

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 629.7.052

**ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД
ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

© 2022 г. В. Л. Гулько^а, А. А. Мещеряков^{а,*}

^а Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

*e-mail:msch@rts.tusur.ru

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 03.05.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

Для формирования радиолокационного изображения земной поверхности реализуется поляризационно-модуляционный метод, основанный на использовании зондирующих сигналов с линейной вращающейся плоскостью поляризации. Описан макет экспериментальной установки, реализующий этот метод. Приведены результаты экспериментальных исследований радиолокационных изображений земной поверхности, полученных с борта летательного аппарата АН-26 бортовой радиолокационной станции (РЛС) “Гроза-26”. Радиолокационные изображения получены в штатном режиме работы РЛС, с фиксированной вертикальной поляризацией излучения, и в режиме излучения, когда плоскость поляризации линейная и вращается с заданной частотой. Отмечается повышенный радиолокационный контраст протяженных объектов типа автомобильных и железных дорог на радиолокационном изображении земной поверхности при использовании поляризационно-модулированных зондирующих сигналов. Установлена связь характеристик принятых поляризационно-модулированных сигналов с поляризационными параметрами радиолокационных объектов, позволяющая обосновать полученные экспериментальные результаты.

DOI: 10.31857/S0032816222050172

ВВЕДЕНИЕ

Качество радиолокационных изображений (РЛИ) земной поверхности существенно влияет на эффективность практического решения задач обнаружения и селекции объектов различных классов на фоне мешающих отражений от земной поверхности. Информативность РЛИ может быть повышена за счет использования поляризационной обработки зондирующих сигналов. При этом необходимо учитывать как поляризационные характеристики рассеяния земной поверхности, так и поляризационные характеристики самих объектов. Эти характеристики полностью описываются матрицей рассеяния (МР), и правильный выбор методов и средств их измерения имеет первостепенное значение для решения задач обнаружения и селекции объектов на РЛИ.

Наиболее физически наглядной и удобной является МР объектов, представленная в рамках двухвibratorной модели с ортогональными vibratorами в виде [1–3]:

$$[S] = \lambda_1 \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} + \lambda_2 e^{j\Delta\varphi} \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует практический вывод, что любой симметричный объект может быть представлен суммой двух ортогональных vibratorов. Модули собственных чисел МР (1) λ_1 и λ_2 имеют смысл эффективных длин vibratorов, а их квадраты – эффективных площадей рассеяния объектов. Разность аргументов собственных чисел МР $\Delta\varphi$ равна фазовой длине пути между vibratorами. Ориентация собственной системы координат МР α совпадает с ориентацией vibratorов для вырожденной цели. В более общем случае параметр α определяется конфигурацией объекта, его ориентацией в пространстве и электрофизическими характеристиками. МР (1) может быть представлена и в другом виде, с помощью тригонометрических функций удвоенного аргумента.

Если электрические свойства объекта таковы, что он не вносит дополнительного фазового

сдвига $\Delta\varphi$ между ортогональными составляющими падающей волны, т.е. $\Delta\varphi = 0$, то МР (1) будет иметь следующий вид [2]:

$$[S] = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \right\}, \quad (2)$$

где $\mu = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ – коэффициент анизотропии объекта.

Выражение (2) есть декомпозиция МР в виде взвешенной суммы МР поляризационно-изотропного трехгранного и анизотропного двугранного угловых отражателей. Степень или коэффициент анизотропии μ есть весовой коэффициент данной декомпозиции, характеризующий анизотропную часть объекта. Таким образом, МР (1) может быть представлена в параметрической форме двумя поляризационными параметрами μ и α .

В работах [4–7] показано, что наиболее пригодными с точки зрения простоты технической реализации и полноты измерений для исследования поляризационных характеристик рассеяния объектов земной поверхности являются методы, основанные на использовании поляризационно-модулированных сигналов.

В настоящей работе предложен метод формирования РЛИ земной поверхности, основанный на использовании поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов, и приведены натурные экспериментальные результаты его применения.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Метод основан на использовании векторов и матриц Джонса [1–3] для описания взаимодействия поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов с радиолокационными объектами с МР в виде выражения (2). Вектор Джонса сигнала на входе приемника радиолокационной станции (РЛС) может быть записан как результат преобразования

$$\mathbf{E}_{\text{вх}}(\theta) = C[\Pi][R(-\theta)][S][R(\theta)]\mathbf{E}, \quad (3)$$

где $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ – вектор Джонса вертикально поляризованного сигнала, генерируемого передатчиком;

$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ – матрица Джонса вращателя плоскости поляризации излученного сигнала на угол $\theta = \Omega t$ (Ω – частота вращения, t – время); $[S]$ – МР объекта, имеющая вид (2); $[R(-\theta)] =$

$= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ – матрица Джонса вращателя плоскости поляризации принятого сигнала на

угол $-\theta$; $\Pi = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица Джонса линейного

поляризатора (переход с волновода круглого сечения на волновод прямоугольного сечения) с вертикальной собственной поляризацией; C – постоянная, учитывающая потенциал РЛС и расстояние от нее до объекта.

Проделив в формуле (3) необходимые преобразования, получим

$$\mathbf{E}_{\text{вх}}(\theta) = C \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 + \mu \cos(2\theta + 2\alpha) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Сигнал непосредственно на входе приемника с учетом равенства $\theta = \Omega t$ будет иметь вид

$$E_{\text{вх}}(\Omega t) = C \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right) [1 + \mu \cos(2\Omega t + 2\alpha)]. \quad (5)$$

Амплитуда сигнала A , дБ, на выходе приемника, имеющего логарифмическую амплитудную характеристику и линейный детектор, будет равна

$$A(\Omega t) = 20 \lg \left\{ C \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right) \right\} + 20 \lg \{ 1 + \mu \cos(2\Omega t + 2\alpha) \}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что сигнал на выходе логарифмического приемника будет промодулирован по амплитуде удвоенной частотой вращения 2Ω плоскости поляризации. Глубина амплитудной модуляции сигнала определяется коэффициентом анизотропии μ , а фаза сигнала – ориентацией собственной системы координат объекта α . Амплитудная модуляция сигнала на выходе приемника достигает 100%-ной глубины, когда объект поляризационно анизотропен и его коэффициент анизотропии μ максимален и равен 1. Минимальная глубина амплитудной модуляции достигается, когда объект поляризационно изотропен и его коэффициент анизотропии $\mu = 0$.

Подавая продетектированный поляризационно-модулированный сигнал (6) на вход индикатора секторного обзора, получим РЛИ (без учета модуляции пачки импульсов диаграммой направленности антенны РЛС). Яркость свечения объектов на РЛИ будет пропорциональна среднему уровню отраженных от радиолокационных объектов сигналов за несколько периодов поляризационной модуляции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РЛИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для проведения экспериментальных исследований был разработан макет РЛС на базе бортового метеонавигационного радиолокатора “Гроза-26”. Макет работал как в штатном режиме, с

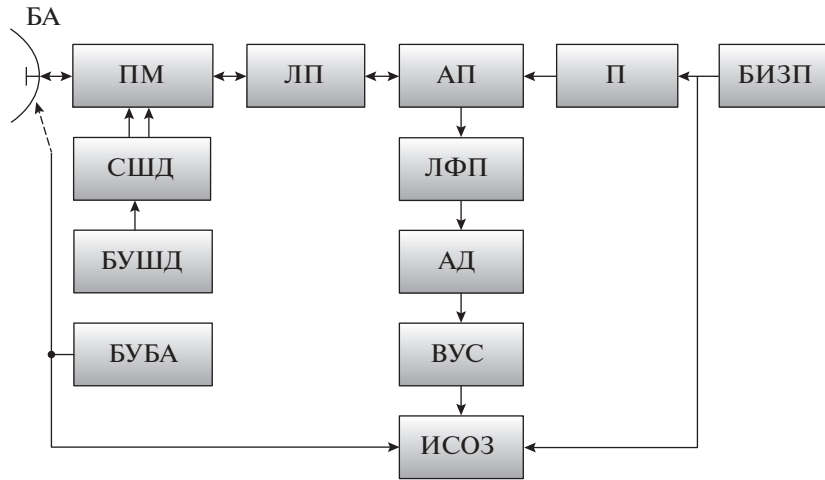


Рис. 1. Функциональная схема макета поляризационно-модуляционной РЛС. БА – бортовая приемопередающая антенна; ПМ – поляризационный модулятор; ЛП – линейный поляризатор; АП – антенный переключатель; П – передатчик; БИЗП – блок импульсов запуска передатчика; СШД – синхронный шаговый двигатель; БУШД – блок управления шаговым двигателем; ЛФП – логарифмический приемник; АД – амплитудный детектор; ВУС – видеоусилитель сигналов; БУБА – блок управления бортовой антенной БА; ИСОЗ – индикатор секторного обзора земной поверхности.

фиксированной вертикальной поляризацией излучения, так и в режиме, когда поляризация излучаемых сигналов была линейной и вращалась с заданной частотой Ω .

Для согласования поляризации зондирующих и принимаемых сигналов частота вращения плоскости поляризации Ω удовлетворяла условию

$$\Omega \ll 2\pi F_n, \quad (7)$$

где F_n – частота повторения излучаемых импульсов.

Выбор частоты вращения Ω плоскости поляризации основывался на анализе экспериментальных оценок спектра флуктуаций амплитуды сигнала, отраженного морской [4] и земной поверхностями различных типов [5] при фиксированной вертикальной поляризации излучения. Верхние частоты спектра флуктуаций амплитуды сигнала находились в интервале от 100 до 170 Гц, что соответствовало интервалам временной корреляции меньше 0.01 с. Выбранный период поляризационной модуляции, соответствующий частоте поляризационной модуляции, равной 20 Гц, в несколько раз превышал интервал временной корреляции амплитудных флуктуаций принимаемого сигнала.

Функциональная схема макета представлена на рис. 1.

Макет РЛС имел следующие технические характеристики: длина волны – 3.2 см; ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ – 3.5°, мощность излучения в импульсе – 9 кВт; чувствительность приемника – 120 дБ/Вт; длительность зондирующих импульсов – 3.5 мкс; частота по-

вторения импульсов – 400 Гц; частота вращения Ω линейной плоскости поляризации сигналов – 20 Гц.

Для реализации предложенного метода был доработан штатный облучатель бортовой приемопередающей антенны БА РЛС “Гроза-26” путем установки в него поляризационного модулятора ПМ. Последний включал в себя вращающуюся секцию круглого волновода с полуволновой фазовой пластиной, которая вращала плоскость поляризации излучаемых сигналов.

Поляризационно-модуляционная РЛС работала следующим образом.

Блок импульсов запуска передатчика БИЗП с частотой 400 Гц запускал передатчик П, генерирующий исходные радиоимпульсы с вертикальной поляризацией. Радиосигнал через антенный переключатель АП поступал на линейный поляризатор ЛП с вертикальной собственной поляризацией. ЛП представлял собой переход с волновода с прямоугольным сечением к волноводу с круглым сечением. Далее через ПМ сигнал поступал в бортовую приемо-передающую антенну БА. Поляризационный модулятор ПМ вращал с частотой Ω плоскость поляризации излучаемых сигналов за счет механического вращения с частотой

$$\Omega' = \frac{\Omega}{2} \quad (8)$$

круглой волноводной секции с вмонтированной в нее полуволновой фазовой пластиной. Вращение волноводной секции осуществлялось синхронным шаговым двигателем СШД, механически связанным с помощью шестеренной передачи 1:1

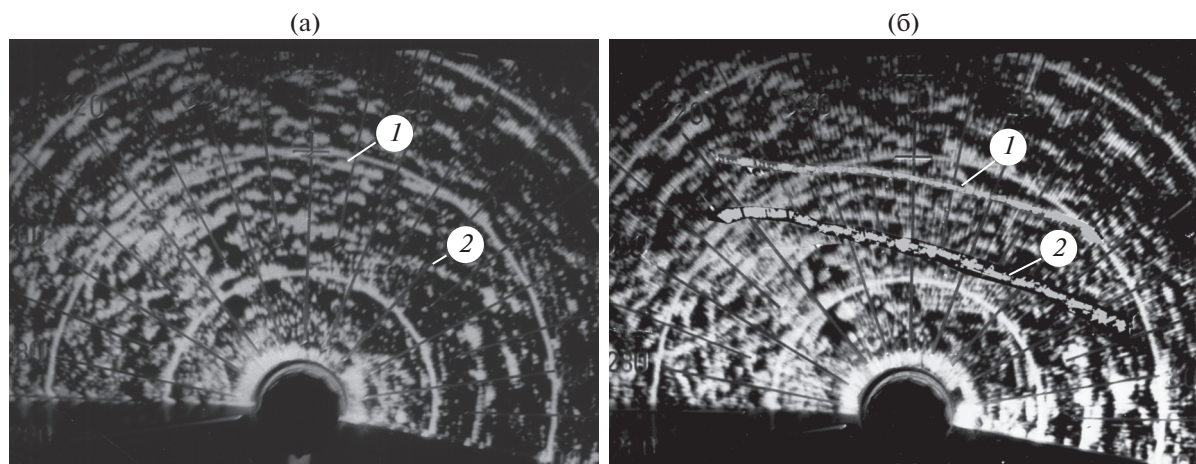


Рис. 2. Радиолокационное изображение одного и того же участка земной поверхности с расположенными на ней автомобильной (1) и железной (2) дорогами: а – в штатном режиме работы РЛС; б – в режиме поляризационной модуляции.

с волноводной секцией. Управление СШД осуществлялось по сигналам с блока управления шаговым двигателем БУШД, который задавал механическую частоту вращения волноводной секции $\Omega' = 10$ Гц.

Принятый на борту летательного аппарата амплитудно-модулированный сигнал проходил через ПМ, ЛП, АП и поступал на вход логарифмического приемника ЛФП, при этом сигнал имел вид (5).

Выходной сигнал ЛФП поступал на вход амплитудного детектора АД, на выходе которого сигнал, с учетом равенства (8), имел следующий вид:

$$A(\Omega' t) [\text{дБ}] = 20 \lg \left\{ C \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2} \right\} + 20 \lg \{ 1 + \mu \cos(4\Omega' t + 2\alpha) \}. \quad (9)$$

Амплитуда сигнала (9) становится промодулированной учетверенной частотой вращения фазовой пластины $4\Omega'$. С выхода АД сигнал, имеющий вид (9), через видеосуилитель ВУС поступал на сигнальный вход индикатора секторного обзора земной поверхности ИСОЗ и модулировал яркость его луча. Выходные сигналы из блока импульсов запуска передатчика БИЗП синхронизировали начала развертки по дальности. Выходные сигналы из блока управления бортовой антенной БУБА согласовывали угловое положение БА с угловым положением луча ИСОЗ. В результате на экране индикатора секторного обзора ИСОЗ формировалось РЛИ, яркость свечения которого была пропорциональна среднему уровню отраженных от земной поверхности сигналов за несколько периодов поляризационной модуляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведены два РЛИ одного и

того же участка земной поверхности с расположенными на ней автомобильной (позиция 1) и железной (позиция 2) дорогами. Метки дальности на изображении сформированы через 10 км. На рис. 2а РЛИ получено в штатном режиме работы РЛС. Полученные в этом режиме изображения автомобильной и железной дорог на РЛИ обозначаются фрагментами, что затрудняет их обнаружение и распознавание.

На рис. 2б РЛИ получено в режиме поляризационной модуляции при вращении плоскости поляризации излучаемого сигнала. Радиолокационный контраст автомобильной и железной дорог на РЛИ уже достаточен для их выделения на фоне мешающих отражений от местности.

Аналогичные результаты приведены на рис. 3. На рис. 3а также наблюдается фрагментарный характер изображения автомобильной дороги (позиция 1), а на рис. 3б – достаточное для распознавания изображение этой же дороги (позиция 1) при работе РЛС в режиме поляризационной модуляции сигнала.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования метода формирования радиолокационного изображения земной поверхности с выделением протяженных объектов типа автомобильных и железных дорог на РЛИ могут быть обоснованы следующими предположениями.

1. В качестве первого приближения можно считать, что протяженный объект является поляризационно анизотропным и его коэффициент анизотропии $\mu \neq 0$. При этом ориентация собственной системы координат α отдельных участков протяженного объекта различна и может не

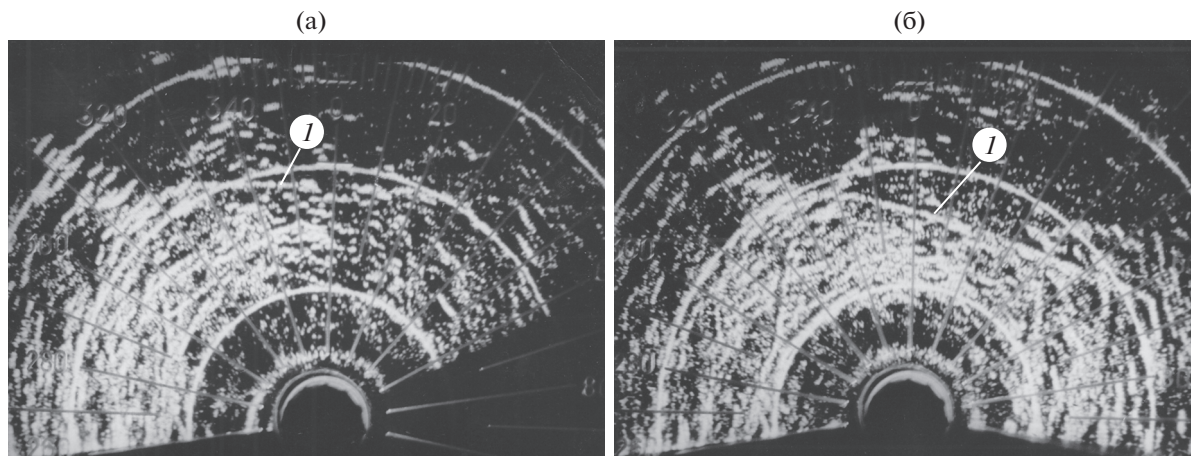


Рис. 3. Радиолокационное изображение одного и того же участка земной поверхности с расположенной на ней автомобильной дорогой (1): а – в штатном режиме работы РЛС; б – в режиме поляризационной модуляции.

совпадать с углом ориентации плоскости поляризации излучаемых сигналов.

2. Максимальный уровень отраженного сигнала в штатном режиме работы РЛС при фиксированной поляризации излучения будет в том случае, когда ориентации собственной системы координат α отдельных участков (фрагментов) протяженного объекта близки к ориентации плоскости поляризации излучаемого сигнала. Однако могут быть и такие отдельные участки местности, для которых ориентация α ортогональна плоскости поляризации излучаемого сигнала. Тогда уровень отраженных от них сигналов будет ниже порога обнаружения. В этом случае изображения протяженного объекта на РЛИ будут иметь фрагментарный характер.

3. В режиме поляризационной модуляции сигнала уровень отраженного сигнала от различных участков протяженного объекта с учетом яркостного накопления не зависит от их ориентации α . Поэтому все участки протяженного объекта будут давать в среднем одинаковый уровень отраженного сигнала за несколько периодов поляризационной модуляции. Тогда протяженный объект на РЛИ будет изображен с большей достоверностью, позволяющей его идентифицировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и опробован поляризационно-модулированный метод формирования РЛИ земной поверхности, основанный на использовании поляризационно-модулированных по углу ориентации плоскости поляризации зондирующих сигналов.

2. Теоретически исследована и экспериментально подтверждена связь характеристик принятых поляризационно-модулированных по ампли-

туде сигналов с поляризационными параметрами μ и α объектов наблюдений для исследуемого поляризационного модулятора в виде вращающейся полуволновой фазовой пластины.

3. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что использование простейшего способа поляризационной модуляции, основанного на вращении плоскости поляризации излучаемых сигналов, позволяет выделять протяженные объекты на РЛИ на фоне мешающих отражений от земной поверхности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966.
2. Татаринов В.Н., Татаринов С.В., Лигтхарт Л.П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Томск: Изд-во Томского университета, 2006.
3. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн.2: Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007.
4. Бадулин Н.Н., Гулько В.Л. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1991. № 4. С. 26.
5. Гулько В.Л., Мещеряков А.А. // Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции "Распространение радиоволн". Казань, 2019. Т. 2. С. 267.
6. Бадулин Н.Н., Гулько В.Л., Масалов Е.В. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1991. № 11. С. 65.
7. Бадулин Н.Н., Гулько В.Л. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 74.