

УДК 621.396.96

Е.Л. Казаков<sup>1</sup>, А.Е. Казаков<sup>2</sup>, В.М. Решетник<sup>3</sup><sup>1</sup> Кировоградская летная академия НАУ, Кропивницкий<sup>2</sup> Харьковская государственная академия культуры, Харьков<sup>3</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-РАСSEИВАЮЩИХ СВОЙСТВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Проведена экспериментальная оценка поляризационно-рассеивающих свойств цилиндрической цели, на которой нанесен резонансный поглощающий материал, при совмещенном и разнесенном приеме. Рассмотрены результаты экспериментальных измерений коэффициентов отражения от цилиндрической цели покрытой широкополосным поглощающим материалом, при ее облучении узкополосными сигналами на различных поляризациях.

**Ключевые слова:** радиолокационный сигнал, радиолокационная цель, радиопоглощающий материал, поляризационная матрица рассеяния.

### Введение

**Постановка проблемы.** В настоящее время для уменьшения заметности и увеличения ошибок определения координат радиолокационных целей (РЛЦ) широкое применение находят радиопоглощающие материалы (РПМ). Однако, для их успешного использования необходимо предварительно оценить отражательные характеристики (характеристики рассеяния) различных типов этих материалов. Применение в РЛС широкого диапазона частот на различных поляризациях настоятельно требует получения количественных значений характеристик рассеяния целей, покрытых РПМ, для этих типов сигналов. Также в связи с переходом при наблюдении за РЛЦ от однопозиционных РЛС к РЛС с разнесенным приемом возникает необходимость получения характеристик рассеяния РЛЦ с поглощающими материалами в вынесенных на разные углы приемных пунктах. Кроме того целесообразно провести анализ получаемых характеристик рассеяния по одним и тем же целям применительно к различным используемым частотам, поляризациям и различным условиям наблюдения для одного и того же измерительного комплекса. В качестве исследуемой цели будет использован цилиндр, так как его характеристики отражения и рассеивания достаточно известны.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время получение информации о характеристиках рассеяния РПМ может быть осуществлено двумя путями: расчетным и на основании экспериментальных измерений. Первый путь является довольно сложным и громоздким. Он требует знания величин диэлектрической и магнитной проницаемости РПМ и в ряде случаев не обеспечивает достаточно высокой точности определения характеристик рассеяния этих материалов [1-3]. Второй путь состоит в проведении непосредственно экспериментальных измерений на полигонах с использо-

ванием специальных радиолокационных установок или безэховых камер [4-6]. Однако, экспериментальные данные, полученные в этих случаях, носят отрывочный характер для разных типов РПМ и в разных диапазонах длин волн. Кроме того, эти данные характеризуют только эффективную отражающую поверхность (ЭОП) каждого исследуемого РПМ на одной основной поляризации.

**Целью статьи является** экспериментальное исследование характеристик рассеяния объекта цилиндрической формы с РПМ, облучаемого сигналами на различных частотах и поляризациях, при совмещенном и разнесенном приемах.

### Основной материал

При проведении измерений использовался экспериментальный комплекс, подробно описанный в [7, 8]. Данный комплекс позволяет проводить измерения коэффициентов отражения элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) цели на 25 частотах в диапазоне от 8,0 до 10,4 ГГц с дискретностью изменения частоты 0,1 ГГц. Так как коэффициенты отражения цели пропорциональны ее ЭОП, то в дальнейшем при проведении дополнительной обработки результатов измерений получаем значения ЭОП  $\sigma$  в квадратных метрах или  $\sqrt{\sigma}$  – в метрах.

При проведении экспериментальных измерений использовались два одинаковых металлических цилиндра с диаметром основания 150 мм и длиной образующей 300 мм. Цилиндры отличаются лишь тем, что у одного основание было покрыто РПМ первого типа (стекловолоконистая ткань с угольным наполнением), а у второго оба основания покрыты РПМ второго типа (каучуковая основа с наполнителем из карбонильного железа). Рассмотрим сначала изменения поляризационных характеристик рассеяния цилиндра при нанесении на него РПМ первого типа для совмещенного и разнесенного приема.

Данный РПМ наносился на основание цилиндра с различным количеством слоев, расстояние между которыми равнялось  $\lambda/4$ . Как показали проведенные экспериментальные исследования наибольший коэффициент поглощения этого материала на частоте 9160 МГц получен при нанесении на основание цилиндра пяти слоев РПМ. При изменении несущей частоты коэффициент поглощения такого покрытия резко уменьшается. Поэтому был сделан вывод о том, что данный поглощающий материал обладает ярко выраженными резонансными свойствами. Все следующие эксперименты по исследованию поляризационно-рассеивающих свойств цилиндра с данным поглотителем проведены для пяти слоев его нанесения на частоте 9160 МГц.

В результате проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных получены зависимости амплитудных элементов ПМР данного цилиндра от угла поворота в горизонтальной плоскости ( $\beta$ ) для совмещенного с передающим приемного пункта ( $\alpha = 0^\circ$ ) и вынесенного приемного пункта ( $\alpha = 10^\circ$ ). Эти зависимости приведены на рис. 1 и 2. На всех рисунках приведены следующие обозначения:  $S_{ГГ}$ ,  $S_{ВВ}$  – модули основных элементов ПМР, выраженные в метрах;  $S_{ВГ}$ ,  $S_{ГВ}$  – модули кроссовых элементов ПМР, также выраженные в метрах. Первый индекс при  $S$  обозначает поляризацию антенны приемного канала, а второй – поляризацию излученного сигнала ( $B$  – вертикальная,  $G$  – горизонтальная). Для удобства анализа на всех рисунках приведены зависимости при наблюдении цилиндра со стороны оснований в секторе углов  $\beta = (180 \pm 20)^\circ$  (кривая 2 – цилиндр со стороны непокрытого основания, кривая 1 – цилиндр со стороны основания, покрытого РПМ), так как при этих ракурсах наблюдения в основном сказывается влияние РПМ.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при наличии РПМ лепестковая структура реализаций элементов ПМР  $S_{ГГ}$  и  $S_{ВВ}$  существенно изменяется. Вместо центрального лепестка и первых двух боковых лепестков в интервале углов наблюдения  $\Delta\beta = \pm 17^\circ$  на реализациях этих элементов видны только два достаточно широких лепестка, особенно для элемента  $S_{ГГ}$ . Для реализации элемента  $S_{ВВ}$  при  $\Delta\beta \approx 177^\circ$  присутствует также небольшой лепесток в провале между широкими лепестками. В целом же в пределах углов  $\Delta\beta = \pm 17^\circ$  и примерно до углов  $\Delta\beta = \pm 30^\circ$  существует незначительное различие в лепестковой структуре данных реализаций элементов ПМР по сравнению с реализациями соответствующих элементов ПМР, получаемых при отражении сигнала от основания цилиндра без покрытия. В этом диапазоне углов наблюдения (особенно при  $\beta = 180^\circ$ ) происходит значительное уменьшение максимальных значений лепестков реализаций основных элементов ПМР при наличии РПМ. Проведенные расчеты показывают, что данное уменьшение составляет величину порядка (17...20) дБ. При увеличении отклонения углов наблюдения от угла  $\beta = 180^\circ$  не происходит существенного уменьшения

коэффициента отражения, а в некоторых случаях он даже увеличивается. Это позволяет также сделать вывод о том, что данное РПМ обладает ярко выраженными резонансными свойствами.

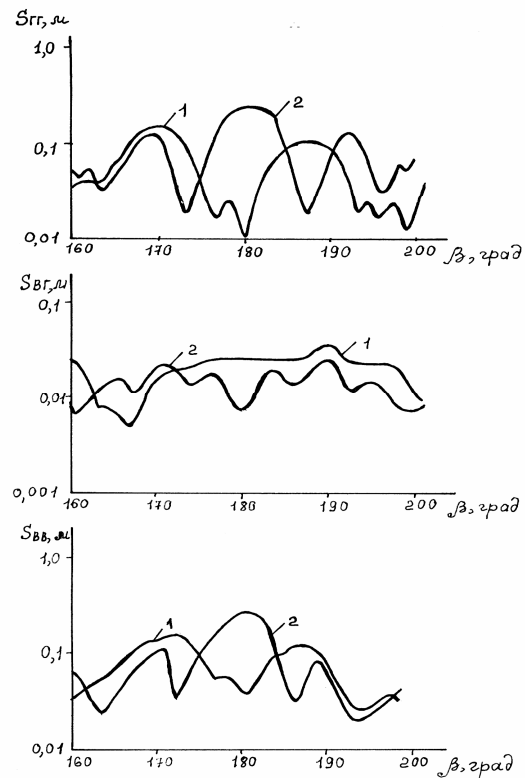


Рис. 1. Элементы ПМР цилиндра при  $\alpha=0^\circ$

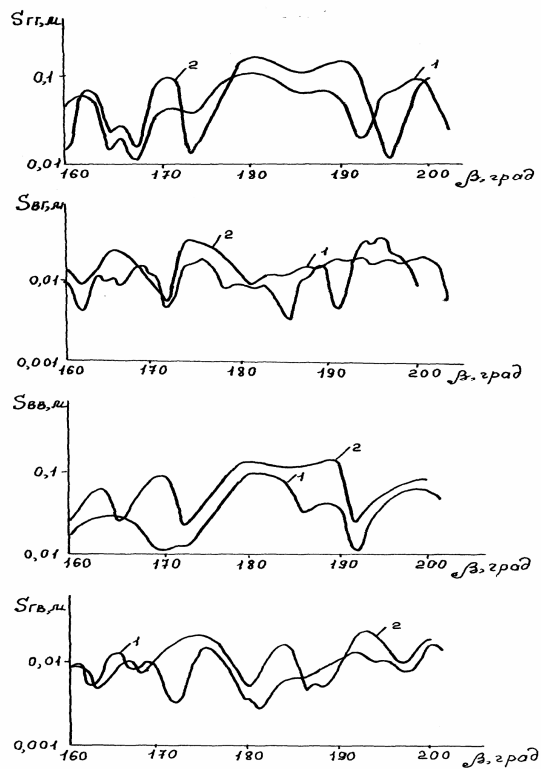


Рис. 2. Элементы ПМР цилиндра при  $\alpha=10^\circ$

Кроссовая составляющая  $S_{ВГ}$  при отражении сигнала от цилиндра с поглотителем в ракурсах на-

блюдения  $\Delta\beta \approx 17^\circ$  сглажена, в отличии от соответствующей реализации при отражении сигнала от цилиндра без покрытия. При этом также наблюдается некоторое увеличение ее абсолютной величины при наличии поглотителя, что приведет к повышению радиолокационной заметности такой цели при использовании кроссовой составляющей.

Для разнесенного приема при углах разноса  $\alpha=10^\circ$  также характерно значительное искажение лепестковой структуры реализаций элементов ПМР на основных поляризациях и некоторое уменьшение их максимальных значений при наблюдении цилиндра со стороны основания, на которое нанесен поглотитель, по сравнению с его наблюдением со стороны непокрытого основания. Это уменьшение составляет порядка 3 дБ. Кроссовые элементы ПМР  $S_{gv}$  и  $S_{vg}$  при наблюдении со стороны покрытого основания цилиндра несколько сглажены. Однако, различий в максимальных значениях данных элементов ПМР при отражении сигнала от непокрытых и покрытых оснований цилиндра на этих участках наблюдения практически не видно. Следует указать также, что при  $\alpha = 10^\circ$  как при наблюдении цилиндра со стороны непокрытого, так и покрытого оснований происходит сдвиг реализаций элементов ПМР на угол  $\beta \approx 5^\circ$ .

Проанализируем изменения коэффициентов отражения широкополосного РПМ при облучении их узкополосными и многочастотными сигналами (МЧС). Как было указано выше, в качестве широкополосного использовался РПМ второго типа, который наносился на основания цилиндра. При наличии на цели РПМ этого типа амплитуда отраженного от нее узкополосного сигнала будет меньше, чем в случае отсутствия РПМ. При этом величина данного уменьшения будет определяться несущей частотой излучаемых узкополосных сигналов.

Для исследования поглощающих свойств данного типа РПМ были проведены экспериментальные измерения реализаций амплитуд отраженных узкополосных сигналов при горизонтальной поляризации на 2-х разнесенных фиксированных частотах в диапазоне частот (8,0-10,0) ГГц.

На рис. 3, 4 в качестве примера представлены участки диаграмм обратного вторичного отражения цилиндра, измеренные для покрытого РПМ второго типа (кривая 1) и непокрытого (кривая 2) его оснований соответственно на частотах 8,1; 10,0 ГГц. Проведенный анализ данных рисунков показывает, что применение данного РПМ приводит к уменьшению амплитуды отраженных сигналов на (6...7) дБ, если несущая частота составляет 8,0 ГГц. При этом такое уменьшение амплитуды отраженного сигнала сохраняется при отклонении направления облучения РПМ от нормали к нему ( $\beta = 180^\circ$ ) на угол до  $30^\circ$ . Данное уменьшение амплитуды отраженного сигнала приводит к уменьшению дальности обнаружения целей с заданными показателями качества в 1,2 раза, а ошибки измерения координат целей увеличиваются в два раза. При повышении несущей частоты излучаемого сигнала

до 10 ГГц сектор углов наблюдения РПМ относительно  $\beta = 180^\circ$ , при котором уменьшение амплитуды отраженного сигнала находится в указанном диапазоне, резко сокращается до  $\sim 10^\circ$ . При значительных отклонениях углов наблюдения от  $180^\circ$  сектора, в частности при угле наблюдения  $\beta = 90^\circ$  наличие РПМ практически не влияет на величину амплитуды отраженного сигнала.

В данном случае наличие РПМ приводит к изменению лепестковой структуры этих реализаций, а именно к незначительному расширению ширины лепестков (в 1,1...1,2 раза). Из-за этого частота флуктуаций амплитуд принятых сигналов будет несколько меньше (в 1,1...1,2 раза).

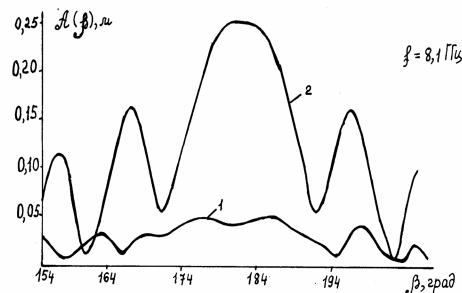


Рис. 3 Участки диаграммы амплитуды цилиндра с РПМ второго типа,  $f=8,1 \text{ ГГц}$

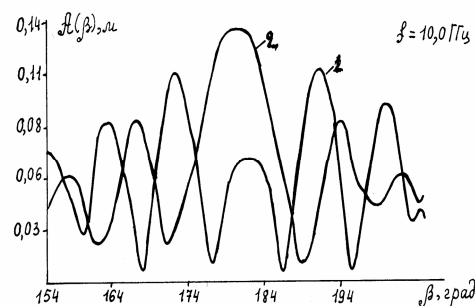


Рис. 4 Участки диаграммы амплитуды цилиндра с РПМ второго типа,  $f=10,0 \text{ ГГц}$

Наличие на цели РПМ при облучении ее МЧС приводит к тому, что различные частотные составляющие такого сигнала дополнительно искажаются. Эти искажения, как и в случае с узкополосным сигналом приводят к уменьшению отношения сигнал/шум, а следовательно к уменьшению дальности обнаружения целей и к увеличению ошибок измерения координат. Величина уменьшения отношения сигнал/шум в данном случае будет определяться не только несущей частотой, но и шириной спектра МЧС.

Проведенные исследования отражательных характеристик второго типа РПМ при облучении его МЧС с шириной спектра порядка 2 ГГц показали, что его применение может приводить к уменьшению отношения сигнал/шум на (3...4) дБ, если несущая частота составляет 9,0 ГГц. Такое уменьшение отношения сигнал/шум приводит к уменьшению дальности обнаружения целей с заданными показателями качества в 1,1 раза, а ошибки измерения координат увеличиваются в 1,5 раза. Увеличение несущей частоты

или расширение спектра МЧС будут приводить к увеличению отношения сигнал/шум. Это видно из рис. 5, на котором изображены зависимости максимальной амплитуды сигналов, отраженных от покрытого вторым типом РПМ (кривая 1) и непокрытого (кривая 2) оснований цилиндров от частоты.

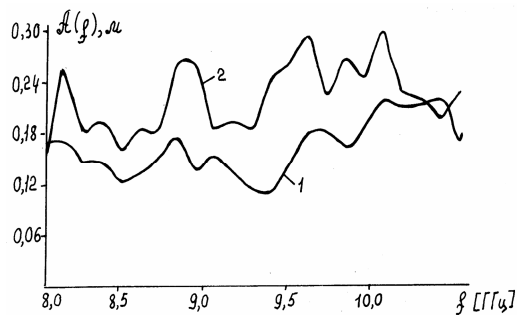


Рис. 5. Частотная зависимость амплитуды для РПМ второго типа

Для частот свыше 10 ГГц отличия кривой 1 от кривой 2 незначительные. Поэтому частотные составляющие, попадающие в этот частотный диапазон практически искажаться не будут. Проведенные исследования показали, что приведенные выше уменьшение отношения сигнал/шум сохраняется и при отклонении направления облучения РПМ от нормали к нему ( $\beta = 180^\circ$ ) на угол до  $30^\circ$ . При больших отклонениях наличие РПМ практически не влияет на величину отношения сигнал/шум.

Аналогичные результаты получаются при анализе кроссовой составляющей отраженного сигнала от цилиндра с данным РПМ.

## Выводы

Таким образом, при нанесении на плоские участки цилиндра РПМ резонансного типа происходит искажение лепестковой структуры реализаций амплитуд отраженных от этих участков сигналов на основных и кроссовых поляризациях как при совмещенном, так и при разнесенном приеме, а также некоторое уменьшение значений амплитуд отраженных сигналов на основных поляризациях. Использование широкополосных МЧС позволяет

повысить радиолокационную заметность цели, выполненных с применением РПМ. При этом выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с использованием узкополосных сигналов может достигать (2...4) дБ при наличии на цели РПМ первого типа и (3,5...5,5) дБ при наличии на цели РПМ второго типа. Увеличение несущей частоты сигнала при расширении его спектра приводит к еще большему энергетическому выигрышу по сравнению с применением узкополосного сигнала. Результаты приведенных исследований могут быть использованы при проектировании и разработке новых РЛС.

## Список литературы

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. Кристин мл., Маффет. Оценка радиолокационного поперечного сечения тел простой геометрической формы. ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. – № 8. – С. 1115 – 1126.
4. Блексмит мл., Хайатт Введение в методы измерения радиолокационного поперечного сечения цели. ТИИЭР. – 1965. – Т. 53. – №8. – С. 1055 – 1057.
5. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1987. – 236 с.
6. Ягольщикова С., Сумнин А., Нестеров С. Опыт исследования "невидимок" // Военно-промышленный курьер. – 2004. – С. 105 – 115.
7. Казаков Е.Л., Кравченко А.И., Николаенко С.В. Экспериментальный измерительный комплекс для определения характеристик рассеяния радиолокационных целей в широком диапазоне частот. // Наука и оборона. – К.: 1994. – Вып. 3 – С. 111 – 116.
8. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах. / Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, А.В. Коломийцев: Под ред. Е.Л. Казакова – Х.: ХУВС, 2015. – 459 с.

Надійшла до редколегії 19.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук В.М. Биков, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-РОЗСІЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ЦІЛІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ З ПОГЛИНАЮЧИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Є.Л. Казаков, О.Є. Казаков, В.М. Решетник

Проведена експериментальна оцінка поляризаційно-розсіюючих властивостей циліндричної цілі, на якій нанесен резонансний поглинаючий матеріал, при сумісному та рознесеному прийомі. Розглянути результати експериментальних вимірювань коефіцієнтів відбиття від циліндричної цілі покритої широкопоздовжнім поглинаючим матеріалом, при її опроміненні вузькополосними сигналами на різних поляризаціях.

**Ключові слова:** радіолокаційні сигнал та, ціль, радіопоглинаючий матеріал, поляризаційна матриця розсіювання.

## EXPERIMENTAL STUDY OF POLARIZATION-SCATTERING PROPERTIES OF RADAR TARGET OF CYLINDRICAL SHAPE WITH ABSORBING MATERIALS

E.L. Kazakov, A.E. Kazakov, V.M. Rechetnik

Experimental evaluation of a polarization-scattering properties of a cylindrical target, which caused a resonant absorbing material and when combined exploded reception. The results of the experimental measurements of reflection coefficients from cylindrical targets broadband covered with absorbent material at its irradiation by narrowband signals at different polarizations.

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