

УДК 621.396.96

Толупа С. В., д.т.н.; Дружинін В. А., д.т.н.; Наконечний В. С., к.т.н.

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ. +380 (67) 880 34 08. tolupa@i.ua)

ЕФЕКТИВНІСТЬ РАДІОЛОКАЦІЇ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ЗНИЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Толупа С. В., Дружинін В. А., Наконечний В. С. Ефективність радіолокації при використанні технологій штучного зниження ефективної поверхні випромінювання літальних апаратів. Стаття присвячена проблемам ефективності радіолокації існуючих радіолокаційних станцій в умовах застосування в конструкції літальних апаратів технологій штучного зниження ефективної поверхні випромінювання. Дослідженні основні способи і технології штучного зниження ефективної поверхні віддзеркалення за допомогою покриття літальних апаратів радіопоглинаючими матеріалами інтерференційного або дифракційного типу. Ефективне супроводження повітряних цілей з такою технологією можливе лише при реалізації в етапах функціонування радіолокаційних станцій частотно-фазового методу виявлення, пасивно-активного методу супроводження, адаптивного методу керування антеною, а також використання багатопозиційних систем радіолокації.

Ключові слова: ефективна поверхня випромінювання, радіолокація, зона Френеля, літальний апарат, частотно-фазовий метод виявлення, пасивно-активний метод супроводження, керування антеною, багатопозиційні системи радіолокації, екран Далленбаха, рівняння Максвелла

Толупа С. В., Дружинин В. А., Наконечный В. С. Эффективность радиолокации при использовании технологии искусственного снижения эффективной поверхности излучения летательных аппаратов. Статья посвящена проблемам эффективности радиолокации существующих радиолокационных станций в условиях применения в конструкции летательных аппаратов технологии искусственного снижения эффективной поверхности излучения. Исследованы основные способы и технологии искусственного снижения эффективной поверхности отражения с помощью покрытия летательных аппаратов радиопоглощающими материалами интерференционного или дифракционного типа. Эффективное сопровождение воздушных целей с такой технологией возможно лишь при реализации в этапах функционирования радиолокационных станций частотно-фазового метода выявления, пассивно-активного метода сопровождения, адаптивного метода управления антенной, а также использования многопозиционных систем радиолокации.

Ключевые слова: эффективная поверхность излучения, радиолокация, зона Френеля, летательный аппарат, частотно-фазовый метод выявления, пассивно-активный метод сопровождения, управления антенной, многопозиционные системы радиолокации, экран Далленбаха, уравнение Максвелла

Tolupa S. V., Druzhynin V. A., Nakonechnyy V. S. Efficiency of radio-location at the use of technology of artificial decline of effective radiation surface of aircrafts. The article is devoted the problems of efficiency of radio-location of the existent radio-location stations in the conditions of application in the construction of aircrafts of technology of artificial decline of effective radiation surface. Basic methods and technologies of artificial decline of effective reflection surface by coverage of aircrafts by interference or diffraction type radiosuctive materials are investigational. Effective accompaniment of air aims with such technology possibly only during realization in the stages of functioning of the radio-location stations frequency phase method of exposure, passively-active method of accompaniment, adaptive method of management aerial, and also use of the multiposition systems of radio-location.

Keywords: effective radiation surface, radio-location, Frenel's area, aircraft, frequency-phase method of exposure, passively-active method of accompaniment, management aerial, multiposition systems of radio-location, Dallenbakh screen of Dallenbakh, Maxwell equalization

Вступ. Актуальність теми. Актуальність дослідження зумовлена наступними причинами: динамічним розвитком авіаційної техніки, широким впровадженням провідними країнами – виробниками літальних апаратів технологій штучного зниження ефективної площі віддзеркалення (ЕПВ), зростанням частки літальних апаратів зі штучно зниженою ЕПВ, які надходять в експлуатацію в останній час, зниженням можливостей існуючих (радіолокаційних станцій) РЛС щодо радіолокації таких літальних апаратів, недостатньою реалізацією потенційних можливостей радіолокаційних станцій (РЛС) під час виявлення та супроводження повітряних цілей зі штучно зниженою ЕПВ. Ситуація, яка склалася, спонукала об'єктивне протиріччя у практиці застосування РЛС щодо локації літальних апаратів зі штучно зниженою ЕПВ. Зростаюча увага з боку керівництва держави, вчених, конструкторів щодо питань створення нових радіолокаційних засобів та модернізації

існуючих РЛС, нові стратегічні концепції, що лежать в основі державних програм передових держав світу, стрімкий розвиток техніки, в першу чергу, авіаційної, створюють передумови підвищення вимог до рівня можливостей РЛС. Значне зростання вимог до РЛС, які й надалі широко використовуються на практиці, необхідність підняття якісних і кількісних показників ефективності функціонування радіолокаційних систем до потрібного рівня, не зорієнтованість РЛС на виявлення та супроводження повітряних цілей зі штучно зниженою ЕПВ, необхідність модернізації існуючих та створення нових високоефективних радіотехнічних комплексів для потреби України, відсутність науково-методичного підходу до визначення напрямків підвищення ефективності радіолокації новітніх літальних апаратів, відсутність обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності радіолокації визначають напрям дослідження.

За результатами останніх науково-дослідних робіт, присвячених ефективності радіолокації існуючих РЛС, зазначається, що їх можливості не дозволяють досягти потрібного рівня надійності в умовах застосування в конструкції літальних апаратів технології штучного зниженою ЕПВ. Гостро постало питання розроблення та впровадження нових високоефективних методів радіолокації, а також визначення можливих шляхів щодо модернізації існуючих РЛС. Для вирішення цього питання необхідне створення науково-методичного апарату шляхів підвищення ефективності радіолокації повітряних цілей зі штучно зниженою ЕПВ та реалізація прийнятих рішень [1].

У багатьох відомих наукових дослідженнях, які в цілому або частково присвячені оцінці ефективності радіолокаційної техніки, пропонуються різноманітні підходи до її визначення. Ефективність радіолокації визначалася щодо можливості виявлення та супроводження високоманеврених, малорозмірних повітряних цілей в умовах складних радіозавад, але відповідність можливостей РЛС вимогам локації повітряних цілей зі штучно зниженою ЕПВ, врахування технологічних та конструкторських рішень щодо створення сучасних літальних апаратів та впливу цих факторів на ефективність радіолокації не розглядалися. У відомих роботах наведені методики штучного зниження ЕПВ, що дозволяє оцінити характеристики певних типів літальних апаратів і визначитися щодо методів підвищення ефективності радіолокації повітряних цілей, створеним за згаданою технологією.

Таким чином, підходи, які існують на даний час, не дозволяють в повному обсязі достовірно оцінити та спрогнозувати вплив характеристик та можливостей сучасних літальних апаратів на ефективність їх радіолокації, розробити методи виявлення та супроводження повітряних цілей зі штучно зниженою ЕПВ.

Основна частина. Технологія штучного зниження ЕПВ полягає у зменшенні площі віддзеркалення з одиниць до сотих долей квадратних метрів. Сутність полягає у використанні неметалічних матеріалів, що забезпечують під час взаємодії з електромагнітною хвилею поглинання, розсіювання та інтерференцію її енергії [2]. З розвитком і удосконалюванням технології створення комплектуючих літальних апаратів поступово постало питання про зниження помітності літальних апаратів у діапазонах хвиль, на яких відбувається виявлення об'єктів і наступне їх супроводження.

Скритність є величезним недоліком щодо виявлення літальних апаратів. Невиявлений РЛС літальний апарат неможливо супроводжувати. Розмір ЕПВ пов'язаний з величиною енергії вторинного випромінювання під час радіолокаційного опромінення літального апарату. Зазначений факт позначається на відстані радіолокаційного виявлення, взяття на супроводження в цілому. Штучне зниження ЕПВ літального апарату суттєво зменшує зазначені характеристики. Навіть якщо повітряна ціль зі штучно зниженою ЕПВ і може бути виявлена, вона буде захоплена на супроводження на меншій дальності, що не дасть змоги виміряти її поточні координати. І навпаки, зменшення часу перебування у зоні виявлення позначається на зниженні ефективності роботи РЛС. Більшість РЛС, що знаходяться в експлуатації країн

світу, використовують радіолокаційні та інфрачервоні засоби виявлення і супроводження, тобто залежать від радіолокаційної й інфрачервоні помірності літальних апаратів [3].

Зниження радіолокаційної й інфрачервоні помірності, тобто досягнення скритності літального апарату означає, що вона як би "птопає" у своєму оточенні. Тобто відбиває радіохвилі так само, як і її оточення. Літальні апарати виділяються зі свого оточення через ефект Доплера, сутність якого полягає у перекрученні спектру сигналу віддзеркаленого від динамічного об'єкту. Отже, для отримання радіолокаційної інформації про літальний апарат необхідно збільшити, наскільки можливо, амплітуду відбитої від об'єкту електромагнітної хвилі. Іншими словами, необхідно прагнути до максимізації величини ефективної віддзеркалюючої поверхні об'єкту.

Фахівці у галузі радіолокації вважають [4], що зменшення ефективної віддзеркалюючої поверхні літального апарату є одним з найбільших недоліків, які ускладнюють ефективну роботу РЛС. Причому не тільки через можливість зниження виявлення за дальністю, але і через можливість пропорційного збільшення енергетичного потенціалу передавача РЛС, необхідного для виявлення літального апарату. Це зумовлено тим, що дальність виявлення об'єкту зменшується пропорційно $\sqrt[4]{\sigma}$, у той час, як необхідний енергетичний потенціал передавача збільшується прямопропорційно σ , що впливає з аналізу виразу:

$$D_0 = \sqrt[4]{\frac{P_i G_0^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{\text{пр.мін}} q k}}, \quad (1)$$

де P_i – імпульсна потужність передавача РЛС; G_0 – коефіцієнт підсилення антени РЛС; λ – довжина хвилі передавача РЛС; σ – ефективна поверхня віддзеркалення літального апарату; $P_{\text{пр.мін}}$ – чутливість приймача РЛС; q – параметр виявлення; k – результуючий коефіцієнт втрат.

Помірність об'єктів у радіолокаційному діапазоні хвиль залежить від ефективної поверхні віддзеркалення, що визначається з виразу:

$$\sigma_{\text{об}} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_s}{E_i} \right|^2, \quad (2)$$

де R – відстань між радіолокаційною станцією та об'єктом; E_i – напруженість електричного поля падаючої хвилі поблизу об'єкта; E_s – напруженість електричного поля після дифракції на об'єкті, обмірювана радіолокаційною станцією, розташованою на відстані R від об'єкту.

Таким чином, ефективна поверхня віддзеркалення об'єкту у тому вигляді, у якому вона була визначена, є по суті ефективним перетином планеру літального апарату й визначає величину зворотного розсіювання радіохвилі. Це означає, що вона характеризує дифракцію (що визначається як будь-яка зміна напрямку поширення падаючої хвилі) у напрямку протилежному напрямку падаючої хвилі. Вираз (2) визначає величину ефективної поверхні віддзеркалення в залежності від модуля коефіцієнта відбиття E_s/E_i цілі.

Коефіцієнт віддзеркалення об'єкту залежить від її форми, матеріалу й інших факторів. Крім того, віддзеркалення цілі буде різним для різних видів поляризації падаючої електромагнітної хвилі, тобто реакція об'єкту залежить від поляризації електромагнітного поля падаючої хвилі і зовсім необов'язково, щоб відбита хвиля мала ту ж поляризацію, що і випромінена. Процес взаємодії електромагнітної хвилі викликає ефект деполіризації радіохвиль.

Зазвичай позначають через E_{1S} і E_{2S} дві ортогональні складові падаючого поля, а через E_{1i} і E_{2i} дві складові дифрагovanого поля, тому можна записати співвідношення:

$$\begin{bmatrix} E_{1s} \\ E_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{1i} \\ E_{2i} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Співвідношення (3) визначає матрицю зворотного розсіювання об'єкту, що складається з чотирьох комплексних елементів a_{ij} . Відповідно до виразу (2) ефективна поверхня віддзеркалення має чотири компоненти, які, використовуючи (3), можна записати у вигляді:

$$\sigma_{ij} = 4\pi R^2 |a_{ij}|^2, \quad \text{де } i, j = 1, 2. \quad (4)$$

Компоненти σ_{12} і σ_{21} описують явище деполяризації на об'єкті.

Як впливає з (2), ефективна поверхня віддзеркалення залежить від довжини хвилі.

У кожній з цих областей на величину ефективної поверхні віддзеркалення об'єкта впливає її матеріал. Сучасні технології штучного зниження площі віддзеркалення повітряних об'єктів використовують два види радіолокаційних покриттів: поглинаючі та інтерференційні. Матеріал поглинаючих покриттів вибирається за умови забезпечення повного поглинання падаючих радіохвиль і відсутності віддзеркалення останніх від межі розділу середовищ. В інтерференційних покриттях матеріал і структура покриття вибираються так, щоб падаюча і відбита радіохвиля взаємно компенсували одна одну. Використання спеціальних матеріалів і фарб також дозволяє зменшити ефективну площу віддзеркалення літального апарату [5].

Найбільшою ефективністю володіють спеціально розроблені поглиначі радіохвиль, але їх застосування не завжди можливе, тому що вони мають часто велику товщину, а відповідно і масу, та піддаються ерозії. Однак є інтерференційні поглиначі, що мають меншу товщину, але вони вузькосмугові.

Використання покриттів у першій зоні Френеля на всіх опуклих поверхнях, а також блискучі точки, тобто гострих ребрах, двограних і тригранних відбивачах і всіх поверхнях малої кривизни перпендикулярних напрямку падіння хвилі ускладнює її віддзеркалення. Природно, що при зміні напрямку приходу радіохвиль положення зон Френеля відповідним чином зміщується. Це обмежує область застосування класичної радіолокації.

Також з метою збільшення площі "зіткнення" радіопоглинача покриття з падаючою електромагнітною хвилею на практиці поширені покриття з так званими "геометричними неоднорідностями" [6]. Ці покриття характеризуються тим, що їхня структура представляє собою періодично повторювані нерівності у виді пірамід чи конусів нерегулярних структур. Одним із загальних недоліків поглинаючих покриттів усіх типів є відносно невисока їх діапазонність і велика вага. Також великим недоліком є вплив температури на їхні електричні властивості та міцнісні характеристики.

Поряд з тим, серійні зразки радіопоглинаючих матеріалів відповідають вимогам до маси та їх температурного діапазону, тому вони можуть практично використовуватися у літакобудуванні.

Принцип дії радіопоглинаючих покриттів пояснюється на основі двох перших рівнянь Максвелла, які мають вигляд:

$$\text{rot} \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (5) \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{I} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (6)$$

В сталому гармонічному режимі рівняння середовища мають вигляд:

$$\vec{B} = \mu \times \vec{H}, \quad (7) \quad \vec{D} = \varepsilon \times \vec{E}, \quad (8) \quad \vec{I} = \sigma \times \vec{E}. \quad (9)$$

В нейтральному стані середовища розповсюдження радіохвиль, використовуючи матеріальні рівняння, діелектрична проникненість середовища визначиться як

$$\varepsilon_c = \varepsilon + j \frac{\sigma}{\omega}. \quad (10)$$

Зважаючи, що в (10) входить провідність σ , рівняння (6) можливо переписати у формі

$$\text{rot} \vec{H} = j\omega \varepsilon_c \vec{E}. \quad (11)$$

Уявна частина діелектричної проникності ε відповідальна за омичні втрати в матеріалі. Це так званий ефект Джоуля.

Але діелектрична проникність ε у виразі (11) сама може мати уявну частину ε'' :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (12)$$

що є також тангенсом кута втрат потужності падаючого сигналу опромінення

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (13)$$

і описує втрати в діелектриках.

Розглядаючи рівняння Максвелла вигляду (12), надзвичайно складно відрізнити втрати, зумовлені σ і ε'' . По суті справи, рівняння (13) дозволяє вважати, що всі втрати зумовлені провідністю σ . Отже, не буде помилковим вважати, що дисипація енергії в речовині завжди може бути описана провідністю речовини.

Завдяки введенню комплексної діелектричної проникності, формули, що визначають величини коефіцієнта віддзеркалення R і проходження T , можуть бути описані як

$$R = \frac{j(Z_2^2 - Z_1^2) \operatorname{tg} k_2 l}{2Z_1 Z_2 + j(Z_2^2 + Z_1^2) \operatorname{tg} k_2 l}, \quad (14)$$

$$T = \frac{\frac{2Z_1 Z_2 e^{jk_1 l}}{\cos k_2 l}}{2Z_1 Z_2 + j(Z_2^2 + Z_1^2) \operatorname{tg} k_2 l}. \quad (15)$$

У виразах (14), (15) $k_i = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_i\mu_i}}{\lambda\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ – хвильове число.

Ці рівняння служать для знаходження величини коефіцієнтів віддзеркалення і проходження (при нормальному падінні) на діелектричну пластину і можуть бути застосовані у разі дослідження властивостей поглинаючого покриття визначеної товщини. Для цього необхідно тільки використовувати у виразах для Z і k комплексну діелектричну проникність, визначену згідно (15).

Якщо розглядати радіопоглинаюче покриття з товщиною більшою за довжину хвилі, то коефіцієнт віддзеркалення при падінні на межу розділу середовищ визначається виразом:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (16)$$

Очевидно, що якщо поглинаюче покриття середовища призначено для маскування повітряного об'єкту, або зменшення ефективної площі віддзеркалення об'єкту, то воно не повинне бути причиною віддзеркалення, що виражається нульовою величиною коефіцієнту віддзеркалення R . Отже, необхідне узгодження характеристичних опорів на межі розділу повітря-поглинач:

$$Z_{\text{повітря}} = Z_{\text{поверхня}}. \quad (17)$$

Очевидно, що необхідно також, щоб енергія поглиналася у середині цього покриття.

Отже, використання електромагнітних поглиначів вирішує одночасно дві проблеми: розсіяння енергії в матеріалі; узгодження характеристичних опорів на межі розподілу повітря-поглинач [7].

Для забезпечення проходження електромагнітної хвилі в товщу матеріалу і виключення її віддзеркалення необхідне узгодження характеристичних опорів на поверхні розділу повітря-поглинач.

Існують наступні види плавного узгодження характеристичних опорів на поверхні розділу повітря-поглинач:

– узгодження за допомогою показника градієнта переломлення, тобто величина відносних магнітних і діелектричних проникностей збільшується до максимальної величини;

– узгодження з використанням загострених пірамід, схожих на ті, які застосовують для виготовлення узгоджених хвильоводних навантажень [8].

В загальному випадку, відносна діелектрична проникність $j\omega$ утворюється суперпозицією двох комплексних відносних діелектричних проникностей ϵ та знаходиться з виразу

$$\frac{\epsilon_1^{-1}}{\epsilon_1^{+U}} = p \frac{\epsilon_1^{-1}}{\epsilon_1^{+U}} + (1-p) \frac{\epsilon_2^{-1}}{\epsilon_2^{+U}}, \quad (18)$$

де p – частина загального об'єму, яка зайнята середовищем; U – об'єм, зайнятий іншим однорідним середовищем – змінюється залежно від форми елементів середовища.

Плавне узгодження характеристичних опорів можна проводити не тільки за допомогою поглинача з пірамідальною поверхнею. Його можна добитися із використанням однорідного по товщині матеріалу з плавно змінюваною концентрацією наповнювача – вуглецю. Наповнювач одночасно служить і для розсіювання енергії. Плавне узгодження характеристичних опорів, також як і узгодження на основі магнітних ефектів, дозволяє створювати широкосмугові поглиначі радіохвиль [9].

Узгодження магнітних ефектів досягається на основі співвідношення (18). Легко визначити, що у разі нормального падіння, умова (18), тобто узгодження характеристичних опорів виконується відповідно:

$$Z_i'' = Z_i^\perp = Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}, \quad (19)$$

а відносні магнітні і діелектричні проникності середовища поглинача задовольняють умові

$$\epsilon_2 = \mu_2. \quad (20)$$

Поглинач, що характеризується співвідношенням (19), називається магнітним. Він автоматично володіє широкою смугою пропускання, якщо тільки умова (20) справедлива для всієї робочої смуги частот поглинача. Останнє не так просто реалізувати, оскільки величини ϵ і μ залежать від несучої частоти падаючої радіохвилі [10].

Але однієї умови (20) недостатньо, необхідно ще розсіяти енергію, оскільки омичні втрати повинні зумовлюватися провідністю. Отже, згідно співвідношення (11), діелектрична проникність повинна бути комплексною, а при цьому, згідно (20), магнітна проникність також повинна бути комплексною. Це накладає жорстке обмеження на магнітні поглиначі, що характеризуються умовою (18). Особливо, якщо використовується матеріал малої товщини. Теоретично в цьому випадку для забезпечення достатнього поглинання потрібне високе значення питомої провідності. Така велика величина питомої провідності, у свою чергу, вимагає згідно виразу $\mu = \mu' - j\mu''$, відповідного збільшення уявної частини магнітної проникності, яка в даний час практично не реалізується. Тому в теперішній час ніхто не зміг наблизитися до створення магнітних поглиначів з товщиною менше половини довжини хвилі.

Для створення магнітних поглиначів необхідно або створити відносну магнітну проникність штучно за допомогою струмів циркулюючих в замкнутому контурі, або ввести в поглинаюче покриття феритовий порошок, оскільки ферит є магнітним матеріалом. Ферит вводиться в поглинач або сплавлянням, або у вигляді порошкового наповнювача гуми. Ферити важкі, оскільки вони мають практично ту ж питому густину, що і залізо. Внаслідок цього магнітні поглиначі на їх основі володіють достатньою масою та не мають практичного застосування.

Узгодження характеристикних опорів може проводитися за допомогою багатопарової структури радіопоглинаючого екрану. Вона має високу вартість і велику товщину, та зате дозволяє зменшити віддзеркалення від металу на 40–50 дБ в робочій смузі частот існуючих РЛС.

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_n \mu_n}}, \quad \text{де } \lambda - \text{довжина хвилі у вакуумі.}$$

Всі розглянуті вище широкосмугові поглиначі мають велику товщину. Можна спробувати зменшити їх фізичну товщину, зберігаючи повністю товщину електричну (тобто товщину, виражену в довжинах хвиль), підбираючи матеріал з великою величиною діелектричної або магнітної проникності.

За допомогою інтерференційного поглинача типу екран Далленбаха можна отримати відносно ефективний радіопоглинач, якщо використовувати не дуже товстий поглинаючий матеріал, що наклеєний на метал. Цим металом може бути, наприклад, лист алюмінію. Отриманий таким чином поглинач називається екраном Далленбаха. Наявність металу обов'язкова. Принцип дії екрану Далленбаха досить простий. Вибором параметрів (останні згідно (11) можуть бути комплексними) досягають того, що віддзеркалення хвилі від першої і другої меж розділу знаходяться в протифазі. Таким чином, завдяки інтерференції віддзеркалених хвиль добиваються мінімуму (або якщо це можливо, нульового значення) коефіцієнту віддзеркалення на межі розділу середовищ.

Отже, екран Далленбаха є інтерференційним або резонансним поглиначем, що визначає його вузькосмуговість. Із-за того, що екран Далленбаха діє на основі інтерференції віддзеркалених хвиль витікає, що товщина поглинаючого шару повинна мати величину біля чверті довжини хвилі (або непарного числа чвертей довжин хвиль) в матеріалі. Неважко зрозуміти чому необхідні інтерференційні поглиначі. На надвисоких частотах більшість матеріалів характеризується тим, що $|\mu| < |\varepsilon|$.

Отже, неможливо задовольнити умову (19), необхідну для реалізації узгодження характеристикних опорів (18), тобто, для створення широкосмугових поглиначів [6].

Таким чином, як зазначено у [9], можна розраховувати на зменшення ефективної площі віддзеркалення, якщо замість поверхонь, що створюють дзеркальне відображення, використовувати неоднорідні шорсткуваті поверхні, на яких відбувається дифузійне віддзеркалення. При дифузійному віддзеркаленні падаюча енергія радіохвилі відбивається у всіх напрямках на відміну від випадку гладкої поверхні, коли уся вона цілком віддзеркалюється в одному напрямку.

Вважається, що рішення проблеми низької радіолокаційної помітності на основі застосування матеріалів, що розсіюють енергію опромінення в напрямку, відмінному від напрямку на джерело випромінювання, може дати ефект тільки у відношенні моностатичних, але не бістатичних радіолокаційних станцій. Тому з розрахунком на перспективу вважають більш ефективним використання саме протирадіолокаційних покриттів і матеріалів.

Особливістю літальних апаратів є штучно знижена ефективна площа віддзеркалення (радіолокаційна невидимість за рахунок використання композитних матеріалів, чи ефекту іонізації прикордонного шару атмосфери на фюзеляжі літального апарату внаслідок високих швидкостей польоту) та здатності маневрувати за напрямком з великим модулем розвиваємих перевантажень (до 9 одиниць для пілотованих і 20 одиниць для непілотованих літальних апаратів). Сучасні РЛС, ефективність яких недостатня для виявлення літальних апаратів виготовлених з композиційних матеріалів, а саме: радіолокація літаків зі зниженою ЕПВ неможлива або не своєчасна; ймовірність виявлення літака (як наслідок) знижується, а динамічна помилка його супроводження перевищує допустиме значення.

Сьогодні загальноновизнано, що створення літальних апаратів зі штучно зниженою площею віддзеркалення є перспективним напрямком розвитку авіатехніки. Зростання

льно-технічних характеристик літальних апаратів за напрямком штучного зниження площі віддзеркалення створили передумови щодо зниження ефективності їх локації РЛС.

Висновки. Технологія штучного зниження ЕПВ полягає у зниженні площі віддзеркалення з одиниць до сотих долей квадратних метрів і розвивається за трьома основними напрямками: покриття літальних апаратів радіопоглинаючими матеріалами, оптимізація конфігурації планеру та утворення комплексного навантаження в конструкції і іонізація прикордонного шару повітря навколо літака. Найбільш перспективним вважається напрямок штучного зниження ЕПВ за допомогою покриття літальних апаратів радіопоглинаючими матеріалами інтерференційного або дифракційного типу. Застосування у практиці літальних апаратів зі штучно зниженою ЕПВ суттєво знизило ефективність їх виявлення та взяття на супроводження РЛС. Це пов'язано з обмеженими можливостями існуючих РЛС щодо радіолокації таких типів літальних апаратів.

Таким чином можна зробити узагальнюючий висновок, що підвищення ефективності супроводження повітряних цілей зі штучно зниженою ефективною поверхнею випромінювання можливе при реалізації в етапах функціонування радіолокаційних станцій частотно-фазового методу виявлення, пасивно-активного методу супроводження, адаптивного методу керування антеною, а також використання багатопозиційних систем радіолокації.

Література

1. Резонансні методи отримання і використання інформації в радіо технології / [І. Р. Пархомей, В. А., С. В. Толюпа, В. А. Дружинін, В. С. Наконечний]. – К.: Логос, 2013. – 146 с.
2. William F. Stenberg, Walter B. Ford. Electricity and electronics basic. American technical society Chicago. USA. – 2002 y. – 222 p.
3. Дружинін В. А. Проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення / В. А. Дружинін. – К.: Логос, 2013. – 230 с.
4. Барабаш Ю. Л. Проблемы радиолокационного распознавания и возможные пути их решения / Ю. Л. Барабаш. – К.: 1984. – 369 с.
5. Толюпа С. В. Особливості функціонування систем радіобачення з багатопозиційною локацією об'єктів моніторингу / С. В. Толюпа, В. А. Дружинін, В. Г. Сайко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіoeлектроніка та телекомунікації. – 2012. – №738. – С. 87-95.
6. Кравець І. А. Щодо можливостей впливу резонансного електромагнітного поля на властивості радіопоглинаючого діелектрика / І. А. Кравець, І. Р. Пархомей // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – 2005. – №3(41). – С. 38-43.
7. Пархомей І. Р. Методика розрахунку радіопоглинаючих покриттів аеродинамічних літальних апаратів / І. Р. Пархомей // Зб. наук. пр. ВІПІ НУТУ «КПІ». – 2002. – №1. – С. 146-151.
8. Толюпа С. В. Синтез інформаційно-телеметричних комплексів цифрового радіобачення з багатопозиційним прийомом / С. В. Толюпа, В. А. Дружинін // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т.10., №1. – С. 24-29.
9. Олексієнко Б. М. Можливі шляхи зниження радіолокаційної помітності аеродинамічних літальних апаратів / Б. М. Олексієнко, І. Р. Пархомей, В. А. Дружинін // Зб. наук. праць НАДПСУ. – 2007. – №40, Ч. 2. – С. 41-44.
10. Пархомей І. Р. Обґрунтування процесу взаємодії НВЧ сигналу з кристалічною структурою діелектрика / І. Р. Пархомей, І. А. Кравець // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – 2005. – №2(40). – С. 38-43.