

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2025-1-5-12

УДК 623.624

ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ВИДОВОЙ ЗАМЕТНОСТИ ОБЪЕКТОВ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Леньшин Андрей Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Кравцов Евгений Владимирович

доктор технических наук, доцент, начальник учебно-методического центра Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

Сидоренко Иван Андреевич

адъюнкт 54 кафедры противодействия техническим средствам разведки Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: Ivan.Sidorenko.95@yandex.ru

Адрес: 394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

Аннотация: Разработан математический аппарат и реализующее его программное обеспечение для оперативной оценки возможностей средств радиолокационной видовой разведки, проводимой вблизи или внутри территории Российской Федерации, позволяющий снизить затрачиваемый временной ресурс на проведение оценки возможностей радиолокационной видовой разведки объектов комплексного технического контроля.

Ключевые слова: вероятность обнаружения, радиолокационная разведка, оперативная оценка, комплексный технический контроль.

Современный этап противостояния Российской Федерации и стран НАТО во главе с США носит беспрецедентный характер, обуславливающий колоссальное наращивание группировки сил и средств всех видов технической разведки на различных типах носителей, позволяющих осуществлять в масштабе времени, близком к реальному, освещение обстановки в зонах разведки в различных диапазонах длин волн с высокой степенью достоверности. Наиболее опасным и информативным видом разведки по добычанию охраняемых сведений (ОС) о вооружении, военной и специальной технике (ВВСТ), а также деятель-

ности войск (сил) в настоящее время является радиолокационная видовая разведки (РЛР-В) [1–3]. Все это предъявляет жесткие требования к эффективности проводимых мероприятий по противодействию техническим средствам разведки (ПД ТСР) и к средствам, их осуществляющим. Функционирование РЛР-В иллюстрируется рис. 1.

В этих условиях спектр решаемых задач силами и средствами комплексного технического контроля (КТК), как в мирное, так и в военное время существенно расширился [4]. Применение сил и средств КТК, как правило, осуществляется в условиях сложной помехово-

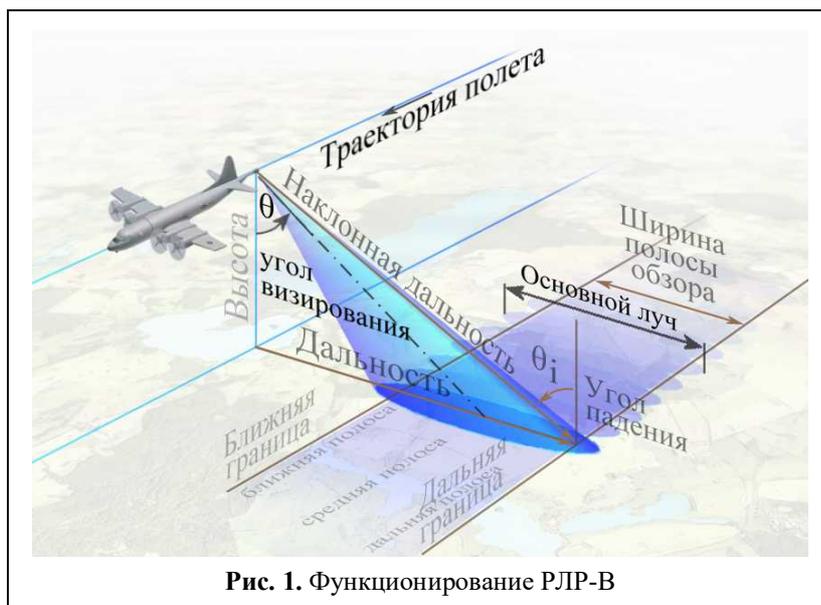


Рис. 1. Функционирование РЛР-В

вёрнутых сил и средств КТК в рамках Единой системы (ЕС) КТК ВС РФ и их технический облик подтверждают необходимость их совершенствования и определяют цель данной работы. Цель работы — развитие математического и программного аппарата технических средств РЛК для повышения оперативности оценки возможностей РЛР-В в условиях изменения функциональных характеристик перспективных систем технической разведки и высокой динамики применения

сигнальной обстановки, характеризуемой наличием как непреднамеренных помех, так и преднамеренных помех от средств радиоэлектронной борьбы противника [5]. Данные обстоятельства накладывают существенные ограничения на реализацию организационных и технических мероприятий, обеспечивающих проведение радиолокационного контроля (РЛК) и определяют необходимость изыскания способов повышения оперативности, достоверности и точности РЛК мер ПД ТСР в условиях сложной радиоэлектронной обстановки (РЭО).

В монографии [1] рассмотрены применяемые в настоящее время средства РЛР-В космического базирования, их технические характеристики и функциональные возможности. Для проведения оценки их возможностей по добычанию ОС об объектах защиты комплексного технического контроля необходимо проведение всесторонней оценки, основанной на параметрах объекта контроля, средств разведки и условиях её ведения. Построение такого математического аппарата рассмотрено в работах [6, 7], однако они не учитывают возможные ошибки при проведении РЛК, а именно ложного срабатывания и пропуска имеющегося ДП.

В то же время анализ существующих методик оценки возможностей РЛР-В, состава раз-

средств радиоэлектронной борьбы, совершенствование методов рационального распределения разнородного ресурса сил и средств РЛК с учётом повышения количества и номенклатуры применяемых средств разведки и объектов защиты, их демаскирующих признаков (ДП).

Имеющиеся силы и средства контроля необходимо рационально распределить по объектам контроля, ДП которых попадают в зону разведдоступности средств РЛР-В. Один из возможных подходов к решению данной задачи рассмотрен в работе [8], но без учёта профиля местности и «важности» объектов КТК.

Предлагается в качестве обобщённой оценки принять функциональную зависимость вероятности обнаружения W_0 и вероятности распознавания W_p объектов от дальности D_p в виде графической зависимости вида

$$W_{0(p)} = f(D_p). \quad (1)$$

В условиях действия войск (сил) одной из главных задач является обеспечение живучести, особенно при высокой динамике изменения оперативной обстановки. Поэтому эти показатели должны быть в явном виде связаны с дальностью D_p или зоной действия как противника, так и своих войск. Это также важно и для решения задачи ПД ТСР [3, 6].

Кроме того, множество графических зависимостей дальности и разведкоступности содержат в себе все возможные ситуации для данного вида разведки и объекта, нормативные показатели в виде обоснованных значений вероятностей, отмеченных на графиках, либо дальностей (зон), соответствующих этим вероятностям, отличаются наглядностью и простотой в использовании. Пример такого расчёта приведён на рис. 2.

Полученные в предыдущих работах математические выражения позволяют установить в явном виде функциональную зависимость между дальностью разведки

$$W_O = \exp\left(-\frac{P_0}{P_{\text{ш}} + |P_{\text{об}} - P_{\text{ф}}|}\right), \quad (2)$$

где разрешение объекта $P_{\text{об}}$ на входе приёмника радиолокационной станции (РЛС) с учётом потерь в среде распространения и приёмном тракте

$$P_{\text{об}} = \frac{P_{\text{л}} G_{\text{л}}^2 \lambda^2 B^2 N_{\text{к}}^2 \mu V \sigma_{\text{обз}}}{(4\pi)^3 D_{\text{р}}^4}, \quad (3)$$

где $P_{\text{л}}$ — импульсная мощность передатчика РЛС; $G_{\text{л}}$ — коэффициент усиления антенны; λ — длина волны; B — база сигнала; $N_{\text{к}}$ — количество когерентно накапливаемых импульсов за время синтезирования апертуры; μ — коэффициент потерь в ВЧ тракте (4...7 дБ); V — множитель ослабления сигнала в среде распространения; $\sigma_{\text{обз}}$ — ЭПР разрешаемого элемента объекта; $D_{\text{р}}$ — дальность разведки; мощность эхосигнала от фона $P_{\text{ф}}$ на входе приёмника РЛС будет определяться выражением

$$P_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{л}} G_{\text{л}}^2 \lambda^2 B^2 N_{\text{к}}^2 \mu V \sigma_{\text{ф}}}{(4\pi)^3 D_{\text{р}}^2}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{ф}}$ — ЭПР фона; $P_{\text{ш}} = k K_{\text{ш}} T_0 \Delta f_{\text{пр}}$ — мощность шумов приёмника РЛС; k — посто-

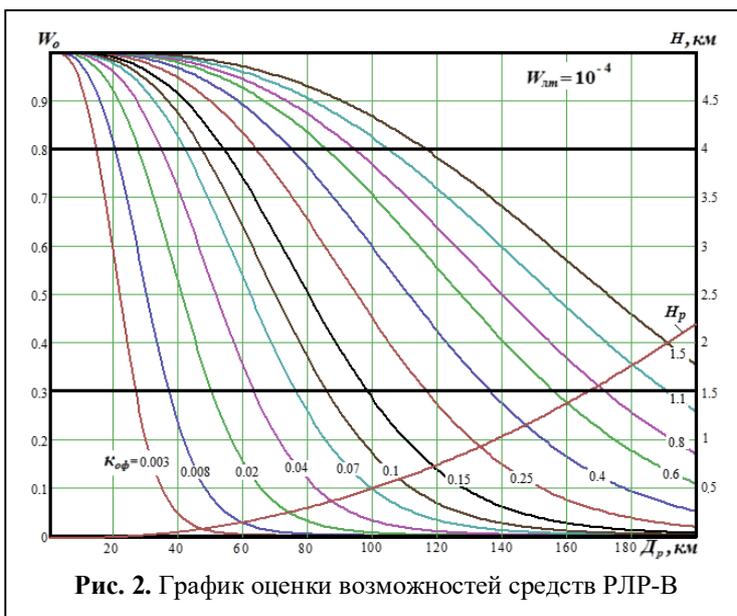


Рис. 2. График оценки возможностей средств РЛР-В

янная Больцмана; $K_{\text{ш}} = 2...4$ — коэффициент шума приёмника; $T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц; $\Delta f_{\text{пр}} = (1, 1...1, 2) \Delta f_{\text{с}}$ — ширина полосы пропускания приёмника РЛС, определяемая шириной спектра сигнала $\Delta f_{\text{с}}$; $p_0 = -P_{\text{ш}} \cdot \ln W_{\text{лт}}$ — значение порога; $W_{\text{лт}}$ — вероятность ложной тревоги [9].

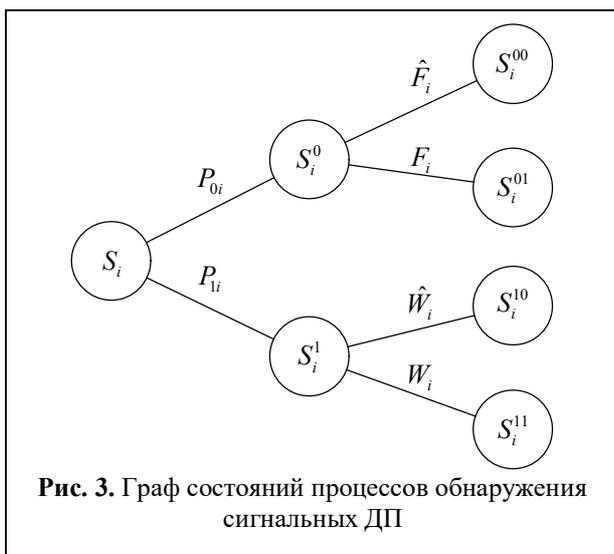
Вероятность ложной тревоги $W_{\text{лт}}$ может быть определена с помощью выражения

$$W_{\text{лт}} = \int_{p_0}^{\infty} \psi_{\text{ш}}(P) dP, \quad (5)$$

где $\psi_{\text{ш}}(P) = \frac{1}{P_{\text{ш}}} \exp\left(-\frac{P}{P_{\text{ш}}}\right)$ — плотность распределения вероятностей мощности помехи; $P_{\text{ш}}$ — мощность шума.

В процессе обнаружения ДП объектов КТК возможны следующие события: A_0, A_1 — события, соответствующие наличию (A_1) или отсутствию (A_0) ДП; A_0^*, A_1^* — события, соответствующие принятию решения о наличии (A_1^*) или отсутствии (A_0^*) ДП.

При совмещении рассмотренных событий получим следующие вероятности: $P_{00} = P(A_0^*, A_0)$, $P_{01} = P(A_0^*, A_1)$, $P_{10} = P(A_1^*, A_0)$, $P_{11} = P(A_1^*, A_1)$. Отсюда следует, что $P_{00} = P_0 \hat{F}$,



$P_{01} = P_1 \hat{W}$, $P_{10} = P_0 F$, $P_{11} = P_1 W$, где W — вероятность вскрытия ДП средствами РЛР-В; $\hat{W} = 1 - W$ — вероятность пропуска ДП; F — вероятность ложного обнаружения ДП; $\hat{F} = 1 - F$ — вероятность правильного пропуска ложного ДП; P_0 — априорная вероятность отсутствия ДП; P_1 — априорная вероятность наличия ДП.

Используя полученные вероятности, составим ориентированный граф состояний принятия решения о наличии или отсутствии ДП объектов КТК как для средств разведки, так и для средств контроля. Для каждого i -ого ДП полученный граф представлен на рис. 3. Вершиной графа выступает процесс поиска ДП, в качестве условий выявления — наличие или отсутствие ДП, а в качестве решения — рассмотренные вероятности правильного или неправильного обнаружения наличия или отсутствия ДП.

Процесс выявления ДП можно представить в виде графа, представленного на рис. 4. Данный граф имеет вид дерева с $(m + 1)$ уровнями, соответствующих секторам (диапазнам) поиска ДП и случая отсутствия данного ДП. При поиске ДП объекта КТК состояния S_m^{00} , S_m^{10} являются поглощающими, потому что в этих случаях поиск прекращается и начинается процесс принятия мер к закрытию (ослабле-

нию) ДП. В качестве показателей эффективности вскрытия ДП примем вероятность правильного обнаружения ДП $P_W(t)$ и ложного обнаружения $P_F(t)$ от времени поиска t .

Обозначим вероятность перехода к состоянию S_i^{j1} как $P_{S_i^{j1}}$ к моменту времени t , тогда общая вероятность правильного обнаружения ДП будет определена следующим выражением

$$P_W(t) = \sum_{S_i^{j1}} P_{S_i^{j1}}(t). \quad (6)$$

Аналогично можно определить вероятность ложной тревоги $P_F(t)$

$$P_F(t) = \sum_{S_i^{j01}} P_{S_i^{j01}}(t). \quad (7)$$

Для определения эффективности процесса выявления ДП будем использовать вероятность правильного обнаружения ДП W_i и ложной тревоги F_i , а также принятых решений о наличии ДП в i -м секторе поиска $\varphi_i(t)$. Учитывая случайность возникновения ДП, процесс поиска будет представлять собой полумарковский процесс изменения состояний. Полученные ранее вероятности будут являться переходными вероятностями, а $\varphi_i(t)$ — плотность распределения вероятностей перехода. Введём в рассмотрение весовые функции переходов, представляющие собой преобразование Лапласа от произведения переходных вероятностей на соответствующие плотности распределения времени переходов. Введём следующие обозначения для весовых функций переходов:

$$w_i(s) = L\{W_i \varphi_i(t)\}, \quad (8)$$

$$\hat{w}_i(s) = L\{\hat{W}_i \varphi_i(t)\}, \quad (9)$$

$$f_i(s) = L\{F_i \varphi_i(t)\}, \quad (10)$$

$$\hat{f}_i(s) = L\{\hat{F}_i \varphi_i(t)\}, \quad (11)$$

где $L\{s\}$ — оператор преобразования Лапласа; s — переменная преобразования Лапласа.

Применив обратное преобразование Лапласа и перейдя к пределу $t \rightarrow \infty$, найдём общие выражения для вероятностей правильного выявления при наличии ДП, не выявления

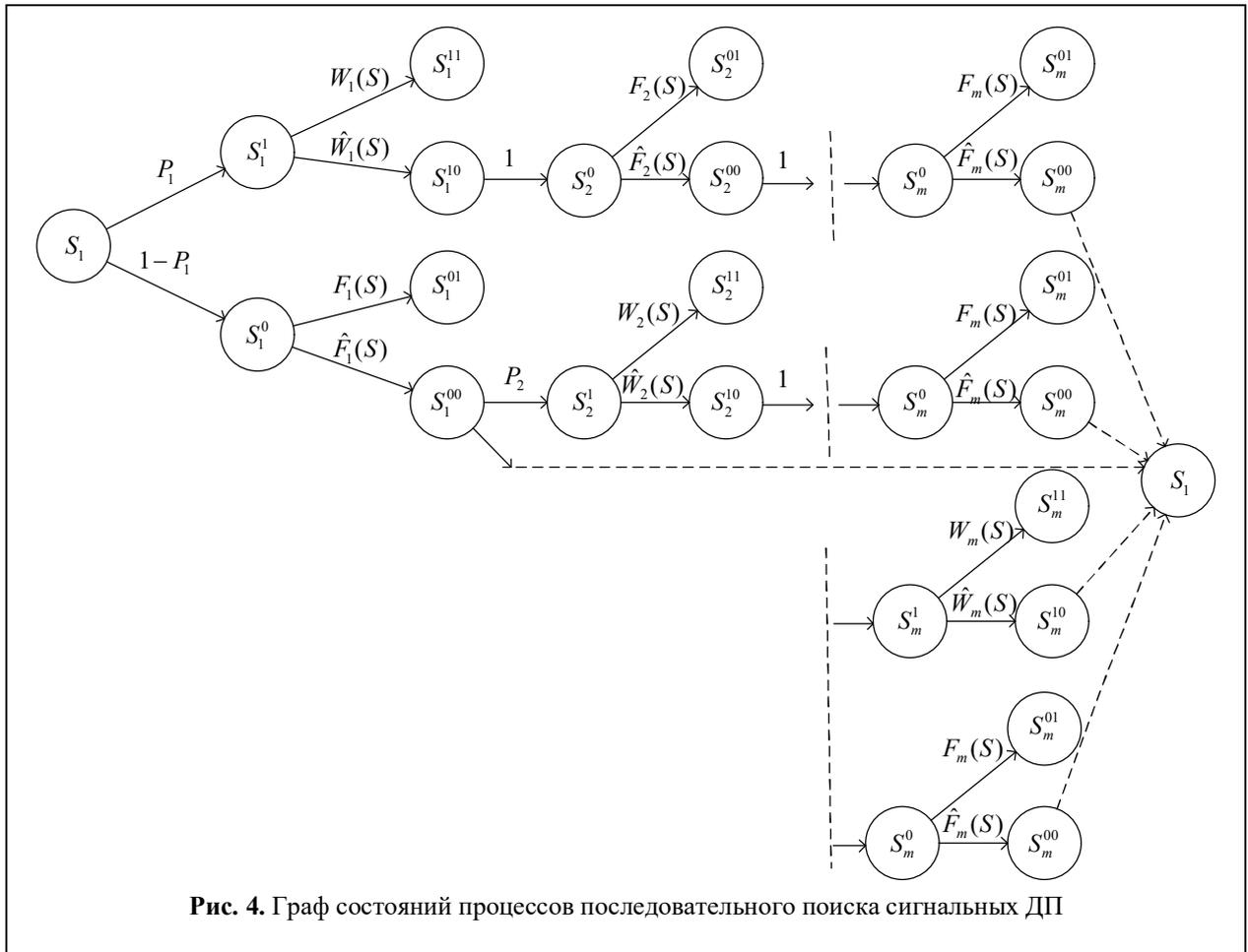


Рис. 4. Граф состояний процессов последовательного поиска сигнальных ДП

при наличии ДП и не выявлении при отсутствии ДП:

$$P_W = \frac{1}{m} W \frac{1 - \hat{F}^m}{1 - \hat{F}}, \quad (12)$$

$$P_F = 1 - \frac{1}{m} W \frac{1 - \hat{F}^m}{1 - \hat{F}} - \hat{W} \hat{F}^{m-1}, \quad (13)$$

$$P_{\hat{W}} = \hat{W} \hat{F}^{m-1}. \quad (14)$$

Данный расчёт актуален для единичного поиска ДП, однако РЛК является многократным повторяющимся процессом. В данном случае после завершения поиска ДП в m диапазонах происходит возврат из состояний S_m^{10} , S_m^{00} в начальное состояние S_1 (пунктир на рис. 4). Вероятности правильного обнаружения существующих сигнальных ДП и пропуска несуществующих ДП будут определяться выражениями:

$$P_W = \frac{1}{m} W \frac{1 - \hat{F}^m}{(1 - \hat{F})(1 - \hat{W} \hat{F}^{m-1})}, \quad (15)$$

$$P_F = 1 - \frac{1}{m} W \frac{1 - \hat{F}^m}{(1 - \hat{F})(1 - \hat{W} \hat{F}^{m-1})}. \quad (16)$$

Учитывая, что задания на проведения РЛК имеют определённый период, получим выражения для конечного числа просмотров секторов ДП. Для этого проведём замену $t = mkT_n$, где k — число просмотров секторов. Тогда вероятности для конечного числа просмотров секторов ДП будут определяться выражениями:

$$P_W = \frac{1}{m} W \frac{1 - \hat{F}^m}{(1 - \hat{F})} \frac{1 - \hat{W}^k \hat{F}^{(m-1)/k}}{1 - \hat{W} \hat{F}^{m-1}}, \quad (17)$$

$$P_F = 1 - \frac{1}{m} W \frac{1 - \hat{F}^m}{(1 - \hat{F})} \frac{1 - \hat{W}^k \hat{F}^{(m-1)/k}}{1 - \hat{W} \hat{F}^{m-1}}. \quad (18)$$

Полученные вероятности позволяют построить зоны разведдоступности объектов

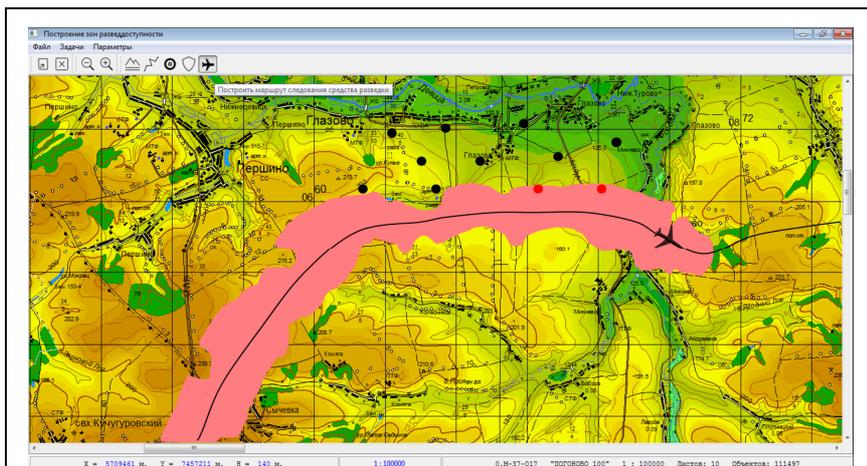


Рис. 5. Применение электронных карт для оценки возможностей средств РЛР-В

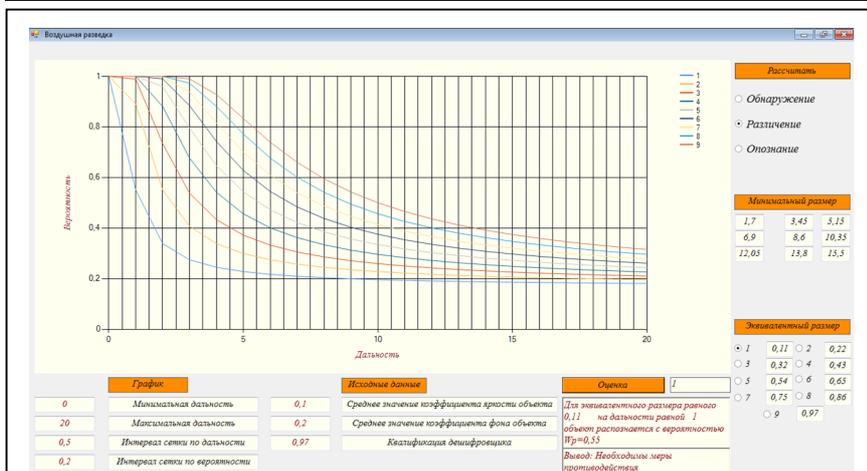


Рис. 6. Применение специального программного обеспечения оценки возможностей средств РЛР-В

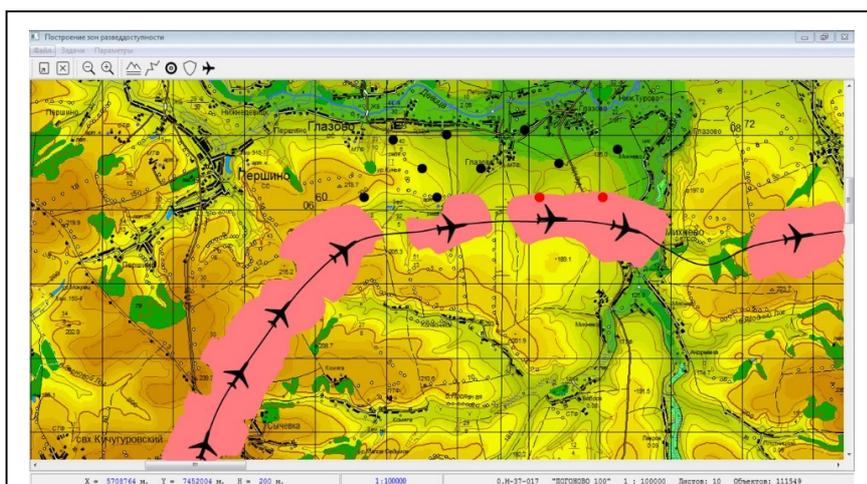


Рис. 7. Перерасчёт зон разведки с изменением обстановки

С учётом рассчитанных коэффициентов затухания при различных типах подстилающей поверхности и погодных условиях, вероятностей обнаружения ДП и ложной тревоги можно оценить вероятность обнаружения ОЗ в различных условиях средствами РЛС-В. Пример комплексной оценки [10] приведён на рис. 6.

Полученные результаты расчётов оценивают вероятность разведки РЛР-В относительно одного ОЗ. В процессе оценки зон разведываемости возможно оперативное внесение изменений, таких как, метеообразования в районе разведки (рис. 7).

Таким образом, предлагаемые в данной работе математический аппарат и программное обеспечение для оперативной оценки возможностей РЛР-В позволяют существенно повысить оперативность проведения расчётов разведываемости объектов КТК. Реализованный в программном обеспечении математический аппарат позволяет определить вероятность разведываемости объекта КТК с учётом вероятности ложной тревоги и полученных на предыдущих этапах оценках. Дальнейшие исследования будут направлены на комплексирование

КТК относительно дальности ведения разведки и вероятности ложной тревоги (рис. 5).

результатов контроля различных видов разведки.

Литература

1. *Куприяшкин И.Ф., Лихачев В.П.* Космическая радиолокационная съёмка земной поверхности в условиях помех: монография. Воронеж: Научная книга, 2014. 460 с.
2. *Авиационные системы радиовидения: монография. Под ред. Г.С. Кондратенкова.* М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
3. *Меньшаков Ю.К.* Основы защиты от технических разведок. М.: Миска, 2017. 572 с.
4. *Сахнин А.А., Игнатенков В.Г.* Защищённое информационное пространство. Комплексный технический контроль радиоэлектронных средств. М.: Горячая линия–Телеком, 2016. 336 с.
5. *Куприянов А.И., Шустов Л.Н.* Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
6. *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.
7. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А.* Моделирование системы оперативной оценки радиолокационной видовой заметности объектов контроля // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2024. С. 408–414.
8. *Леньшин 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.
9. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А.* Математический аппарат оперативной оценки возможностей радио- и радиотехнической разведки в лесном массиве // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. №4. С. 72–79.
10. Программный модуль системы оценки эффективности противодействия радиолокационной видовой разведки с учётом множителя ослабления / *Сидоренко И.А.* // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022614275 (РФ), дата гос. регистрации 18.03.2022.

Поступила 23 июля 2024 г.

English

FEATURES OF OPERATIONAL ASSESSMENT OF RADAR VISIBILITY OF OBJECTS OF COMPLEX TECHNICAL CONTROL

Andrey Valentinovich Lenshin — Grand Dr. in Engineering, Professor of Department, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Evgeny Vladimirovich Kravtsov — Grand Dr. in Engineering, the Head of the Educational and Methodological Center, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

Ivan Andreevich Sidorenko — Postgraduate Student, Department 54, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: Ivan.Sidorenko.95@yandex.ru

Address: 394064, Russian Federation, Voronezh, Starykh Bolshevikov str., 54 a.

Abstract: Currently, it is impossible to imagine the process of combat use of images of weapons, military equipment, military facilities and actions of troops without the implementation of measures to counter the technical means of intelligence of foreign states. The hybrid nature of modern armed conflicts indicates that technical intelligence can also be conducted by States that are not involved in the conflict, but provide intelligence data to one of the parties. Under these conditions, when assessing the capabilities of foreign intelligence services, it is necessary to take into account the most dangerous technical means, the characteristics of whose intelligence equipment are the most advanced. In the context of significantly increased capabilities of foreign technical intelligence, the authors reasonably determined the purpose of the work, which is to develop mathematical and software to increase the efficiency of assessing the capabilities of radar reconnaissance tools. Its solution makes it possible to make a significant contribution to improving the protection of weapons, military, special equipment, military facilities and troops from foreign technical intelligence, which ensures an increase in the defense capability of our country. The mathematical and software apparatus pro-

posed in the work is based on calculating the probability of intelligence accessibility of objects of complex technical control, taking into account the attenuation coefficients obtained at previous stages and further recalculation taking into account the probabilities of a false alarm and missing a target.

Keywords: probability of detection, radar reconnaissance, operational assessment, comprehensive technical control.

References

1. *Kupryashkin I.F., Likhachev V.P.* Space radar survey of the Earth's surface under interference conditions: monograph. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2014. 460 p.
2. Aviation radio vision systems: a monograph. Edited by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 648 p.
3. *Menshakov Yu.K.* Fundamentals of protection from technical intelligence. Moscow: Maska, 2017. 572 p.
4. *Sakhnin A.A., Ignatenkov V.G.* Protected information space. Comprehensive technical control of radio-electronic devices. Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom, 2016. 336 p.
5. *Kupriyanov A.I., Shustov L.N.* Electronic warfare. Fundamentals of theory. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2011. 800 p.
6. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Functional method of generalized parameters for operational assessment of the capabilities of technical intelligence tools. Radio engineering and telecommunication systems. 2021. No. 3. Pp. 23–32.
7. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Sidorenko I.A.* Modeling of a system for operational assessment of radar visibility of control objects. All-Russian Open Armand readings: Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: Moscow State University, 2024. Pp. 408–414.
8. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Sidorenko I.A.* Features of constructing a mathematical apparatus for assessing the capabilities of radar field reconnaissance. Radio engineering and telecommunication systems. 2022. No. 4. Pp. 15–24.
9. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Sidorenko I.A.* Mathematical apparatus for the operational assessment of the capabilities of radio and radio engineering intelligence in the forest area. Radio engineering and telecommunication systems. 2023. No. 4. Pp. 72–79.
10. *Sidorenko I.A.* Software module of the system for evaluating the effectiveness of countering radar species reconnaissance, taking into account the attenuation multiplier. Certificate of state registration of the computer program No. 2022614275 (RU), date of state registration 18.03.2022.