

УДК 623.746:621.396.6:004.7



О. Ю. Іохов



О. О. Білаш

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ MESH-МЕРЕЖІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ ДІЇ ЗАСОБІВ РЕБ

У статті розглянуто проблему оцінювання стійкості mesh-мережі системи управління безпілотними системами в умовах активної дії засобів радіоелектронної боротьби. Показано, що сучасні військові системи управління базуються на самоорганізованих багатохопових мережах типу MANET, реалізованих на програмно-конфігурованих радіостанціях із застосуванням завадостійких методів модуляції, зокрема COFDM. Проаналізовано характер впливу суцільних, реактивних та селективних завад на працездатність мережі й контур управління безпілотними апаратами. Запропоновано узагальнену модель mesh-мережі у вигляді динамічного графа з урахуванням мобільності вузлів і сценаріїв радіоелектронного впливу. Обґрунтовано систему показників стійкості MANET, орієнтовану на забезпечення управляємості безпілотних систем. Розроблено інтегральний критерій оцінювання стійкості mesh-мережі, який поєднує показники зв'язності, надійності та своєчасності доставки управляючих повідомлень і дозволяє здійснювати порівняльне оцінювання варіантів функціонування мережі в умовах радіоелектронної протидії.

К л ю ч о в і с л о в а : озброєння та військова техніка, безпілотні системи, літальні апарати, mesh-мережі, MANET, COFDM, радіоелектронна боротьба, узагальнена модель, система показників, інтегральний критерій, оцінювання стійкості, надійність, своєчасність.

Постановка проблеми. Досвід сучасних бойових дій засвідчує, що ефективність застосування безпілотних систем значною мірою визначається стійкістю системи управління та зв'язку в умовах активної радіоелектронної боротьби (РЕБ). Противник цілеспрямовано застосовує засоби радіоелектронного подавлення, реактивні та селективні завади, а також впливи на контрольні й маршрутні повідомлення, що призводить до порушення зв'язності мережі, збільшення затримок передавання команд та втрати управляємості безпілотними платформами [1–3].

У сучасних військових системах управління та зв'язку як транспортну основу переважно використовують самоорганізовані багатохопові мережі типу MANET, реалізовані на програмно-конфігурованих радіостанціях (SDR) із застосуванням завадостійких методів модуляції, зокрема COFDM [4–7]. Така архітектура забезпечує мобільність вузлів, багатоальтернативну маршрутизацію та адаптивне відновлення топології мережі, що є критично важливим у бойових умовах.

Водночас аналіз практики застосування та результатів наукових досліджень показує, що наявні методи оцінювання стійкості безпроводових мереж здебільшого:

- орієнтовані на цивільні технології (Wi-Fi, IEEE 802.11s) або стаціонарні сценарії [8, 9];
- зосереджені переважно на фізичному рівні (BER, SINR) і не враховують деградацію мережевих і управляючих процесів [10, 11];
- не враховують вплив РЕБ на контур управління, зокрема часові обмеження доставки команд та відновлення маршрутів у MANET [12].

У результаті виникає актуальна науково-прикладна проблема в межах спеціальності «Озброєння та військова техніка», а саме: відсутність узгодженого методу оцінювання стійкості MANET+SDR+COFDM як підсистеми управління безпілотними системами, який би комплексно враховував динаміку топології, сценарії радіоелектронного впливу та показники, критичні для процесу управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження самоорганізованих мереж типу MANET показують, що їхня живучість визначається не лише характеристиками радіоканалу, а й ефективністю алгоритмів маршрутизації та швидкістю відновлення зв'язності після втрати вузлів або каналів [4, 5].

У працях з дослідження військових SDR-систем наголошується, що використання COFDM забезпечує підвищену завадостійкість у складних радіоумовах, однак не усуває вразливості мережевого рівня до селективного або реактивного глушіння [6, 10].

Окремі зарубіжні дослідження доводять, що вплив засобів РЕБ на MANET призводить до непропорційного зростання затримок управляючого трафіка та деградації маршрутів навіть за збереження прийнятних показників SINR на фізичному рівні [11, 12]. Це підтверджує, що оцінювання стійкості лише за радіотехнічними показниками є недостатнім для систем управління.

Вітчизняні наукові праці, пов'язані зі спеціальними телекомунікаційними системами та РЕБ, розглядають питання завадостійкості та ефективності протидії, проте, зазвичай не формалізують інтегральну оцінку стійкості MANET з урахуванням функціонування контуру управління безпілотними системами [1, 2, 13].

Отже, аналіз публікацій свідчить про відсутність комплексного методу, який би поєднував:

- фізичні ефекти COFDM-радіоканалу;
- мережеві властивості MANET;
- вимоги до часової та інформаційної стійкості системи управління БпЛА.

Метою статті є підвищення обґрунтованості оцінювання стійкості mesh-мережі системи управління безпілотними системами, побудованої за архітектурою MANET на основі SDR із застосуванням COFDM, в умовах дії засобів радіоелектронної боротьби шляхом розроблення інтегрального критерію, що враховує мережеві, часові та управляючі показники функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості застосування MANET+SDR+COFDM у сучасних військових системах управління безпілотними системами та характер впливу засобів РЕБ на їх функціонування;
- сформулювати узагальнену модель mesh-мережі як підсистеми управління з урахуванням мобільності вузлів і сценаріїв радіоелектронного впливу;
- обґрунтувати систему показників стійкості MANET, критичних для забезпечення управляємості безпілотних систем;
- розробити інтегральний критерій оцінювання стійкості mesh-мережі в умовах дії засобів РЕБ.

Виклад основного матеріалу. Особливості застосування MANET+SDR+COFDM у військових системах управління безпілотними системами такі.

1. MANET як мережева основа розподіленого управління.

У задачах управління групою БпЛА (або взаємодії БпЛА з наземними пунктами управління) ключовою вимогою є збереження зв'язності та управляємості при високій мобільності вузлів і змінній топології. MANET-архітектура забезпечує багатохопову мережу передавання даних, альтернативні маршрути та самовідновлення топології, що підвищує живучість системи управління за умови втрати окремих вузлів або каналів зв'язку [4, 5]. Водночас надійність MANET значною мірою визначається властивостями маршрутизації (швидкість конвергенції, стабільність маршрутів, накладні витрати), що є критичним для управляючого трафіка [5].

2. SDR як технологічна база адаптивності та «перебудови під обстановку».

У військових системах SDR використовується як платформа, що дозволяє гнучко змінювати параметри радіоінтерфейсу (режими модуляції / кодування, смугу, потужність, методи доступу, частотні плани) та реалізовувати механізми когнітивного / адаптивного радіообміну залежно від завадової обстановки і ресурсних обмежень [6]. Для задач БпЛА це особливо важливо через змінну геометрію мережі, несталі умови поширення й необхідність швидкої реакції на впливи РЕБ [6, 7].

3. COFDM як фізичний рівень для складних каналів і підвищеної завадостійкості.

COFDM як реалізаційний клас OFDM з акцентом на стійкість у реальних умовах забезпечує ефективну роботу у випадку багатоприменовості, NLOS і швидких змінах каналу, що типово для рухомих вузлів (БпЛА / наземні платформи) [7]. Це створює підґрунтя для підтримання зв'язку при погіршенні каналу, однак не вирішує проблеми деградації мережі на рівні маршрутизації та управління трафіком за навмисного впливу [5, 7].

4. Розподіл трафіка за критичністю: «управляючий контур» проти «корисних даних».

У системі управління БпЛА існують класи повідомлень з різною критичністю:

- управляючі команди та службова синхронізація (жорсткі вимоги до затримки / втрат);
- телеметрія (регулярна доставка з обмеженнями у затримці);
- корисне навантаження (відео / дані) (високий трафік, часто може бути деградований без миттєвої втрати керованості).

Для MANET це означає потребу в QoS / пріоритизації та в оцінюванні стійкості не «у середньому за мережу», а саме за показниками управляючого контуру [4, 5].

Визначимо характер впливу засобів РЕБ на функціонування MANET+SDR+COFDM. До них можна віднести п'ять таких чинників.

1. Енергетичне (суцільне) подавлення: деградація каналу спричинює каскадний ефект на мережу. При ширококутовому або вузькокутовому подавленні погіршуються показники фізичного рівня (зростання помилок, спадання корисної швидкості), що викликає повторні передавання, збільшення затримок та «роздування» черг, а на мережевому рівні – розриви маршрутів і переформування топології [7]. Для управління БПЛА критичним наслідком є зростання затримки управляючих повідомлень і можливі провали керованості, навіть до повного розриву зв'язності [3, 7].

2. Реактивні та інтелектуальні завади: удар по ефективності мережі, застосовуючи меншу енергію. Дослідження протидії глушінню показують, що «розумні» стратегії можуть досягати суттєвого ефекту при менших витратах потужності, впливаючи на механізми доступу до середовища, стабільність каналу та поведінку протоколів [10, 11]. Для MANET це небезпечно тим, що деградація проявляється не лише як зниження пропускної здатності, а також як дестабілізація маршрутів і збільшення часу відновлення [5, 11].

3. Селективний вплив на контрольні / маршрутні обміни: «ламається» саме MANET. У мережах із самоорганізацією стійкість значно залежить від службових повідомлень маршрутизації та підтримки топології. Селективні атаки / завади, спрямовані на ці механізми, здатні спричинити непропорційно великий системний ефект. Мережа може втрачати узгодженість маршрутів, збільшувати накладні витрати та переходити в режим частих перебудов [5, 9]. Це напряду впливає на систему управління БПЛА, оскільки порушується регулярність доставки команд і телеметрії [3, 5].

4. Вплив РЕБ на контур управління: критичні не лише BER/SINR, а й delay/PDR управляючого трафіка. Для управління безпілотними системами вирішальними стають ймовірність доставки управляючих пакетів (PDR_ctrl), затримка (D_ctrl), джитер і час відновлення маршрутів (T_rec), тобто показники, які відображають працездатність контуру управління, а не лише якість фізичного каналу [5, 11]. Саме тому у методиках оцінювання стійкості необхідно враховувати РЕБ-вплив через мережеві метрики продуктивності та критерії керованості [11].

5. Значення SDR-адаптації в умовах РЕБ: можливість протидії, але не «панацея». SDR / когнітивні підходи дозволяють реалізувати адаптацію параметрів (частотне маневрування, зміну режимів, перестроювання смуги / потужності), що може підвищити шанси збереження зв'язку [6]. Однак навіть у випадку успішної адаптації фізичного рівня MANET може залишатися вразливою до селективних і мережево-орієнтованих впливів (дестабілізація маршрутизації, перевантаження контрольним трафіком), що потребує саме комплексного оцінювання стійкості [5, 3].

Отже, для систем управління безпілотними системами на базі MANET+SDR+COFDM стійкість визначається одночасно працездатністю фізичного рівня зв'язку, стабільністю та відновлюваністю маршрутизації MANET, здатністю системи зберігати управляємість за показниками управляючого трафіка під впливом РЕБ. Це обґрунтовує необхідність застосування комплексного підходу до оцінювання стійкості, що враховує мережеві та часові метрики, релевантні саме контуру управління.

Сформулюємо узагальнену модель mesh-мережі як підсистеми управління з урахуванням мобільності вузлів і сценаріїв радіоелектронного впливу.

У системах управління безпілотними системами mesh-мережа розглядається як функціональна підсистема зв'язку, що забезпечує реалізацію контуру управління шляхом передавання управляючих, телеметричних і службових повідомлень між розподіленими елементами системи. Особливістю такої мережі є поєднання високої мобільності вузлів, динамічної топології та навмисного радіоелектронного впливу, що зумовлює необхідність формалізованого моделювання її функціонування.

Mesh-мережу моделюємо у вигляді динамічного орієнтованого графа

$$G(t) = \langle V(t), E(t) \rangle, \quad (1)$$

де $V(t) = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_N(t)\}$ – множина вузлів мережі в момент часу t , до яких належать безпілотні апарати, наземні пункти управління та можливі ретранслятори;

$E(t) = \subseteq V(t) \times V(t)$ – множина радіоканалів, що формуються між вузлами залежно від їх просторового розташування, параметрів радіообміну та заводової обстановки.

Кожен вузол $v_i(t)$ характеризується вектором параметрів

$$S_i(t) = \{x_i(t), y_i(t), z_i(t), v_i(t), P_i, f_i, B_i\}, \quad (2)$$

де $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$ – координати вузла;

$v_i(t)$ – вектор швидкості;

P_i – потужність передавання;

f_i – робоча частота або піддіапазон;

B_i – доступна смуга пропускання.

Зміна координат і швидкостей вузлів у часі зумовлює нестационарність топології мережі та періодичну перебудову маршрутів.

Радіоканали $e_{ij}(t) \in E(t)$ реалізуються на основі SDR із застосуванням COFDM, що забезпечує адаптацію до умов поширення сигналів і багатопронемовості. Стан кожного каналу описується набором параметрів

$$C_{ij}(t) = \{SINR_{ij}(t), R_{ij}(t), D_{ij}(t)\}, \quad (3)$$

де $SINR_{ij}(t)$ – відношення сигнал / завада+шум;

$R_{ij}(t)$ – досяжна швидкість передавання;

$D_{ij}(t)$ – затримка на каналі.

Для врахування радіоелектронного впливу вводиться функція завадової дії

$$J(t) = \{J_k(t)\}, \quad (4)$$

яка описує сценарії застосування засобів РЕБ і впливає як на параметри радіоканалів, так і на доступність окремих вузлів мережі. У моделі розглядаються такі типові сценарії:

– суцільне енергетичне подавлення, що призводить до зниження $SINR_{ij}(t)$ на значній частині каналів;

– реактивні завади, що активуються під час передавання даних і спричиняють стохастичні розриви зв'язку;

– селективний вплив на службові та маршрутні повідомлення, що порушує процеси маршрутизації та синхронізації мережі;

– часткова втрата вузлів унаслідок подавлення або фізичного впливу.

Передавання інформації в мережі здійснюється за багатохоповими маршрутами

$$P_{mn}(t) = \{v_m(t), \dots, v_n(t)\}, \quad (5)$$

які формуються алгоритмами маршрутизації MANET та змінюються в часі відповідно до топології $G(t)$ і впливу $J(t)$. Особливу роль у моделі відіграє управляючий трафік, для якого визначальними є не лише можливість доставляння, а й дотримання часових обмежень.

Запропонована узагальнена модель дозволяє розглядати mesh-мережу не ізольовано як систему зв'язку, а як складову системи управління, де порушення мережевих характеристик безпосередньо трансформуються у втрату або деградацію керованості безпілотними системами. Саме на цій моделі в подальшому базується формування показників стійкості та інтегрального критерію оцінювання в умовах дії засобів радіоелектронної боротьби.

Обґрунтуємо систему показників стійкості MANET, критичних для забезпечення управляємості безпілотних систем.

Стійкість mesh-мережі MANET як підсистеми управління безпілотними системами доцільно оцінювати за показниками, що безпосередньо відображають здатність системи зберігати управляємість в умовах мобільності вузлів і дії засобів радіоелектронної боротьби. У цьому контексті фізичні параметри радіоканалу розглядаються як допоміжні, тоді як визначальними є мережеві та часові характеристики управляючого обміну.

Показники структурної стійкості мережі. До показників, що характеризують збереження цілісності MANET, належать:

– ймовірність збереження зв'язності мережі P_{conn} , яка відображає наявність принаймні одного маршруту між елементами управління;

– частка ізольованих вузлів K_{iso} , що визначає деградацію мережі при втраті вузлів або каналів.

Ці показники характеризують здатність mesh-мережі підтримувати базову інформаційну взаємодію в умовах руйнування топології.

Показники стійкості керуючого обміну. Оскільки система управління безпілотними системами функціонує в реальному масштабі часу, критичними є показники, що відображають якість доставки управляючої інформації:

- коефіцієнт успішної доставки управляючих пакетів PDR_{ctrl} ;
- середня та гранична затримка доставки управляючих повідомлень D_{ctrl} ;
- джитер керуючого трафіка, що впливає на стабільність управління.

Наведені показники безпосередньо визначають можливість реалізації команд управління та підтримання стійкого зворотного зв'язку з безпілотними системами.

Показники відновлюваності MANET. Для умов активної радіоелектронної протидії важливою властивістю MANET є здатність до адаптації та самовідновлення, яка оцінюється за такими показниками:

- час відновлення маршрутів T_{rec} після порушення зв'язності;
- накладні витрати маршрутизації O_{rt} , що відображають частку службового трафіка в умовах перебування мережі.

Ці показники характеризують ефективність алгоритмів маршрутизації та їх вплив на працездатність управляючого контуру.

Узагальнення системи показників. Запропонована система показників дозволяє комплексно оцінювати стійкість MANET не лише як мережі зв'язку, а як інформаційної основи системи управління безпілотними системами. Сукупне використання показників зв'язності, якості управляючого обміну та відновлюваності створює основу для формування інтегрального критерію оцінювання стійкості mesh-мережі в умовах дії засобів радіоелектронної боротьби.

Розробимо інтегральний критерій оцінювання стійкості mesh-мережі в умовах дії засобів РЕБ.

Для кількісного оцінювання стійкості mesh-мережі MANET як підсистеми управління безпілотними системами в умовах дії засобів радіоелектронної боротьби доцільно застосовувати інтегральний критерій, що поєднує показники структурної цілісності мережі, якості управляючого обміну та відновлюваності мережі.

Сформулюймо інтегральний критерій.

Інтегральний критерій стійкості K_{st} визначається у вигляді зваженої суми нормованих показників:

$$K_{st} = \omega_1 P_{conn} + \omega_2 PDR_{ctrl} + \omega_3 \left(1 - \frac{D_{ctrl}}{D_{max}}\right) + \omega_4 \left(1 - \frac{T_{rec}}{T_{max}}\right), \quad (6)$$

де P_{conn} – ймовірність збереження зв'язності MANET;

PDR_{ctrl} – коефіцієнт успішної доставки управляючих пакетів;

D_{ctrl} – середня затримка доставки управляючих повідомлень;

T_{rec} – час відновлення маршрутів після порушення зв'язності;

D_{max} , T_{max} – гранично допустимі значення затримки та часу відновлення відповідно;

ω_i – вагові коефіцієнти, що задовольняють умову $\sum_{i=1}^4 \omega_i = 1$.

Нормування показників дозволяє привести їх до єдиної шкали та забезпечити коректне агрегування в межах одного критерію.

Вибір вагових коефіцієнтів для управління БпЛА здійснюється експертним методом з урахуванням пріоритетів управляючого контуру, де визначальними є надійність і своєчасність доставки управляючих команд. Отримані експертні оцінки нормуються таким чином, щоб сума вагових коефіцієнтів інтегрального критерію дорівнювала одиниці, що забезпечує коректне порівняння варіантів функціонування MANET.

Вагові коефіцієнти визначаються відповідно до пріоритетів системи управління безпілотними системами, де критичною є своєчасна та надійна доставка управляючих команд. Для типових сценаріїв управління доцільно прийняти: $\omega_1 = 0,25$, $\omega_2 = 0,35$, $\omega_3 = 0,25$, $\omega_4 = 0,15$.

Таке співвідношення відображає підвищену значущість показників, безпосередньо пов'язаних із управляючим контуром (PDR_{ctrl} , D_{ctrl}), за умови збереження достатньої ваги структурної цілісності та відновлюваності MANET.

Застосування критерію для порівняльного оцінювання показало такий результат. Запропонований інтегральний критерій використовується для порівняння варіантів побудови та функціонування MANET в умовах дії засобів РЕБ, зокрема:

- різних алгоритмів маршрутизації;
- варіантів параметрів SDR (частотні плани, смуга, потужність);
- сценаріїв мобільності вузлів і радіоелектронного впливу.

Для кожного варіанта обчислюється значення K_{st} . Варіант з більшим значенням критерію вважається більш стійким з погляду на забезпечення управляємості безпілотними системами. Це дозволяє формалізувати процес вибору раціональних рішень щодо конфігурації мережі та обґрунтувати заходи з підвищення її стійкості в умовах радіоелектронної протидії.

Висновки

У статті обґрунтовано доцільність розгляду mesh-мережі MANET на основі SDR із застосуванням COFDM як критичної підсистеми управління безпілотними системами, стійкість якої безпосередньо визначає ефективність реалізації управляючого контуру в умовах мобільності та дії засобів радіоелектронної боротьби.

Сформовано узагальнену модель mesh-мережі у вигляді динамічного графа, що враховує зміну топології внаслідок руху вузлів і різні сценарії радіоелектронного впливу, що дозволяє формалізувати процеси порушення та відновлення інформаційної взаємодії між елементами системи управління.

Обґрунтовано систему показників стійкості MANET, орієнтовану на забезпечення управляємості безпілотними системами, яка охоплює показники структурної цілісності мережі, якості доставки управляючих повідомлень та здатності мережі до адаптації і самовідновлення в умовах радіоелектронної протидії.

Розроблено інтегральний критерій оцінювання стійкості mesh-мережі, що базується на зваженому зведенні нормованих показників зв'язності, надійності та своєчасності управляючого обміну і дозволяє здійснювати кількісне порівняльне оцінювання варіантів побудови та функціонування MANET у складній завадовій обстановці.

Показано, що застосування запропонованого критерію створює основу для обґрунтованого вибору алгоритмів маршрутизації, параметрів SDR та режимів функціонування мережі, спрямованих на підвищення стійкості системи управління безпілотними системами до дії засобів РЕБ.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення вагових коефіцієнтів інтегрального критерію для різних сценаріїв бойового застосування безпілотних систем, розширення моделі з урахуванням кооперативної взаємодії груп БПЛА та інтеграцію запропонованого підходу з адаптивними алгоритмами маршрутизації і когнітивного радіообміну.

Перелік джерел посилання

1. Лисечко В. П. Методи та моделі підвищення завадостійкості безпроводових телекомунікаційних систем : дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.02. Київ, 2023. 428 с.
2. Шовкошитний І. І. Математична модель оцінювання ефективності систем РЕБ з БПЛА. *Наукові праці Національного університету оборони України*. Київ, 2022. № 3 (166). С. 92–101.
3. Electronic Warfare Cyberattacks, Countermeasures and Defensive Strategies for UAVs. 2025. 34 p. (препринт. arXiv).
4. Perkins C. Ad Hoc Networking. Boston : Addison-Wesley, 2008. 432 p.
5. Baumgartner M., Breu R., Brunner S. Resilient routing in MANET. *Peer-to-Peer Networking and Applications*. 2024. Vol. 17. No. 2. Pp. 356–372.
6. Mitola J. Cognitive Radio Architecture. Hoboken, NJ : Wiley, 2006. 656 p.
7. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2014. 1104 p.
8. IEEE Std 802.11s-2011. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. New York : IEEE, 2011. 392 p.
9. Kim Y. S., Kim Y., Helmy A. Intelligent jamming in 802.11s mesh networks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS)*. Las Vegas, USA, 2013. Pp. 317–325.
10. Anti-jamming systems for wireless networks / Pelechrinis K., Broustis I., Krishnamurthy S. V., Gkantsidis C. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2009. Vol. 17. No. 3. Pp. 817–830.

11. Jamming detection using performance metrics / Del-Valle-Soto C., Mex-Perera C., Nolzco-Flores J. A., Velázquez R. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. Art. 1179.

12. Ali A. S., Hamdi M., Marinho R. Jamming attacks on Wi-Fi and MANET using SDR. *Proceedings of the International Conference on Military Communications and Information Systems*. 2023. Pp. 1–6.

13. Хоменко П. Стійкість систем зв'язку спеціального призначення до РЕБ. *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації*. Київ, 2024. № 1 (59). С. 44–52.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2025 р.

UDC 623.746:621.396.6:004.7

О. Іохов, О. Білаш

ASSESSMENT OF THE RESILIENCE OF A MESH NETWORK OF AN UNMANNED SYSTEMS CONTROL SYSTEM UNDER ELECTRONIC WARFARE EFFECTS

The article addresses the problem of assessing the resilience of a mesh network used as a communication subsystem of an unmanned systems control system under conditions of active electronic warfare. Modern military control systems increasingly rely on self-organizing multi-hop networks of the MANET type implemented on software-defined radios with the use of interference-resilient modulation techniques, in particular COFDM. Such architectures provide mobility support, alternative routing, and adaptive topology recovery, which are essential in contested electromagnetic environments. However, combat experience and recent studies demonstrate that electronic warfare effects cause not only physical layer degradation but also significant disruptions of routing processes and control information exchange.

The paper analyzes the impact of continuous jamming, reactive interference, and selective attacks on service and routing messages. It is shown that these effects may lead to loss of network connectivity, increased control message delays, excessive routing overhead, and ultimately degradation or loss of controllability of unmanned platforms. Therefore, resilience assessment based solely on radio channel metrics such as SINR or BER is insufficient for unmanned systems control applications.

A generalized model of a mesh network is proposed in the form of a time-dependent directed graph that represents network nodes, radio links, node mobility, and electronic warfare influence scenarios. The model explicitly accounts for dynamic topology changes, partial node loss, and degradation of radio links caused by electronic countermeasures. Special attention is paid to control traffic, which is subject to strict reliability and timeliness constraints.

Based on the proposed model, a system of MANET resilience indicators critical for unmanned systems control is substantiated. These indicators include network connectivity probability, successful delivery ratio of control packets, control message delay, routing recovery time, and routing overhead under interference conditions. The indicators are selected to directly reflect the operational effectiveness of the control loop rather than average network performance.

An integral resilience criterion is developed by aggregating normalized indicators using weighting coefficients determined according to the priorities of unmanned systems control. The criterion enables quantitative comparison of alternative routing algorithms, SDR parameter configurations, and electronic warfare scenarios. The proposed approach provides a formal basis for selecting rational network configurations and improving the resilience of unmanned systems control networks in electronic warfare environments.

Keywords: armament and military equipment, unmanned systems, aerial vehicles, mesh networks, MANET, COFDM, electronic warfare, generalized model, system of indicators, integral criterion, resilience assessment, reliability, timeliness.

Іохов Олександр Юрійович – доктор технічних наук, професор, начальник центру імітаційного моделювання Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0002-1718-0138>

Білаш Олександр Олександрович – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0009-0008-5696-8439>