

УДК 621.396.96.095
DOI 10.34822/1999-7604-2020-2-41-49

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ СОСТАВНОГО ОБЪЕКТА И ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

Е. Л. Шошин

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
E-mail: shoshin6@mail.ru

В работе рассматриваются характеристики рассеяния объекта (грузового автомобиля) и пространственно распределенных радиолокационных целей. Приведены результаты испытаний самолетного радиолокатора, работающего в режиме поляризационной модуляции зондирующих сигналов и формирующего радиолокационные изображения земной поверхности. Рассматривается угловая зависимость характеристик рассеяния транспортного средства. Описаны механизмы рассеяния радиоволн, формирующие индикатрисы энергетических и поляризационных параметров автомобиля ГАЗ-66.

Ключевые слова: поляризационная модуляция, радиолокационное изображение, эффективная поверхность рассеяния, поляриметр, ракурс, индикатриса рассеяния.

POLARIZATION AND ENERGY CHARACTERISTICS OF SCATTERING FOR COMPOUND OBJECT AND SPATIALLY DISTRIBUTED RADAR TARGETS

Е. Л. Shoshin

Surgut State University, Surgut, Russia
E-mail: shoshin6@mail.ru

The paper considers the characteristics of vehicle scattering and spatially distributed radar targets. The test results of an aircraft radar operating in polarization modulation of probing signals and forming radar images of the earth's surface are presented. The angular dependence of vehicle scattering characteristics is considered. The mechanisms of radio wave scattering that form the indicatrix of energy and polarization parameters of the GAZ-66 truck are described.

Keywords: polarization modulation, radar image, effective scattering surface, polarimeter, angle, scattering pattern.

Введение

Для решения задач распознавания радиолокационных целей либо их обнаружения на фоне мешающих отражений необходима априорная информация об энергетических и поляризационных свойствах этих целей [1–2]. В отличие от искусственных радиолокационных отражателей, обладающих широкой индикатрисой рассеяния с известными поляризационными параметрами, реальные объекты могут носить пространственно распределенный характер, а их характеристики рассеяния зависят от поляризации и угла облучения зондирующих сигналов [3–4]. Изменчивость поляризационных параметров связана с наличием у радиолокационной цели нескольких рассеивающих центров, разнесенных в пространстве, что приводит к изменению фазовых соотношений рассеянных этими центрами полей при изменении угла падения волны. Пространственно распределенные цели состоят из рассеивающих участков, поляризационные свойства которых отличаются между собой.

Для полного описания рассеивающих свойств радиолокационной цели необходимо знать зависимость ее энергетических и поляризационных параметров от направления падения волны на цель. Для целей сложной формы теоретический расчет энергетических и поля-

ризационных индикаторов рассеяния представляет собой сложную задачу, поэтому особое значение имеют экспериментальные методы исследования.

Цель исследования – разработка режима поляризационной модуляции зондирующих сигналов, направленного на улучшение радиолокационного изображения земной поверхности при навигации воздушного судна, а также исследование угловой зависимости энергетических и поляризационных параметров грузового автомобиля.

Характеристики рассеяния земной поверхности. При оценке поляризационных характеристик цели используют понятие матрицы обратного рассеяния (МОР), параметрическое представление которой включает [5]: λ_1, λ_2 – собственные числа, α – угол ориентации собственного базиса относительно измерительной системы координат:

$$S = \tilde{Q} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix} Q, \quad (1)$$

где Q – унитарная матрица преобразования поляризационного базиса:

$$Q = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Проведем анализ уровня принимаемых сигналов самолетным радиолокатором, выполняющим функции обзора земной поверхности при движении воздушного судна. Для радиолокационной станции (РЛС) «Гроза-26» формирование излучаемых сигналов напряженностью E_0 и прием рассеянных сигналов напряженностью \dot{E}_s осуществляются параболической антенной, оснащенной облучателем фиксированной линейной поляризации:

$$\dot{E}_s = \frac{E_0 \sqrt{\sigma} \exp(j2kR_0)}{\sqrt{4\pi} R_0} \cdot \Pi \cdot S \cdot E, \quad (2)$$

где $E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ – вектор Джонса излученного сигнала, E_0 – напряженность излученного сигнала,

R_0 – расстояние до объекта, σ – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) радиолокационного объекта, k – волновое число, Π – оператор поляризатора (соответствует плечу антены для подключения к приемнику):

$$\Pi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выходной сигнал РЛС формируется на выходе приемного тракта, включающего антенну, супергетеродинный приемник, линейный детектор, видеоусилитель, и обладающего сквозным коэффициентом передачи μ :

$$E_R = \mu \left| \dot{E}_s \right|. \quad (3)$$

При этом временная развертка $E_R(t)$, формируемая синхронно со сканированием приемо-передающей антенны, поступает в индикатор секторного обзора для формирования радиолокационной карты местности. Подставляя (1) в (2) и (3), получим:

$$E_R = \mu \cdot \frac{E_0 \sqrt{\sigma} \exp(j2kR_0)}{\sqrt{4\pi} R_0} \cdot \left| \lambda_1 \cos^2 \alpha + \lambda_2 \sin^2 \alpha \right|.$$

Таким образом, выходной сигнал РЛС зависит от угла ориентации α поляризационно-анизотропных целей, что сказывается на формировании радиолокационных изображений земной поверхности. Покажем возможность устраниТЬ зависимость результатов радиолокационного обзора земной поверхности от параметра α . С этой целью введем в состав антено-фидерного тракта РЛС поляризационный модулятор, использующий шаговый двигатель для вращения секции круглого волновода со встроенной фазовой полуволновой пластиной.

С учетом формирования поляризационным модулятором зондирующих сигналов с вращающейся линейной поляризацией напряженность рассеянных сигналов в месте расположения приемной антенны определится как:

$$\dot{E}_s = \frac{E_0 \sqrt{\sigma} \exp(j2kR_0)}{\sqrt{4\pi} R_0} \cdot \Pi \cdot M^T \cdot S \cdot M \cdot E, \quad (4)$$

где $M = \begin{bmatrix} \cos(2\Omega t) & -\sin(2\Omega t) \\ -\sin(2\Omega t) & -\cos(2\Omega t) \end{bmatrix}$ – матрица Джонса полуволновой фазовой пластиинки [5],

Ω – частота вращения фазовой пластины, T – символ транспонирования.

С учетом (1), (3) и (4) выходной сигнал РЛС, усредненный на интервале времени, равном периоду модуляции, примет вид:

$$E_R = \frac{\mu}{2} \cdot \frac{E_0 \sqrt{\sigma} \exp(j2kR_0)}{\sqrt{4\pi} R_0} \cdot \left| \lambda_1 + \lambda_2 \right|. \quad (5)$$

Заметим, что модернизации подвергается только антенна РЛС, при этом, как видно из (5), выходной сигнал становится нечувствителен к углу ориентации α .

С целью проверки работоспособности режима формирования поляризационно-модулированных сигналов и его влияния на формирование радиолокационных изображений был проведен летный эксперимент на борту АН-26 с установленным на антенну РЛС поляризационным модулятором. В программу летных испытаний входило построение радиолокационного изображения участка местности размером 30×70 км, содержащего малый населенный пункт, пойму реки и асфальтированные автомобильные дороги.

Технические характеристики самолетной РЛС:

- несущая частота – 9 370 МГц;
- мощность излучения – 9 кВт;
- длительность зондирующего сигнала – 3,5 мкс;
- режимы поляризации зондирующего сигнала – линейная вертикальная и линейная вращающаяся;
- частота поляризационной модуляции – 40 Гц;
- частота зондирующих импульсов – 400 Гц;
- уровень собственных шумов приемника –130 дБ/Вт;
- ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости –3 град;
- угол раствора диаграммы направленности в угломестной плоскости – 30 град.

На рисунке 1 приведены радиолокационные карты, полученные при облучении земной поверхности высокочастотными импульсами вертикальной поляризации (рис. 1а) и по-

ляризационно-модулированными импульсами (рис. 1б). Результаты эксперимента свидетельствуют, что поляризационная модуляция зондирующих сигналов приводит к формированию радиолокационных карт местности лучшего качества. При этом такие протяженные объекты, как русло реки (1) и автомобильная дорога с высаженными по периметру полотна высокими деревьями (2), имеют непрерывную стратификацию, в отличие от тех же объектов, изображения которых получены с помощью облучающих сигналов фиксированной поляризации, и носят сегментированный характер. Отличие в радиолокационных изображениях объясняется проявлением отдельными участками пространственно распределенных объектов рассеивающих свойств поляризационно-изотропных и поляризационно-анизотропных целей. При облучении таких объектов высокочастотными импульсами вертикальной поляризации в радиолокационном изображении присутствуют поляризационно-изотропные участки ($\lambda_1 = \lambda_2$) и поляризационно-анизотропные участки ($\lambda_1 \neq \lambda_2$), угол ориентации α которых близок к 90° . Облучение земной поверхности поляризационно-модулированными зондирующими сигналами приводит к формированию несегментированного изображения протяженных объектов, состоящих из изотропных и анизотропных участков, без связи с углом α .

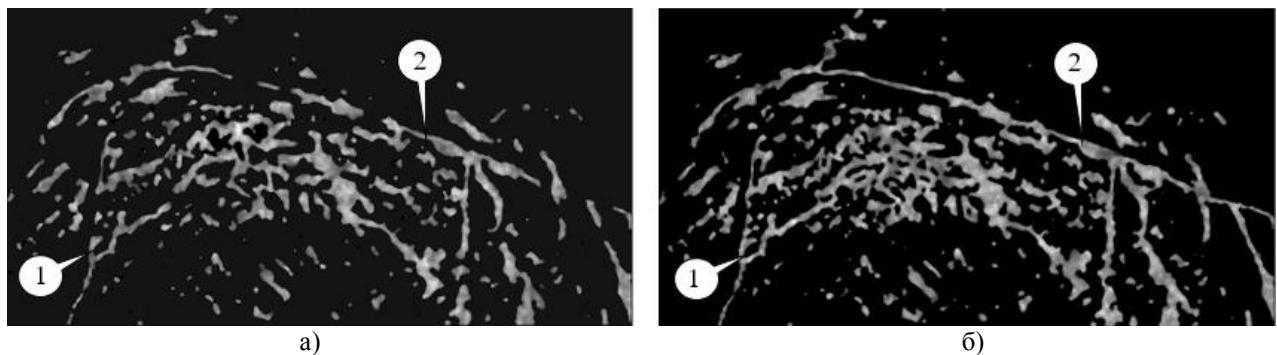


Рис. 1. Радиолокационная карта земной поверхности:
а) зондирующие сигналы линейной вертикальной поляризации;
б) поляризационно-модулированные зондирующие сигналы

Угловые характеристики рассеяния транспортного средства. Для простых радиолокационных целей, таких как искусственные отражатели, ширина индикаторы рассеяния достаточно велика, а поляризационные параметры отражателя изменяются незначительно [6]. Для реальных целей, сложных по своей форме, поляризационные параметры будут зависеть от угла облучения.

Рассмотрим угловую зависимость поляризационно-энергетических характеристик автомобиля, представляющего собой составной объект из рассеивающих протяженных фрагментов (капот, двери, элементы кузова и др.) и сосредоточенных элементов (зеркало, ручки, колесные диски и др.). По аналогии с составной целью [7] будем рассматривать автомобиль как систему из рассеивающих фрагментов протяженного элемента и простых одиночных элементов, для которых благодаря их малым размерам отсутствуют переотражения. Воспользуемся полученными в [8] соотношениями, определяющими напряженность рассеянной волны от составной цели в месте размещения однопозиционного радиолокатора:

$$\vec{E}_\Sigma = \vec{E}_{ST} + \vec{E}_{S\Sigma}, \quad (6)$$

где \vec{E}_{ST} – напряженность поля, рассеянного протяженным элементом:

$$\begin{aligned} E_{ST} &= \frac{E_0 \sqrt{\sigma} \exp(j2kR_0)T}{\sqrt{4\pi} R_0}, \\ T &= \frac{\sin(kL\theta)}{kL\theta}, \end{aligned} \quad (7)$$

и $E_{S\Sigma}$ – напряженность поля, рассеянного M одиночными элементами:

$$\begin{aligned} E_{S\Sigma} &= \frac{E_0 \exp(j2kR_0)}{\sqrt{4\pi} R_0} \sum_{m=1}^M \sqrt{\sigma_m} T_m, \\ T_m &= \exp[j2k(z_m - x_m\theta)], \end{aligned} \quad (8)$$

здесь L – длина протяженного элемента, σ и σ_m – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) протяженного и простых элементов, x_m и z_m – координаты рассеивающего центра одиночного элемента в системе координат, центр которой совмещен с центром тяжести составного объекта, θ – угол позиционирования (ракурса) облучения.

Перейдем к нахождению МОР составного объекта. Учитывая, что ЭПР радиолокационного объекта зависит от поляризации излученного и принимаемого сигналов, МОР протяженного элемента может быть записана в виде:

$$S^{(1)} = \frac{\sqrt{\sigma} \exp(j2kR_0)T}{\sqrt{4\pi} R_0} \tilde{\Theta} \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{vmatrix} \Theta, \quad (9)$$

где Θ – унитарная матрица вращения.

Одиночные элементы, в свою очередь, образуют множество произвольно ориентированных точечных отражателей, МОР которых с помощью матриц вращения Θ^m могут быть приведены к диагональному виду:

$$S^{(2)} = \frac{\exp(j2kR_0)}{\sqrt{4\pi} R_0} \sum_{m=1}^M \sqrt{\sigma_m} T_m \tilde{\Theta}^m \begin{vmatrix} b_1^m & 0 \\ 0 & b_2^m \end{vmatrix} \Theta^m. \quad (10)$$

Результирующая матрица рассеяния составного объекта равна:

$$S = S^{(1)} + S^{(2)}. \quad (11)$$

МОР (11) с помощью конгруэнтного преобразования также может быть приведена к диагональному виду, элементы главной диагонали которой будут равны собственным значениям d_1 и d_2 . При этом сумма квадратов модулей значений d_1 и d_2 определяет полную ЭПР σ_Σ , а отношение модулей и разность фаз собственных значений определяют поляризационные параметры ρ и $\Delta\varphi$. Угловая зависимость значений МОР составного объекта связана с входящими в (9) и (10) множителями T и T_m . Задавая различными параметры протяженного и одиночных элементов и используя (9–11), можно выполнять моделирование рассеивающих свойств транспортного средства.

При изучении характеристик рассеяния сложных объектов важную роль играют экспериментальные методы анализа. В качестве объекта исследования был выбран автомобиль ГАЗ-

66 (рис. 2), для которого в зависимости от ракурса облучения выполнялось измерение эффективной поверхности рассеяния σ_Σ , поляризационных параметров ρ и $\Delta\varphi$. При проведении поляризационных измерений использовался модуляционный метод, согласно которому измеренные амплитуды спектральных составляющих огибающей принятого сигнала, кратные частоте поляризационной модуляции, пересчитывались в параметры ρ , дБ и $\Delta\varphi$, дБ [9].



Рис. 2. Объект исследования

Примечание: фото автора.

Технические характеристики радиолокационного поляриметра:

- несущая частота – 9 370 МГц;
- мощность излучения – 9 кВт;
- длительность зондирующего сигнала – 0,2 мкс;
- поляризация зондирующего сигнала – линейная врачающаяся;
- частота поляризационной модуляции – 40 Гц;
- частота зондирующих импульсов – 400 Гц;
- уровень собственных шумов приемника – 130 дБ/Вт;
- ширина диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскости – 0,8 град;
- время усреднения измеряемых параметров – 0,2 с.

Радиолокационный поляриметр располагался на удалении 2 500 м от участка ровного поля, покрытого снегом, глубиной 15–20 см. Во время измерений автомобиль совершал равномерное движение на поле по кругу диаметром 20 м. Размеры элемента пространственного разрешения поляриметра в районе размещения цели составили 30×35 м. С помощью эталонного уголкового отражателя была проведена внешняя калибровка поляриметра, по результатам которой получена оценка удельной ЭПР поля, на котором проводились измерения. При значении угла места в $1,5^\circ$ эта оценка не превышала $10^{-3} \text{ м}^2/\text{м}^2$, что позволило получать оценки ЭПР исследуемой цели, большие 1 м^2 .

На рис. 3а, 3б и 3в приведены индикаторы рассеяния ЭПР, параметров ρ и $\Delta\varphi$ автомобиля ГАЗ-66. Ракурс 0° соответствует положению автомобиля левым бортом к наблюдателю, ракурс 90° соответствует виду сзади, ракурс 180° соответствует положению автомобиля правым бортом к наблюдателю, ракурс 270° – вид спереди.

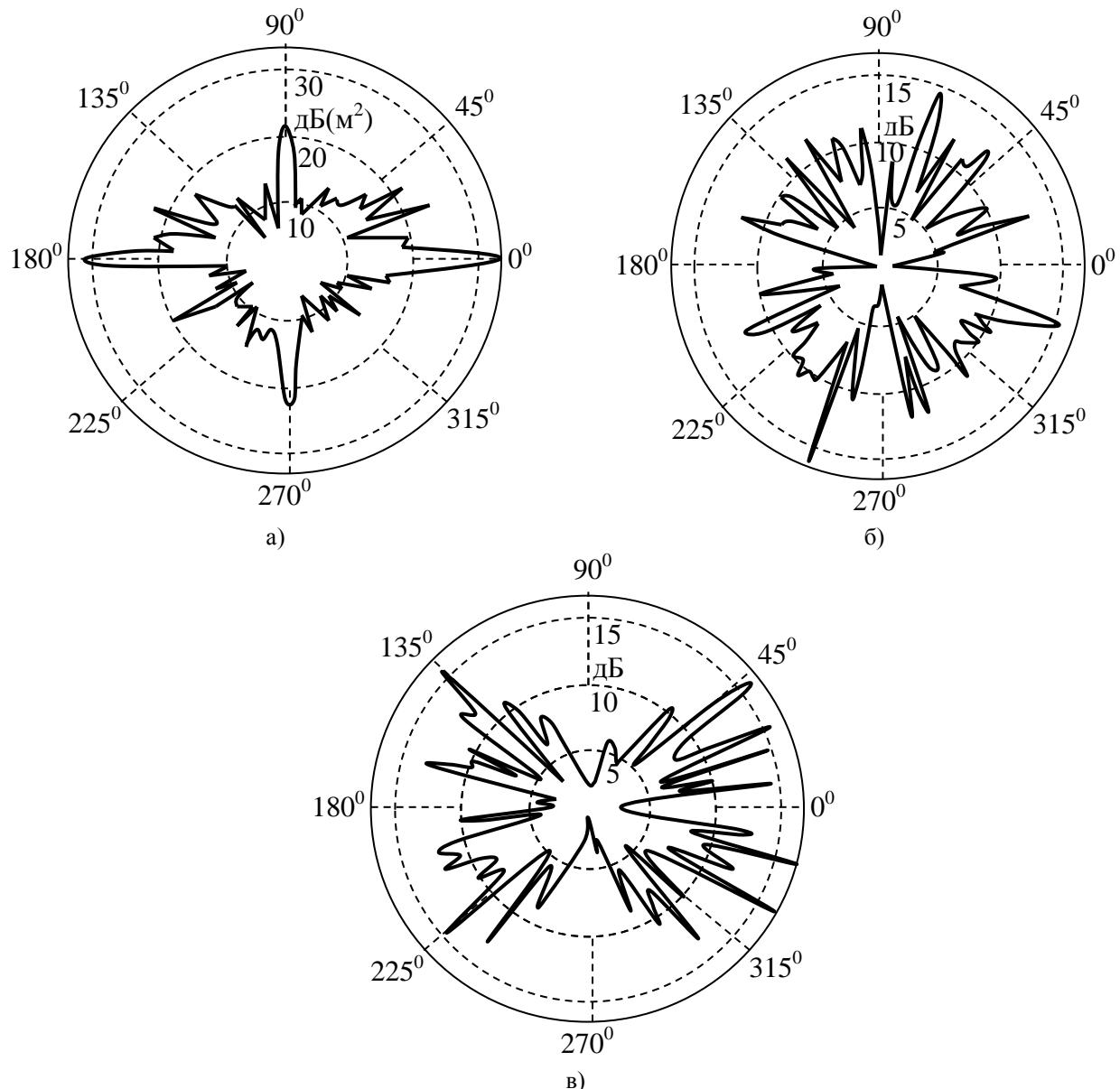


Рис. 3. Угловые зависимости характеристик рассеяния автомобиля ГАЗ-66:

а) индикаторы ЭПР ($\text{dB}/\text{м}^2$); б) индикаторы ρ (dB); в) индикаторы $\Delta\varphi$ (dB)

Примечание: составлено автором.

Рисунок 3а свидетельствует о том, что эффективная поверхность рассеяния автомобиля ГАЗ-66 изменяется в зависимости от ракурса облучения от 7 $\text{дБ}(\text{м}^2)$ до 33 $\text{дБ}(\text{м}^2)$, при этом в направлениях облучения, перпендикулярных поверхности протяженных фрагментов кузова автомобиля (левый и правый борт фургона, нос кабины и кормовая часть), присутствуют ярко выраженные максимумы, значения ЭПР и угловую ширину которых можно увязать с параметрами эквивалентной металлической пластины (табл.).

Таблица

Параметры индикатрисы ЭПР автомобиля ГАЗ-66

Параметр	Левый борт	Носовая часть	Правый борт	Корма
ЭПР σ_{Σ} , м ²	1 260	199	1 995	125
Угловая ширина по уровню половинной мощности, 0	4	3	4	3
Эквивалентная металлическая пластина, длина (м) × ширина (м)	$0,52 \times 0,52$	$0,33 \times 0,33$	$0,58 \times 0,58$	$0,29 \times 0,29$

Примечание: составлено автором.

С целью выявления закономерностей в поведении поляризационных параметров был проведен корреляционный анализ, который показал, что в автокорреляционной функции параметра $\Delta\varphi$ присутствует ярко выраженная угловая периодическая составляющая со значениями $-0,5\dots-0,6$ при ракурсах облучения, близких к 45° , 135° , 225° и 315° , при этом параметр $\Delta\varphi$ достигает величин 16–17 дБ (соответствуют разности фаз собственных чисел МОР со значением $170^\circ-180^\circ$) при малых значениях параметра ρ , что указывает на наличие рассеивающих центров, в электродинамическом отношении представляющих собой двугранные уголковые отражатели. В то же время в автокорреляционной функции параметра ρ угловая периодическая составляющая выражена меньше.

Заключение

Поляризационная модуляция зондирующих сигналов самолетного радиолокатора улучшает качество радиолокационных изображений земной поверхности, что выражается в формировании несегментированных изображений пространственно распределенных объектов, таких как автомобильные дороги и русло реки. Эффективная поверхность рассеяния автомобиля ГАЗ-66 изменяется (в зависимости от ракурса облучения) от единиц до нескольких тысяч квадратных метров. При ракурсах облучения автомобиля ГАЗ-66, кратных 90° , основную роль в рассеянии играют плоские металлические поверхности, близкие по своим свойствам к поляризационно-изотропным целям. При ракурсах облучения, близких к $45^\circ + (n - 1) 90^\circ$ (n – целое), поляризационные характеристики автомобиля соответствуют свойствам двугранных уголковых отражателей.

Литература

1. Козлов А. И., Логвин А. И., Сарычев В. А. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия : моногр. М. : Радиотехника, 2007. 640 с.
2. Шошин Е. Л. Радиолокационные методы контроля навигационной судоходной обстановки // Вестник кибернетики. 2018. № 3. С.113–134.
3. Ben-Shimol Y., Blaunstein N., Sergeev M. B. Depolarization Effects of Raduo Wave Propagaton in Various Land Bult-Up Environments // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 68–76. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.1.68.
4. Кривин Н. Н., Козлов А. И., Татаринов В. Н., Татаринов С. В. Поляризационные инварианты в задачах обнаружения малоразмерных РЛО // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника. 2011. № 171. С. 14–19.
5. Татаринов В. Н., Татаринов С. В., Лигтхарт Л. П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования. Томск : Томск. гос. ун-т, 2006. 380 с.
6. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances / Eds. R. Zekavat, R. Buehrer. Wiley-IEEE Press, 2011. 1264 p.

7. Козлов А. И., Татаринов В. Н., Татаринов С. В., Пепеляев А. В. Оценка средних значений поляризационных инвариантов составных объектов при двухпозиционном рассеянии по результатам однопозиционных измерений // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника. 2016. Т. 19, № 5. С. 5–19.
8. Козлов А. И., Татаринов В. Н., Татаринов С. В., Пепеляев А. В. Определение поляризационно-энергетических инвариантов составных объектов при двухпозиционном рассеянии на основе обобщения теоремы Келла // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника. 2015. № 222. С. 6–20.
9. Патент № 1232034 СССР, G01S 13/02. Способ измерения поляризационных характеристик радиолокационной цели и устройство для его реализации / Бадулин Н. Н., Масалов Е. В. : № 3802018 : заявл. 15.10.84 ; опубл. 30.03.1993. Заявитель: Томск. ин-т автоматизир. систем управления и радиоэлектроники. 4 с.