

## **Математическое обеспечение системы оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом множителя ослабления**

А.В. Леньшин<sup>1</sup>, Е.В. Кравцов<sup>1</sup>, И.А. Сидоренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а  
E-mail: [andrey-lenshin@yandex.ru](mailto:andrey-lenshin@yandex.ru)

*Разработан математический аппарат оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом множителя ослабления, которая основана на применении в качестве показателя оценки функциональной зависимости вероятности обнаружения объекта от угла зондирования и дальности разведки.*

## **Mathematical support for the system of operational assessment of the capabilities of radar species reconnaissance, taking into account the attenuation multiplier**

A. V. Lenshin<sup>1</sup>, E. V. Kravtsov<sup>1</sup>, I. A. Sidorenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Voronezh)

*A mathematical apparatus has been developed for the operational assessment of the capabilities of radar specific reconnaissance, taking into account the attenuation multiplier, which is based on the use as an indicator of the functional dependence of the probability of detecting an object on the sensing angle and the reconnaissance range.*

### **Введение**

В современных условиях достоверную информацию о местонахождении и составе войск противника, его экономическом потенциале получают за счет активного использования воздушных и космических средств радиолокационной разведки. Среди перечисленных средств космические РЛС занимают особое место благодаря ряду принципиальных преимуществ [1–3]. В частности, использование принципа синтезирования апертуры антенны (РСА) [4] и широкополосных зондирующих сигналов, новых алгоритмов их обработки [5–7] позволяет резко повысить детальность радиолокационного изображения и приблизить информационные возможности радиолокационных средств к оптическим. В большинстве случаев современные космические РСА являются системами двойного назначения: при повседневном функционировании данные применяются для оценки состояния морской поверхности, лесных массивов, сельскохозяйственных угодий и др., однако при необходимости возможно их использование и для решения различных задач военного характера [2].

Для обобщенной оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки (РЛР-В) правомерно использовать в качестве нормативных показателей обоснованные значения вероятностей обнаружения (скрытия) объектов либо дальностей, соответствующих этим вероятностям [8]. Однако данный подход не учитывает ослабления и угол зондирования. Для повышения точности оперативной оценки возможностей РЛР-В возникает необходимость проведения анализа влияния множителя ослабления и угла зондирования на вероятности обнаружения и вскрытия объекта. Подобный анализ может заключаться в определении соответствия эшелона

возможных высот носителя РСА  $H_p$ , диапазона возможных дальностей расположения объекта разведки  $D_p$  и соответствующих углов зондирования  $\beta$ .

Целью работы является повышение качества методики оперативной оценки возможностей РЛР-В, позволяющей связать вероятность обнаружения объекта  $W_0$ , дальностью ведения разведки  $D_p$  и соответствующих углов зондирования  $\beta$ .

### Постановка задачи

Поскольку распознавание типа (класса) объекта связано с оценкой его формы, то пороговые значения вероятностей могут быть найдены из условия не превышения ошибки в оценке формы более, чем на 10 % (по аналогии с измерениями, когда допустимая ошибка не должна превышать 0,1 от абсолютного значения измеряемой величины). Данное условие соответствует вероятности обнаружения  $W_0 \geq 0,8$ . Тогда в первом приближении для задачи распознавания формы объекта в качестве порогового значения можно принять условие  $W_{РАСП} \approx W_0 \geq 0,8$ , а для задачи скрытия формы – условие  $W_{СКР} \approx W_0 \geq 0,8$ . Дальности  $D_p$ , соответствующие указанным условиям, которые можно найти из рисунка 1 для заданной ситуации, будут определять зону распознавания типа объекта и зону скрытия типа объекта.

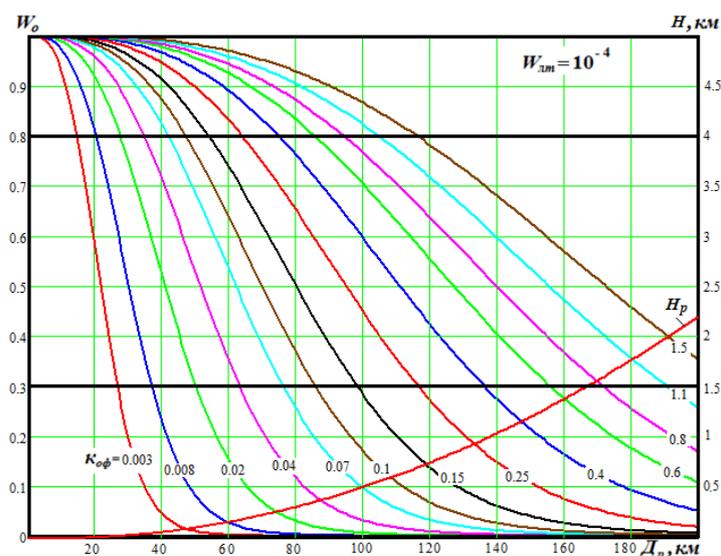


Рис. 1. Графики для оценки возможностей воздушной РЛР-В

Для нахождения указанных зон пороговые значения вероятностей  $W_0 = 0,3$  и  $W_0 = 0,8$  на рис. 1 выделены более наглядно линиями, параллельными оси дальностей.

Анализ зависимостей  $W_0(D_p)$ , приведенных на рис. 1, показывает, что весьма эффективным способом противодействия РЛР-В в сантиметровом диапазоне длин волн является расположение объектов в лесном массиве. Обнаружение объектов, находящихся под пологом леса, определяется степенью поглощения электромагнитных волн в кронах деревьев на пути их распространения (до объекта и обратно), которое по аналогии с распространением в атмосфере может быть учтено с помощью множителя ослабления в лесу  $V_L$ . Поглощение в кронах деревьев леса существенно сказывается при небольших углах падения волны даже при относительно невысоких кронах ( $h_{кр} \leq 7$  м).

С увеличением высоты крон потери значительно возрастают даже для больших углов падения волны. Поэтому при больших углах зондирования влиянием поглощения на обнаружение объекта в целом ряде случаев можно пренебречь. Следовательно, возникает задача на дополнение оперативной методики учета угла зондирования для расчета множителя ослабления.

### Результаты исследований

Вероятность обнаружение объектов, находящихся в лесу, может быть оценена с помощью множителя ослабления в лесу  $V_{\text{л}}$  в виде

$$V_{\text{л}} = 10^{-0,1\alpha_{\text{л}} \cdot R_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{л}}$ , [дБ/м], – коэффициент поглощения в листве;  $R_{\text{кр}} = 2h_{\text{кр}}/\sin \beta$  – длина пути в кронах деревьев;  $h_{\text{кр}}$  – высота крон;  $\beta$  – угол падения волны.

Выражение для расчета множителя ослабления в лесу запишем в виде

$$V_{\text{л}} = 10^{-0,2\alpha_{\text{л}} \cdot h_{\text{кр}}/\sin \beta}. \quad (2)$$

Значение коэффициент поглощения в листве  $\alpha_{\text{л}}$  зависит от породы деревьев и длины волны и определяется по справочным данным. В сантиметровом диапазоне коэффициент поглощения в листве составляет  $\alpha_{\text{л}} \approx 1,2$  дБ/м [9].

Рассчитанные в соответствии с (3) графики зависимости  $V_{\text{л}}(\beta)$  множителя ослабления в лесу для сантиметрового диапазона от угла падения волны при различных значениях высоты крон представлены на рисунке 2.

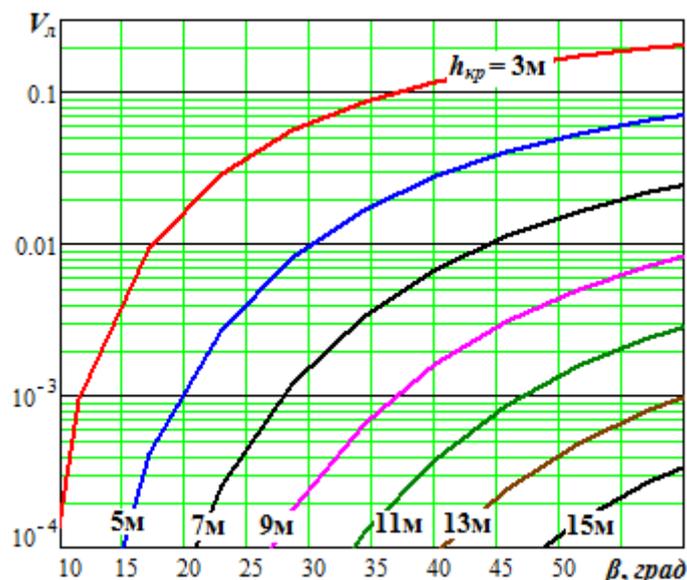


Рис. 2. Графики зависимости множителя ослабления в лесу

Как следует из анализа зависимостей на рис. 2, поглощение в кронах деревьев леса существенно сказывается при небольших углах падения волны ( $\beta < 25^\circ$ ) даже при относительно невысоких кронах ( $h_{\text{кр}} \leq 7$  м). С увеличением высоты крон потери значительно возрастают даже для больших углов падения волны ( $\beta \geq 50^\circ$ ).

Для высоты крон  $h_{\text{кр}} \leq 7$  м и при больших углах ( $\beta \geq 50^\circ$ ), характерных для космических РСА, воздушной самолетной разведки (СР) и РСА на БПЛА, дальность радиолокации сокращается незначительно, а поглощение обусловлено только краями

крон при  $\alpha_n < 0,6$  дБ/м. Поэтому при больших углах зондирования влиянием поглощения на обнаружение объекта в целом ряде случаев можно пренебречь. Однако при высоте крон  $h_{кр} \geq 10$  м это влияние, как следует из графиков рис. 2, становится заметным даже для больших углов зондирования и в каждом случае необходим анализ конкретной ситуации относительно схемы и вида РЛР-В.

Подобный анализ заключается в определении соответствия эшелона возможных высот носителя РСА  $H_p$ , диапазона возможных дальностей расположения объекта разведки  $D_{pz}$  и соответствующих углов зондирования  $\beta$ .

Это соответствие устанавливает следующее соотношение

$$\beta \approx \arctg \frac{H_p}{D_{pz}}, \quad (3)$$

где  $D_{pz}$  – ориентировочная дальность разведки по Земле (горизонтальная дальность).

Построенные на основании (3) зависимости  $\beta(H_p)$  угла зондирования от высоты разведки для различных фиксированных значений дальности расположения объекта представлены на рисунке 3.

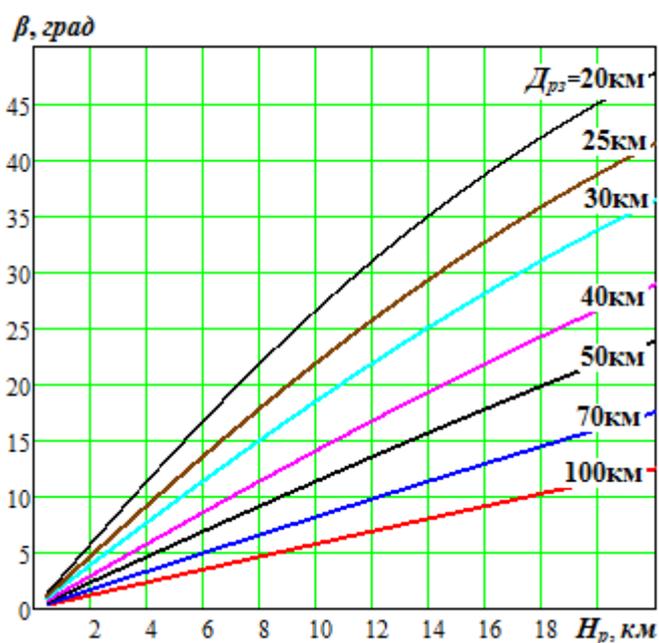


Рис. 3. Графики для оценки влияния угла зондирования

Для примерно известной высоты носителя РСА и дальности до объекта угол зондирования легко находится по соответствующей кривой на рис. 3. Затем для найденного угла зондирования из графиков на рис. 2 определяется при известной (или принятой) высоте крон значение множителя ослабления в лесу  $V_L$  и находится произведение  $k_{оф} \cdot V_L$  для проведения дальнейшей оценки возможностей РЛР-В ( $k_{оф}$  – коэффициент объект–фон). При неизвестной высоте носителя РСА следует исходить из возможного значения  $k_{оф} \cdot V_L$  эшелона высот и определять либо среднее значение угла зондирования для соответствующего диапазона дальностей, либо близкого к максимальному.

Например, для эшелона высот 1...4 км диапазон дальностей ограничивается значением 50 км, а диапазон углов зондирования – в среднем  $\beta \approx 3...10^\circ$ . Но в

соответствии с графиками на рис. 2 для полученного значения углов лес обеспечивает надежную маскировку объектов даже для высоты крон  $\sim 3$  м и частично заглубленном объекте, поскольку значение множителя ослабления в листве составляет  $V_L \sim 10^{-3}$ .

Для эшелона высот 4...8 км диапазон дальностей ограничивается значением 70 км, а диапазон углов зондирования, под которыми «видны» объекты в среднем составляет  $\beta \approx 5...20^\circ$ . В соответствии с графиками для  $V_L$  (рис. 2) надежная маскировка обеспечивается в указанном секторе углов зондирования для высоты крон  $h_{кр} \geq 5$  м (при  $V_L \leq 10^{-3}$ ). В то же время для  $h_{кр} \leq 5$  м достигаемое значение  $V_L$  может не обеспечивать нужного ослабления зондирующего сигнала.

С эшелона высот 8...12 км перекрывается весь диапазон дальностей от 20 до 100 км, указанный на рис. 3, которому соответствует диапазон углов зондирования  $\beta \leq 7...28^\circ$ . Надежная маскировка в указанном секторе обеспечивается уже при высоте крон  $h_{кр} \geq 7...8$  м. Наконец, для эшелона высот 12...16 км и диапазона «видимых» дальностей от 20 до 100 км диапазон углов зондирования составляет в среднем  $\beta \leq 8...35^\circ$ . Надежная маскировка в указанном секторе реализуется при высоте крон  $h_{кр} \geq 10...12$  м.

Анализ показывает, что при проведении общих оценок воздушной тактической РЛР-В минимальным предельным углом визирования следует считать  $\beta \leq 10^\circ$ , а максимальным –  $\beta \leq 40^\circ$ . В качестве среднего значения при отсутствии приближенных априорных сведений относительно взаимного положения объекта и средства РЛР-В может быть принято значение угла визирования  $\beta \leq 25...30^\circ$ . Учитывая, что для «малых» углов зондирования значение коэффициента поглощения в листве составляет  $\alpha_L \approx 1,2$  дБ/м, а для «больших» –  $\alpha_L \approx 0,6$  дБ/м, при оценке эффективности РЛР-В на тактических носителях в качестве усредненного варианта может быть принято значение  $\alpha_L \approx 1,0$  дБ/м.

Соотношения (2), (3) и полученные на их основе графики на рис. 2, 3 позволяют проанализировать физическую картину и провести соответствующие расчеты ослабления мощности радиолокационного зондирующего сигнала кронами деревьев в лесу, однако данные расчеты достаточно громоздки в использовании. Для упрощения расчетов графоаналитическим методом получим общее соотношение для определения потерь в лесу в виде

$$V_L = 10^{-0,2\alpha_L \cdot h_{кр} / \sin[\arctg(H_P/D_{P3})]} \quad (4)$$

Рассчитанные в соответствии с (4) зависимости  $V_L = V_L(H_P/D_{P3})$  представлены на рисунке 4. Кривые на рис. 4 представляют собой зависимости множителя ослабления в кронах деревьев от отношения высоты носителя РСА к дальности разведки по Земле при различных фиксированных значениях высоты крон деревьев.

При этом область значений  $V_L$  для отношений  $H_P/D_{P3} \leq 0,6$  принадлежит, как показывает анализ, к относительно «малым» углам зондирования, а область значений  $V_L$  для отношений  $H_P/D_{P3} \geq 0,9$  – к относительно «большим» углам зондирования.

В качестве мер противодействия РЛР-В находят применение маски-экраны в виде преград из металлической сетки – каркаса, на котором располагают радиотехническую ткань, растительность, маты из хвороста, камыша, устанавливаемых перед объектом под углом  $50...60^\circ$  относительно возможного направления на РЛС.

Экранирующее действие маски характеризуется коэффициентом снижения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объекта [10], который определяется соотношением

$$\eta \approx \frac{\lambda}{10 \cdot H \cdot r}, \quad (5)$$

где  $r \approx \lambda/6$  – линейный размер ячейки сеточного экрана;  $H$  – эмпирическая функция, определяемая формулой

$$H = u + z \cdot 6 \cdot d_{\text{пр}} / \lambda + c \cdot 36 \cdot d_{\text{пр}}^2 / \lambda^2. \quad (6)$$

В выражении (6):  $d_{\text{пр}}$  – диаметр проволоки каркаса;  $u = 3,13[1 + 1,33M(\lambda)]$ ;  $z = -28[1 + 1,76M(\lambda)]$ ;  $c = 65,5[1 + 4,6M(\lambda)]$ ;  $M(\lambda) \approx (\lambda - 3)/7$  для  $\lambda \leq 10$  см.

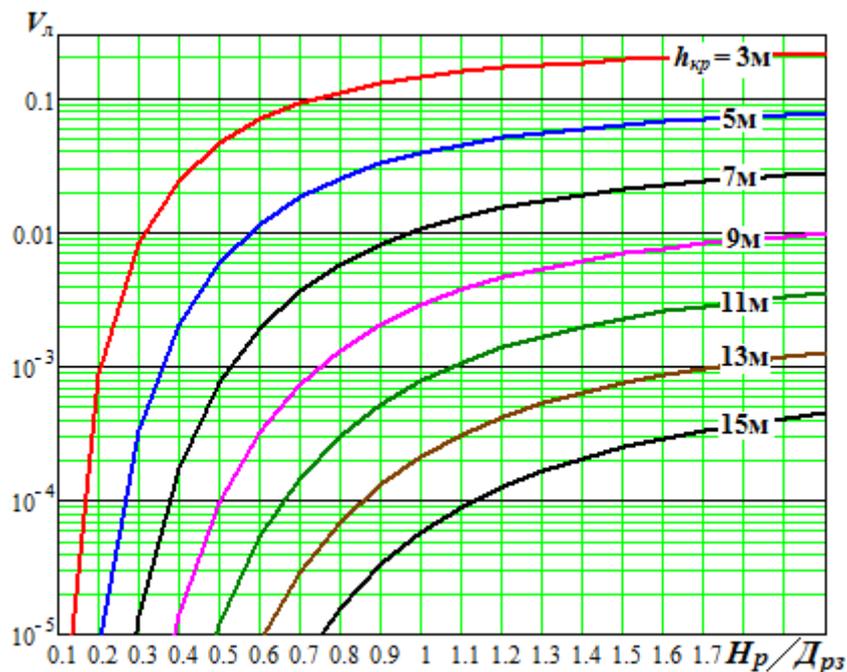


Рис. 4. Графики для расчета множителя ослабления в лесу

Для учета экранирующего действия маски соотношение при вычислении коэффициента объект – фон преобразуется к виду

$$k_{\text{оф}} = \left| \frac{\sigma_{\text{об}}}{S_{\text{об}} \cdot \eta} - \sigma_o \right|. \quad (7)$$

Расчеты показывают, что, например, для  $\lambda \approx 3$  см значение коэффициента снижения ЭПР экранированного объекта составляет  $\eta \approx 4$ . Дальнейший учет этого способа противодействия средствам РЛС-В следует по разработанному методическому подходу.

В общем случае при наличии заранее вычисленных коэффициентов по указанным видам разведки и построенных семействах кривых вида  $W_0 = f(D_p)$  (рис. 1) все необходимые для проведения оценки расчеты сводятся к определению коэффициента объект–фон  $k_{\text{оф}}^*$ , который удобно представить в виде общего для всех случаев соотношения

$$k_{\text{оф}}^* = \left| \frac{\sigma_{\text{об}}}{S_{\text{об}} \cdot \eta} \cdot k_{\text{рпн}} - \sigma_o \right| \cdot V \cdot V_L, \quad (8)$$

где  $k_{pnn}$  – коэффициент ослабления мощности сигнала поглощающим покрытием;  $V = 10^{-0,2\alpha \cdot D_p}$  – множитель ослабления [8];  $\alpha$  – коэффициент затухания [дБ/км], зависящий от частоты, состояния атмосферы, характера трассы.

При отсутствии мер противодействия средствами РЛС-В и учета затухания в атмосфере соответствующие коэффициенты становятся единичными, а формула для расчета  $k_{оф}^*$  приобретает наиболее простой вид (7).

### **Выводы**

Таким образом, предлагаемый математический аппарат для оперативной оценки возможностей видовой радиолокационной разведки основывается на функциональной зависимости вероятности обнаружения объекта от дальности, связана с использованием обобщенных данных по средству ведения радиолокационной разведки, объекту и условиям, учитывает все возможные способы организации противодействия и отличается простотой и наглядностью.

### **Литература**

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
2. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. 460 с.
3. S. Unnikrishna Pilai, Ke Yong Li, Braham Himed. Space Based Radar: Theory & Applications. McGraw Hill, 2008. 448 p.
4. Бортовые радиоэлектронные системы. Основы построения: учебное пособие / А.В. Леньшин, Н.М. Тихомиров, С.А. Попов; под ред. А.В. Леньшина. 2 изд., перераб. и доп. Воронеж: ИПЦ «Научная книга». 2021. 486 с.
5. Chen V.C., Ling H. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis. Boston: Artech House, 2002. 460 p.
6. Верба В.С., Неронский Л.Б., Турук В.Э. Перспективные технологии цифровой обработки радиолокационной информации космических РСА. М.: Радиотехника, 2019. 416 с.
7. Wang B.-C. Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008, 367 p.
8. Кравцов Е.В. Методика оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 1. С. 38–46.
9. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Функциональный метод обобщенных параметров для оперативной оценки возможностей технических средств разведки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 3. С. 23–32.
10. Кравцов Е.В. Методический подход к комплексной оперативной оценке возможностей выявления сведений об объектах защиты // Телекоммуникации. 2020. №9. С. 33–41.