

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕТАЛЬНОСТИ СОГЛАСОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЭХОСИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОМ РАДИОЛОКАТОРЕ НА ЕГО ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ

Панов Дмитрий Вячеславович

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

Чижов Анатолий Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры
радиолокационного вооружения Военной академии
войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации
имени Маршала Советского Союза А. М. Василевского.
E-mail: rtshouse@mail.ru.

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

Аннотация: В классической литературе по теоретическим основам радиолокации показатели качества обнаружения, как правило, рассматриваются для одного из каналов согласованной обработки. Вместе с тем за цикл обзора пространства радиолокатор фактически просматривает значительное количество каналов согласованной обработки. Кроме того, на практике значение рассматриваемого параметра эхосигнала не всегда совпадает со значением параметра ожидаемого сигнала одного из каналов согласованной обработки, что приводит к снижению значений показателей качества обнаружения. Проведённые исследования показали, что в интересах повышения эффективности решения радиолокатором задачи обнаружения целесообразно обеспечивать относительную детальность согласованной обработки эхосигналов не хуже 1/4. При этом дальность действия радиолокатора может повыситься приблизительно на 10 % относительно ситуации, когда интервал детальности согласованной обработки равен рэлеевскому интервалу разрешения.

Ключевые слова: многоканальный радиолокатор, дальность действия радиолокатора, детальность согласованной обработки, показатели качества обнаружения.

Введение

В классической литературе по теоретическим основам радиолокации показатели качества обнаружения (ПКО), как правило, принято рассматривать для одного из каналов согласованной обработки (СО) (например [1]). Под каналом СО здесь понимается фрагмент тракта обработки, обеспечивающий согласованную обработку для ожидаемого эхосигнала с заданными параметрами. Вместе с тем за цикл обзора пространства радиолокатор просматривает значительное количество каналов СО, поэтому, исходя из практических соображений более

объективным представляется рассматривать ПКО за цикл обзора [2]. Кроме того, на практике значение рассматриваемого параметра эхосигнала не всегда совпадает со значением параметра ожидаемого сигнала одного из каналов согласованной обработки, что в свою очередь приводит к снижению значений ПКО.

В некоторых работах, например [3–5], вопросы обнаружения сигналов многоканальными обнаружителями в условиях неточности априорного задания их параметров рассматривались. Однако непосредственных оценок влияния на ПКО за цикл обзора радиолокатора

детальности СО в указанных работах не приводится.

В настоящей статье проводится анализ влияния на ПКО за цикл обзора и на дальность действия многоканального радиолокатора относительной детальности СО эхосигналов, а также обосновывается оптимальное (по критерию максимальной вероятности правильного обнаружения) её значение.

Методика и имитационная математическая модель, используемые для оценки влияния детальности согласованной обработки эхосигналов на показатели качества обнаружения в многоканальном радиолокаторе

Для случая, когда вероятности ложных тревог (ЛТ) F для всех каналов СО одинаковы, вероятность ЛТ для совокупности из n независимых каналов F_n (назовем ее суммарная вероятность ЛТ) будет определяться выражением [1]:

$$F_n = 1 - (1 - F)^n. \quad (1)$$

Для повышения точности измерения координат, а также реализации алгоритмов сверхразрешения, например [6–8], необходимо выбирать интервал детальности $\Delta\alpha$ согласованной обработки эхосигнала (устанавливать параметры опорных сигналов в соответствующих каналах системы СО с шагом $\Delta\alpha$) меньшим рэлеевского интервала разрешения $\delta\alpha$ ($\Delta\alpha_{\text{отн.}} = \Delta\alpha/\delta\alpha$, где $\Delta\alpha_{\text{отн.}}$ – относительная детальность СО, α – рассматриваемая координата объекта наблюдения). При этом будет сформирована новая совокупность из $n_2 = n/\Delta\alpha_{\text{отн.}}$ отсчетов (каналов) по выходу системы СО, шумовые составляющие которых являются коррелированными случайными величинами. Причем при наличии на входе системы СО только помехового сигнала значение суммарной вероятности ЛТ F_{n_2} для совокупности из n_2 каналов не может быть рассчитано по выражению (1), справедливому только для некоррелированных отсчетов.

Для оценки влияния на ПКО за цикл обзора относительной детальности согласованной обработки эхосигналов требуется стабилизиро-

вать значение суммарной вероятности ЛТ в зоне обзора радиолокатора (уровнять значения F_{n_2} и F_n) снижением вероятности ЛТ F в отдельных n_2 каналах. Указанного снижения вероятности ЛТ добиваются повышением значения k порога обнаружения.

Для определения значений k порогов, соответствующих выбранным значениям относительной детальности $\Delta\alpha_{\text{отн.}}$ согласованной обработки, необходимо получить зависимость значений F_{n_2} от k . Расчет зависимости значений суммарной вероятности ЛТ F_{n_2} от k для различных значений $\Delta\alpha_{\text{отн.}}$ может быть проведен аналитически или методом имитационного математического моделирования.

В основе аналитического подхода к получению вышеуказанной зависимости лежит выражение, описывающее плотность вероятности случайного вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_N)^T$ (где x_1 и x_2, \dots, x_{N-1} и x_N – пары отсчетов шума представляют собой квадратурные составляющие $n_2 = N/2$ комплексных отсчетов, N – общее количество квадратурных составляющих n_2 комплексных отсчетов), элементы которого распределены по нормальному закону:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sqrt{|\Theta|}} e^{-\frac{1}{2}[\mathbf{x}-\mathbf{m}]^T \Theta^{-1}[\mathbf{x}-\mathbf{m}]}, \quad (2)$$

где $\Theta = [\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j]$ – корреляционная матрица шумов, ρ_{ij} – коэффициенты корреляции квадратурных составляющих отсчетов шума (причем $\rho_{ij} = 0$, если $i+j$ – нечетное число, $i=1\dots N$, $j=1\dots N$), $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_{N-1}, m_N)^T$ – вектор математических ожиданий, σ_i – среднее квадратичное отклонение квадратурной составляющей i -ого отсчета шума, $|\Theta|$ – определитель корреляционной матрицы, Θ^{-1} – обратная корреляционная матрица.

Аналитическая зависимость для расчёта значения суммарной вероятности ЛТ F_{n_2} совокупности из n_2 комплексных отсчетов имеет вид:

$$F_{n_2} = 1 - \int_{-k}^k \int_{-\sqrt{k^2-x_2^2}}^{\sqrt{k^2-x_2^2}} \dots \int_{-k}^k \int_{-\sqrt{k^2-x_N^2}}^{\sqrt{k^2-x_N^2}} \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sqrt{|\Theta|}} \times$$

$$\times e^{-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix}^T \cdot \Theta^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \end{bmatrix}} dx_{N-1} dx_N \cdots dx_1 dx_2. \quad (3)$$

При проведении расчётов значений F_{n_2} по (3) значения коэффициентов корреляции ρ_{ij} квадратурных составляющих рассчитывались следующим образом:

$$\rho_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ 0, & \text{если } i + j - \text{нечетное число или } \Delta\alpha \geq 1; \\ 1 - 0,5 \times \Delta\alpha_{\text{отн.}} \times |i - j|, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Значения ρ_{ij} , рассчитываемые по (4) для случаев, когда $\rho_{ij} \neq 1$ и $\rho_{ij} \neq 0$, соответствуют значениям нормированной корреляционной функции шума на выходе системы согласованной обработки, оптимальной для простого прямоугольного радиоимпульса. При проведении моделирования использовался указанный вид зондирующего сигнала.

Для проведения численного расчёта значений вероятности правильного обнаружения D_{n_2} объекта наблюдения (для модели эхосигнала с детерминированной амплитудой и равномерно распределённой начальной фазой) хотя бы в одном из n_2 каналов СО может быть использовано основанное на (2) аналитическое выражение:

$$D_{n_2} = 1 - \int_{-k}^k \int_{-\sqrt{k^2-x_2^2}}^{\sqrt{k^2-x_2^2}} \cdots \int_{-k}^k \int_{-\sqrt{k^2-x_N^2}}^{\sqrt{k^2-x_N^2}} \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sqrt{|\Theta|}} \times \\ \times e^{-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1 - m_1 \\ x_2 - m_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} - m_{N-1} \\ x_N - m_N \end{bmatrix}^T \cdot \Theta^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_1 - m_1 \\ x_2 - m_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} - m_{N-1} \\ x_N - m_N \end{bmatrix}} dx_{N-1} dx_N \cdots dx_1 dx_2. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что для большого количества n_2 коррелированных отсчетов численный расчёт значений F_{n_2} по (3) и D_{n_2} по (5) затруднителен ввиду ограниченных возможностей вычислительных средств. Поэтому для получения оценок значений F_{n_2} и D_{n_2} с использованием методов статистических исследований было использовано имитационное математическое моделирование.

Изложим основные элементы методики проведённого имитационного моделирования, выполненного в программной среде математической системы MATLAB.

В отсутствие источника полезного сигнала входной сигнал представлял собой совокупность из $n_2=20000$ (количество рэлеевских элементов разрешения составляло $n=100$, минимальное значение относительной детальности СО было равно $\Delta\alpha_{\text{отн.}}=0,005$) комплексных отсчетов шума с нулевым математическим ожиданием и единичным средним квадратичным отклонением в каждой из квадратурных составляющих.

При наличии источника полезного сигнала шумовой сигнал суммировался с отсчётами комплексной огибающей простого радиоимпульса, имеющего длительность 200 отсчётов, равномерно распределённую случайную начальную фазу, постоянную амплитуду (определяемую исходя из заданного отношения сигнал-шум q^2) и варьируемое по случайному закону с равномерным распределением значение времени запаздывания, задаваемое с точностью до одного отсчёта.

Входной сигнал подвергался корреляционной квадратурной обработке, результаты которой нормировались с учётом количества отсчётов, приходящихся на длительность импульса. Шаг расстановки опорных сигналов коррелятора определялся условиями моделирования.

Однократное решение о наличии объекта наблюдения за цикл обзора радиолокатора принималось в случае превышения сигналом на выходе коррелятора порога обнаружения k хотя бы в одном из n_2 каналов СО. Статистические данные набирались по 1000 реализациям по каждой из точек приводимых графиков.

Разработанная имитационная математическая модель позволила получать зависимости вероятностей правильного обнаружения (ложных тревог) для различных значений устанавливаемых порогов обнаружения k , значений относительной детальности $\Delta\alpha_{\text{отн.}}$ СО эхосигналов и отношений сигнал-шум q^2 .

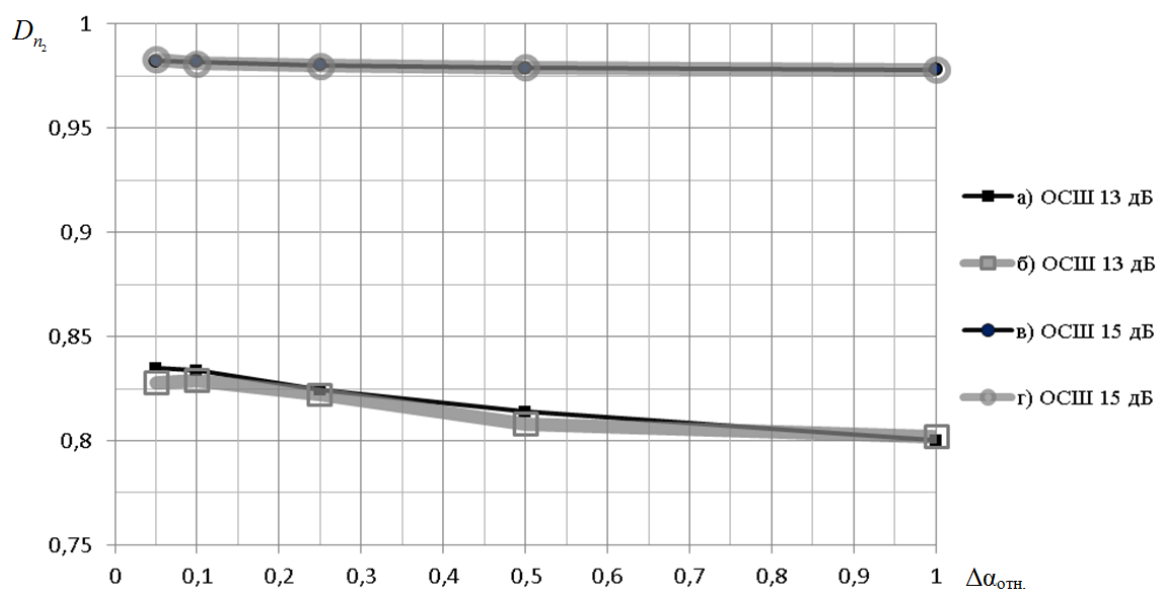


Рис. 1. Зависимости вероятности правильного обнаружения D_{n_2} от относительной детальности $\Delta\alpha_{отн}$ согласованной обработки эхосигналов, полученные для трёх отсчётов полезного сигнала аналитически (а, в) и по результатам имитационного математического моделирования (б, г)

Для доказательства адекватности разработанной модели, полученные для малого количества отсчётов результаты сопоставлялись с результатами аналитических расчётов. Моделировались и рассчитывались по (5) зависимости вероятности правильного обнаружения D_{n_2} от относительной детальности $\Delta\alpha_{отн}$ согласованной обработки эхосигналов, полученные для трёх отсчётов полезного сигнала при отношениях сигнал-шум (ОСШ) $q^2=13$ дБ,

$q^2=15$ дБ и $F=10^{-3}$ (рис. 1).

Анализ приведённых на рис. 1 зависимостей позволяет сделать вывод об адекватности получаемых путём математического моделирования результатов.

Анализ результатов имитационного математического моделирования

По результатам имитационного математического моделирования были получены зависимости значений k порогов, с использованием

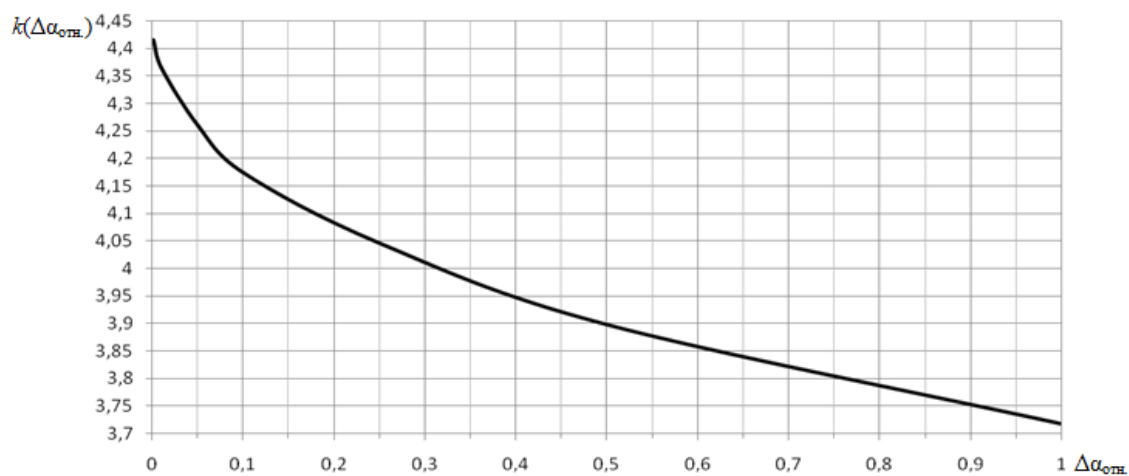


Рис. 2. Зависимость значений k порогов обнаружения, с использованием которых обеспечивалась постоянная вероятность суммарной ЛТ $F_n \approx 0,0952$ в зоне обзора радиолокатора, содержащей $n=100$ рэлеевских элементов разрешения, от относительной детальности $\Delta\alpha_{отн}$ согласованной обработки

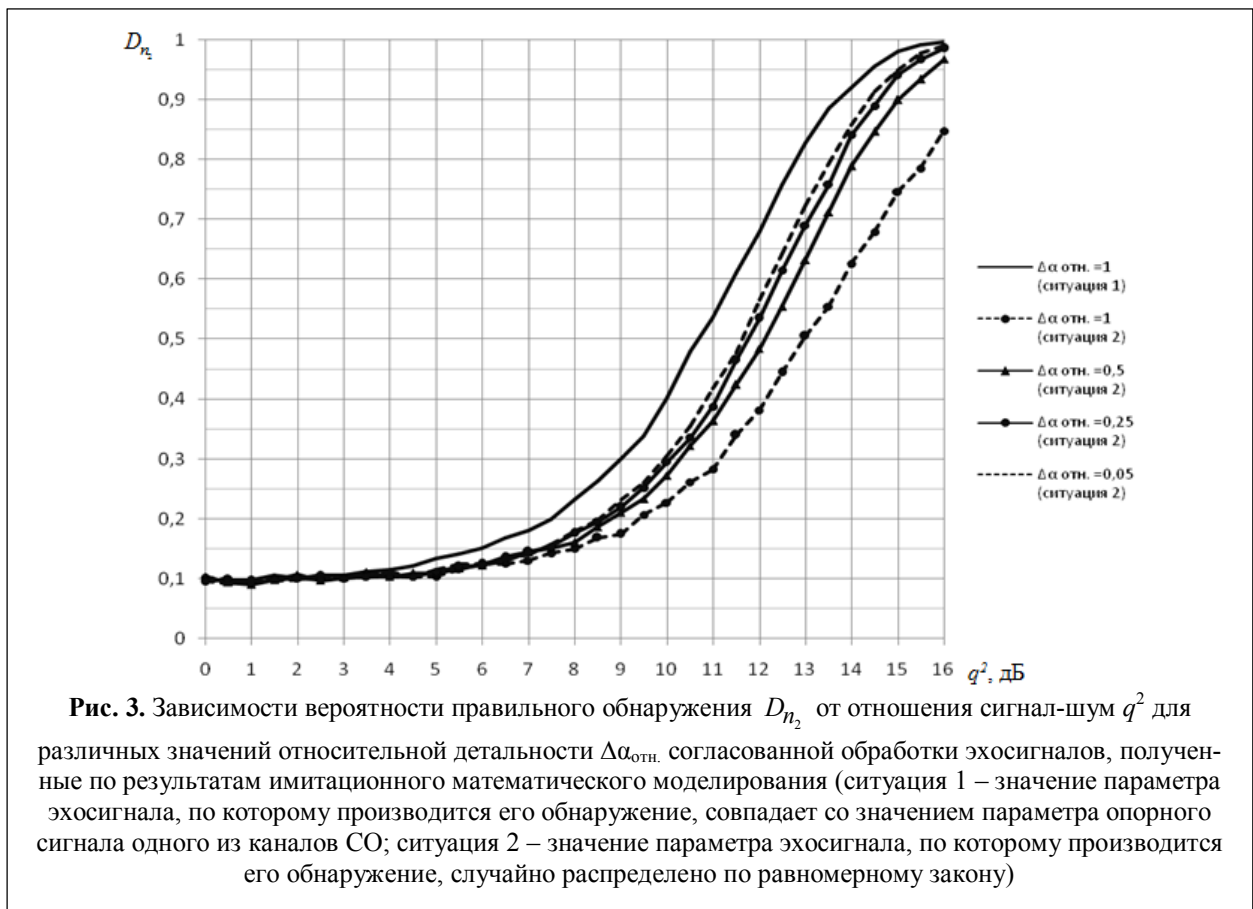


Рис. 3. Зависимости вероятности правильного обнаружения D_{n_2} от отношения сигнал-шум q^2 для различных значений относительной детальности $\Delta\alpha_{отн.}$ согласованной обработки эхосигналов, полученные по результатам имитационного математического моделирования (ситуация 1 – значение параметра эхосигнала, по которому производится его обнаружение, совпадает со значением параметра опорного сигнала одного из каналов СО; ситуация 2 – значение параметра эхосигнала, по которому производится его обнаружение, случайно распределено по равномерному закону)

которых обеспечивалась постоянная суммарная вероятность ЛТ в зоне обзора радиолокатора, от относительной детальности $\Delta\alpha_{отн.}$ согласованной обработки (рис. 2). Исходное значение суммарной вероятности ЛТ $F_n \approx 0,0952$ было рассчитано по (1) для $F=10^{-3}$ и $n=100$ рэлеевских элементов разрешения.

С использованием информации о значениях k порогов обнаружения по результатам имитационного математического моделирования были рассчитаны зависимости $D_{n_2} = f(q^2)$ для различных значений $\Delta\alpha_{отн.}$. Расчёты D_{n_2} проведены для $n=100$ рэлеевских элементов разрешения при $F=10^{-3}$. Графические зависимости $D_{n_2} = f(q^2)$ для различных значений $\Delta\alpha_{отн.}$ приведены на рис. 3, где кривые соответствуют следующим случаям: ситуация 1 – значение параметра эхосигнала, по которому производится его обнаружение, совпадает со значением параметра опорного сигнала одного из ка-

налов СО; ситуация 2 – отличается от предшествующего случая тем, что значение параметра эхосигнала, по которому производится его обнаружение, случайно распределено по равномерному закону.

Анализ графиков на рис. 3 свидетельствует о том, что улучшение относительной детальности $\Delta\alpha_{отн.}$ согласованной обработки в 4 раза (от 1 до 0,25) приводит к повышению средней вероятности правильного обнаружения D_{n_2} (для $q^2=13-16$ дБ) примерно в 1,25 раза. Вместе с тем из графиков видно, что улучшение относительной детальности $\Delta\alpha_{отн.}$ согласованной обработки более чем в 4 раза не приводит к существенному повышению вероятности правильного обнаружения D_{n_2} , потенциальные значения которых, по всей видимости, соответствуют кривой « $\Delta\alpha_{отн.}=1$ (ситуация 1)» (рис. 3).

Кроме того, анализ графиков на рис. 3 позволяет установить, что при улучшении относительной детальности $\Delta\alpha_{отн.}$ согласованной об-

работки от 1 до 0,25 возможно получить заданную вероятность правильного обнаружения D_{n_2} при меньшем примерно на $q^2=1,3-2$ дБ отношении сигнал-шум. Указанный энергетический выигрыш соответствует повышению дальности действия радиолокатора на 7–12 %.

В заключение можно сделать следующий вывод: улучшение относительной детальности согласованной обработки эхосигналов приводит к повышению дальности действия многоканального радиолокатора. Результаты математического моделирования свидетельствуют о том, что в интересах повышения эффективности обнаружения целесообразно обеспечивать относительную детальность согласованной обработки эхосигналов не хуже 1/4. При этом дальность действия радиолокатора повышается приблизительно на 10 % относительно ситуации, когда интервал детальности согласованной обработки равен рэлеевскому интервалу разрешения.

Литература

1. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. Под ред. Ширмана Я.Д. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

2. Панов Д.В. Оценка влияния разрешающей способности радиолокатора на его дальность дей-

Поступила 21 марта 2016 г.

ствия // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 3. С. 78–82.

3. Лютиков И.В., Замараев В.В., Кучин А.А., Фомин А.Н., Богомолов Н.П., Копылов В.А. Многоканальный алгоритм обнаружения интенсивно маневрирующих воздушных целей для импульсно-доплеровской радиолокационной станции, учитывающий априорную неопределенность частотной девиации сигнала // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2014. Т. 7. № 8. С. 911–918.

4. Русанов В.Э. Оценка и минимизация потерь помехоустойчивости многоканального обнаружителя в условиях неточности априорного задания параметров сигналов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 2. С. 63–65.

5. Субботин С.В., Большаков Д.Ю. Оценка вероятности обнаружения сигнала в многоканальной радиотехнической системе // Журнал радиоэлектроники. 2006. № 5.

6. Климов С.А. Метод разрешения групповых радиолокационных объектов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 4. С. 28–37.

7. Чижов А.А. Сверхрэлеевское разрешение. Т. 2. Преодоление фактора некорректности обратной задачи рассеяния и проекционная радиолокация. – М.: Красанд, 2010. – 104 с.

8. Абраменков В.В., Абраменков А.В., Семченков С.М. Особенности инверсной фильтрации импульсных сигналов / Сб. науч. ст. по материалам II Всероссийской науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. С. 5–13.

English

Effect analysis of matched echo processing degree in multichannel radar on its operating range

Dmitry Vyacheslavovich Panov - Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Doctoral Candidate of In-house Doctoral Program in 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.

Anatoly Anatolyevich Chizhov – Doctor of Technical Sciences Associate Professor Deputy Chief of Department in 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: rtshouse@mail.ru.

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

Abstract: Classic works about radar detection fundamentals usually regard detection quality parameters only for one matched processing channel. At the same time a radar actually goes through rather a lot of matched processing channels during space scanning period. Besides, an echo signal parameter value practically does not always match a parameter value of the response signal of one of channels matched processing that results in reducing detection quality parameter values. Therefore, the research work purpose is the effect estimation of the matched echo processing degree on detection quality parameter values of the object scanned during one period; correspondingly, it affects multichannel range operating range as well. Results of the conducted research

revealed that it is reasonable to ensure relative matched echo processing degree at least $1/4$ in order to enhance radar detection efficiency. Thus radar operating range can be increased approximately by 10% in regard to a situation when the matched processing degree interval is equal to Rayleigh resolution interval. The practical significance of the research work arises from the fact that the performed research work enabled to substantiate requirements for relative matched echo processing degree in multichannel radar and thus to enhance detection efficiency.

Key words: multichannel radar, radar operating range, matched processing degree, detection quality parameters.

References

1. Radio-electronic systems: Development fundamentals and theory. Reference book. Ed. 2nd, revis. and enl. Ed. by Shirman Ya. D. - M.: Radiotekhnika, 2007. - 512 p.
2. Panov D.V. Effect estimation of radar resolution on its operating range. - Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2015. No. 3. P. 78-82.
3. Lyutikov I.V., Zamarayev V.V., Kuchin A.A., Fomin A.N., Bogomolov N. P., Kopylov V. A. Detection multichannel algorithm of intensively maneuvering air targets for pulsed Doppler radar, taking into account prior uncertainty of signal frequency deviation//Journal Siberian Federal University. Seriya «Tekhnika i tekhnologii». 2014. T. 7. No. 8. P. 911-918.
4. Rusanov V.E. Estimation and minimization of noise-immunity loss in multichannel detector in the presence of inaccuracy in signal parameters aprior setting. - T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2012. T. 6. No. 2. P. 63-65.
5. Subbotin S.V., Bolshakov D.Yu. Signal detection estimated probability in multichannel radio engineering system. - Zhurnal radioelektroniki. 2006. No. 5.
6. Klimov S.A. Resolution method for permission of group radar objects. - Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy 2013. T. 18. No. 4. P. 28-37.
7. Chizhov A.A. Super Rayleigh resolution. T. 2. Overcoming of incorrectness factor of inverse scattering problem and projective radar-location. - M.: Krasand, 2010. - 104 p.
8. Abramnikov V.V., Abramnikov A.V., Semchenkov S.M. Features of pulsed signal inverse filtering. Coll. acad. pap. II All-Russian research/practice conference "Akademicheskoye Zhukovskoye chteniya". - Voronezh: VUNTS VVS «VVA», 2015. P. 5-13.