УДК 621.396.96+621.391.821

В. В. Яцышен, А. Ю. Гордеев

Электродинамический метод в бистатической радиолокации – реальные и искусственные цели

Показано, что реальное средство воздушного нападения (гиперзвуковая боеголовка ракеты) и имитатор цели типа *MALD* в бистатической радиолокации дают существенно отличающиеся топологические картины рассеяния при учете поляризации излучения. Излучение с *p*-поляризацией позволяет получить более выразительную топологическую картину рассеяния, чем в случае *s*-поляризации, а изменение угла θ места – более яркой рельефной картины с чередованием максимумов и глубоких минимумов, что позволяет предполагать высокую разрешающую способность при идентификации объектов с использованием градиентного метода. Особое отличие двух объектов (имитатора цели и боеголовки ракеты) можно наблюдать в случае *s*-поляризации: картины существенно отличаются по топологии, у ракеты области максимумов занимают большую площадь, а минимумы значительно более глубокие.

Ключевые слова: бистатическая радиолокация, боеголовка ракеты, имитатор целей типа *MALD*.

Данная статья продолжает цикл публикаций [1–3], посвященных электродинамическим методам селекции и распознавания полезных и ложных целей при бистатической радиолокации. В работах [1, 2] были рассмотрены методики различия реальной и искусственной целей на основании исследования их портретов сечений рассеяния по всем азимутальным углам φ и углам θ места приемной и передающей антенн для двух типов поляризаций. В статье [3] аналогичная информация была представлена для градиентов (градиентных компонент) сечений рассеяния по азимутальным углам приемной и передающей антенн. На рис. 1 показана конфигурация радиолокационной системы и введены следующие величины:

β – угол, образованный зондирующим и отраженным от цели лучами;

Рис. 1. Геометрия бистатической радиолокационной системы:

1 – цель; 2 – приемник; 3 – передатчик

θ_R – угол места для приемной радиолокационной станции (РЛС);

θ_T – угол места для излучающей антенны;

r_1, r_2 – расстояния между излучающей антенной и зондируемым объектом и между этим объектом и приемной антенной соответственно;

L – расстояние между передающей и приемной антеннами.

Углы θ_R и θ_T отсчитываются от нормали к поверхности до линии, определяющей максимум диаграммы направленности приемной антенны.

Бистатической радиолокации посвящены работы [4–17], в них показано, что все неизвестные параметры r_1, r_2 и β могут быть легко найдены, если известны параметр θ_R или θ_T , а также время Δt запаздывания между прямым сигналом от зондирующей РЛС и отраженным сигналом от цели. Если известны все вышеуказанные параметры, то можно легко получить азимутальные углы φ_j облучения цели и рассеяния φ_r , которые можно найти из проекций угла β и сторон r_1 и r_2 соответствующего треугольника на рис. 1 на земную поверхность. Кроме того, значения φ_r и θ_R для приемной РЛС могут быть получены методом разностно-фазовой пеленгации.

В работе [3] показано, что для определения типа (или даже конкретного вида) цели необязательно знать его сечение рассеяния ($RCS - R$) или градиентного поля ($dR / d\varphi_{j,r}$) во всем диапазоне углов φ_j, φ_r и/или θ_R, θ_T .

Достаточно знать вышеуказанные параметры в некотором диапазоне углов (φ_j, φ_r) и/или (θ_R, θ_T), поскольку портреты сечений рассеяния или соответствующих градиентов для различных целей часто имеют ярко выраженные характерные особенности, различающие их, для одних и тех же значений этих углов. При этом крайне желательно, чтобы данные об *RCS* или соответствующих градиентов поступали непрерывно, для чего необходимо осуществлять зондирование непрерывным сигналом, т. е. передающая РЛС должна работать в режиме постоянного подсвета цели.

В данной статье рассмотрим случаи обнаружения и распознавания электродинамическими методами в бистатической радиолокации реального средства воздушного нападения, представляющего на сегодняшний день наибольшую угрозу, – гиперзвуковой боеголовки баллистических ракет [11–17] (рис. 2). Также исследуем случаи обнаружения и распознавания искусственной цели (имитатора целей типа *MALD* [4–10]), имеющей радиолокационную сигнатуру, близкую к сигнатуре истребителя (в том числе за счет имитации профиля полета истребителя), при 180° -рассеянии (0° -отражении), т. е. при классической радиолокации, и при этом создающей активные радиолокационные помехи в направлении его облучения (рис. 3).

Рис. 2. Гиперзвуковая боеголовка баллистической ракеты типа *WU-14*

Рис. 3. Имитатор цели типа *MALD-J*

Объекты этих двух типов сложны для обнаружения классическими РЛС еще и по следующим двум причинам. Помимо высокой скорости, оставляющей на обнаружение ничтожно малое время, и гиперзвуковых боеголовок ЭПР составляет, как и у обычных, примерно $0,01 \dots 0,02 \text{ м}^2$. Такая боеголовка может быть обнаружена, только когда это уже абсолютно бесполезно и нет времени на какую-либо реакцию. Будучи примененными в большом количестве в первой волне воздушной атаки противника и с включенными бортовыми средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), имитаторы типа *MALD* (здесь и далее имеем в виду его последнюю модификацию *MALD-J* [4, 6, 8, 10]) могут полностью «ослепить» классические РЛС, поскольку направление зондирования имитаторов классическими РЛС будет идентичным направлению постановки прицельных заградительных помех большой интенсивности. Кроме того, в это же самое время в направлении наземных РЛС традиционного вида также могут применяться средства РЭБ из других источников, например *EA-18G Growler*, или очень мощный авиационный комплекс дальней радиолокационной борьбы *EC-130H Compass Call*. Отметим, что имитаторы целей *MALD-J* не только имитируют сигнатуру истребителей поколения 4 и 4+, но и траекторию полета истребителей для ввода в заблуждение следящих классических РЛС [4–10].

Исходя из сказанного выше, наиболее эффективным, а в определенных случаях единственно возможным, средством обнаружения и распознавания гиперзвуковых боеголовков баллистических или тактических ракет, а также имитаторов целей типа *MALD-J*, является анализ их *RCS*-портретов в бистатической радиолокации. Рассмотрим подробнее портреты их сечений рассеяния для случаев различных поляризаций зондирующего излучения РЛС.

Для удобства обозначим *MALD* как объект 1, а боеголовку ракеты – как объект 2. При расчете азимутальный угол φ менялся в диапазоне $0^\circ \dots 180^\circ$, а угол θ места – $0^\circ \dots 180^\circ$, при этом другой угол оставался фиксированным и равным 45° .

Будем использовать следующие обозначения:

- φ_j – азимутальный угол падения;
- φ_r – азимутальный угол рассеяния;
- θ_T – угол места излучателя;
- θ_R – угол места приемника.

При анализе топографических портретов характерные точки будем обозначать в виде координат (tA, rA) , где под A будем понимать угол φ или θ . Тогда точку, отвечающую значениям $\varphi_j = 45^\circ$ и $\varphi_r = 50^\circ$ на соответствующем этому углу топографическом портрете будем обозначать как $(45, 50)$. Диапазон в виде области на топографическом портрете обозначим $[tA1, rA1; tA2, rA2]$, что соответствует области

$$tA1 \leq tA \leq tA2,$$

$$rA1 \leq rA \leq rA2.$$

Здесь tA – угол падения излучения на исследуемый объект;

rA – угол рассеяния.

Обозначение градуса ($^\circ$) при этом для простоты записи опустим, имея в виду, что все цифры в скобках даны в градусах.

Из топографического портрета рассеянного от объекта 1 излучения для случая p -поляризации (рис. 4) видим, что максимум рассеяния находится в диапазонах $[0, 50; 40, 60]$ и $[100, 180; 140, 180]$. Кроме этого, наблюдается минимум в узких полосках вблизи точек $(20, 20)$, $(20, 160)$.

Рис. 4. Радиационное сечение рассеяния *RCS* объекта 1, дБ. Бистатическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов φ_j, φ_r , град

Для случая s -поляризации (рис. 5) область максимумов рассеяния наблюдается вблизи краев картины, образуя при этом приблизительно кольцевую область. Картина максимумов более симметрична, и сечение рассеяния в целом имеет меньшие числовые значения, чем для p -поляризации. Отметим, что картина для азимутального угла φ достаточно плавная, без резких переходов максимум – минимум. Это связано с тем, что изменение угла φ вызывает меньшее изменение видимой площади объекта рассеяния, чем при изменении угла θ .

Рис. 5. Радиационное сечение рассеяния *RCS* объекта 1, дБ. Бистатическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов φ_j, φ_r , град

На рис. 6, 7 показаны портреты для меридиональных углов (углов места) рассеяния для объекта 1. Случаи s - и p -поляризации по

Рис. 6. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 1, дБ. Бистатистическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов θ_R, θ_T , град

Рис. 8. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 2, дБ. Бистатистическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов ϕ_j, ϕ_r , град

Рис. 7. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 1, дБ. Бистатистическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов θ_R, θ_T , град

Рис. 9. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 2, дБ. Бистатистическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов ϕ_j, ϕ_r , град

интенсивности рассеяния достаточно близки, однако картина дифракции для p -поляризации выглядит более рельефно. Обратим внимание на диагональ высоких значений интенсивности рассеяния, соединяющую точки (180, 0) и (0, 180), ее будем обозначать как (180, 0)–(0, 180).

Для объекта 2 топологические портреты показаны на рис. 8–11. Максимумы для азимутальных углов в случае p -поляризации находятся в окрестностях точек (50, 40), (130, 130), (20, 160) и (170, 20). В случае s -поляризации картина дифракции выглядит более симметричной относительно диагоналей (0, 0)–(180, 180) и (0, 180)–(180, 0).

Рис. 10. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 2, дБ. Бистатистическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов θ_R, θ_T , град

Рис. 11. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 2, дБ. Бистатистическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов θ_R, θ_T , град

При изменении угла θ_T места (см. рис. 10, 11) интенсивность рассеянного излучения от объекта 2 значительно превосходит по значениям интенсивности объекта 1 и объекта 2 при рассмотрении азимутального рассеяния. При этом, как и ранее для объекта 1, картина для p -поляризации более рельефна, а для s -поляризации несколько размыта. Для обеих поляризаций зондирующего излучения видна характерная полоса максимумов рассеяния вдоль диагонали $(180, 0) - (0, 180)$. Структура минимумов в случае p -поляризации более выражена, чем для s -поляризации. Видимо, это обусловлено тем, что p -поляризация оказывается более чувствительной к процессу рассеяния из-за того, что вектор напряженности электрического поля в этом случае содержит нормальную компоненту к границе раздела. На рис. 12–15 отражены трехмерные картины радиационного сечения рассеяния имитатора и ракеты для случаев изменения азимутальных углов для s - и p -поляризации.

Исходя из сказанного выше, можно заметить, что исследуемые объекты в бистатистической радиолокации позволяют получить существенно отличающиеся топологические картины рассеяния при учете поляризации излучения и том, что в рекламных сообщениях *MALD* представлен как объект, с помощью которого получается диаграмма рассеяния, близкая к реальным целям. При учете поляри-

Рис. 12. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 1, дБ. Бистатистическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов ϕ_j, ϕ_r , град. 3D-картина

Рис. 13. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 2, дБ. Бистатистическая геометрия, p -поляризация. Зависимость от углов ϕ_j, ϕ_r , град. 3D-картина

Рис. 14. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 1, дБ. Бистатистическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов ϕ_j, ϕ_r , град. 3D-картина

Рис. 15. Радиационное сечение рассеяния RCS объекта 2, дБ. Бистатистическая геометрия, s -поляризация. Зависимость от углов Φ_j , Φ_r , град. 3D-картина

зации и регистрации сигнала в бистатистической геометрии различия весьма ощутимы. Излучение с p -поляризацией дает более выразительную топологическую картину рассеяния, чем в случае s -поляризации.

Изменение угла θ места приводит к более яркой рельефной картине с чередованием максимумов и глубоких минимумов, что позволяет предполагать высокую разрешающую способность при идентификации объектов с использованием градиентного метода [3]. Особое отличие двух объектов – имитатора цели и боеголовки ракеты – можно наблюдать в случае s -поляризации: картины существенно разнятся по топологии, у ракеты области максимумов занимают большую площадь, а минимумы значительно более глубокие.

С учетом всего сказанного выше можно заключить, что предложенный электродинамический метод поляризационной бистатистической радиолокации позволяет достаточно надежно отличать реальную цель, в данном случае гиперзвуковую боеголовку, от имитатора реальной цели.

Список литературы

1. 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.

2. Яцышен В. В., Гордеев А. Ю. Электродинамические методы селекции целей // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2016. № 1. С. 61–68.

3. Яцышен В. В., Гордеев А. Ю. Электродинамические методы селекции целей – анализ градиентов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2016. № 3. С. 3–10.

4. ADM-160C MALD-J. USA: Raytheon, 2012. URL: http://www.deagel.com/Protection-Systems/ADM-160C-MALD-J_a000989002.aspx (дата обращения 23.11.2017).

5. Disrupting Enemy Air Defense Systems. URL: <http://www.raytheon.com/capabilities/products/mald> (дата обращения 23.11.2017).

6. Keller J., ed. Raytheon to build lot of MALD-J EW jammer drones in \$118.5 million Air Force contract // Military & Aerospace Electronics. June 30, 2016. URL: <http://www.militaryaerospace.com/articles/2016/06/ew-jammer-drones.html> (дата обращения 23.11.2017).

7. McCaney K. Air Force looks to upgrade its EW jammers // Defense Systems. July 15, 2016. URL: <https://defensesystems.com/articles/2016/07/15/air-force-raytheon-mald-j-jammer-upgrades.aspx> (дата обращения 23.11.2017).

8. Miniature Air Launched Decoy (MALD®) & Future Concepts // 48th Annual Targets, UAVs & Range Operations Symposium & Exhibition. October 20, 2010. URL: <https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2010/targets/Rutt.pdf> (дата обращения 23.11.2017).

9. Miniature Air Launched Decoy (MALD), including MALD-Jammer (MALD-J). URL: <https://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2008/dot-e/af/2008mald.pdf> (дата обращения 23.11.2017).

10. Raytheon, US Navy demonstrate new electronic attack architecture using MALD-J aerial jammer. IndyCar racing tech adapted to create “swappable” mission capabilities // Cision PR Newswire. September 9, 2015. URL: <http://www.prnewswire.com/news-releases/raytheon-us-navy-demonstrate-new-electronic-attack-architecture-using-mald-j-aerial-jammer-300136457.html> (дата обращения 23.11.2017).

11. Gady F.-S. China Tests New Hypersonic Weapon // The Diplomat. November 26, 2015.

URL: <http://thediplomat.com/2015/11/china-tests-new-hypersonic-weapon> (дата обращения 23.11.2017).

12. Карпенко А. В., ред. Гиперзвуковой аппарат WU-14 (Китай) // Невский бастион – Бастион. 26.02.2018. URL: <http://nevskii-bastion.ru/wu-14-china> (дата обращения 23.11.2017).

13. Weapons of Mass Destruction (WMD) DF-ZF (formerly WU-14), WU-14 Dong Feng-21D (DF-21D)/CSS-5 Mod 5. Anti-Ship Ballistic Missile (ASBM). URL: <https://www.globalsecurity.org/wmd/world/china/df-21d.htm> (дата обращения 23.11.2017).

14. Acton J. M. China's Advanced Weapons // Carnegie Endowment for International Peace. February 23, 2017. URL: <http://carnegieendowment.org/2017/02/23/china-s-advanced-weapons-pub-68095> (дата обращения 23.11.2017).

15. Advanced Hypersonic Weapon (AHW). URL: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/ahw.htm> (дата обращения 23.11.2017).

16. Perrett B., Sweetman B., Fabey M. U.S. Navy Sees Chinese HGV As Part Of Wider Threat. China demonstrates a hypersonic glider // Aviation Week & Space Technology. January 27, 2014. URL: <http://aviationweek.com/awin/us-navy-sees-chinese-hgv-part-wider-threat> (дата обращения 23.11.2017).

17. Acton J. M. Hypersonic Boost-Glide Weapons // Science & Global Security. 2015. No. 23. Pp.191–219. URL: <http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs23acton.pdf> (дата обращения 23.11.2017).

Поступила 20.11.17

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 method in bistatic radar – real and artificial targets

The research shows that the real aerial weapon, i.e. hypersonic missile warhead and the target simulator of the *MALD* type, in bistatic radar result in significantly different topological scattering patterns when taking into account the radiation polarization. Radiation with *p*-polarization allows for a more expressive topological scattering pattern than in the case of *s*-polarization, and the θ angle change of the place gives a brighter relief pattern with alternating maxima and deep minima, which leads to an assumption about a high resolving power when identifying the objects by means of the gradient method. A special difference between the two objects, i.e. the target simulator and the missile warhead, can be observed in the case of *s*-polarization: the patterns differ significantly in topology, the missile maxima regions occupy a larger area, while the minima are much deeper.

Keywords: bistatic radar, missile warhead, target simulator of the *MALD* type.

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.

Science 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, nonlinear 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.

Science 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.