

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЗОРНЫХ РЛС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОЧНЫХ РЕШЕНИЙ

к.т.н. А.Н. Колесник, к.т.н. М.Р. Арасланов, В.М. Андришин
(представил д.т.н., проф. Д.И. Леховицкий)

Предлагается новый подход к оценке параметров обнаружения в обзорных радиолокационных станциях (РЛС), позволяющий учитывать статистические характеристики воздушных объектов и используемые режимы обзора воздушного пространства. В основу подхода положено применение вероятностного критерия, который дает оценку границ заданного качества и не требует знания структуры приемного устройства РЛС.

Постановка задачи. В условиях сокращения государственных расходов на оборонные нужды ограничиваются возможности проведения экспериментальных исследований при конструировании, производстве и эксплуатации вооружения и военной техники, в том числе и радиолокационной. Поэтому все большую актуальность приобретают теоретические методы исследований с использованием математического и имитационного моделирования.

В войсках ПВО моделирование наиболее широко используется при определении пространственных показателей возможностей как отдельных средств радиолокационной разведки, так и радиолокационной системы в целом. В зависимости от назначения моделей оценки пространственных возможностей РЛС к ним предъявляются различные требования по точности определения границ области пространства, где возможно обнаружение заданных воздушных объектов. Традиционно при определении пространственных возможностей группировки радиолокационных средств параметры зон обнаружения (ЗО) РЛС и радиолокационного поля рассчитываются для стандартных значений эффективной поверхности рассеяния цели, релеевой модели флюктуаций амплитудных значений эхо - сигнала и основного используемого в РЛС режима обзора воздушного пространства.

Однако, существует множество задач, где необходимо учитывать влияние перечисленных факторов на показатели качества обнаружения целей (вероятности правильного обнаружения D и ложной тревоги F) для отличных от стандартных условий. К таким задачам можно отнести моделирование действий группировки радиолокационных средств в конкретных заданных условиях воздушной обстановки, определение радио-

нального состава и режимов работы РЛС группировки, уточнение возможностей РЛС по обнаружению конкретных типов воздушных объектов на заданных маршрутах их полета, проведение сравнительной оценки возможностей существующих и перспективных РЛС.

Разработке методического аппарата расчета пространственных характеристик обзорных РЛС в условиях, отличных от стандартных, и посвящена данная статья.

Выбор методического аппарата. Для учета влияния на зоны обнаружения РЛС параметров режима обзора воздушного пространства и статистических характеристик реальных воздушных целей возможно использование метода прямого расчета показателей качества обнаружения (значений **D** и **F**). Однако, такой расчет затруднителен, так как требует точного знания характера преобразований сигналов и помех в приемном устройстве РЛС.

Для учета влияния статистических характеристик реальных воздушных объектов и режимов обзора РЛС на показатели качества обнаружения перейдем от прямого расчета **D** и **F** к косвенным оценкам с использованием вероятностного критерия, который дает оценку границ заданного качества [1]. Достоинством такого критерия является то, что для оценки показателей качества обнаружения достаточно знать плотности распределения вероятностей случайных значений помехи и аддитивной смеси сигнала и помехи на входе приемного устройства.

В ряде работ предлагается критерий, основанный на граничных оценках вероятностей ошибочных решений [1,2], который называется расстоянием Бхаттачария, в более удобной форме, представленный как показатель различимости **Pr**:

$$Pr = -\ln \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{W_{\text{сн}}(U) \cdot W_{\text{п}}(U)} \cdot dU, \quad (1)$$

где $W_{\text{сн}}(U)$, $W_{\text{п}}(U)$ - условные многомерные распределения плотности вероятности случайных значений амплитуд аддитивной смеси сигнала и помехи и только помехи в приемном тракте РЛС соответственно.

Показатель различимости прост в расчете и дает точную оценку границ вероятностей ошибочных решений. Он согласуется с неравенствами для граничных оценок вероятностей ошибок, введенных Колмогоровым [1]. Фактически показатель различимости является частным случаем более общего неравенства для граничных оценок, введенного Черновым [1]. Интеграл, определяющий показатель различимости, выражается через производящую функцию моментов отношения правдоподобия [2]. Соответственно, выбранный критерий согласуется с критерием Неймана - Пирсона и, вычисленный в виде одной числовой величины (скаляра), косвенно характеризует результат оптимальной по критерию Неймана-Пирсона процедуры обнаружения полезного сигнала на фоне

помех. При этом полная вероятность ошибочных решений $P_{ош} = F + (1-D)$ имеет границы, выраженные через показатель Pr :

$$0.25 \exp^{-2 \cdot Pr} \leq P_{ош} \leq 0.5 \exp^{-Pr} . \quad (2)$$

Показатель различимости инвариантен относительно достаточных статистик. При любых преобразованиях входных процессов Pr либо уменьшается, либо остается неизменным. Важное свойство показателя различимости состоит в том, что он позволяет оценивать граничные значения полной вероятности ошибочных решений, не находя замкнутого выражения для оптимальной решающей схемы (алгоритма обработки сигналов).

Воспользуемся зависимостью показателя различимости Pr от значения энергетического параметра обнаружения (q_c^2) для уточнения оценки порогового значения (q_c^2) при расчете зоны обнаружения РЛС. Определим зависимость Pr от (q_c^2) для нормального закона распределения плотности вероятности дискретных значений комплексных амплитуд смеси сигнала и помехи и только помехи на входе приемного устройства РЛС.

Помеховое колебание будем представлять как случайный стационарный процесс с нулевым средним. Его полной статистической характеристикой является плотность вероятности распределения [5]:

$$W_{п}(\dot{Y}) = (2 \cdot \pi)^{-k} \cdot |\dot{\Phi}_{п}|^{-1} \cdot \exp \left(\frac{-\dot{Y}^{*t} (\dot{\Phi}_{п}^{-1}) \dot{Y}}{2} \right), \quad (3)$$

где k - число комплексных отсчетов; $|\dot{\Phi}_{п}|$ - детерминант комплексной корреляционной матрицы помехи; \dot{Y}^{*t} - комплексно - сопряженный вектор амплитуд дискретных значений помехового колебания; $\dot{\Phi}_{п}^{-1}$ - матрица, обратная корреляционной матрице помехи.

Для выбранной гауссовской модели сигнала совместная плотность распределения вероятности мгновенных значений комплексных амплитуд аддитивной смеси сигнала и помехи будет описываться выражением аналогичным (3) при условии замены $\Phi_{п}$ на $\Phi_{сп}$, где \dot{Y} - соответственно вектор - столбец дискретных значений комплексных амплитуд входной смеси сигнала и помехи.

В дальнейшем будем использовать описание (3) для принимаемого РЛС сигнала в виде пачки радиоимпульсов, отраженных от воздушной цели, при условии, что каждому дискретному значению соответствует результат накопления энергии одиночного радиоимпульса. Число отсчетов комплексного вектора \dot{Y} будет равно N , где N - число импульсов пачки эхо - сигнала. Подставим в выражение (1) описания условных плотностей вероятности аддитивной смеси сигнала и помехи $W_{сп}(\dot{Y})$ и

только помехи $\mathbf{W}_n(\hat{\mathbf{Y}})$. В полученном выражении дополним квадратичную форму показателя экспоненты под знаком \mathbf{N} - мерного интеграла до полного квадрата и преобразуем его к окончательному виду

$$\mathbf{P}_p = \frac{1}{2} \cdot \text{Ln} \frac{|\dot{\Phi}_\Sigma|}{\sqrt{(|\dot{\Phi}_n| \cdot |\dot{\Phi}_{cn}|)}}, \quad (4)$$

где $\dot{\Phi}_\Sigma = \frac{1}{2} \cdot (\dot{\Phi}_n + \dot{\Phi}_{cn})$.

Для проведения расчета зависимости $\mathbf{Pr}(\mathbf{q}_c^2)$ необходимо для каждой РЛС определить элементы корреляционной матрицы эхо-сигнала с учетом используемого в РЛС режима обзора воздушного пространства и статистических характеристик воздушных целей.

Под параметрами режима обзора понимаются: период повторения зондирующих импульсов (\mathbf{T}), скорость вращения антенной системы, многочастотное излучение (поимпульсная перестройка частоты, наличие двух и более частотных каналов).

Выражение (4) позволяет построить зависимости показателя $\mathbf{Pr}(\mathbf{q}_c^2)$ для широкого класса когерентных и некогерентных эхо-сигналов, которые можно использовать для сопоставительного анализа потенциальных возможностей по обнаружению этих сигналов, не прибегая к точному расчету показателей качества обнаружения (\mathbf{D} и \mathbf{F}).

Корреляционная матрица эхо-сигнала в обзорной РЛС. Элементы корреляционной матрицы эхо-сигнала для постоянного периода следования зондирующих импульсов, характерного для обзорных РЛС, можно представить в виде [5]:

$$\dot{\Phi}_{il} = \frac{\mathbf{q}_c^2}{\mathbf{N}} \cdot \rho_{il} \cdot \exp(-j \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{l}) \cdot \alpha_c) + \delta_{il}, \quad (5)$$

где \mathbf{q}_c^2 - отношение среднего значения накопленной энергии когерентного эхо-сигнала к мощности шума; α_c - доплеровский набег фазы за период зондирования; ρ_{il} - значение результирующей нормированной автокорреляционной функции (АКФ) сигнала в моменты времени $\tau = \mathbf{k} \cdot \mathbf{T} = (\mathbf{i} - \mathbf{l}) \cdot \mathbf{T}$, ($\mathbf{i}, \mathbf{l} = 1 \dots \mathbf{N}$);

Нормировка в (5) к числу импульсов \mathbf{N} обеспечивает фиксацию суммарной энергии сигнала, излучаемой в направлении цели.

Основными факторами, определяющими элементы ρ_{il} корреляционной матрицы смеси сигнала и помехи на входе приемного устройства, являются [3]: автокорреляционная функция зондирующего сигнала, флюктуации эхо-сигнала цели, вращение диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС. Проанализируем влияние этих факторов при условии их независимости.

Уровень флюктуаций зондирующего сигнала, обусловленный нестабильностями приемо-передающего тракта, мал и составляет -20...-50 дБ [3]. Соответственно, влиянием нестабильностей приемо - передающего тракта на результирующую автокорреляционную функцию эхо - сигнала можно пренебречь.

Значения межпериодных коэффициентов корреляции эхо - сигнала $\rho_c(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T})$ в таком случае будут определяться выражением

$$\rho_c(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T}) = \rho_a(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T}) \cdot \rho_{ф.л}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T}), \quad (6)$$

где $\rho_{ф.л}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T})$ - значение межпериодного коэффициента корреляции эхо-сигнала, обусловленное нормированной автокорреляционной функцией флюктуаций сигнала в заданном диапазоне длин волн; $\rho_a(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T})$ - значение межпериодного коэффициента корреляции эхо-сигнала, обусловленное вращением диаграммы направленности антенны РЛС.

Анализ АКФ флюктуаций эхо-сигналов различных типов самолетов был проведен на основе расчетов характеристик вторичного излучения целей с использованием известных [4] моделей. При оценке АКФ эхо-сигнала полагалось, что самолеты совершают полет в направлении на РЛС.

Для расчета $\rho_{ф.л}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{T})$ было проведено моделирование эхо-сигналов и расчет огибающих автокорреляционных функций флюктуаций эхо-сигналов турбореактивных и винтовых самолетов (Миг-21, F-15, В-1В, В-52, Ту-16) в различных диапазонах длин волн и в различных погодных условиях при усреднении по ракурсам полета в секторе углов $\pm 85^\circ$. Результаты расчетов показали, что для большинства типов турбореактивных самолетов характерен экспоненциальный вид огибающей усредненной автокорреляционной функции эхо-сигнала. Усредненные значения $\rho_{ф.л}(\mathbf{T})$ эхо-сигнала турбореактивного самолета для сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн и периода следования зондирующих импульсов 3мс могут составлять от 0.99 до 0.998. Однако, при тангенциальном полете самолета относительно РЛС корреляционная функция флюктуаций эхо-сигнала может вырождаться в узкий пик, что соответствует отсутствию межпериодной корреляции импульсов пачки принимаемого сигнала. Для винтовых самолетов (АН-24, вертолет) автокорреляционной функции эхо-сигнал имеет ярко выраженный пик, обусловленный вращением лопастей винтов, и медленно спадающую “планерную” составляющую.

Для анализа влияния вращения ДНА РЛС на вид огибающей АКФ сигнала выберем гауссовскую аппроксимацию ДНА РЛС [3]:

$$\rho_a(\tau) = \exp\left(-\frac{1,66 \cdot \tau}{4 \cdot T_{обл}}\right)^2, \quad (7)$$

где $T_{обл}$ - время облучения цели, определяемое скоростью вращения антенны и шириной ДНА РЛС.

Результаты расчетов огибающей АКФ и значений $\rho_a(T)$ для гауссовской аппроксимации ДНА и различных значений скорости вращения антенны РЛС позволили сделать следующий вывод.

Сканирование диаграммы направленности антенны РЛС при обзоре воздушного пространства является определяющим фактором, влияющим на вид огибающей АКФ сигнала на входе приемного устройства РЛС, по сравнению с флюктуациями эхо - сигнала воздушной цели и нестабильностями прямо-передающего тракта РЛС. Поэтому для дальнейших расчетов зависимости $\text{Пр}(q_c^2)$ выбираем огибающую АКФ эхо-сигнала гауссовского вида. Значения межпериодных коэффициентов корреляции принимаемого сигнала будут определяться соотношением [3]:

$$\rho_c(k \cdot T) = [\rho_c(T)]^{k^2}. \quad (8)$$

Сравнение потенциальных возможностей обзорных РЛС по обнаружению воздушных объектов. С использованием выражений (4,5,6,8) сравним зависимости показателя различимости $\text{Пр}(q_c^2)$ для различных моделей эхо-сигналов. Вид модели эхо-сигнала определяется используемым в РЛС режимом обзора воздушного пространства. Будем полагать, что период повторения зондирующих импульсов постоянный и энергия, излучаемая в направлении цели, для всех моделей эхо-сигнала одинакова. Условно разделим обзорные РЛС на три класса:

- 1) РЛС с короткой пачкой ($N=1\dots5$). (Как правило, это РЛС с ФАР);
- 2) РЛС со средним числом импульсов в пачке ($N=10\dots25$);
- 3) РЛС с большим числом импульсов в пачке ($N=40\dots80$).

Примеры расчета зависимости показателя различимости $\text{Пр}(q_c^2)$ при независимых флюктуациях импульсов пачки представлены на рис. 1. Кривые 1-8 соответствуют случаям обнаружения некогерентного сигнала с числом импульсов: 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40 соответственно. Зависимость 1 соответствует случаю обнаружения когерентного импульсного сигнала с произвольным числом импульсов в пачке.

Для РЛС со средним и большим числом импульсов в пачке зависимость $\text{Пр}(q_c^2)$ нарастает быстрее, чем для РЛС с короткой пачкой. Это связано с увеличением числа независимо флюктуирующих составляющих сигнала. Ход полученных зависимостей отображает факт повышения надежности обнаружения некогерентного сигнала по мере роста числа его некогерентных составляющих. Это соответствует переходу от релеевских флюктуаций амплитуды суммарной квадратичной статистики для полностью когерентного сигнала к распределению Накагами, параметр которого увеличивается по мере роста числа некогерентных составляющих сигнала [5]. Такой результат соответствует переходу от модели сигнала с быстрыми флюктуациями амплитуды к модели сигнала для не флюктуирующей пачки импуль-

сов по мере роста числа некогерентных составляющих сигнала.

Сравнение зависимостей $\text{Пр}(q_c^2)$ для различных моделей сигнала позволяет уточнить разницу в величине энергетического параметра обнаружения q_c^2 , обеспечивающего такое же значение показателя различимости Пр , что и для модели когерентной пачки радиоимпульсов ($N=1$). Примеры оценки разницы в величине q_c^2 при сопоставлении модели когерентного

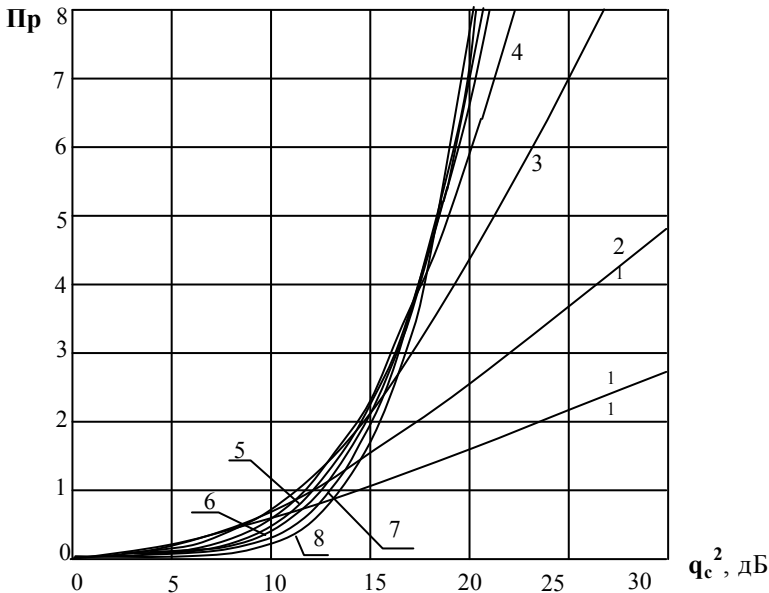


Рис. 1. Зависимость показателя различимости

сигнала и некогерентных сигналов ($N \gg 1$) представлены в табл.1.

Таблица 1

Разница в пороговом значении q_c^2
для когерентных и некогерентных сигналов

$\rho_c (T)$	$q_c^2 = 13 \dots 20$ дБ ($N=1$)		
	$N=2 \dots 5$	$N=10 \dots 25$	$N=40$
0.5	1.5...4.5 дБ	1...6.5 дБ	0...6.5 дБ
	1.5...6.5 дБ	0.5...5.5 дБ	
0.9	0...2 дБ	2.5...6 дБ	1.5...6.5 дБ
	1...4.5 дБ	2...6.5 дБ	
0.95	0...1 дБ	2...5 дБ	2...6.5 дБ
	1...3 дБ	2...6.5 дБ	
0.98	0 дБ	1.5...4 дБ	2...6 дБ
	0.5...2.5 дБ	1.5...6 дБ	
0.99	0 дБ	1...3 дБ	2...5.5 дБ
	0...1 дБ	1.5...4.5 дБ	

Зная разницу в величине q_c^2 для когерентного и некогерентного сигнала, можно рассчитать зону обнаружения РЛС с учетом используемых в РЛС режимов обзора и статистических характеристик воздушных целей.

Выводы. Таким образом, предложенный подход к оценке параметров обнаружения в обзорных РЛС позволяет учитывать статистические характеристики воздушных объектов и используемые режимы обзора воздушного пространства, не прибегая к точному расчету показателей качества обнаружения (**D** и **F**), что особенно важно при отсутствии информации о характере преобразований сигналов и помех в приемном устройстве РЛС.

Предложенный подход может применяться:

- при моделировании действий группировки радиолокационных средств в конкретных условиях воздушной обстановки и при оптимизации ее структуры и режимов обзора воздушного пространства;
- при сравнительной оценке возможностей перспективных и существующих радиолокационных средств разведки воздушного пространства;
- при определении оптимальных маршрутов полетов авиации для преодоления системы ПВО противника,
- для определения возможностей наведения самолетов;
- при определении коэффициента проводки воздушных судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tomas Kailath, Thy Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection // IEEE Trans. On Communication Technology. – 1967. – Vol.15., №1. – P. 52 - 60.
2. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. – М.: Сов. радио, 1972. – С. 124 - 130.
3. Бакулев П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
4. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П., Братченко Г.Д., Орленко В.М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – №11. – С. 3 - 63.
5. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 415 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2001