УДК 621.396.677 : 623.62

В. Д. Бондарчук, І. В. Первак, В. М. Кривонос

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРИ БпЛА-РЕТРАНСЛЯТОРІВ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ

Анотація. *Розглянуто проблему втрати каналу зв'язку "командний пункт – підрозділ" у разі, коли один БпЛА-ретранслятор потрапляє в зону дії станції радіоелектронного придушення (РЕП). Запропоновано схему з двох ретрансляторів із частотним і просторовим рознесенням та автоматичним перемиканням каналів за показником якості зв'язку. Обґрунтовано, що така схема знижує ймовірність повної втрати зв'язку та скорочує час його відновлення.*

Ключові слова: *БпЛА-ретранслятор, радіоелектронне придушення, частотне рознесення, резервування, завадостійкість.*

Abstract. *The paper considers the loss of the communication channel between a command post and a unit when a single UAV relay falls into the coverage area of an electronic jamming station. A scheme with two relays using frequency and spatial diversity and automatic channel switching based on link quality is proposed. It is substantiated that such a scheme reduces the probability of a complete loss of communication and shortens the recovery time.*

Keywords: *UAV relay, electronic jamming, frequency diversity, redundancy, jamming resistance.*

Сучасні підрозділи керуються по радіоканалу, а відстань до командного пункту часто значна, при цьому перешкоджають штучні забудови та ландшафт місцевості. За таких умов пряма видимість відсутня, тому для підтримання зв'язку пропонується застосувати БпЛА-ретранслятор. Апарат підіймається над перешкодами, приймає сигнал від одного абонента, підсилює його та передає його іншому. Водночас противник використовує станції РЕП, які створюють потужні завади в робочій смузі частот. На практиці їх вмикають імпульсно. Короткі періоди придушення чергуються з паузами, що ускладнює виявлення станції та планування обходу.

Підйом антени збільшує зону прямої видимості, а напрямлені антени знижують рівень завад із бічних напрямків. Однак ретранслятор переважно розглядається як елемент, що сам не піддається впливу РЕП.

Схема з одним ретранслятором має певні недоліки. Коли відношення сигнал/завада на вході його приймача падає нижче допустимого рівня, обривається одразу і прийом, і передача, а підрозділ втрачає зв'язок повністю. Відновлення вручну (пошук вільної частоти, зміна позиції апарата) потребує чимало часу. За цей час противник може змінити налаштування РЕП, і процес починається знову. Тому метою є не лише підвищення стійкості одного каналу, а й усунення залежності всього зв'язку від одного вузла.

Для підтримання каналу зв'язку запропоновано застосовувати пару ретрансляторів, у якій основний і резервний апарати відрізняються за частотою та положенням. Ідея ґрунтується на двох принципах рознесеного прийому. Перший – частотне рознесення. Станція РЕП зазвичай ефективно працює у вузькій смузі, тому одночасне придушення двох каналів у різних діапазонах потребує більшої потужності або кількох станцій. Другий – просторове рознесення. Коли апарати віддалені один від одного, завада від одного джерела діє на них по-різному, оскільки сила сигналу швидко зменшується з відстанню. Якщо канали придушуються незалежно, то ймовірність втрати обох значно менша, ніж втрати одного, адже вона дорівнює добутку цих ймовірностей. Отже, резервування суттєво знижує ризик повної втрати зв'язку. Реальні значення залежать від потужності РЕП і потребують польового вимірювання.

Загальний порядок застосування схеми такий. Спочатку визначають напрямок, звідки найімовірніше працює станція РЕП, використовуючи дані розвідки або спостереження за тим, з якого боку зв'язок погіршується частіше. Потім обидва апарати піднімають над перешкодами з боку, протилежного РЕП, і розносять їх на таку відстань, щоб одна завада не накривала обидва одночасно. Основному й резервному ретрансляторам призначають різні частоти з різних діапазонів, водночас резервний тримають у режимі прийому без випромінювання, що знижує

ймовірність його виявлення. Антени спрямовують на абонентів, оскільки напрямлена антена послаблює завади з бічних і зворотних напрямків.

Далі задають правило автоматичного перемикання за якістю каналу. Коли частка втрачених пакетів перевищує допустимий поріг протягом короткого проміжку часу, зв'язок переходить на резервний ретранслятор без участі оператора. Значення порогів визначають під час випробувань на конкретному обладнанні. Після перемикання дезорганізований засобами РЕБ апарат змінює позицію або висоту й повертається в резерв, тобто основний і резервний ретранслятори періодично міняються ролями. З огляду на обмежений час польоту апарат із вичерпаним польотним ресурсом замінюють новим, щоб забезпечити безперервну роботу схеми. Очікуваний ефект полягає в суттєвому скороченні часу відновлення каналу зв'язку, оскільки перемикання виконується автоматично і не потребує дій оператора. Крім того, противник змушений придушувати одночасно два канали з різних напрямків, що підвищує його витрати на ведення радіоелектронної боротьби.

Таким чином, застосування пари БпЛА-ретрансляторів із частотним і просторовим рознесенням та автоматичним перемиканням усуває слабке місце одного ретранслятора, знижує ймовірність повної втрати зв'язку й скорочує час його відновлення. Схема сумісна з наявними радіостанціями, а подальша робота полягає в експериментальному визначенні оптимальних параметрів.

Список використаних джерел:

1. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 2. P. 1123–1152.
2. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems.

IEEE Transactions on Communications. 2016. Vol. 64, No. 12. P. 4983–4996.
3. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, No. 2. P. 767–809.
4. Tse D., Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 564 p.

Бондарчук Володимир Дмитрович *– курсант інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61009, e-mail: vovabondarchuk103@gmail.com.*

Первак Ігор Володимирович – *курсант інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61009, e-mail: pervakigor9@gmail.com.*

Кривонос Володимир Миколайович *– кандидат технічних наук, начальник кафедри експлуатації та застосування безпілотних авіаційних систем та комплексів повітряної розвідки інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61023, e-mail: kvn35@ukr.net ORCID https://orcid.org/0000-0002-6511-6640*

Bondarchuk Volodymyr Dmytrovych *– cadet from the Faculty of Aviation Engineering of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St. 77/79, Ind 61009, e-mail: vovabondarchuk103@gmail.com.*

Pervak Ihor Volodymyrovych *– cadet from the Faculty of Aviation Engineering of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St. 77/79, Ind 61009, e-mail: pervakigor9@gmail.com.*

Kryvonos Volodymyr Mykolayovych *– Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Operation and Employment of Unmanned Aerial Systems and Aerial Reconnaissance Complexes, faculty of Aviation Engineering, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St. 77/79, Ind. 61023, e-mail: kvn35@ukr.net ORCID https://orcid.org/0000-0002-6511-6640*