

DOI <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2019.11.142-154>

УДК 623.623

О.М. Семененко¹, д.військ.н.**О.Г. Водчиць²**, к.т.н., доц.**О.А. Каблуков¹****О.М.Шкурпіт³****В.С. Мироненко⁴**¹Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ²Кафедра військової підготовки Національного авіаційного університету, Київ³Військова академія (м. Одеса)⁴Військова частина А4465, Миколаїв

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРАРАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ БОРТОВІЙ СТАНЦІЇ АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД ПРОТИВНИКА В УМОВАХ СТВОРЕННЯ НЕЮ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ ПЕРЕШКОДИ НА ФІКСОВАНІЙ ПЛОЩИНІ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

У статті запропонована математична модель оцінювання ефективності контррадіоелектронної протидії бортовій станції перешкод індивідуального захисту противника в умовах створення нею поляризаційної перешкоди на фіксованій площині поляризації, а також розкриті особливості практичної реалізації такої протидії під час ведення повітряного бою та обмеження щодо її створення.

Ключові слова: контррадіоелектронна протидія; поляризаційна перешкода; станція активних перешкод, бортова радіолокаційна станція, інтегрований радіолокаційно-прицільний комплекс.

Аналіз сучасних поглядів передових країнах світу на ведення збройної боротьби та способи розв'язування воєнних конфліктів показують, що основна ставка робиться на повітряні засоби. На усіх етапах збройного конфлікту у переважній більшості випадків найбільшу загрозу для військових формувань Збройних Сил (ЗС) будь-якої країни буде становити саме авіаційне угруповання. Бойові можливості сучасних засобів ведення війни у повітрі, у значній мірі залежать від надійного функціонування радіоелектронних засобів (РЕЗ) та радіоелектронних систем (РЕС) управління. Тому під час повітряних операцій кожна з воюючих сторін буде прагнути максимально дезорганізувати роботу РЕЗ та РЕС силами та зброєю з метою забезпечення стійкої роботи своїх РЕЗ та РЕС [1–5]. Це завдання покладене на сили і засоби РЕБ, місце та роль яких у сучасних умовах постійно зростає [4,5]. Основним засобом РЕБ під час повітряного бою є станції активних перешкод індивідуального захисту противника, ефективність яких з кожним роком зростає. Сучасні станції активних перешкод індивідуального захисту (САП ІЗ) знижують ураження літака ракетами с активними та полуактивними голівками самонаведення під час повітряного бою на 40-60%. Активний розвиток бортових засобів РЕБ змушує шукати шляхи та способи не тільки захисту від них, а й активної протидії цим засобом, так званої контррадіоелектронної протидії – КРЕП [3–9]. Сторона, яка перша почне розробляти та використовувати засоби КРЕП отримає на визначеному часовому інтервалі переваги в ефективності ведення РЕБ та отримає перевагу під час повітряного бою взагалі.

На хвилі повсякчасної модернізації засобів РЕБ на основі нової технологічної бази та інтеграції засобів РЕБ на літаках в єдиний інтегрований радіолокаційно-перешкодовий комплекс (ІРЛПК) [5,7,9,10], слід зауважити, що встановлення нового інтегрованого комплексу на літак без реалізації способів та пристроїв КРЕП не дасть потрібної ефективності ведення війни у радіочастотному діапазоні. При виконанні бойового завдання літаком-винищувачем, головною задачею бортового комплексу управління

зброєю (БКУЗ) є: виявлення цілі на потрібній дальності; визначення її текучих координат; ступеню її небезпеки; прийняття рішення на атаку та знищення цілі [1,5,11]. Для вирішення цих задач під час повітряного бою застосовуються радіолокаційні прицільні комплекси (РЛПК), однією з головних систем яких є система автоматичного супроводження за напрямком (АСН). Однією з найбільш ефективних перешкод, які можуть бути створенні цим системам станціями активних перешкод індивідуального захисту противника – це є поляризаційна перешкода (ефективність її дії на систему АСН – 0,8-0,95). Тому питання зниження ефективності впливу поляризаційної перешкоди на систему АСН бортової радіолокаційної системи управління зброєю (БРЛС УЗ) є сьогодні достатньо актуальним.

Постановка проблеми

Поляризаційна перешкода (ПП) відрізняється від інших видів перешкод своєю універсальністю. Ця перешкода діє на БРЛС різних типів: РЛС з конічним скануванням, моноімпульсні системи, РЛС з супроводженням на проході. Ця перешкода створюється з однієї точки простору [4, 6]. Структурна схема одного з варіантів станції створення ПП приведена на рис. 1. Сигнали зондування, які приймаються антенами з ортогональними поляризаціями, підсилюються і випромінюються антенами з поляризаціями протилежними прийомним антенам. Горизонтально поляризована складова прийнятого сигналу випромінюється з вертикальною поляризацією, а вертикально поляризована складова прийнятого сигналу – з горизонтальною поляризацією. Поляризація антени передавача системи встановлюється таким чином, щоб перешкода, яка випромінюється, була ортогонально-поляризована по відношенню до поляризації прийнятого сигналу БРЛС, яку подавляють. Для вимірювання поляризації можна використовувати дві ортогонально-поляризовані прийомні антени [5,9].

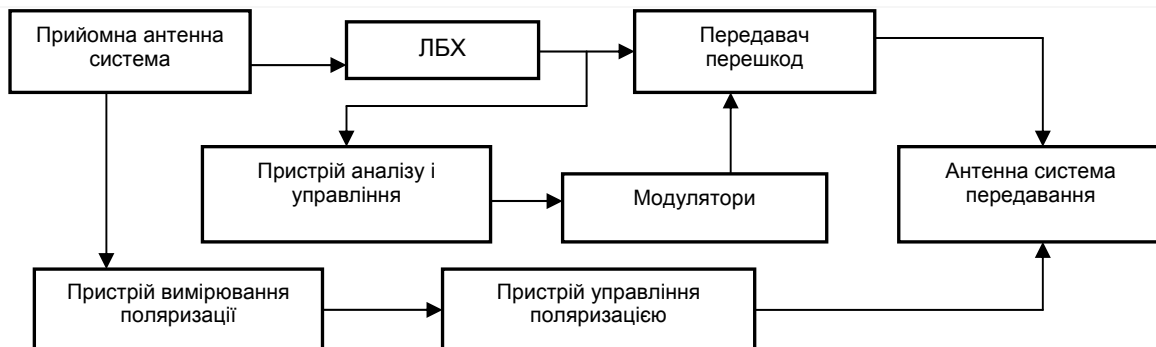


Рис.1. Структурна схема станції перешкод з вимірювачем поляризації сигналів

Поляризаційна перешкода також відрізняється від інших тим, що при дотриманні складних умов створення перешкоди вона діє з великою ефективністю на найбільш важливу систему автосупроводження БРЛС УЗ – систему АСН. За оцінками експертів та лабораторних досліджень ймовірність зриву системи АСН БРЛС УЗ поляризаційною перешкодою на фіксованій площині поляризації дорівнює $P_{зриву} = 0,8...0,95$ – це одне з найбільших значень дії перешкоди на системи супроводження [6]. При недосягненні потрібного енергопотенціалу випромінювання ПП чи при неточності вимірювання поляризації сигналів зондування РЛС ймовірність зриву ($P_{зриву}$) значно зменшується. Але слід відмітити, що в сучасних умовах значного розвитку бортових засобів РЕБ, ПП набуває своєї перспективності, тому як практично усі антени мають паразитну складову випромінювання на крос-поляризації. Найбільше значення її в дзеркальних антенах, найменше в антенних решітках та ФАР [9]. Поляризаційні фільтри та компенсатори зменшують цю складову, але цього недостатньо, тому що потужність та точність вимірювання поляризації бортових засобів радіоелектронного подавлення (РЕП) зростає з подальшою їх розробкою та модернізацією. Потрібно нове рішення цієї проблеми і в якості цього рішення пропонується здійснювати КРЕП САЗ ІЗ противника, які працюють в режимі випромінювання ПП шляхом зміни параметрів роботи БРЛС без погіршення характеристик виявлення та супроводження цілей.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Проведений аналіз останніх досягнень і публікацій свідчить [1–11] з розглядуваної тематики показує, що переважна більшість математичних моделей, які описують процеси взаємодії засобів РЕП та радіолокації, призначені для оцінювання ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій (БРЛС) в умовах перешкод [1, 3, 5]. Окремими випадками є моделі, які дозволяють оцінювати ефективність застосування тих чи інших пасивних засобів захисту бортової радіолокаційної станції від окремих видів перешкод [1,5]. Перехід від пасивного захисту від перешкод, які вже потрапили на вхід приймача, до активної протидії власне станціям активних перешкод противника під час повітряного бою, для того щоб перешкода, яка приходиться на вхід приймача, була якомога менш ефективною вимагає удосконалення математичної моделі оцінювання ефективності функціонування БРЛС із урахуванням нових особливостей її роботи – з урахуванням показників ведення КРЕП. Тобто в новій моделі повинні знайти своє відображення й нові процеси щодо одночасної контррадіоелектронної протидії САП ІЗ в умовах ведення повітряного бою. Однією з таких математичних моделей повинна бути модель, яка надасть змогу оцінити ефективність функціонування БРЛС УЗ в умовах створення САП ІЗ противника поляризаційної перешкоди на фіксованій площині поляризації та одночасного ведення КРЕП їй.

Постановка задачі та її розв'язання

Тому метою статті є розроблення математичної моделі оцінювання ефективності контррадіоелектронної протидії бортовій станції активних перешкод противника в умовах створення нею поляризаційної перешкоди на фіксованій площині поляризації, яка повинна дозволити сформулювати практичні рекомендації щодо застосування розробленого способу КРЕП [9] на різних етапах ведення повітряного бою.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Сьогодні спосіб протидії літаковій станції перешкод противника шляхом зміни площини поляризації сигналу БРЛС, є запропонованим та розробленим (рис. 2) [9, 11]. Цей спосіб здійснює протидію САП ІЗ противника, коли вона працює в режимі створення поляризаційної перешкоди на фіксованій площині поляризації, тобто протидія здійснюється визначеному одному виду перешкоди, який входить до усього комплексу перешкод. Але протидія навіть тільки одній перешкоді змінює показники ефективності функціонування БРЛС в умовах перешкод. Ведення нового процесу спонукає до перегляду математичної моделі оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах дії перешкоди та одночасної протидії їй.

Для практичної реалізації зазначеного способу пропонується, під час роботи бортової радіолокаційної станції управління зброєю (БРЛС УЗ) в режимі безперервного супроводження цілі, пропонується відхилити на $\Delta\gamma=3-10$ площину поляризації сигналу (рис. 3), який приймається після відбиття від цілі. Бортовий комплекс оборони (БКО) противника, в який входить САП ІЗ, після отримання інформації проте, що БРЛС УЗ перейшла в режим безперервного супроводження автоматично вмикає САП ІЗ. Розвідувальні системи визначають площину поляризації опромінюючого сигналу БРЛС УЗ та передають її на САП ІЗ.

Далі станція перешкод випромінює комплекс перешкод, однією із яких є поляризаційна перешкода (перешкода на ортогональній поляризації відносно сигналу опромінення). Виникає неузгодження поляризації випроміненого сигналу та поляризації на прийомній стороні призведе до порушення умов дії поляризаційної перешкоди на роботу БРЛС, внаслідок чого зменшиться потужність сигналу перешкоди та збільшиться відношення сигнал/перешкода на вході приймача $(E_{cnПРМ}(\Delta\gamma) \ll E_{cnПРМ})$ – це надасть можливість уникнути дії поляризаційної перешкоди на систему АСН БРЛС УЗ, що підвищить ефективність застосування ракет.

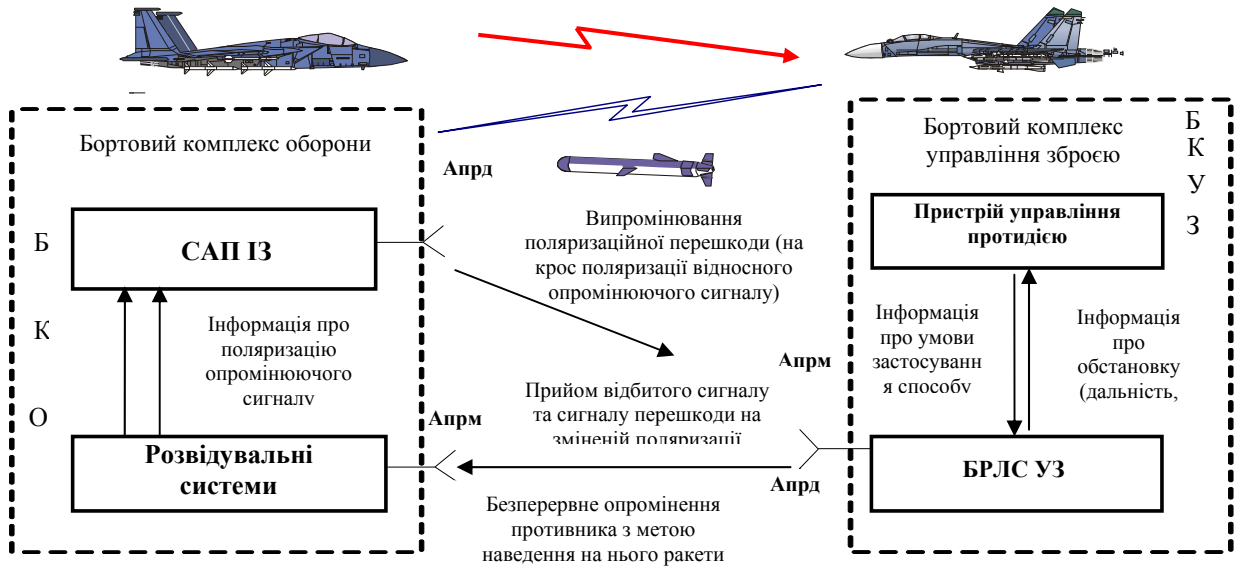


Рис. 2. Спосіб протидії станціям перешкод противника шляхом зміни поляризації під час прийому сигналу БРЛС

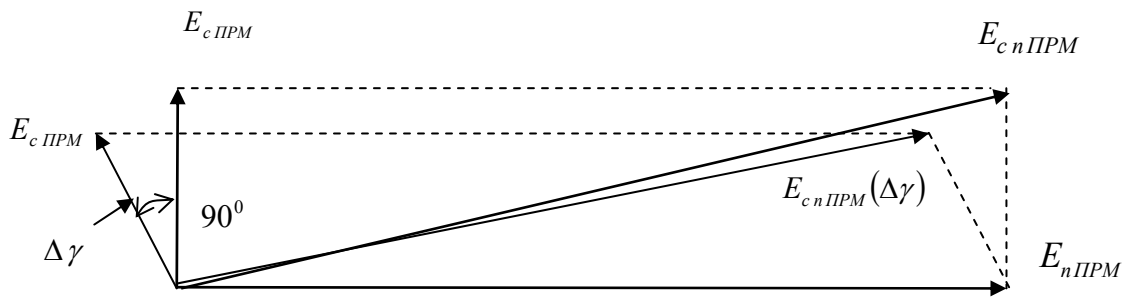


Рис. 3. Векторна діаграма створення способу протидії поляризаційній перешкоді на фіксованій площині поляризації

Із-за недоліку неточності та складності вимірювання поляризації сигналів на прийомній стороні, в деяких випадках поляризація перешкоди відрізняється від поляризації корисного сигналу не на 90° , а на величину $90^{\circ} - \Delta\gamma$. Тоді з’являється складова перешкоди на поляризації, яка співпадає з робочою поляризацією (рис. 3). Ця частина перешкоди підсилена з коефіцієнтом підсилення антени G , буде “підсвічувати” постановник перешкод. Відношення потужності перешкоди до потужності корисного сигналу зменшується, це видно з формули [1].

$$\frac{P_{n\text{ вх}}}{P_{c\text{ вх}}} = \frac{P_{n\text{ вх}} G^k \cos^2 \Delta\gamma}{P_{c\text{ вх}} G + P_n G \sin^2 \Delta\gamma}, \tag{1}$$

де: $P_{n\text{ вх}}, P_{c\text{ вх}}$ – потужність перешкоди та сигналу на вході антени РЛС, яка подавляється; G^k, G – коефіцієнт підсилення антени РЛС, яка подавляється, на крос- та робочій поляризації; $\Delta\gamma$ – кут неузгодження площини поляризації завади при прийомі від ортогонального положення.

Під час створення ПП необхідно, щоб точність установки поляризації завади була достатньо високою (одиниці градусів). На основі цього факту пропонується створювати спосіб протидії САП ІЗ, яка працює в режимі створення ПП, таким чином буде здійснюватися КРЕП [9]. При відхиленні

площини поляризації перешкоди від ортогонального положення перешкода мало впливає на стійкість системи АСН. Допустиме відхилення поляризації перешкоди можна визначити за формулою:

$$\Delta\gamma \leq \sqrt{\frac{P_n G^k - k_n P_c G}{k_n P_n G}}, \quad (2)$$

де: k_n – коефіцієнт подавлення.

Як вже відмічалось при одночасному приході корисного сигналу та сигналу ПП виробляються корисний сигнал управління і сигнал перешкоди. При цьому помилка супроводження $\theta_{ном}$ цілі визначається з рішення трансцендентного рівняння [5]: $U_c^2 G U_{nx}(\theta_{ном}) + U_s^2 G^k U_{nx}^k(\theta_{ном}) = 0$, де: $U_c \cdot G$, $U_s \cdot G^k$ – значення потужності корисного сигналу та сигналу перешкоди на вході пеленгатору; U_{nx} , U_{nx}^k – значення пеленгаційної характеристики без сигналу ПП на вході та при його наявності.

Для практичної реалізації на борту літака цього способу КРЕП пропонується змінювати площину поляризації на прийомній стороні. Внаслідок цього корисний сигнал буде прийматися на поляризації, яка не співпадає з площиною поляризації сигналу випромінювання. Неузгодження поляризації при прийомі відбитого сигналу, не суттєво вплине на потужність корисного сигналу.

Рівняння РЕП для випадку самоприкриття [1,5], буде мати вид при наявності незбіжності площини поляризації перешкоди (врахування неточності вимірювання поляризації):

$$\frac{P_n G_n}{P_c G_c} \frac{\Delta f_{ПРМ} 4\pi \Delta\gamma F_c(\theta_u, \beta_u)}{\Delta F} \cdot D^2 \geq K_n, \quad (3)$$

де: P_n, P_c – потужність передавачів БРЛС та САП ІЗ; $F_c^2(\theta_u, \beta_u)$ – нормована ДСА по потужності БРЛС; G_c, G_n – максимальний коефіцієнт підсилення антен БРЛС та САП ІЗ; D – дальність між САП ІЗ та БРЛС; $\Delta f_{ПРМ}$ – смуга пропускання приймача БРЛС; ΔF_n – смуга випромінювання сигналу перешкоди; $\Delta\gamma$ – коефіцієнт, який враховує незбіжності поляризації антени САП ІЗ та БРЛС, яка подавляється. За малої потужності сигналу перешкоди, коли $\frac{U_c^2 G}{U_n^2 G^k} \gg 1$ зменшується лише крутизна

пеленгаційної характеристики (ПХ) та відбувається зміщення точки стійкої рівноваги. Якщо $\frac{U_c^2 G}{U_n^2 G^k} \ll 1$,

то ПХ суттєво деформується, нахил ПХ змінюється на зворотній і система АСН втрачає стійкість.

Так як G^k в 100...1000 разів менше чим G , то потужність ПП повинна перевищувати потужність сигналу в розкритті антени в 100...1000 разів. Потужність ПП на вході приймача при здійсненні навмисної зміни площини поляризації на приймачі (при реалізації запропонованого способу КРЕП) визначається за формулою (рис.2):

$$P_{n\text{ вх}} = \frac{P_n G_n}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{ПРМ}^k F_c^2(\theta_n, \beta_n)}{4\pi} \cdot \frac{\Delta f_{ПРМ}}{\Delta F} \cdot \psi \cdot \cos^2(\Delta\gamma + \Delta\beta), \quad (4)$$

де: σ_u – ЕПР цілі; λ – робоча довжина хвилі; ψ – коефіцієнт передачі потужності сигналу з виходу антени до входу приймача, який залежить від коефіцієнта корисної дії фідерного тракту і виконання умов його узгодження з навантаженням; $\Delta\beta$ – неточність вимірювання площини поляризації.

Потужність корисного сигналу при відсутності сигналу ПП на вході приймача, але при здійсненні запропонованого способу КРЕП буде дорівнювати:

$$P_{cex} = \frac{P_c G_c}{4\pi D^2} \frac{\sigma_y}{4\pi D^2} \frac{\lambda^2 G_c}{4\pi} \psi \cos^2(\Delta\gamma + \Delta\beta), \quad (5)$$

Так як принцип утворення ПП оснований на повороті кута поляризації сигналу БРЛС з подальшим випромінювання сигналу на ортогональній поляризації, тоді для здійснення КРЕП потрібно змінювати поляризацію на визначену величину (завчасно перед вильотом чи в польоті) чи взагалі качати вектор поляризації антенної системи при прийомі у визначеному діапазоні. Для цього потрібно розрахувати необхідний діапазон зміни площини поляризації. У попередніх роботах [1,5,9] при дослідженні питань поляризаційної селекції відмічено, що на вході приймача при точній збіжності поляризації на прийомній стороні з поляризацією сигналу зондування потужність корисного сигналу набуває максимального значення, але неточність прийняття сигналу на прийомній стороні в діапазоні $\pm 10^\circ$ незначно впливає на потужність корисного сигналу на вході приймача. Неузгодження поляризації при прийомі приводить до втрат в потужності корисного сигналу, але і потужність перешкоди на вході приймача також буде змінюватися. Наприклад, для передавача шумової перешкоди і лінійного ретранслятора енергетичні співвідношення при лінійній поляризації мають вид рис. 4 [1,5].

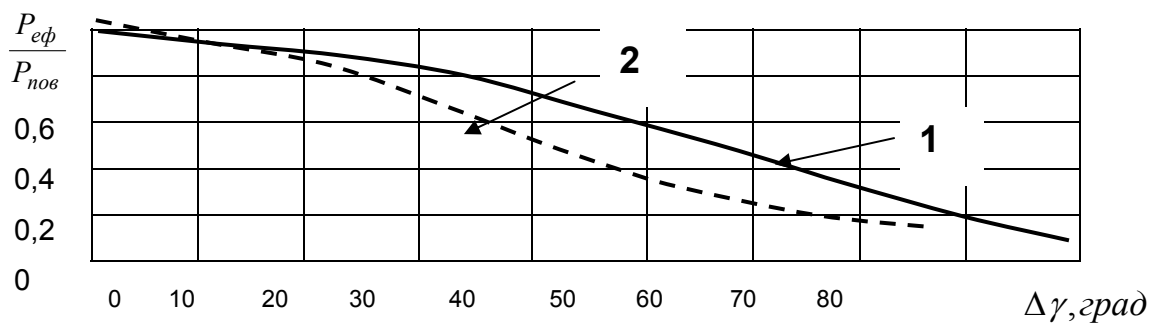


Рис. 4 Ефект неузгодження поляризації перешкоди з робочою поляризацією бортової РЛС

Для передавача шумової перешкоди (крива №1) $P_{ef} = P_{nov} \cos^2 \Delta\gamma$, а для лінійного ретранслятора (крива №2) $P_{ef} = P_{nov} \cos^4 \Delta\gamma$, де P_{ef} – ефективна потужність випромінювання перешкоди; P_{nov} – повна ефективна потужність випромінювання перешкоди; $\Delta\gamma$ – кут неузгодження поляризації антен передавача перешкод і приймача БРЛС в градусах.

Неузгодження поляризації сигналу перешкоди з площиною поляризації прийомної антени призводить до втрат в сигналі перешкоди на вході приймача. Навіть при неузгодженні на 10° втрати складають тільки 3% (біля 0,1дБ), у випадку передавача шумових перешкод і 6% (біля 0,3%) для ретранслятора [1,5]. Визначимо вплив ПП на систему АСН літака при застосуванні запропонованого способу КРЕП, а також то, наскільки погіршуються характеристики БРЛС в умовах, коли ПП не утворюється. При навмисному неузгодженні вектора поляризації антени при прийомі з вектором ПП на основі формул (3, 4, 5) (рис. 3) отримаємо наступне рівняння КРЕП:

$$K_n \geq \frac{P_{nex} G_n^k \cos^2(\Delta\gamma + \Delta\beta)}{P_{cex} G_c \cos^2(\Delta\gamma + \Delta\beta) + P_{nex} G_c \sin^2(\Delta\gamma + \Delta\beta)}, \quad (6)$$

де: $\Delta\gamma$ - реалізоване відхилення площини поляризації антенної системи на прийомній стороні; $\Delta\beta$ - помилка при вимірюванні площини поляризації ($\pm 0,5^\circ$).

Вирішуючи рівняння КРЕП для отримання необхідних розрахунків потужностей корисного сигналу та сигналу перешкоди на вході приймача в умовах наявності сигналу ПП та при здійсненні КРЕП будуть використовуватися тактико-технічні характеристики САП ІЗ – 161 і РЛПК-27. На рис. 5. наведені розраховані залежності потужності перешкоди на вході приймача під час ведення КРЕП запропонованим способом [9] для антен з різним рівнем крос-поляризаційного випромінювання, якщо відстань між літаками дорівнює 50 кілометрів та станція активних перешкод противника працює в режимі випромінювання ПП при $\lambda = 3\text{ см}$, $k_f = 1$, $\psi = 0,5$.

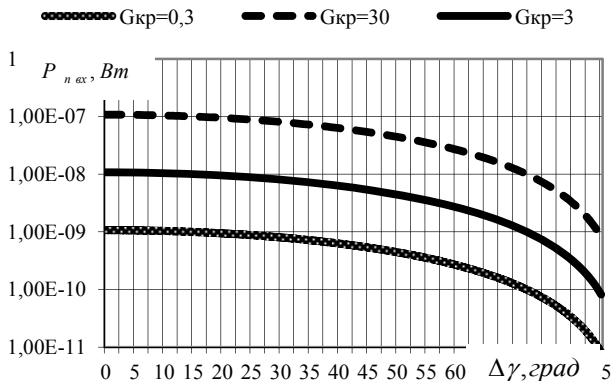


Рис. 5. Залежність потужності перешкоди від неузгодження площини поляризації прийомної антени БРЛС і ПП, яка утворюється САП ІЗ

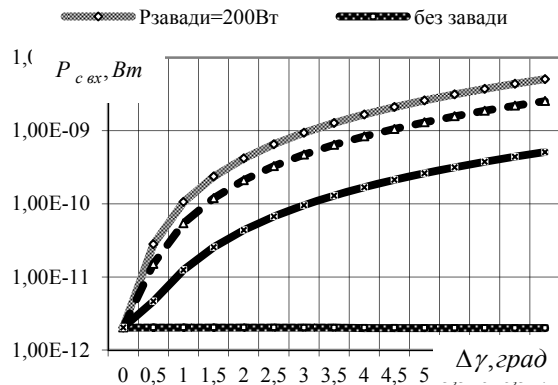


Рис. 6. Залежність потужності корисного сигналу при зміні площини поляризації на прийомній стороні при роботі САП ІЗ противника в режимі випромінювання ПП та без неї

Потужність сигналу перешкоди на вході приймача змінюється не значно, але сама сутність дії її як ПП при вже незначному неузгодженні втрачає свої властивості. Тому як при реалізації даного способу КРЕП складова потужності перешкоди буде тільки негативно впливати на сам постановник перешкод так, як вона буде його підсвічувати, докажемо це розрахунками.

Потужність корисного сигналу на вході приймача БРЛС при здійсненні запропонованого способу КРЕП та при умові, що САП ІЗ працює в режимі утворення ПП буде дорівнювати (рис. 3):

$$P_{с\text{ex}} = \frac{P_c G_{прдс}}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{прмс}}{4\pi} \cdot \frac{\sigma_{ц}}{4\pi D^2} \cdot \psi \cdot \cos^2(\Delta\gamma \pm \Delta\beta) + \frac{P_n G_n}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_{прмс}}{4\pi} \cdot \frac{\Delta f_{прм}}{\Delta F_n} \cdot \psi \cdot \sin^2(\Delta\gamma \pm \Delta\beta), \quad (7)$$

Як видно з приведеної формули, що при випромінюванні САП ІЗ противника ПП та при реалізації даного способу КРЕП до складової корисного сигналу додається складова потужності перешкоди на робочій поляризації антени. Вона вже при малих неузгодженнях площини поляризації ПП та прийомної антени має велике значення із-за того, що потужність перешкоди на вході приймача значно більше ніж потужність корисного сигналу (рис. 5). Під час проведення розрахунків потужності корисного сигналу на вході приймача БРЛС видно (рис. 5, рис. 6), що при відсутності сигналу ПЗ корисний сигнал в умовах ведення КРЕП (неузгодженні поляризації сигналу зондування з сигналом при прийомі) змінюється, але ця зміна дуже незначна. Максимальне значення корисного сигналу буде при $\Delta\gamma = 0^0 \rightarrow P_{с\text{ex}} = 2,03 \cdot 10^{-12} \text{Вт}$ [5]. При незначній зміні, коли $\Delta\gamma = 4^0$, то $P_{с\text{ex}}$ зміниться усього на одну соту і буде дорівнювати $P_{с\text{ex}} = 2,02 \cdot 10^{-12} \text{Вт}$. При збільшенні цього неузгодження до $\Delta\gamma = 31,5^0 \rightarrow P_{с\text{ex}} = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{Вт}$, а $\Delta\gamma = 70,5^0 \rightarrow P_{с\text{ex}} = 2,2 \cdot 10^{-13} \text{Вт}$. Таким чином, при здійсненні неузгодження більш ніж на $\Delta\gamma = 30^0$ зміна потужності корисного сигналу складає всього $\Delta P = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{Вт}$, а при зміні поляризації в діапазоні $\Delta\gamma = 1^0 \div 15^0$ $P_{с\text{ex}}$

буде зменшуватися всього від 0,5% до 4% від максимального значення потужності при ($\Delta\gamma = 0^0$). Корисна потужність сигналу (P_{cex}) на вході приймача за відсутності сигналу ПП та одночасному веденні КРЕП зміниться на порядок лише, коли $\Delta\gamma = 69^0$ [9].

Внаслідок незначної зміни потужності корисного сигналу при здійсненні запропонованого способу КРЕП буде змінюватися максимальна дальність розвідки БРЛС (рис. 7):

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_c G_{cпрд} \lambda G_{cпрм} \sigma_{ц}}{64 \pi^3 P_{cex}}} \cdot \psi \cdot \cos^2 \Delta\gamma, \tag{8}$$

де: P_{cex} - значення потужності корисного сигналу при $\Delta\gamma = 0^0$ та на відстані 50км.

З проведених розрахунків видно те, що при здійсненні неузгодження на $\Delta\gamma = 30^0$ дальність розвідки зміниться на 6,8% і буде дорівнювати 46,6 кілометрів, якщо максимальне значення дальності розвідки без здійснення КРЕП ($\Delta\gamma = 0^0$) дорівнює 50 кілометрів. А при веденні КРЕП визначеним способом (неузгодження в діапазоні $\Delta\gamma = 1^0 \div 15^0$) розрахунки показують, що максимальна дальність розвідки буде зменшуватися від десятків метрів до 1 кілометра від максимального значення. Цю відстань літак винишувач при сучасних значеннях швидкості польоту подолає за дуже малий час (одиниці секунд).

До теперішнього моменту, ми розглядали як погіршуються характеристики БРЛС при реалізації КРЕП, але слід зауважити, що якщо САП ІЗ противника працює у режимі випромінювання ПП і на борту літака реалізований запропонований спосіб КРЕП, то потужність корисного сигналу на вході приймача БРЛС вже при неузгодженні $\Delta\gamma$ від 0^0 до $3,5^0$ зміниться практично на два порядки (рис. 5). Наприклад, при $\Delta\gamma = 0^0 \longrightarrow P_{cex} = 2,03 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$, а вже при $\Delta\gamma = 1,5^0 \longrightarrow 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$, і $\Delta\gamma = 3,5^0 \longrightarrow P_{cex} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}$. Таким чином, чим більше потужність передавача завади тим більше потужність сигналу на вході приймача при здійсненні КРЕП. Постановник завад починає себе підсвічувати і покращує характеристики виявлення БРЛС.

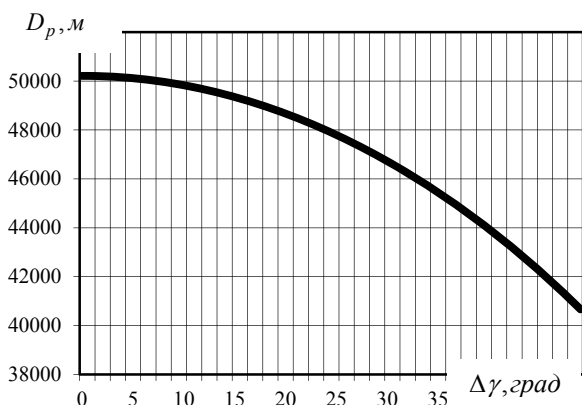


Рис. 7. Розрахунок зміни дальності розвідки БРЛС від зміни площини поляризації під час КРЕП

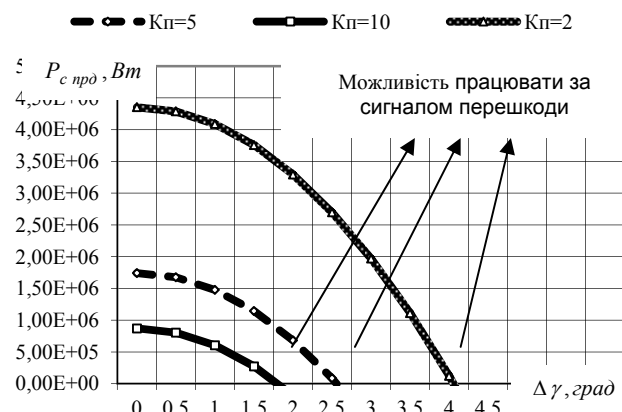


Рис. 8. Необхідна потужність передавача для уникнення дії ПП при різних коефіцієнтах подавлення, що вимагаються

Таке збільшення потужності при прийомі може бути одним із факторів того, що САП ІЗ противника працює в режимі випромінювання ПП. ПП діє дуже ефективно на систему АСН літака. Вона володіє одним з найбільшим значень ефективності дії, ймовірність зриву системи АСН БКУЗ при її дії дорівнює $P_{зриву} = 0,85 \dots 0,95$ [1,5]. Але здійснивши змінювання площини поляризації на

приймній стороні на декілька градусів ми повністю уникнемо дії ПП та й ще отримаємо величезний плюс в тому, що при випромінюванні САП ІЗ поляризаційної перешкоди на фіксованій площині поляризації вона повністю себе відкриває, підсвічуючи складовою перешкоди на робочій поляризації [9]. Проведемо розрахунок необхідної потужності передавача БРЛС (корисного сигналу) при здійсненні КРЕП для уникнення впливу ПП на систему АСН БКУЗ. Аналізуючи формули (4, 5, 6, 7) отримуємо, що необхідна потужність передавача БРЛС для уникнення дії ПП повинна бути (рис. 8):

$$P_{cnpd} \geq \frac{P_n G_n G^k D^2}{G_c G_{cnpd} \sigma_{\psi}} \left(\frac{1}{k_n} - \frac{G_{cnpd}}{G^k} \cdot \operatorname{tg}^2(\Delta\gamma + \Delta\beta) \right). \quad (9)$$

На рис. 8 наведені розраховані залежності необхідної потужності корисного сигналу передавачів БРЛС для уникнення дії ПП за умови здійснення КРЕП (зміни площини поляризації), та якщо противник задається необхідними значеннями коефіцієнтів подавлення. Розраховані залежності в черговий раз підтвердили ефективність дії ПП. Тому як при точному вимірюванні площини поляризації та створенні ПП на строго ортогональній поляризації, для уникнення наслідків дії ПП потрібні занадто великі потужності передавачів БРЛС, при незначних потужностях постановників перешкод, що практично неможливо реалізувати на борту літака і є однією з головних інженерних задач (за обмежених характеристик розмірів та ваги, досягти великого значення потужності). Але відмітимо, що при здійсненні КРЕП, при неузгодженні площини поляризації на $\Delta\gamma = 4^0$ постановник перешкод настільки себе підсвічує, що складова завади набагато більше складової корисного сигналу і вона додає в корисній потужності на декілька порядків (за мінімального коефіцієнта подавлення $k_n = 2$).

Якщо $k_n = 10$, то для уникнення дії перешкоди вже достатньо величини неузгодження $\Delta\gamma = 1^0$. Вже при цьому неузгодженні складова перешкоди настільки себе підсвічує, що потужність корисного сигналу може бути мінімальною. Якщо $\frac{G^k}{G} = 10^{-2} \dots 10^{-4}$, $k_n = 5 \dots 10$, то для співвідношень P_n та P_c отримуємо, що достатньо відхилення $\Delta\gamma = 1^0 \dots 3^0$ для практично повного уникнення дії ПП на систему АСН БКУЗ літака. Здійснивши розрахунки відношення потужності перешкоди до потужності корисного сигналу на вході приймача БРЛС УЗ від зміни площини поляризації в черговий раз отримали доказ універсальності та якості крос-поляризаційної перешкоди при дотриманні умов строгої ортогональності її створення. На рис. 9 в черговий раз проілюстрована необхідність реалізації запропонованого способу КРЕП, так як за відхилення площини поляризації на приймній стороні на $\Delta\gamma = 3^0 \dots 4^0$ відношення потужності перешкоди на вході приймача до потужності корисного сигналу настільки мале, що ПП при такому невеликому неузгодженні практично не діє на систему АСН БКУЗ. Слід зазначити, що при незначній потужності передавача САП ІЗ, але в умовах строгої ортогональності створення ПП, вона є надзвичайно ефективною, про що свідчать отримані результати (рис. 8, рис. 9).

Для здійснення КРЕП можна качати вектор поляризації антенної системи на приймній стороні, тим самим запобігти прийому сигналу перешкоди на крос-поляризації, але розрахунок діапазону качання згідно отриманих результатів повинен не перевищувати $1^0 \dots 4^0$ відхилення від робочої поляризації (рис. 10).

При цьому, через час реакції САП ІЗ (t_{reak}) і час розповсюдження радіохвиль від САП ІЗ до БРЛС ($t_{розп}$) корисний сигнал та сигнал перешкоди будуть відрізнятися за поляризацією на величину $\delta\gamma$, яка визначається:

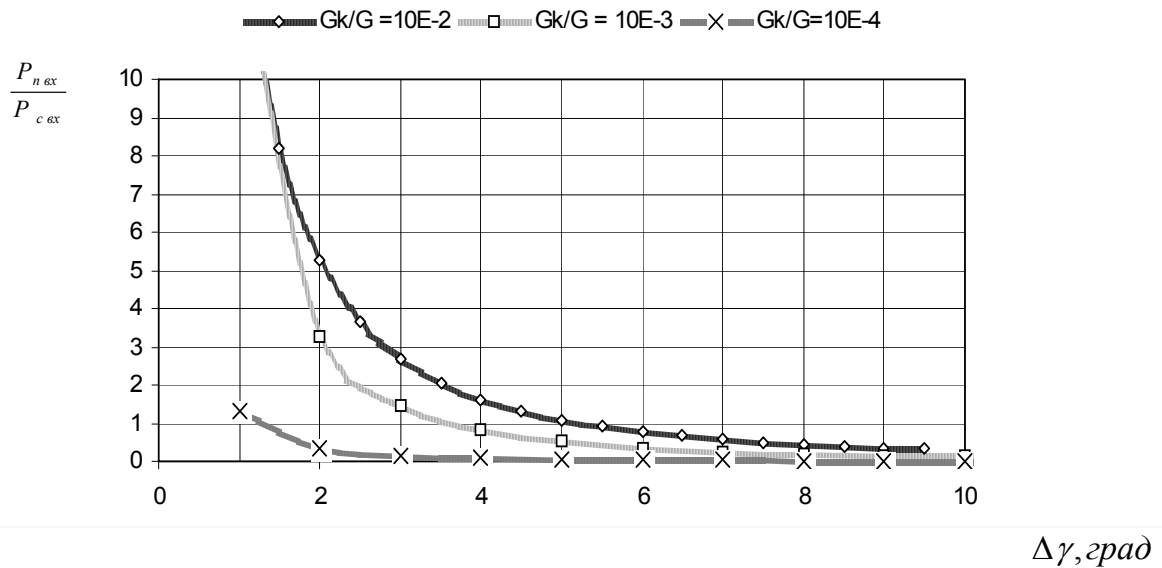


Рис. 9. Відношення потужності перешкоди до потужності корисного сигналу за різних співвідношень коефіцієнтів посилення антенних систем при здійсненні КРЕП

$$\delta \gamma = \gamma_c - \gamma_z \tag{10}$$

де: γ_z - вектор поляризації сигналу перешкоди; γ_c - вектор поляризації антенної системи БРЛС УЗ під час прийому сигналів.

$$\gamma_c = \gamma_z \pm \dot{\gamma}(t) t_{np}, \tag{11}$$

де:

$$t_{np} = t_{reak} + t_{rozn} = t_{reak} + \frac{D}{C}, \tag{12}$$

де: $\dot{\gamma}(t)$ - закон зміни (“при качанні”) вектора поляризації; D - дальність до цілі в час використання поляризаційної перешкоди; C - швидкість світлу.

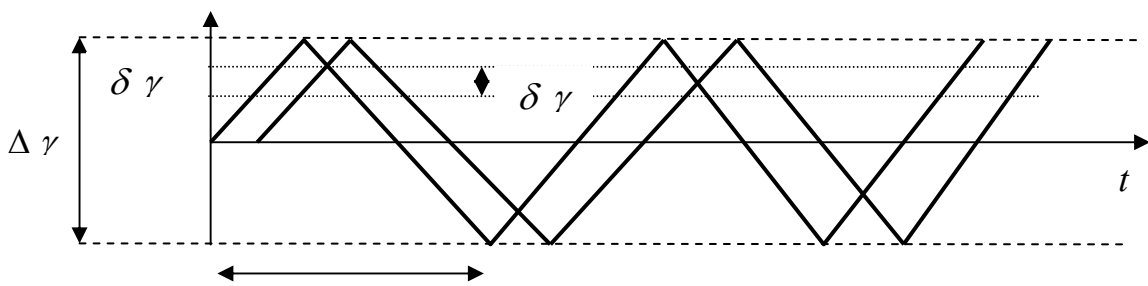


Рис. 10. Зміна вектора поляризації за пилоподібним законом

Швидкість зміни вектора поляризації (“при качанні”) $\dot{\gamma}(t)$ антенної системи БРЛС УЗ повинна забезпечувати максимальну різницю в поляризації сигналу, який перевипромінюється САП ІЗ противника (на крос-поляризації) та поляризацією на прийомній стороні. При зміні вектора поляризації за пилоподібним законом (10):

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{\Delta\gamma}{T} t, \tag{13}$$

де: $\Delta\gamma$ - діапазон зміни вектора поляризації (повинен бути згідно проведених розрахунків не більше 10...40; T – період закону зміни поляризації.

Для досягнення максимальної ефективності запропонованого способу КРЕП САЗ ІЗ, яка працює в режимі випромінювання ППІ необхідно дотримання умов:

$$T = t_{np} = t_{peak} + D/C, \quad (14)$$

тоді:

$$\delta \gamma = \Delta \gamma = \max. \quad (15)$$

Таким чином відштовхуючись від отриманих результатів дослідження можна визначити, що зміна поляризації на прийомній стороні на визначену величину додає деяке погіршення в потужності корисного сигналу, але запропонований спосіб КРЕП повністю виключає дію ППІ на систему АСН БКУЗ. Аналіз роботи САП ІЗ, які знаходяться на борту сучасних літаків винищувачів показує, що останнім часом в цих станціях здійснюється качання площини поляризації ППІ, діапазон цього качання дорівнює та не перевищує $\Delta \gamma_{кач} = \pm 4^0 \dots 7^0$. Тоді пропонується, здійснювати узгодження на величину розрахованого ефективного узгодження для уникнення дії ППІ, яке дорівнює $\Delta \gamma_{роз} = 1^0 \dots 3,5^0$, плюс $\Delta \gamma_{кач}$. Таким чином запропоноване узгодження для здійснення КРЕП, буде дорівнювати: $\Delta \gamma_{запроп.} = \Delta \gamma_{роз.} + \Delta \gamma_{кач.} = (7^0) + (1^0 \dots 3,5^0) = (8^0 \dots 10,5^0)$. За такого узгодження, у разі відсутності сигналу ППІ на вході приймача потужність корисного сигналу зменшиться на $\Delta P = 0,09 \dots 0,15 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$ від максимального значення, що свідчить про зменшення максимальної дальності розвідки від 215 м до 1 км, але ймовірність зриву системи АСН БКУЗ під час дії ППІ, за думками експертів буде дорівнювати $P_{зриву} = 0,05 \dots 0,15$.

Висновки

Розроблена математична модель оцінювання ефективності контррадіоелектронної протидії бортовій станції активних перешкод противника в умовах створення нею поляризаційної перешкоди на фіксованій площині поляризації, дозволить сформулювати практичні рекомендації щодо застосування розробленого способу КРЕП на різних етапах ведення повітряного бою, а також вона може слугувати підґрунтям для формування математичної моделі функціонування бортових засобів управління зброєю в умовах перешкод та одночасного ведення КРЕП із урахуванням існуючих обмежень щодо їх застосування. Ведення КРЕП різними способами, з одного боку незначно зменшує ефективність функціонування БКУЗ на різних етапах польоту, але з іншого, значно зменшується ефективність функціонування бортових засобів РЕП противника, що підвищить ефективність застосування БКУЗ та ймовірність ураження літака противника використанням засобів ураження, які на сьогоднішній день дорого коштують.

Перспективи подальших досліджень

Незначні втрати в потужності корисного сигналу за відсутності сигналу на крос-поляризації накладають обмеження на цей спосіб КРЕП тим, що його не рекомендується використовувати на максимальній дальності виявлення цілей, що є перспективним дослідженням за напрямком розроблення математичної моделі та алгоритму ведення КРЕП в повітряному бою усіма відомими способами, бо практично кожний із відомих способів ведення КРЕП передбачає зміну параметрів роботи БРЛС УЗ, що накладає певні обмеження на їх застосування. Також в подальшому необхідно розглядати можливість практичної реалізації розроблених способів під час модернізації засобів РЕБ та виявлення на сучасних літаках, інтегруючи їх в єдиний ІРЛЗК.

Список використаних джерел

1. Леонов, А.И. Моноимпульсная радиолокация [Текст] / А.И. Леонов, К.И. Фомичёв // . – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1984. – 312с.

2. Василевич Л.Ф., Семененко О.М. Контррадіоелектронне подавлення, як складова частина РЕБ. // Збірник наукових праць №5. – К.: НЦ ВПС України, 2002. – С. 48-50.
3. Vant Brunt L. B. *Applied EGM, V 1,2, 1982. E.W. Engineering, USA.*
4. Lockheed-Boeing-General Dynamics F-22 Raptor Многоцелевой истребитель / Аналитика 2015 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.paralay.com/f22.html>.
5. Василевич, Л.Ф. Радиоэлектронное подавление [Текст]. К.: КВВАИУ, 1989. 243с.
6. Семененко, О.М. Основні принципи контррадіоелектронної протидії сучасним бортовим станціям активних перешкод індивідуального захисту літака [Текст] / О.М. Семененко, І.В. Чекед, С.А. Чупахін // Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України. 2011. №2(56). С. 178–188.
7. Семененко О.М., Добровольський Ю.Б. Щодо інтегрування бортового радіоелектронного обладнання літаків-винищувачів Збройних Сил України в єдиний комплекс Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України №1(55). К.: ЦНДІ ЗС України, 2002. С. 48–50.
8. Семененко О.М., Добровольський Ю.Б., Манішин О.В., Чекед І.В. Основні завдання контррадіоелектронної протидії сучасним бортовим станціям активних перешкод індивідуального захисту противника Збірник наукових праць ДНДІА №1(55). К.: ДНДІА, 2013. С. 103–110.
9. Василевич Л.Ф., Семененко О.М. Спосіб контррадіоелектронного подавлення станції активних завад, яка працює в режимі випромінювання поляризаційної завади. // Труды Академії № 50. К.: НАОУ, 2004. С. 163–167.
10. Семененко О.М., Чекед І.В., Добровольський Ю.Б., Коваленко І.Ю. Спосіб контррадіоелектронної протидії літаковій станції активних перешкод противника шляхом порушення її функціонування [Текст]. ЗНП ЦНДІ ЗС України. 2011. №4(58). С. 224–236.
11. Семененко, О.М. Щодо визначення послідовності комплексного застосування способів контррадіоелектронної протидії станціям активних завад противника та оцінка ефективності її ведення [Текст]. ЗНП ЦНДІ ЗС України. 2006. №2(36). С. 109–116.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
КОНТРАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БОРТОВОЙ СТАНЦИИ
АКТИВНЫХ ПОМЕХ ПРОТИВНИКА В УСЛОВИЯХ СОЗДАНИЯ ЕЮ
ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ПОМЕХИ НА ФИКСИРОВАННОЙ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

О.М. Семененко, А.Г. Водчиц, О.А. Каблуков, А.Н.Шкурпит, В.С. Мироненко

В статье предложена математическая модель оценки эффективности контррадиоэлектронного противодействия бортовой станции помех индивидуальной защиты противника в условиях создания ей поляризационной помехи на фиксированной плоскости поляризации, а также раскрыты особенности практической реализации такого противодействия во время ведения воздушного боя с учётом ограничений по ведению такого вида противодействия.

Ключевые слова: контррадиоэлектронное противодействие; поляризационная помеха; станция активных помех; бортовая радиолокационная станция; интегрированный радиолокационно-прицельный комплекс.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF THE CONTROL
OF RADIO ELECTRONIC COUNTERACTION OF THE AIRPORT STATION OF ACTIVE
CONTEMPORARY INTERFERENCES IN THE CONDITIONS OF CREATING A
POLARIZATION INTERFACE ON A FIXED PLANE OF IT**

O. Semenenko, O. Vodchits, O. Kablukov, O. Shkurpit, V. Mironenko

In the article, based on the analysis of the use of modern individual on-board electronics and electronic search and guidance systems, it is concluded that one of the promising directions for their further development is the search for methods of not only protection from the means of radio-electronic suppression, but also an active counteraction to

these means, the so-called counter-radio electronic counteraction. One of the most effective obstacles that can be created by radar detection systems by stations is the active barrier of individual enemy protection - this is a polarizing obstacle, so the issue of reducing the effectiveness of the polarizing effect on the system of automatic support for the direction of the on-board radar weapon control system is quite relevant today. In order to counteract the station's active interference in the conditions of its creation of a polarization obstacle, it is proposed to change the plane of polarization on the receiving side. As a result, a useful signal will be taken in polarization, which does not coincide with the polarization plane of the radiation signal. Failure to match polarization when receiving a reflected signal will not significantly affect the power of a useful signal. In order to implement the proposed method in the article, a mathematical model for evaluating the effectiveness of the counter-radio-electronic counteraction of the on-board station was proposed to obstruct the enemy's individual protection in the conditions of its creation of a polarization obstacle on a fixed plane of polarization, as well as features of the practical realization of such counteraction during air combat and restrictions on its creation.

The mathematical model of the evaluation of the effectiveness of the counter-electronic counteraction to the aircraft station's active barriers in the conditions of its creation of a polarization obstacle on a fixed plane of polarization is developed, it will allow to formulate practical recommendations regarding the application of the developed method at different stages of air combat. KELP management in different ways, on the one hand, slightly reduces the effectiveness of the on-board management of weapons at different stages of flight, but on the other hand, the effectiveness of the airborne equipment of the airborne ejection of the enemy significantly decreases, which will increase the effectiveness of the use of weapons and the likelihood of damage to the enemy aircraft using the means of destruction, which today have a significant cost.

Key words: *counter-radio-electronic counteraction; polarization obstacle; an active barrier station; an onboard radar station; an integrated radar and sighting complex.*