

СКОРЕЦЬКИЙ Максим Сергійович,

Командування Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна, <https://orcid.org/0009-0008-6721-291X>

КАПТУР Вадим Анатолійович,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

Окремий спеціальний центр електронної підтримки Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-4200-1151>

БЕРЕЗКІН Андрій Леонідович,

кандидат технічних наук,

Окремий спеціальний центр електронної підтримки Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-3087-1184>

ДУРНЄВ Віталій Федорович,

Окремий спеціальний центр електронної підтримки Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна, <https://orcid.org/0009-0000-1506-3301>

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТІВ ЗАСОБАМ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ ДЛЯ ПОДАВЛЕННЯ КОНКРЕТНОГО РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБ'ЄКТУ

Мета статті. Розроблення алгоритму визначення пріоритетів засобам радіоелектронної боротьби для подавлення приймального тракту конкретного радіоелектронного об'єкту на основі визначення коефіцієнтів подібності між характеристиками засобів і характеристиками цілей.

Методи дослідження. Під час написання статті застосовано метод формалізованого аналізу подібностей, що дає змогу оцінити потенційну ефективність впливу засобів радіоелектронної боротьби на приймальні тракту виявлених радіоелектронних засобів. Запропонований підхід дав змогу врахувати алгоритм попередньої фільтрації та формування матриці близькості, що ґрунтується на нормативно заданих коефіцієнтах сумісності.

Отримані результати дослідження. Розроблено алгоритм визначення пріоритетів засобам радіоелектронної боротьби для подавлення конкретного радіоелектронного об'єкту, що враховує подібність тактико-технічних характеристик засобів до характеристик цілей, а також інші важливі оперативні обставини. Запропонований алгоритм дає змогу ранжувати засоби радіоелектронної боротьби для кожної цілі на основі інтегральної оцінки подібності. Алгоритм урахує частотну сумісність, геометричні характеристики сектору дії, очікувану потужність перешкоди, а також зайнятість і придатність засобів до групової роботи.

Елементи наукової новизни. Запропонований алгоритм описує новий спосіб визначення пріоритетів засобам радіоелектронної боротьби, який дає змогу адаптувати вибір засобів до динамічних змін у бойовій обстановці. Вперше застосовано метод формалізованого аналізу подібностей в частині перетворення технічних параметрів у метрику ефективності взаємодії.

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. Отримані результати мають прикладне значення для побудови адаптивних систем управління засобами радіоелектронної боротьби у зоні бойових дій. Модель може бути інтегрована в існуючі системи автоматизованого управління засобами радіоелектронної боротьби, підвищуючи точність і ефективність їх роботи за мінімізації зайвих витрат ресурсів.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба, визначення пріоритетів засобів подавлення радіоелектронних об'єктів, алгоритм фільтрації, матриця подібності, тактичні характеристики.

Вступ

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток галузі радіоелектронної боротьби викликав появу нової проблеми – необхідності координації дій між різними засобами під час виконання завдань на подавлення приймальних трактів виявлених радіоелектронних об'єктів (тут і далі під радіоелектронним об'єктом в контексті цієї статті слід розуміти лише ворожі радіоелектронні об'єкти, до яких для зручності також застосовуватимемо термін «ціль»). Одним із

найважливіших елементів такої координації є визначення порядку застосування засобів радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі у разі, якщо впливу одного засобу для подавлення буде не достатньо для виконання поставленого завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оптимізації застосування засобів радіоелектронної боротьби стає все актуальнішим в

умовах сучасних гібридних конфліктів. Зокрема, ускладнення радіоелектронної обстановки формує потребу в ефективних алгоритмах координації дій між засобами радіоелектронної боротьби. Так, у [1] проаналізовано системний вплив радіоелектронної боротьби на характер сучасних збройних конфліктів, підкреслено роль гнучких алгоритмів, спрямованих на оперативне переналаштування систем подавлення відповідно до типу цілей та сценаріїв загрози.

В [2] акцентовано увагу на прогнозованому розвитку систем радіоелектронної боротьби, зокрема, на перспективних концепціях, що базуються на синергії квантового зв'язку та штучного інтелекту. Такий підхід відкриває нові можливості для створення самонавчальних систем подавлення, що автоматично адаптуються до динаміки змін радіоелектронного поля та здатні виконувати моніторинг радіоелектронного спектру в режимі реального часу.

Окрему увагу привертає дослідження [3], в якому наведено методи просторового аналізу загроз від безпілотних літальних апаратів, включно із дистанційною візуалізацією та реконструкцією маршруту дронів. Це дає змогу підвищити точність прицільного впливу засобів радіоелектронної боротьби та оптимізувати їх використання шляхом фокусування енергії в зонах з найбільшою концентрацією цілей.

У [4] розроблено алгоритм ранжування електромагнітних джерел, заснований на формальних характеристиках спектральних параметрів. Запропонована модель дає змогу встановити послідовність дій засобів радіоелектронної боротьби на основі комплексної метрики оцінювання загроз, що поєднує амплітудні, частотні та часові характеристики сигналів.

Отже, результати аналізу останніх досліджень і публікацій свідчать, що сучасні дослідження у сфері радіоелектронної боротьби демонструють системний підхід до визначення пріоритетів та управління ресурсами, який спирається на формалізовані математичні моделі, адаптивні алгоритми і новітні технології прогнозного аналізу, а розроблення (удосконалення) методів визначення пріоритетності застосування засобів радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі є актуальним науковим завданням.

Метою статті є розроблення алгоритму визначення пріоритетів засобам радіоелектронної боротьби для подавлення приймального тракту конкретного радіоелектронного об'єкту на основі визначення коефіцієнтів подібності між характеристиками засобів та характеристиками цілей.

Виклад основного матеріалу дослідження

Зазвичай підхід за якого вибір оптимальних засобів подавлення відповідно до обраної цілі та ступеню її пріоритетності носить назву «цілецентричного підходу». Водночас, видача інформації стосовно

підтримки прийняття рішення здійснюється з урахуванням існуючих обмежень для ефективного подавлення цілі. Основним принципом цього підходу має бути реалізація послідовності: «ціль → рішення → дія», а не так, як відбувається зараз, а саме: «інформація → ситуація → рішення». Як можна побачити, відповідно до вказаного вище принципу, рішення має бути не останнім елементом, а передумовою для дії. Обґрунтованим завершенням послідовності ефективних дій у процесі прийняття рішення є реалізація цього рішення та досягнення результату, який відображає ефект від такої дії. Тому в процесі цілецентричної підтримки прийняття рішень, дія що може призвести до очікуваного результату і має бути завершальним етапом логічного ланцюга розвитку подій.

Для реалізації цілецентричного підходу підтримки прийняття рішень у системі управління радіоелектронної боротьби потрібно чітко визначити перелік ситуаційних параметрів, що впливають на вибір рішень. Для визначення таких параметрів доцільно використовувати системний аналіз з метою ідентифікації головних і підпорядкованих цілей, упорядкування їх за пріоритетністю (від першочергових до другорядних), а також автоматизації процесу ухвалення рішень шляхом створення «системи, яка розуміє, що їй робити далі».

Зокрема, на початковому етапі на основі планів дій старшого начальника аналізується поточна радіоелектронна обстановка, діючі плани застосування засобів, а також плани дій підрозділів. На підставі такого аналізу виконується планування завдань для засобів радіоелектронної боротьби, з урахуванням оперативної ситуації та наявних можливостей. Такий процес починається з виявлення цілей завдяки сенсорам і засобам електронної підтримки. Після виявлення цілей здійснюється автоматизована обробка інформації – попередня фільтрація та прив'язка. Паралельно здійснюється корекція інформації про цілі на основі даних, отриманих від інших засобів, зокрема, засобів радіоелектронної боротьби, радіо- та радіотехнічної розвідки, радіолокації, геопросторових систем тощо.

На цьому етапі відбувається формування переліку цілей. Для кожної цілі збираються вхідні параметри, що дають змогу проводити їх ідентифікацію. Додатково використовуються наявні кластери даних, що містять інформацію про джерело, час, тип випромінювання та інші ознаки. Далі приймається рішення щодо ідентифікації кожної цілі. Якщо ціль вдалося ідентифікувати, то перевіряється, можливість впливу на цю ціль відповідно до наявних обмежень, пріоритетів і режимів роботи. У випадку ідентифікації або відповідності критеріям впливу не підтверджується, така ціль або відсіюється, або зберігається для подальшого спостереження. Якщо ціль підтверджено як пріоритетна для впливу, то інформація про неї передається для корекції з метою

уточнення з урахуванням інформації від інших джерел, зокрема, систем позиціонування. Водночас здійснюється уточнення координат цілі та перерахування її параметрів для обґрунтування доцільності застосування засобів подавлення. Далі оцінюється наявність та технічний стан засобів, потрібних для реалізації розробленого плану подавлення конкретної цілі. Якщо за результатами оцінювання встановлено, що план можна реалізувати, то потрібно переходити до формування завдань для екіпажів, задіяних у виконанні заходів електронної підтримки та подавлення. Цими завданнями визначаються основні вхідні дані: пріоритет, час виконання та технічні характеристики. Після цього, завдання доводяться до кожного екіпажу та контролюється їх отримання усіма екіпажами. Якщо всі екіпажі підтвердили отримання, то відбувається остаточне узгодження та підготовка до практичного застосування засобів радіоелектронної боротьби. У випадку не підтвердження отримання, здійснюється перевірка та уточнення інформації для забезпечення повного охоплення ситуаційної обстановки. На завершальному етапі застосовуються засоби відповідно до затвердженого плану з урахуванням усіх уточнених завдань та оперативної обстановки.

Визначення пріоритетів застосування засобів для подавлення конкретної цілі має здійснюватися з урахуванням таких факторів:

пріоритет цілі, що визначається на основі її параметрів і тактико-технічних характеристик (визначених через ідентифікацію цілі або в безпосередній спосіб), з можливим врахуванням стратегічної значущості території, над якою спостерігається ціль;

тактико-технічних характеристик наявних засобів подавлення, що знаходяться на тій чи іншій ділянці фронту, та їх технічного стану, й теоретично можуть бути застосовані для подавлення приймального тракту радіоелектронного засобу.

Крім того, очевидним є те, що для подавлення мають пропонуватися лише ті засоби, які здатні подавити цілі, що перебувають у зоні дії засобів радіоелектронної боротьби (просторово-енергетичної досяжності цілі радіозавадами). Водночас, окремо доцільно контролювати й мінімальну відстань до цілі, (в умовах, коли вона перебуває занадто близько до засобу подавлення і засіб не може на неї впливати), а також ситуації коли ціль знаходиться за межами зони дії засобу, але рухається в його напрямку.

До переліку доцільно не додавати засоби, що вже задіяні для виконання іншого завдання, а також такі, для яких ціль знаходиться за межами їх секторів подавлення (у засобу є географічні перешкоди на місцевості, або обмежений кут повороту антен). Тож в цілому, до переліку визначення пріоритетності мають додаватися лише ті засоби подавлення, які за своїми тактико-технічними характеристиками здатні ефективно подавити конкретну ціль. Зокрема, до такого переліку мають бути віднесені засоби, діапазон

частот подавлення яких, покриває повністю або переважно більшість частот, на яких спостерігається ціль (або спостерігалась), які вона потенційно може використовувати за своїми тактико-технічними характеристиками (для ідентифікованої цілі).

Водночас доцільно пропонувати можливість роботи кількох засобів радіоелектронної боротьби по одній цілі, залежно від її пріоритетності, а також рекомендувати частоти для кожного засобу, щоб комплексно перекрити весь діапазон роботи цілі.

Будемо вважати, що в певний момент часу на певній ділянці фронту функціонує N – засобів подавлення, які представлені множиною $EW \{ew_1, ew_2, \dots, ew_N\}$. Кожен із засобів має певний набір з M_i характеристик (де $i = 1, \dots, N$), що характеризується множиною $EW C_i \{ewc_1, ewc_2, \dots, ewc_{M_i}\}$, який є унікальним для кожного із засобів (або груп засобів) з множини EW . За таких умов будь-яка з множин $EW C_i$ за визначенням є складовою частиною іншої множини $EWCG$ розміром P , що містить всі можливі типи характеристик засобів подавлення, тобто для будь-якого із засобів є справедливим вираз $EW C_i \in EWCG$. При цьому, для будь-якого M_i буде справедливим вираз $M_i \leq P$.

Також будемо вважати, що в той самий момент часу на тій самій ділянці лінії бойового зіткнення засобами електронної підтримки виявлено L радіоелектронних об'єктів (цілей), які представлені множиною $RS \{rs_1, rs_2, \dots, rs_L\}$. Кожна з цілей, як і у випадку із засобами радіоелектронної боротьби, має набір з K_j характеристик (де $j = 1, \dots, L$), що характеризується множиною $RSC_j \{rsc_1, rsc_2, \dots, rsc_{K_j}\}$, який є унікальним для кожної з цілей (або груп цілей) з множини RS . При цьому будь-яка з множин RSC_j за визначенням є складовою частиною іншої множини $RSCG$ розміром R , що містить всі можливі типи характеристик цілей, тобто для будь-якої з цілей є справедливим вираз $RSC_j \in RSCG$. За таких умов для будь-якого K_j буде справедливим вираз $K_j \leq R$.

В основу алгоритму визначення пріоритетів засобам радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі покладено принцип використання процедур оцінювання подібності характеристик. Відповідна матриця A всіх можливих процедур оцінювання подібності розміром P стовпців на R рядків формується з пар характеристик засобів і цілей за принципом «кожен з кожним» (рис. 1). При цьому будь-який елемент матриці A буде приймати нульове значення для випадку, коли пара характеристик засобів та цілей, що була використана для формування цього елементу, є повністю несумісними. В іншому випадку елемент матриці буде визначати конкретну процедуру, використання якої дає змогу визначити фактор сумісності між відповідними характеристиками засобу та цілі завдяки його приведення до шкали значень від 0 (абсолютно різні або несумісні) до 1 (максимально подібні).

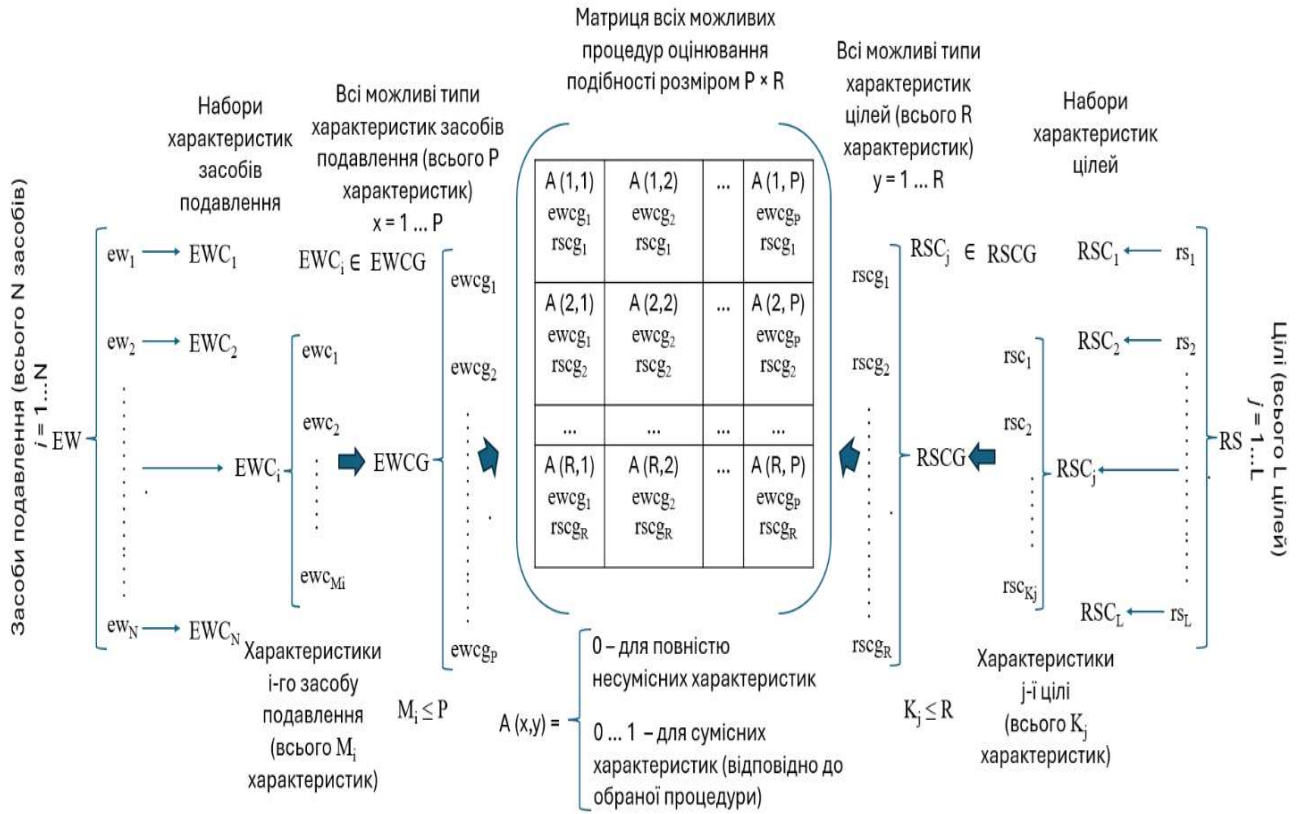


Рисунок 1 – Принцип формування матриці процедур оцінювання подібності

Типовим прикладом процедури оцінювання подібності може бути визначення відношення розміру перетину множин значень певних характеристик засобу та цілі до розміру множини значень відповідної характеристики цілі. При цьому значення фактору сумісності β може бути визначено за виразом:

$$\beta = \frac{|EWV \cap RSV|}{|RSV|}, \quad (1)$$

де EWV – множина значень певної характеристики засобу подавлення. Наприклад, сукупність рівнів подавлення навігації ГЛОНАСС/GPS, що забезпечується відповідним засобом;

RSV – множина значень відповідної характеристики цілі. Наприклад, сукупність рівнів навігації ГЛОНАСС/GPS, що використовується відповідною ціллю.

Так, наприклад, якщо множина значень певної характеристики засобу подавлення складається з таких компонент $EWV = \{L1, L2, L5\}$, а множина значень відповідної характеристики цілі складається з таких компонент $RSV = \{L1\}$, то відповідне значення фактору сумісності буде становити:

$$\beta = \frac{|\{L1, L2, L5\} \cap \{L1\}|}{|\{L1\}|} = \frac{|\{L1\}|}{|\{L1\}|} = 1.$$

Для кращого розуміння відповідного принципу наведемо два приклади. В першому прикладі множина

значень певної характеристики засобу подавлення складається з таких компонент $EWV = \{L1\}$, а множина значень відповідної характеристики цілі складається з таких компонент $RSV = \{L1, L2\}$. В такому випадку відповідне значення фактору сумісності буде становити:

$$\beta = \frac{|\{L1\} \cap \{L1, L2\}|}{|\{L1, L2\}|} = \frac{|\{L1\}|}{|\{L1, L2\}|} = 0.5.$$

У другому прикладі множина значень певної характеристики засобу подавлення складається з таких компонент $EWV = \{L1\}$, а множина значень відповідної характеристики цілі складається з таких компонент $RSV = \{L2, L5\}$. У такому випадку значення фактору сумісності буде становити:

$$\beta = \frac{|\{L1\} \cap \{L2, L5\}|}{|\{L2, L5\}|} = \frac{|0|}{|\{L2, L5\}|} = 0.$$

На рис. 2 наведено алгоритм визначення пріоритетів засобів радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі. Результатом роботи зазначеного алгоритму мають стати пріоритети засобів подавлення визначені відносно кожного з виявлених радіоелектронних об'єктів (від найбільш «дієвого» до найменш «дієвого» з погляду потенційної (ймовірної) ефективності впливу).

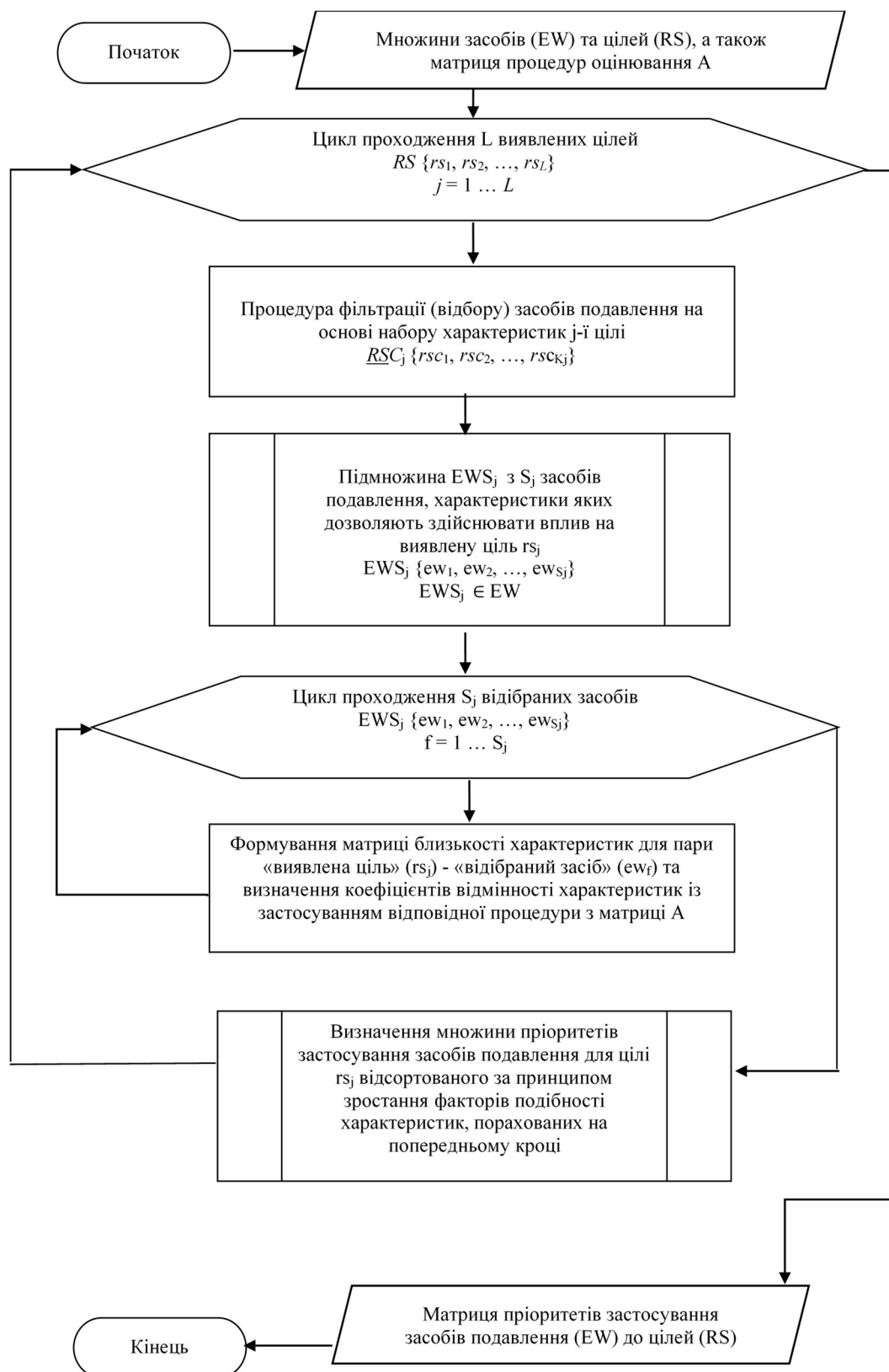


Рисунок 2 – Алгоритм визначення пріоритетів засобів радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі

Вхідними параметрами для алгоритму (рис. 2) є відповідні множини засобів подавлення (EW), що функціонують в тій чи іншій операційній зоні, а також сукупність цілей (RS), що виявлені на певний момент часу на відповідній ділянці лінії бойового зіткнення

засобами радіоелектронної розвідки. Також, в якості вхідного параметру використовується матриця процедур оцінювання, принципи формування якої було детально розглянуто на рис. 1.

Як показано на рис. 2, у межах першого (головного)

циклу алгоритм послідовно (цикл із лічильником j , де $j = (1, \dots, L)$) обробляє всі виявлені на визначений момент часу та на конкретній ділянці лінії бойового зіткнення ворожі цілі $RS\{rs_1, rs_2, \dots, rs_L\}$ для подавлення яких можуть бути сформовані відповідні задачі. Вихід з циклу відбувається по завершенні перебору всіх виявлених цілей.

На першому з вкладених у головний цикл кроків здійснюється фільтрація (відбір) засобів подавлення за принципом несумісності із виявленим радіоелектронним об'єктом. Водночас фільтрація здійснюється на основі набору характеристик $RSC_j\{rsc_1, rsc_2, \dots, rsc_{K_j}\}$, що притаманний саме цілі з номером j (чинне значення лічильника циклу). Зокрема, на цьому кроці мають бути відкинуті ті засоби подавлення, які (відповідно до своїх характеристик) жодним чином не можуть бути використані для подавлення відповідної (чинної за лічильником головного циклу) цілі.

Результатом виконання першого кроку є підмножина $EWS_j\{ew_1, ew_2, \dots, ew_{S_j}\}$ з S_j засобів подавлення, характеристики яких дають змогу здійснювати вплив на виявлену цілість rs_j . При цьому $EWS_j \in EW$. Одним з елементів такої фільтрації може бути фільтрація за ознакою наявності потенційної можливості впливу засобу на цілість. За таких умов мають виконуватися три базові умови (правила):

Правило 1. Між частотними характеристиками j -ої цілі та відповідного засобу подавлення існує принаймні один перетин.

Правило 2. Сектор подавлення від географічної точки розміщення засобу подавлення в напрямку виявленої цілі проходить через геометричне відображення діаграми спрямованості антени відповідного засобу. У разі, якщо засіб подавлення оснащений декількома антенами, це правило має виконуватися принаймні для однієї з антен, що використовується для створення завади в діапазоні для якого виявлено перетин на попередньому кроці.

Правило 3. Очікуваний рівень сигналу завади в умовній точці знаходження цілі, який розрахований із застосуванням певної моделі поширення електромагнітних хвиль, перевищує задане порогове значення хоча б для одного з можливих діапазонів впливу, що встановлені на двох попередніх кроках.

На наступному кроці (рис. 2) у межах циклу послідовного проходження (цикл із лічильником f , де $f = (1, \dots, S_j)$) відібраних засобів $EWS_j\{ew_1, ew_2, \dots, ew_{S_j}\}$ подавлення для кожної пари «виявлена цілість» (rs_j) – «відібраний засіб» (ew_f) здійснюється формування матриці близькості (подібності) характеристик цілей та засобів. Вихід з вкладеного циклу відбувається по завершенні проходження всіх відібраних засобів. Потім відбувається перехід на наступну ітерацію циклу проходження виявлених цілей. У разі завершення головного циклу відбувається вихід з алгоритму.

Матриця близькості формується в такий спосіб. Для кожної пари «виявлена цілість» (rs_j) – «відібраний

засіб» (ew_f) формується матриця B розміром $M_i \times K_j$, де M_i – кількість характеристик, що характеризує засіб подавлення, K_j – кількість характеристик, що характеризує цілість. Далі із застосуванням процедур, визначених для характеристик певного типу, матрицею процедур оцінювання A подібності визначаються значення елементів матриці близькості.

Правила (процедури) формування конкретних значень визначаються для кожної пари характеристик окремо. Водночас правила оцінювання можуть змінюватись завдяки використанню методів машинного навчання для підвищення ефективності моделі.

Остаточне значення фактору подібності визначається як сума всіх елементів матриці близькості і використовується як значення для визначення пріоритетів засобам (чим більше значення фактору тим більш пріоритетним є застосування саме цього засобу для подавлення відповідної цілі). Слід зазначити, що конкретний перелік характеристик, а також правила (процедури) формування конкретних значень можуть відрізнятися у різних системах управління засобами радіоелектронної боротьби та в межах цієї статті не розглядається.

Отже, проходження двох вкладених циклів (рис. 2) дає змогу визначити множину пріоритетів застосування засобів подавлення для кожної виявленої цілі, призначену за принципом зростання факторів подібності характеристик. Це, у свою чергу, дає змогу отримати в якості вихідного результату матрицю пріоритетів застосування засобів подавлення (EW) до цілей (RS).

Реалізацію алгоритму, наведеного на рис. 2 розглянемо на прикладі. Оперативне тактичне угруповання (далі – ОТУ) веде оборонну операцію у визначеному районі, з відносно прямою лінією фронту. Противник успішно зупинений на ділянці, що обмежена річкою та залізничною колією на насипі. Противник намагається форсувати придатну для переходу на техніці та пішому переході ділянку. Частково отримав успіх на території сусіда ліворуч та створив плацдарм для розвитку свого успіху на нашому лівому фланзі. Веде постійний вогневий контроль смуги забезпечення на всю ширину та глибину ОТУ. Напруженість використання ударних дронів, FPV-дронів, дронів зі скидами та розвідувальних дронів – до 60 вильотів на годину. Здійснює постійний моніторинг за допомогою БПЛА оперативного рівня на глибину до 10 км з інтенсивністю до 8 літако-вильотів на годину. Має перевагу через контроль своїми силами домінуючих висот на місцевості.

Засобами радіоелектронної розвідки було виявлено радіоелектронний об'єкт, що має такі ідентифіковані характеристики: тип – Орлан-10; частотний діапазон каналів управління 300–500 МГц; система навігації ГЛОНАСС / GPS (L1) [5]. У певний момент часу на відповідній ділянці лінії бойового зіткнення функціонує 5 засобів подавлення характеристики яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики засобів подавлення

Характеристика	Засіб 1	Засіб 2	Засіб 3	Засіб 4	Засіб 5
Подавлення навігації ГЛОНАСС / GPS	-	L1, L2	L1	-	L1, L2, L5
Частотний діапазон	300–400 МГц	300–500 МГц	420–720 МГц	2,4 ГГц 5,8 ГГц	500–1500 МГц
Підтверджена ефективність проти таких безпілотних літальних апаратів (БПЛА)	FPV-управління, Орлан-10	Орлан-10	FPV-управління	БПЛА виробництва DJI [6]	Орлан-10, FPV – відео, AUTEL [7]
Відстань до виявленої цілі, км	3	17	5	4	8
Виміряна потужність випромінювання, dBm	46,98	43,97	46,98	50	50

У межах виконання процедури фільтрації (відбору) засобів подавлення на основі набору характеристик зазначеної вище цілі перевірено виконання трьох основних умов:

наявність перетину між частотними діапазонами засобів з табл. 1 та цілі;

наявність перекриття між діаграмою спрямованості антен засобів подавлення та геометричним розташуванням цілі у просторі;

можливість впливу засобу на цілі (будемо вважати що мінімально достатній показник рівня потужності сигналу, що утворюється тим чи іншим засобом подавлення в точці розташування цілі становить не менш ніж -60 dBm).

Розглядаючи виконання першого правила, слід зазначити, що всі засоби, наведені у табл. 1 крім Засобу 4 мають перетин по частоті із радіоелектронним об'єктом. Для спрощення, в межах цієї статті, будемо вважати що всі антени перелічених засобів мають кругові діаграми спрямованості і, таким чином, для будь-якої з антен має виконуватись умова поширення електромагнітних хвиль у напрямку, що утворений від географічної точки розміщення засобу подавлення до виявленої цілі через геометричне відображення діаграми спрямованості антени відповідного засобу.

Для оцінювання можливості впливу засобу на цілі використаємо спрощений варіант моделі поширення електромагнітних хвиль у вільному просторі (за умов коли засіб подавлення і цілі знаходяться в зоні прямої видимості) [8]. Відповідно до такої моделі показник рівня потужності сигналу Received Signal Strength Indicator (RSSI) [9], що утворюється тим чи іншим засобом подавлення в точці розташування цілі може бути визначений за виразом:

$$RSSI = P_t + G_t - 32.4 - 20 \log F - 20 \log d + G_r, \quad (2)$$

де $RSSI$ – рівень потужності сигналу, що фіксується приймальним трактом радіоелектронного об'єкту (цілі) в результаті впливу засобу подавлення на частоті F , dBm;

P_t – виміряна потужність сигналу завади, dBm;

G_t – максимальний коефіцієнт підсилення антени передавача (для головного напрямку випромінювання), dBi;

G_r – максимальний коефіцієнт підсилення антени приймача (для резонансної частоти та головного

напрямку випромінювання), dBi;

F – частота, МГц;

d – відстань, км.

Водночас, $L = 32.4 + 20 \log F + 20 \log d$ – це втрати вільного простору в dB (коли між антенами засобу подавлення та цілі зона Френеля [10] є відкритою). Для спрощення, вважатимемо, що коефіцієнти підсилення антен у зазначеній моделі не враховуються і становлять 1 dBi як для засобів подавлення, так і для приймального тракту цілі. Проведемо розрахунки за формулою (2) для кожного із засобів з табл. 1 (крім Засобу 4, який не має перетину по частоті із радіоелектронним об'єктом), використовуючи центральну частоту перетинів діапазонів кожного з піддіапазонів засобів та цілі для:

Засобу 1 на частоті 350 МГц:

$$RSSI = 49,98 + 1 - 32.4 - 20 \log(350) - 20 \log(3) + 1 = -43,8 \text{ dBm};$$

Засобу 2 на частоті 400 МГц:

$$RSSI = 43,97 + 1 - 32.4 - 20 \log(400) - 20 \log(17) + 1 = -63,1 \text{ dBm};$$

Засобу 3 на частоті 460 МГц:

$$RSSI = 46,98 + 1 - 32.4 - 20 \log(460) - 20 \log(5) + 1 = -50,7 \text{ dBm};$$

Засіб 5 на частоті 400 МГц:

$$RSSI = 50 + 1 - 32.4 - 20 \log(400) - 20 \log(17) + 1 = -57,1 \text{ dBm}.$$

Проведені розрахунки демонструють неможливість впливу Засобу 2 на цілі через те, що результат є меншим за встановлену межу в -60 dBm. Отже, методом попередньої фільтрації було відібрано 3 засоби подавлення (Засіб 1, Засіб 3 і Засіб 5).

У таблицях 2–4 наведені приклади матриць близькості, що сформовані для кожного з перелічених вище засобів. Аналіз таблиць свідчить що для несумісних (непов'язаних) характеристик (наприклад, «частотний діапазон каналів управління» та «подавлення навігації») встановлені нульові значення «0» відповідних елементів матриці. В свою чергу, якщо засіб подавлення за своїми характеристиками здатний повністю «перекрити» той чи інший частотний діапазон роботи безпілотного літального апарату, то для таких елементів матриці встановлені одиничні значення «1». Для випадків, коли «перекриття» не є повним встановлюється відповідне значення між «0» та «1».

Таблиця 2

Приклади матриць близькості для Засобу 1

Характеристики засобу подавлення		Характеристики цілі		
		1	2	3
		Тип	Частотний діапазон каналів управління	Система навігації
1	Подавлення навігації	0	0	0
2	Частотний діапазон	0	0,5	0
3	Ефективний проти	1	0	0
Сума ненульових значень		1,5		

Таблиця 3

Приклади матриць близькості для Засобу 3

Характеристики засобу подавлення		Характеристики цілі		
		1	2	3
		Тип	Частотний діапазон каналів управління	Система навігації
1	Подавлення навігації	0	0	1
2	Частотний діапазон	0	0,4	0
3	Ефективний проти	0	0	0
Сума ненульових значень		1,4		

Таблиця 4

Приклади матриць близькості для Засобу 5

Характеристики засобу подавлення		Характеристики цілі		
		1	2	3
		Тип	Частотний діапазон каналів управління	Система навігації
1	Подавлення навігації	0	0	1
2	Частотний діапазон	0	0	0
3	Ефективний проти	1	0	0
Сума ненульових значень		2		

Так, наприклад, для Засобу 1 (табл. 2) значення елементу матриці, що знаходиться на перетині характеристики безпілотного літального апарату «Частотний діапазон каналів управління» та характеристики засобу «Частотний діапазон» встановлене значення «0,5» через те, що частотний діапазон Засобу 1 (300–400 МГц) лише на 50% перекриває частотний діапазон каналів управління виявленої цілі (300–500 МГц). Зокрема «перекрито» лише 1000 МГц з потрібних 200 МГц частотного діапазону каналів управління.

У свою чергу для перетину характеристики цілі з назвою «Тип» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Подавлення навігації» встановлене нульове значення через їх несумісність (непов'язаність) між собою. Тобто відповідна характеристика цілі ніяким чином не може вплинути на вибір засобу подавлення через відповідну характеристику засобу.

За аналогічним принципом нульове значення встановлене і для характеристики цілі з назвою «Частотний діапазон каналів управління» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Подавлення навігації». На відміну від попередніх випадків нульове значення для перетину характеристики цілі з назвою «Система навігації» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Подавлення навігації» встановлене через повну відсутність у Засобу 1

можливостей подавлення навігації. Водночас відомо, що виявлений безпілотний літальний апарат має систему навігації ГЛОНАСС/GPS (L1).

Аналогічно до попередньо викладених принципів, встановлені нульові значення для перетину характеристики цілі з назвою «Тип» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Частотний діапазон», характеристики цілі з назвою «Система навігації» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Частотний діапазон», характеристики цілі з назвою «Частотний діапазон каналів управління» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Ефективний проти», а також характеристики цілі з назвою «Система навігації» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Ефективний проти». За таких умов, одиничне значення «1» для перетину характеристики цілі з назвою «Тип» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Ефективний проти» встановлене через підтверджену ефективність Засобу 1 проти безпілотних літальних апаратів типу «Орлан-10» (див. табл. 1).

Натомість, для Засобу 3 (табл. 3) значення елементу матриці, що знаходиться на перетині характеристики безпілотного літального апарату «Частотний діапазон каналів управління» та характеристики засобу «Частотний діапазон» встановлене значення «0,4» через те, що частотний діапазон Засобу 3 (420–720 МГц) лише на 40% перекриває частотний діапазон каналів

управління виявленої цілі (300–500 МГц). Зокрема, «перекрито» лише 80 МГц з потрібних 200 МГц частотного діапазону каналів управління. Єдине одиничне значення «1» для перетину характеристики цілі з назвою «Система навігації» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Подавлення навігації» встановлене через те, що Засіб 3 (табл. 1) за своїми характеристиками є спроможним здійснювати подавлення сигналів навігації ГЛОНАСС/GPS (L1).

У всіх інших випадках характеристики цілі та засобу є або несумісними (непов'язаними), або, як, наприклад, для перетину характеристики цілі з назвою «Тип» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Ефективний проти» відсутнє підтвердження ефективності роботи Засобу 3 проти безпілотного літального апарату відповідної моделі (табл. 1). Через це, відповідно до визначених вище правил, для перетину таких характеристик встановлюються нульові значення.

Як видно з табл. 4 матриця близькості для Засобу 5 містить два одиничних значення. Перше одиничне значення перетину характеристики цілі з назвою «Система навігації» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Подавлення навігації» встановлене через спроможність Засобу 5 (табл. 1) подавлювати всі види навігації ГЛОНАСС / GPS (L1, L2, L5), включно із тим, що застосовується виявленням безпілотним літальним апаратом.

Друге одиничне значення встановлене для значення перетину характеристики цілі з назвою «Тип» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Ефективний проти» через те, що як і для випадку із Засобом 1 безпілотний літальний апарат «Орлан-10» рахується серед таких, проти яких застосування Засобу 5 має підтверджену ефективність (табл. 1).

У решти випадків, характеристики цілі та засобу є або несумісними (непов'язаними), або, як, наприклад, для перетину характеристики цілі з назвою «Частотний діапазон каналів управління» з характеристикою засобу подавлення під назвою «Частотний діапазон» відсутній перетин між частотними діапазонами роботи засобу подавлення та цілі (табл. 1). Через це, відповідно до визначених вище правил, для перетину таких характеристик також встановлюються нульові значення.

Отже, значення факторів подібності для всіх трьох засобів можуть бути визначені як суми ненульових значень елементів відповідних матриць:

$$\text{Засіб 1: } 0,5 + 1 = 1,5;$$

$$\text{Засіб 3: } 1 + 0,4 = 1,4;$$

$$\text{Засіб 5: } 1 + 1 = 2.$$

Зважаючи на значення, що використані у наведеному вище прикладі множина пріоритетів застосування засобів подавлення для відповідної цілі буде виглядати так: Засіб 5 (2); Засіб 1 (1,5); Засіб 3 (1,4).

Для формування завдання на подавлення цілі з урахуванням пріоритетності засобам застосовується наказ начальника (командира) обслугам (екіпажам) підпорядкованих засобів радіоелектронної боротьби здійснити бойову роботу по визначеній цілі.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Розроблений алгоритм визначення пріоритетів засобам радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі дає змогу запровадити координацію дій між різними засобами при виконанні завдань на подавлення, що ставляться за допомогою автоматизованих систем управління засобами радіоелектронної боротьби.

Запропонований підхід до фільтрації та ранжування засобів радіоелектронної боротьби базується на об'єктивних характеристиках цілей та засобів із використанням алгоритму визначення пріоритетів засобів радіоелектронної боротьби для подавлення конкретної цілі за ключовими параметрами, що дає змогу обґрунтовано обирати оптимальні комбінації засобів подавлення, що мають бути застосовані для знешкодження цілі. Модель ураховує не лише відповідність параметрів засобу та цілі, але й додаткові тактичні фактори, такі як пріоритет цілі, зайнятість засобів та можливість застосування декількох типів засобів радіоелектронної боротьби для подавлення певного типу цілі, що значно підвищує гнучкість та адаптивність систем управління засобами радіоелектронної боротьби.

Підготовлена теоретична база для подальшого оцінювання ефективності групового застосування засобів радіоелектронної боротьби. У майбутніх наукових роботах можна дослідити інтеграцію коригувань на основі навчання до оцінки схожості та розробку прототипу програмного забезпечення для автоматизованої підтримки прийняття рішень в області електронної війни.

Список бібліографічних посилань

1. Cai B., Li H., Zhang N. et al. A cooperative jamming decision-making method based on multi-agent reinforcement learning. *Auton. Intell. Syst.* 2025. № 5. P. 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43684-025-00090-4>. 2. ResearchGate. The Prospect of Electronic Warfare in the 21st Century: An Analysis of Electronic Warfare Equipment Innovation and Its Strategic Impact Based on the Fusion of Quantum Communication and Artificial Intelligence. URL: <https://www.researchgate.net/publication/386269786> (accessed: 11 May 2025). 3. Ibrahim A. et al. A Drone Path Planning Method Based on Remote Sensing and 3D Environmental Reconstruction. *Remote Sensing*. 2023. № 15(12). P. 3108. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/12/3108> (accessed: 11 May 2025). 4. Yao D. et al. Multi-Target Electromagnetic

Source Threat Ranking Model Based on Spectral Characteristics. *Mathematics*. 2024. № 12(5). P. 691. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/5/691> (accessed: 11 May 2025). 5. Kaplan E. D., Hegarty C. J. Understanding GPS: Principles and Applications. 2nd ed., Artech House, 2005. 6. DJI. A Guide to Drone Communication Frequencies. URL: <https://www.dji.com> (accessed: 11 May 2025). 7. Autel Robotics. Frequency Bands and Transmission Technologies. URL: <https://auteldrones.com> (accessed: 11 May 2025). 8. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed., Prentice Hall, 2002. 9. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005. 10. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed., Wiley, 2016.

ALGORITHM FOR PRIORITIZATION OF ELECTRONIC WARFARE ASSETS FOR SUPPRESSION OF SPECIFIC RADIO ELECTRONIC OBJECT

SKORETSKYI Maxim, Command of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0008-6721-291X>

KAPTUR Vadym, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Separate Special Centre for Electronic Support of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4200-1151>

BEREZKIN Andriy, Candidate of Technical Sciences, Separate specialised centre for electronic support of Command of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-3087-1184>

DURNEV Vitaliy, Separate Special Centre for Electronic Support of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-1506-3301>

Formulation of the problem in general. This article presents a novel algorithm for prioritising electronic warfare assets to suppress specific radio electronic objects, considering the similarity of their technical characteristics with those of the identified targets and real-time operational constraints.

Research methods. When writing the article, the technique of formalised similarity analysis was applied, which allows assessing the potential effectiveness of the impact of electronic warfare means on the receiving paths of detected electronic means. The proposed approach includes a pre-filtering algorithm and forming a proximity matrix based on regulatory compatibility coefficients.

Literature review. The review of recent studies highlights the growing need for adaptive and data-driven coordination strategies in modern electronic warfare. Emerging concepts involving AI and quantum communications and threat ranking models confirm the relevance of multi-criteria decision-making methods and justify the development of new prioritisation algorithms for dynamic environments.

Research results. The article proposes an algorithm for ranking electronic warfare assets relative to each detected target, using a composite similarity score. The algorithm accounts for frequency overlap, sector geometry, signal strength at the emission source, resource availability, and feasibility of group engagement. A numerical case study illustrates the step-by-step implementation and resulting priority vector.

Research novelty. The proposed algorithm describes a new way of prioritising electronic warfare assets, which allows the choice of assets to adapt to dynamic changes in the combat situation. For the first time, the formalised similarity analysis method is applied to transform technical parameters into a metric of interaction effectiveness.

Theoretical and practical significance. The results have practical value for battlefield-level command and control systems. The model enhances operational management capabilities by improving the efficiency of electronic warfare resource deployment, especially in high-density electromagnetic environments.

Conclusions and future work. The developed prioritisation algorithm improves the coordination and deployment of electronic warfare systems. Future work may explore the integration of learning-based adjustments to similarity scoring and the development of a software prototype for automated electronic warfare decision support.

Keywords: electronic warfare, asset prioritisation, suppression of radio electronic objects, filtering algorithm, similarity matrix, tactical characteristics.

References

1. Cai B., Li H., Zhang N. et al., (2025). A cooperative jamming decision-making method based on multi-agent reinforcement learning. *Auton. Intell. Syst.* 5, 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43684-025-00090-4>.
2. ResearchGate. The Prospect of Electronic Warfare in the 21st Century: An Analysis of Electronic Warfare Equipment Innovation and Its Strategic Impact Based on the Fusion of Quantum Communication and Artificial Intelligence [online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/386269786> [Accessed: 11 May 2025].
3. Ibrahim, A. et al., (2023). A Drone Path Planning Method Based on Remote Sensing and 3D Environmental Reconstruction [online]. *Remote Sensing*. 15(12), 3108. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/12/3108> [Accessed: 11 May 2025].
4. Yao, D. et al., (2024). Multi-Target Electromagnetic Source Threat Ranking Model Based on Spectral Characteristics [online]. *Mathematics*. 12(5), 691. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/5/691> [Accessed: 11 May 2025].
5. Kaplan, E. D., Hegarty, C. J. Understanding GPS: Principles and Applications. 2nd ed., Artech House, 2005.
6. DJI. A Guide to Drone Communication Frequencies [online]. Available at: <https://www.dji.com> [Accessed: 11 May 2025].
7. Autel Robotics. Frequency Bands and Transmission Technologies [online]. Available at: <https://auteldrones.com>. [Accessed: 11 May 2025].
8. Rappaport, T. S., (2002). Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed., Prentice Hall.
9. Goldsmith, A., (2005). Wireless Communications. Cambridge University Press.
10. Balanis, C. A., (2016). Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed., Wiley.

Рукопис надійшов до редакції 19.05.2025
 Рукопис прийнято до друку після рецензування 08.07.2025
 Дата публікації 29.08.2025