

## **Математическое обеспечение системы оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом фактора метеообразований**

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

*Предлагаемый в работе математический аппарат учитывает ослабление зондирующего сигнала в условиях дождя, что позволит повысить достоверность оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки по вскрытию объектов комплексного технического контроля.*

*Ключевые слова: вероятность обнаружения, радиолокационная видовая разведка, оперативная оценка, множитель ослабления, фактор дождя.*

## **Mathematical software of the system of operational assessment of the capabilities of radar specific reconnaissance taking into account the factor of meteorological formations**

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)*

*The mathematical apparatus proposed in the work takes into account the attenuation of the probing signal in rain conditions, which will increase the reliability of the operational assessment of the capabilities of radar specific reconnaissance to open objects of complex technical control.*

*Keywords: probability of detection, radar species reconnaissance, operational assessment, attenuation multiplier, factor of meteorological formations.*

### **Введение**

Современный этап развития информационных систем комплексного технического контроля (КТК) и защиты информации характеризуется стремительным развитием характеристик технических средств разведки (ТСР) иностранных государств, которые в режиме времени, близком к реальному, добывают сведения об объектах защиты (ОЗ) во всех физических полях, в которых проявляются их демаскирующие признаки [1, 2]. Одним из ключевых видов разведки иностранных государств является радиолокационная видовая разведка, применяемая как на наземных, так и на воздушных и космических средствах базирования [3]. В большинстве случаев современные средства радиолокационной разведки космического базирования являются системами двойного назначения: основным заявленным функционалом является оценка состояния морской поверхности, лесных массивов, сельскохозяйственных угодий и др., однако при необходимости возможно их использование и для решения различных задач военного характера [4, 5]. Также применяются и радиолокационные системы (РЛС) воздушного базирования на самолетах авиакомпаний иностранных государств, совершающих воздушные перелеты над территорией Российской Федерации и в приграничных районах.

Учитывая разнообразие применяемых средств, высокую достоверность и актуальность получаемой информации, постоянно повышается актуальность совершенствования методического и математического аппарата оценки возможностей РЛС и вероятностей обнаружения (скрытия) объектов. Одним из возможных вариантов оценки, показавшим свою высокую практическую значимость, является применение методики оперативной оценки возможностей средств радиолокационной разведки [6]. Предложенная методика заключается в определении соответствия эшелона возможных высот носителя синтезированной апертуры антенны  $H_p$ , диапазона возможных дальностей расположения объекта разведки  $D_p$  и соответствующих углов зондирования  $\beta$ . В [7, 8] рассмотрено ослабление радиолокационного сигнала при наличии деревьев на трассе. Еще одним возможным препятствием, при проведении РЛР, являются различные метеообразования, например, капли дождя.

Целью работы является повышения качества оперативной оценки возможностей средств радиолокационной видовой разведки (РЛР-В) за счет учета фактора метеообразований. Одним из показателей достоверности оценки, является учет возможных препятствий. В данной работе рассмотрен математический аппарат оперативной методики оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом фактора дождя.

### **Постановка задачи**

Распознавание типа (класса) ОЗ связано с оценкой его формы, следовательно, 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). Современные РЛС позволяют выполнить это условие даже в условиях недостаточной видимости – в ночное время. В случае же плохой видимости, вызванной наличием метеообразований таких как дождь, снег и туман, эффективность работы РЛС резко падает, уменьшается дальность действия, появляется большое количество посторонних засветок от метеообразований [4]. Причина такого явления – поглощение энергии гидрометеорными частицами и рассеяние на капельках жидкости, кусочках льда, снежинках. Учитывая этот факт при оперативной оценке разведдоступности ОЗ, можно сократить материальные и временные затраты на применение средств массировки, перемещение и т.д. Кроме того, помимо применения множителя ослабления в условиях дождя, возможна заблаговременная оценка возможного снижения разведдоступности ОЗ на основе сведений о статистической повторяемости этих образований, а также данные об их пространственной структуре.

Также эффективность применения средств РЛР-В снижается за счет наличия дополнительного отражения от подстилающей поверхности и препятствий. Данные отражения также снижают эффективность применения РЛР-В, увеличивая количество ложных тревог и срабатываний. Все вышеперечисленные факторы могут быть применены как дополнительное ослабление к полученным в предыдущих работах [6, 7] вероятностях оперативной оценки графоаналитическим способом (рисунок 1).

Данный график показывает, что в сантиметровом диапазоне, учитывая метеообразования, получается эффективно скрыть ОЗ. Обнаружение объекта будет определяться степенью поглощения электромагнитных волн каплями дождя - интенсивностью метеообразования, которое по аналогии с распространением в атмосфере может быть учтено с помощью множителя ослабления в дождь  $V_d$ .

С увеличением интенсивности метеообразования 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 учетом метеообразования для расчета множителя ослабления.

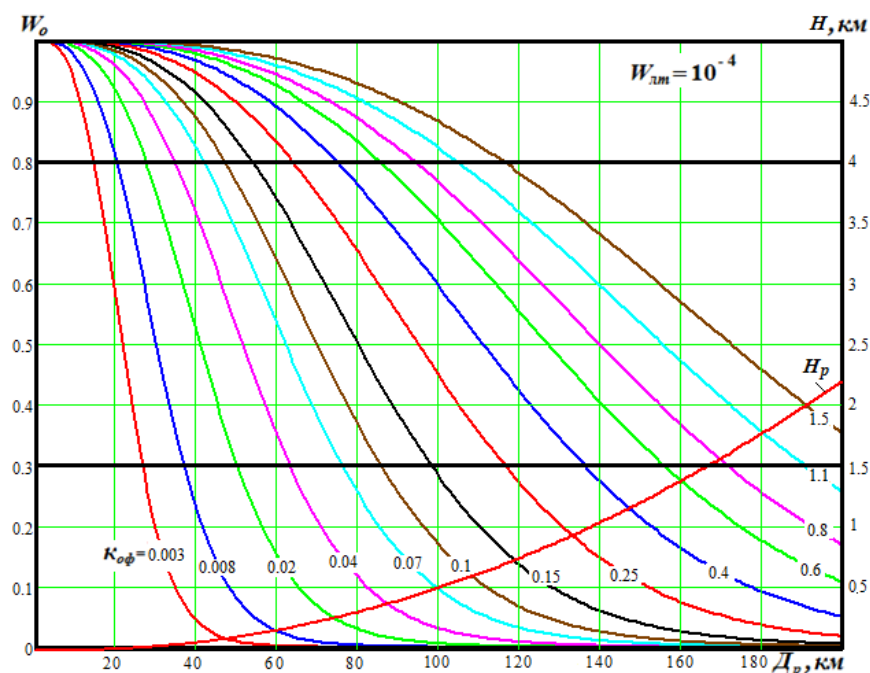


Рис. 1. Графики для оценки возможностей воздушной РЛР-В

### Результаты исследований

Учитывая, что любая монохроматическая волна полностью поляризована и может быть бесчисленным множеством способов разложена на сумму произвольного числа полностью поляризованных волн. На практике часто имеют дело с разложением полностью поляризованных волн на некоторые ортогональные компоненты, которые не обязательно должны быть вещественными. В общем случае это могут быть некоторые комплексные ортогональные векторы.

На начальном этапе разработки математического обеспечения рассмотрим разложение поляризованной волны по двум комплексным ортам, находящимся в одной плоскости, что и рассматриваемая радиолокационная волна. Полученная пара ортонормированных комплексных векторов  $\dot{e}_1$  и  $\dot{e}_2$  будут поляризационным базисом  $[e_1, e_2]$ . Таким образом получим зависимость произвольного комплексный вектор  $\dot{E}$  от орт базиса  $[e_1, e_2]$

$$\dot{E} = (\dot{E}\dot{e}_1^*)\dot{e}_1 + (\dot{E}\dot{e}_2^*)\dot{e}_2 = \dot{E}_n\dot{e}_1 + \dot{E}_n\dot{e}_2, \quad (1)$$

где  $\dot{E}\dot{e}_n^* = \dot{E}_n$  – комплексные числа, описывающие проекцию вектора  $\dot{E}_n$  на орту  $\dot{e}_n$  соответственно. Учитывая, что описанный вектор  $\dot{E}$ , описывающий поляризацию волны, то их аргументы комплексных координат являются фазами и амплитудами их поляризованных координат. Каждая компонента этой волны поляризована параллельно ее соответствующему орту базиса. Поэтому компоненты этой волны поляризованы параллельно соответствующим им орту базиса. Исходя из этого, уравнение (1) понимается как разложение одной полностью поляризованной волны на две ортогональные, полностью поляризованные составляющие, каждая из которых имеет свою амплитуду и фазу.

Для перехода к оценкам ослабления РЛР в условиях дождя, представим поле передающей антенны РЛС в виде

$$\dot{\mathbf{E}}_{\text{прд}} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}_{\text{прд}}. \quad (2)$$

Следующим этапом является учет метеообразований, для этого подставим в уравнение (2) коэффициент подстилающей поверхности

$$\dot{\mathbf{E}}_{\text{под}} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}_{\text{под}} = \mathbf{A} \dot{\mathbf{E}}_{\text{прд}} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}_{\text{прд}}. \quad (3)$$

где  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} e^{-a_{11}H} e^{j\psi_{11}} & e^{-a_{12}H} e^{j\psi_{12}} \\ e^{-a_{21}H} e^{j\psi_{21}} & e^{-a_{22}H} e^{j\psi_{22}} \end{pmatrix}$  – матрица распространения электромагнитной волны от РЛС, при наличии метеообразований на пути следования.

В рассматриваемой матрице коэффициент  $a_{ij}$  обозначает затухание на трассе, а  $H$  – расстояние от РЛС до цели. Для однородной среды распространения случайный паразитный множитель, определяющий возникшие паразитных модуляций сигнала РЛС и показывающий затухание, имеет вид  $e^{-a_{ij}H}$ . На основе экспериментальных данных можно рассчитать возможные значения коэффициентов затухания  $a_{ij}$  в различных метеообразованиях и различных поляризациях антенн.

Учитывая, что при попадании электромагнитной волны от РЛС на цель происходит рассеивание этой волны. Приемная и передающая антенны в случае РЛР-В находятся вне ближней зоны цели, являющей вторичным излучателем, поэтому рассчитать электромагнитное поле, после рассеивания, определяемое  $\dot{\mathbf{E}}_{\text{отр}}$ , можно с помощью линейного преобразования

$$\dot{\mathbf{E}}_{\text{отр}} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}_{\text{отр}} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}_{\text{под}} = \mathbf{S} \dot{\mathbf{E}}_{\text{под}}. \quad (4)$$

Если поляризация приемной и передающей антенн совпадает, то полученная матрица  $\mathbf{S}$  является однополяризационной.

Кроме того, в рассмотренной модели учитывается только матрица истинной (полезной) цели  $\mathbf{S}_{\text{ц}} = \begin{pmatrix} S_{\text{ц}11} & S_{\text{ц}12} \\ S_{\text{ц}21} & S_{\text{ц}22} \end{pmatrix}$ , однако на практике, помимо истинной цели находится множество ложных целей, общую матрицу рассеивания для которых можно представить в виде  $\mathbf{S}_{\text{ф}} = \begin{pmatrix} S_{\text{ф}11} & S_{\text{ф}12} \\ S_{\text{ф}21} & S_{\text{ф}22} \end{pmatrix}$ .

Таким образом, входной сигнал в приемном устройстве РЛС будет определяться суммой полученных матриц

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_{\text{ф}} + \mathbf{S}_{\text{ц}}. \quad (5)$$

Полученная совокупность уравнений (3) и (5) позволяет оценить электромагнитное поле у приемной антенны РЛС, после прохождения через метеообразования

$$\dot{\mathbf{E}}_{\text{под}} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^* \cdot \dot{\mathbf{E}}_{\text{прд}}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}^*$  – матрица прохождения через метеообразования отраженного сигнала в направлении РЛС.

С учетом перемножения комплексно сопряженных матриц из выражения (6), получаем

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_{\text{под}} &= \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^* \cdot \dot{\mathbf{E}}_{\text{прд}} = \mathbf{S} \begin{pmatrix} e^{-2a_{11}H} e^{j\psi_{11} - j\psi_{11}} & e^{-2a_{12}H} e^{j\psi_{12} j\psi_{12}} \\ e^{-2a_{21}H} e^{j\psi_{21} - j\psi_{21}} & e^{-2a_{22}H} e^{j\psi_{22} - j\psi_{22}} \end{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_{\text{прд}} = \\ &= \mathbf{S} \begin{pmatrix} e^{-2a_{11}H} & e^{-2a_{12}H} \\ e^{-2a_{21}H} & e^{-2a_{22}H} \end{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_{\text{прд}}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом рассчитанных коэффициентов затухания  $a_{ij}$  при различных погодных условиях, можно оценить вероятность обнаружения ОЗ в условиях метеообразований средствами РЛС-В.

### Выводы

Таким образом, предлагаемое математическое обеспечение для оперативной оценки возможностей видовой радиолокационной разведки в условиях метеообразований основывается на расчете электромагнитного поля у приемной антенны РЛС с учетом прохождения электромагнитной волны через метеообразования дважды. Дальнейшие исследования будут посвящены автоматизации оценки зон РЛР-В разведки, с учетом полученных множителей ослабления для лесной местности и метеообразований в районе ведения разведки.

### Литература

1. 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.
2. Кравцов Е.В. Методический подход к комплексной оперативной оценке возможностей выявления сведений об объектах защиты // Телекоммуникации. – 2020. – № 9. – С. 33–41.
3. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. – 460 с.
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. Леньшин А.В., Лебедев В.В. Обоснование характеристик радиопередающего и радиоприемного трактов малогабаритной РЛС // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2021. – С. 343–351.
6. Сидоренко И.А., Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Автоматизация системы оперативной оценки обнаружения объектов комплексного технического контроля средствами радиолокационной видовой разведки // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: МИ ВлГУ, 2022. – С. 429–436.
7. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Математическое обеспечение системы оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом множителя ослабления // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: МИ ВлГУ, 2022. – С. 424–428.

8. Леншин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Особенности построения математического аппарата оценки возможностей радиолокационной видовой разведки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – № 4. – С. 15–24.