

## ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК 621.396

А.В. Головань, В.Г. Головань, М.О. Дроздов

*Військовий інститут Одеського національного політехнічного університету, м. Одеса*

### МОЖЛИВОСТІ ПАСИВНОГО ПРОТИРАДІОЛОКАЦІЙНОГО МАСКУВАННЯ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

*У даній статті розглядаються деякі перспективні способи пасивного гасіння ефективної площі розсіювання цілі за рахунок її зниження шляхом використання довільно нахилених плоских металевих пластин.*

**Ключові слова:** ефективна площа розсіювання цілі, пасивне гасіння, ціль.

Одним з основних завдань забезпечення воєнної безпеки України є удосконалення існуючих та створення нових зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), поліпшення їх технічних та експлуатаційних характеристик. Зокрема, необхідно приділити увагу питанням живучості ОБТ за рахунок використання комплексу організаційно-технічних заходів і застосування методів та засобів протирадіолокаційного маскування (ПРЛМ), яке є одним з основних методів зниження ефективності радіолокаційних засобів противника.

Основною метою ПРЛМ є зниження радіолокаційної помітності об'єктів або такого кількісного показника, як ефективна площа розсіювання (ЕПР). Для зниження ЕПР ОБТ у діапазоні надвисоких частот використовується два методи: використання протирадіолокаційних матеріалів та вибір спеціальної форми зразка ОБТ [1-3].

Перший метод передбачає застосування інтерференційних протирадіолокаційних покриттів (ПРЛП), градієнтних ПРЛП, радіолокаційних ланцюгових аналогів ПРЛП, частотно-селективних поверхонь та різного роду гібридів. Інтерференційні покриття забезпечують низький рівень відбиття електромагнітних хвиль (ЕМХ), мають відносно невелику товщину та вагу, але вони вельми вузькосмугові, градієнтні ПРЛП відрізняються широкодіапазонністю, але мають недостатню ефективність; такі покриття мають відносно велику товщину та вагу. Усі відомі ПРЛП відрізняються недостатньою термостійкістю, слабкою стійкістю до динамічних навантажень, мають дуже велику вартість і виконуються за складною технологією.

Щодо вибору радіолокаційних маловідбиттєвих форм об'єктів, слід відзначити, що деякий час перевага віддавалась таким тілам, як

куля чи конус. Однак дослідники дійшли висновку, що для зниження ЕПР слід використовувати нахилені поверхні, які відбивають ЕМХ далеко у бік від локаційного напрямку [4]. Технологію, яка використовує саме такі поверхні, почали називати протирадіолокаційним шейпінгом (ПРЛШ). За такою технологією виконуються різноманітні зразки ОБТ. Слід зазначити, що для створення малопомітних об'єктів необхідно на етапі ескізного проекту зразка ОБТ використати процедуру ПРЛШ, а потім, якщо малопомітність, яка вимагається, не досягнута, використовувати радіопоглинальні матеріали (РПМ). При цьому очікуваний ефект зниження ЕПР у 10000 разів (-40 дБ) для літаків та надводних кораблів досягається за допомогою ПРЛШ та використанням РПМ при однаковій ефективності цих заходів, тобто за рахунок ПРЛШ у 100 разів (-20 дБ) та РПМ – у 100 разів (-20 дБ).

У результаті застосування ПРЛШ «невидимі» бойові кораблі набирають вигляду катамаранів. Надводна частина таких об'єктів є основою, яка виконана у вигляді прямокутника. Борти, ніс та корма (тобто бокові грані) майже однаково нахилені до основи, але не перехрещуються в одній точці (до речі, у геометрії такий багатогранник називається «обеліском» (рис. 1).

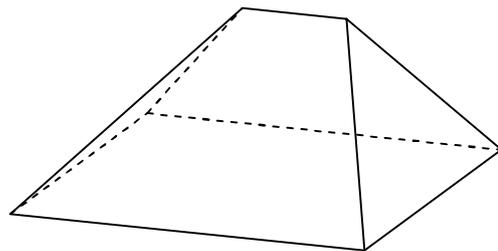


Рис. 1. Обеліск

Для того, щоб ЕПР таких кораблів була на рівні фонових завад від поверхні моря, на них також наносять РПМ.

Але поки що шейпінг не використовують для ПРЛМ озброєння та військової техніки Сухопутних військ. Для підтвердження реальності такого використання припустимо, що:

бойова машина (танк чи бронетранспортер) є копією корабля-«невидимки», тільки її корпус розміщується не на поплавцях, а, припустимо, на колесах;

електромагнітна хвиля падає точно по нормалі до однієї з бокових сторін обох об'єктів одночасно:

борт корабля являє собою прямокутну металеву пластину (без протирадіолокаційного покриття) з розмірами: довжина  $a_{ш} = 49\text{м}$ ; висота  $b_{ш} = 15,5\text{м}$ ;

борт ескізного проекту бойової машини теж являє собою прямокутну пластину без покриття з розмірами: довжина  $a_m = 6\text{м}$ ; висота  $b_m = 2,12\text{м}$ ;

довжина хвилі  $\lambda$  значно менше розмірів сторін пластини;

за умов ПРЛШ озброєння бойової машини знаходиться усередині корпусу.

З'ясуємо на скільки ЕПР корабля перевищує ЕПР бойової машини. Відомо, що максимальна ЕПР  $\sigma_{\text{макс}}$  будь-якої прямокутної пластини зі сторонами  $a, b$  на довжині хвилі  $\lambda$  дорівнює [2]

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} a^2 b^2. \quad (1)$$

Відношення ЕПР корабля  $\sigma_{\text{максШ}}$  та машини  $\sigma_{\text{максТ}}$  має вигляд

$$\frac{\sigma_{\text{максШ}}}{\sigma_{\text{максТ}}} = \frac{a_{\text{Ш}}^2 b_{\text{Ш}}^2}{a_{\text{Т}}^2 b_{\text{Т}}^2}. \quad (2)$$

Розрахунки показують, що ЕПР корабля більша ЕПР танка у 3586 разів (на 35,5 дБ).

Крім того, аналіз можливостей виявлення наземних (надводних) об'єктів радіолокаційними станціями показує, що питома ефективна поверхня розсіювання  $\sigma_0$  степу (суха трава) приблизно на 16-18 дБ більше, ніж у водної поверхні.

Це означає, що фонові завади земної поверхні (величина ефективної площі розсіювання фону, яка визначається добутком  $\sigma_0$ , на величину площі розподілу  $\delta S$  на місцевості) теж будуть перевищувати рівень завад від морської поверхні на зазначену вище величину.

Таким чином, ефективність заходів ПРЛМ «шейпінгової» бойової машини можна загалом підвищити за рахунок зниження її ЕПР на  $(35,5\text{ дБ} + 16\text{ дБ}) = 51,5\text{ дБ}$ . Це означає, що при здійсненні заходів ПРЛМ наземних об'єктів можна

знехтувати застосуванням дорогих ПРЛП, які дають можливість знизити ЕПР лише на 20 дБ, а за рахунок ПРЛШ досягти радіолокаційної невидимості наземних об'єктів в умовах їх виявлення радіолокаційними станціями розвідки.

Автори не ставлять перед собою завдання розробки «невидимої» бойової машини, але вважають, що використання ПРЛШ зі створенням стаціонарних або тимчасових споруд для прикриття зразка ОВТ є доцільним з точки зору підвищення їх живучості. Тому вирішення завдання обґрунтування можливості ПРЛМ шляхом застосування нахилених плоских поверхонь є актуальним.

Наукове завдання роботи полягає у визначенні умов виявлення бортовими радіолокаційними станціями наземних об'єктів, які покриті нахиленими поверхнями. Об'єктом дослідження є вторинне випромінювання довільно нахилених плоских поверхонь. Предметом дослідження є рівень бічного вторинного випромінювання довільно нахилених плоских поверхонь.

Метою дослідження є обґрунтування можливості ПРЛМ шляхом використання нахилених плоских поверхонь. Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі окремі завдання:

- обґрунтувати достатність використання методів фізичної оптики для оцінки ЕПР довільно нахиленої плоскої металеві прямокутної пластини при вирішенні наукового завдання роботи;
- розрахувати рівень бічного вторинного випромінювання довільно нахилених плоских поверхонь;
- оцінити рівень ЕПР довільно нахилених плоских поверхонь і порівняти її з ЕПР фону; на основі такої оцінки обґрунтувати можливість ПРЛМ об'єктів за допомогою довільно нахилених плоских металевих пластин.

Наукова новизна роботи полягає у розробці нового методу ПРЛМ, який відрізняється від відомих використанням довільно нахилених плоских металевих пластин для зниження радіолокаційної помітності наземних об'єктів, це дозволить знизити вартість маскувальних заходів.

Практична цінність роботи полягає у розробці рекомендацій щодо вибору кутів нахилу запропонованих засобів ПРЛМ.

Питанню оцінювання ЕПР тіл простої форми, дослідженням дифракції ЕМХ на ідеально провідних цілях, поверхня яких має злами, присвячені роботи [5, 6], але, на жаль, автори не надають робочих формул для таких тіл, як прямокутник та трикутник.

Робота [7] присвячена дифракції на крайках, які утворені криволінійними та плоскими поверхнями, і не дає уяви про діаграму зворотного

вторинного випромінювання (ДЗВВ) плоских поверхонь.

У статті [8] надається порівняльна оцінка основних методів розрахунку ДЗВВ металевих тіл із ребрами. Автори показують позитивні і негативні якості методів у загальному вигляді без конкретизації стосовно тіл, які є об'єктами дослідження у нашій роботі.

У класичній роботі з радіолокації [2] розглянута ДЗВВ плоскої прямокутної пластини із сторонами  $a$  та  $b$ ;  $a$  – вважається шириною пластини,  $b$  – висотою. Обидві сторони значно більші довжини хвилі  $\lambda$ . При цьому пластинка обертається в ділянці Фраунгофера навколо осі, яка перетинає пластинку навпіл по вертикалі. Вираз для ДЗВВ отримано точним методом поверхневих струмів, який також називається методом інтегрального (інтегрально-диференціального) рівняння при певних припущеннях. На жаль, в отриманому виразі відсутнє урахування крайових хвиль, а також відсутня можливість оцінити ДЗВВ нахиленої від вертикалі пластини. Крім того у монографії не обумовлені межі кутів падіння, при яких можна використовувати вираз.

У роботі за тематикою ПРЛМ [4] надаються довідкові формули для окремих геометричних тіл, у тому числі плоскої прямокутної пластини з тими ж розмірами, що і в [2]. Автор розглянув ДЗВВ при повороті пластини у двох площинах. Однак в роботі не розглянуто вплив крайових хвиль на ЕПР об'єкта, також не вказано, при яких кутах спостереження справедлива приведена формула.

Найбільш суперечливою роботою у напрямку досліджень, який розглядається, є [11]. Щодо ДЗВВ нахилених пластин, то в різних розділах монографії визначається різний внесок механізмів розсіювання у сумарний відгук від цілі; приклади ДЗВВ від прямокутної пластини визначені при її обертанні відносно вертикальної осі; графіки характеризують ДЗВВ тільки при  $\frac{a}{\lambda} \approx 3$ ; відсутній аналіз тенденції поведінки ДЗВВ при підвищенні відношення  $\frac{a}{\lambda}$ ; довідкові формули хоч і відрізняються відносною простотою, але ніде не вказані межі зміни аргументів, при яких надані співвідношення справедливі.

Найбільш фундаментальною роботою за предметом дослідження є [9]. Автор описує розсіювальні властивості деяких тіл простої форми, зокрема прямокутної пластини, в залежності від кутів опромінювання за азимутом та кутом місця. Крім того, надаються достатньо точні вирази, які отримані за допомогою методу геометричної теорії дифракції.

Таким чином, аналіз літератури за темою дозволяє зробити висновок, що можливість ПРЛМ об'єктів за допомогою довільно нахилених плоских металевих пластин є не до кінця вирішеним завданням.

Розглянемо обґрунтування достатності використання методів фізичної оптики для оцінки ЕПР довільно нахиленої плоскої металеві прямокутної пластини.

Проаналізуємо фізичні явища, що відповідають за формування розсіяного поля від об'єкта з абсолютною провідністю при використанні вузькосмугових сигналів у квазіоптичній області, коли довжина розмірів тіла значно перевищує довжину хвилі. У високочастотному наближенні існують такі феномени, що визначають сумарне розсіяне поле [10, 11]:

- відбиття від порожнинних структур (передня та задня порожнини реактивних двигунів);
- дзеркальне відбиття;
- «біжучі» хвилі, які виникають при нахиленому падінні поля на слабоопуклі та плоскі поверхні;
- дифракція на краях (крайках) плоских пластин та круглих дисків, на кутах плоских пластин та піках конусів тощо;
- «повзучі» хвилі;
- інтерактивні луна-сигнали;
- відгуки від неоднорідності поверхні та неоднорідності її кривизни (розриви, щілини, зазори, пази, шви, виступи тощо).

У деякій класифікації механізми розсіювання ранжирувані за потужністю внеску у сумарний луна-сигнал.

Природно, що при розгляданні ДЗВВ плоских пластин можна виключити відбиття від порожнин (можливих кутникових відбивачів). В роботі [11] автори вважають за необхідне урахування трьох основних механізмів розсіювання: дзеркального відбиття, «біжучих» хвиль та дифракції. Але у надвисокочастотному наближенні інші автори локалізують свою увагу тільки на двох механізмах [10-11], тому що потужність «біжучих» хвиль дуже сильно падає із зниженням довжини хвилі [12].

Максимальне значення  $\sigma_{\text{макс}}$  при дзеркальному відбитті визначається за формулою (1), а максимальне значення відгуку, що викликаний механізмом «біжучих» хвиль, дорівнює  $3\lambda^2$  [11]. Тому необхідно обґрунтувати достатність використання тільки одного механізму розсіювання, тобто, дзеркального відбиття для оцінювання ЕПР довільно нахиленої плоскої металеві пластини з метою застосування більш простого математичного апарату фізичної оптики у зв'язку з відсутністю

відповідних вже готових співвідношень у розглянутих використаних джерелах.

Розглянемо спочатку ДЗВВ безмежно тонкої ідеально провідної пластини прямокутної форми (рис. 2) із довжинами сторін  $2a$  (по горизонталі) і  $2b$  (по вертикалі), при чому величина сторін значно більша ніж довжина падаючої радіохвилі  $\lambda$ .

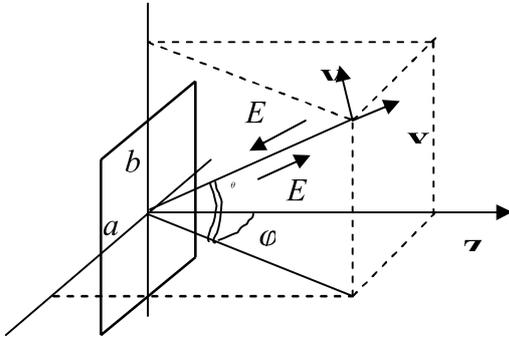


Рис. 2. Моностатичне розсіяння плоскої хвилі на прямокутній пластині

Позначимо напрямок приходу хвилі, який відраховується від нормалі  $Z$  до поверхні пластини кутами  $\varphi$  (у горизонтальній площині) і  $\theta$  (у вертикальній площині). Хвильове число  $k$  визначається відомим виразом  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Тоді, якщо  $\varphi = \theta = 0$  (нормальне падіння) метод фізичної оптики дозволяє отримати вираз для максимальної ЕПР [5]:

$$\sigma_m = \frac{64 \pi a^2 b^2}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Цей вираз є справедливим для будь-якого нахилу площини поляризації.

У приближенні фізичної оптики ДЗВВ прямокутної пластини  $\sigma(\varphi, \theta)$  теж не залежить від поляризації і визначається формулою [7]

$$\sigma(\varphi, \theta) = \sigma_m \left[ \cos \varphi \cos \theta \frac{\sin(2ka \sin \varphi \cos \theta)}{2ka \sin \varphi \cos \theta} \times \frac{\sin(2kb \sin \theta)}{2kb \sin \theta} \right]^2 \quad (4)$$

Це співвідношення дає задовільні результати лише при виконанні таких умов:

$$\begin{aligned} a > 3\lambda; & \quad b > 3\lambda; \\ |\varphi| < 35^\circ; & \quad |\theta| < 35^\circ. \end{aligned} \quad (5)$$

Таку характеристику як ДЗВВ краще розглядати як відношення теоретично розрахованої ЕПР до значення еталонної ЕПР  $\sigma_{em}$  (у нашому випадку  $\sigma_{em} = 1 \text{ м}^2$ )

$$\sigma_{\delta\sigma}(\varphi, \theta) = 10 \lg \frac{\sigma(\varphi, \theta)}{\sigma_{em}}. \quad (6)$$

Діаграму доцільно презентувати у прямокутних координатах (двовірних або тривірних).

Графік ДЗВВ для  $a=3 \text{ м}$ ,  $b=1,06 \text{ м}$  та  $\lambda = 0,03 \text{ м}$  має вигляд (рис. 3) для  $\theta = 0$ .

Більш точними можна отримати вирази для ДЗВВ прямокутної пластини за допомогою геометричної теорії дифракції, яка враховує дифракцію на ребрах та крайках, але результати розрахунку добре узгоджуються з експериментальними даними при таких умовах:

$$a > 1,5\lambda; \quad b > 1,5\lambda; \quad |\varphi| < 70^\circ. \quad (7)$$

Наведені в [4] співвідношення описують залежність ЕПР металевої пластини тільки від кута  $\varphi$  (при  $\theta = 0$ ), але для двох видів поляризації падаючої хвилі: горизонтальної  $\sigma_G(\varphi)$  та вертикальної  $\sigma_B(\varphi)$  відповідно:

$$\sigma_G(\varphi) = \sigma_m \left| \frac{\sin x}{x} - j \frac{\cos x}{2ka} + j \frac{4\pi z_0 e^{j2ka} \left[ 1 - \frac{z_0 (\cos x - j \sin \varphi \sin x)}{2 \cos \varphi \sqrt{\pi ka}} e^{j2ka} \right]}{\cos \varphi \sqrt{\pi ka} (4\pi ka - z_0^2 e^{j4ka})} \right|^2 \quad (8)$$

$$\sigma_B(\varphi) = \sigma_m \left| \frac{\sin x}{x} + j \frac{\cos x}{2ka} - j \frac{4\pi z_0 e^{j2ka} \left[ 1 + \frac{(1 + \sin \varphi)^3 e^{-jx} + (1 - \sin \varphi)^3 e^{jx}}{16kaz_0 \cos^3 \varphi \sqrt{\pi ka}} e^{j2ka} \right]}{\cos \varphi \sqrt{2\pi ka} (16\pi kaz_0 \sqrt{2ka} - e^{j4ka})} \right|^2 \quad (9)$$

$$\text{де } x = 2ka \sin \varphi; \quad z_0 = e^{j\frac{\pi}{4}}.$$

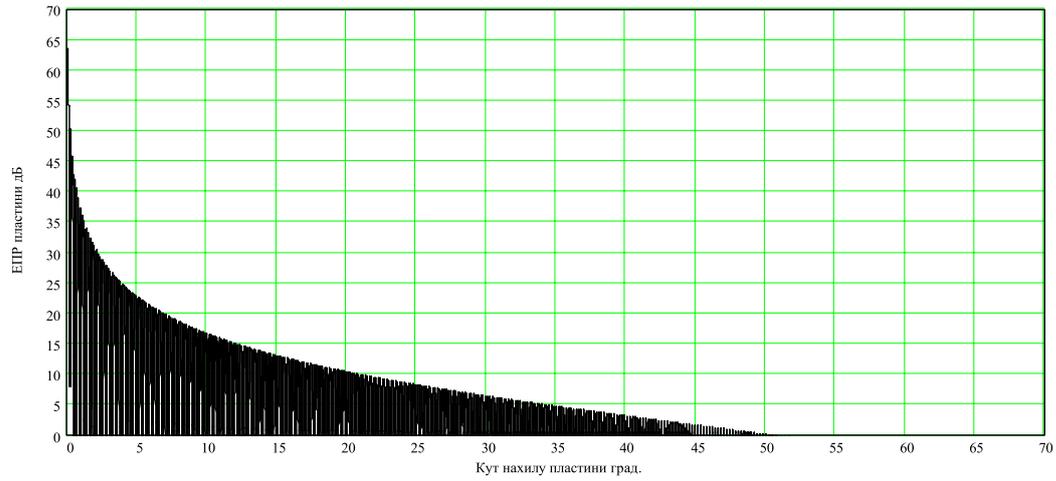


Рис. 3. ДЗВВ прямокутної металевої пластини (фізична оптика)

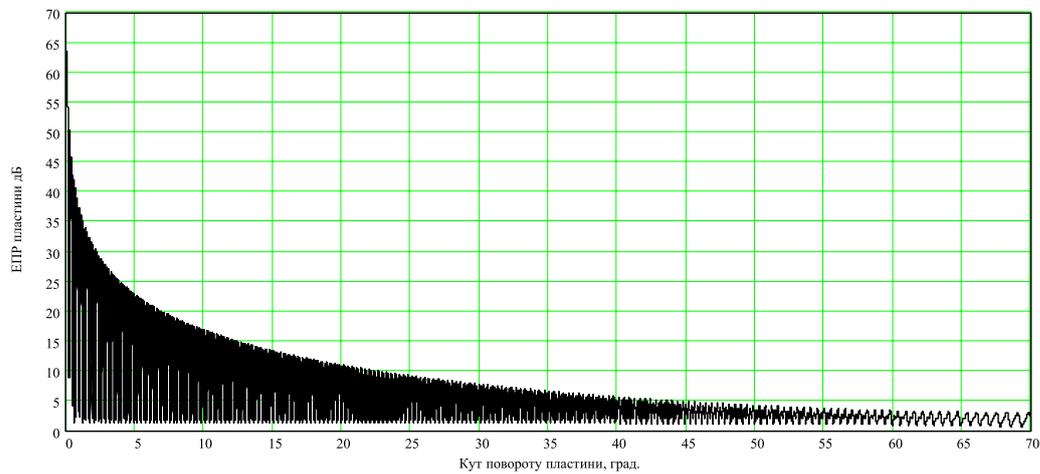


Рис. 4. ДЗВВ прямокутної металевої пластини (геометрична теорія дифракції, горизонтальна поляризація хвиль)

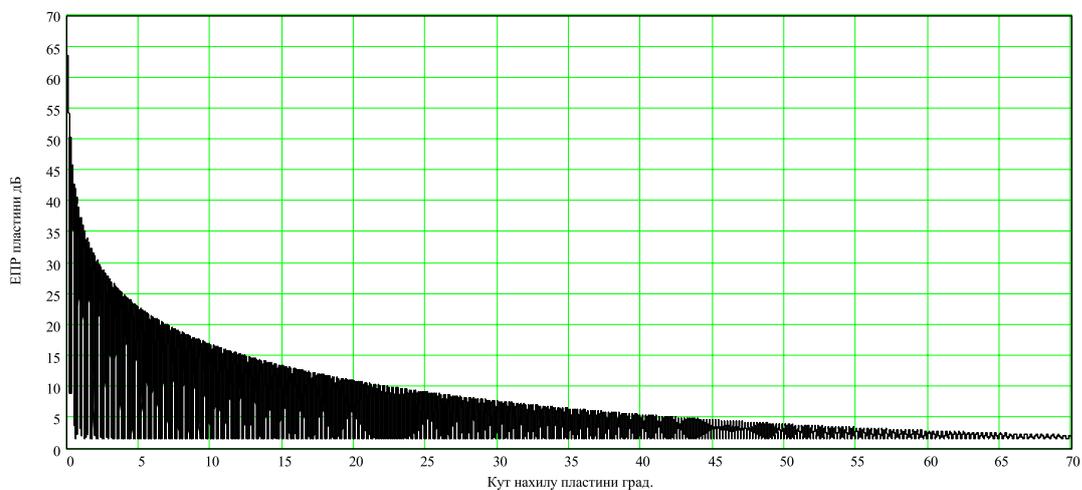


Рис. 5. ДЗВВ прямокутної металевої пластини (геометрична теорія дифракції, вертикальна поляризація хвиль)

Графіки ДЗВВ, що розраховані за співвідношеннями (8) та (9), представлені (рис. 4, 5) відповідно.

Порівняльний аналіз ДЗВВ, отриманих за співвідношеннями (4), (8) та (9), показує:

- в інтервалі кутів від  $-35^0$  до  $-70^0$  та від  $35^0$  до  $70^0$  існує певна різниця між ДЗВВ, розрахована методом фізичної оптики і ДЗВВ, що враховує механізм дифракції на крайках;

- різниця у розрахованих ЕПР у вказаних інтервалах зникає від 0 до 10 дБ;

- механізми дифракції не порушують тенденцію зниження рівня бічних пелюсток при кутах  $|\phi| > 35^\circ$ ;

- зазначена тенденція дозволяє зробити обґрунтований висновок, що якщо при кутах  $|\phi| = 35^\circ$  за рахунок ПРЛШ (або нахилення пластин) буде досягнутий бажаний рівень ЕПР (краще кажучи, рівень непомітності), то використання методів фізичної оптики є доцільним.

### Список літератури

1. Головань А.В., Ленков С.В., Науменко М.І., Маміч В.В., Плосконос І.М. Методи активного та пасивного гасіння ефективної площі цілі: Збірник наукових праць ВІ КНУ ім. Тараса Шевченка. – 2010. – № 27. – С. 171-177.

2. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин, Г.А. Костин, В.Н. Манжос и др./ Под редакцией Я.Д. Ширмана. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.

3. Палий А.И. Радиотехническая борьба. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.

4. Степанов Ю.Г. Противорадиолокационная маскировка. – М.: Советское радио, 1968.

5. Кобак В.О. Эффективная площадь рассеяния и радиолокационная заметность кораблей // Судостроение за рубежом. – 1989. – № 10. – С. 3–19.

6. Уфимцев П.Я. Приближенный расчет дифракции плоских электромагнитных волн на некоторых металлических телах. – Ч. II. // Журнал технической физики. – 1958. – Т. 28, № 11. – С. 2604–2616.

7. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Советское радио, 1962. – 243 с.

8. Кююмджан, Патхак. Равномерная геометрическая теория дифракции на идеально проводящей поверхности с ребром // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1974. – Т. 62. – № 11. – С. 40-55.

9. Нотт, Сеньор. Сравнение трех методов, применяемых в высокочастотной теории дифракции // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1974. – Т. 62. – № 11. – С. 63-71.

10. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. – М.: Советское радио, 1975. – 248 с.

11. Борзов А.Б., Соколов А.В., Сучков В.Б. Методы цифрового моделирования радиолокационных характеристик сложных объектов на фоне природных и антропогенных образований // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». – 2000. – № 3. – С. 1-24.

12. Knott, Eugene F. Radar Cross Section /Eugene F. Knott, John F. Shaeffer, Michael T. Tuley. – 2-nd ed. Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.

**Рецензент:** В.В. Скачков, д.т.н., Науковий центр бойового застосування Сухопутних військ Військового інституту Одеського національного політехнічного університету.

### ВОЗМОЖНОСТИ ПАССИВНОЙ ПРОТИВОРАДИОЛОКАЦИОННОЙ МАСКИРОВКИ ОРУЖИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

А.В. Головань, В.Г. Головань, М.О. Дроздов

*В статье рассматриваются некоторые перспективные способы пассивного гашения эффективной площади цели за счет её снижения с использованием произвольно наклоненных плоских металлических пластин.*

**Ключевые слова:** эффективная площадь рассеивания цели, пассивное гашение, цель.

### CAPABILITIES OF PASSIVE ANTI-RADAR WEAPONS AND EQUIPMENT CAMOUFLAGE

A. Holonan', V. Holonan', M. Drozdov

*in the given article Some perspective ways of passive quenching of target effective area by means of its decrease using randomly inclined flat metal plates are considered.*

**Keywords:** effective area of target dispersion, passive quenching, target.