

УДК 621.396

ОЦЕНКА РАДИОВИДИМОСТИ НИЗКОЛЕТАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Фитасов Евгений Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

E-mail: fitasoves@mail.ru.

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Аннотация: Известно, что при работе радиолокационной системы по низколетящим воздушным объектам значительное экранирующее действие оказывает рельеф местности и местные предметы, что приводит к уменьшению дальности действия локатора. При этом можно считать, что максимальная дальность обнаружения низколетящих воздушных объектов РЛС коротковолнового диапазона волн (X , S и коротковолновой части L длин волн) равна дальности радиовидимости цели. Предлагается метод оценки зон радиовидимости низколетящих воздушных объектов с учётом экранирующего воздействия рельефа местности. С помощью разработанной математической модели определены законы распределения дальности прямой радиовидимости низколетящих воздушных объектов. Приведены зависимости вероятности радиовидимости низколетящих воздушных объектов целей от дальности для различных высот подъёма фазового центра антенны. Показано, что подъём фазового центра антенны на высоту до 15 м позволяет увеличить дальность обнаружения воздушного объекта летящего на предельно малых высотах для типа местности «гладкая равнина» и «слегка холмистая равнина» в среднем в 2...2,5 раза.

Ключевые слова: радиовидимость, радиолокационные цели, низколетящие цели, рельеф, плотность вероятности, фазовый центр антенны.

Введение

Одной из основных задач, определяющих развитие радиолокационных средств, является обеспечение обнаружения воздушных целей на малых и предельно малых высотах [1-3]. При работе радиолокационной системы (РЛС) по низколетящим воздушным целям (НЛЦ) значительное экранирующее действие оказывает рельеф местности и местные предметы, что приводит к уменьшению дальности действия локатора. Проведение оценок эффективности работы РЛС по маловысотным целям требует учёта экранирующего действия местности, при этом можно считать, что максимальная дальность обнаружения НЛЦ РЛС коротковолнового диапазона волн (X , S и коротковолновой части L длин волн) равна дальности радиовидимости цели [11].

Традиционно дальность обнаружения НЛЦ определяют с учетом углов закрытия, измеренных непосредственно на позиции РЛС (при помощи буссоли или теодолита) или рассчитанных с использованием данных топографической обработки карты. При этом, набор достаточной статистики позволяет получить закон распределения углов закрытия и его числовые характеристики. Однако, использование

этих характеристик в математических моделях может приводить к ошибкам вследствие неоднозначной связи угла закрытия с высотой экранирующего НЛЦ препятствия и дальностью до него. Из рис. 1 видно, что при одном и том же угле закрытия, формируемом препятствиями, расположенными на различных дальностях, дальности обнаружения НЛЦ с одинаковой высотой полёта могут существенно отличаться. Более корректно при оценке дальности обнаружения НЛЦ использовать зависимости вероятности радиовидимости цели от дальности при условии, что они получены на основании достаточно большой статистики, учитывают особенности рельефа местности (рельефа и местных предметов), высоту и траектории полёта цели, высоту подъёма антенны РЛС. При этом, более общая модель, очевидно, предполагает учёт особенностей распространения переотражённых радиолокационных сигналов [4,5].

Основной целью данной работы является получение зависимостей вероятности радиовидимости НЛЦ от дальности для различных рельефов и типов местностей. Характеристики указанных рельефов и типов местности [6] представлены в таблице 1.

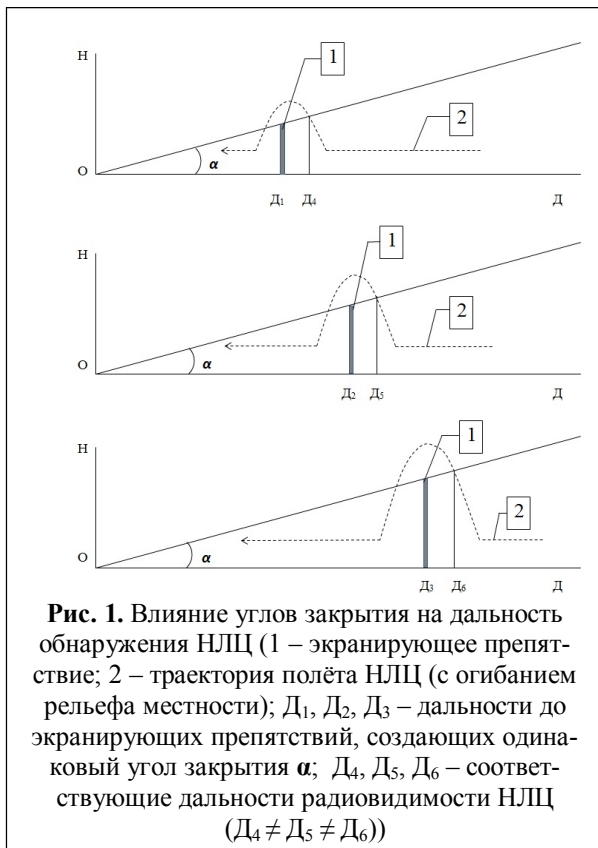


Таблица 1.

Тип местности	СКО высоты неровностей подстилающей поверхности от плоскости, σ [м]
гладкая равнина	5–20
слегка холмистая равнина	20–40
холмистая равнина	40–80
холмы	80–150
горы	150–300

Исследования показывают [7], что для различных типов неровных поверхностей их среднеквадратичный наклон равен $\delta/L = 0,02 - 0,2$, где L – интервал корреляции рельефа в горизонтальной плоскости.

При моделировании принято, что высоты рельефа местности представляют собой изотропное нормальное случайное поле с функцией корреляции вида:

$$\rho(\tau) = \exp(-\alpha^{-1}\tau), \quad (1)$$

где α – интервал корреляции [8].

При этом плотность распределения многомерного случайного вектора H высот рельефа местности записывается [9] в виде (2):

$$p(H) = (2\pi)^{-N/2} (\det A_N)^{-1} \sigma_p^{-N} \times \exp[-1/2 \sigma_p^2 (H^T - B^T) A_N^{-1} (H - B)], \quad (2)$$

где σ_p – СКО высот рельефа местности, определяемое выбранным рельефом местности; B – вектор математического ожидания высот рельефа местности, изменяющихся за счёт кривизны Земли, элементы которого равны (3):

$$B_i = \frac{(i-1)^2 \Delta d^2}{2R_3} = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где R_3 – эквивалентный радиус Земли с учётом рефракции ($R_3 = 8500$ км), A_N представляет собой ковариационную матрицу вектора H (4):

$$A_N = \begin{pmatrix} 1 & p_{1,2} & p_{1,3} & \dots & p_{1,N} \\ p_{2,1} & 1 & p_{2,3} & \dots & p_{2,N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ p_{N,1} & p_{N,2} & p_{N,3} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $p_{i,j}$ – ковариационный коэффициент высот рельефа местности в точках i и j . Вследствие однородности случайного поля рельефа местности $p_{i,j}$ зависит от разницы $|i, j|$:

$$p_{i,j} = p_{|i,j|} \quad (5)$$

Т.е. матрица является трёхдиагональной. Таким образом с учетом ковариационной функции матрица A_N записывается в виде (6):

$$A_N = \begin{pmatrix} 1 & p & p^2 & \dots & p^{N-1} \\ p & 1 & p & \dots & p^{N-2} \\ p^2 & p & 1 & \dots & p^{N-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p^{N-1} & p^{N-2} & p^{N-3} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

Вычисление высот рельефа местности проводится в модели последовательно, начиная с H_1 и заканчивая H_N . При этом текущее значение H_i рассчитывается, как случайная нормальная величина с параметрами, исходя из распределения (2), равными (7):

$$m(H_i) = B_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{C_{ji}^i}{C_{ii}^i} (H_j - B_j), \quad \sigma = \frac{1}{C_{ii}^i}. \quad (7)$$

Здесь через C_{ii}^i обозначены элементы последнего столбца матрицы C_i , обратной к ковариационной матрице A_i , равной (8):

$$A_i = \begin{pmatrix} 1 & p & p^2 & \dots & p^{i-1} \\ p & 1 & p & \dots & p^{i-2} \\ p^2 & p & 1 & \dots & p^{i-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p^{i-1} & p^{i-2} & p^{i-3} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Определить элементы C_{ii}^i можно, используя известные положения матричного исчисления. Так:

$$C_{ii}^i = \frac{(A_i)_{ii}}{\det A_i}, \quad (9)$$

где $(A_i)_{ii}$ – алгебраическое дополнение к элементу a_{ii} матрицы A_i .

Далее применение разложения определителя по минорам

$$\det(A_i) = \sum_{l=1}^i \alpha_{li} (A_i)_{li} \quad (10)$$

позволяет судить, что

$$(A_i)_{li} = 0 \text{ при } i = 1, 2, \dots, i-2, \quad (11)$$

Т.к. в этом случае две последние строки соответствующих миноров зависимы, а

$$\begin{aligned} (A_i)_{i-1,i} &= -\rho \det(A_{i-1}), \\ (A_i)_{i,i} &= -\det(A_{i-1}). \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, подставив соотношения (11) и (12) в выражение (10), получаем:

$$\begin{aligned} \det(A_i) &= -\rho^2 \det(A_{i-1}) + \det(A_{i-1}) = \\ &= (1 - \rho^2) \det(A_{i-1}). \end{aligned}$$

И элементы обратной матрицы запишутся в виде:

$$\begin{aligned} C_{1,i}^i &= 0, \\ C_{i-1,i}^i &= -\frac{\rho}{1 - \rho^2}, \quad i = 1, 2, \dots, i-2, \\ C_{i,i}^i &= \frac{\rho}{1 - \rho^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

А параметры (2) переписываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m(H_i) &= \rho H_{i-1} - \frac{(i-1)^2 \Delta D^2}{2R_3}, \\ \sigma &= \frac{\sigma_p^2}{1 - \rho^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Это означает, что в вычислении H_i участвует лишь предыдущий элемент H_{i-1} , что значительно упрощает расчёты.

В результате совместное использование соотношений (14) и (1) позволяет построить одномерную реализацию нормального случайного поля рельефа местности с ковариационной функцией вида (1).

Таким образом, полученный в реализации набор высот H_1, H_2, \dots, H_N рельефа совместно с величинами H_0 и D_0 составляют дискретное описание рельефа местности.

Исходными данными для расчёта являются СКО рельефа местности σ_p , характерного интервала корреляции α и уровня дискретизации по дальности ΔD . Численные значения σ_p и α определяются выбранным типом рельефа местности, а ΔD – необходимой точностью расчёта зон прямой радиовидимости. Предварительные расчёты при постепенно убывающих величинах ΔD – 5000м, 2000м, 1000м, 500м, 250м показали, что изменение вероятности видимости целей при $\Delta D = 1000$ м и $\Delta D = 500$ м не превосходит 0,05, что было принято допустимым. Поэтому в модели значение дискрета дальности задано равным 1000

м. Над сформированным таким образом рельефом местности осуществляется «протяжка» цели на заданной высоте полета $H_{ц}$, причём, предполагается, что цель полностью огибает рельеф. Исходя из этого, высота полученной трассы цели в каждой дискретной точке по дальности составляет

$$H_{цi} = H_i + H_{ц}. \quad (15)$$

РЛС располагается в первой точке рельефа, а высота нахождения фазового центра её антенны определяется в виде

$$H_{Ai} = H_A + H_1, \quad (16)$$

где H_A – высота подъема антенны в РЛС.

Расчет углов закрытия, создаваемых K -й точкой рельефа местности, производится по формулам

$$\alpha_k = \arctg \frac{H_k - H_{A,1}}{\Delta D(K-1)}. \quad (17)$$

Аналогично определяются углы места цели, которые равны

$$\beta_k = \arctg \frac{H_k - H_{A,1}}{\Delta D(K-1)}. \quad (18)$$

Полученные по формулам массивы являются исходными данными для расчёта зон радиовидимости целей при заданных рельефах местности и различных высот подъема антенны и полета НЛЦ.

С помощью разработанной математической модели были получены законы распределения дальности прямой радиовидимости НЛЦ. Для удобства использования полученных зависимостей осуществлена их аппроксимация в виде неполной Гамма-функции:

$$P(D) = \int_0^D \frac{1}{\Gamma(\alpha) - \beta^\alpha} * x^{\alpha-1} * \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) dx,$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма функция; α, β – параметры аппроксимации [10].

На рис. 2-3, в качестве примера приведены зависимости вероятности радиовидимости НЛЦ от дальности для типа местности «слегка холмистая равнина» ($\sigma = 30$ м). Высота подъема фазового центра антенны 5 м (рис. 2) и 15 м (рис. 3), высоты полёта целей 25 м, 50 м, 100 м, 150 м, 300 м и 500 м.

Таким образом, проведённые исследования показали:

1) подъем фазового центра антенны на высоту до 15 м позволяет увеличить дальность обнаружения воздушного объекта:

– летящего на предельно малых высотах 25–100 м для типа местности «гладкая равни-

на» и «слегка холмистая равнина» в среднем в 2...2,5 раза;

– летящего на малых высотах 150–500 м для типа местности «гладкая равнина» и «слегка холмистая равнина» в среднем в 1,5 раза;

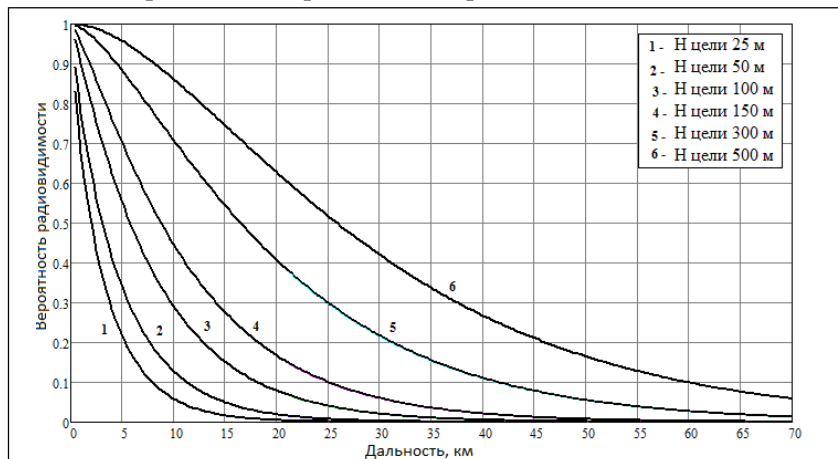


Рис. 2. Зависимость вероятности радиовидимости целей от дальности для типа местности «слегка холмистая равнина», высота фазового центра антенны 5 м

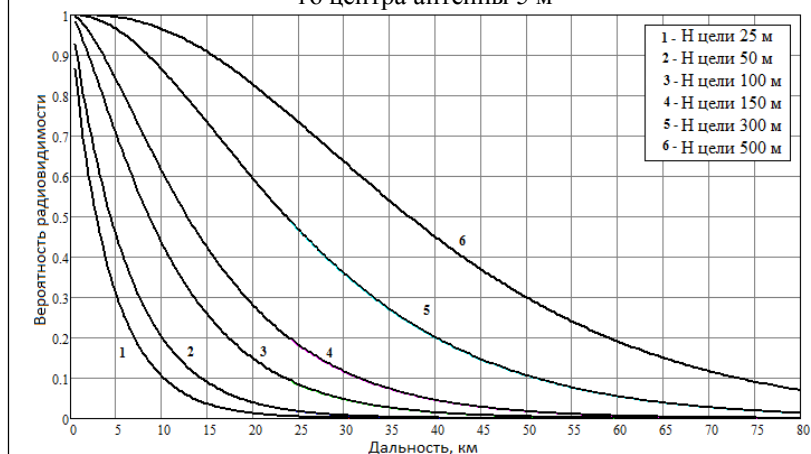


Рис. 3. Зависимость вероятности радиовидимости целей от дальности для типа местности «слегка холмистая равнина», высота подъема фазового центра антенны 15 м

– летящего на малых высотах 150–500 м для типа местности «холмистая равнина» – в 1,3...1,5 раза.

2) Подъем фазового центра практически не даёт прироста дальности обнаружения воздушного объекта летящего на предельно малых высотах 25–100 м для типа местности «холмистая равнина», а также для местности типа «холмы» – «горы».

Литература

1. Сизов Ю.Г., Скоков А.Л. О радиолокационном поле ПВО // Вооружение, политика, конверсия. - № 1. - 2005.

2. Алексеев Д.Ю., Гвоздев А.Б. Состояние и перспективы развития радиолокационного вооружения ПВО СВ // Вооружение, политика, конверсия. - № 4. – 2012.

3. Фитасов Е.С., Козлов С.А. К вопросу повышения качества информационного обеспечения малогабаритных РЛС обнаружения низколетающих целей// XV Всероссийская научно-практическая конференция 2-3 октября 2014 года «Проблемы развития и применения средств противовоздушной обороны на современном этапе. Средства противовоздушной обороны России и других стран мира, сравнительный анализ», сборник докладов. – Ярославль. - 2014. - С.145-152.

4. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.А. Гауссовская модель многолучевого канала связи в городских условиях// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2004. - № 1. – С. 127-137.

5. Душко И.В., Ивлев Д.Н., Односвцев В.А. Метод разделения лучей в многолучевом радиоканале // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. - № 5-3. – С. 237-241.

6. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У.К. Джейкса. – М.: Связь. - 1979. 520 с.

7. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. – М.: Сов.радио. - 1976. 392 с.

8. Абаулин В.И. Внешнее проектирование танкового и противотанкового вооружения. - М.: Дом техники. – 1967. 326с.

9. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. – М.: Радио и связь. - 1986. 448 с.

10. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. - М.: Джангар, Большая Медведица. - 2001. 864 с.

11. Фитасов Е.С., Односвцев В.А., Душко И.В., Ивлев Д.А. К вопросу моделирования канала распространения радиолокационных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, - 2016, №3, - С.48-55.

Поступила 26 декабря 2016 г.

English

Radio visibility evaluation of low-flying airborne objects with regard to the terrain profile screening effect

Evgeny Sergeevich Fitasov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Radio Engineering Department Lobachevsky National Research State University of Nizhni Novgorod.

E-mail: fitasoves@mail.ru.

Address: 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

Abstract: When radar station (RS) is tracking low-flying airborne objects and targets (LFT) the terrain profile and details produce a significant screening effect that results in reducing radar operating range. The radar operating efficiency evaluation in regard to low-altitude targets requires consideration of the terrain screening effect and herewith it can be assumed that the LFT maximum detection range by RS of short-wave wave band (X, S, and short-wave part of L wavelengths) is equal to target radio visibility range. Traditionally LFT detection range is defined in view of the cut-off angles measured directly in RS position (via a boussole or theodolite) or calculated by using topographical map processing data. At the same time, sufficient statistics set enables to obtain the distribution law of cut-off angles and its numerical characteristics. However, using these characteristics in mathematical models can lead to errors due to ambiguous connection of cut-off angle with height of the LFT screening obstacle and the distance to it. It is more properly to use dependences of radio visibility probability on the target range when evaluating LFT detection range provided that they are obtained on the basis of rather large-scale statistics and that they take into account the terrain profile (terrain profile and details), target height and flight path, height of raising of the RS antenna elevation. The main objective of this work is to obtain dependences of LFT radio visibility probability on range for different terrain profiles and types of areas: "the smooth plain", "slightly hilly plain", "the hilly plain", "hills" and "mountains". Distribution laws of LFT direct radio visibility range were obtained via the developed mathematical model. Their approximation in the form of incomplete Gamma function is carried out for the ease of use of the obtained dependences. The analysis of the obtained dependences enables to draw the following main conclusions: the elevation of the antenna phase center up to 15 m height enables to increase detection range of the airborne object flying at very low altitudes for the area type "the smooth plain" and "slightly hilly plain" on the average in 2 ... 2.5 times. At the same time the elevation of the antenna phase center practically does not give a gain of detection range of the airborne object flying at very low altitudes for the area type "the hilly plain" and also for the area like "hills" and "mountains".

Key words: radio visibility, radar targets, low-flying targets, terrain profile, probability density, the antenna phase center.

References

1. Sizov Yu.G., Skokov A.L. On the antiaircraft defense radar field//Arms, policy, conversion. - No. 1. - 2005.
2. Alekseev D.Yu., Gvozdev A.B. Current state and development trends of radar arms of the Army antiaircraft defense. - Arms, policy, conversion. - No. 4. - 2012.
3. Fitasov E.S., Kozlov S. A. On the question of the data support quality improvement for small-size radar stations of low-flying targets detection. - the XV All-Russian scientific and practical conference on October 2-3, 2014 "Problems of development and usage of antiaircraft defense nowadays. Antiaircraft facilities of Russia and other countries in the world, comparative analysis", book of reports. - Yaroslavl. - 2014. – P. 145-152.
4. Yermolaev V.T., Flaksman A.G., Averin I.A. Gaussian model of the multibeam communication channel in an urban environment. - the Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. - 2004. - No. 1. – P. 127-137.
5. Dushko, I.V. Beam splitting method in a multibeam radio channel. - I.V. Dushko, D. N. Ivlev, V.A. Odnosevtsev. - the Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. - 2011. - No. 5-3. – P. 237-241.
6. Microwave mobile communications/ Ed. by W.C. Jakes. - M, Svyaz - 1979. 520p.
7. Barton D., Ward H. Handbook of Radar Measurement. - M, Sov.Radio. - 1976. 392p.
8. Abaulin V. I. External design of tank and anti-tank armament. - M, Dom tekhniki. - 1967. 326p.
9. Monzingo R. A., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. - M, Radio i svyaz.-1986. 448 p.
10. Vygodsky M. Ya. Higher mathematics reference book. - M, Dzhangar, Bolshaya Medveditsa. - 2001. 864 p.
11. Fitasov E.S., Odnosevtsev V.A., Dushko I.V., Ivlev D.A. On the question of modeling the distribution channel of radar signals. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy, - 2016, No. 3, - P. 48-55