



УДК 621.396.96+621.391.821

В. В. Яцышен, А. Ю. Гордеев

Электродинамические методы селекции целей

Рассмотрен новый электродинамический подход к селекции целей. Показано, что топологический портрет в случае p -поляризации для двух типов угловых отражателей в определенном смысле противоположен случаю s -поляризации и, следовательно, можно проследить явную поляризационную зависимость топологических портретов углового отражателя.

Ключевые слова: бистатическая радиолокация, электродинамический портрет, угол падения.

Данная статья написана в продолжение темы анализа электродинамических методов селекции целей, начатой в работах [1, 2]. В частности, в них был рассмотрен метод поляризационной дистанционной диагностики объектов [1] и изложен способ решения задачи о рассеянии поляризованного электромагнитного излучения объектами – угловым отражателем и ракетой, представлены угловые спектры радиационного сечения рассеяния для случая моностатической радиолокации [2]. В настоящей работе приведены результаты расчетов для случая бистатической радиолокации тех же объектов. Геометрия решаемой задачи представлена на рис. 1.

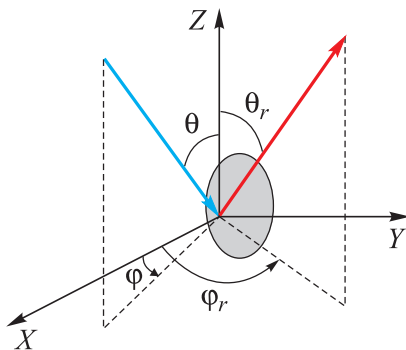


Рис. 1. Геометрия рассеяния в бистатической радиолокации: φ, θ – сферические угловые координаты направления падающего излучения; φ_r, θ_r – сферические угловые координаты рассеянного излучения

Подход к изучению рассеянного электромагнитного излучения, а также бистатическая радиолокация не являются чем-то новым в радиолокации. По данным темам существует множество работ, в первую очередь зарубежных [3–9]. Исследования влияния различных поляризаций зондирующего излучения на характер получаемой радиолокационной кар-

тины проводили ранее (правда, в несколько другом разрезе), например, в работах [7, 8]. Особенностью предлагаемого подхода является анализ топологического портрета рассеянного излучения, сформированного двумя углами, изменяющимися в широком диапазоне значений, – углом падения и углом рассеяния при различных поляризациях зондирующего излучения. Как показано ниже, для различных объектов эти портреты столь же уникальны, как отпечатки пальцев.

Проанализируем результаты расчетов, представленные на рис. 2–9. На них указана поляризация падающего излучения – p или s . Первый случай соответствует ориентации вектора поля падающего излучения при $E_\varphi^{in} = 0, E_\theta^{in} \neq 0$, а второй – при $E_\varphi^{in} \neq 0, E_\theta^{in} = 0$.

На рис. 3 показана зависимость радиационного сечения рассеяния (RCS) углового отражателя в бистатическом варианте локации от углов падающего излучения φ и рассеянного φ_r . Заметно, что топологический рисунок в случае углового отражателя сильно зависит от характера поляризации падающего излучения. В этом смысле весьма показательны двумерные рисунки, демонстрирующие преимущество использования поляризованного излучения перед неполяризованным – в первом случае отчетливо виден векторный характер электромагнитного поля. Назовем для краткости эти двумерные рисунки топологическим портретом рассеянного электромагнитного поля (по аналогии с фазовым портретом в теории колебаний).

На рис. 2, 3 видно, что на топологическом портрете в случае p -поляризации в центре картины наблюдается выраженный максимум в виде линии, которая растянута от левого нижнего в правый верхний угол, при этом он более

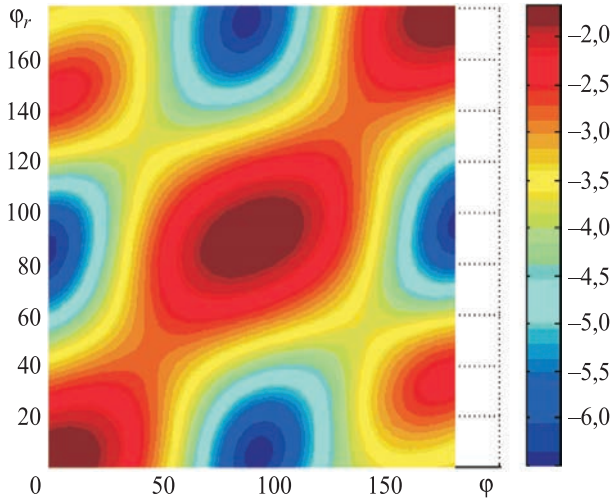


Рис. 2. Радиационное сечение рассеяния уголкового отражателя. Бистатическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов φ_r, φ , град. Двумерная картина

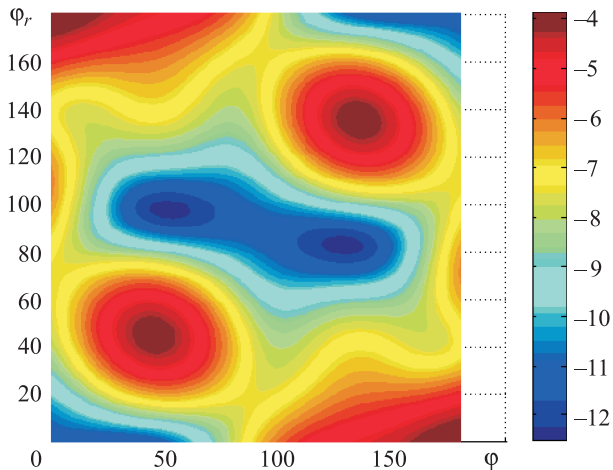


Рис. 3. Радиационное сечение рассеяния уголкового отражателя. Бистатическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов φ_r, φ , град

выражен в центре, чем по краям. В случае s -поляризации, наоборот, в центре портрета расположена область минимума, которая по той же диагонали сменяется овальными областями максимума сечения рассеяния. Таким образом, прослеживается явная поляризационная зависимость топологических портретов рассеяния для уголкового отражателя.

Аналогичная зависимость для рассеяния на ракете приведена на рис. 6. Здесь также можно наблюдать определенное различие топологических портретов для разных поляризаций. Однако весьма существенно различаются топологические портреты уголкового отражателя и ракеты (см. двумерные картины на рис. 2, 6 и рис. 3, 7).

Расчет портретов проводили при следующих условиях: зондирующее излучение падало под фиксированным углом $\theta = 45^\circ$, угол φ изменялся в диапазоне $0 \leq \varphi \leq 180^\circ$. Угол рассеяния φ_r в бистатической радиолокации изменялся в пределах $0 \leq \varphi_r \leq 180^\circ$. Данный случай будем называть азимутальной бистатической радиолокацией.

Зависимости RCS уголкового отражателя и ракеты, дБ, в бистатическом варианте локации от углов падающего излучения θ и рассеянного θ_r показаны на рис. 4, 5 и рис. 8, 9. Этот случай назовем полярной бистатической радиолокацией. Зондирующее излучение падает под фиксированным углом $\varphi = 45^\circ$, а угол θ изменяется в диапазоне $0 \leq \theta \leq 180^\circ$. Угол рас-

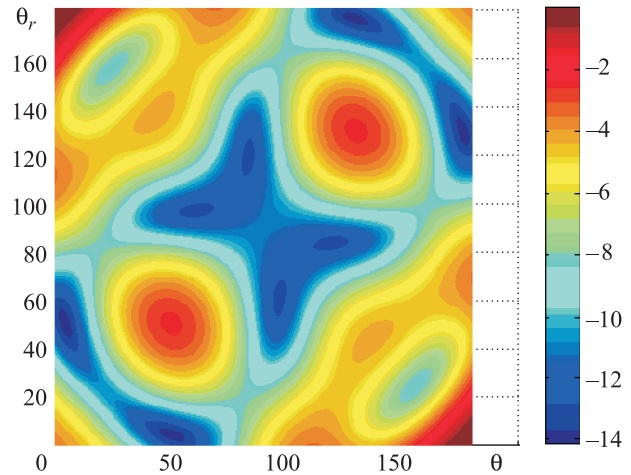


Рис. 4. Радиационное сечение рассеяния уголкового отражателя. Бистатическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов θ, θ_r , град

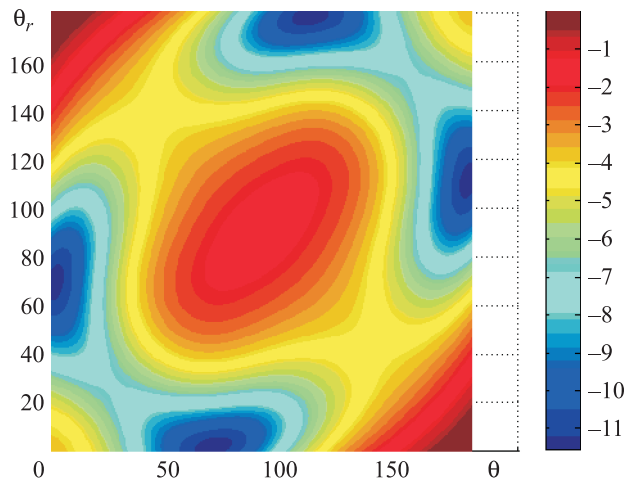


Рис. 5. Радиационное сечение рассеяния уголкового отражателя. Бистатическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов θ, θ_r , град

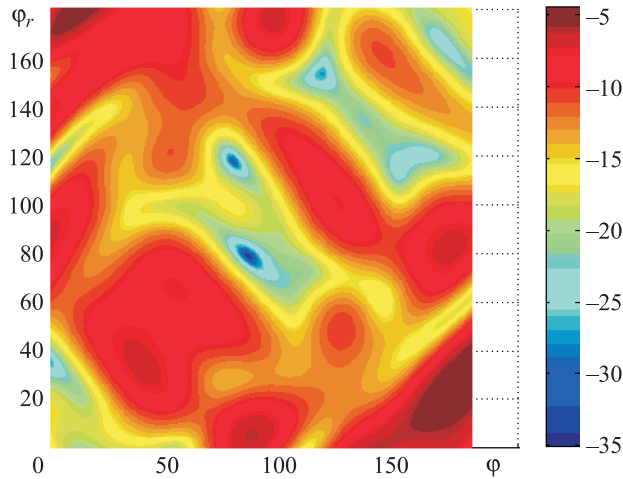


Рис. 6. Радиационное сечение рассеяния ракеты. Бистатическая геометрия, *p*-поляризация. Зависимость от углов ϕ_r, ϕ , град

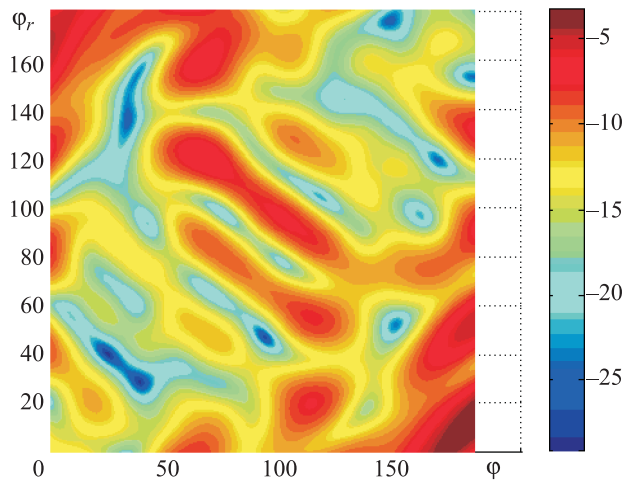


Рис. 7. Радиационное сечение рассеяния ракеты. Бистатическая геометрия, *s*-поляризация. Зависимость от углов ϕ_r, ϕ , град

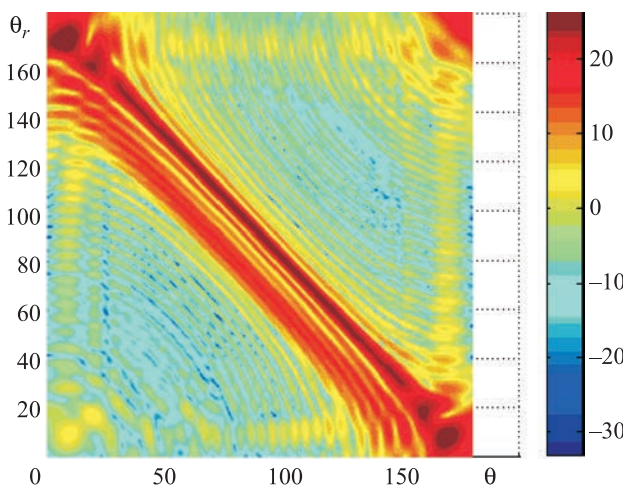


Рис. 8. Радиационное сечение рассеяния ракеты. Бистатическая геометрия, *p*-поляризация. Зависимость от углов θ, θ_r , град

сеяния θ_r в бистатической радиолокации также изменяется в пределах $0 \leq \theta_r \leq 180^\circ$.

Как и в предыдущем случае изменения углов ϕ_r, ϕ , здесь наблюдается зависимость радиационного сечения рассеяния от поляризации для уголкового отражателя. Однако теперь для *p*-поляризации в центре топологического портрета существует область минимума в виде бабочки, в то время как для изменяющихся углов ранее наблюдалась область максимума. В случае *s*-поляризации в центре портрета можно увидеть обширную область максимума в противоположность рассмотренной ранее области минимума для изменяющихся углов θ, θ_r . Такая специфика расположения областей максимума и минимума при выборе способа изменения падающих углов и углов рассеяния дает дополнительную информацию о рассеивающем объекте, в данном случае – уголковом отражателе. Топологический портрет, содержащий в этом случае две достаточно четко разделяемые области максимума и минимума, можно объяснить интерференцией дифрагированного электромагнитного поля на небольшом препятствии – уголковом отражателе. Более сложную дифракционную картину, содержащую множество интерференционных максимумов и минимумов, можно наблюдать в случае изменения углов θ, θ_r при зондировании ракеты. Причина в том, что в этом варианте дифракционное препятствие (продольная проекция ракеты) во много раз превышает в размерах рассмотренное выше для случая

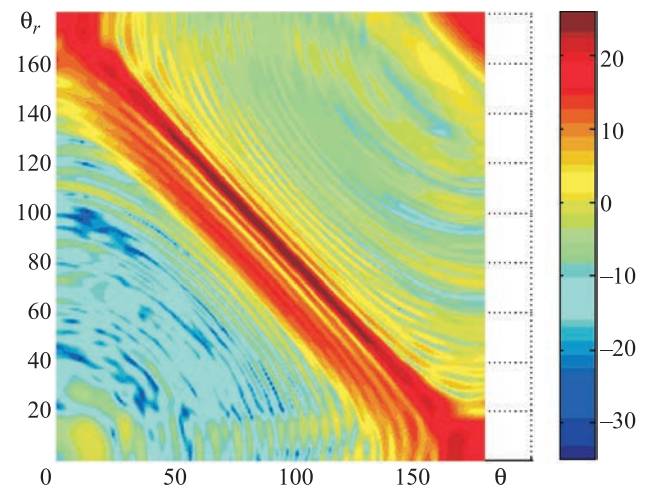


Рис. 9. Радиационное сечение рассеяния ракеты. Бистатическая геометрия, *s*-поляризация. Зависимость от углов θ, θ_r , град

изменения углов φ_r , φ препятствие в виде поперечного сечения ракеты. Для уголкового отражателя, как видно из рисунков, в случае изменения углов θ , θ_r при фиксированных φ_r , φ можно наблюдать взаимно противоположный характер топологических портретов для различных поляризаций. Что касается ракеты, то в этом варианте бистатической радиолокации при сравнительно большом продольном размере ракеты дифракционная картина практически не зависит от вида поляризации. Следует заметить, что зондирование, связанное с изменением углов θ , θ_r , дает более слабые значения радиационного сечения рассеяния по сравнению с полярной радиолокацией. И если в первом случае максимальные значения RCS , дБ, отрицательные, то во втором они достигают в максимуме нескольких десятков. На рис. 10 приведена трехмерная картина рассеяния уголкового отражателем s -поляризованного зондирующего излучения в бистатической геометрии и зависимости от углов θ , θ_r .

Помимо изучения упомянутых выше стандартного уголкового отражателя (в проекциях представляющего собой квадрат, пересеченный диагоналями и составленный из восьми треугольных уголков [2]) и ракеты, было проведено исследование рассеяния поляризованного электромагнитного излучения с частотой 0,5 ГГц уголкового отражателем другого вида (рис. 11). Отражатель представляет собой три взаимно перпендикулярных металлических квадрата со сторонами 0,6 м и толщиной плоскости 6 мм.

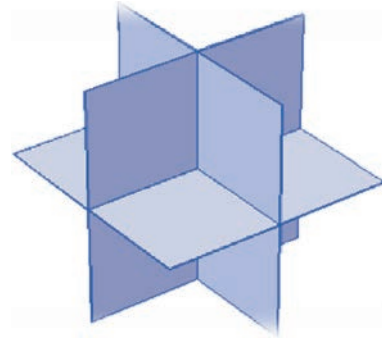


Рис. 11. Модель отражателя из взаимно перпендикулярных плоскостей, проходящих через середины его квадратных проекций

Сечения рассеяния (в децибелах) для бистатической радиолокации объекта при различных поляризациях приведены на рис. 12–21. Как и ранее, θ обозначает угол падения, а θ_r – угол рассеяния в бистатической схеме радиолокации, град. При этом считаем угол φ равным 45° . Напомним, что частота зондирующего излучения принята равной 0,5 ГГц.

Двумерная топологическая картина рассеяния в случае p -поляризации показана на рис. 12. В достаточно широкой области около точек $\theta_r = 90^\circ$ и $\theta = 90^\circ$ расположены максимальные значения сечения рассеяния. Следовательно, если изменять угол падения θ от 0 до 180° и угол наблюдения θ_r от 180° до 0, то, говоря «геометрическим» языком, двигаясь из верхнего левого угла топологической двумерной картины сечения рассеяния

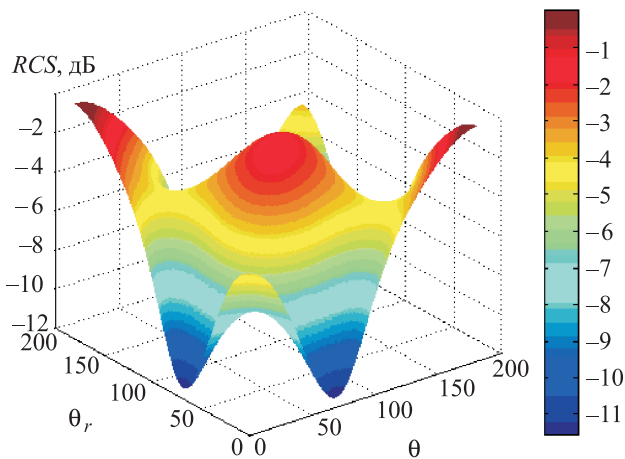


Рис. 10. Радиационное сечение рассеяния ракеты, 3D-изображение. Бистатическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов θ , θ_r , град

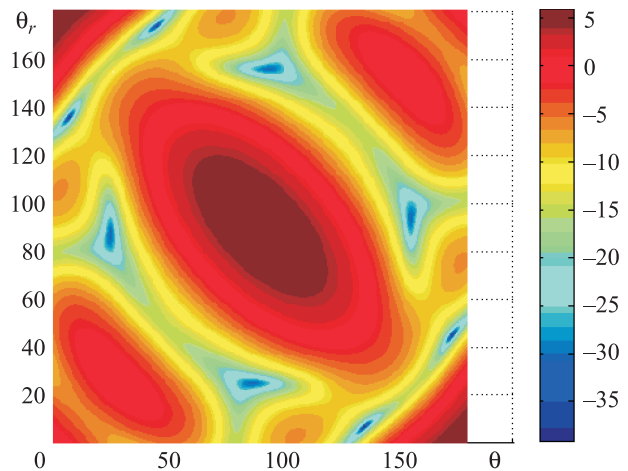


Рис. 12. Радиационное сечение рассеяния уголкового отражателя из взаимно перпендикулярных плоскостей. Бистатическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов θ , θ_r , град

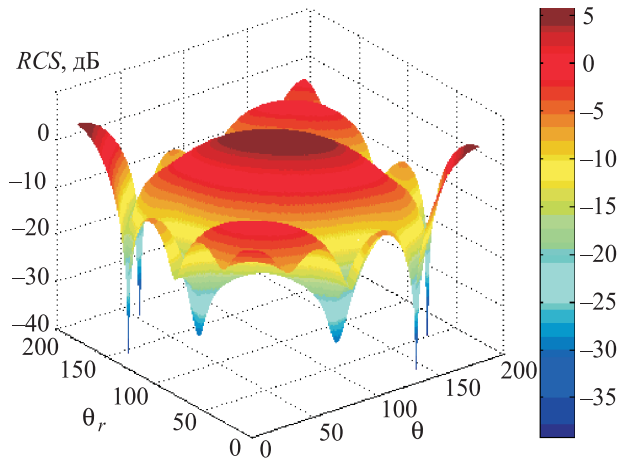


Рис. 13. Радиационное сечение рассеяния углового отражателя из взаимно перпендикулярных плоскостей, 3D-изображение. Бистатистическая геометрия, *p*-поляризация. Зависимость от углов θ , θ_r , град

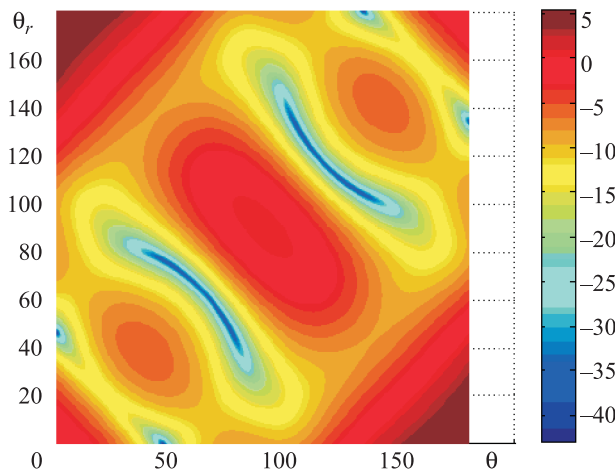


Рис. 14. Радиационное сечение рассеяния углового отражателя из взаимно перпендикулярных плоскостей. Бистатистическая геометрия, *s*-поляризация. Зависимость от углов θ , θ_r , град

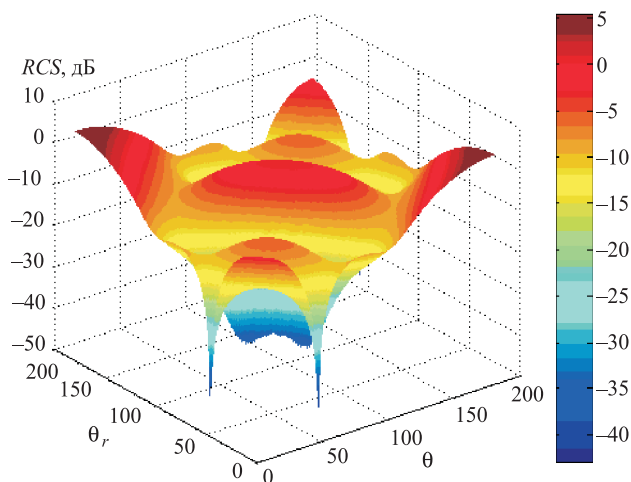


Рис. 15. Радиационное сечение рассеяния углового отражателя из взаимно перпендикулярных плоскостей, 3D-изображение. Бистатистическая геометрия, *s*-поляризация. Зависимость от углов θ , θ_r , град

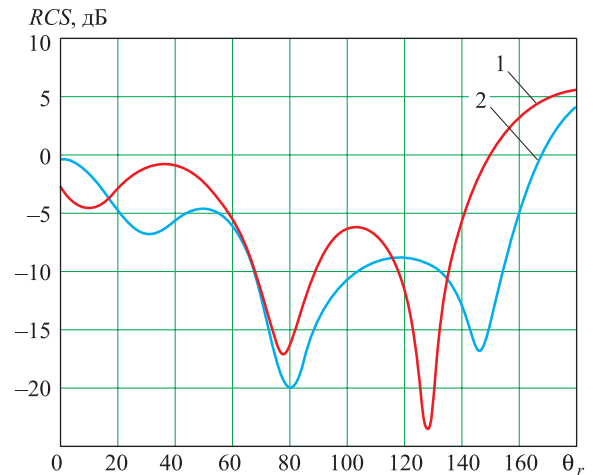


Рис. 16. Графики зависимостей радиационного сечения рассеяния углового отражателя от угла наблюдения θ_r для двух различных углов падения (обозначены *IncAngle*). Бистатистическая геометрия, *p*-поляризация:
1 – *IncAngle* = 0°;
2 – *IncAngle* = 15°

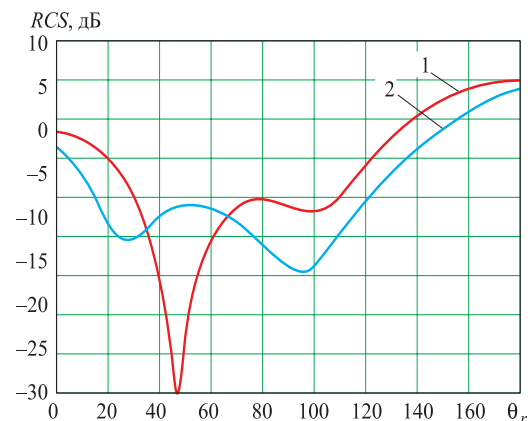


Рис. 17. Графики зависимостей радиационного сечения рассеяния углового отражателя от угла наблюдения θ_r для двух различных углов падения (обозначены *IncAngle*). Бистатистическая геометрия, *s*-поляризация:
1 – *IncAngle* = 0°;
2 – *IncAngle* = 15°

ния в правый нижний, можно увидеть область сильного отражения. В области $\theta = 20...90^\circ$, $\theta_r = 80...20^\circ$ и симметричной относительно главной диагонали области $\theta = 90...160^\circ$, $\theta_r = 150...90^\circ$ есть островки минимального отражения. Аналогичная картина сложилась вблизи левого верхнего и нижнего правого углов. Если посмотреть на рис. 14, то можно заметить различия между картиной отражения в случае *s*- и *p*-поляризации. В частности, по главной диагонали отсутствуют области минимума, есть только максимумы. Об-

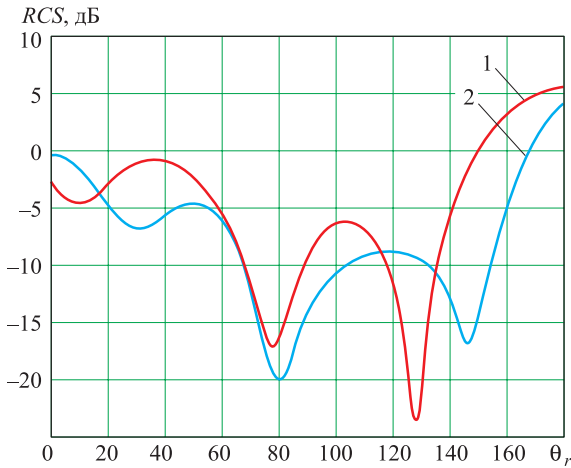


Рис. 18. Графики зависимостей радиационного сечения рассеяния углового отражателя от угла наблюдения θ_r для двух различных углов падения (обозначены $IncAngle$). Бистатическая геометрия, p -поляризация:
 1 – $IncAngle = 0$;
 2 – $IncAngle = 15^\circ$

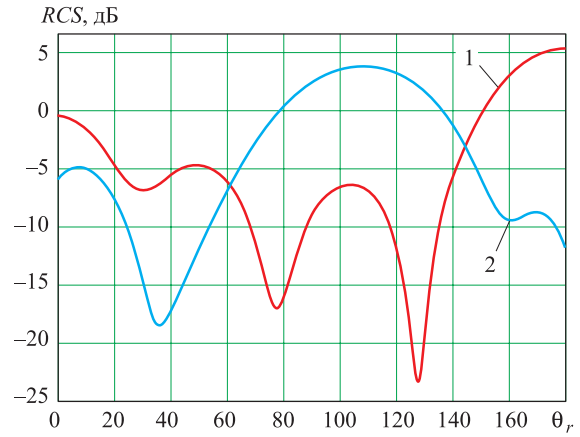


Рис. 20. Графики зависимостей радиационного сечения рассеяния углового отражателя от угла наблюдения θ_r для двух различных углов падения (обозначены $IncAngle$). Бистатическая геометрия, p -поляризация:
 1 – $IncAngle = 0$;
 2 – $IncAngle = 60^\circ$

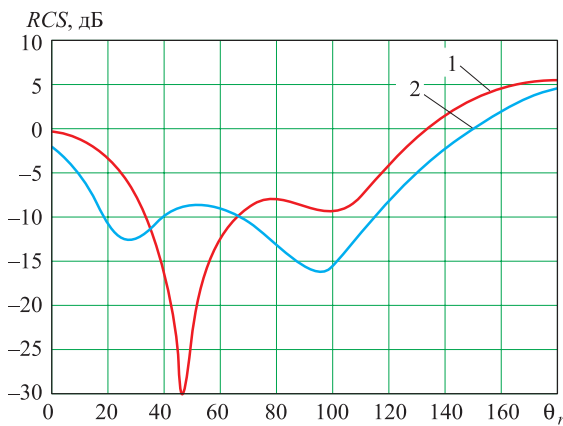


Рис. 19. Графики зависимостей радиационного сечения рассеяния углового отражателя от угла наблюдения θ_r для двух различных углов падения (обозначены $IncAngle$). Бистатическая геометрия, s -поляризация:
 1 – $IncAngle = 0$;
 2 – $IncAngle = 15^\circ$

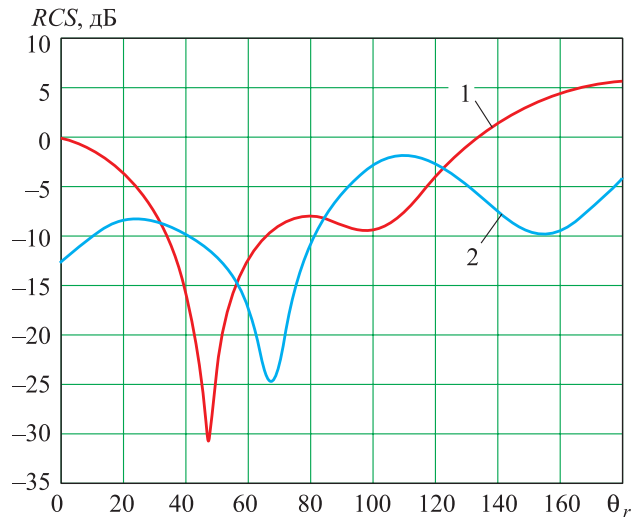


Рис. 21. Графики зависимостей радиационного сечения рассеяния углового отражателя от угла наблюдения θ_r для двух различных углов падения (обозначены $IncAngle$). Бистатическая геометрия, s -поляризация:
 1 – $IncAngle = 0$;
 2 – $IncAngle = 60^\circ$

ласти минимумов отражения расположены симметрично относительно второй диагонали, и отличаются они от аналогичных областей при p -поляризации тем, что занимают более узкие продолговатые участки. Следовательно, различия в топологиях рассеяния s - и p -поляризации дают важную информацию о характере отражателя.

На рис. 13 и 15 изображены поверхности сечения рассеяния в координатах θ, θ_r .

Рассмотрим рассеяние в бистатической схеме радиолокации для двух различных углов падения при изменении угла наблюдения θ_r от 0 до 180° . На рис. 16 приведены графики зависимости сечения рассеяния от угла при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 15^\circ$ для p -поляризации, а на рис. 17 – для s -поляризации. Видно, что если в первом случае для $\theta = 0$ минимум наблюдается в области $\theta_r \approx 127^\circ$, то во втором – в области $\theta_r \approx 45^\circ$.



Кроме того, на рис. 14 и рис. 18–21 заметны различия в картинах рассеяния при разных углах падения.

Такого рода зависимости могут быть использованы для распознавания ложных целей по специфике угловых зависимостей сечения рассеяния для различных поляризаций зондирующего излучения.

Вывод

Проведенный анализ позволит разработать стратегию обнаружения цели на фоне искусственного объекта с помощью управляемого изменения падающих и рассеянных углов (углов наблюдения) в соответствии с обнаруженным особенностями топологических портретов рассеивающих объектов. Стратегия, связанная с изменением углов θ и θ_r по правилу, соответствующему движению вдоль диагонали топологического портрета рассеяния из верхнего левого угла в нижний правый, позволяет идентифицировать в качестве рассеивающего объекта именно ракету. Согласно представленным данным, могут быть разработаны и другие стратегии поляризационной бистатической радиолокации.

Данная методика с успехом применима как в случае неподвижных, разнесенных друг от друга излучающей и приемной антенн РЛС (в этом случае топологический портрет рассеяния можно построить лишь в определенном диапазоне углов падения и рассеяния исключительно за счет собственного движения и маневрирования цели), так и – с еще большей эффективностью – в случае движущихся источников и/или приемников зондирующего излучения за счет чисто геометрически расширенных возможностей по анализу рассеянного излучения.

Список литературы

1. Гордеев А. Ю., Яцышен В. В. Радиолокация при наличии пассивных помех с помощью поляризованных электромагнитных волн и анализа рассеянного излучения // Вестник ВолГУ. 2012. Сер.10. Вып. 6. С. 65–67.

2. Гордеев А. Ю., Яцышен В. В. Перспективные методы повышения эффективности подавления пассивных помех системами селекции движущихся целей // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20, № 3. С. 40–52.

3. Doviak R. J., Weil C. M. Bistatic radar detection of the melting layer // Journal Appl. Meteor. 1972. No. 11. P. 1012–1016.

4. Doviak R. J., Goldhirsh J., Miller A. R. Bistatic radar detection of high-altitude clear-air atmospheric targets // Radio Sci. 1972. P. 993–1003.

5. Wurman J., Heckman S., Boccipio D. A bistatic multiple-doppler radar network // Journal Appl. Meteor. 1993. No. 32:12. P. 1802–1814.

6. Kulie M. S., Michael J. Hiley, Bennartz R., Kneifel S., Tanelli S. Triple-Frequency Radar Reflectivity Signatures of Snow: Observations and Comparisons with Theoretical Ice Particle Scattering Models // Journal Appl. Meteor. 2004. Vol. 43. No. 8. P. 1080–1098.

7. Battaglia A., Haynes J. M., L'Ecuyer T., Simmer C. Identifying multiple-scattering-affected profiles in CloudSat observations over the oceans // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. Iss. D8. DOI: 10.1029/2008JD009960.

8. Battaglia A., Tanelli S., Kollias P. Polarization Diversity for Millimeter Spaceborne Doppler Radars: An Answer for Observing Deep Convection // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2013. Vol. 30. No. 12. P. 2768–2787.

9. Gørsdorf U., Lehmann V., Bauer-Pfundstein M., Gerhard P., Vavriv D., Vinogradov V., Volkov V. A 35-GHz Polarimetric Doppler Radar for Long-Term Observations of Cloud Parameters – Description of System and Data Processing // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. Vol. 32. No. 4. P. 675–690. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00066.1>.

Поступила 08.02.16

Яцышен Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения ФГАУ ВПО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград.

Область научных интересов: исследование влияния эффектов неоднородности, нелинейности и пространственной дисперсии на электромагнитные свойства сред, исследование распространения и рассеяния электромагнитных волн в нелинейных средах, нелинейная радиолокация, математическое моделирование процессов в физике, методы квантово-механического расчета электромагнитных свойств материальных сред.



Гордеев Алексей Юрьевич – аспирант кафедры теоретической радиотехники и радиофизики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники», г. Москва.
Область научных интересов: программируемые сигнальные процессоры, радиофизика, радиотехнические системы, радиолокация, цифровая электроника, параллельные вычисления, цифровая обработка сигналов, системы искусственного интеллекта, численные методы и математическое моделирование.

Electrodynamic target selection techniques

We examine a new electrodynamic approach to target selection. The study shows that in the case of p-polarisation, a topological portrait of two types of angle reflectors is in a certain sense inverted in relation to that of the s-polarisation case, and consequently, evident polarisation dependence of angle reflector topological portraits may be traced.

Keywords: bistatic radiolocation, electrodynamic portrait, angle of incidence.

Yatsyshen Valeriy Vasilevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Forensic Expertise and Physical Materials Science, Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education “Volgograd State University”, Volgograd.

Research interests: studying effects of inhomogeneity, nonlinearity and spatial dispersion phenomena on electromagnetic properties of media, electromagnetic wave propagation and dissipation in non-linear media, non-linear radiolocation, mathematical modelling of physical processes, and quantum mechanics methods of computing electromagnetic properties of physical media.

Gordeev Aleksey Yuryevich – postgraduate student of the Department of Theoretical Radio Engineering and Radiophysics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow Technological University”, Moscow.

Research interests: programmable signal processors, radiophysics, radio engineering systems, radiolocation, digital electronics, parallel computing, digital signal processing, artificial intelligence systems, numerical methods and mathematical modelling.