

УДК 621.396.96

А.А. Звонко

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІСНУЮЧИХ РАДІОПОГЛИНАЮЧИХ ПОКРИТТІВ ДО БОЙОВИХ ЧАСТИН РАКЕТ

Проведений аналіз існуючих радіопоглинаючих покриттів, основних вимог до них та розглянуто можливості їх застосування до бойових частин ракет з метою зменшення радіолокаційної помітності.

Ключові слова: радіолокаційна помітність, радіопоглинаючі покриття, інтерференційні покриття.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проведений аналіз шляхів зниження радіолокаційної помітності та можливостей щодо їх використання для військових об'єктів показав, що на сьогодні найбільш перспективним та ефективним способом зниження радіолокаційної помітності для бойових частин ракет є використання радіопоглинаючих покриттів [1,4,6,7].

При взаємодії електромагнітного поля з матеріалом, що покриває поверхню об'єкта, спостерігається поглинання, розсіювання та інтерференція електромагнітних хвиль.

Поглинання послаблює поле падаючої хвилі за рахунок переходу електромагнітної енергії в теплову внаслідок діелектричних та магнітних втрат.

Розсіювання відбувається в результаті перетворення потоку електромагнітної енергії визначеного напрямку в потоки різних напрямків, в тому числі таких, що не досягнуть прийомних антен засобів розвідки.

Інтерференція радіохвиль характеризує відбивну здатність радіопоглинаючого матеріалу в напрямку найбільшого вторинного випромінювання від його поверхні [2].

Метою статті є проведення аналізу існуючих радіопоглинаючих покриттів, основних вимог до них та розгляд можливостей їх застосування до бойових частин ракет.

Виклад основного матеріалу

До радіопоглинаючих матеріалів висуваються наступні вимоги [2]:

мінімальне відбиття радіохвиль від поверхні об'єкта;

максимальне поглинання електромагнітних хвиль;

широкий частотний діапазон та кутовий сектор збереження працездатності;

високі міцнісні характеристики;

мінімальна маса;

здатність працювати в широкому інтервалі температур;

стійкість до агресивних середовищ;

надійність.

На сьогодні існують наступні види радіопоглинаючих покриттів: інтерференційні, поглинаючі, покриття, що використовують ефект повного проходження хвилі в інше середовище, та невідбивні структури [3,4,6].

1. Інтерференційні покриття.

Принцип дії інтерференційних покриттів оснований на зниженні інтенсивності перевипромінюваної енергії за рахунок взаємодії двох і більше когерентних пучків електромагнітних хвиль, що пройшли різні шляхи розповсюдження від об'єкта до приймача РЛС розвідки. В результаті когерентного додавання різних пучків утворюється просторова інтерференційна картина. Тому можливе послаблення відображених сигналів у напрямках, що збігаються з мінімумами інтерференційної картини.

Розрізняють два основні види інтерференційних покриттів: одношарові та багатшарові.

В основі розробки одношарових покриттів лежить явище двопроменевої інтерференції. Діаграма перевипромінювання цих покриттів формується за рахунок інтерференції променя, що відображений від зовнішньої границі, та променя, відображеного від границі розподілу «покриття-об'єкт». Антенна система фокусує промінь. За рахунок інтерференції двох монохроматичних хвиль \vec{E}_1 та \vec{E}_2 , що відрізняються постійною фазою δ , інтенсивність результуючого поля $\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ залежить від різниці фаз δ :

$$I_p = \langle E_p^2 \rangle = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (1)$$

де $I_1 = \langle E_1^2 \rangle$, $I_2 = \langle E_2^2 \rangle$,

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n_1 h \cos \Theta', \quad (2)$$

де n_1 - коефіцієнт заломлення покриття;

λ_0 - довжина хвилі у вільному просторі;

h - товщина покриття;

Θ' - кут заломлення.

При нормальному падінні ($\Theta' = 0$) мінімум інтенсивності перевипромінюваної хвилі досягається при $\delta = (2m + 1)\pi$, $m=0, 1, 2, \dots, \infty$, при товщині покриття

$$h = \frac{2m + 1}{4} \frac{\lambda}{n_1}. \quad (3)$$

Під багатошаровим інтерференційним покриттям розуміється багатошарова структура однакової товщини, що перевипромінює поле, яке складається з суми променів, що проходять багаторазове відбиття. Всі відображені промені, що утворені падаючими променями, після відбиття, взаємно паралельні [3].

У багатошаровому інтерференційному покритті роль поглиначів виконує резистивна плівка, яка може замінюватися решіткою з диполів, що навантажені на резистори. Для розширення діапазонних властивостей покриття застосовують набір диполів різної довжини. Диполі розташовують на різних відстанях від відбиваючої поверхні. Застосування двох взаємно перпендикулярних решіток виключає залежність перевипромінюваних характеристик від поляризації падаючих хвиль.

2. Поглинаючі покриття.

Принцип дії поглинаючих покриттів оснований на використанні ефекту перетворення енергії падаючих електромагнітних хвиль в теплову або інші види енергії. Явище інтерференції хвиль має другорядний характер. Матеріал поглинаючого покриття вибирається з умови забезпечення повного поглинання в ньому падаючих хвиль та відсутності відображення останніх від границі розподілу середовищ.

Фігурна поверхня покриття дозволяє збільшити площу дотику покриття з вільним простором. Для зменшення відбиття кут при вершині пірамід повинен бути $30-90^\circ$ (рис. 1). Кращі поглинаючі властивості досягаються за рахунок додавання в діелектричні матеріали вуглецевого пилу (сажі). Максимально допустима густина поглинаючої потужності для покриття без охолоджувача складає $0,155-0,465 \text{ Вт/см}^2$.

При застосуванні до наземних об'єктів покриття виготовляються у вигляді волосяних, гумових або дерев'яних матів, що просякнуті сумішшю каучуку та сажі. Дані покриття, маючи товщину в декілька сантиметрів, здатні зменшити потужність відбитого сигналу в 20-50 разів [6].

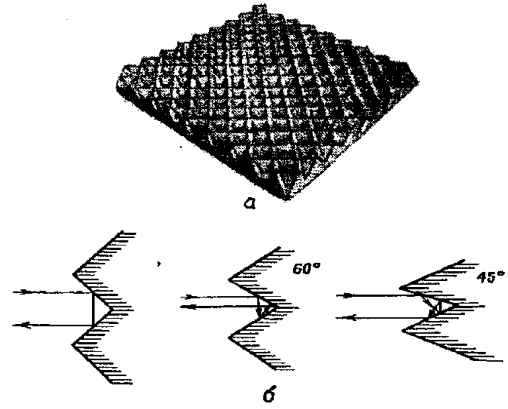


Рис. 1. Зразок форми поверхні поглинаючого типу: а-зовнішній вигляд; б- розсіювання радіохвилі

3. Невідбиваючі структури.

Невідбиваючі структури можуть бути побудовані на базі антенних решіток або конструкцій з великою кількістю дифракційних елементів. Вони формують діаграму перевипромінювання з мінімумом у напрямку прийому.

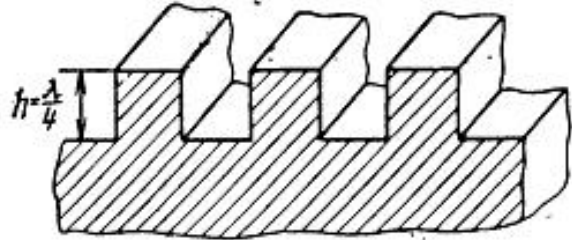


Рис. 2. Конструкція невідбиваючого покриття з вирізаними канавками

Відомим невідбиваючим пристроєм є провідне тіло з вирізаними в ньому канавками глибиною четверть довжини хвилі (рис. 2). Якщо канавки мають висоту, яка кратна цілому числу півхвилі, то така структура відбиває хвилі як ідеальне дзеркало, коли електричний вектор перпендикулярний ребру канавки (нормальне падіння).

Мінімум перевипромінюваної енергії для хвиль з довільним положенням площини поляризації можна отримати при застосуванні ґратчастої структури, в якій заглиблення та сходинок чергуються в шахматному порядку. Хороші результати отримуються, коли на відбиваючій поверхні в шахматному порядку розташовуються дифракційні елементи з напівсферичною головкою (рис. 3). Таке покриття має кращі діапазонні характеристики за рахунок розташування дифракційних елементів на різній висоті від підкладки [3].

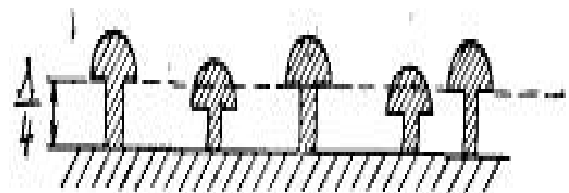


Рис. 3. Конструкція невідбиваючого покриття з дифракційними елементами та напівсферичною головкою

4. Покриття, що використовують ефект повного проходження хвилі в інше середовище.

Цей тип покриття оснований на властивості деяких матеріалів не відбивати хвилі, що падають під кутом, який називається кутом Брюстера [3].

Коефіцієнт відбиття R залежить від поляризації падаючої хвилі. Для компонентів вектора \vec{E} , розташованих перпендикулярно (\vec{E}_\perp) та паралельно (\vec{E}_\parallel) площині падіння значення коефіцієнта відбиття визначаються виразами:

$$R_\parallel = \frac{\operatorname{tg}^2(\Theta - \Theta')}{\operatorname{tg}^2(\Theta + \Theta')} \quad (4)$$

$$R_\perp = \frac{\sin^2(\Theta - \Theta')}{\sin^2(\Theta + \Theta')}, \quad (5)$$

де Θ - кут падіння електромагнітної хвилі;

Θ' - кут заломлення електромагнітної хвилі.

При збігу площини поляризації з площиною падіння, під якою розуміється площина, яка визначається вектором Пойтинга, та нормаллю до границі розподілу відбиття відсутнє ($R_\parallel = 0$) при $\operatorname{tg}(\Theta + \Theta') = \infty$. Тому відповідно до виразу (3) умова відсутності відбиття має вигляд

$$\Theta + \Theta' = \pi/2. \quad (6)$$

Умова (6) означає, що відбитий та переломлений промені взаємно перпендикулярні (рис. 4), при цьому хвиля повністю переходить в інше середовище (покриття). Фізично це пояснюється тим, що поле падаючої хвилі викликає коливання електронів в матеріалі покриття. Електрони коливаються в напрямку електричного вектора, що поширюється в покритті хвилі. Диполі орієнтуються в напрямку, що перпендикулярний напрямку поширення. Вони породжують вторинну (відбиту) хвилю. Так як збуджений диполь (коливаючий електрон) не випромінює вздовж своєї осі, то в дзеркальному відображенні відсутній потік енергії. На рис. 4 цьому відповідає напрямок стрілок, які умовно показують положення диполів.

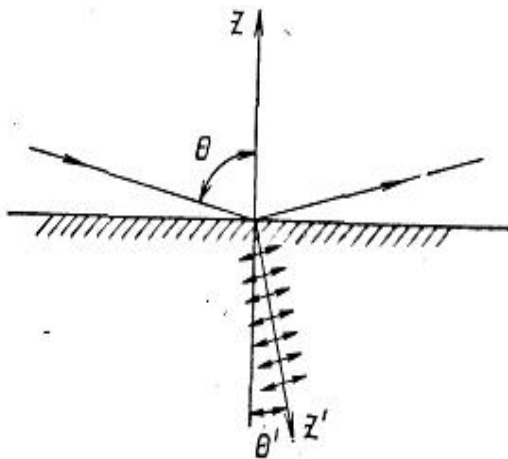


Рис. 4. Принцип дії покриття, що використовує ефект повного проходження електромагнітної хвилі в інше середовище

Співвідношення, що описує закон заломлення, має вигляд

$$\sin \Theta / \sin \Theta' = n / n_1. \quad (7)$$

З врахуванням (6) вираз (7) перетворюється

$$\operatorname{tg} \Theta = n / n_1. \quad (8)$$

Для діелектричних покриттів відображення відсутнє при кутах падіння

$$\Theta = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}}. \quad (9)$$

Аналогічно можна отримати умову відсутності відбиття для перпендикулярної компоненти \vec{E}_\perp

$$\sin^2 \Theta = \frac{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - \frac{\mu_1}{\mu_0}}{\frac{\mu_0}{\mu_1} - \frac{\mu_1}{\mu_0}}, \quad (10)$$

де ϵ_0 , μ_0 - діелектрична та магнітна проникність вільного простору;

ϵ_1 , μ_1 - діелектрична та магнітна проникність покриття.

На відміну від попереднього випадку кут Брюстера при перпендикулярній поляризації існує не для всіх середовищ. Наприклад, у діелектриків він відсутній.

Плоскі хвилі з круговою та еліптичною поляризацією, що мають в своєму складі дві ортогональні компоненти \vec{E}_\perp та \vec{E}_\parallel , відбиваються.

Однак при відбитті суттєво змінюється співвідношення між компонентами \vec{E}_\perp та \vec{E}_\parallel . Якщо на покриття під кутом Брюстера падає хвиля з круговою поляризацією, то відбита хвиля стає лінійно поляризованою.

Можливості застосування покриттів до бойових частин ракет

Розглянемо можливість використання вищеперахованих покриттів для головної частини ракети.

1. Застосування інтерференційних покриттів.

Використання інтерференційних покриттів показало, що в напрямку падіння хвилі перевипромінювання відсутнє. Однак в інших напрямках інтенсивність відображених сигналів може бути велика. Це є недоліком, який обмежує застосування інтерференційних покриттів при вирішенні задачі радіолокаційного маскування об'єктів. На рис. 5 штриховою лінією показана діаграма перевипромінювання металевієї пластини, а суцільною лінією – діаграма перевипромінювання тієї ж пластини, яка захищена інтерференційним покриттям.

Другим недоліком інтерференційних покриттів є їх мала широкосмуговість

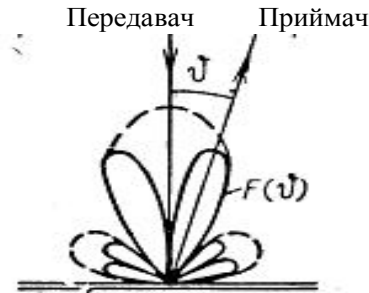


Рис. 5. Діаграма перевипромінювання металевієї пластини

2. Застосування поглинаючих покриттів.

Матеріал покриття повинен забезпечувати плавну зміну діелектричної та магнітної проникності від значень $\epsilon_r = \mu_r = 1$ на зовнішній границі покриття до значень $\mu_{n(z)}$, та $\epsilon_{n(z)}$, що забезпечують повне проникнення падаючих хвиль у покриття. Зміни μ та ϵ повинні відбуватися на інтервалі, що більший за довжину хвилі λ .

3. Застосування покриттів, що використовують ефект повного проходження електромагнітної хвилі.

Застосування покриття, що використовує ефект повного проходження електромагнітної хвилі, буде ефективним, якщо відповідним чином підібрати кут його встановлення, визначивши попередньо кут падіння хвилі та кут Брюстера покриття.

Виходячи з того, що діапазон кутів падіння електромагнітної хвилі на границю розподілу, при якому відсутня відбита хвиля, має різну величину, необхідно підібрати таке значення імпедансу, що дасть змогу розширити цей діапазон, досягти його максимуму.

Висновки

1. Аналізуючи існуючі радіопоглинаючі покриття та можливості їх використання для бойових частин ракет, найбільш ефективним на даний час є застосування покриття, що використовує ефект повного

поглинання електромагнітної хвилі. При цьому необхідно за рахунок вибору типу матеріалу покриття та його форми вирішити задачу – всеракурсного та широкосмугового поглинання.

2. Для обґрунтування характеристик та конструкції матеріалу покриття необхідно створити математичну модель, що дозволить розрахувати дифракцію електромагнітної хвилі на головній частині ракети з імпедансним покриттям, параметри якого можуть змінюватись.

Список літератури

1. Звонко А.А. *Можливості зниження радіолокаційної помітності об'єктів та застосування їх до бойових частин ракет* / А.А. Звонко // *Військово-технічний збірник*. – 2012. – №6.
2. Великанов В.Д. *Радиотехнические системы в ракетной технике* / В.Д. Великанов, В.Н. Галкин, Н.Н. Захарченко. – М.: Воениздат, 1974. – 219 с.
3. *Основы теории радиоэлектронной борьбы*. Под ред. Николенко Н.Ф. – М.: Воениздат, 1987. – С. 260-270.
4. Палий А.И. *Радиоэлектронная борьба*. 2-е изд. – М.: Воениздат, 1989. – 103 с.
5. *Методи пасивного та активного гасіння ефективної площі цілі* / С.В.Ленков, М.І. Науменко, А.В. Головань (та ін.) // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім.Т.Шевченка*. – 2010. – № 27. – С. 171-177.
6. Гончаренко Э.А. *Снижение радиолокационной заметности военной техники и объектов* / Э.А. Гончаренко // *Вологодские чтения*. – 2002. – №16. – С.8-11.
7. Беляев Ю.Л. *Радиопоглощающие материалы и технологии Стелс* / Ю.Л. Беляев // *Зарубежное военное обозрение*. – 1993. – № 4. – С.45-47.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. А.М. Зубков, Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів.

Возможности применения существующих радиопоглощающих покрытий к боевым частям ракет

А.А. Звонко

Проведений анализ существующих радиопоглощающих покрытий, основных требований к ним и рассмотрены возможности их применения к боевым частям ракет с целью снижения радиолокационной заметности.

Ключевые слова: радиопоглощающие покрытия, интерференционные покрытия, радиолокационная заметность.

Possibilities of antiradar coating application to missile warheads

A. Zvonko

Analysis of existing antiradar coatings, basic requirements, possibilities of their application to missile warheads, in order to reduce their radar visibility have been carried out.

Keywords: antiradar coating, interference coating, radar visibility.