

УДК 621.396

канд. техн. наук Панченко І. В. ORCID: 0000-0001-5690-3813 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Бондаренко Д. М. ORCID: 0009-0001-7815-6027 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)  
канд. техн. наук, доцент Липський О. А. ORCID: 0009-0007-7355-4433 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)  
Стефанишин Я. І. ORCID: 0000-0002-8317-4131 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)  
Ушаков В. Д. ORCID: 0009-0009-0787-6607 (ФОП «Ушаков Віктор Дмитрович»)

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОЛІНІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ БПЛА

На поточний час захист від придушення радіоліній спеціального зв'язку засобами РЕБ складає серйозну проблему при тактичному використанні БПЛА.

Метою статті є викладення основних підходів до створення перспективних радіоліній спеціального зв'язку БПЛА, стійких до впливу засобів РЕБ, результатів розрахунку потенціалу макетного зразка інформаційної радіолінії БПЛА, а також результатів її натурних випробувань.

Наразі, до основних недоліків наявних радіоліній спеціального зв'язку БПЛА відносять недостатній рівень захисту від впливу засобів РЕБ, слабку захищеність від перехоплення управління та схильність до взаємних завад. Для послаблення цих недоліків, окрім реалізації заходів щодо криптозахисту інформації, обґрунтовано використання перспективного діапазону міліметрових хвиль електромагнітного спектра.

Наведено оцінку потенціалу радіолінії низькочастотного відтинку міліметрового діапазону із обґрунтуванням необхідних запасів (20 дБ). При розрахунках розглядалися антени наземного сегмента діаметром 300 мм та 600 мм, а у якості бортової антени – антена у вигляді відкритого фланця хвилевода з орієнтовною діаграмою спрямованості  $159^\circ \times 96^\circ$ .

Розглянуто функціональні схеми перспективних наземного та бортового сегментів радіолінії БПЛА, а також основні технічні характеристики макетного зразка інформаційної радіолінії (борт – земля) і результати його попередніх натурних випробувань (зокрема, досягнута відстань зв'язку склала 14 км).

Зроблено висновок, що запропоноване перенесення робочих частот радіоліній спеціального зв'язку БПЛА у міліметровий діапазон електромагнітного спектра дасть можливість оперативно змінювати їх робочі частоти, що може стати суттєвою тактичною перевагою в умовах масованого застосування засобів РЕБ.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати (БПЛА), радіолінії спеціального зв'язку БПЛА, засоби РЕБ для боротьби з БПЛА, міліметровий діапазон електромагнітного спектра.

### **I. Panchenko, D. Bondarenko, O. Lypskyi, Ya. Stefanyshyn, V. Ushakov. Increasing the security of UAV special communication radio lines**

Currently, protection against suppression of special communication radio lines by electronic warfare (EW) is a serious problem in the tactical use of UAVs.

The purpose of the article is to present the main approaches to creating promising UAV special communication radio lines resistant to the influence of electronic warfare (EW), the results of calculating the potential of a prototype UAV information radio line, as well as the results of its full-scale tests.

Currently, the main disadvantages of existing UAV special communication radio lines include an insufficient level of protection against the influence of electronic warfare (EW), weak protection against interception of control, and a tendency to mutual interference. To mitigate these disadvantages, in addition to implementing measures for cryptographic protection of information, the use of the promising millimeter wave range of the electromagnetic spectrum is justified.

An assessment of the potential of a radio line of the low-frequency section of the millimeter range is presented with a justification of the necessary reserves (20 dB). The calculations considered ground segment antennas with a diameter of 300 mm and 600 mm, and as an onboard antenna - an antenna in the form of an open waveguide flange with an approximate directivity pattern of  $159^\circ \times 96^\circ$ .

Functional diagrams of promising ground and onboard segments of the UAV radio line were considered, as well as the main technical characteristics of the prototype of the information radio line (board - ground) and the results of its preliminary field tests (in particular, the achieved communication distance was 14 km).

It was concluded that the proposed transfer of the operating frequencies of the UAV special communication radio lines to the millimeter range of the electromagnetic spectrum will make it possible to quickly change their operating frequencies, which can become a significant tactical advantage in conditions of massive use of electronic warfare equipment.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles (UAVs), UAV special communication radio lines, EW means for combating UAVs, millimeter range of the electromagnetic spectrum.

### **Постановка проблеми**

Безпілотні літальні апарати (БпЛА, дрони) будь-якого типу обладнані командно-телеметричною та інформаційною радіолініями спеціального зв'язку.

За допомогою командно-телеметричної радіолінії БпЛА забезпечується передавання команд управління на борт БпЛА та отримання сигналів зворотного зв'язку (які, зокрема, підтверджують виконання команд і сигналізують про роботоспроможність окремих вузлів та блоків). Обсяги інформації, які передаються цією радіолінією, – порівняно невеликі (швидкість передавання інформації не перевищує декількох сотень кбіт/с). Зазвичай, командно-телеметрична радіолінія складається із двох незалежних радіоліній земля – борт та борт – земля. У багатьох випадках радіолінія борт – земля відсутня, а зворотна інформація передається інформаційною радіолінією. Для уникнення несанкціонованого перехоплення управління БпЛА (spoofing) у командно-телеметричній радіолінії часто застосовується криптозахист інформації. Крім того, командно-телеметрична радіолінія, з цією самою метою, часто будується за технологією псевдовипадкового переналаштування робочої частоти (ППРЧ). При цьому смуга робочих частот розширюється (до декількох десятків МГц). Тим не менше, командно-телеметрична радіолінія, у загальному випадку, слабо захищена від впливу засобів РЕБ, внаслідок дії яких забезпечується її придушення (jamming) завадою, що генерується у смузі робочих частот. Зважаючи на те, що системи РЕБ забезпечують, переважно, нерівномірну щільність перекриття смуги робочих частот радіолінії сигналами завади, існує певна можливість неповного придушення функціонування радіолінії з ППРЧ. Однак цей факт не дає підстави говорити про повну захищеність цієї радіолінії від впливу засобів РЕБ.

Інформаційна радіолінія БпЛА призначена для передавання у реальному масштабі часу відеоінформації від бортової відеокамери чи інших високоінформаційних давачів. Швидкість передавання сигналу (наприклад, відеопотоку) сягає 10 Мбіт/с, тому запас потенціалу радіолінії реалізувати значно важче і, відповідно, забезпечення якісних показників передавання інформації становить певну проблему. Для усунення можливості перехоплення інформаційного потоку доцільно також застосовувати криптозахист інформації. Саме застосування криптозахисту може стати одним із чинників, що визначає певні тактичні переваги БпЛА. Разом із тим, інформаційна радіолінія загалом також не захищена від придушення засобами РЕБ.

Таким чином, захист від придушення радіоліній спеціального зв'язку БпЛА ворожими засобами РЕБ складає серйозну проблему. Причому придушення інформаційної радіолінії так званих FPV-дронів можна визнати більш дошкульним, бо, фактично, це означає фізичну втрату БпЛА (зважаючи на переважну відсутність у FPV-дронів іншої навігації, окрім візуального орієнтування оператора).

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Основні вимоги до частотних діапазонів, перспективних видів модуляції, швидкостей передавання інформації, методів боротьби з багатопроменевою розповсюдження радіохвиль, а також конструктивного виконання антенних пристроїв цифрових радіоліній спеціального зв'язку БпЛА наведені у роботі [1].

Загальні характеристики інформаційних радіоліній FPV-дронів із робочими частотами у діапазонах 2,4 ГГц та 5,8 ГГц розглянуто у роботі [2]. Зроблено висновок про перспективність використання у складі цих БпЛА аналогових радіоліній спеціального зв'язку діапазону 5,8 ГГц. Приклад реалізації радіоліній у діапазоні 900 МГц наведено у роботі [3].

Робота [4] присвячена розгляду особливостей побудови радіоліній зв'язку для БпЛА малого (до 30 км) та середнього і великого радіусу дії (до та більше 100 км). Наголошено на перспективності використання частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, а також більш

високочастотних (зокрема, діапазон міліметрових хвиль). Серед факторів, які обмежують використання високочастотних діапазонів електромагнітного спектра, названа сильна залежність умов розповсюдження радіохвиль від погодних умов, необхідність забезпечення прямої видимості між передавачем та приймачем, а також багатопроменевість розповсюдження радіохвиль. Наголошено, що висота підйому наземної антени слабо впливає на дальність зв'язку з БпЛА, тому на практиці висота наземної щогли вибирається з міркувань зниження впливу багатопроменевості, яка виникає у результаті наявності завад на шляху поширення сигналу (рельєф місцевості, будівлі, дерева, лісопосадки тощо).

У роботах [5; 6] наведено типові основні тактико-технічні характеристики засобів РЕБ противника, аналіз яких дозволяє зробити висновок про обмеженість їх робочого частотного діапазону приблизно на рівні 20 ГГц.

Нормативно-правовим документом [7] регламентується розподіл смуг радіочастот між радіослужбами в Україні та визначаються смуги радіочастот для спеціального та загального користування.

У роботі [8] наведено відомості про принципи розрахунку радіоліній зв'язку з БпЛА за двома методиками (класичною – для вільного простору, та експериментально вивіреною – згідно з рекомендаціями, викладеними у документі [9]). Сформульовано рекомендації щодо підвищення запасу потенціалу радіоліній спеціального зв'язку з БпЛА.

Фізичні розміри параболічних антен, у загальному випадку, розраховуються відповідно до загальновідомої залежності, яка, наприклад, наведена у роботі [10]. Розрахунки з такими самими результатами також можна виконати за допомогою online-калькулятора, розміщеного за посиланням [11].

Технічні характеристики бортового передавача діапазону 5,8 ГГц АКК Race Ranger FPV VTX, відомості щодо діаграми спрямованості антени у вигляді відкритого фланця хвилеводу та технічні характеристики дисплея FPV 7" Readytosky 800×480 DVR Diversity 5,8 GHz, які використано як складові для макетування перспективної інформаційної радіолінії БпЛА, розміщено на вебресурсах [12–14] відповідно.

Незважаючи на те, що більшість загальнодоступних джерел як захист БпЛА від впливу засобів РЕБ пропонують використання ППРЧ, видається, що ця технологія, забезпечуючи стійкість радіолінії до перехоплення інформації (РЕР), не гарантує стовідсотковий її захист від негативного впливу засобів придушення (РЕБ).

**Метою** цієї статті є викладення основних підходів до створення перспективних радіоліній спеціального зв'язку БпЛА, стійких до впливу засобів РЕБ, результатів розрахунку потенціалу макетного зразка інформаційної радіолінії БпЛА, а також результатів її випробувань.

#### **Викладення основного матеріалу**

**Основні вимоги до побудови радіоліній спеціального зв'язку БпЛА.** Типовим підходом до побудови радіоліній спеціального зв'язку БпЛА є технологія цифрової передачі інформації. Це дає можливість забезпечити високу якість передавання інформації шляхом корекції спотворень та помилок, які виникли при розповсюдженні сигналу уздовж траси. Зокрема, у роботі [1] пропонується для цього використовувати модуляцію виду OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням сигналів) або C-OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням сигналів та кодуванням). Видається, що модуляція C-OFDM, яка дає можливість забезпечити корегування помилок, що виникли при розповсюдженні сигналу уздовж траси, у багатьох випадках при створенні радіолінії для БпЛА (наприклад, на протяжних трасах) є більш перспективною. Ці види модуляції забезпечують зниження символної швидкості передавання інформації завдяки розділенню інформації на декілька менш швидкісних потоків та передаванню кожного з них на своїй частоті-субносії, ортогональній до інших частот-субносій.

Крім того, пропонується використання типового методу боротьби з багатопроменевістю розповсюдження радіохвиль – технології МІМО (зокрема, найпростішої схеми з двохантенною передачею інформації з борту БПЛА на одну наземну антену), що дозволяє вирішити проблему забезпечення надійного зв'язку при маневрах дрона у просторі.

На сьогодні робочий частотний діапазон розглянутих радіоліній спеціального зв'язку БПЛА, у переважній більшості випадків, не перевищує 5,825 ГГц. Це дає можливість використовувати однотипні всеспрямовані бортові антени, а різноманітність конструктивного виконання наземних антен звести до двох типів: всеспрямовані – для зв'язку на невеликих відстанях і вузькоспрямовані – для зв'язку з віддаленими БПЛА. Як один із варіантів спрощеної реалізації наземної вузькоспрямованої антени пропонується використання направлених секторіальних антен (зазвичай, у кількості 6 одиниць), які перемикаються, створюючи псевдокругову діаграму спрямованості. Видається, що у якості бортової антени може бути використана також patch (мікросмужкова) антена. Крім того, наземна вузькоспрямована антена може бути виконана також у вигляді більш складної активної або пасивної фазованої антенної решітки.

На думку авторів, реалізація бортової чи наземної секторіальної антенної системи, незважаючи на її певну громіздкість є достатньо перспективною ідеєю, бо дає можливість позбутися енерговитратних механічних пристроїв повороту антени.

Загалом, можна сказати, що цифрові радіолінії спеціального зв'язку БПЛА мають переваги перед аналоговими, зважаючи на можливості забезпечення:

- значно кращої якості передавання інформації (завдяки використанню спеціального кодування інформації, яке дозволяє проводити автоматичну корекцію прийнятого сигналу для усунення похибок, що виникли при розповсюдженні сигналу уздовж траси);

- криптозахисту інформації (підвищує стійкість до несанкціонованого перехоплення);

- часткового захисту від впливу штучно створених (засобами РЕБ) чи природних завад (завдяки автоматичному переходу на інші робочі частоти, або використанню технології ППРЧ у межах певного робочого діапазону частот);

- передавання додаткової інформації;

- менших габаритно-масових показників (завдяки більшій пристосованості до мініатюризації).

Таким чином, при створенні радіоліній спеціального зв'язку БПЛА в умовах мирного часу для загального використання альтернативу цифровим лініям знайти важко.

Якщо мова йде про БПЛА спеціального використання (особливо FPV-дрони), то переваги цифрових радіоліній зв'язку не такі однозначні. Як не дивно, позитивні властивості цифрових радіоліній (наявність сигналу визначеної якості, або його відсутність взагалі при значних спотвореннях чи помилках) тут відіграють негативну роль. Ситуація з повною відсутністю сигналу на виході приймального пристрою радіолінії при управлінні FPV-дроном видається у багатьох випадках вкрай небажаною, бо може призвести до втрати управління, що, зазвичай, означає фізичну втрату БПЛА.

Натомість, в аналогових радіолініях спеціального зв'язку БПЛА при наявності завад суттєво втрачається якість сигналу (значно знижується його контрастність та інтенсивність), але зображення певний час не зникає повністю і це дає змогу досвідченому оператору, у багатьох випадках, вчасно оцінити ситуацію, не втратити геопросторову орієнтацію і, тим самим, попередити фізичну втрату FPV-дрона. Тобто, у ситуації впливу засобів РЕБ в аналогових радіолініях спеціального зв'язку БПЛА важливу роль відіграє кваліфікація оператора (людський фактор). Як бачимо, незважаючи на те, що, зазвичай, у людино-машинних системах людський фактор намагаються всіляко зменшити, для конкретного

випадку керування FPV-дроном саме людський фактор суттєво підвищує живучість всієї людино-машинної системи.

Що відноситься до частотних діапазонів радіоліній спеціального зв'язку БпЛА, то, загалом, у переважній більшості наразі використовують 3 діапазони частот: 900 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц. При цьому, діапазон 900 МГц в основному використовується для командно-телеметричних, діапазон 5,8 ГГц – інформаційних радіоліній, а у діапазоні 2,4 ГГц можуть працювати як командно-телеметричні, так й інформаційні радіолінії.

Кожний із вищезначених діапазонів частот має свої особливості. Наприклад, у роботі [2] розглянуто загальні характеристики інформаційних радіоліній FPV-дронів з робочими частотами у діапазонах 2,4 ГГц та 5,8 ГГц (представлено у таблиці 1) і сформульовано висновки щодо доцільності переважного використання при створенні FPV-дронів аналогових радіоліній спеціального зв'язку діапазону 5,8 ГГц.

Таблиця 1

Характеристики радіоліній FPV-дронів із різними робочими частотами

| Діапазон, ГГц | Характеристики радіолінії |                               | Характеристики інформації |                      | Інтенсивність використання |
|---------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------|
|               | завантаженість            | спосіб передавання інформації | якість                    | затримка передавання |                            |
| 2,4           | Висока                    | Аналогова                     | Низька                    | -                    | Невелика                   |
|               |                           | Цифрова (Wi-Fi)               | Середня                   | Велика               | Середня                    |
| 5,8           | Середня                   | Аналогова                     | Висока                    | -                    | Велика                     |
|               |                           | Цифрова (Wi-Fi)               |                           | Прийнятна            | Середня                    |

Як вже наголошувалося, більш низькочастотний частотний діапазон 900 МГц також широко використовується. Наприклад, командна радіолінія БпЛА «Ланцет» частотного діапазону 900 МГц працює саме у цьому робочому діапазоні (зокрема, 868–870 МГц та 902–928 МГц [3]).

**Основні недоліки радіоліній БпЛА.** Наразі бойове застосування БпЛА, особливо, FPV-дронів, виявило їх суттєві недоліки, які обумовлені недоліками радіоліній:

- 1) недостатній рівень захисту від впливу засобів РЕБ;
- 2) слабка захищеність від несанкціонованого перехоплення управління внаслідок ідентичності обладнання, яке використовується ворогом, та переважної відсутності криптозахисту командної інформації;
- 3) схильність до взаємних завад при використанні декількох БпЛА внаслідок обмеженості кількості робочих частот.

Зважаючи на це, широке застосування ворожих купольних (окопних) засобів РЕБ створило умови для суттєвого зниження ефективності використання БпЛА за цільовим призначенням.

**Підходи до зменшення впливу засобів РЕБ на БпЛА.** Одним із класичних методів часткового зменшення впливу засобів РЕБ на ефективність використання БпЛА, як вже наголошувалося, є застосування криптозахисту інформації, що циркулює радіолініями спеціального зв'язку. При цьому такий захід може покращити ситуацію з несанкціонованим перехопленням управління, але не усунути можливість придушення сигналу засобами РЕБ.

Більш кардинальним методом боротьби з негативним впливом засобів РЕБ (який тим не менше не відкидає криптозахист інформації) видається перенесення робочих частот засобів спеціального зв'язку БпЛА у більш високочастотні діапазони електромагнітного спектра, як рекомендовано в [4]. На думку авторів, у конкретному випадку протистояння на лінії зіткнення, це могло б забезпечити (протягом певного часу) усунення вищезначених недоліків ліній спеціального зв'язку БпЛА, а також дало б можливість оперативно реагувати на зміну ситуації щодо появи нових засобів РЕБ (шляхом переходу на інші робочі частоти)

і, тим самим, отримати суттєву тактичну короткострокову та й у багатьох випадках довгострокову переваги.

**Вибір робочого діапазону частот радіолінії.** Для вибору робочої частоти радіоліній спеціальної інформації БпЛА доцільно врахувати наступні фактори:

максимальні робочі частоти засобів РЕБ противника, які потенційно можуть бути використані для боротьби з БпЛА;

рекомендації Міжнародного комітету з радіочастот (МКРЧ) щодо вибору робочих частот для забезпечення рухомого зв'язку (частоти, на використання яких потенційно можна буде отримати дозвіл в установленому порядку).

Аналіз відкритих джерел інформації свідчить, що наразі діапазон робочих частот ворожих засобів РЕБ не перевищує 20 ГГц. Наприклад, у [5] повідомляється про робочі частоти станції РЕБ РФ «Свет-КУ», які лежать у діапазоні від 25 МГц до 18 ГГц. У [6] наведено згадку про відсутність у противника засобів РЕБ із робочими частотами у міліметровому (ММ) діапазоні електромагнітних хвиль (30–300 ГГц). Таким чином, видається, що, зважаючи на значно меншу інтенсивність використання діапазону ММ хвиль, саме перенесення спектра робочих частот у цей діапазон дасть можливість упродовж певного часу отримати на лінії зіткнення тактичні переваги.

Особливістю ММ-діапазону електромагнітного спектра є те, що він освоєний значно менше, а, відповідно, елементна база цього діапазону – менш розповсюджена, ціна її значно вища, ніж елементної бази сантиметрового діапазону і, крім того, вона суттєво зростає пропорційно підвищенню частоти.

Що відноситься до дотримання вимог МКРЧ, на думку авторів, неухвалене відношення до вибору частот, яке, зазвичай широким загалом мотивується воєнним станом, може призвести до невиправданих втрат часу на створення нероботоспроможного засобу зв'язку (при випадковому потраплянні на робочі діапазони інших радіоелектронних засобів) та у подальшому до втрати для цього засобу комерційної перспективи при спробі його постачання на світовий ринок (після настання мирного часу).

Аналіз [7] дає можливість зробити висновок про наявність широкої номенклатури смуг радіочастот, на які загальним користувачам в установленому порядку, потенційно, можна отримати дозвіл на використання (присвоєння номіналів радіочастот) для рухомої служби (служба радіозв'язку між рухомою і сухопутною станціями або між рухомими станціями). Не завжди ці частоти передбачають спеціальне використання, але, видається, що це не може бути причиною відмови, особливо в умовах воєнного стану.

**Оцінка потенціалу радіолінії ММ-діапазону.** Орієнтовний розрахунок потенціалу аналогової інформаційної радіолінії (борт – земля) проведемо для довільно вибраної частоти ММ-діапазону, наприклад,  $F = 30$  ГГц і інтервалів зв'язку  $R = 10$  км та  $R = 30$  км у припущенні, що потужність бортового передавача складає  $P_{Tx} = 30$  дБм (1 Вт), коефіцієнт підсилення бортової всеспрямованої антени  $G_{Tx} = 5$  дБі, коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{Rx} = 36$  дБі, температура шуму наземного приймального пристрою  $T_{NRx} = 2,5$  дБ ( $\approx 250$  К), смуга його робочих частот –  $B_{Rx} = 10$  МГц та необхідне відношення сигнал/шум на виході приймача –  $SNR_{Rx} = 10$  дБ.

Загальне затухання сигналу  $L$ , при розповсюдженні його у вільному просторі уздовж траси, розраховуємо за загальновідомою формулою, наведеною, наприклад, в [4].

У результаті розрахунку визначаємо, що величина затухання сигналу при розповсюдженні його у вільному просторі уздовж вибраної траси протяжністю  $R = 10$  км складає  $L_{10\text{км}} = -142$  дБ, а для траси протяжністю  $R = 30$  км –  $L_{10\text{км}} = -152$  дБ.

При цьому чутливість приймального пристрою, розрахована для вищезначених вихідних даних за формулою, яка, зокрема, також наведена у цій роботі, становить:

$$P_{s\min} = -95,0 \text{ дБм.}$$

Сигнал на вході приймального пристрою  $P_{Rx}$  визначимо за формулою:

$$P_{Rx} = L + P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx},$$

де  $P_{Rx}$  – потужність сигналу на виході приймального пристрою, дБм;

$L$  – затухання на трасі, дБ;

$P_{Tx}$  – потужність передавача, дБм;

$G_{Tx}$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени, дБі;

$G_{Rx}$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБі.

Підставивши числові величини складових у вищенаведену формулу, отримаємо реальний рівень сигналу на вході приймального пристрою для траси  $R = 10$  км  $P_{Rx(10 \text{ км})} = -71$  дБм, а для траси  $R = 30$  км  $P_{Rx(30 \text{ км})} = -81$  дБм.

Різниця між реальним рівнем сигналу на вході приймача та його чутливістю (запас потенціалу радіолінії)  $P_{Rx} - P_{s \min}$  складає 24,0 дБм (для  $R = 10$  км) та 14 дБм (для  $R = 30$  км).

На перший погляд такий запас можна вважати завеликим для  $R = 10$  км та прийнятним для  $R = 30$  км. Разом з тим, у роботі [8] наведено відомості про принципи розрахунку радіоліній за двома методиками. Зокрема, розрахунки, які базуються на класичних залежностях для вільного простору (як і було розраховано вище), та розрахунки, які рекомендовано використовувати при організації радіозв'язку у повітряних службах (згідно з рекомендаціями Міжнародного Союзу електрозв'язку [9]), тобто у нашому випадку, для БПЛА. Вищезначені рекомендації базуються на експериментально вивірній моделі розповсюдження радіохвиль в атмосфері, але вони наведені для максимальної частоти 15 500 МГц (рис. 1). Тому величину затухання сигналу на трасі для вибраної нами частоти ММ-діапазону можна спрогнозувати тільки приблизно.

Аналіз графіку свідчить про наявність для авіаційних систем суттєвої відмінності між втратами сигналу, розрахованими для вільного простору, та визначеними за експериментально вивірною моделлю. Зокрема, ці втрати суттєво залежать від відстані між антенами та висотами їх підняття. Наприклад, для частоти 15,5 ГГц на відстані 400 км при висоті підняття антен 1000 м додаткові втрати сигналу сягають величини 90–100 дБ. Компенсація таких втрат – завдання, загалом, проблематичне, що свідчить про суттєву обмеженість інтервалів зв'язку радіоліній ММ-діапазону. На відстанях до 100 км для 95 % часу ці додаткові втрати становлять більш прийнятну величину (орієнтовно 15–20 дБ), яка може бути достатньо легко компенсована. Таким чином, оснащення FPV-дронів (на відстані передавання інформації не більше 20–30 км) радіолініями ММ-діапазону можливе.

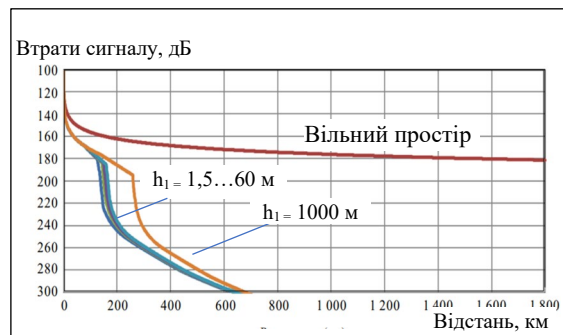


Рис. 1. Залежність основних втрат сигналу частоти 15 500 МГц для 95 % часу та висоти  $h_2 = 1000$  м ( $h_1$  – висота як наземної антени так і БПЛА,  $h_2$  – висота БПЛА)

На думку авторів, попередньо для вибраної частоти  $F = 30$  ГГц та відстані  $R = 10$  км запас потенціалу радіолінії доцільно також встановити не менше 20 дБ. Тобто, розрахованого запасу потенціалу (24 дБ) для забезпечення гарантованої роботи радіолінії спеціального зв'язку БпЛА цілком достатньо.

На жаль, цього не можна сказати про потенціал траси  $R = 30$  км. Для досягнення запасу потенціалу більше 20 дБ (зокрема 24 дБ, як і для  $R = 10$  км), тут доцільно підвищити на 3 дБ потужність випромінювання передавача (до  $P_{Rx} = 2$  Вт) та збільшити на 7 дБ коефіцієнт підсилення приймальної антени (до  $G_{Rx} = 43$  дБі). Незважаючи на певне збільшення енергоспоживання бортового передавача, такий шлях у багатьох випадках може виявитися прийнятним.

Для визначення можливості практичної реалізації приймальної антени розрахованої радіолінії діаметр її рефлектора  $D_{Rx}$  визначимо з використанням загальновідомої залежності, наведеної, наприклад, в [10]:

$$G = (0,4 \dots 0,6) \times 4\pi \times S/\lambda^2,$$

де  $G$  – коефіцієнт підсилення параболічної антени, одиниць;

$S$  – геометрична площа рефлектора параболічної антени,  $m^2$ ;

$\lambda$  – довжина робочої хвилі антени,  $m$ .

Розрахована величина діаметру рефлектора параболічної антени (при орієнтовно вибраному коефіцієнті у формулі близько 0,5) складає  $D_{Rx} \approx 0,3$  м (для  $R = 10$  км) та  $D_{Rx} \approx 0,6$  м (для  $R = 30$  км). Такі самі результати можна отримати у результаті машинного розрахунку, наприклад, згідно з програмою, наведеною на вебресурсі [11]. Загалом, визначені розміри рефлекторів антен цілком прийнятні, зважаючи на невелику парусність та масу, що цілком допускає комфортну експлуатацію наземного приймального пристрою.

Альтернативним (або взагалі доповнювальним) рішенням до цих пропозицій можна вважати використання повітряного ретранслятора. Встановлення на борт БпЛА антени з діаметром рефлектора  $D_{Rx} \approx 0,3$  м взагалі великих труднощів не складе. При цьому, видасться, що із тактичних міркувань (необхідність забезпечення надійного маскування наземного сегмента) доцільно використовувати повітряний ретранслятор штатно. Це дасть можливість зробити габарити наземного приймального пристрою достатньо малими, що спростить проблему його надійного маскування.

**Побудова приймально-передавальних пристроїв радіоліній БпЛА.** Як вже згадувалося, практично масове виробництво БпЛА обумовило ситуацію, за якої на світовому ринку широко представлені комплектувальні вироби високого ступеню інтеграції для побудови радіоліній спеціального зв'язку БпЛА, уже згаданих частотних діапазонів 900 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, які, крім того, мають достатньо демократичні ціни.

Таким чином, для скорочення термінів та зменшення трудовитрат, при побудові перспективних радіоліній ММ-діапазону доцільно використовувати наявні штатні складові сантиметрового діапазону. Тобто найоптимальнішим варіантом запропонованого доопрацювання є включення до складу штатного передавального пристрою БпЛА передавача ММ-діапазону (Up-конвертор із підсилювачем потужності вихідного сигналу та антеною), а до складу штатного приймального пристрою – приймача ММ-діапазону (антени, малощумливого підсилювача та Down-конвертора). При цьому, бортові антени передавачів та приймачів ММ-діапазону, очевидно, повинні бути всеспрямовані, а наземні – вузькоспрямовані.

Разом із тим, це не відноситься до бортового ретранслятора, зважаючи на необхідність підтримання потенціалу радіолінії. Тому на борту ретранслятора необхідно буде розмішувати як всеспрямовані, так і вузькоспрямовані антени.

**Структурна схема радіолінії спеціального зв'язку БпЛА.** У загальному випадку структурна схема побудови передавального та приймального пристроїв як інформаційної, так і командно-телеметричної радіолінії спеціального зв'язку БпЛА однакова. Тільки, зазвичай командно-телеметрична радіолінія побудована за принципом часового дуплексу, а інформаційна радіолінія – завжди односпрямована (або, у окремих випадках, симплексна).

Для прикладу на рисунку 2 представлена структурна схема бортового передавача інформаційної радіолінії спеціального зв'язку БпЛА.



Рис. 2. Структурна схема бортового аналогового передавального пристрою інформаційної радіолінії БпЛА

У наведеній схемі як штатний передавач відеосигналу, до антенного виходу якого підключено передавач ММ-діапазону, використано передавач відеосигналу АКК Race Ranger FPV VTX [12], який функціонує у діапазоні  $(5,8 \pm 0,15)$  ГГц із регульованою потужністю випромінювання від 200 мВт до 1,6 Вт. При цьому, для узгодження зі створюваним передавачем ММ-діапазону потужність передавача необхідно зменшити до мінімальної та додатково встановити атенюатор відповідного номіналу. До складу Ур-конвертора включається фільтр дзеркального каналу, який забезпечує виділення необхідної бокової смуги змішувача, а також, за необхідності, вихідний фільтр (на виході підсилювача потужності), який формує смугу робочих частот у ММ-діапазоні.

Як всеспрямована (більш конкретно, слабоспрямована) антена у ММ-діапазоні, загалом, може бути використано, наприклад, антена у вигляді відкритого фланця хвильоводу. Як показано в [13], для відкритих фланців хвильоводів стандартних розмірів ширина діаграми спрямованості на рівні 3 дБ складає  $159^\circ$  у площині вузької стінки та близько  $96^\circ$  у площині широкої стінки. До недоліків такої антени відноситься погане узгодження хвильовода (хвильовий опір 480–590 Ом) із вільним простором (хвильовий опір 377 Ом), наслідком чого коефіцієнт стоячої хвилі сягає 1,6–1,9 (що для антен, загалом, можна вважати прийнятним). Зауважимо, що із тактичних міркувань при розташуванні антени у вигляді відкритого фланця хвильовода на борту БпЛА, зважаючи на різницю у формі діаграми спрямованості, доцільно відкритий фланець хвильоводу розташовувати широкою стінкою вертикально до землі.

Загальновідомо, що для боротьби з нестійкою роботою радіолінії в умовах перевідбиття сигналу від завад часто використовується метод передавання сигналу одночасно двома каналами з різною поляризацією. Для цього до антенного виходу підключається подільник потужності на 3 дБ, виходи якого з'єднуються, наприклад, з відкритими фланцями хвильоводів, розташованими ортогонально один до другого. Для вирівнювання форми діаграми спрямованості у двох площинах можна запропонувати використання секторіальних рупорів.

Крім того, при створенні передавального пристрою за запропонованою схемою доцільно приділити увагу його екрануванню. Це дасть можливість запобігти виявленню роботи передавача засобами радіоелектронної розвідки шляхом фіксації випромінювання на штатних робочих частотах (у діапазонах 900 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц), які використовуються як проміжні. Відсутність належного екранування може звести нанівець всі переваги перенесення спектра у ММ-діапазон, особливо на невеликих відстанях від засобу РЕБ.

Структурна схема наземного приймача інформаційної радіолінії спеціального зв'язку БпЛА представлена на рисунку 3.

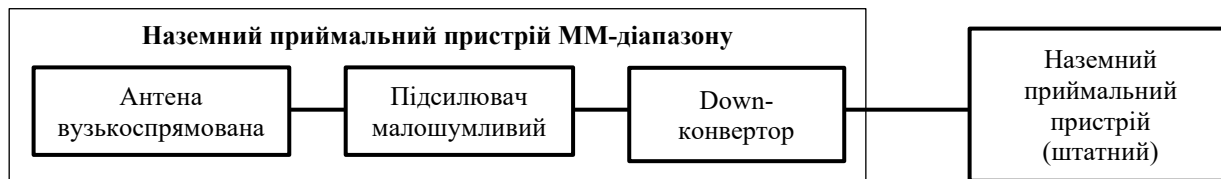


Рис. 3. Структурна схема наземного аналогового приймального пристрою інформаційної радіолінії БпЛА

Сигнал, прийнятий приймачем ММ-діапазону, подається на антенний вхід штатного приймального пристрою з робочою частотою 5,8 ГГц та монітором (дисплей FPV 7" Readytosky 800×480 DVR Diversity 5,8 GHz [14]). Як вузькоспрямована антена використовується параболічна антена (наприклад, антена offset з діаметром рефлектора 0,3 м).

Для забезпечення можливості приймання сигналу двома каналами, як передбачено у штатному приймальному пристрої (дисплей FPV 7" Readytosky 800×480 DVR Diversity 5,8 GHz), необхідно використати 2 приймальні пристрої ММ-діапазону, які мають ортогональне розташування фланців хвильоводів, що опромінюють спільний рефлектор.

Формування робочої смуги частот у ММ-діапазоні, а також зменшення шумової складової на виході приймача ММ-сигналу забезпечується включенням до складу приймального пристрою вхідного фільтра. Крім того, до складу Down-конвертора включено фільтр дзеркального каналу, який призначений для виділення необхідної бокової смуги частот змішувача, яка відповідає смузі робочих частот штатного наземного приймача інформаційного сигналу БпЛА. Застереження щодо екранування приймального пристрою такі ж суворі, як і для передавального, бо потужний сигнал РЕБ, при відсутності екранування, спроможний придушити його роботу каналами проміжних частот.

При цьому, приймальний пристрій ММ-діапазону доцільно розміщувати на поворотному штативі. Для зручності експлуатації радіолінії доцільно використати поворотний штатив з автоматичним регулюванням та підтриманням напрямку на передавач.

З'єднання приймача ММ-діапазону з дисплеєм виконується коаксіальним кабелем. Із тактичних міркувань кабель повинен допускати розміщення оператора на певній відстані від поворотного пристрою, тому використання кабелю невеликих перерізів – проблематичне. Крім того, для електричного з'єднання доцільно використовувати найбільш надійні в експлуатації радіочастотні роз'єми N-типу.

**Створення та випробування макетного зразка.** Макетний зразок інформаційної радіолінії з робочою частотою у нижній частині ММ-діапазону представлено на рисунку 4.

Макетний зразок передавального пристрою інформаційної радіолінії для забезпечення його автономності включає до свого складу повний комплект штатного обладнання БпЛА (у тому числі джерело живлення), що значно збільшує його габаритні розміри. У якості антен передавального пристрою використано відкритий фланець хвильоводу. Антена наземного приймального пристрою – офсетна з діаметром рефлектора 300 мм. Опромінювач антени не оптимізувався. Макетний зразок виготовлено тільки для одного поляризаційного каналу. Передавальний пристрій, разом з електронними елементами FPV-дрона, поміщено у кожух, який закріплено на борту квадрокоптера DJI Matrice. Наведення наземної антени на БпЛА забезпечувалося у ручному режимі.

У процесі випробувань передавальний пристрій піднімався на висоту до 200 м, а приймальний пристрій розташовувався на висоті не більше 1,5 м. Випробувальна траса вибиралася за умови відсутності на ній природних завад.



Рис. 4. Загальний вигляд макетного зразка радіолінії ММ-діапазону:  
а – бортовий сегмент; б – наземний сегмент

При цьому, за потужності передавача 27 дБм відстань зв'язку склала близько 15 км. За експертними оцінками якість відеосигналу, що передавався, – задовільна.

#### **Висновки і перспективи подальших досліджень**

Перенесення робочих частот радіоліній спеціального зв'язку БпЛА у ММ-діапазон електромагнітного спектра видається перспективним напрямом їх подальшого розвитку. При цьому, наразі, для скорочення термінів і трудовитрат створення таких радіоліній доцільно використовувати штатні радіолінії сантиметрового діапазону, підключаючи до них конвертори ММ-діапазону.

Розрахункові гарантовані відстані зв'язку радіоліній ММ-діапазону (із запасом потенціалу відносно розповсюдження сигналу у вільному просторі не менше 20 дБ), для нижніх частот ММ-діапазону складають: при габаритах наземної приймальної системи не більше 300 мм – 10 км, а при габаритах антени 600 мм – близько 30 км.

Використання ретрансляторів дасть можливість не тільки використовувати наземні антени з меншим діаметром рефлектора, але й досягнути більш якісного передавання відеосигналу при еволюціях БпЛА на мінімальних висотах.

Для зменшення спотворень/втрат сигналу від завад на трасі розповсюдження при його перевідбиттях дієвим заходом залишається одночасне передавання сигналу двома каналами (зокрема, з різною поляризацією чи різними частотами).

Створення вітчизняних конверторів ММ-діапазону дасть можливість оперативно змінювати робочі частоти БпЛА, що може забезпечити певні тактичні переваги при застосуванні ворожих засобів РЕБ.

У перспективі передбачається розроблення ретранслятора, а також вжиття заходів щодо освоєння високочастотних ділянок діапазону ММ-хвиль з метою їх використання на всіх видах дронів (повітряних, морських, наземних), що дасть можливість, завдяки оперативному маневруванню робочими частотами, підвищити ефективність боротьби із ворожими засобами РЕБ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Слюсар В. Радиолінії зв'язу с БпЛА. Примеры реализации // ЭЛЕКТРОНИКА. НТБ, 2010. № 5. С. 56–60. URL: <https://www.slysar.kiev.ua>.
2. Що таке FPV і в чому різниця 2,4 ГГц та 5,8 ГГц аналог або Wi-Fi. URL: <https://maroder.com.ua/uk/obzor/chto-takoe-fpv-i-v-chem-raznitsa>.
3. Радіоелектронна протидія безпілотним літальним апаратам «Ланцет» // G7 – сайт ТрО ЗСУ. URL: [https://sprotyvg7.com.ua/lesson/radioelektronna-protidii-bezpilotnim-lital\[nim\]-aparatom-lancet](https://sprotyvg7.com.ua/lesson/radioelektronna-protidii-bezpilotnim-lital[nim]-aparatom-lancet).
4. Дмитрук Р. І., Коротєєв І. М., Думанський М. В. // Аналіз радіоліній зв'язку з безпілотними літальними апаратами // Сучасна спеціальна техніка. 2014. № 3 (38). Електронний репозитарій НАВС. URL: <http://www.elar.naiau.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/efcc7b78-8d44-4184-8e15-9667b0645b83/content>.
5. Сили оборони вперше знищили російську РЕБ «Свет-КУ». URL: <https://bagnet.org/news/accidents/1353595/cili-oboroni-vperche-znishchili-rsiysku-reb-svet-ku-video/>.
6. Радіоелектронна боротьба: аналіз арсеналу Росії. Сильні та слабкі сторони російських засобів РЕБ. URL: [https://defens-ua.com/weapon\\_and\\_tech/radioelektronna\\_borotba\\_jak\\_i\\_chim\\_rosija\\_vojue\\_proti\\_ukrajini-708.html](https://defens-ua.com/weapon_and_tech/radioelektronna_borotba_jak_i_chim_rosija_vojue_proti_ukrajini-708.html).
7. Про затвердження Національної таблиці розподілу смуг радіочастот: постанова Каб. Міністрів України від 15.12.2005 № 1208 // Офіційний вісник України. 2005. № 51. С. 54. Ст. 3196.
8. Снісаренко А. Г. Особливості розрахунку радіоканалів командних радіоліній крилатих ракет // Системи озброєння і військова техніка. 2018. № 1 (53). С. 49–53. URL: [http://www.researchgate.net/publication/324974422\\_Osoblivosti\\_rozrahunku\\_radiokanaliv\\_komandnih\\_radioliniy\\_krilatih\\_raket](http://www.researchgate.net/publication/324974422_Osoblivosti_rozrahunku_radiokanaliv_komandnih_radioliniy_krilatih_raket).
9. Кривые распространения радиоволн для подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ: Рекомендации МСЭ-R P.528-3 (02/2012). URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.528-3-201202-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.528-3-201202-S!!PDF-R.pdf).
10. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни “Проектування антенно-фідерних пристроїв НВЧ” для студентів спеціальності “Радіотехніка” всіх форм навчання // Запорізький національний технічний університет. URL: <https://studfile.net/preview/9875374/page4>.
11. Расчет зеркальной параболической антенны. URL: <https://www.3g-aerial.biz/onlijn-raschety/raschety-antenn/raschet-parabolicheskoy-antenny>.
12. URL: <https://www.akktek.com/akk-race-ranger-n-a-for-customer.html>.
13. Долбик А. И. Устройства сверхвысоких частот и антенны. Часть 2. Антенные системы РЭС РТВ. Казань, 2004. 104 с.
14. URL: <https://www.droua.com.ua/ua/p1847976773-monitor-fpv-readytosky.html>.