О.Є. Казаков

Харківська державна академія культури, Харків

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ РАДІОПОГЛИНАЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ОПРОМІНЕННІ ЇХ БАГАТОЧАСТОТНИМ СИГНАЛОМ

У статті наведені результати експериментальних вимірювань і досліджень коефіцієнтів відбиття об'єкта циліндричної форми з нанесеним на його основу радіопоглинаючим матеріалом при використанні багаточастотного сигналу. Розглядається зміна коефіцієнтів відбиття в залежності від частоти випромінюваного сигналу в РЛС з суміщеним прийомом.

Ключові слова: радіолокаційна ціль, радіопоглинаючий матеріал, багаточастотний сигнал, коефіцієнт відбиття, ефективна відбивна поверхня.

Вступ

Постановка проблеми. В даний час для зменшення помітності і збільшення помилок визначення координат радіолокаційних цілей (РЛЦ) широке застосування знаходять радіопоглинаючі матеріали. Однак, для їх успішного використання необхідно попередньо оцінити відбивні характеристики (характеристики розсіювання) різних типів цих матеріалів. Застосування в РЛС багаточастотних сигналів настійно вимагає отримання кількісних значень відбивних характеристик цілей, покритих радіопоглинаючими матеріалами, для цих типів сигналів. Крім того доцільно провести аналіз отриманих відбивних характеристик по одним і тим же цілям стосовно різних частот, що використовуються і різних умов спостереження для одного і того ж вимірювального комплексу. В якості досліджуваної цілі буде використана модель циліндричної 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 радіопоглинаючих матеріалів 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; 6]. У зв'язку з тим, що складні РЛЦ можуть бути утворені з сукупності об'єктів простої геометричної форми, доцільно отримати експериментальні дані по цих простих об'єктах з різними радіопоглинаючими матеріалами.

Потім, використовуючи методи суперпозиції, отримати значення характеристик розсіювання цілей для різних ракурсів спостереження. Однак, експериментальні дані, отримані в цих випадках, носять уривчастий характер для різних типів радіопоглинаючих матеріалів і в різних діапазонах довжин хвиль [5; 9]. Крім того, ці дані характеризують лише ефективну відбивну поверхню кожного досліджуваного радіопоглинаючого матеріалу.

Метою статті є експериментальне дослідження характеристик розсіювання об'єкта циліндричної форми з нанесеним радіопоглинаючим матеріалом при опроміненні його багаточастотним сигналом.

Виклад основного матеріалу

Наявність на цілі радіопоглинаючого матеріалу при опроміненні її багаточастотним сигналом призводить до того, що різні частотні складові такого сигналу додатково спотворюються. Ці спотворення, як і в випадку з вузькосмуговим сигналом призводять до зменшення відношення сигнал / шум, а отже до зменшення дальності виявлення цілей і до збільшення помилок вимірювання координат. Величина зменшення відношення сигнал/шум в даному випадку буде визначатися не тільки частотою, але і шириною спектру багаточастотного сигналу [10–12].

Дослідження проводилися на експериментальному вимірювальному комплексі, який детально описаний в [7–8]. В якості моделі, по якій проводилися вимірювання коефіцієнтів відбиття, була обрана ціль циліндричної форми (циліндр з діаметром основи 150 мм і довжиною утворюючої 300 мм.). Дана ціль встановлювалася на опорі поворотного пристрою за допомогою радіопрозорого оправлення, виконаного з пінопласту. Установка проводилася таким чином, щоб вісь циліндра лежала в площині

обертання. Реально вісь цілі не збігалася з площиною обертання через помилки при установці, обумовлених неточністю виготовлення оправлення. Величина даних помилок не перевищувала 1 град.

Для проведення експериментальних вимірювань використовувався циліндр обидві основи якого були покриті радіопоглинаючим матеріалом першого і другого типів. Ці радіопоглинаючі матеріали виконані на каучуковій основі з наповнювачем з карбонільного заліза різної товщини. Радіопоглинаючі матеріали призначені для зменшення коефіцієнтів відбиття в 3 см. діапазоні хвиль.

Використовуваний комплекс дозволяє проводити вимірювання коефіцієнтів відбиття на 25 частотах у діапазоні від 8,0 ГГц до 10,4 ГГц з дискретністю зміни частоти від виміру до виміру 0,1 ГГц.

При проведенні вимірювань спочатку на опору поворотного пристрою встановлювався циліндр з непокритим радіопоглинаючим матеріалом основою. Проводилися вимірювання діаграм зворотного вторинного випромінювання при розвороті циліндра на 360 град. в горизонтальній площині. Розворот моделі і вимір здійснювалося з дискретністю 0,25 град. При такій дискретності за один оборот об'єкта на кожній частоті відбувалося 1440 вимірювань. Перед проведенням вимірів на кожній частоті проводилося вимірювання амплітудних характеристик прийомних каналів (калібрування).

Вимірювання проводилося по циліндру, ефективна відбивна поверхня якого для певних ракурсів спостереження може бути розрахована з високою точністю. Наприклад, при спостереженні циліндра вздовж його осі або по нормалі до неї. Оскільки ефективна відбивна поверхня пропорційна коефіцієнту відображення, то в подальшому використовувалося поняття ефективна відбивна поверхня (σ), вимірювана в квадратних метрах, або, $\sqrt{\sigma}$, що вимірюється в метрах. Для використаного в експериментах циліндра величина $\sqrt{\sigma}$, при нормалі до його осі в 3 см. діапазоні хвиль становила 1,19 м. Вимірювана інформація записувалась на гнучкі магнітні диски з метою подальшої її обробки на персональній електронній обчислювальній машині.

Аналогічні вимірювання і записи проводилися по циліндру покритим радіопоглинаючими матеріалами першого і другого типів.

Після цього записані на магнітних дисках значення в кодах аналого-цифрового перетворювача перераховувались в значення $\sqrt{\sigma}$ з використанням вимірюваних амплітудних характеристик прийомних каналів на відповідних частотах, а також розрахованого значення ефективної відбивної поверхні циліндра при спостереженні його по нормалі до осі.

Отримані масиви значень $\sqrt{\sigma}$, виміряні в метрах, для циліндра з непокритим і покритим радіо-

поглинаючим матеріалом основами піддавалися подальшій обробці на електронній обчислювальній машині для дослідження відбивних характеристик радіопоглинаючих матеріалів розглянутих типів.

Наявність на цілі радіопоглинаючого матеріалу при опроміненні її багаточастотним сигналом призводить до того, що різні частотні складові такого сигналу додатково спотворюються. Ці спотворення, як і в випадку з вузькосмуговим сигналом призводять до зменшення відносини сигнал / шум, а отже до зменшення дальності виявлення цілей і до збільшення помилок вимірювання координат. Величина зменшення відносини сигнал / шум в даному випадку буде визначатися не тільки частотою, але і шириною спектру багаточастотного сигналу.

Проведені дослідження відбивних характеристик першого типу радіопоглинаючого матеріалу при опроміненні його багаточастотним сигналом з шириною спектра близько 2 ГГц показали, що його застосування може призводити до зменшення відношення сигнал/шум на (3...4) дБ, якщо несуча частота становить 9,0 ГГц. Таке зменшення відношення сигнал/шум призводить до зменшення дальності виявлення цілей із заданими показниками якості в 1,1 рази, а помилки вимірювання координат збільшуються в 1,5 рази. Збільшення несучої частоти або розширення спектру багаточастотного сигналу будуть приводити до збільшення відносини сигнал / шум. Це видно з рис. 1, на якому зображені залежності максимальної амплітуди сигналів ($A(f)$), відбитих від покритого (крива 1) першим типом радіопоглинаючого матеріалу і непокритого (крива 2) основ циліндрів від частоти (f).

Рис. 1. Частотна залежність амплітуди для РПМ першого типу

Джерело: розроблено автором.

Для частот понад 10 ГГц відмінності кривої 1 від кривої 2 незначні. Тому частотні складові, що потрапляють в цей частотний діапазон практично спотворюватися не будуть. Проведені дослідження показали, що зменшення відношення сигнал/шум зберігається і при відхиленні напрямку опромінення радіопоглинаючого матеріалу від нормалі до нього ($\beta = 180^\circ$) на кут до 30° . При великих відхиленнях наявність радіопоглинаючого матеріалу практично

не впливає на величину відносини сигнал/шум.

Проведені дослідження відбивальних характеристик другого типу радіопоглинаючого матеріалу при опроміненні його багаточастотним сигналом з шириною спектра близько 2 ГГц показали, що його застосування може призводити до зменшення відношення сигнал/шум на (1,5...2,5) дБ, якщо несуча частота становить 9,5 ГГц. Також зменшення відношення сигнал / шум призводить до зменшення дальності виявлення цілей із заданими показниками якості в 1,02 рази, а помилки вимірювання координат цілей збільшуються в 1,2 рази.

Збільшення несучої частоти або розширення спектра багаточастотного сигналу будуть приводити до збільшення відношення сигнал/шум. Це видно з рис. 2, на якому зображені залежності максимальної амплітуди сигналів, відбитих від покритого (крива 1) другим типом радіопоглинаючого матеріалу і непокритого (крива 2) основи циліндрів, від частоти.

Рис. 2. Частотна залежність амплітуди для РПМ другого типу

Джерело: розроблено автором.

Для діапазону частот від 9,3 ГГц до 9,7 ГГц відмінності кривої 1 від кривої 2 максимальні, тому частотні складові, що потрапляють в цей діапазон, максимально спотворюються за амплітудою. Проведені дослідження також показали, що таке зменшення відношення сигнал/шум зберігається, на відміну від попереднього випадку, при незначному відхиленні напрямку опромінення радіопоглинаючого матеріалу від нормалі до нього ($\beta = 0^\circ$) на кут до 5 град.

Висновки

Грунтуючись на результатах проведених експериментальних досліджень можна зробити висновок про те, що використання багаточастотних ширококутових сигналів дозволяє підвищити радіолокаційну помітність цілей, виконаних з застосуванням радіопоглинаючого матеріалу. При цьому виграш у відношенні сигнал/шум у порівнянні з використанням вузькосмугового сигналу може досягати (2 ... 4) дБ при наявності на цілі радіопоглинаючого матеріалу першого типу і (3,5 ... 5,5) дБ при наявності на цілі радіопоглинаючого матеріалу другого типу. Збільшення несучої частоти або розширення спектру багаточастотного сигналу буде приводити до ще більшого енергетичного виграшу в порівнянні з вузькосмуговим сигналом. Однак, у зв'язку з тим, що застосування радіопоглинаючого матеріалу призводить до різного спотворення амплітуд різних частотних складових відбитого багаточастотного сигналу, ця обставина ускладнить отримання ознак розпізнавання цілей при використанні даного сигналу.

Список літератури

1. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев – М.: Сов. радио, 1962. – 234 с.
2. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / О.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшин; под ред. О.К. Сиренко. – Х.: Крок, 2000. – 242 с.
3. Криспин Дж. Оценка радиолокационного поперечного сечения тел простой геометрической формы / Дж. Криспин, Д.Л. Моффат // Труды института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1965. – № 8(53). – С. 1115-1126.
4. Блексмит П. Введение в методы измерения радиолокационного поперечного сечения цели / П. Блексмит, Р.Е. Хайатт // Труды института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1965. – № 8(53). – С. 1055-1057.
5. Варганов М.Е. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин; под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1987. – 236 с.
6. Ягольщикова С. Опыт исследования “невидимок” / С. Ягольщикова, А. Сумнин, С. Нестеров // Военно-промышленный курьер. – 2004. – № 6. – С. 105-115.
7. Казаков Е.Л. Экспериментальный измерительный комплекс для определения характеристик рассеяния радиолокационных целей в широком диапазоне частот / Е.Л. Казаков, А.И. Кравченко, С.В. Николаенко // Наука и оборона. – 1994. – № 3 – С. 111-116.
8. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах: монография / Е. Казаков, А. Казаков, А. Коломийцев, К. Садовий. – Х.: КП “Городская типография”, 2015. – 458 с.
9. Казаков Е.Л. Экспериментальное исследование поляризационно-рассеивающих свойств РЛЦ цилиндрической формы с поглощающими материалами / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, В.Н. Решетник // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 6(46). – С. 37-41.
10. Вишин Г.М. Многочастотная радиолокация / Г.М. Вишин. – М.: Воениздат, 1973. – 92 с.

11. Радиолокационные признаки распознавания при многопозиционной локации: монография / Е. Казаков, В. Бзот, А. Казаков, В. Павлов. – Х.: АСЕ СПДФО Сторожук А.П., 2005. – 188 с.

12. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 11. – С. 3-64.

Надійшла до редколегії 23.12.2020

Схвалена до друку 09.02.2021

Відомості про автора:

Казаков Олександр Євгенович

кандидат технічних наук

старший науковий співробітник доцент

Харківської державної академії культури,

Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-7588-1576>

Information about the author:

Oleksandr Kazakov

Candidate of Technical Sciences Senior Researcher

Senior Lecturer

of the Kharkiv State Academy of Culture,

Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-7588-1576>

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ МНОГОЧАСТОТНЫМ СИГНАЛОМ

А.Е. Казаков

В статье приведены результаты экспериментальных измерений и исследований коэффициентов отражения объекта цилиндрической формы с нанесенным на его основания радиопоглощающим материалом при использовании много-частотного сигнала. Рассматривается изменение коэффициентов отражения в зависимости от частоты излучаемого сигнала в РЛС с совмещенным приемом.

Ключевые слова: радиолокационная цель, радиопоглощающий материал, многочастотный сигнал, коэффициент отражения, эффективная отражающая поверхность.

RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF REFLECTION COEFFICIENTS OF RADIO-ABSORBING MATERIALS WHEN IRRADIATED BY A MULTIPLE-FREQUENCY SIGNAL

O. Kazakov

The subject of the article is information on the reflection coefficients of a cylindrical object with various types of radio-absorbing material applied to its bases when using a multi-frequency signal. The goal is to study the reflection coefficients of a cylindrical radar target on which various types of radar-absorbing material is applied. Tasks: assessment of a decrease in visibility and an increase in errors in determining the coordinates of a cylindrical target when applying various types of radio mabsorbing materials to it, obtaining quantitative values of target scattering characteristics, with applied radio-absorbing materials of various types, using multi-frequency signals. The methods used are: mathematical modeling of the possibility of obtaining characteristics of the scattering of the target, with the applied radio absorbing materials, using multi-frequency signals. The following results were obtained. The use of multi-frequency signals makes it possible to increase the radar signature of targets made with the use of RPM, the use of multi-frequency signals reduces errors in determining the location of targets, the use of radio absorbing materials of various types leads to a significant decrease in the effective reflecting surface of the target in the quasi-optical region of reflection of radio waves. Conclusions. The scientific novelty of the results obtained is as follows: the use of multi-frequency broadband signals makes it possible to increase the radar signature of targets made with the use of radio-absorbing materials. Increasing the carrier frequency or broadening the spectrum of a multi-frequency signal results in an even greater power gain than a narrowband signal. The application of radio-absorbing materials to the target leads to distortion of the amplitudes of various frequency components of the reflected multi-frequency signal.

Keywords: radar target, radar absorbing material, multi-frequency signal, reflection coefficient, effective reflecting surface.