

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ**Кравцов Евгений Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, начальник 54 кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

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

Аннотация: Предложен метод, позволяющий проводить обобщённые оценки возможности радиотехнической разведки по обнаружению маломощных источников радиоизлучения с учётом временного фактора для усреднённых параметров средств по видам радиотехнической разведки на основе функционального подхода к определению вероятностных характеристик.

Ключевые слова: оперативная оценка, радиотехническая разведка, маломощные источники радиоизлучения, коэффициент различимости.

В настоящее время конфликтное противоборство в спектре электромагнитных волн характеризуется возрастающей ролью радиотехнической разведки (РТР) в информационном обеспечении действий войск [1]. Постоянно нарастающая динамика изменения оперативной обстановки требует учёта фактора времени при оценке возможностей РТР и разработке мероприятий по противодействию техническим средствам разведки (ПД ТСР) иностранных государств.

В работе [2] предложен функциональный метод оперативной оценки возможностей технических средств разведки, позволяющий за счет типизации и обобщения исходных данных, определяющих характеристики технических средств разведки, объектов защиты и условия ведения разведки, определять функциональные зависимости показателей защищённости объектов защиты от дальности ведения разведки в условиях неполноты и неопределённости исходных данных, характерных для высокой динамики ведения технической разведки. При этом в качестве обобщённой оценки принята функциональная зависимость вероятности обнаружения P_0 от дальности ведения разведки D_p в виде

$$P_0 = f(D_p). \quad (1)$$

Преимуществом такого подхода является явная связь показателя оценки с зоной дей-

ствия, поскольку конфликтная ситуация вне пространства не реализуется. Кроме того, для упрощения оценки используются обобщённые коэффициенты, в которые объединяются усреднённые параметры средства разведки, объекта разведки и условий ведения разведки, облегчающие анализ. Недостатком предложенного в [2] подхода является отсутствие учёта временного фактора при анализе возможности обнаружения сигналов маломощных источников радиоизлучения (ИРИ).

Цель статьи — разработка метода оценки возможностей радиотехнической разведки по обнаружению маломощных ИРИ с учётом временного фактора проявления их сигнальных демаскирующих признаков. Метод позволяет в условиях неполноты исходных данных по средствам радиотехнической разведки и условиям её ведения определять вероятность обнаружения сигналов ИРИ.

При получении подобной оценки будем основываться на соотношении (1), представив его в виде

$$P_0 = f(t, D_p), \quad (2)$$

где t — текущее время РТР.

В этом случае зависимость вероятности обнаружения от времени ведения РТР примет следующий вид

$$P_0(t) = 1 - \exp\left[-\frac{t}{T_H} \cdot \ln\left(1 + \frac{P_{CBX}}{\gamma \cdot (P_{III} + P_{II})}\right)\right], \quad (3)$$

где T_H — минимально необходимая длительность наблюдаемого сигнала; P_{CBX} — мощность сигнала на входе приёмника средства РТР; P_{III} — мощность шума на входе приёмника; P_{II} — мощность помехи на входе приёмника; $\gamma \geq 1$ — коэффициент различимости [3], значение которого определяется, в общем случае, требуемыми показателями качества обнаружения [4].

При проведении оценочных расчётов значение коэффициента различимости может быть принято равным трём ($\gamma = 3$). Далее будем полагать, что помехи отсутствуют ($P_{II} = 0$), а рассматриваемая ситуация характерна для случаев с незначительной мощностью излучения сигнала ИРИ (мкВт...мВт). В этом случае второе слагаемое под знаком логарифма невелико.

Тогда соотношение (3) преобразуется к виду

$$P_0(t) \approx 1 - \exp\left[-\frac{t}{T_H} \cdot \frac{P_{CBX}}{\gamma \cdot P_{III}}\right]. \quad (4)$$

Отношение $P_{CBX}/(\gamma \cdot P_{III})$ представляет собой отношение сигнал/шум на входе приёмника средства РТР с учётом коэффициента различимости γ , которое определяет все количественные показатели оценки возможностей РТР [5–7].

В общем случае мощность шумов на входе приёмника РТР P_{III} зависит от собственных шумов приёмного устройства $P_{III\text{пр}}$ и шумов антенны $P_{III\text{А}}$. При допущении о равенстве ширины полосы пропускания приёмника средства РТР $\Delta f_{\text{пр}}$ и ширины спектра сигнала РЭС Δf_c ($\Delta f_{\text{пр}} \approx \Delta f_c$) мощность шума определяется суммой $P_{III} = P_{III\text{пр}} + P_{III\text{А}}$. В диапазоне УКВ при $f \geq 50$ МГц шумы приёмника и антенны соизмеримы и уровень их таков, что для оце-

ночных расчётов вполне достаточен учёт только шумов приёмника.

Поэтому часто в ТТХ на средства РТР задается предельная чувствительность приёмника P_{min} и можно принять $P_{III} \approx P_{\text{min}}$. Чаще всего значение чувствительности $N_{\text{min}}(f_c)$, измеренное в полосе частот 1 Гц (дБ/Вт/Гц), выражается в дБ относительно 1 Вт. В этом случае значение чувствительности [Вт] будет

$$P_{\text{min}} = 10^{0,1N_{\text{min}}(f_c)} \cdot \Delta f_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Нередко значение $N_{\text{min}}(f_c)$, измеренное в полосе частот 1 Гц, выражается в дБ относительно 1 мВт, тогда $P_{\text{min}} = 10^{0,1(N_{\text{min}}(f_c)-3)} \cdot \Delta f_{\text{пр}}$.

Мощность сигнала на входе приёмника, используя уравнение радиосвязи, представим в виде

$$P_{CBX} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \cdot \frac{P_s G_p \eta}{D_p^2} \cdot V, \quad (6)$$

где λ — длина волны; η — коэффициент потерь в приёмном тракте и за счёт несовпадения поляризаций антенны средства разведки и сигнала (для оценочных расчетов можно принять $\eta = 0,25$; G_p — коэффициент усиления приёмной антенны; P_s — эквивалентная (излучаемая) мощность ИРИ; $V \leq 1$ — множитель ослабления сигнала в атмосфере.

Значение коэффициента усиления антенны на частоте сигнала f_c часто задается в децибелах $R(f_c)$, дБ. Поэтому значение G_p в размах будет

$$G_p = 10^{0,1R(f_c)}. \quad (7)$$

Эквивалентная мощность ИРИ P_s в (6) рассчитывается или измеряется. При измерительном контроле ИРИ в рамках рассматриваемой задачи достаточно определения частоты излучения f_c , ширины спектра Δf_c и уровня излучения X , измеряемого, как правило, в дБ/мкВ. Можно показать [5], что методика пересчёта измеренного уровня X , дБ/мкВ, с учётом вход-

ного сопротивления средства измерения в P_3 , Вт, приводит к соотношению

$$P_3 \approx 0,02 \cdot 10^{0,1 \cdot X - 12}. \quad (8)$$

При отсутствии измерений расчёт P_3 производится по известной мощности передатчика РЭС P_{nep} и коэффициенту усиления антенны G_a в виде $P_3 = P_{nep} G_a g_a$, если разведдоступность оценивается по основному лепестку диаграммы направленности (ДНА) РЭС. Если учитывается уровень бокового излучения g_a , что наиболее вероятно, то

$$P_3 = P_{nep} G_a g_a. \quad (9)$$

При этом, для оценочных расчётов можно воспользоваться приближённым соотношением $G_a g_a \approx 0,1 \dots 0,25$. Здесь уровень 0,25 применим для директорных антенн, а уровень 0,1 — для зеркальных. Тогда с учётом (7) мощность сигнала на входе приёмника разведки будет определяться выражением

$$P_{CBX} = \frac{c^2 \cdot P_3 \cdot 10^{0,1R(f_c)} \eta}{(4\pi)^2 \cdot f_c^2 \cdot D_p^2} \cdot V, \quad (10)$$

где c — скорость света, а значение P_3 определяется на основании (8) или (9).

Определённую неоднозначность имеет место при задании значения минимально необходимой длительности наблюдаемого сигнала T_H . Действительно, с одной стороны существует огромное многообразие сигналов различных РЭС с разнообразными видами модуляции и манипуляции, прерывистых (импульсных) и квазинепрерывных с шириной спектра от сотен кГц до единиц ГГц. С другой стороны, необходим поиск сигнала ИРИ средством РТР в очень широком диапазоне частот, осуществляемый различными способами, анализ сигналов и возможно более точное измерение параметров, что требует обязательного накопления с осреднением результатов. В методическом аппарате оценки возможностей РТР общепринятым считается допущение (например, [8–10]) о том, что произведение времени ана-

лиза T_a на полосу пропускания должно удовлетворять неравенству $T_a \Delta f_{np} \gg 1$.

По-видимому, нижней границей приведённого неравенства следует считать цифру 10, а в качестве рабочих значений, как показывает анализ, обеспечивающих высокие показатели аппаратуры РТР, следует принять диапазон 50...100. Тогда, приняв условие, что $T_H = T_a$, в соотношение для показателя оценки следует подставить значение T_H из условия

$$T_H \geq \frac{B}{\Delta f_{np}}, \quad (11)$$

где значение коэффициента B принимает значение $B \in [50, 100]$.

С учётом полученных соотношений (5), (10) и (11) представим выражение (4) для вероятности обнаружения в виде

$$W_0(t, D_p) \approx 1 - \exp \left[- \frac{c^2 \cdot P_3 \cdot 10^{0,1R(f_c)} \eta}{(4\pi)^2 \cdot f_c^2 \cdot 10^{0,1N_{\min}(f_c)} \cdot \gamma \cdot B} \cdot V \cdot \frac{t}{D_p^2} \right], \quad (12)$$

Полученное соотношение связывает в явном виде параметры средства разведки, объекта разведки и условий ведения разведки, представляя эту связь функциональным образом от двух наиболее важных переменных — дальности и времени, что делает анализ разведдоступности более полным с возможностью представления в 3D графике.

Преобразуем соотношение (12), сгруппировав входящие в него параметры по их принадлежности так, чтобы обобщить в виде коэффициентов. Для этого объединим все постоянные и параметры, относящиеся к средству разведки, в виде коэффициента вида разведки k_{ep} , $[m^2/(Вт/Гц)]$

$$k_{ep} = \frac{c^2 \cdot 10^{0,1R(f_c)}}{(4\pi)^2 \cdot f_c^2 \cdot 10^{0,1N_{\min}(f_c)}}. \quad (13)$$

Соотношение (13) позволяет провести анализ, обобщить и представить данные по видам разведки в виде зависимостей $k_{ep}(f_c)$, которые затем можно использовать при оценке. Фраг-

мент таких зависимостей, полученных путём обобщения характеристик $N_{\min}(f_c)$ и $R(f_c)$ аппаратуры самолетов иностранных авиакомпаний (СИАК)), а также наземной (НР) и наземной разведки возимой (НРВ) представлены на рис. 1.

Далее объединим параметры, относящиеся к объекту разведки (ИРИ), в виде коэффициента ИРИ $k_{ИРИ}$ [Вт], включив в него некоторые постоянные

$$k_{ИРИ} = \frac{P_s \cdot \eta}{\gamma \cdot B}. \quad (14)$$

Здесь эквивалентная мощность излучения ИРИ P_s находится либо в соответствии с (8) для случая измерительного контроля, либо с использованием технических характеристик РЭС в соответствии с (9).

Потери в атмосфере на практике начинают учитывать для длин волн $\lambda \leq 3$ см. В этом случае значение множителя ослабления определяется соотношением

$$V = 10^{-0,1\alpha \cdot D_p}. \quad (15)$$

где α [дБ/км] — коэффициент затухания, зависящий от частоты, состояния атмосферы, характера трассы. Усреднённые по времени года значения $\alpha(f_c)$, полученные в работе [6], представлены в виде фрагмента на рис. 1, б.

Преобразованное с учётом обобщающих коэффициентов соотношение (12) приобретает вид

$$W_0(t, D_p) \approx 1 - \exp\left[-k_{ep} \cdot k_{ИРИ} \cdot V \cdot \frac{t}{D_p^2}\right]. \quad (16)$$

Для упрощения оценочных расчётов значения коэффициентов, входящих в (16), могут быть заранее определены и представлены в виде семейства графиков.

В качестве примера рассмотрим оценку возможностей средств РТР, оборудованных современными цифровыми приёмниками разведки для случаев их размещения на беспилотных летательных аппаратах среднего класса, или на самолетах иностранных авиакомпаний, а также наземных средствах по обнаружению маломощного ИРИ, представляющего кратковременный канал утечки, для следующих исходных данных. Цифровые приёмники разведки в диапазоне 10 МГц...2 ГГц имеют спектральный уровень мощности шума $N_{\min} = 10^{-18,6} \dots 10^{-19,5}$ Вт/Гц [1].

Примем для расчётов: значение рабочей частоты ИРИ $f_c = 500$ МГц; значение предельной чувствительности приёмника $N_{\min}(f_c) = 10^{-19}$ Вт/Гц; значение коэффициента различимости $\gamma = 3$; значение коэффициента

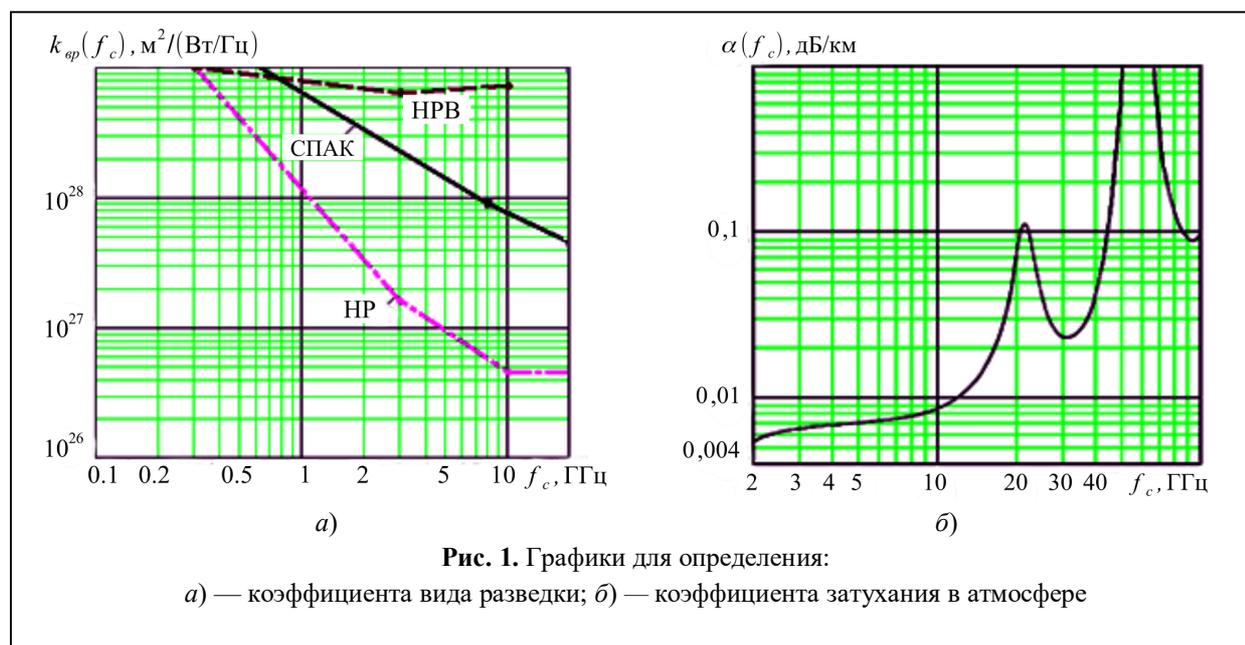


Рис. 1. Графики для определения:
 а) — коэффициента вида разведки; б) — коэффициента затухания в атмосфере

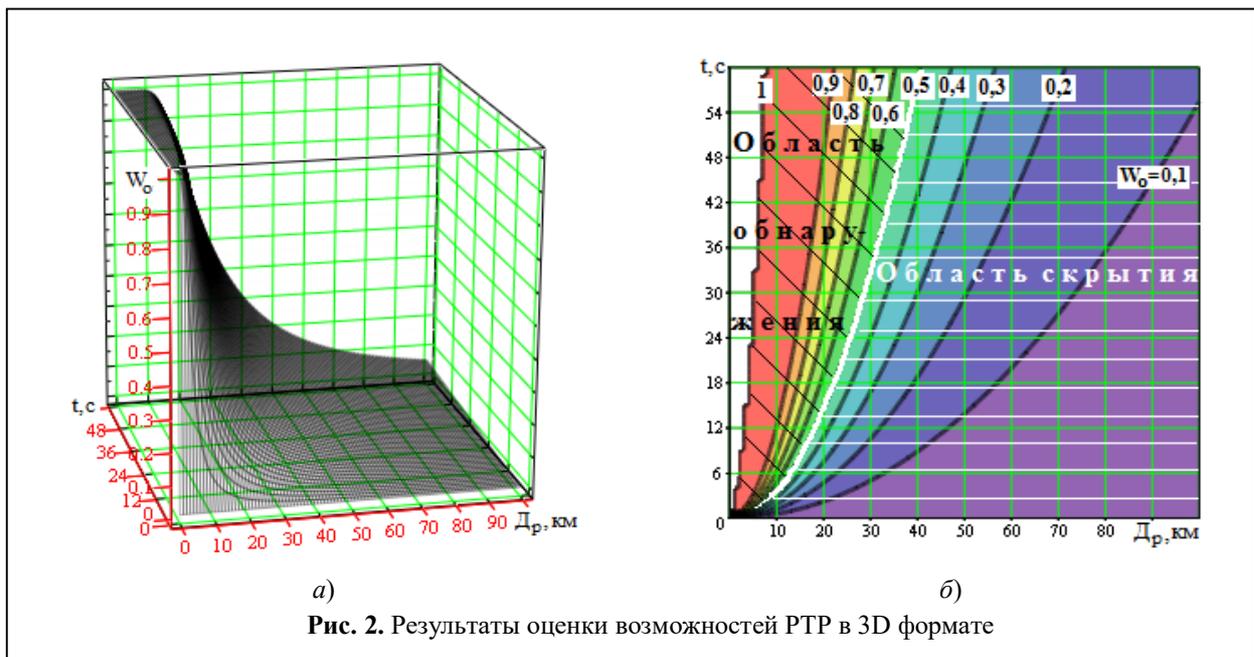


Рис. 2. Результаты оценки возможностей РТР в 3D формате

потерь $\eta = 0,25$; значение коэффициента, определяющего длительность сигнала ИРИ с учётом времени анализа $B = 100$; значение коэффициента усиления антенны средства РТР $G_p(f_c) = 1$ (случай слабонаправленной антенны); значение эквивалентной мощности излучения ИРИ $P_s = 10$ мкВт.

Для принятого значения рабочей частоты ослаблением сигнала ИРИ в атмосфере можно пренебречь (рис. 1, б), поэтому значение множителя ослабления принимаем $V = 1$. Результаты расчетов в соответствии с (16) в виде функциональных зависимостей вероятности обнаружения сигнала ИРИ от дальности и времени представлены на рис. 2.

Показанные на рис. 2, а графики в 3D формате дают как общее представление о характере зависимости вероятности обнаружения ИРИ средством РТР от времени ведения разведки и дальности, так и позволяют судить о конкретных диапазонах указанных параметров (хотя и грубо), в пределах которых обеспечивается то или иное значение вероятности обнаружения маломощного ИРИ.

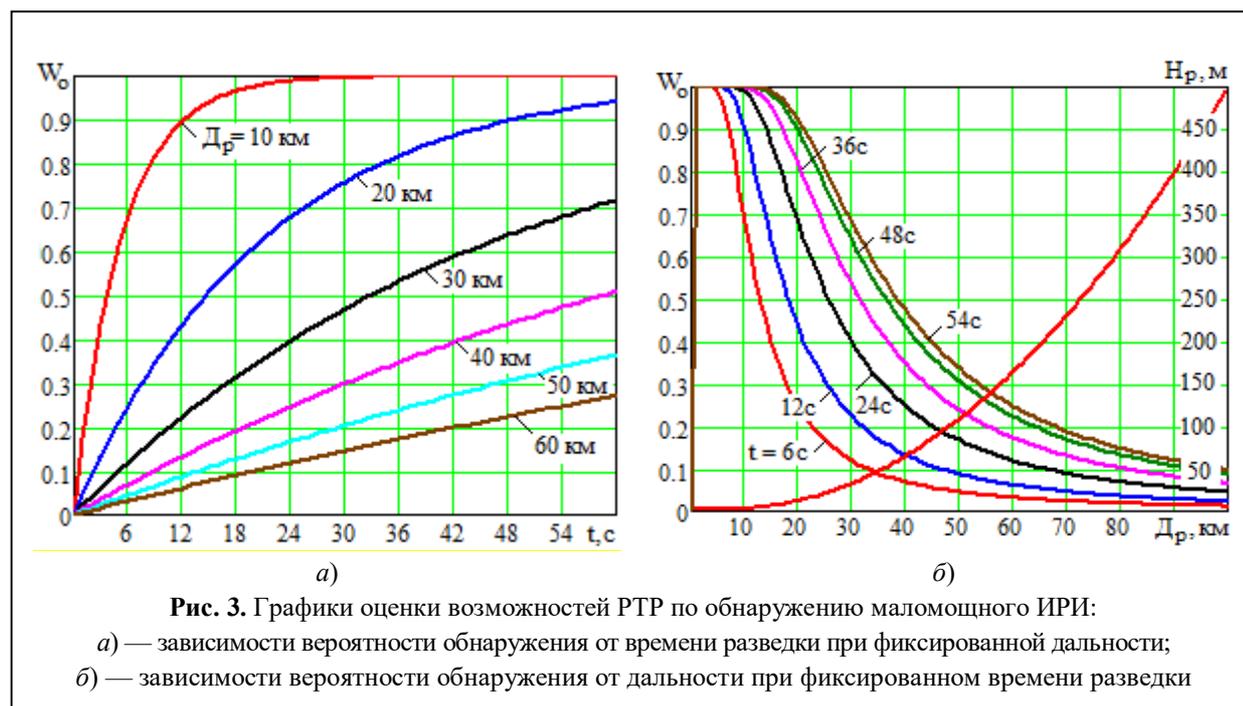
На рис. 2, б приведены контурные графики поверхностей равного уровня, представляющие собой сечения трёхмерной картины

$P_0 = f(t, D_p)$ (рис. 2, а) плоскостями $P_0 = const$, параллельными основанию (координатной плоскости t, D_p). Если принять в качестве граничного значения $P_0 = 0,5$, то с точки зрения разведоступности область возможных значений параметров t и D_p можно разделить на область обнаружения, в которой $P_0 > 0,5$, и область скрытия, где значения $P_0 \leq 0,5$.

Из графиков следует, что обнаружение маломощного ИРИ даже при относительно большом времени разведки возможно лишь в пределах 40 км, где $P_0 \geq 0,5$.

Достаточно детальное представление в количественном смысле относительно возможностей обнаружения маломощного ИРИ даёт анализ сечений графиков 3D формата, сделанных по осям координат. Эти сечения представлены на рис. 3.

Графики на рис. 3, а вида $P_0 = f(t)$ при $D_p = const$ позволяют ответить на вопрос о том, за какое время РТР реализует обнаружение маломощного ИРИ с заданной вероятностью при известной дальности. Например, если принять пороговое значение вероятности



$P_0 \geq 0,5$, то ИРИ на дальности $D_p = 10$ км обнаруживается за время $t \geq 4$ с, а на дальности $D_p = 30$ км — за время $t \geq 34$ с.

Эти графики при известной дальности до средства РТР и известном времени несанкционированного излучения позволяют оценить степень ущерба, либо определить допустимое время выхода в эфир при определённых обстоятельствах.

Графики на рис. 3, б вида $W_0 = f(D_p)$ при $t = const$ свидетельствуют о том, что, начиная с определённого значения, именно дальность в силу квадратичной зависимости от неё вероятности обнаружения решающим образом сказывается на значении этой вероятности при всё более слабом влиянии времени разведки. Следует обратить внимание в связи с этим на более «плотный» характер кривых с ростом t и D_p и, как следует и хода кривых, начиная с $D_p \geq 40$ км, увеличение времени разведки практически не приводит к обнаружению маломощного ИРИ.

Графики позволяют при проведении технического обслуживания РЭС, связанного с необходимостью проверки параметров излу-

ний на особый период, определять допустимое время включения передатчика на эквивалент антенны, чтобы гарантировать исключение добывания РТР информации об охраняемых сведениях на заданной дальности.

Таким образом, приведённый методический аппарат позволяет проводить обобщённые оценки возможностей РТР по обнаружению маломощных ИРИ с учётом временного фактора для усреднённых параметров средств по видам РТР на основе функционального подхода к определению вероятностных характеристик обнаружения.

Литература

1. Сахнин А.А., Игнатенков В.Г. Защищенное информационное пространство. Комплексный технический контроль радиоэлектронных средств. — М.: Горячая линия–Телеком, 2016. 336 с.
2. 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.
3. Леньшин А.В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. 590 с.
4. Кравцов Е.В. Методический подход к комплексной оперативной оценке возможностей выявления сведений об объектах защиты // Телекомму-

никации. 2020. № 9. С. 33–41.

5. *Меньшаков Ю.К.* Основы защиты от технических разведок: учебное пособие. М.: ИПЦ «Маска», 2017. 572 с.

6. *Леньшин А.В., Кравцов Е.В., Рюмиш П.И., Сеников Г.А.* Оценка возможностей радиотехнической разведки по результатам контроля радиоэлектронных средств комплексом радиотехнического контроля // Динамика сложных систем – XXI век. 2015. № 3. С. 29–35.

7. *Хорев А.А.* Оценка возможностей средств радиоразведки по перехвату информации // Специальная техника. 2009. № 2. С. 54–64.

8. *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.

9. *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.

10. *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.

Поступила 30 сентября 2021 г.

English

METHOD FOR DETECTING LOW-POWER RADIO SOURCES TAKING INTO

Evgeniy Vladimirovich Kravtsov — PhD, Associate Professor, the Head of Department 54, Air force Military Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin”.

E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

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

Abstract: The ever-increasing dynamics of changes in the operational situation requires taking into account the time factor when assessing the capabilities of radio intelligence and developing measures to counteract the technical means of intelligence of foreign states. The functional method of operational assessment of the capabilities of technical means of intelligence allows, by typing and generalizing the initial data that determine the characteristics of technical means of intelligence, objects of protection and conditions for conducting intelligence, to determine the functional dependencies of the indicators of the security of objects of protection from the range of reconnaissance in conditions of incompleteness and uncertainty of the initial data, which is characteristic of modern highly dynamic methods of conducting technical intelligence. At the same time, the functional method does not allow taking into account the time factor when analyzing the possibility of detecting signals from low-power radio sources. Under these conditions, there is a practical need to find methods for assessing the possibility of radio intelligence to detect low-power sources of radio emission, taking into account the time factor for averaged parameters of means by types of radio intelligence based on a functional approach to determining probabilistic characteristics. The solution proposed in this article allows for generalized assessments of the capabilities of radio intelligence to detect low-power sources of radio emission, taking into account the time factor for the averaged parameters of means by types of radio intelligence based on a functional approach to determining the probabilistic characteristics of detection. Practical testing of the proposed method has confirmed its validity in assessing the capabilities of radio intelligence of foreign states.

Keywords: operational assessment, radio engineering intelligence, low-power sources of radio emission, coefficient of discrimination.

References

1. *Sakhnin A.A., Ignatenkov V.G.* Protected information space. Complex technical control of radio-electronic means. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2016. 336 p.

2. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Functional method of generalized parameters for the operational assessment of the capabilities of technical means of intelligence. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2021. No. 3. Pp. 23–32.

3. *Lenshin A.V.* On-board systems and electronic suppression complexes. Voronezh: CPI "Nauchnaya kniga", 2014. 590 p.

4. *Kravtsov E.V.* Methodological approach to a comprehensive operational assessment of the possibilities of identifying information about the objects of protection. *Telekommunikacii*. 2020. No. 9. Pp. 33–41.

5. *Menshakov Yu.K.* Fundamentals of protection from technical intelligence: a textbook. Moscow: Maska, 2017. 572 p.

6. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V., Ryumshin R.I., Senyukov G.A.* Evaluation of the capabilities of radio-technical intelligence based on the results of monitoring of radio-electronic means by the radio-technical control complex. *Dinamika slozhnyh sistem – XXI vek*. 2015. No. 3. Pp. 29–35.

7. *Khorev A.A.* Evaluation of the capabilities of radio intelligence tools for intercepting information. *Special'nya tekhnika*. 2009. No. 2. Pp. 54–64.

8. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Methodology of adaptive distribution of forces and means of complex technical control over protection objects in various physical fields of spaced reception. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2020. No. 4. Pp. 15–22.

9. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Algorithm of distribution of heterogeneous resource of complexes and means of complex technical control on objects of control and protection. *Telekommunikacii*. 2017. No. 8. Pp. 13–17.

10. *Lenshin A.V., Kravtsov E.V.* Optimization of the distribution of a heterogeneous resource of complexes and means of complex technical control for protection objects in various physical fields. *Telekommunikacii*. 2021. No. 2. Pp. 17–20.