

Кривуля Г.Ф.

<https://orcid.org/0000-0002-6143-5628>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Зигін С.Є.

<https://orcid.org/0009-0003-3537-7713>

Харківський національний університет радіоелектроніки

ВИЯВЛЕННЯ КЕРУЮЧИХ СИГНАЛІВ ПРИ КЕРУВАННІ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ НАЯВНОСТІ ІНТЕНСИВНИХ ЗАВАД

Дана робота присвячена питанню виявлення сигналів керування в системах зв'язку безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що функціонують відповідно до стандарту 802.11. Сучасні безпілотні системи дедалі ширше використовуються як у цивільній, так і у військовій сферах, що висуває підвищені вимоги до надійності їхніх каналів зв'язку. І особливо важливо це в умовах інтенсивних перешкод, зокрема застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), коли традиційні методи синхронізації та виявлення сигналів втрачають ефективність.

Стандартний метод визначення початку пакета даних, передбачений протоколом 802.11, ґрунтується на обчисленні кореляції між прийнятим сигналом та еталонною послідовністю, у результаті чого формується кореляційне плато. Цей підхід демонструє належну ефективність за звичайних умов експлуатації, коли рівень шумів є помірним, а канал зв'язку не зазнає цілеспрямованого впливу. Однак за наявності інтенсивних шумів або в умовах радіоелектронної боротьби він стає вразливим. У таких випадках кореляційне плато втрачає рівномірну структуру, стає нерівномірним, фрагментується або взагалі нівелюється, що унеможливує надійне визначення моменту початку корисного сигналу. Це, у свою чергу, призводить до зриву синхронізації, втрати пакетів і, як наслідок, порушення керованості безпілотним літальним апаратом.

Авторами запропоновано новий метод виявлення сигналів керування, позбавлений зазначених вище обмежень. Його ключова відмінність полягає у відмові від аналізу кореляційного плато на користь детектування окремих кореляційних піків. Використовуючи природну повторюваність короткої навчальної послідовності у сигналі 802.11, цей підхід забезпечує надійну ідентифікацію початку пакета навіть за умов, коли традиційне кореляційне плато зазнає значних спотворень або взагалі не формується.

Замість очікування стійкої платоподібної ділянки, яка легко руйнується під впливом перешкод, метод орієнтується на виявлення окремих пікових значень кореляційної функції, що зберігають інформативність навіть за значного погіршення співвідношення сигнал/шум.

Такий підхід забезпечує значно вищу стійкість до впливу радіоелектронних перешкод і дозволяє зберігати працездатність системи зв'язку навіть за умов значного погіршення якості прийнятого сигналу. Результати проведених експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого методу в умовах, наближених до реальних сценаріїв застосування засобів РЕБ. Отримані результати можуть бути використані при розробці сучасних систем зв'язку для безпілотних літальних апаратів, а також для модернізації вже існуючих комплексів з метою підвищення їхньої завадостійкості.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, сигнали керування, метод, кореляційне плато, кореляційні піки, радіоелектронна боротьба, стійкість до перешкод, виявлення пакетів.

Постановка проблеми. Сучасні системи бездротового зв'язку, зокрема ті, що базуються на стандартах сімейства IEEE 802.11, широко застосовуються для керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Надійність роботи таких систем значною мірою залежить від коректного та своєчасного визначення початку прийнятого пакета даних.

У більшості реалізацій первинна синхронізація приймача виконується шляхом виявлення короткої тренувальної послідовності (STS), яка має періодичну структуру. Для цього широко застосовується метод автокореляції вхідного сигналу із самим собою зі зсувом на довжину періоду L . У результаті обчислення формується характерне кореляційне плато, за довжиною якого приймається рішення про наявність пакета.

Однак у реальних умовах функціонування, особливо за наявності інтенсивних завад (наприклад, при дії систем радіоелектронної боротьби), структура прийнятого сигналу може бути частково спотворена. Це призводить до порушення кореляційного плато: воно стає нерівномірним, містить розриви або має знижену амплітуду. У таких умовах класичні методи детектування, що базуються на аналізі довжини плато, втрачають ефективність і можуть призводити до пропуску пакетів навіть за незначних пошкоджень сигналу.

Таким чином, виникає проблема підвищення завадостійкості алгоритмів визначення початку пакета в OFDM-системах. Зокрема, актуальним є розроблення методів, які б дозволяли:

- забезпечити надійне виявлення пакета за часткового спотворення тренувальної послідовності;
- зменшити ймовірність пропуску пакета в умовах зашумленого ефіру;
- зберегти працездатність алгоритму при наявності імпульсних та ширококутових завад.

Отже, науково-практичним завданням є вдосконалення методів синхронізації приймача шляхом розроблення більш стійких підходів до аналізу тренувальних послідовностей, які враховують можливість часткового руйнування кореляційної структури сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема визначення початку пакета та часової синхронізації в OFDM-системах, зокрема у стандартах сімейства IEEE 802.11, широко досліджується у сучасній науковій літературі. Основна увага приділяється розробці ефективних алгоритмів детектування сигналу та підвищенню їх завадостійкості.

У роботах, присвячених OFDM-приймачам, показано, що первинна синхронізація зазвичай виконується з використанням тренувальних послідовностей (передмови), які мають хороші автокореляційні властивості. Зокрема Гіта Прія [1], зазначає, що оцінка моменту початку символу здійснюється на основі автокореляції або крос-кореляції прийнятого сигналу з відомою еталонною послідовністю, а максимум кореляційної функції визначає точний момент синхронізації.

Класичні підходи до виявлення пакета базуються на обчисленні автокореляції сигналу зі зсувом, що відповідає довжині короткої тренувальної послідовності. Такі методи забезпечують швидке виявлення сигналу та широко застосовуються в практичних реалізаціях як зазначено у дослідженні Пей Сяо та Колін Коуен [2]. Разом із цим використовуються і методи крос-кореляції з відомою послідовністю, які дозволяють підвищити точність визначення початку символу як зазначено у дослідженні Кавіта Кхаре та співавтори [3].

У низці робіт запропоновано комбіновані підходи, що поєднують автокореляцію та оцінку потужності сигналу для підвищення ефективності детектування пакета. Наприклад, у Кю Мін Кан [4] розглядаються алгоритми, що використовують затриману кореляцію та оцінку енергії сигналу, що дозволяє покращити ймовірність виявлення у складних умовах каналу.

Також існують підходи, наприклад як у Унсун Чо та Дж. Кім [5], засновані виключно на крос-кореляції з відомою послідовністю, які забезпечують меншу апаратну складність, але є чутливими до частотних зсувів та шумів. У більш сучасних дослідженнях пропонуються методи із застосуванням алгоритмів машинного навчання для підвищення точності синхронізації наприклад у дослідженні Цін Чаоцзін та колег [6].

Незважаючи на значну кількість досліджень, існує ряд невирішених питань, які залишаються актуальними:

- більшість класичних алгоритмів орієнтовані на ідеальні або помірно зашумлені канали та демонструють суттєве погіршення ефективності при дії інтенсивних завад;
- автокореляційні методи, що формують кореляційне плато, є чутливими до локальних спотворень сигналу, що призводить до розривів плато та помилок детектування;
- крос-кореляційні методи забезпечують точніші результати, але потребують більшої обчислювальної складності або є нестійкими до частотного зсуву;

– існуючі комбіновані алгоритми не завжди забезпечують необхідну надійність у випадках часткового пошкодження тренувальної послідовності;

– недостатньо досліджені методи відновлення структури сигналу при частковій втраті кореляційних ознак.

Таким чином, актуальним залишається завдання розроблення більш завадостійких методів визначення початку пакета, які б забезпечували надійну роботу системи навіть у складних умовах радіоелектронного впливу та часткового спотворення сигналу.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення достовірності визначення моменту початку пакета в OFDM-системах зв'язку, що використовують стандарт IEEE 802.11, за умов впливу інтенсивних завад. Для досягнення цієї мети необхідно виконати аналіз існуючих методів синхронізації, основаних на використанні короткої тренувальної послідовності, виявити їх обмеження при частковому спотворенні сигналу та запропонувати підхід, який забезпечує детектування початку пакета навіть за наявності втрат окремих ділянок сигналу.

У роботі ставиться завдання дослідити метод кореляційної обробки з використанням еталонної тренувальної послідовності, оцінити можливість відновлення відсутніх кореляційних максимумів на основі відомої структури сигналу та визначити умови підвищення завадостійкості алгоритму синхронізації.

Виклад основного матеріалу. Теоретичні основи OFDM

Ортогональне частотне мультиплексування (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) є одним із найбільш поширених методів передавання даних у сучасних бездротових системах, зокрема в стандартах сімейства IEEE 802.11. OFDM сигнал у часовій області формується як сума гармонічних сигналів із різними частотами:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t < T \quad (1)$$

де:

X_k – комплексні символи (наприклад, QPSK/QAM),

N – кількість піднесучих,

Δf – інтервал між піднесучими,

T – тривалість OFDM символу.

У практичній реалізації формування сигналу здійснюється за допомогою оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT):

$$s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N} \quad (2)$$

Це дозволяє ефективно реалізувати OFDM у цифрових системах. Ключовою властивістю OFDM є ортогональність піднесучих. Вона забезпечується вибором частотного інтервалу:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Завдяки цьому виконується умова:

$$\int_0^T e^{j2\pi k \Delta f t} \cdot e^{-j2\pi m \Delta f t} dt = 0 \quad k \neq m \quad (4)$$

Це означає, що піднесучі не заважають одна одній, навіть якщо їх спектри перекриваються. Така властивість дозволяє значно підвищити спектральну ефективність системи.

Для боротьби з багатопроменевим поширенням сигналу в OFDM використовується циклічний префікс (CP, Cyclic Prefix). Він формується шляхом копіювання кінцевої частини символу на його початок (5):

$$S_{cp}(t) = S(t+T) \quad -T_{cp} \leq t < 0 \quad (5)$$

де:

$s(t)$ – Вихідний OFDM-символ,

T – тривалість символу,

T_{cp} – тривалість циклічного префікса,

$S_{cp}(t)$ – доданий циклічний префікс

Додавання циклічного префікса дозволяє по-перше зменшити міжсимвольну інтерференцію, та по-друге зберегти ортогональність піднесучих у каналі з багатопроменевістю.

У стандартах сімейства IEEE 802.11 OFDM сигнал формується з використанням 64-точкового IFFT, з яких 48 піднесучих використовуються для передачі даних, 4 для передачі пілотних сигналів, решта мають нульові значення.

Особливістю цих стандартів є наявність тренувальних послідовностей на початку пакета: коротка тренувальна послідовність (STS) та довга тренувальна послідовність (LTS).

Коротка тренувальна послідовність формується у частотній області як відома послідовність, яка після IFFT у часовій області утворює періодичний сигнал. Завдяки цьому вона складається з повторюваних фрагментів однакової довжини. Використовуючи коротку тренувальну послідовність система знаходить початок корисного сигналу.

Особливістю короткої тренувальної послідовності є те, що у часовій області вона має періодичну структуру (6):

$$S[n] \approx S[n+L] \quad (6)$$

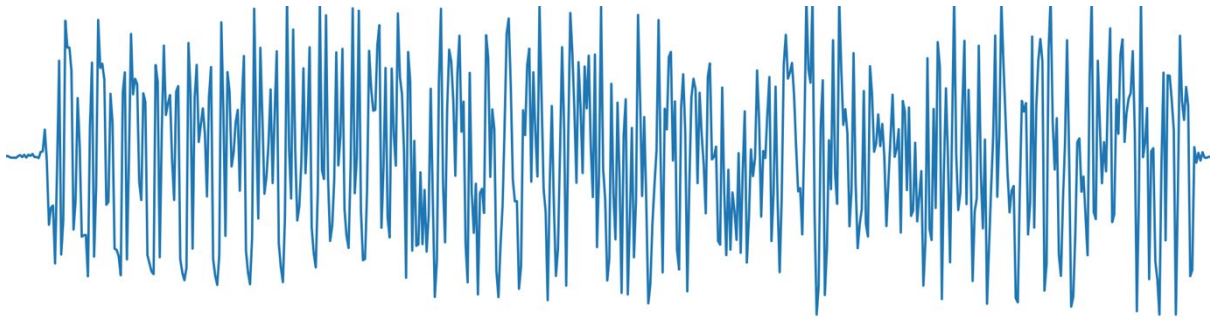


Рис. 1. Графік OFDM сигналу

де L – довжина одного періоду (для більшості варіантів стандарту $L = 16$ відліків). Приклад реального OFDM сигналу у часовій області наведено на рисунку 1.

Як ми зазначили в формулі (6) для позначення початку корисного сигналу стандарт 802.11 визначає коротку навчальну послідовність [7]. Отримана послідовність повторюється 10 разів поспіль. На рисунку 2 представлена початкова частина сигналу пакета 802.11, яка являє собою повторену 10 разів коротку навчальну послідовність.

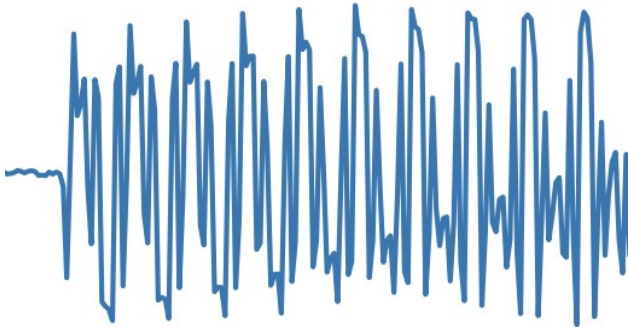


Рис. 2. Стартова послідовність сигналу

Для визначення початку корисного сигналу зазвичай на приймальній стороні виконується пошук автокореляції для вхідного сигналу, оскільки повторюється одна й та сама послідовність, що дозволяє надійно відрізнити корисний сигнал від шуму. Так для визначення автокореляції виконується обчислення (7):

$$P(n) = \sum_{k=0}^{L-1} r[n+k] \cdot \overline{r[n+k+L]} \quad (7)$$

де:

L – довжина тренувальної послідовності

r – вхідний комплексний сигнал

\bar{r} – комплексно-спряжений сигнал

Довжина L короткої навчальної послідовності залежить від обраного варіанту стандарту та від частоти дискретизації, що застосовується в системі представлена у таблиці 1 [7].

Як видно з таблиці 1, тривалість одного символу змінюється пропорційно частоті дискретизації. Тому при використанні стандартної частоти дискретизації для кожного зі стандартів довжина L дорівнюватиме 16 відлікам.

Під час роботи приймального пристрою найчастіше застосовується пошук автокореляції для вхідного сигналу з цим самим сигналом із зсувом на $L = 16$ відліків.

Під час обчислення цієї кореляції за наявності корисного сигналу утворюється плато певної тривалості.

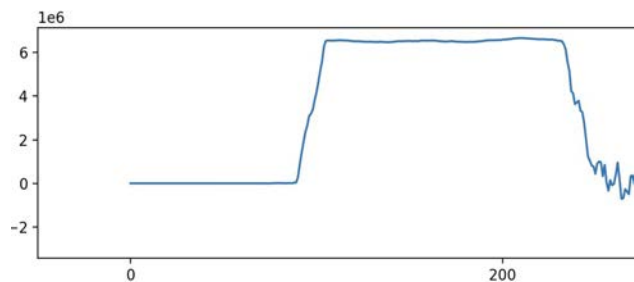


Рис. 3. Отримане значення кореляції для стартової послідовності

Таблиця 1

Параметри короткої тренувальної послідовності

Стандарт	Ширина каналу	Довжина одного STS	Частота дискретизації	Кількість STS
802.11a/h/j/n/ac/ax/b	20 мгц	0,8 мкс	20 МГц	10
802.11p	10 мгц	1,6 мкс	10 МГц	10
802.11j	5 мгц	3,2 мкс	5 МГц	10

Якщо плато перевищує по тривалості певний поріг, приймається рішення про початок корисного сигналу. Цей підхід добре працює в стандарті 802.11, однак за сильного зашумлення ефіру, наприклад, під впливом зовнішніх систем РЕБ, цей механізм визначення початку пакета за довжиною плато перестає працювати, оскільки плато може бути «пошкодженим», тобто бути неоднорідним, із розривами.

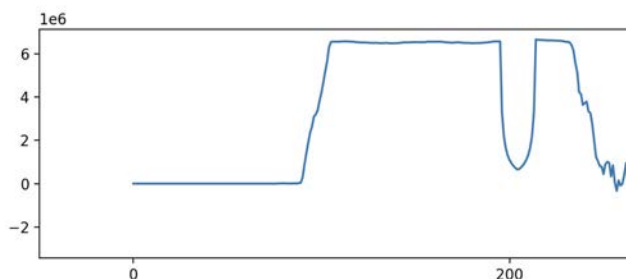


Рис. 4. Кореляційне плато з пошкодженнями

На рисунку 4 представлено плато кореляції якщо частина сигналу була пошкоджена. Так як визначення початку пакету відбувається за довжиною кореляційного плато, після обробки даних за цим методом наступний пакет буде загублено незважаючи на те що пошкоджено було не велику частину пакету

Для корекції цієї проблеми пропонується обчислювати кореляцію за окремими послідовностями, тобто отримувати не суцільне плато, яке показує високу кореляцію, а окремі кореляційні сплески, що відповідають центрам еталонної послідовності з 16 символів. Використовується кореляція з еталонним сигналом, також еталонний сигнал береться як комплексно-спряжена величина.

Отже, після обробки початкової частини вхідного сигналу з рисунка 1 ми отримуємо наступний графік кореляції між еталонною тренувальною послідовністю та сигналом с рисунка 1.

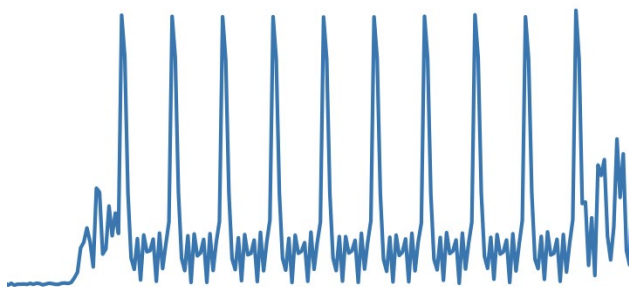


Рис. 5. Графік кореляції

За цим графіком, встановивши певне вхідне порогове значення, ми можемо отримати 10 піків кореляції. На цьому графіку всі піки наявні, однак при сильному зашумленні каналу, наприклад, при зовнішньому впливі систем РЕБ, частина піків може бути втрачена.

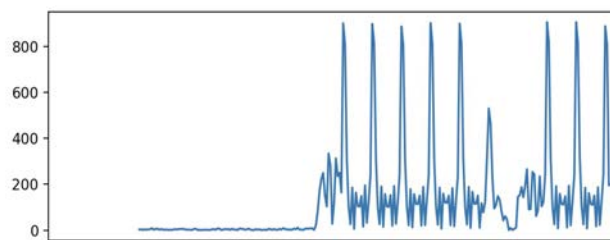


Рис. 6. Графік кореляції з пошкодженими ділянками

Проте при неповному зашумленні їх можна відновити, оскільки нам відстані між піками відомі.

За умови наявності піку в точці X та наявності піку в точці $X+2*D$, де D – відома відстань між піками, ми можемо припустити наявність піку в точці $X + D$, навіть якщо він там відсутній.

Висновки. У роботі розглянуто особливості визначення початку пакета в OFDM-системах на основі стандартів сімейства IEEE 802.11, які широко застосовуються в системах керування безпілотними літальними апаратами. Було проведено аналіз класичних методів синхронізації, які базуються на використанні короткої тренувальної послідовності та обчисленні автокореляції вхідного сигналу.

Показано, що класичний метод, який базується на пошуку кореляційного плато, демонструє ефективність у штатних умовах, проте втрачає стійкість за сильних перешкод чи часткової деградації сигналу. При цьому навіть незначні спотворення навчальної послідовності спричиняють колапс структури плато та призводять до втрати пакетів.

У роботі запропоновано підхід до визначення початку пакета, що базується на аналізі окремих кореляційних піків, які відповідають повторюваним фрагментам короткої тренувальної послідовності. На відміну від класичного методу, запропонований підхід дозволяє здійснювати детектування навіть за часткової втрати або спотворення окремих ділянок сигналу шляхом використання апріорної інформації про відстані між піками.

Показано, що у випадку втрати окремих кореляційних максимумів можливе їх відновлення на основі відомої структури сигналу, що дозволяє підвищити завадостійкість алгоритму та змен-

шити ймовірність пропуску пакета. Таким чином, запропонований метод забезпечує більш надійне визначення початку сигналу в умовах зашумленого ефіру та дії зовнішніх завад.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні приймальних пристроїв OFDM-систем, зокрема у програмно-визначуваних радіо-

системах та FPGA-реалізаціях, з метою підвищення їх ефективності та стійкості до завад.

Перспективами подальших досліджень є кількісна оцінка ефективності запропонованого методу в різних умовах каналу, оптимізація порогових параметрів, а також апаратна реалізація алгоритму з урахуванням обмежень реального часу.

Список літератури:

1. C. Geetha Priya, Suganthi M Two symbol timing estimation methods using Barker and Kasami sequence as preamble for OFDM-based WLAN systems. *Signal Processing Volume 90, Issue 7, July 2010*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.01.021>
2. Pei Xiao, Colin Cowan, Ratnarajah T., Fagan T.D. Time synchronization algorithms for IEEE 802.11 OFDM systems. *Conference: Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009), IET International Communication Conference. 2009*. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2009.1947>
3. Rakhi Thakur, Kavita Khare, Synchronization and Preamble Concept for Frame Detection in OFDM. *International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 1, February 2013*. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJMO.2013.V3.237>
4. Kyu-Min Kang, Packet Detection for Zero-Padded OFDM Transmission. *IEICE Transactions on Communications, Volume E91, 2008*. DOI: <https://doi.org/10.1093/ietcom/e91-b.4.1158>
5. Unsun Cho and J. Kim, "Efficient signal acquisition scheme for multi-band OFDM UWB systems," *8th International Conference on Computing and Networking Technology (INC, ICCIS and ICMIC), Gyeongju, Korea (South), 2012*.
6. Chaojin Qing, Na Yang, Shuhai Tang, Jinliang Chen, Jiafan Wang, CNN-aided timing synchronization in OFDM systems by exploiting lightweight cascaded mode. *ICT Express, № 1, 2024*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2023.03.003>
7. IEEE Std 802.11a-1999, "IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems–Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications–Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band," IEEE, 1999. DOI: 10.1109/IEEESTD.1999.90606

Krivoulya G.F., Zygin S.E. DETECTION OF CONTROL SIGNALS IN UNMANNED AERIAL SYSTEMS UNDER INTENSE INTERFERENCE CONDITIONS

This work is devoted to the issue of control signal detection in communication systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating in accordance with the 802.11 standard. Modern unmanned systems are increasingly used in both civil and military domains, which imposes heightened requirements on the reliability of their communication links. This is especially critical in conditions of intense interference, particularly with the use of electronic warfare (EW) measures, when traditional methods of synchronization and signal detection lose their effectiveness.

The standard method for determining the start of a data packet, as defined by the 802.11 protocol, is based on computing the correlation between the received signal and a reference sequence, resulting in the formation of a correlation plateau. This approach demonstrates adequate effectiveness under normal operating conditions, when the noise level is moderate and the communication channel is not subjected to targeted interference. However, in the presence of intense noise or under electronic warfare conditions, it becomes vulnerable. In such cases, the correlation plateau loses its uniform structure, becomes uneven, fragments, or is completely obliterated, making reliable determination of the start of the useful signal impossible. This, in turn, leads to synchronization failure, packet loss, and, consequently, loss of controllability of the unmanned aerial vehicle.

To overcome these limitations, the authors propose an alternative method for detecting control signals, which is based not on plateau analysis but on the detection of individual correlation peaks. The proposed approach leverages the repetitive nature of the short training sequence within the 802.11 signal structure and allows identification of the packet start even when the correlation plateau is distorted or absent. Instead of waiting for a stable plateau-like region, which is easily disrupted by interference, the method focuses on detecting individual peak values of the correlation function, which retain their informational value even under significant signal-to-noise ratio degradation.

This approach provides significantly higher resilience to electronic interference and allows the communication system to remain operational even under conditions of significant degradation in received signal quality. The results of experimental studies confirm the effectiveness of the proposed method under conditions approximating real-world electronic warfare scenarios. The obtained results can be used in the development of modern communication systems for unmanned aerial vehicles, as well as for the modernization of existing systems to enhance their interference immunity.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, control signals, method, correlation plateau, correlation peaks, electronic warfare, interference resilience, packet detection.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026