

Тарасенко Є.В.<https://orcid.org/0009-0004-0506-6997>Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ СУПРОВОДУ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕШКОД

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та завадостійкості радіолокаційних систем у задачах супроводу повітряних цілей, що ускладнюються зростанням щільності повітряного руху, появою малорозмірних і малопомітних об'єктів та застосуванням шумових і імітаційних перешкод. Особливу увагу зосереджено на початковому етапі функціонування РЛС – від первинного виявлення до зав'язки, підтвердження траєкторії та передачі цілі на подальші рівні управління. Показано, що помилки на цьому етапі мають накопичувальний характер і призводять до втрат цілей, формування хибних трас та перевантаження каналів обробки, тому статичні імовірнісні критерії є недостатніми без урахування часових обмежень реального часу.

Запропоновано та мотивовано використання інтегрального ймовірно-часового показника «час взаємодії РЛС з об'єктом стеження» як узагальненої характеристики, що синтезує імовірності успіху/зривів на етапах пошуку, зав'язки й підтвердження, а також випадкові затримки, зумовлені режимом огляду, обробкою та перешкодами. Наведено класифікацію показників ефективності й завадостійкості (імовірнісні, часові, просторові та комплексні) і показано їх взаємозв'язок у сценаріях з маневруванням цілей та неповнотою вимірювань.

Виконано огляд і порівняння класів математичних моделей процесів функціонування РЛС у завадовому середовищі. Обґрунтовано доцільність комплексного підходу, у якому макрорівнева модель початкового супроводу реалізується у вигляді стохастичної GERT-мережі з імовірностями переходів і розподілами тривалостей дуг та можливістю циклів повторного захоплення, а мікрорівневі процедури оцінювання стану цілі описуються фільтром Калмана та його модифікаціями з перспективою інтелектуального адаптивного налаштування параметрів. Сформульовано вимоги до нової моделі та методу, орієнтованих на аналітичне/напіваналітичне оцінювання розподілу часу взаємодії у різних перешкодових сценаріях і придатність для систем реального часу.

Ключові слова: радіолокаційна система, супровід повітряних цілей, завадостійкість РЛС, стохастичні моделі, фільтр Калмана, GERT-мережі, марковські процеси, траєкторія, алгоритми супроводу.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного розвитку авіації, безпілотних літальних апаратів та високоточної зброї радіолокаційні системи (РЛС) залишаються базовим інструментом спостереження за повітряним простором і управління повітряною обстановкою. Вони забезпечують виявлення, розпізнавання та супроводження повітряних цілей, формують вхідну інформацію для систем протиповітряної оборони, управління польотами, навігації та моніторингу критично важливих об'єктів. З огляду на зростання щільності повітряного руху, появу малорозмірних і малопомітних цілей, а також широке використання активних і пасивних засобів радіоелектронної протидії, до РЛС висува-

ються підвищені вимоги щодо точності, швидкості та завадостійкості.

Особливої актуальності набуває аналіз так званого початкового етапу функціонування РЛС у задачі супроводу повітряних цілей. Під початковим етапом у даній роботі розуміється сукупність процесів від первинного виявлення об'єкта до формування та підтвердження його траєкторії, придатної для подальшого використання в системі управління. Тому, розглянута проблема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи багатьох вчених зосереджені на підвищенні завадостійкості РЛС у складних умовах, де перешкоди впливають як на етап виявлення, так і на процедури зав'язки/підтвердження траєкто-



рій та подальший супровід. У напрямі адаптивного виявлення активно розвиваються підходи на основі узагальнених критеріїв (GLRT/Wald/Rao) для сценаріїв «clutter + jamming», що дозволяють формально враховувати параметричну невизначеність та структуру перешкод під час прийняття рішень [1-2].

Значну увагу приділяють імітаційним (descriptive) перешкодам, які формують хибні позначки та псевдоцілі й ускладнюють відбір достовірних вимірювань на старті супроводу. Актуальні публікації аналізують механізми формування таких перешкод і демонструють, що стабільність супроводу критично залежить від якості етапів track initiation/association і фільтрації в заводовому середовищі [3]. Паралельно з'являються оглядові роботи, які систематизують сучасні антидезаційні стратегії (prevention/detection/mitigation) та підкреслюють зсув акценту від «локальної» заводостійкості до системної стійкості ланцюжка «виявлення–ідентифікація–супровід» [4].

У задачах супроводу маневруючих цілей поширеним стандартом залишаються калманівські методи та їх модифікації, зокрема IMM та схеми з імовірнісною асоціацією вимірювань, що підвищують робастність у середовищах із завадами та «чужими» вимірюваннями (clutter) [5]. Водночас для слабких/малопомітних цілей активно розвивається підхід track-before-detect (зокрема багатоканальні процедури), який поєднує детекцію й супровід та дає вигоду за низького SNR [6].

Окремий сучасний тренд – інтеграція інтелектуальних методів для адаптації параметрів (порогів, режимів огляду, налаштувань фільтрації) під поточну заводову обстановку. Зокрема, публікації прямо орієнтуються на початковий етап супроводу та підкреслюють потребу в динамічній зміні параметрів обробки залежно від рівня перешкод і надійності сигналу [7]. Узагальнюючі огляди нейромережових підходів до супроводу також фіксують зростання ролі гібридних схем «NN + (Kalman/IMM)» для підсилення стійкості та зменшення кількості хибних трас [8].

Водночас, попри активний розвиток детекторів, антидезаційних методів і фільтрації, у публікаціях часто домінують локальні показники, тоді як інтегральні ймовірнісно-часові характеристики процесу «від першої позначки до стійкого супроводу/зриву» формалізуються рідше. Для заповнення цієї прогалини перспективними є мережеві стохастичні моделі, зокрема GERT-підхід, який природно описує альтернативні шляхи та цикли повторних спроб із випадковими тривалостями.

У суміжних задачах уже показана придатність GERT для аналізу розподілів часу в процесах із зворотними зв'язками [9-10].

Постановка завдання. Сучасний етап розвитку радіолокаційних систем супроводу повітряних цілей характеризується зростанням складності заводової обстановки, збільшенням щільності повітряного руху та появою мало-розмірних і малопомітних об'єктів. За цих умов вирішальне значення для забезпечення заводостійкості та ефективності функціонування РЛС має початковий етап супроводу цілей – від моменту первинного виявлення до формування та підтвердження траєкторії. Помилки, допущені на цьому етапі, мають накопичувальний характер і суттєво впливають на подальшу якість супроводу.

Аналіз наукових публікацій і існуючих підходів показує, що традиційні локальні показники ефективності не забезпечують повної та узгодженої оцінки роботи РЛС на початковому етапі супроводу в умовах навмисних перешкод. Крім того, наявні класи математичних моделей процесів функціонування РЛС – детерміновані, статистичні, марковські, мережеві, фільтраційні та інтелектуальні – здебільшого описують окремі аспекти задачі та не дають цілісного ймовірнісно-часового уявлення про процес початкового супроводу.

У зв'язку з цим виникає науково-методична проблема відсутності узагальненого підходу до оцінювання та моделювання заводостійкості РЛС на початковому етапі супроводу, який би поєднував макрорівневий опис послідовності станів супроводу з мікрорівневою траєкторною обробкою та враховував вплив навмисних перешкод.

Метою даної роботи є систематизація та критичний аналіз сучасних показників ефективності й математичних моделей процесів початкового супроводу повітряних цілей у радіолокаційних системах, а також обґрунтування доцільності використання інтегральних ймовірнісно-часових характеристик, зокрема часу взаємодії РЛС з об'єктом стеження, як узагальненого показника заводостійкості.

Для досягнення поставленої мети в статті необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати сучасні вимоги до РЛС супроводу повітряних цілей в умовах навмисних перешкод;
- узагальнити та класифікувати показники ефективності й заводостійкості, що застосовуються на початковому етапі супроводу;
- виконати критичний огляд існуючих класів математичних моделей процесів функціонування

РЛС та визначити їх переваги й обмеження щодо опису початкового етапу супроводу;

- обґрунтувати перспективність поєднання стохастичних мережеских моделей макрорівня з фільтраційними та інтелектуальними методами мікрорівня;

- сформулювати методологічні вимоги до побудови нових моделей і методів аналізу завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу.

Результати огляду створюють методичну основу для подальшої розробки комплексної ймовірно-часової моделі початкового супроводу повітряних цілей у радіолокаційних системах.

Виклад основного матеріалу

Сучасні вимоги до радіолокаційних систем у задачах супроводу повітряних цілей

Типовий вигляд індикаторного поля кругового огляду сучасної РЛС із відображенням трас повітряних цілей, задових відміток та елементів інтерфейсу оператора наведено на рисунку 1.

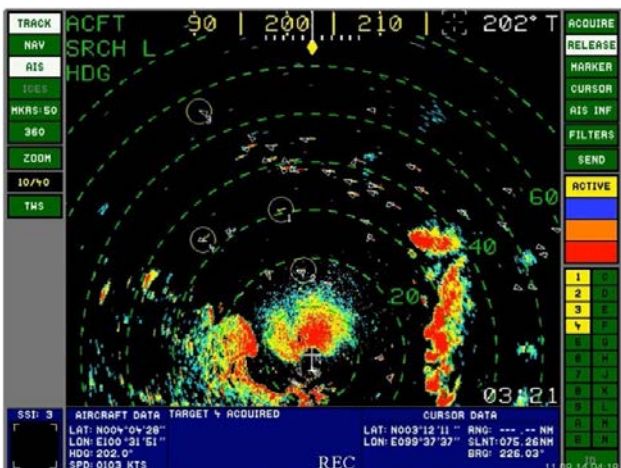


Рис. 1. Приклад кругового індикатора РЛС у режимі track-while-scan із відображенням декількох повітряних цілей

Класичні критерії ефективності радіолокаційних систем, імовірність виявлення цілі, імовірність хибної тривоги, точність визначення координат, пропускна здатність тощо, сьогодні розглядаються не ізольовано, а в контексті виконання складних комплексних задач управління. У реальних сценаріях функціонування залучені різноманітні об'єкти: керовані і некеровані літаки, крилаті та балістичні ракети, безпілотні літальні апарати, помилкові цілі. Це вимагає від РЛС не лише високої чутливості та роздільної здатності, але й здатності забезпечувати стабільний, безперервний супровід траєкторій у режимі реального часу, включно із ситуаціями маневрування та зміни динаміки руху.

Особливої актуальності набуває аналіз так званого початкового етапу функціонування РЛС у задачі супроводу повітряних цілей. Саме на цьому етапі виконується:

- виявлення об'єкта на фоні завад і шумів;
- зав'язка траєкторії, тобто групування послідовних позначок, які з достатньою достовірністю належать одній і тій самій цілі;

- підтвердження траєкторії за результатами кількох оглядів простору та прийняття рішення про доцільність її подальшого супроводження.

Узагальнений інформаційний потік на початковому етапі функціонування РЛС, від появи первинних позначок до формування підтвердженої траєкторії, придатної для подальшого супроводу та управління, показано на рисунку 2.

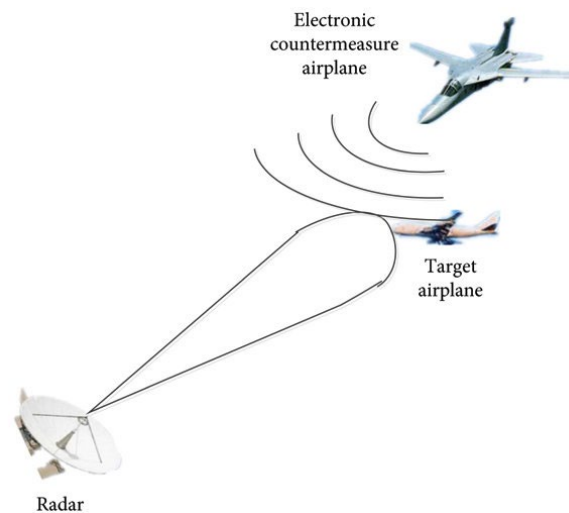


Рис. 2. Схематичне зображення геометрії активної радіоелектронної протидії: розташування літака-постановника перешкод відносно РЛС і повітряної цілі

Помилки на етапі початкового супроводу мають накопичувальний характер: некоректна зав'язка або запізниті підтвердження траєкторії призводять до втрати цілі, зростання кількості хибних трас, перевантаження каналів обробки та погіршення роботи всієї системи. Тому алгоритми початкового супроводу повинні бути стійкими до пропусків вимірювань, варіацій параметрів руху, завад і обмежених обчислювальних ресурсів.

Додатковою складністю є навмисний перешкодовий вплив. Шумові завади знижують імовірність виявлення слабких сигналів, а імітаційні та структуровані перешкоди формують хибні позначки, що ускладнює оцінювання достовірності вимірювань і підвищує ризик помилкових рішень щодо зав'язки та підтвердження траєкторій.

За таких умов вирішального значення набувають часові аспекти функціонування РЛС: тривалість виявлення, інтервал стійкої зав'язки та збереження коректного супроводу. Ключовим стає не лише факт виявлення, а здатність системи забезпечити достатній «час взаємодії» з ціллю, протягом якого інформація залишається достовірною.

Це зумовлює вимоги до адаптивних і робастних алгоритмів початкового супроводу, узгоджених з часовими обмеженнями реального часу. У підсумку сучасні РЛС мають забезпечувати високу достовірність і стійкість виявлення та супроводу в умовах інтенсивних завад, що потребує моделей і методів, які враховують імовірнісну природу процесів, їх часову структуру та вплив перешкод на «час взаємодії» з ціллю.

Дослідження показників ефективності та завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу

Аналіз сучасних вимог до радіолокаційних систем показує, що узагальнені формулювання на кшталт «висока завадостійкість» або «надійний супровід» є недостатніми для інженерного проектування. Для обґрунтованого вибору структури РЛС і алгоритмів обробки необхідна формалізована система кількісних показників, орієнтована саме на початковий етап супроводу повітряних цілей, де важливі швидкість переходу до стійкого супроводу та чутливість до зривів під дією завад.

Традиційно ефективність РЛС описується імовірнісними показниками: імовірностями виявлення, хибної тривоги, зав'язки траєкторії, зриву захоплення, зриву супроводу та передачі цілі на наступний рівень управління. Вони характеризують стійкість процесу супроводу до випадкових флуктуацій і навмисних перешкод, однак не відображають своєчасності прийняття рішень.

Тому важливою є група часових показників, до яких належать час пошуку, виявлення, зав'язки та підтвердження супроводу, а також час до можливого зриву. В умовах інтенсивних перешкод саме часові затримки можуть стати критичними, оскільки затягування процесу супроводу знижує ефективність управління.

Доповнюють оцінку просторові показники, що визначають зону виявлення, роздільну здатність і точність оцінювання координат. На початковому етапі вони визначають область невизначеності положення цілі та впливають на ймовірність формування хибних трас, особливо за наявності завад.

Усі ці групи показників тісно взаємопов'язані, тому доцільним є використання інтегральних характеристик. Однією з них є узагальнений

показник часу взаємодії РЛС з ціллю на початковому етапі супроводу. Під часом взаємодії розуміється випадкова величина, що описує тривалість активної роботи системи з конкретною ціллю – від початкового виявлення до переходу в режим стійкого супроводу або до зриву під дією завад.

Час взаємодії інтегрує імовірнісні, часові та просторові аспекти функціонування РЛС, враховуючи повторні спроби зав'язки, тимчасові втрати цілі та вплив перешкод. Аналіз його розподілу дозволяє оцінити не лише середню тривалість взаємодії, але й імовірність своєчасного досягнення стійкого супроводу. З позицій завадостійкості цей показник є зручним інструментом для порівняння різних алгоритмів і сценаріїв перешкодового впливу та створює основу для подальшої ймовірно-часової формалізації процесу.

Отже, система показників ефективності та завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу, яка розглядається, включає:

- класичні імовірнісні показники виявлення та зривів;
- часові характеристики процесів пошуку, зав'язки й супроводу;
- просторові показники точності та зони спостереження;
- узагальнений інтегральний показник часу взаємодії, що поєднує всі перелічені аспекти в єдиній ймовірно-часовій рамці.

Саме навколо цього інтегрального показника в подальших дослідженнях буде будуватись математична GERT-модель функціонування РЛС в умовах навмисних перешкод, а також виконуватись порівняльний аналіз різних варіантів параметрів і сценаріїв роботи системи.

Огляд та класифікація математичних моделей процесів функціонування РЛС в умовах перешкод

Аналіз ефективності та завадостійкості РЛС неминуче пов'язаний із вибором математичних моделей, які описують процеси виявлення та початкового супроводу повітряних цілей. Від типу моделі залежить не лише точність оцінок, а й можливість отримання аналітичних виразів для ймовірно-часових характеристик, зокрема розподілу часу взаємодії РЛС із ціллю в умовах перешкод.

Класичні детерміновані та статистичні моделі (енергетичні рівняння радіолокації, розподіли сигналів і шумів, теорія виявлення) дозволяють коректно оцінювати локальні показники, такі як імовірність виявлення за заданого співвідношення сигнал/шум. Однак вони, як правило, описують

одноразовий акт прийняття рішення й не враховують послідовний характер процесу зав'язки та підтвердження траєкторії з можливими пропусками та тимчасовими втратами цілі.

Марковські та мережеві моделі подають функціонування РЛС у вигляді послідовності станів і переходів між ними, що дозволяє враховувати повторюваність подій і отримувати узагальнені ймовірнісні характеристики, зокрема ймовірність досягнення стійкого супроводу. Водночас часові аспекти в таких моделях часто задаються спрощено або потребують переходу до напівмарковських схем, що ускладнює аналіз.

Подальшим розвитком мережевого підходу є застосування стохастичних мереж, зокрема GERT-мереж, які дають змогу одночасно враховувати ймовірності переходів, часові затримки та наявність циклів, що відповідають повторним спробам зав'язки або поверненню до пошуку. Це робить їх зручним інструментом для опису «життєвого циклу» цілі на початковому етапі взаємодії з РЛС та дослідження розподілу часу взаємодії.

У задачах супроводу траєкторій широко застосовуються фільтр Калмана та його модифікації, які забезпечують ефективне оцінювання координат і швидкостей цілі в умовах шумів і пропусків вимірювань. Проте ці методи зосереджені на мікрорівні обробки вже сформованої послідовності вимірювань і не описують системний процес переходу від пошуку до стійкого супроводу з урахуванням ймовірнісних подій зав'язки та зриву.

Інтелектуальні та машинно-навчальні методи забезпечують адаптацію до складних заводових умов і використовуються для класифікації, оптимізації режимів та налаштування параметрів РЛС. Водночас вони переважно орієнтовані на локальні задачі й не дають прозорих аналітичних виразів для інтегральних часових характеристик, що зумовлює залежність оцінок від імітаційного моделювання.

Таким чином, жоден із підходів окремо не забезпечує повного опису початкового етапу супроводу в термінах інтегральних ймовірнісно-часових показників, що обґрунтовує доцільність використання моделей, здатних поєднувати ймовірнісну та часову структуру процесу.

Аналіз контексту показав, що доцільним видається комплексний підхід, у якому макрорівнева ймовірнісно-часова модель процесу початкового супроводу будується на основі GERT-мережі, а мікрорівневі процедури оцінювання стану цілі реалізуються за допомогою фільтра Калмана та інтелектуальних модулів налаштування пара-

метрів. Така інтеграція дозволяє, з одного боку, отримати аналітичні характеристики розподілу часу взаємодії РЛС з об'єктом стеження в різних перешкодових сценаріях, а з іншого врахувати реальні можливості алгоритмів супроводу та їх адаптивну поведінку.

Саме на розробку й дослідження подібної інтегрованої моделі спрямовані подальші роботи, де пропонується конкретна GERT-структура початкового етапу, узгоджена з застосуванням фільтра Калмана та інтелектуальних методів керування супроводом цілей.

Аналіз обмежень існуючих підходів і формулювання вимог до нової моделі та методу

Аналіз існуючих підходів до математичної формалізації показує, що задача дослідження розподілу часу взаємодії РЛС з ціллю на початковому етапі супроводу в умовах навмисних перешкод не може бути адекватно розв'язана в межах однієї технології моделювання. Класичні детерміновані та статистичні моделі орієнтовані на одноразовий акт виявлення й дозволяють оцінювати локальні показники (ймовірність виявлення, хибної тривоги тощо), але не описують послідовний характер процесу зав'язки, повторні спроби, тимчасові втрати та повернення до пошуку. Тому вони непридатні для аналізу інтегрального показника часу взаємодії, де важливим є сам шлях розвитку процесу.

Марковські та напівмарковські моделі частково враховують послідовність станів, однак або не мають явного фізичного часу, або оперують фіксованими чи слабо інтерпретованими часовими параметрами. Це обмежує їх застосування для опису реальних процесів РЛС, у яких тривалості операцій є різнорідними та випадковими, особливо в умовах перешкод.

Стохастичні мережі, зокрема GERT-мережі, дозволяють одночасно враховувати ймовірності переходів, часові розподіли, альтернативні шляхи та цикли, що робить їх перспективними для макрорівневого опису процесу початкового супроводу. Проте в типових постановках вони використовують спрощені часові розподіли та враховують вплив перешкод у вигляді грубих поправок, що знижує їх прикладну цінність для синтезу конкретних алгоритмів РЛС.

Алгоритми фільтра Калмана та його модифікації є ефективними для мікрорівневої траєкторної обробки, але не описують процес зав'язки траєкторії та слабо пристосовані до негаусівських завод. Інтелектуальні та машинно-навчальні методи забезпечують адаптивність, однак потре-

бують великих обсягів даних і часто мають «чорний ящик»-характер, що ускладнює аналітичний опис часових характеристик.

Узагальнення цих обмежень вказує на відсутність цілісної моделі, яка б одночасно описувала послідовність станів початкового супроводу, містила явний часовий вимір та враховувала структурний вплив навмисних перешкод. У зв'язку з цим обґрунтовується необхідність інтегрованого підходу, що поєднує макрорівневу стохастичну модель у вигляді GERT-мережі з мікрорівневими алгоритмами фільтрації стану та інтелектуальними механізмами адаптації параметрів, забезпечуючи аналітичне дослідження розподілу часу взаємодії РЛС з повітряною ціллю.

Висновки. У роботі виконано аналіз сучасних вимог до радіолокаційних систем у задачах супроводу повітряних цілей, показників ефективності та завадостійкості на початковому етапі супроводу, а також підходів до математичного моделювання функціонування РЛС в умовах перешкод.

Показано, що за зростання щільності повітряного руху, появи малопомітних цілей і застосу-

вання навмисних перешкод вирішальну роль відіграє початковий етап супроводу – від виявлення до підтвердження траєкторії. Помилки на цьому етапі мають накопичувальний характер і визначають подальшу якість роботи системи.

Обґрунтовано недостатність традиційних локальних показників ефективності для повної оцінки РЛС. Запропоновано їх розширену класифікацію та введено інтегральний показник «часу взаємодії РЛС з об'єктом стеження» як узагальнену характеристику завадостійкості на початковому етапі.

Показано, що існуючі математичні моделі описують лише окремі аспекти процесу та не забезпечують комплексного ймовірно-часового опису початкового супроводу в умовах навмисних перешкод. Обґрунтовано доцільність поєднання стохастичних мереж типу GERT для макрорівневого опису, фільтра Калмана – для траєкторної обробки та інтелектуальних методів – для адаптації параметрів супроводу.

На основі проведеного аналізу сформульовано методологічну задачу та вимоги до нової моделі й методу подальших досліджень.

Список літератури:

1. Xincheng Jing, Hongtao Su, Lu Shen, Zhi Mao, Congyue Jia. Adaptive Radar Detection in the Clutter and Noise Cover Pulse Jamming Environment. *Signal Processing*. 2023. Vol. 205:108852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108852>
2. M. Sun, W. Liu, J. Liu, C. Hao. Rao and Wald Tests for Target Detection in Coherent Interference. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022. Vol. 58, no. 3. P. 1906-1921. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3122833>
3. Lu S., Deng Y., Wu L., Li Q., Qin, G. Simulation of Monopulse Radar Under Jamming Environments Based on Space Slicing. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 18:5785. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25185785>
4. R. Li, S. Zhang, C. Zhang, Y. Liu, X. Li. Deep Learning Approach for Sparse Aperture ISAR Imaging and Autofocusing Based on Complex-Valued ADMM-Net. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, no. 3. P. 3437-3451. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3025053>
5. Y. Bar-Shalom, F. Daum, J. Huang. The probabilistic data association filter. *IEEE Control Systems Magazine*. 2009. Vol. 29, no. 6. P. 82-100. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCS.2009.934469>
6. W. Yi, Z. Fang, W. Li, R. Hoseinnezhad, L. Kong. Multi-Frame Track-Before-Detect Algorithm for Maneuvering Target Tracking. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, no. 4. P. 4104-4118. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2976095>
7. Patrick U., Rao S. K., Jagan B. O. L., Rai H. M., Agarwal S., Pak, W. Radar-Based Target Tracking Using Deep Learning Approaches with Unscented Kalman Filter. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 18:8332. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188332>
8. Ge F., Ding Y., Zhang Y., Zhang Y. A Review of Deep Learning Based Target Detection Algorithms. *Proceedings of the TEPEN International Workshop on Fault Diagnostic and Prognostic*. TEPEN 2024. Mechanisms and Machine Science. 2024. Vol. 141. P. 88-99. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-73407-6_9
9. João P. Hespanha. Modeling and analysis of networked control systems using stochastic hybrid systems. *Annual Reviews in Control*. 2014. Vol. 38, no. 2. P. 155-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2014.09.001>
10. Zeng Y., Duan R., Huang S., Feng T. Reliability analysis for complex systems based on generalized stochastic petri nets and EDA approach considering common cause failure. *Engineering Computations*. 2020. Vol. 37, no. 5. P. 1513–1530. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-05-2019-0241>

Tarasenko Ye.V. METHODOLOGICAL BASIS OF INTELLECTUAL METHODS OF ACCOMPANYING AIR TARGETS IN CONDITIONS OF RADIO ELECTRONIC INTERFERENCE

The article considers the problem of increasing the efficiency and noise immunity of radar systems in the tasks of tracking air targets, which are complicated by the increase in air traffic density, the appearance of small-sized and inconspicuous objects and the use of noise and imitation interference. Particular attention is focused on the initial stage of radar operation - from initial detection to tying, confirmation of the trajectory and transmission of the target to subsequent levels of control. It is shown that errors at this stage are cumulative and lead to loss of targets, the formation of false tracks and overloading of processing channels, therefore static probabilistic criteria are insufficient without taking into account real-time time constraints.

The use of the integral probabilistic-time indicator "time of interaction of the radar with the tracking object" as a generalized characteristic that synthesizes the probabilities of success/failures at the stages of search, tying and confirmation, as well as random delays caused by the viewing mode, processing and interference is proposed and motivated. The classification of efficiency and noise immunity indicators (probabilistic, temporal, spatial and complex) is presented and their relationship in scenarios with target maneuvering and incomplete measurements is shown.

A review and comparison of classes of mathematical models of radar operation processes in a noise environment is performed. The feasibility of a complex approach is substantiated, in which the macro-level model of initial tracking is implemented in the form of a stochastic GERT network with transition probabilities and distributions of arc durations and the possibility of re-capture cycles, and the micro-level procedures for assessing the target state are described by the Kalman filter and its modifications with the prospect of intelligent adaptive parameter tuning. Requirements for a new model and method focused on analytical/semi-analytical assessment of the interaction time distribution in various noise scenarios and suitability for real-time systems are formulated.

Keywords: radar system, air target tracking, radar noise immunity, stochastic models, Kalman filter, GERT networks, Markov processes, trajectory, tracking algorithms.

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026