

УДК 621.396.96

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОЛОКАТОРА НА ЕГО ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ

**Панов Дмитрий Вячеславович**

кандидат технических наук, доцент, докторант военной академии войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского.  
E-mail: pdvlist@list.ru.

Адрес: 214027, г. Смоленск, ул. Котовского, 2.

**Аннотация:** В классической литературе по теоретическим основам радиолокации показатели качества обнаружения, как правило, рассматриваются для одного рэлеевского элемента разрешения. Однако фактически за цикл обзора пространства радиолокатор просматривает большое количество таких элементов, каждый из которых может явиться источником ложной тревоги. Поэтому, исходя из практических соображений, более объективным подходом представляется стабилизация уровня ложных тревог не в одном рэлеевском элементе разрешения, а за однократный просмотр радиолокатором зоны обзора. В статье показано, что при рассмотрении показателей качества обнаружения с использованием указанного подхода, повышение разрешающей способности радиолокатора при прочих равных условиях приводит к снижению его дальности действия в свободном пространстве. Например, при повышении разрешающей способности радиолокатора в 10 раз снижение его дальности действия в свободном пространстве может достигать 7 %.

**Ключевые слова:** дальность действия радиолокатора, разрешающая способность радиолокатора, коэффициент сжатия зоны обнаружения радиолокатора.

В классической литературе по теоретическим основам радиолокации показатели качества обнаружения, как правило, рассматриваются для одного рэлеевского элемента разрешения [1–5]. Однако фактически за некоторый интервал времени, равный циклу обзора пространства, радиолокатор (радиолокационная станция (РЛС)) просматривает большое количество таких элементов, каждый из которых может явиться источником ложной тревоги. Поэтому, исходя из практических соображений, при рассмотрении показателей качества обнаружения более объективным подходом представляется стабилизация уровня ложных тревог не в одном рэлеевском элементе разрешения, а за однократный просмотр радиолокатором зоны обзора.

Необходимо отметить, что в ряде работ показатели качества обнаружения для совокупности из  $m$  рэлеевских элементов разрешения рассматривались [6–11]. В настоящей статье предлагается оценить влияние непосредственно разрешающей способности радиолокатора на его дальность действия.

Постоянно возрастающие требования к возможностям современных РЛС по обнаружению и измерению координат отдельных объектов наблюдения стимулируют повышение их разрешающей способности [12–14]. Известно [15], что одним из путей повышения разрешающей способности РЛС и точности измерения координат объектов наблюдения является переход от простых зондирующих сигналов к сложным (например, с линейной частотной модуляцией или фазовой манипуляцией). Выражение для расчета потенциальной разрешающей способности РЛС по дальности  $\delta D$ , использующей в качестве зондирующих сигналов радиоимпульсы с прямоугольной огибающей, имеет вид [16]:

$$\delta D = c / (2\Delta f),$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве;  $\Delta f$  – ширина спектра зондирующего сигнала.

Пусть в импульсной однопозиционной РЛС обнаружения осуществлен переход к использованию сложных зондирующих сигналов и при этом ширина спектра  $\Delta f$  зондирующего сигнала увеличена в  $n$  раз. В этом случае в  $n$  раз

повысится разрешающая способность РЛС по дальности  $\delta D$ , а также в  $n$  раз возрастет исходное количество элементов разрешения  $m = \Psi_d / \delta D$  (где  $\Psi_d$  – протяженность сектора обзора РЛС по дальности) в зоне ее обзора.

Для случая, когда вероятности ложной тревоги  $F$  для всех рэлеевских элементов разрешения одинаковы, вероятность ложной тревоги для совокупности из  $m$  элементов  $F_m$  будет определяться выражением  $F_m = 1 - (1 - F)^m$  [5]. При повышении разрешающей способности РЛС по дальности  $\delta D$  в  $n$  раз вероятность ложной тревоги в зоне обзора радиолокатора, содержащей  $m \times n$  элементов разрешения, составит  $F'_m = 1 - (1 - F)^{m \times n}$ .

Очевидно, что для стабилизации значения вероятности ложной тревоги  $F_m$  за однократный просмотр радиолокатором зоны обзора необходимо в каждом новом (из  $m \times n$ ) рэлеевском элементе разрешения по дальности снижать вероятность ложной тревоги  $F$ , то есть обеспечить вероятность ложной тревоги  $F'$  ( $F' < F$ ). Записав равенство  $1 - (1 - F)^m = 1 - (1 - F')^{m \times n}$ , которое требуется обеспечить для стабилизации  $F_m$ , можно получить аналитическое выражение для расчета  $F'$ :

$$F' = 1 - \sqrt[n]{1 - F}. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что значение вероятности ложной тревоги  $F'$  определяется только количеством раз  $n$ , в которое повышается разрешающая способность РЛС по дальности  $\delta D$ , и не зависит от исходного количества  $m$  элементов разрешения. Зависимости

вероятностей ложных тревог  $F'$  в новом рэлеевском элементе разрешения от количества раз  $n$ , в которое повышена разрешающая способность РЛС по дальности, приведены на рис. 1 для различных  $F$ .

Таким образом, для обеспечения вероятности ложной тревоги  $F'$  в каждом новом рэлеевском элементе разрешения требуется повышать уровень порога обнаружения, что негативно скажется на вероятности правильного обнаружения  $D$  объекта наблюдения.

Перейдем к оценке влияния разрешающей способности радиолокатора по дальности  $\delta D$  на его дальность действия  $D_{\max}$  в свободном пространстве. Для расчета последней можно использовать выражение [5]:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{\mathcal{E}_n G S \sigma}{(4\pi)^2 \mathcal{E}_{\text{вх. min}}}}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_n$  – энергия зондирующего сигнала;  $G$  – коэффициент усиления антенны РЛС;  $S$  – эффективная площадь антенны РЛС;  $\sigma$  – средняя эффективная поверхность рассеяния объекта наблюдения;  $\mathcal{E}_{\text{вх. min}} = (\alpha_\Sigma / L) (\ln F / \ln D - 1) N_{\text{ш}}$  – пороговая энергия эхосигнала (со случайными амплитудой (распределенной по рэлеевскому закону) и начальной фазой (распределенной по равномерному закону));  $\alpha_\Sigma$  – суммарный коэффициент потерь;  $L$  – количество импульсов в пачке эхосигнала;  $F$  и  $D$  – вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения (для одного рэлеевского элемента разрешения);  $N_{\text{ш}}$  – спектральная плотность мощности шумов,

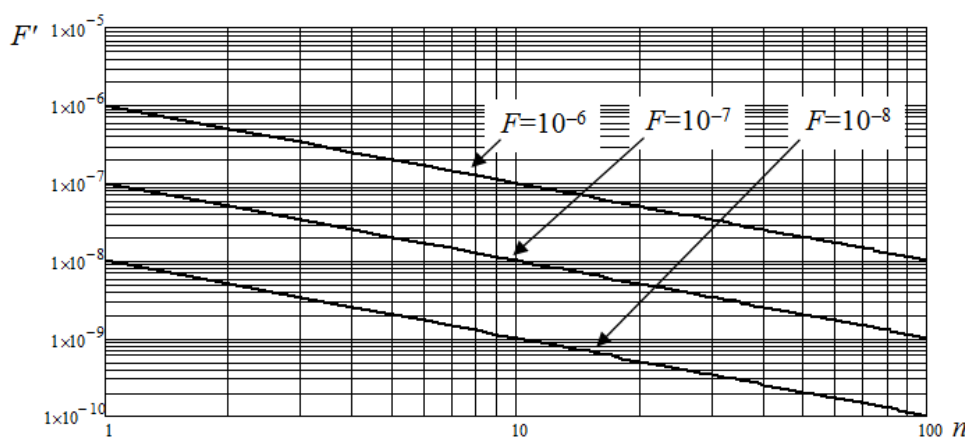


Рис. 1. Зависимости вероятностей ложных тревог  $F'$  в новом рэлеевском элементе разрешения от количества раз  $n$ , в которое повышена разрешающая способность РЛС по дальности  $\delta D$

приведенных ко входу приемника РЛС.

Пусть для вероятности ложной тревоги  $F$  в одном исходном рэлеевском элементе разрешения дальность действия РЛС составляет  $D_{\max}$ , а для вероятности ложной тревоги  $F'$  в одном новом рэлеевском элементе разрешения (при повышении разрешающей способности РЛС по дальности в  $n$  раз) составляет  $D'_{\max}$ . Находя отношение  $D'_{\max}/D_{\max}$ , получим аналитическое выражение для расчета зависимости коэффициента сжатия  $K_{\text{сж}}$  зоны обнаружения РЛС от количества раз  $n$ , в которое повысилась ее разрешающая способность по дальности  $\delta D$ , а также вероятностей ложной тревоги  $F$  и правильного обнаружения  $D$  в одном исходном рэлеевском элементе разрешения:

$$K_{\text{сж}} = \frac{D'_{\max}}{D_{\max}} = \sqrt[4]{\ln\left(\frac{F}{D}\right) / \ln\left(\frac{1 - \sqrt[n]{1-F}}{D}\right)}. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что аналитическая зависимость (3) справедлива для количества раз  $n$ , в которое повысилась разрешающая способность РЛС по любой из измеряемых координат объекта наблюдения, и в общем случае  $n = n_{\delta D} \times n_{\delta v} \times n_{\delta \beta} \times n_{\delta \epsilon}$ , где  $n_{\delta D}$  ( $\delta v$ ,  $\delta \beta$ ,  $\delta \epsilon$ ) – количество раз, в которое повысилась разрешающая способность РЛС по дальности  $\delta D$  (скорости  $\delta v$ , азимуту  $\delta \beta$ , углу места  $\delta \epsilon$ ).

На рис. 2 приведены полученные по выражению (3) для  $D=0,8$  и различных  $F$  графические зависимости коэффициента сжатия  $K_{\text{сж}}$  зоны обнаружения РЛС от количества раз  $n$ , в которое повысилась ее разрешающая способность.

Анализ графиков, приведенных на рис. 2,

позволяет констатировать, что при повышении разрешающей способности радиолокатора, например, в  $n=10$  раз, его дальность действия в свободном пространстве снижается примерно на 7 % и 2 % при вероятностях ложных тревог в одном исходном рэлеевском элементе разрешения  $F=10^{-3}$  и  $F=10^{-10}$  соответственно.

Подводя итог приведенного выше анализа, необходимо обратить внимание на то, что вывод [5, стр. 164]: «Параметр обнаружения  $q = \sqrt{2\mathcal{E}/N}$  когерентного сигнала заданного вида (с полностью известными параметрами, со случайными амплитудой и начальной фазой) зависит от энергии сигнала  $\mathcal{E}$  и спектральной плотности шума  $N$ . Поэтому несущественно, какую форму имеет когерентный сигнал – импульсный он или непрерывный, по какому закону он модулирован – возможность обнаружить его при оптимальном приеме с заданными значениями  $D$  и  $F$  определяется лишь отношением энергии сигнала к спектральной плотности шума» справедлив только при рассмотрении показателей качества обнаружения для одного рэлеевского элемента разрешения. При стабилизации уровня ложных тревог за однократный просмотр зоны обзора вероятность ложной тревоги в одном элементе разрешения, а следовательно, и вероятность правильного обнаружения становятся зависимыми от разрешающей способности радиолокатора.

В заключение статьи можно сделать следующий вывод: повышение разрешающей способности радиолокатора при прочих равных условиях влечет за собой снижение его даль-

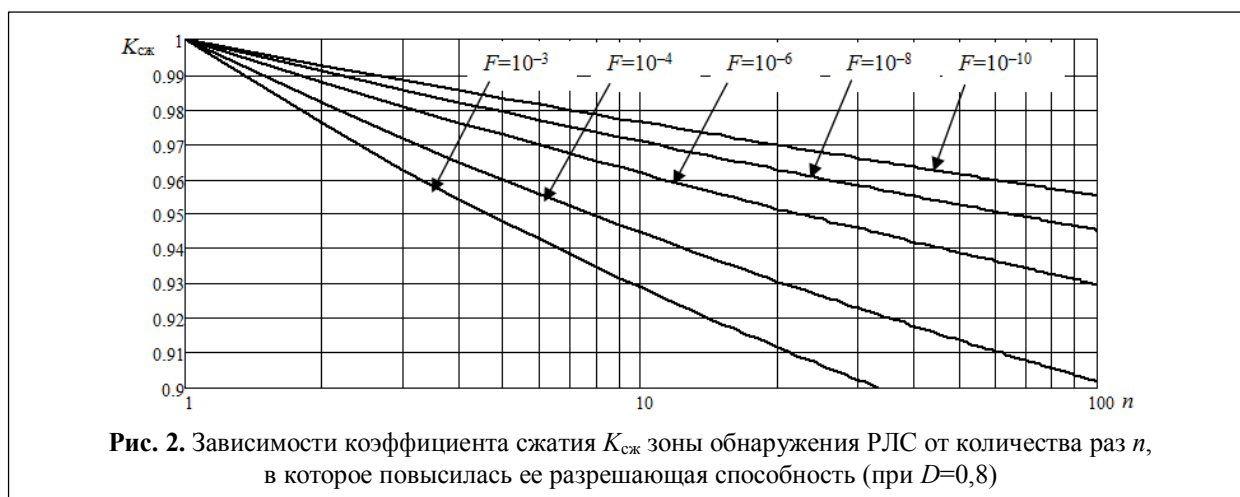


Рис. 2. Зависимости коэффициента сжатия  $K_{\text{сж}}$  зоны обнаружения РЛС от количества раз  $n$ , в которое повысилась ее разрешающая способность (при  $D=0,8$ )

ности действия в свободном пространстве. Например, при повышении разрешающей способности радиолокатора в 10 раз снижение его дальности действия в свободном пространстве может достигать 7 %.

### Литература

1. Основы радиолокации. Под ред. Богданова Г.Б. Киев: КВИРТУ ПВО, 1978. – 285 с.
2. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
3. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1961. – 386 с.
4. Справочник по основам радиолокационной техники. Под ред. Дружинина В.В. М.: Военное издательство, 1967. – 767 с.
5. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д. М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
6. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. М.: Военное издательство, 1983. – 456 с.
7. Справочник по радиолокации. Под ред. Скольника М. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. Трофимова К.Н. Том 1. Ос-

новы радиолокации. Под ред. Иццоки Я.С. М.: Советское радио, 1976. – 456 с.

8. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Дулевича В.Е. М.: Советское радио, 1964. – 732 с.
9. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.
10. Хестром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 432 с.
11. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
12. Бункин Б.В., Реутов А.П. Направления развития радиолокационных систем // Вопросы перспективной радиолокации. – М.: Радиотехника, 2003. – С. 12-19.
13. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития. Под ред. Канащенкова А.И. и Меркулова В.И. М.: Радиотехника, 2003. – 414 с.
14. Нахмансон Г.С. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов. М.: Радиотехника, 2015. – 256 с.
15. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Советское радио, 1974. – 356 с.
16. Радиолокационные устройства. (Теория и принципы построения). Под ред. Григорина-Рябова В.В. М.: Советское радио, 1970. – 680 с.

Поступила 29 июня 2015 г.

English

### Assessment of influence of radar resolution ability on its operating range

*Dmitry Vyacheslavovich Panov* – Candidate of Engineering, Associate Professor Military academy of Army Antiaircraft Defense of Armed Forces of the Russian Federation named after Marshall of the Soviet Union A.M. Vasilevsky.

*E-mail:* pdvlist@list.ru.

*Address:* 214027, Smolensk, Kotovskiy St., 2.

**Abstract:** Quality parameters of detection are, as a rule, taken for one Rayleigh element of radar resolution. However in practice the radar looks through a large number of such elements for time interval equal to cycle of area scanning and each of these elements may be source of false alarm. Thus more objective approach seems to be level equalization of false alarms not in one Rayleigh resolution element but radar single scanning of the coverage area. The amount of resolution elements in radar's coverage area, conditioned by its resolution ability, has impact on detection quality parameters when using the above approach. The article points out that the increase in radar's resolution ability with other things being equal leads to decrease in operation range in clean area when value of false alarm probability during radar single area scanning is stabilized. The author's analytical expression enables to calculate compression coefficient value of radar's coverage area depending on the number of times in which its resolution ability rises, and also probabilities of the correct detection and false alarm in initial Rayleigh resolution element. And the number of times in which radar's resolution ability increases can be examined at the same time in all measured coordinates of surveillance subject. Quantitative assessments of radar's resolution ability impact on its operating range are given in the article. It is evident that, for example, that the increase of radar's resolution ability by 10 times decreases its operating range by 7% in clean area.

**Key words:** radar's operating range, radar's resolution ability, compression coefficient value of radar's coverage area.

**References**

1. Radar-location basics. Ed. by Bogdanov G. B. Kiev: To KVIRT PVO, 1978. - 285 p.
2. Sosulin Yu.G. Basic theory of radar-location and radio navigation. M.: Radio i svyaz, 1992. - 304 p.
3. Saybel A.G. Radar-location basics. M.: Sovetskoye radio, 1961. - 386 p.
4. Reference book on radar equipment basics. Ed.by Druzhinin V. V. M.: Voennoye izdatelstvo, 1967. - 767 p.
5. Basic theory of radar-location. Ed.by Shirman Ya.D. M.: Sovetskoye radio, 1970. - 560 p.
6. Okhrimenko A.E. Basics of radar-location and radio-electronic warfare. Part 1. Radar-location basics. M.: Voennoye izdatelstvo, 1983. - 456 p.
7. Reference book on radar-location. Ed.by Skolnik M. New-York, 1970. Trnsl.from Eng. (in four volumes) Ed.by Trofimov K.N. Vol 1. Radar-location basics. Ed.by Itskhoki Ya.S. M.: Sovetskoye radio, 1976. - 456 p.
8. Basic theory of radar-location. Ed. by Dulevich V.E. M.: Sovetskoye radio, 1964. - 732 p.
9. Finkelstein M. I. Radar-location basics. M.: Radio i svyaz, 1983. - 536 p.
10. Hestrom K. Statistical theory of signal detection . M.: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1963. - 432.
11. Shirman Ya.D., Manzhos V. N . The theory and technology of radar information processing amid signal jamming. M.: Radio i svyaz, 1981. - 416 p.
12. Bunkin B. V., Reutov A.P. Trends in radar-location systems// Voprosy perspektivnoy radiolokatsii. – M.: Radiotekhnika, 2003. - P.12-19.
13. Protection of radar-location systems against jamming. Status and trends. Ed. by Kanashchenkov A.I. and Merkulova V. I. M.: Radiotekhnika, 2003. - 414p.
14. Nakhmanson G. S. Space-time processing of broadband signals. M.: Radiotekhnika, 2015. - 256 p.
15. Shirman Ya.D. Resolution and compression of signals. M.: Sovetskoye radio, 1974. - 356 p.
16. Radar devices. (Theory and principles of construction). ed.by Grigorin-Ryabov V. V. M.: Sovetskoye radio, 1970. - 680 p.