

Применение математического обеспечения системы оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки при распределении средств контроля

А.В. Леншин¹, Е.В. Кравцов¹, И.А. Сидоренко¹

¹ 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

Предложен модернизированный математический аппарат для оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом распределения имеющихся сил и средств контроля по объектам защиты, используемый в специальном программном обеспечении средств комплексного технического контроля.

Ключевые слова: радиолокационная разведка, оперативная оценка, радиолокационная заметность, программное обеспечение.

The use of mathematical support for the system of operational assessment of the capabilities of radar field reconnaissance in the allocation of controls

A.V. Lenshin¹, E.V. Kravtsov¹, I.A. Sidorenko¹

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

An upgraded mathematical apparatus is proposed for the operational assessment of the capabilities of radar field reconnaissance, taking into account the distribution of available forces and controls for protection facilities, used in special software for integrated technical control.

Keywords: radar reconnaissance, operational assessment, radar visibility, software.

Введение

Исследования возможностей иностранных технических разведок для получения данных о Вооруженных Силах Российской Федерации, вооружении, военной и специальной техники демонстрируют непрерывную модернизацию и расширение потенциала разведывательных служб ведущих стран мира. Радиолокационная видовая разведка (РЛР), чье оборудование размещается на разнообразных носителях, является одним из наиболее эффективных и оперативных способов технической разведки [1–3]. Внимание к России как к разведывательной цели значительно возросло. Приоритетами иностранных разведок являются процессы формирования России как независимого государства в глобальном масштабе, ее внутренняя и внешняя политика, военная стратегия и ее практическое осуществление, передовые образцы военной техники и вооружений, а также направления научно-технических разработок.

Противодействие техническим средствам разведки (ПД ТСР), направленное на уменьшение эффективности сбора данных о войсках, военных объектах и вооружении, всегда требует времени и ресурсов. В связи с ограниченностью выделяемых средств, критически важно определить оптимальный уровень ПД ТСР, обеспечивающий решение задачи с минимальными затратами и максимальной эффективностью [4, 5]. Обоснование мероприятий ПД ТСР на основе критерия оптимальности, учитывающее важность информации, наличие технических каналов утечки информации (ТКУИ), возможности

противника по восстановлению сведений о вооружении и технике, и ресурсы обороняющейся стороны, осуществляется по результатам задач, возложенных на подразделения комплексного технического контроля (КТК).

В современных условиях противодействие разведывательной деятельности становится все более актуальным, особенно в свете постоянно меняющейся обстановки на международной арене. Одним из наиболее сложных аспектов данной задачи является необходимость многократной оценки разведывательной доступности объектов защиты (ОЗ) и принятие эффективных мер по их охране. Одним из наиболее эффективных подходов к решению данной проблемы является использование математических моделей и алгоритмов для оперативной оценки возможностей средств радиолокационной разведки (РЛР), рассмотренных в работах [6–9].

Модели и алгоритмы позволяют не только проанализировать текущую разведывательную ситуацию, но и предсказать возможные сценарии действий противника, что, в свою очередь, способствует более обоснованному принятию решений по защите ОЗ. Однако существует ряд факторов, которые могут существенно повлиять на точность таких оценок. К ним относятся время, в течение которого осуществляется разведка, а также наличие различных препятствий на пути радиолокационных сигналов (например, природные ландшафтные условия или метеорологические явления). Эти аспекты были подробно рассмотрены в работе [10] и решены за счет разработки специального программного обеспечения с применением электронных карт местности и матрицы высот (рисунок 1).

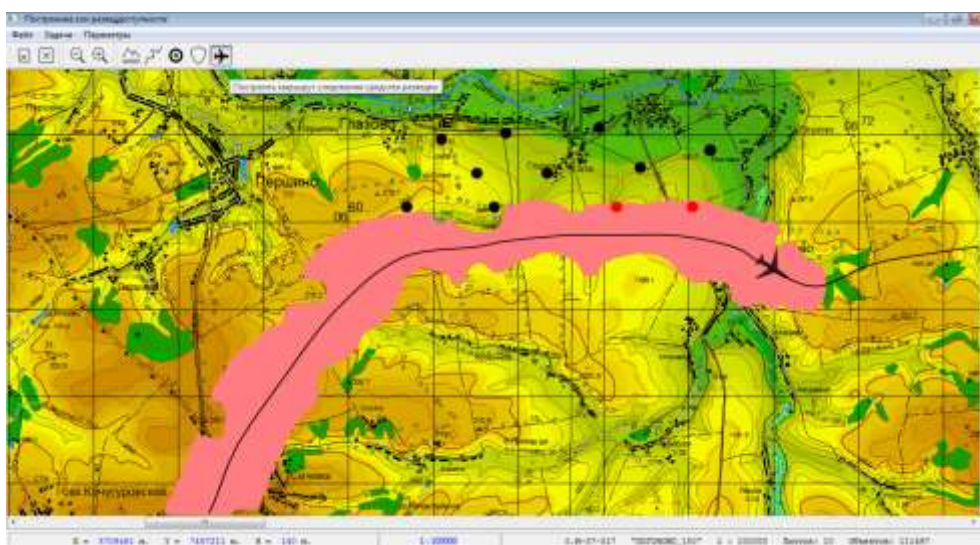


Рис. 1. Применение электронных карт для оценки возможностей средств РЛР

Программное обеспечение позволяет оперативно и точно с учетом рельефа местности и в автоматизированном режиме оценить разведдоступность объекта контроля. Однако ограниченный ресурс сил и средств контроля не позволяет в полной мере охватить выявленные разведдоступные объекты. В рамках данной работы будет рассмотрена алгоритмическая база рационального распределения сил и средств КТК по объектам РЛР. Разработка и внедрение таких алгоритмов позволит создать более эффективные инструменты для анализа разведывательной обстановки, что, в свою очередь, повысит уровень защиты объектов и снизит риски, связанные с разведывательной деятельностью противника.

Таким образом, интеграция современных технологий и математических методов в процесс оценки разведывательной доступности объектов защиты представляет собой

важный шаг к улучшению системы ПД ТСР. Это не только повысит качество принимаемых решений, но и позволит оперативно реагировать на изменения в обстановке, что является ключевым фактором в обеспечении безопасности и защиты интересов государства. В конечном итоге, эффективное противодействие разведывательным операциям требует комплексного подхода, включающего как всестороннюю оценку разведдоступности, так и применением имеющихся сил и средств, что и будет являться основным направлением данной работы.

Постановка задачи

Структура и содержание методики рационального распределения ресурса контроля по объектам защиты от средств РЛР определяется следующими основными исходными положениями.

1. Контролируемые объекты имеют сложную иерархическую структуру: они состоят из значительного количества территориально распределенных объектов КТК. В связи с этим возникает необходимость оценки степени охвата контролем объектов по отдельности и оценки степени охвата группировки в целом [11].

2. Заметное увеличение числа вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) с охраняемыми параметрами (ОП), а также средств РЛР в современных условиях значительно усложняет оперативную идентификацию ТКУИ.

3. Для обеспечения необходимого охвата объектов контроля требуется автоматизация как процедур оценивания вероятности обнаружения объекта защиты средствами РЛР, так и планирование применения средств контроля.

Решение поставленной задачи по автоматизации сводится к решению ряда подзадач по распределению ресурса:

1) разработка и накопление баз данных (БД) характеристик ТСР, ОЗ, условий ведения разведки;

2) применение электронной карты местности в решении расчетных задач распределения;

3) применение автоматизированных оперативных методик оценки разведдоступности ОЗ;

4) комплексирование результатов относительно отдельного средства контроля и средств в группировки в целом.

Целью работы является разработка математического аппарата для оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом распределения имеющихся сил и средств КТК по ОЗ для специального программного обеспечения средств КТК.

Результаты исследований

Представим математическую модель контроля объектов. Объем контроля определяется числом контролируемых объектов, частотой возникновения запросов на контроль, требуемым временем контроля, удаленностью объектов и количеством используемых ресурсов, а также их мобильностью (временем развертывания, свертывания и скоростью перемещения между объектами) [4, 5, 11].

Комплекс средств контроля представляется как n -канальная система массового обслуживания (СМО) с ограничением на среднее время ожидания заявок в очереди (n – число средств КТК). Задачи контроля рассматриваются как заявки на обслуживание, поступающие в систему. Поток поступления заявок – простейший с интенсивностью λ ; время обслуживания и ожидания в очереди – случайные величины с известными средними значениями. Объекты необходимо проконтролировать в установленные сроки. Допускается задержка начала контроля при отсутствии свободных средств контроля, что

соответствует модели СМО с ограниченным временем ожидания [8]. Величина задержки $\bar{t}_{ОЖ}$ не должна превышать разницу между средним временем обнаружения объектов разведкой противника t_{CP} и временем пресечения нарушения t_{PP} и определяется из условия

$$\bar{t}_{ОЖ} \leq t_{CP} - t_{PP} = t_{CP} - (t_K + t_{OPГ}). \quad (1)$$

Временной интервал обнаружения нештатной ситуации обозначается как t_K , а время, затрачиваемое на подготовку и реализацию мер по устранению нарушения, как $t_{OPГ}$. Продолжительность этапа обнаружения может варьироваться от десятков минут до нескольких дней. Распределение времени, требуемого на выполнение каждого контрольного мероприятия, а также времени ожидания заявки в очереди на обслуживание, может быть любым, при этом математическое ожидание для этих величин составляет $t_{ОБС}$ и $\bar{t}_{ОЖ}$ соответственно. Процесс выполнения каждой задачи рассматривается как последовательность этапов, включающих сбор ресурсов, их транспортировку из одной зоны контроля в другую, развертывание и непосредственное осуществление контрольных действий. Содержание этих этапов может варьироваться в зависимости от ситуации.

Среднее время, необходимое для выполнения задачи (обслуживание заявки) $t_{ОБС}$, определяется как

$$t_{ОБС} = t_{CB} + t_{П} + t_{PAЗ} + t_K, \quad (2)$$

где t_{CB} , $t_{П}$, $t_{PAЗ}$, t_K – среднее время свертывания, перемещения, развертывания и контроля соответственно.

Эффективность СМО оценивается вероятностью отказа в обслуживании запроса $P_{ОТК}$, зависящей от числа каналов (n) и параметров $\beta = t_{ОБС} / \bar{t}_{ОЖ}$ и $\alpha = \lambda t_{ОБС}$ [8]. Эта вероятность связана со степенью охвата контролем соотношением

$$\pi_j = 1 - P_{ОТК}. \quad (3)$$

Модели СМО учитывают динамику контроля объектов, но не акцентируют внимание на качестве контроля каждого объекта РЛР. Предполагается, что любые нарушения на объекте выявляются при контроле с абсолютной достоверностью.

Рассмотрим математическую модель зонального контроля объектов РЛР [12]. Средства РЛР можно представить как элементы СМО. Обслуживание запроса (наличие ОЗ в районе разведки) состоит из этапов: а) обнаружение объекта; б) классификация объекта; в) анализ совокупности объектов. Некоторые этапы могут отсутствовать.

Степень охвата контролем – это доля проконтролированных ОЗ от общего количества. Численно она равна вероятности контроля ОЗ, имеющего демаскирующий признак (ДП). Контроль ОЗ включает обнаружение объекта и его классификацию.

Вероятность контроля ОЗ определяется по формуле

$$W_{ОЗ} = P_{ПО} \cdot P_{ПК}, \quad (4)$$

где $P_{ПО}$ – вероятность обслуживания заявки подсистемой обнаружения; $P_{ПК}$ – вероятность обслуживания заявки подсистемой классификации.

Имеется несколько (n) приемников поиска ОЗ, которые осуществляют поиск путем разведки района или конкретной области с объектом. При обнаружении ОЗ в одном из районов разведки подается заявка в подсистему периодического контроля на классификацию выявленного ОЗ. Вероятность обнаружения ОЗ за время его существования определяется выражением

$$P_{ОБН} = \frac{t_{ОЗ}}{T_{ПП}} [1 - \exp[-T_{ПП}/t_{ОЗ}]], \quad (5)$$

где $t_{ОЗ}$ – средняя продолжительность ведения РЛР в районе ОЗ; $T_{ПП}$ – общий период ведения РЛР;

$$T_{ПП} = \begin{cases} \frac{S_0}{\gamma n} + \frac{S_0 \tau_{АН} \xi}{n} & \text{при свободном поиске ОЗ,} \\ \frac{N}{n} (\tau_{АН} + \tau_{ПЕР}) & \text{при поиске в фиксированном районе,} \end{cases} \quad (6)$$

S_0 – общая площадь района РЛР; γ – скорость разведки минимального района; $\tau_{АН}$ – время анализа объекта, необходимое для его обнаружения ($\tau_{АН}$ зависит от размера объекта, применения средств маскировки и имитации); ξ – плотность разведки; N – количество объектов в районе; $\tau_{ПЕР}$ – время перестройки средств РЛР. При выводе формулы (6) полагалось, что ОЗ, находящиеся в пределах зоны разведки, обнаруживаются достоверно.

Для определения вероятности обслуживания заявки подсистемой классификации воспользуемся формализацией функционирования этой подсистемы в виде СМО с ограниченным средним временем ожидания заявок в очереди. Возможность такой формализации обусловлена тем, что классификация по заявке, поступающей из подсистемы обнаружения, могут быть выполнены с некоторой задержкой.

Величина такой задержки определяется из условия

$$\bar{t}_{ОЖ\ 2} \leq t_{ИЗЛ} - t_{ОБН} - t_{ОБС\ 2}, \quad (7)$$

где $t_{ОБН} = T_{ПП}/2$ – среднее время обнаружения ОЗ; $t_{ОБС\ 2}$ – время классификации ОЗ, которое для автоматизированных подсистем $t_{ОБС\ 2} \approx 2...3$ с, для неавтоматизированных – не менее 100 с.

Если правая часть выражения (7) меньше нуля, то $\bar{t}_{ОЖ\ 2}$ следует считать равным нулю и использовать для вычисления вероятности обслуживания известную модель СМО с потерями заявок [8]. Интенсивность входного потока заявок подсистемы классификации рассчитывается по формуле

$$\lambda_{12} = M/T_{ПП}, \quad (8)$$

где M – количество ОЗ, обнаруженных подсистемой обнаружения за время $T_{ПП}$;

$$M = \begin{cases} \frac{\Phi_0}{K_f} & \text{при свободном поиске ОЗ,} \\ N\rho & \text{при поиске в фиксированном районе,} \end{cases} \quad (9)$$

K_f – коэффициент прореживания объектов (в процессе разведки ряд объектов, не являющихся объектами разведки, исключаются из дальнейшего анализа), $K_f \approx 2,60...2,85$; $\rho = t_{ОЗ}/(t_{ОЗ} + t_{П})$ – относительное время нахождения ОЗ в районе разведки; $t_{П}$ – средняя продолжительность паузы между разведкой.

Вероятность отказа в обслуживании заявки $P_{ОТК\ 2}$ подсистемой классификации зависит от параметров $\alpha = \lambda_{12}t_{ОБС\ 2}$, $\beta = t_{ОБС}/\bar{t}_{ОЖ}$, n_2 (n_2 – количество каналов обслуживания в подсистеме классификации). Вычислив эти параметры, находим $P_{ОТК\ 2}$ и вероятность обслуживания $P_{ОБС}$.

По разработанной в работе [8] методике и с учетом необходимого времени контроля объектов РЛР получен алгоритм рационального распределения сил и средств контроля по ОЗ, представленный на рисунке 2.

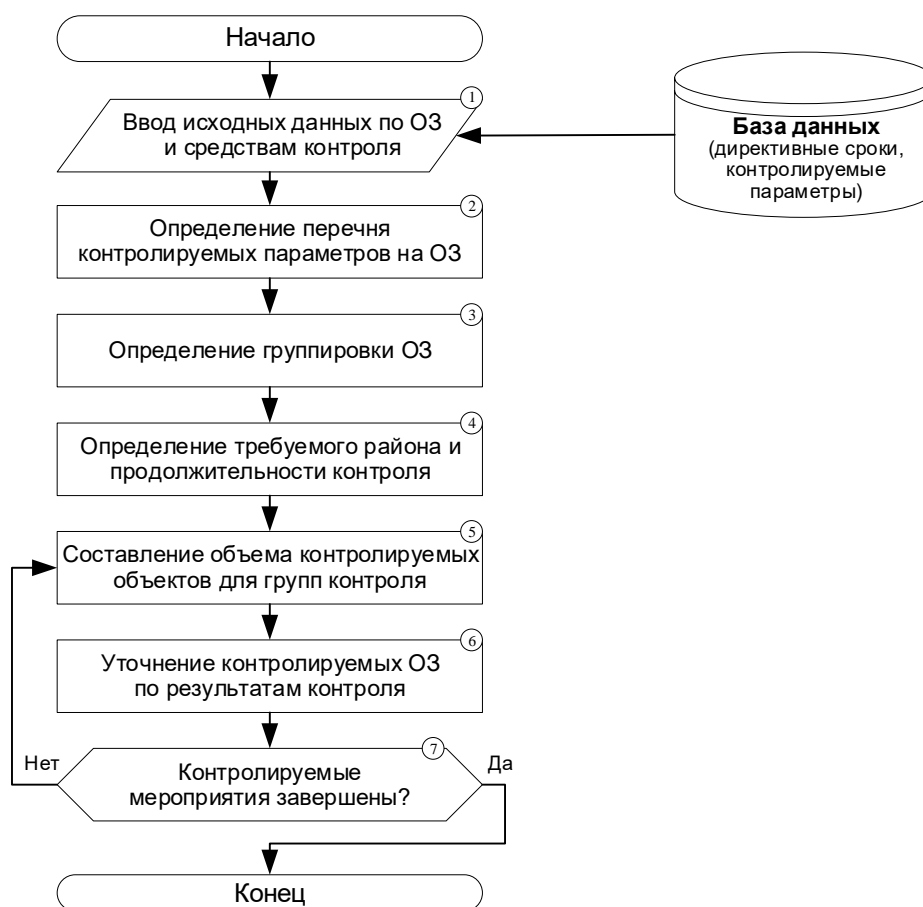


Рис. 2. Алгоритм определения рационального объема контрольных мероприятий и объектов РЛР

Алгоритм определения рационального объема контрольных мероприятий и объектов РЛР за заданный период времени сводится к выполнению представленной на рисунке 2 последовательности действий. В блоке 1 вводится перечень контролируемых объектов РЛР и средств имитации, из базы данных загружаются директивные сроки проведения мероприятий контроля.

В блоке 2 составляется график потребности в контролируемых параметрах. При составлении графика учитывается комплектация объекта РЛР, применяемые меры скрытия и имитации, результаты оценки возможностей средств разведки противника. В перечень не включаются потребности в контроле по тому ОЗ, по которому разведка не в состоянии обнаружить объект, если даже не применяются какие-либо меры ПД ТСР. Все ОЗ, хотя бы частично, попадают как минимум под одно средство разведки.

В блоке 3 определяются перечни районов контроля и состав входящих в них ОЗ, которые могут быть проконтролированы каждой группой контроля из одного позиционного района. В блоке 4 оценивается требуемая продолжительность контроля ОЗ. Требуется определить такое распределение N_m ($m = \overline{1, M}$) каналов обнаружения M объектов контроля по L участкам контроля, при котором:

- 1) обеспечиваются требуемый охват контроля и минимум занятых средств контроля;

- 2) достигается необходимая оперативность ведения контроля;
- 3) исключается дублирование контроля заданных участков двумя и более каналами обнаружения средств контроля;
- 4) время просмотра назначенных n -му ($n = \overline{1, N_m}$) каналу обнаружения контролируемых участков не превышает его технических возможностей;
- 5) назначенные для контроля n -му каналу обнаружения участки попадают в его район.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид. Определить матрицу $X_0 = \|x_{mnl}\|_{M, N_m, L}$, для которой

$$\sum_{m=1}^M \max_{1 \leq n \leq N_m} x_{mnl} \rightarrow \min, \quad 1 \leq l \leq L, \quad (9)$$

$$x_{mnl} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta f_l \cap \Delta F_{mn} \text{ и } R_{ms} \geq R_0, \\ 0, & \text{в иных случаях,} \end{cases} \quad (10)$$

при линейных ограничениях на переменные

$$\sum_{l=1}^L t_{mnl} x_{mnl} \leq T_{mnl}, \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} x_{mnl} \leq 1, \quad (12)$$

а также при условии

$$t_{mnl} \leq t_l, \quad (13)$$

где t_{mnl} – времена просмотра m -м средством контроля по n -му каналу l -го участка; t_l – требуемая оперативность контроля l -го участка контролируемого района.

Данная задача относится к задачам нелинейного целочисленного программирования. Для ее решения определено правило выбора для n -го канала обнаружения m -го средства контроля участков. Для этого введено понятие «приоритетности» контролируемых участков: участок считается приоритетнее другого участка, если ОЗ, попадающие в участок, доступнее меньшему числу средств контроля, меньше важность ОС, и, кроме того, участок характеризуется большей требуемой оперативностью контроля t_l , если

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{ms} \delta_{ls} < \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{ms} \delta_{(l+1)s}, \quad t_l > t_{l+1}, \quad (14)$$

$$a_{ms} = \begin{cases} 1, & \text{если } R_{ms} \geq R_0, \\ 0, & \text{в иных случаях,} \end{cases} \quad (15)$$

$$\delta_{ls} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta l_l \cap \Delta L_s \neq \emptyset, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (16)$$

Правило выбора для n -го канала обнаружения m -го средства контролируемых участков состоит в следующем: l -й участок контролируемого района считается выбранным, если суммарное время контроля данного участка и всех более приоритетных контролируемых участков не превышает минимального значения требуемой оперативности их контроля, т.е.

$$\sum_{l_0=1}^{L_0} t_{mnl_0} + t_{mnl} \leq \min_{1 \leq l_0 \leq L_0} \{t_{l_0}, t_l\}, \quad (17)$$

где L_0 – число контролируемых участков с приоритетом выше, чем у L -го участка ($L_0 \leq L-1$).

В качестве оптимизируемого показателя используется относительная суммарная «степень охвата» объектов и их контролируемых характеристик, взвешенная по их относительной важности и информативности их контролируемых характеристик в основных физических полях, вычисляемая по формуле

$$\Phi(U, T_a) = \sum_{i=1}^N \beta_i \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \delta_{ijl}^{\gamma_{ij}}(T_a, U) \alpha_{ij} \quad (18)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} = 1 \text{ для } \forall i = \overline{1, N}, \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L \delta_{ijl}^{\gamma_{ij}} \leq 1 \text{ для } \forall t \in [0, T_a], i = \overline{1, N}, j = \overline{1, J}, \quad (20)$$

где $\{\gamma_{ij}\}$ – множество задач контроля для каждого i -го объекта в каждом j -м районе; $\delta_{ijl}^{\gamma_{ij}}(T_a, U)$ – показатель степени выполнения задач контроля за анализируемый период времени $[0, T_a]$; U – план-график применения средств контроля, описываемый параметрами $T_k, \Delta\tau_k, L_k$.

Полученное математическое обеспечение позволяет автоматизировать процесс планирования и распределение ресурса контроля по ОЗ. Пример полученного специального программного обеспечения представлен на рисунке 3.

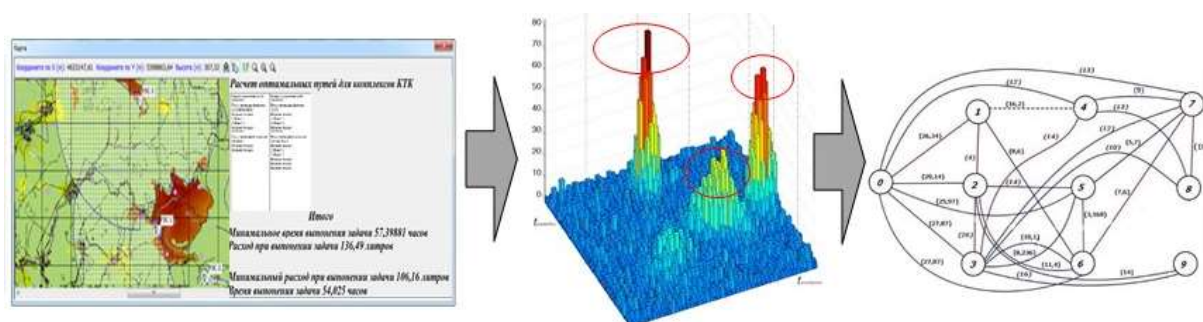


Рис. 3. Специальное программное обеспечение по распределению средств контроля

Вывод. Таким образом, предложенный в работе модернизированный математический аппарат для оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки для распределения имеющихся сил и средств КТК по объектам защиты позволяет определить долю проконтролированных ОЗ от их общего количества, оценить необходимую продолжительность контроля, распределить имеющиеся силы и средства КТК. Кроме того, проведена автоматизация процесса распределения с использованием специального программного обеспечения средств комплексного технического контроля.

Литература

1. Кравцов Е.В., Волков А.В., Кушев С.С., Рюмшин Р.И. Теоретические основы технических разведок: учебное пособие. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – 307 с.
2. Бражников А.Е., Меньшаков Ю.К. Иностранные разведки. Сегодня. – М.: Медиа Группа «Авангард», 2015. – 458 с.

3. Леньшин А.В., Рюмшин Р.И., Кравцов Е.В., Сенюков Г.А. Оценка возможностей радиотехнической разведки по результатам контроля радиоэлектронных средств комплексом радиотехнического контроля // Динамика сложных систем – XXI век. – 2016. – № 3. – С. 29–35.
4. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Методика адаптивного распределения сил и средств комплексного технического контроля по объектам защиты в различных физических полях разнесенного приема // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2020. – № 4. – С. 15–22.
5. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Оптимизация распределения разнородного ресурса комплексов и средств комплексного технического контроля по объектам защиты в различных физических полях // Телекоммуникации. – 2021. – № 2. – С. 17–20.
6. Леньшин А.В., Сидоренко И.А., Кравцов Е.В. Особенности построения математического аппарата оценки возможностей радиолокационной видовой разведки // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – № 4. – С. 29–38.
7. 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. 72–78.
8. 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 [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2022. – С. 422–428.
9. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Математическое обеспечение системы оперативной оценки возможностей радиолокационной видовой разведки с учетом фактора метеообразований // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: МИ ВлГУ, 2023. – С. 399–404.
10. Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Сидоренко И.А. Моделирование системы оперативной оценки радиолокационной видовой заметности объектов контроля // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: МИ ВлГУ, 2024. – С. 408–414.
11. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Методика определения частоты и продолжительности контроля эффективности защиты информации на критически важных объектах // Телекоммуникации. – 2021. – № 5. – С. 30–34.
12. Леньшин А.В., Кравцов Е.В. Алгоритм распределения разнородного ресурса комплексов и средств комплексного технического контроля по объектам контроля и защиты // Телекоммуникации. – 2017. – № 8. – С. 13–17.