УДК 621.396.41

А.В. Новиков, А.В. Христенко

Дальность действия радиолокационных сенсоров охранных систем

Рассмотрена методика расчета дальности действия радиолокационных сенсоров применительно к охранным системам. Показано, что при определенных условиях дальность действия имеет две грани: нижнюю, определяемую отраженным от подстилающей поверхности сигналом, и верхнюю, определяемую собственным шумом приемника. Получено соответствующее уравнение дальности, найдена область существования положительных корней и сделана оценка точности численного решения этого уравнения. Приведен пример расчета дальности действия радиолокационного сенсора MRS-1000.

Ключевые слова: уравнение дальности, дальность действия, радиолокационный сенсор, характеристика обнаружения, угловой отражатель, радиолокационный контраст, охранные системы.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-7-10

В настоящее время в связи с прогрессом техники прямого цифрового синтеза получили развитие радиолокационные системы охраны периметра, предназначенные для обнаружения, захвата и сопровождения подвижных целей [1–5]. Необходимость в таких системах возникает на потенциально опасных объектах, таких как аэропорты, объекты атомной и электроэнергетики, заводы хим. промышленности и т.п.

Первичным датчиком в охранных системах, как правило, является радиолокационный (РЛ) сенсор, выдающий координаты целей, причем для повышения информативности системы дополнительно комплектуются видеокамерами и тепловизорами, управление которыми ведется на основе информации от РЛ-сенсора.

РЛ-сенсор, как известно [6, 7], характеризуется дальностью действия (ДД), которая фактически определяется РЛ-контрастом γ между целью и помехой, под которой в данной работе будем понимать обратно рассеянный подстилающей поверхностью зондирующий сигнал, поступающий на вход приемника. В помеху включим и шум приемника.

РЛ-контраст, который определяется соотношением γ мощностей полезного сигнала и помехи, входит в *уравнение дальности*, которое имеет множество форм [7].

Уравнение дальности для свободного пространства записывается в виде

$$D^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \gamma P_{\text{п}}} \sigma_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{и}}$ – мощность излученного сигнала; G – коэффициент усиления приемопередающей антенны; λ – длина волны излученного сигнала; $\sigma_{\text{ц}}$ – эффективная поверхность обратного рассеяния цели (ЭПР); $P_{\text{п}}$ – мощность помехи.

Мощность помехи определяется суммой фоновой и шумовой компоненты

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ф}} + P_{\text{ш}}, \quad (2)$$

где индексом «ф» отмечена мощность фона, т.е. мощность сигнала, обратно рассеянного подстилающей поверхностью; индексом «ш» обозначена мощность шума приемника.

Будем считать, что цель – точечная, т.е. целиком лежит внутри элемента разрешения РЛ-сенсора.

Сценарий работы охранных систем предполагает достаточное возвышение сенсора над охраняемой областью (на десятки метров). В связи с этим уместно рассмотреть модель статистически изотропной и однородной шероховатой подстилающей поверхности. Тогда мощность фоновой составляющей будет определяться не только удельной ЭПР подстилающей поверхности, но и углом облучения, который в свою очередь зависит от высоты установки сенсора H и текущей дальности D (рис. 1) [8].

Рис. 1. Схема расположения РЛ-сенсора

Для вышеопределенной модели подстилающей поверхности зависимость ЭПР-элемента разрешения сенсора от высоты и дальности следующая [6. С. 209]:

$$\sigma_{\text{ф}}(D) \sim \Delta\theta_{\text{аз}} \Delta D \frac{H^2}{D}, \quad D > H. \quad (3)$$

Здесь $\Delta\theta_{\text{аз}}$ и ΔD – элемент разрешения сенсора по азимуту и дальности соответственно.

Модель (3) приводит к тому, что мощность сигнала, обратно рассеянного подстилающей поверхностью, убывает пропорционально пятой степени дальности (рис. 2, около 15 дБ/октаву)

$$P_{\text{ф}} \sim \sigma_{\text{ф}}(D) \frac{1}{D^4} \sim \frac{H^2}{D^5}. \quad (4)$$

Несмотря на то, что зависимость (3) известна, обзор показал, что анализ уравнения дальности (1) с учетом (2)–(4) отсутствует.

Так как мощность отраженного от точечной цели сигнала убывает с ростом дальности пропорционально четвертой степени, а мощность фоновой компоненты – пятой, то для достаточно больших дальностей фоном можно пренебречь, а РЛ-контраст

при этом будет определяться собственным шумом приемника (отношением сигнал/шум) и монотонно снижаться с ростом дальности.

Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма мощности обратнo рассеянного асфальтированным участком (300 м) сигнала. Сенсор MRS-1000 X-диапазона

С другой стороны, для достаточно малых дальностей можно пренебречь шумом приемника, а РЛ-контраст при этом будет определяться фоном и монотонно снижаться, что важно, с уменьшением дальности. Налицо наличие такой дальности, для которой РЛ-контраст достигает максимума $\gamma_{\max}$. Поэтому, задавая некоторый РЛ-контраст, определяемый вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, получим две дальности, если γ меньше $\gamma_{\max}$, или ни одной дальности, если γ превышает $\gamma_{\max}$. Если же $\gamma = \gamma_{\max}$, то получим единственную дальность, для которой обеспечивается требуемый РЛ-контраст. Две определенные таким образом дальности дают отрезок (зону действия РЛ-сенсора), на котором РЛ-контраст не хуже требуемого.

Определение дальности действия РЛ-сенсора

Запишем для некоторого контраста γ_1 уравнение дальности (1), принимая во внимание (2)–(4)

$$D_1^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \gamma_1 (P_{\Phi 1} + P_{\text{ш}})} \sigma_{\text{ц}}, \quad (5)$$

где $P_{\Phi 1} = K_1 / D_1^5$, K_1 – коэффициент пропорциональности между мощностью фона и дальностью D_1 .

Аналогично запишем уравнение (1) для некоторого контраста γ_2

$$D_2^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \gamma_2 (P_{\Phi 2} + P_{\text{ш}})} \sigma_{\text{ц}}. \quad (6)$$

Здесь $P_{\Phi 2} = K_2 / D_2^5$.

Считая, что коэффициенты пропорциональности K_1 и K_2 равны, разделим (5) на (6)

$$(D_1/D_2)^4 = \frac{\gamma_2 (D_1/D_2)^5 + (P_{\text{ш}}/P_{\Phi 1})}{\gamma_1 1 + (P_{\text{ш}}/P_{\Phi 1})}. \quad (7)$$

Введем следующую замену переменных:

$$x = \frac{D_1}{D_2}, \quad \varepsilon = \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\Phi 1}}, \quad q = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (8)$$

тогда отношение (7) может быть переписано в виде алгебраического уравнения пятой степени относительно переменной x

$$x^5 - q(1+\varepsilon)x^4 + \varepsilon = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) и является уравнением дальности для рассматриваемого случая статистически однородной и изотропной шероховатой подстилающей поверхности.

Коэффициент q показывает, во сколько раз отличаются два РЛ-контраста. Первый контраст – это некоторый опорный контраст, который может быть получен, например, в результате обмера тестовой цели над заданной подстилающей поверхностью, а второй – требуемая величина РЛ-контраста, определяемая заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.

Параметр ε определяет контраст шум–фон на некоторой опорной дальности D_1 , и может быть определен, например, в результате измерений.

Путем анализа первой и второй производных уравнения (9), показано, что для некоторого ε существует (рис. 3) критическая величина q

$$q_{\text{кр}}(\varepsilon) = \frac{5}{2(1+\varepsilon)} \sqrt[5]{\frac{\varepsilon}{8}}, \quad (10)$$

при этом уравнение (9) при $q < q_{\text{кр}}$ не имеет положительных корней; при $q = q_{\text{кр}}$ имеет единственный положительный корень

$$x_e = \frac{4}{5} q(1+\varepsilon), \quad (11)$$

а при $q > q_{\text{кр}}$ – два положительных корня, один меньше x_e , другой больше x_e .

Рис. 3. Граница существования положительных корней уравнения дальности (9). Точке экстремума соответствует $\varepsilon = 1/4$ (около -6 дБ)

Положительность отыскиваемых корней объясняется физическим смыслом переменной x в (8) – отношением дальностей.

Из рис. 3 следует, что если $q > 1$, то уравнение (9) при любых $\varepsilon > 0$ будет иметь два положительных корня.

Если $q < 1$, то для существования зоны действия РЛ-сенсора должна найтись такая дальность, для которой контраст шум–фон не хуже определенной величины $\varepsilon_{\text{кр}}$. Эта величина может быть определена, например, по рис. 3 или решением трансцендентного уравнения (10) относительно ε . Например, (10) может быть решено методом простой итерации [9] при заданной величине q

$$\varepsilon_{\text{кр}} \leftarrow 0,$$

$$\varepsilon_{\text{кр}} \leftarrow q^5 \frac{1}{5} \left(\frac{4}{5} \right)^4 (1 + \varepsilon_{\text{кр}})^5. \quad (12)$$

Формула (12) позволяет отыскать левый корень (на рис. 3 слева от экстремума $\varepsilon=1/4$). Это соответствует ситуации, когда уровень фона выше уровня шума, что естественно при корректном измерении уровня фона.

Уравнение (9) решается численно методом простой итерации [9], после чего по (8) вычисляются две дальности, определяющие зону действия сенсора.

Показано, что начальные значения корней для метода простой итерации могут быть следующими:

$$x_1 \approx q(1+\varepsilon), \quad x_2 \approx \sqrt[4]{\varepsilon/q(1+\varepsilon)}, \quad (13)$$

при этом итерации должны быть выполнены по следующему алгоритму:

$$x_1 \leftarrow q(1+\varepsilon) - (\varepsilon/x_1^4), \quad (14)$$

$$x_2 \leftarrow \sqrt[4]{(x_2^5 + \varepsilon)/q(1+\varepsilon)}. \quad (15)$$

Показано, что если для (14) взять 50 итераций, а для (15) – 250, то относительная ошибка расчета корней не превысит 10^{-5} , при этом максимум ошибки соответствует приближению коэффициента ε к критическому $\varepsilon_{кр}$ слева.

Пример расчета дальности действия РЛ-сенсора MRS-1000

На основании результатов эксперимента, заключающегося в обмере углового отражателя (углока) и человека на фоне некоторой подстилающей поверхности, по предложенной методике сделана оценка ДД-сенсора MRS-1000 [10, 11] (таблица).

Результат расчета ДД РЛ-сенсора MRS-1000
X-диапазона

Тип цели, ее ЭПР	Расчетная зона действия, м
Человек, 0,8 м ²	1000...2500
Уголок, 10 м ²	50...6800

Вероятность правильного обнаружения – 0,8; вероятность ложной тревоги – 0,01; высота установки сенсора – 25 м; дальность D_1 до измеряемых целей – 900 м.

Требуемое отношение сигнал/помеха рассчитывалось на основании [12–15]. При этом для цели типа «человек» использовалась модель сигнала со случайной начальной фазой и случайной амплитудой, распределенной по закону Рэлея. Для цели типа «уголок» использовалась модель сигнала со случайной начальной фазой и постоянной амплитудой.

Для цели типа «уголок» граница зоны действия, обусловленная фоном, равна 50 м (см. таблицу). Известно, что в ближней зоне антенны не работает закон четвертой степени дальности [16]. Для рассматриваемого сенсора граница ближней зоны равна 150 м, поэтому расчетную границу ДД сенсора 50 м следует скорректировать к 150 м. Учет ближней зоны антенны выходит за рамки данной работы, равно как и учет зоны действия формулы Введенского, когда в уравнении (1) вместо четвертой появляется восьмая степень дальности.

Выводы

Показано, что РЛ-сенсор охранной системы, возвышающийся над статистически изотропной и

однородной шероховатой поверхностью, имеет зону действия, нижняя граница которой определяется уровнем обратно рассеянного подстилающей поверхностью сигнала, а верхняя – уровнем собственного шума приемника.

Таким образом, при высотах расположения РЛ-сенсора, сравнимых с размерами (по дальности) зондируемой области подстилающей поверхности, не всегда близкое расположение цели обуславливает более надежное ее обнаружение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ, соглашение 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57717X0279.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущему научно-му сотруднику НИИ РТС ТУСУРа В.А. Хлусову за сделанные замечания и предложения, а также инженерам АО НПФ «Микран», в частности В.С. Малофиенко и А.С. Бондину, за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

Литература

1. Wide-area Surveillance. Navtech Radar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://navtechradar.com/features/wide-area-surveillance/>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
2. Kelvin Hughes Security Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kelvinhughes.com/security>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
3. Honeywell Integrated Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellintegrated.com/products/integrated-security/video/>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
4. White K. Radar sensor management for detection and tracking / K. White, J. Williams, P. Hoffensetz // Information Fusion 2008 11th International Conference on. – 2008. – P. 660–667.
5. Hennin S. Integrated Perimeter Security System / S. Hennin, G. Germana, L. Garcia // IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. – 2007. – P. 70–75.
6. Радиотехнические системы: учеб. для вузов / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
7. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника (Нью-Йорк, 1970); пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова: в 4 т. – Т. 1: Основы радиолокации / под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
8. Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution – L-Band VV Polarisation Perspective [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/7ea5/f8cc618e36c72b3dc344e9c1a02bed6b0e98.pdf>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).
9. Бахвалов Н.С. Численные методы: учеб. пособие для студентов физико-математ. специальностей вузов / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – 4-е изд. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2006. – 636 с.
10. Доценко В.В. Повышение энергетического потенциала РЛС с непрерывным ЛЧМ-сигналом / В.В. Доценко, М.В. Осипов, В.А. Хлусов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 1(23). – С. 29–33.
11. Доценко В.В. Разработки аппаратуры радиолокации, приборостроения и электронной компонентной базы СВЧ: основные результаты выполнения комплексных про-

ектов НИИ систем электрической связи и АО «НПФ «Микран» / В.В. Доценко, Н.Д. Малютин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 79–85.

12. Computation of Rice and Noncentral Chi-Squared Probabilities. Technical Report PHS0254 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.phaselockedsystems.com/NoncentralChiSquared.pdf>, свободный (дата обращения: 24.01.2019).

13. Bocus M.Z. An Approximation of the First Order Marcum Q-Function with Application to Network Connectivity Analysis / M.Z. Bocus, C.P. Dettmann, J.P. Coon // IEEE Communications Letters. – 2013. – Vol. 17, № 3. – P. 499–502.

14. Andras Sz. The generalized Marcum Q-function: an orthogonal polynomial approach / Sz. Andras, A. Baricz, Y. Sun // Acta Univ. Sapientiae Math. – 2011. – Vol. 3, No 1. – P. 60–76.

15. Gil A. The Asymptotic and Numerical Inversion of the Marcum Q-Function / A. Gil, J. Segura, N.M. Temme // Stud. Appl. Math. – 2011. – Vol. 133, No 2. – P. 257–278.

16. Оценка границы дальней зоны линейной антенной решетки / В.И. Замятин, А.Ф. Шевченко // Системы обработки информации. – 2006. – № 1(50). – С. 55–64.

Новиков Анатолий Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-155-96-99
Эл. почта: anatolii.v.novikov@tusur.ru

Христенко Алексей Викторович

Инженер АО «НПФ «Микран»
Вершинина ул., 47, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-906-949-66-73
Эл. почта: hristenko@micran.ru

Novikov A.V., Khristenko A.V.

Radar range applied to guard surveillance systems

A method to calculate the range of the radar sensor for security systems is considered. It is shown that in certain situations the range has two bounds: the lower, determined by signal backscattered by an underlying surface, and the upper, determined by the receiver noise. An appropriate 5th degree range equation is obtained and the area of existence of positive roots is found. An example of the radar range calculating is given.

Keywords: range equation, radar range, radar systems, detection and false-alarm probabilities, corner reflector, signal-to-noise ratio, signal-to-clutter ratio, guard surveillance system.

doi: 10.1293/1818-0442-2019-22-1-7-10

References

1. Wide-area Surveillance. Navtech Radar. Available at: <https://navtechradar.com/features/wide-area-surveillance/> (accessed: January 24, 2019).
2. Kelvin Hughes Security Systems. Available at: <https://www.kelvinhughes.com/security> (accessed: January 24, 2019).
3. Honeywell Integrated Security. Available at: <https://www.honeywellintegrated.com/products/integrated-security/video/> (accessed: January 24, 2019).

4. White K, Williams J, Hoffensetz P. Radar sensor management for detection and tracking. *Information Fusion 2008 11th International Conference on*, 2008, pp. 660–667.

5. Hennin S, Germana G, Garcia L. Integrated Perimeter Security System. *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, 2007, pp. 70–75.

6. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskii Yu.A., Ul'anitskii Yu.D. *Radiotekhnicheskiye sistemi* [Radio Systems]. Moscow, High School Publ., 1990, 496 p.

7. Skolnik M. *Spravochnik po radiolokatsii* [Radar Handbook], New York, M., Sov. Radio Publ., 1976, 456 p.

8. Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution – L-Band VV Polarisation Perspective. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/7ea5/f8cc618e36c72b3dc344e9c1a02bed6b0e98.pdf>, (accessed: January 24, 2019).

9. Bachvalov N.S., Gidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennye metody* [Numerical Methods], Moscow, Binom Publ., 2006, 636 p.

10. Docenko V.V., Osipov M.V., Hlusov V.A. *Povyshenie ehnergeticheskogo potentsiala RLS s nepreryvnym LCHM-signalom* [An Increase CW-LFM Radar Capacity], Proceedings of TUSUR University, 2011, no 1(23), pp. 29–33.

11. Docenko V.V., Malyutin N.D. *Razrabotki apparatury radiolokatsii, priborostroeniya i ehlektronnoy komponentnoy bazy SVCH: osnovnye rezul'taty vypolneniya kompleksnykh projektov NII Sistem ehlektricheskoy svyazi i AO «NPF «Mikran»* [Development of radar equipment, instrument-making and electronic component base of microwave: the main results of the implementation of complex projects of the Research Institute of Telecommunications Systems and «Micran» company], Proceedings of TUSUR University, 2017, no 3(20), pp. 79–85.

12. Computation of Rice and Noncentral Chi-Squared Probabilities. Technical Report PHS0254. Available at: <http://www.phaselockedsystems.com/NoncentralChiSquared.pdf>, (accessed: January 24, 2019).

13. Bocus M.Z., Dettmann C.P. An Approximation of the First Order Marcum Q-Function with Application to Network Connectivity Analysis. *IEEE Communications Letters*, 2013, vol. 17, no 3, pp. 499–502.

14. Andras Sz., Baricz A., Sun Y. The generalized Marcum Q-function: an orthogonal polynomial approach. *Acta Univ. Sapientiae Math*, 2011, vol. 3, no 1, pp. 60–76.

15. Gil A., Segura J., Temme N.M. The Asymptotic and Numerical Inversion of the Marcum Q-Function. *Stud. Appl. Math*, 2011, vol. 133, no 2, pp. 257–278.

16. Zamyatin V.I., Shevchenko A.F. *Ocenka granitsy dal'nei zoni lineynoy antennoj reshetki* [A Far Field Region of the Linear Array Estimation]. Information Processing Systems, 2006, no 1(50), pp. 55–64.

Anatolii V. Novikov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-155-96-99
Email: anatolii.v.novikov@tusur.ru

Alexey V. Khristenko

Engineer, Department of Radar Systems, Micran 47, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7-906-949-66-73
Email: hristenko@micran.ru