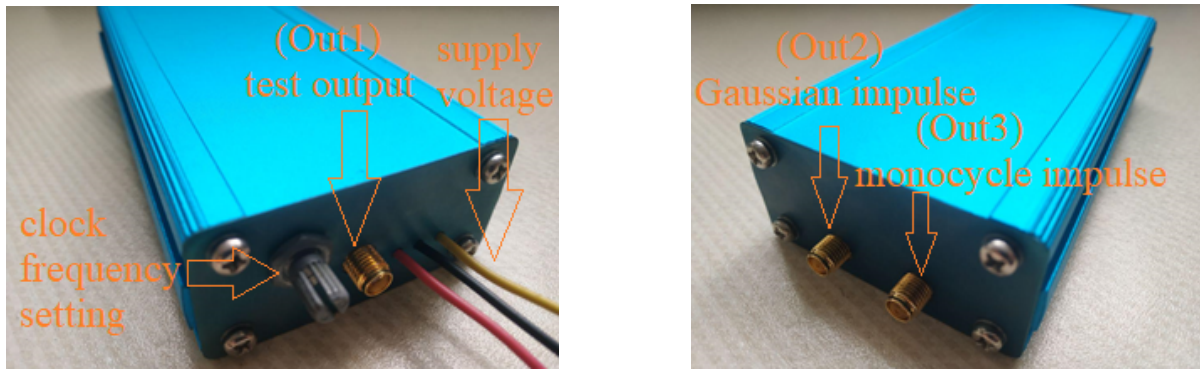


Рис. 7. Фото зовнішнього вигляду генератора

З TTL інвертора виходить сигнал, який задає тактову частоту повторення імпульсів генератора. На виході драйвера (Out1) формується сигнал амплітудою 12 В та тривалістю 5 нс. На виході схеми формування імпульсу (Out2) робиться загострення імпульсу за допомогою SRD діода, а зайва частина енергії гаситься на діодах Шоттки, в результаті чого формується гаусовий імпульс. На виході диференціатора (Out3) за допомогою довгих ліній формується моноцикл-імпульс.

При використанні у ролі збуджуючого імпульсу меандру з частотою 3,5 МГц і амплітудою 2,2 В отримано Гаусів і моноцикл-імпульс, форма і спектр яких зображені на Рис. 8 та Рис. 9. Дані імпульси були виміряні за допомогою чотирьохканального цифрового осцилографа Tektronix DPO 70804C зі смугою пропускання 8 ГГц та швидкістю дискретизації сигналу 25 Гс/с.

В результаті досліджень досягнуто імпульс Гауса з амплітудою 5 В і шириною імпульсу на половинному рівні 170 пс (Рис. 8а). При цьому моноцикл-імпульс на виході передавача має такі параметри:

- амплітуда позитивної частини імпульсу 2 В;
- амплітуда негативної частини імпульсу 2 В;
- ширина позитивної частини імпульсу на середньому рівні 135 пс;
- ширина негативної частини імпульсу на середньому рівні 120 пс;
- амплітуда джитера позитивної частини 0,45 В;
- амплітуда джитера негативної частини 0,3 В;
- частота повторення 3,5 МГц.

Як видно, спектр гаусового сигналу починається з самих низьких частот і поступово згасає на високих частотах (Рис. 9а). При цьому спектр моноцикл-імпульсу на рівні -10 дБ починається від 0,5 ГГц та доходить до 3,75 ГГц (Рис. 9б). Спектри зняті на аналізаторі спектра і сигналів Anritsu MS2830 з максимальною частотою вимірювання 13,5 ГГц. В моноцикл-імпульс передається менше енергії, чим

в гаусів імпульс, але максимальна частина енергії сконцентрована в необхідному частотному діапазоні.

За попередніми результатами аналізу, при отриманій потужності імпульсу CWD радар дає надійні результати про наявність або відсутність у людини зброї, моделі якої додані для виявлення, на відстані 0,5–2 м. Для роботи радара на більші відстані необхідно збільшувати амплітуду зондуючого імпульсу генератора.

3 Переваги та обмеження

Розроблений радар має певні переваги порівняно з іншими методами виявлення заборонених предметів, таких як зброя, вибухівки, забороненої електронної техніки, та може стати доповненням до вже існуючих систем. Передавальний модуль радара здійснює швидкі сканування, що дозволяє швидко виявляти наявність зброї або інших небезпечних предметів та приймати рішення щодо відповідних дій. Наприклад, якщо частота генерації імпульсів 10 МГц, то простір буде скануватися мільйони разів за секунду. Хвиля, яку випромінює радар, проходить через тканину та шкіру, тому може виявляти заборонений предмет, який прихований під одягом, в речах, або навіть в тілі людини, що може бути важко зробити іншими методами.

Зважаючи на ці особливості, радар може бути корисним для поліцейських, військових, охоронців та інших організацій, які займаються забезпеченням безпеки та протидією злочинності та тероризму. Також він може бути корисним для захисту важливих об'єктів, таких як аеропорти, порти, стадіони, транспортні мережі тощо. Він може встановлюватися як основна, так і додаткова система безпеки.

Слід враховувати, що радар має свої обмеження та може призводити до помилкових сповіщень. Зокрема:

- може бути важко відрізнити зброю від інших металевих предметів, які дуже схожі за формою, розмірами та структурою;

- можуть виникати проблеми з точністю вимірювання на великих відстанях та у складних умовах, таких як на вулиці з великою кількістю металевих предметів;
- зменшення точності детектування зброї при швидкозмінному навколишньому середовищі. Радару потрібен час, щоб адаптуватися до навколишнього середовища, в якому він розгортається;
- для встановлення прихованого радара необхідні фахово навчені спеціалісти. А металодетектори та прохідні рамки можуть бути придбані, встановлені та налаштовані самостійно;
- в різних країнах діють різні обмеження на максимальну вихідну потужність радіочастотного сигналу, через що відстань роботи радара може бути меншою за необхідну;
- радар може бути дорожчим та складнішим у використанні в порівнянні з іншими системами виявлення зброї, що може ускладнювати його застосування в певних умовах;
- радар може показувати помилкові результати, якщо він знаходиться поряд із джерелом електромагнітного випромінювання в робочому діапазоні частот передавача. У той час як металодетектори та прохідні рамки не залежать від зовнішніх електромагнітних впливів і можуть працювати у різних умовах;
- для збільшення точності виявлення нових небезпечних предметів в систему обробки сигналу необхідно додавати сигнатури цих предметів.

Отже, радар з можливістю виявлення прихованої зброї на тілі рухомої людини є одним з інструментів для забезпечення безпеки та протидії злочинності, який може мати свої переваги та обмеження. Розглянутий передавальний модуль є складовою частиною широкосмугового радара для виявлення зброї на тілі людини на основі резонансних характеристик зброї. Такі системи є корисними в місцях з великим скупченням людей, але необхідно враховувати їх обмеження, серед яких: обмежена точність виявлення та розпізнавання цілі; дальність

дії обмежена допустимою потужністю. Тому доцільно використовувати такі системи в комбінації із іншими технологіями, наприклад, з металодетекторами, щоб отримати підвищення достовірності виявлення потенційно небезпечних предметів на тілі людини.

Висновки

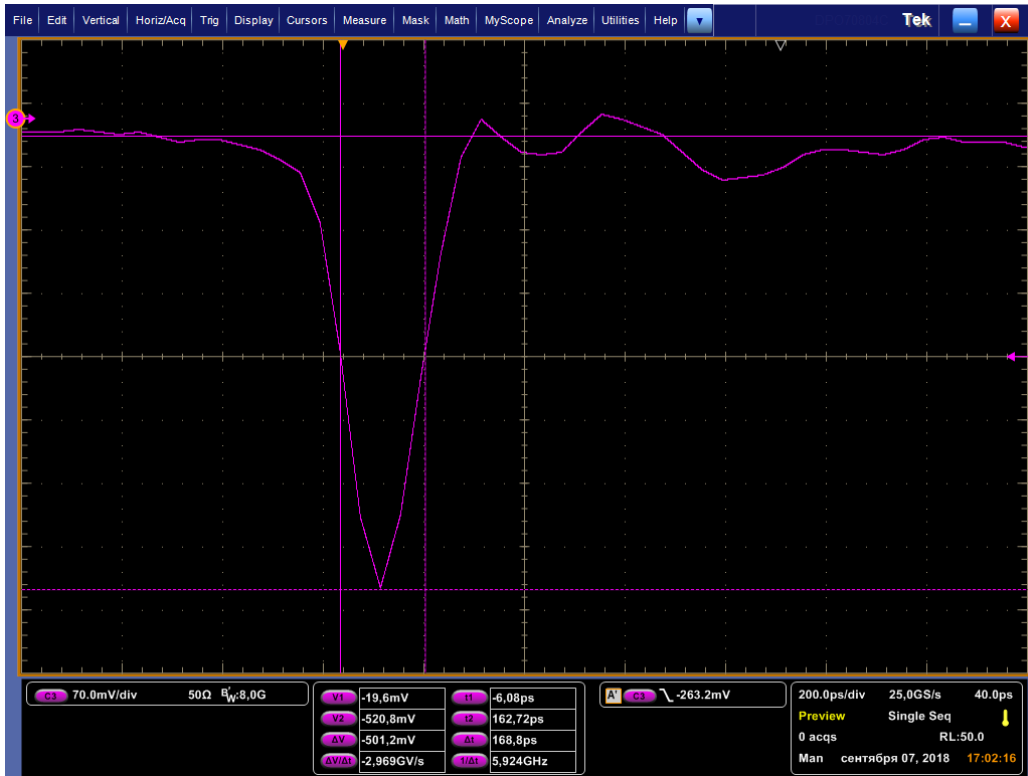
В роботі запропоновано, розроблено та експериментально перевірено генератор та антени до CWD радара, здатного виявляти заборонені приховані предмети на тілі рухомої людини.

З блоку генерації сигналу отримано Гаусів імпульс амплітудою 5 В та завширшки 170 пс, або моноцикл-імпульс амплітудами по 2 В та ширинами 120 і 135 пс. За попередніми результатами аналізу, з таким сигналом можна досягти виявлення небезпечних предметів на відстані до 2 м.

Виготовлені антени для передачі та прийому сигналу добре працюють в робочому діапазоні частот 0,5–5 ГГц та мають КСХН <2. Антени є спрямованими, але на різних частотах їх діаграма спрямованості є різною. Коефіцієнт підсилення антен починається від 2.5 дБі та з ростом частоти доходить до 8 дБі.

Радар CWD може використовуватись в точках входу або виходу з приміщення, наприклад біля дверей, в проходах, тунелях, також у великих кімнатах, вестибюлях, або на відкритому просторі. Проте, доцільно провести додаткові дослідження для поліпшення характеристик передавальної частини радара, зокрема, збільшення дальності детекції та зниження кількості помилкових сигналів. Одним із напрямків є розробка нової антени з більш однорідною діаграмою спрямованості у всьому робочому діапазоні частот. Інший напрямок, це зменшення джитеру в генераторі для точнішого виявлення небезпечних предметів, і зменшення тривалості випромінюючого імпульсу для підвищення робочої частоти та кращого аналізу предметів малих розмірів, підвищення амплітуди сигналу для забезпечення роботи радара на більшій відстані.

Дана робота виконувалась в рамках гранту НАТО G4992 «Long-range Stand-off Microwave Radar for Personnel Protection» за програмою НАТО «Наука заради миру та безпеки» (Science for Peace and Security, SPS).



(а)



(б)

Рис. 8. Гауссовий (а) і моноцикл (б) імпульси



(a)



(б)

Рис. 9. Спектри гаусового (а) і моноцикл (б) імпульсів

References

- [1] Harmer S.W., Cole S.E., Bowring N.J., Rezgui N.D., Andrews D. (2012). On Body Concealed Weapon Detection Using a Phased Antenna Array. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 124, pp. 187-210. doi:10.2528/PIER11112105.
- [2] Skorupski J., Uchroński P. (2017). A fuzzy model for evaluating metal detection equipment at airport

- security screening checkpoints. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Vol. 16, pp. 39–48. DOI:10.1016/j.ijcip.2016.11.001.
- [3] Nelson C., et al. (2015). Experimental Designs for Testing Metal Detectors at a Large Sports Stadium. *2015 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp. 1-7. DOI:10.1109/THS.2015.7225280.
- [4] Skorupski J., Uchroński P. (2016). A Human Being as a Part of the Security Control System at the Airport. *Procedia Engineering*, Vol. 134, pp. 291–300. DOI:10.1016/j.proeng.2016.01.010.
- [5] Hakan İşiker, İhrami Ünal, Mustafa Tekbaş, Caner Özdemir (2018). An auto-classification procedure for concealed weapon detection in millimeter-wave radiometric imaging systems. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 60, Iss. 3, pp. 583–594. DOI:10.1002/mop.31005.
- [6] Weixian Tan, et al. (2017). Three-Dimensional Microwave Imaging for Concealed Weapon Detection Using Range Stacking Technique. *International Journal of Antennas and Propagation*, Article ID 1480623. DOI:10.1155/2017/1480623.
- [7] Millot P., Casadebaig L. (2015). Ultra Wide X-Band Microwave Imaging of Concealed Weapons and Explosives Using 3D-SAR Technique. *International Journal of Antennas and Propagation*, Article ID 528103. DOI:10.1155/2015/528103.
- [8] Moulder W. F. et al. (2016). Development of a high-throughput microwave imaging system for concealed weapons detection. *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, pp. 1-6. DOI:10.1109/ARRAY.2016.7832573.
- [9] Naydenko V., Kozachuk M. (2020). Vivaldi Coplanar-Antipodal Antennas. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, pp. 121-125. DOI:10.1109/UkrMW49653.2020.9252807.
- [10] Harmer S. W., Andrews D. A., Rezgui N. D., Bowring N. J. (2010). Detection of handguns by their complex natural resonant frequencies. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, Vol. 4, Iss. 9, pp. 1182–1190. DOI:10.1049/iet-map.2009.0382.
- [11] Langley J.D.S., Hall P.S., Newham P. (1993). Novel ultrawide-bandwidth Vivaldi antenna with low crosspolarisation. *Electronics Letters*, Vol. 29, Iss. 23, pp. 2004-2005. DOI:10.1049/el:19931336.
- [12] Wang P., Zhang H., Wen G., and Sun Y. (2012). Design of Modified 6-18 GHz Balanced Antipodal Vivaldi Antenna. *Prog. Electromagn. Res. C*, Vol. 25, pp. 271–285. DOI:10.2528/PIERC11101202.
- [13] Moosazadeh M. and Kharkovsky S. (2015). Design of Ultra-Wideband Antipodal Vivaldi Antenna for Microwave Imaging Applications. *2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, pp. 1-4. DOI:10.1109/ICUWB.2015.7324435.
- [14] Han X., Juan L., Changjuan C. and Lin Y. (2012). UWB dual-polarized Vivaldi antenna with high gain. *2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICMMT.2012.6230177.
- [15] Wriedt T., Wolff K.-H., Arndt F., and Tücholtke U. (1989). Rigorous Hybrid Field Theoretic Design of Stepped Rectangular Waveguide Mode Converters Including the Horn Transitions into Half-Space. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 37, Iss. 6, pp. 780–790. DOI:10.1109/8.29365.
- [16] Ying Q. and Dou W. (2013). Simulation of two compact antipodal Vivaldi antennas with Radiation Characteristics enhancement. *International Symposium on Antennas and Propagation*.
- [17] Vasanelli C., Meti H., and Waldschmidt C. (2016). Investigation on a 77-GHz broadside Vivaldi antenna. *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5. DOI:10.1109/EuCAP.2016.7481148.
- [18] Naydenko V., Dovhal D., Kozachuk M., Nikolova N., and Shumakov D. (2019). Radiating Element Based on the Two-Wire Line with Horns. *Int. J. Eng. Sci. Invent. (IJESI)*, Vol. 8, Iss. 2, pp. 63–69.
- [19] Protiva P., Mrkvica J., Macháč J. (2008). Universal Generator of Ultra-Wideband Pulses. *Radioengineering*, Vol. 17, Iss.4, pp. 74–78.

Transmission Module of Radar of Hidden Weapon on Body of Moving Person

Kozachuk M. A., Naydenko V. I.

The results of the transmitter development for the radar are presented in this study. The main purpose of the radar is searching of concealed weapon hidden on the human body. Several designs of Vivaldi antennas used for transmitting and receiving signals in the radar system that performs full polarimetric measurements are considered. The system uses 4 antennas - two for transmitting and two for receiving signals with different polarizations. To ensure accurate weapon detection, the antennas must have a uniform radiation pattern and minimal side lobes. Vivaldi antennas have wide frequency bandwidth and high gain. They also feature reduced cross-polarization levels and have a narrow radiation pattern. Several designs of such antennas have been developed that meet the technical requirements for CWD (Concealed Weapon Detection) radar. The studied antennas cover the required frequency range of 0.5-5 GHz. The results of measurements of their VSWR coefficients, radiation patterns, and gain are also presented. The developed signal generator is designed to generate ultra-wideband (UWB) pulses covering the frequency range from 0.5 to 3.75 GHz at -10 dB level. The main task of the generator is to create monopulse signals with a duration of 150 ps. The pulses are time-delayed in such a way that their repetition time significantly exceeds the duration of the pulse itself. To ensure stability and low jitter, these pulses are synchronized with the receiver. The generator consists of a driver, a pulse generating circuit and a differentiator. The driver generates a signal whose onset is associated with the start of the pulse coming from TTL logic. The pulse generating circuit uses an SRD (Step Recovery Diode) diode to create a Gaussian pulse. A differentiator generates the final monocycle pulse. In addition, the advantages and limitations of various weapon detection systems are described. Preliminary results of the analysis showed that the developed transmitting module as part of the radar has high efficiency at distances up to 2 meters and can be used to detect weapons concealed on the human body in real conditions.

Keywords: generator; Vivaldi antenna; uwb; radar; Gaussian pulse; monocycle; concealed weapon detection