

Є. Л. Казаков<sup>1</sup>, О. Є. Казаков<sup>2</sup>, В. М. Решетнік<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup> Харківська державна академія культури, Харків, Україна

<sup>3</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-РОЗСІЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ КОНІЧНОЇ ФОРМИ, ПОКРИТОЇ РАДІОПОГЛИНАЮЧИМ МАТЕРІАЛОМ

**Предметом** вивчення в статті є інформація про характеристики розсіювання РЛЦ при нанесенні на неї РПМ для вирішення прикладних завдань розпізнавання радіолокаційних цілей. **Метою** є отримання експериментальної оцінки поляризаційно-розсіюючих властивостей радіолокаційної цілі конічної форми на якій завдано поглинаючий матеріал магнітного типу. **Завдання:** зменшення помітності і збільшення помилок визначення координат РЛЦ при нанесенні на неї РПМ, оцінка відбивних характеристик (характеристик розсіювання) різних типів РПМ, отримання кількісних значень характеристик розсіювання цілей, покритих РПМ, для вузькосмугових сигналів. Використовуваними **методами** є: математичні моделі оптимізації, методи вирішення матричних задач. Отримані наступні **результати**. Використання РПМ призводить до істотного зниження ЕПР цілі в квазіоптичній області відображення радіохвиль при використанні вузькосмугового сигналу. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: При нанесенні на носову частину і на підставу мети конічної форми РПМ відбувається спотворення пелюсткової структури реалізації амплітуд відбитих від цих ділянок сигналів на основних і кросових поляризаціях при суміщеному прийомі, а також деяке зменшення значень амплітуд відбитих сигналів на основних поляризаціях квазіоптичній. Використання РПМ розглянутого типу також призводить до істотного зниження ЕПР цілі в області відображення радіохвиль при використанні вузькосмугового сигналу. Аналіз статистичних характеристик амплітуд відбитих від конуса сигналів (середнього значення і дисперсії), показав вплив розглянутого РПМ аналогічний впливу на реалізації даних амплітуд. Нанесення РПМ на окремі частини конуса також призводить до зменшення протяжності гістограм амплітуд відбитих сигналів на різних поляризаціях.

**Ключові слова:** радіолокаційна ціль, поляризаційна матриця розсіювання цілі, поглинаючий матеріал, вузькосмуговий сигнал.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В даний час для зменшення помітності і збільшення помилок визначення координат радіолокаційних цілей (РЛЦ) широке застосування знаходять радіопоглинаючі матеріали (РПМ). Однак, для їх успішного використання необхідно попередньо оцінити відбивні характеристики (характеристики розсіювання) різних типів цих матеріалів. Застосування в РЛС широкого діапазону частот на різних поляризаціях настійно вимагає отримання кількісних значень характеристик розсіювання цілей, покритих РПМ, для цих типів сигналів. Також в зв'язку з переходом при спостереженні за РЛЦ від однопозиційних РЛС до РЛС з рознесеним прийомом виникає необхідність отримання характеристик розсіювання РЛЦ з поглинаючими матеріалами в винесених на різні кути приймальних пунктах. Крім того доцільно провести аналіз отриманих характеристик розсіювання за одними і тими ж цілями стосовно різних використовуваних частот, поляризаціям і різних умов спостереження для одного і того ж вимірювального комплексу. Як досліджуваної мети буде використана модель конічної форми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Отримання інформації про характеристики розсіювання РПМ може бути здійснено двома шляхами: розрахунковим і на підставі експериментальних вимірювань. Перший шлях є досить складним і громіздким. Він вимагає знання величин діелектричної і

магнітної проникності РПМ і в ряді випадків не забезпечує досить високої точності визначення характеристик розсіювання цих матеріалів [1–3].

Другий шлях полягає в проведенні безпосередньо експериментальних вимірювань на полігонах з використанням спеціальних радіолокаційних установок або безлунних камер [4, 5]. У зв'язку з тим, що складні РЛЦ можуть бути утворені з сукупності об'єктів простої геометричної форми, доцільно отримати експериментальні дані по таких об'єктах з різними РПМ. Потім, використовуючи методи суперпозиції, отримувати значення характеристик розсіювання цілей для різних ракурсів спостереження. Однак, експериментальні дані, отримані в цих випадках, носять уривчастий характер для різних типів РПМ і в різних діапазонах довжин хвиль [4, 6]. Крім того, ці дані характеризують лише ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) кожного досліджуваного РПМ на одній основній поляризації.

**Метою статті** є експериментальне дослідження характеристик розсіювання об'єкта конічної форми з РПМ, що опромінюється сигналами на різних поляризаціях при суміщеному прийомі.

### Основний матеріал

В якості досліджуваної РЛЦ використовувалася модель конічної форми, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 1. Дослідження проведені на експериментальному вимірювальному комплексі [7]. Як еталон використовувався куля діаметром 200 мм. РЛЦ і куля виконані з алюмінію. Вимірювання про-

водились на частоті  $f = 9160$  МГц. Коефіцієнт моделювання  $m = 3$ .

В експериментальних дослідженнях використовувався РПМ магнітного типу ВРП-3.

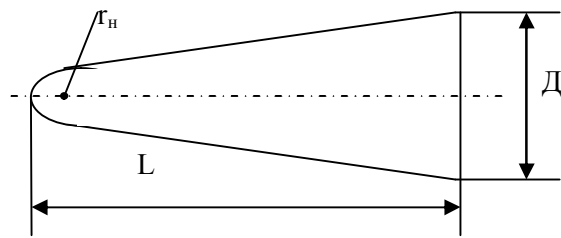


Рис. 1. Вид моделі цілі.  $L = 13000$  мм,  $D = 370$  мм,  $r_n = 46$  мм.

Радіотехнічні характеристики даного РПМ наведені в табл. 1, де  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  дійсні частини діелектричної і магнітної проникності;  $\epsilon''$ ,  $\mu''$  - уявні частини;  $|R|$  - модуль коефіцієнта відбиття.

Таблиця 1 – Характеристики РПМ типу ВРП-3

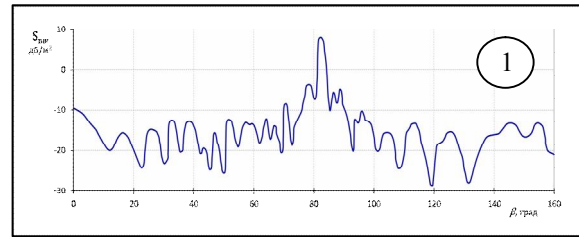
$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\mu'$	$\mu''$	$ R ^2$ , дБ
20	0	1,40	0,7	15

Товщина РПМ становила 1,3 мм. Для даної цілі використовувалося часткове покриття РПМ. Покриття наносилося на носову частину і на підставу цілі. Такі місця нанесення покриття обрані в зв'язку з тим, що розсіюючи властивості цілі в формі тіла обертання без зламів поверхні, характерні розміри якого перевищують довжину хвилі РЛС, визначаються внеском відображень від локальних ділянок розсіювання двох типів - еліптичного (носова частина) і кромочного типу. Ослаблення залишкового відображення, що виникає через різке відмінності імпедансу РПМ і металевої поверхні цілі на ділянці "кромка РПМ - конічна поверхня цілі", здійснюється шляхом вибору структури кромки РПМ. Для цього частину поверхні РПМ виконується у вигляді періодичної структури. Розміри закриваємих РПМ ділянок поверхні цілі більше або дорівнюють  $\lambda/2$ , а розміри періодичної структури складають  $\lambda$  експериментального комплексу.

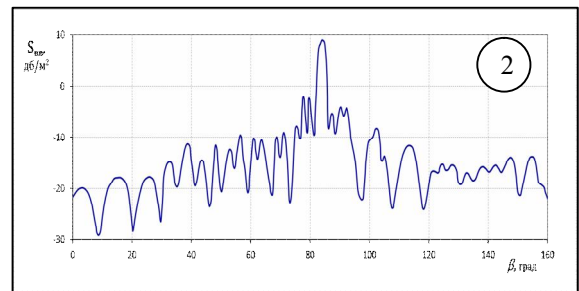
Для обраної моделі цілі досліджувалися наступні 4 варіанти часткового покриття, тут і надалі умовно позначені цифрами в дужках: 1 - без РПМ; 2 - з РПМ тільки на носовій частині; 3 - з РПМ тільки на кромці і підставі; 4 - з РПМ на носовій частині, кромці і підставі.

Результати вимірювань у вигляді діаграм зворотного вторинного відображення для амплітудних елементів ПМР в ракурсі кутів спостереження ( $0 \dots 180$ )<sup>0</sup> приведені на рис. 2 і 3. На рисунках по осі ординат відкладені значення ЕПР цілі в логарифмічному масштабі, розраховані за співвідношенням  $S$  (дБ/м<sup>2</sup>) =  $10 \log S$  (м<sup>2</sup>), а по осі абсцис - кут спостереження цілі в градусах (при  $\beta = 0$  носова частина цілі направлена в сторону експериментального комплексу). Перший індекс при  $S$  позначає поляризацію

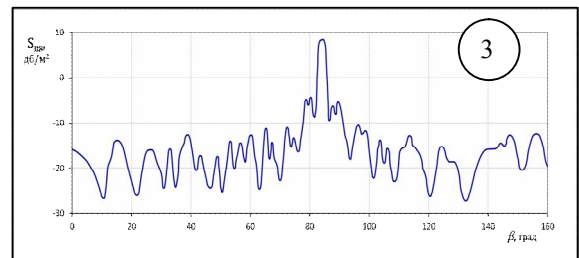
приймної антени, а другий - поляризацію передавальної антени.



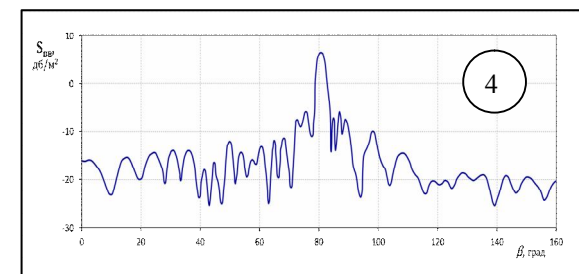
а



б



в



г

Рис. 2. Діаграми зворотного вторинного відображення для амплітудних елементів  $S_{BVP}$  ПМР в ракурсі кутів спостереження

На рис. 2 а, 3 а показані діаграми амплітудних елементів ПМР моделі цілі без покриття РПМ, а на рис. 2 б, в, г - для різних варіантів часткового покриття РПМ (варіанти покриття позначені цифрами в гуртках). Ефект зменшення ЕПР проявляється не у всьому діапазоні кутів спостереження і неоднаковий для всіх варіантів покриття. Найбільш істотне зниження середнього значення ЕПР проявляється для четвертого варіанту покриття в напрямках падіння хвилі, незначно відхиляється від осевого, і в області нормалі, проведеної до основи цілі. Зменшення середнього значення ЕПР в цих діапазонах кутів спостереження є наслідком закриття носової частини, кромки і підстави цілі РПМ, причому при падінні хвилі у напрямку нормалі до основи цілі ( $\beta = 180$ )<sup>0</sup>. Це зниження досягає  $\sim 12$  дБ.

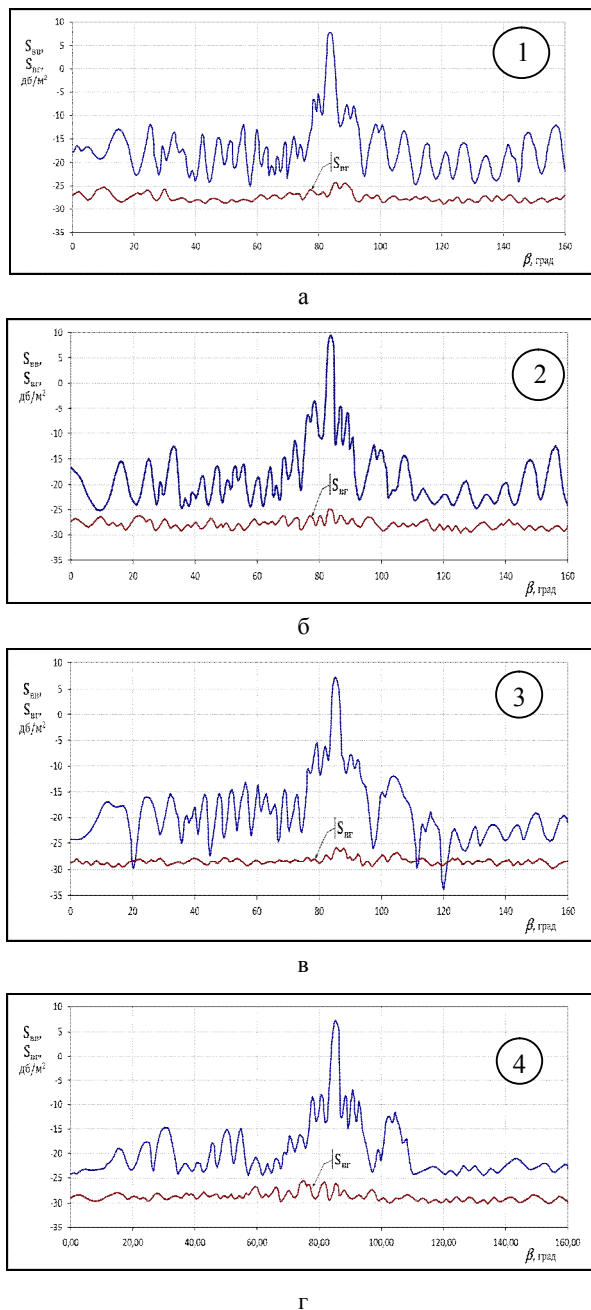


Рис. 3. Діаграми зворотного вторинного відображення для амплітудних елементів SGT і SBG ПМР в ракурсі кутів спостереження

За результатами експериментальних даних розраховані величини середніх значень і дисперсій флюктуацій амплітудних елементів ПМР моделі цілі при носових і бічних ракурсах спостереження і різних інтервалах усереднення  $\Delta\beta = (\pm 20^0; \pm 30^0; \pm 40^0; \pm 50^0; \pm 60^0)$ .

На рис. 4 а представлений характер зміни середнього значення ЕПР основних і кросового амплітудних елементів ПМР при носовому ракурсі спостереження моделі цілі, а на рис. 4 б - при бічному ракурсі спостереження. На цих рисунках по осі ординат відкладено середнє значення ЕПР, виражене в  $\text{м}^2$ , а по осі абсцис - інтервал усереднення  $\pm\Delta\beta$  в градусах, симетричний щодо ракурсу спостереження. Аналіз наведених на рис. 4 а, б графіків показує, що

найменше середнє значення ЕПР основних амплітудних елементів ПМР проявляється в напрямку зворотного відображення при носовому ракурсі спостереження ( $\beta = 0 \pm 20^0$ ) і варіанті покриття 4.

Існує відмінність в зниженні середнього значення ЕПР при вертикальній і горизонтальній поляризаціях зондуючого сигналу. Для бічного ракурсу спостереження найменше середнє значення ЕПР основних амплітудних елементів ПМР даної цілі проявляється в найбільшому з інтервалів усереднення ( $\beta = 90^0 \pm 60^0$ ), коли починає позначатися вплив ділянок закриття цілі четвертим варіантом покриття.

Вплив РПМ на зменшення середнього значення ЕПР "кросових" елементів ПМР моделі цілі не суттєво.

Дисперсія флюктуацій ЕПР елементів ПМР моделі цілі (рис. 4 в) з розширенням інтервалу усереднення для носового ракурсу спостереження зростає, а для бокового - зменшується (рис. 4 г).

Як приклад на рис. 5 і 6 представлені гістограми основного амплітудного елемента ПМР ( $S_{\text{ст}}$ ) при різних варіантах покриття конуса і різних ракурсах спостереження.

На рисунках по осі абсцис відкладені значення, виражені в метрах, а по осі ординат - кількість вимірювань, які потрапили в той чи інший інтервал спостереження значень  $F$ . Гістограми наведені для носового (рис. 5), і бічного (рис. 6) ракурсів спостереження і при інтервалі усереднення  $\Delta\beta = \pm 60^0$ . Варіанти покриття як і раніше позначені номерами 1, 2, 3, 4, - зменшується (рис. 4 г).

З рис. 5 добре видно, що гістограма для моделі цілі без покриття при носовому ракурсі спостереження має "протяжний" вид. Покриття окремих частин цілі РПМ призводить до зміни характеру гістограм.

Зменшується їх "протяжність" по осі абсцис і збільшується кількість вимірювань, які потрапили в область малих значень  $\sqrt{S_{\text{ст}}}$ , ( $0,03 \div 0,07$ ) м. При бічному ракурсі спостереження описана тенденція зберігається, але не є настільки вираженою.

## Висновки

При нанесенні на носову частину і на підставу цілі конічної форми РПМ відбувається спотворення пелюсткової структури реалізацій амплітуд відбитих від цих ділянок сигналів на основних і кросових поляризаціях при суміщеному прийомі, а також деяке зменшення значень амплітуд відбитих сигналів на основних поляризаціях. Використання РПМ розглянутого типу також призводить до істотного зниження ЕПР цілі в квазіоптичній області відображення радіохвиль при використанні вузькосмугового сигналу. Аналіз статистичних характеристик амплітуд відбитих від конуса сигналів (середнього значення і дисперсії), показав вплив розглянутого РПМ аналогічний впливу на реалізації даних амплітуд. Нанесення РПМ на окремі частини конуса також призводить до зменшення протяжності гістограм амплітуд відбитих сигналів на різних поляризаціях.

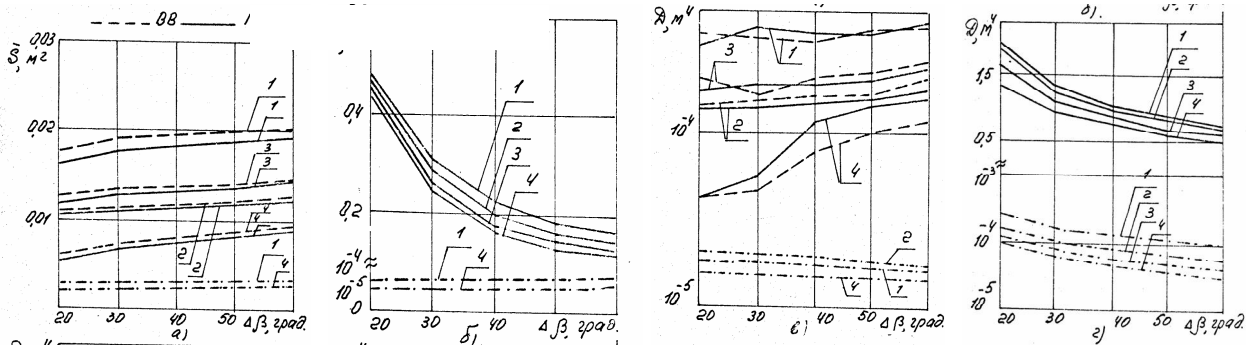


Рис. 4. Характер зміни середнього значення і дисперсії ЕПР основних і кросового амплітудних елементів ПМР

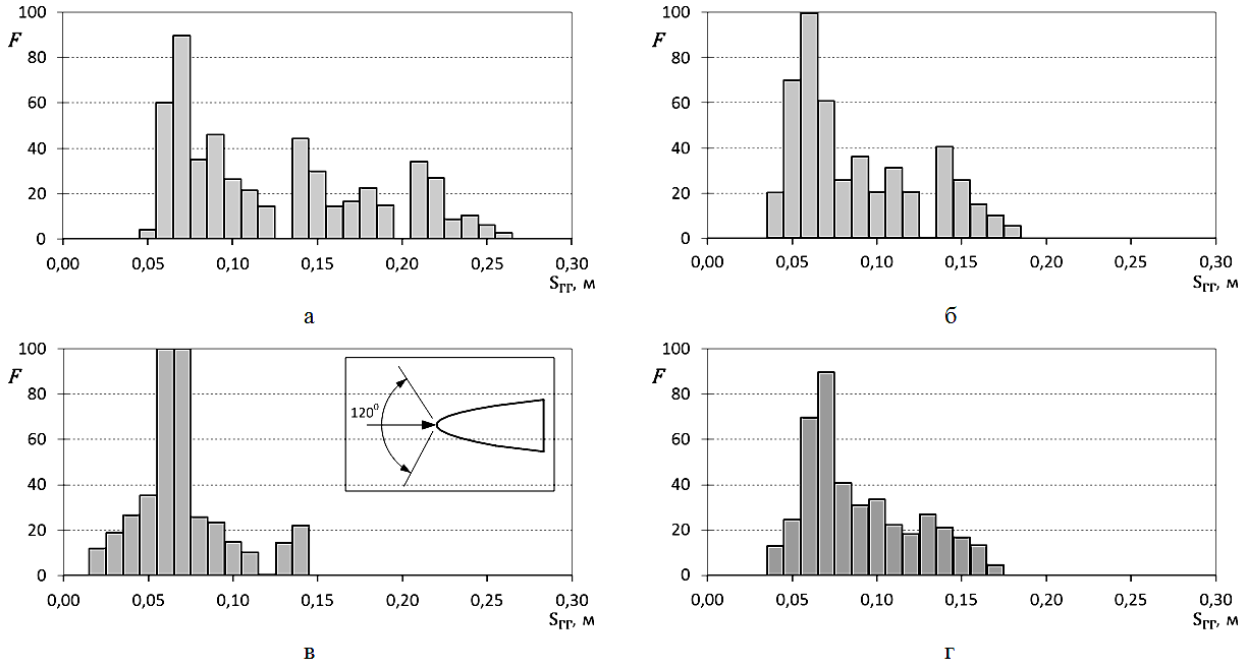


Рис. 5. Гістограми елемента  $S_{ГР}$  при носовому ракурсі спостереження

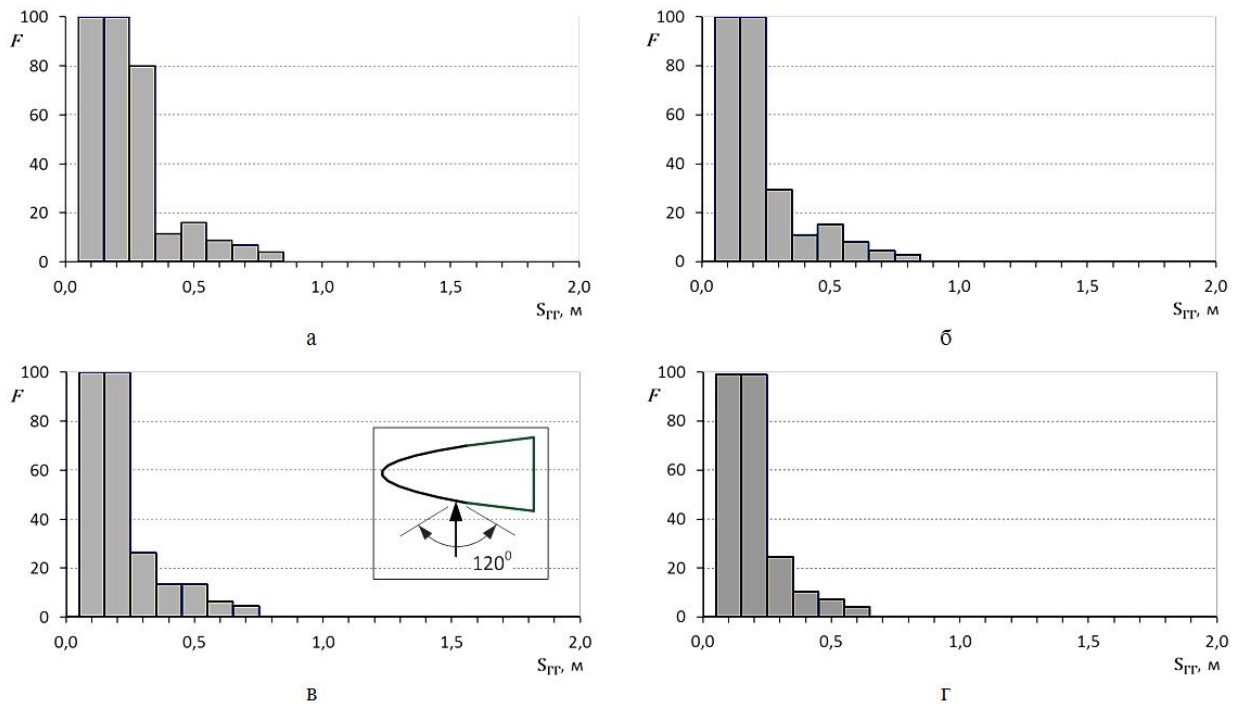


Рис. 6. Гістограми елемента  $S_{ГР}$  при бічному ракурсі спостереження

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Сов. радио, 1962. – 234 с.
2. Сиренко О.К., Сухаревский И.В., Сухаревский О.И., Яшин Н.П. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Под ред. О.К. Сиренко – Х.: Крок, 2000. – 242 с.
3. Блексмит мл., Хайатт Введение в методы измерения радиолокационного поперечного сечения цели. ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. - №8. – С. 1055 – 1057..
4. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин др.; Под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1987. – 236 с.
5. Ягольщикова С., Сумнин А., Нестеров С. Опыт исследования "невидимок" // Военно-промышленный курьер. – 2004. – С. 105 - 115.
6. Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, В.Н. Решетник. Экспериментальное исследование поляризации-онно-рассеивающих свойств РЛЦ цилиндрической формы с поглощающими материалами. / Системы управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць – Х.: 2017. - Вип. 6 (46). - С. 37-41.
7. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных лоаторах / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев, К.В. Садовый; Под ред. Е.Л. Казакова. - КП "Городская типография", 2015. – 458 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. М. Биков,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків  
Received (Надійшла) 24.08.2019  
Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

**Экспериментальное исследование поляризационно-рассеивающих свойств радиолокационной цели конической формы, покрытой радиопоглощающим материалом**

Е. Л. Казаков, А. Е. Казаков, В. М. Решетник

**Предметом** изучения в статье являются информация о характеристиках рассеяния РЛЦ при нанесении на нее РПМ для решения прикладных задач распознавания радиолокационных целей. **Целью** является получение экспериментальной оценки поляризационно-рассеивающей свойств радиолокационной цели конической формы на которой нанесен поглощающий материал магнитного типа. **Задачи:** уменьшение заметности и увеличения ошибок определения координат РЛЦ при нанесении на нее РПМ, оценка отражательных характеристик (характеристик рассеяния) различных типов РПМ, получение количественных значений характеристик рассеяния целей, покрытых РПМ, для узкополосных сигналов. Используемыми **методами** являются: математические модели оптимизации, методы решения матричных задач. Получены следующие **результаты**. Использование РПМ приводит к существенному снижению ЭПР цели в квазиоптической области отражения радиоволн при использовании узкополосного сигнала. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: При нанесении на носовую часть и на основание цели конической формы РПМ происходит искажение лепестковой структуры реализаций амплитуд отраженных от этих участков сигналов на основных и крессовых поляризациях при совмещенном приеме, а также некоторое уменьшение значений амплитуд отраженных сигналов на основных поляризациях. Использование РПМ рассмотренного типа также приводит к существенному снижению ЭПР цели в квазиоптической области отражения радиоволн при использовании узкополосного сигнала. Анализ статистических характеристик амплитуд отраженных от конуса сигналов (среднего значения и дисперсии), показал влияние рассмотренного РПМ аналогично влиянию на реализации данных амплитуд. Нанесение РПМ на отдельные части конуса также приводит к уменьшению протяженности гистограмм амплитуд отраженных сигналов на разных поляризациях.

**Ключевые слова:** радиолокационная цель, поляризационная матрица рассеяния цели, поглощающий материал, узкополосный сигнал.

**Experimental study of the polarization of mono-scattering properties of the radar objective of the conic form covered with radio-absorbing material**

E. Kazakov, A. Kazakov, V. Rechetnik

The subject of the study is information on the characteristics of the radar scattering when applying an RPM to it to solve applied problems of recognizing radar targets. The goal is to obtain an experimental assessment of the polarization-scattering properties of a conical-shaped radar target on which a magnetic type absorbing material is applied. Tasks: reducing the visibility and increasing errors of determining the coordinates of the radar station when applying RPM to it, evaluating the reflection characteristics (scattering characteristics) of various types of RPMs, obtaining quantitative values of the scattering characteristics of targets coated with RPMs for narrow-band signals. The methods used are: mathematical optimization models, methods for solving matrix problems. The following results are obtained. The use of RPM leads to a significant decrease in the EPR of the target in the quasi-optical region of reflection of radio waves when using a narrow-band signal. Conclusions. The scientific novelty of the results obtained is as follows: When a conical RPM is applied to the nose and base of the target, the petal structure is distorted by the realization of the amplitudes of the signals reflected from these sections at the main and cross polarizations with combined reception, as well as a slight decrease in the amplitudes of the reflected signals at the main polarizations. The use of RPM of the considered type also leads to a significant decrease in the EPR of the target in the quasi-optical region of reflection of radio waves when using a narrow-band signal. Analysis of the statistical characteristics of the amplitudes of the signals reflected from the cone (average value and dispersion) showed the effect of the considered RPM similar to the effect on the implementation of these amplitudes. The application of RPM to separate parts of the cone also leads to a decrease in the length of the histograms of the amplitudes of the reflected signals at different polarizations.

**Keywords:** radar target, polarization target scattering matrix, absorbing material, narrowband signal.