

## ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ СЛАБЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИЗЕМНОЙ СРЕДЫ

ЖИРНОВ В.В., ЛЕБЕДЕВ О.Г.,  
СТРЕЛЬЧЕНКО В.И.

Анализируются возможности обнаружения и сопровождения слабых радиолокационных сигналов на фоне интенсивных мешающих отражений от неоднородностей приземной среды, в том числе помех типа «ангел-эхо», при накоплении сигнала после линейного детектора. Приводятся количественные характеристики обнаружения, оценивается степень влияния параметров РЛС на эффективность обнаружения и сопровождения воздушных объектов.

Для обнаружения и сопровождения сигналов на фоне мешающих отражений требуются достаточно большие значения отношения сигнал/помеха на всех этапах обработки, в том числе и последетекторного, для чего осуществляется накопление сигналов [1, 4]. Несмотря на то, что анализу и решению этой задачи посвящено большое количество работ, например [1, 2], она из-за всевозрастающих требований, предъявляемых к радиолокационным системам, и в настоящее время является *актуальной*. Данная работа посвящена анализу возможности использования процедуры некогерентного накопления сигналов для решения задачи обнаружения слабых сигналов на фоне мешающих отражений на выходе приемного тракта с линейной амплитудной характеристикой.

Проанализируем возможности обнаружения при накоплении слабых сигналов на фоне интенсивных помех, в том числе мешающего отражения (МО) типа «ангел-эхо», на выходе приемного тракта с линейной амплитудной характеристикой.

Статистика обнаружения при накоплении сигнала на входе линейного тракта приемника определяется выражением:

$$U_{\Sigma} = \sum_{m=1}^N k \cdot y_m + C, \quad (1)$$

где  $k$  и  $C$  – параметры амплитудной характеристики приемного тракта (без ограничения общности рассуждений положим  $k = 1$ ,  $C = 0$ ).

Для простоты анализа модулирующим влиянием сканирования диаграммы направленности антенны пренебрегаем, тем более в режиме сопровождения цели влияние этого фактора на форму пачки выборки сигналов незначительно.

Для анализа характеристик обнаружения необходимо определить плотности распределения вероятностей величины  $U_{\Sigma}$  при наличии сигнала от цели –  $P_{\text{сн}}(U_{\Sigma})$  и при его отсутствии –  $P_{\text{п}}(U_{\Sigma})$  [1].

Основная трудность в решении такого рода задач вызывается коррелированностью величин  $y_m$ . Преодолеть ее удалось при определенных допущениях и приближениях на основе разложения плотностей распределения вероятностей  $P_{\text{сн}}(U_{\Sigma})$  и  $P_{\text{п}}(U_{\Sigma})$  в ряд по ортогональным многочленам:

$$P_{\text{п}}(U_{\Sigma}) = \sum_{k=0} b_k \Psi_k(U_{\Sigma}),$$

где  $b_k$  – коэффициенты разложения;  $\Psi_k(U_{\Sigma})$  – некоторые многочлены, ортогональные в области определения функций  $P_{\text{сн}}(U_{\Sigma})$  и  $P_{\text{п}}(U_{\Sigma})$ .

Логарифмически-нормальная плотность распределения вероятностей, характерная для отсчетов  $y_m$  неоднородностей атмосферы в приземной среде, определена на полуоткрытом интервале, отсюда вытекает, что искомые плотности также определены на этом интервале. Для аппроксимации плотности распределения воспользуемся разложением по полиномам Лагерра, ортогональным на интервале  $(0, \infty)$ :

$$P(U_{\Sigma}) = \sum_{k=0} b_k \bar{\Psi}(U_{\Sigma}),$$

где многочлены определяются выражением:

$$\Psi_k = \begin{cases} k! d^k (x^{k+\alpha} e^{-x}) / dx^k, & (x \geq 0) \\ 0, & (x < 0) \end{cases}$$

или  $\Psi_k(-1)^k x^{\alpha} e^{-x} L_k^{\alpha}(x)$ , где  $L_k^{\alpha}(x)$  – полиномы Лагерра [5];  $L_k^{\alpha} = (-1)^k k! e^x x^{k+\alpha} e^{-x} / d \cdot x^k$ .

Полиномы Лаггера вычисляются по рекуррентным соотношениям:

$$L_0^{\alpha} = 1,$$

$$L_1^{\alpha} = -(\alpha + 1 + x),$$

.....

$$(n+1)L_{n+1}^{\alpha}(x) - (2n+\alpha+1-x)L_n^{\alpha}(x) + (n+\alpha)L_{n-1}^{\alpha}(x) = 0.$$

Параметр полиномов и коэффициенты разложения определяются начальными моментами величины, которые, в свою очередь, выражаются через числовые характеристики отсчетов огибающей помех  $y_m$  [5].

Обычно нормирование параметров разложения производят так, чтобы коэффициенты разложения при первом и втором членах были равны нулю. Начиная с третьего, порядок малости которого по отношению к нулевому члену равен  $(1/N)^{1/2}$ , коэффициентами разложения пренебрегают. В результате плотность распределения вероятностей величины аппроксимируем нулевым членом разложения, представляющим собой гамма-распределение:

$$P(U_{\Sigma}) = \begin{cases} \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \cdot U_{\Sigma}^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda U_{\Sigma}}, & U_{\Sigma} \geq 0, \\ U, & U_{\Sigma} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha = \mu_1^2 / (\mu_2 - \mu_1^2)$ ,  $\lambda = \mu_1 / (\mu_2 - \mu_1^2)$ ;  $\mu_1, \mu_2$  – первый и второй начальные моменты величины  $U_\Sigma$ . Из (2) следует, что для анализа статистики величины  $U_\Sigma$  достаточно определения двух первых начальных моментов  $\mu_1, \mu_2$ , причем  $\mu_2^2 = \mu_1^2 + \sigma_\Sigma^2$ , где  $\sigma_\Sigma^2$  – дисперсия величины  $U_\Sigma$ . Это и дает возможность решить задачу анализа статистики величины  $U_\Sigma$  на корреляционном уровне [5].

Сначала определим искомые параметры  $\alpha$  и  $\lambda$  для плотности распределения величины  $U_\Sigma$  при наличии только одной помехи –  $P(U_\Sigma)$ . По правилам нахождения среднего и дисперсии суммы случайных величин (в том числе и коррелированных) для  $\mu_1$  и  $\sigma_\Sigma^2$  имеем:

$$\mu_1 = N \cdot M_y = N \cdot \exp(M_z + \sigma_z^2), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\Sigma^2 &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \text{cov}\{(y_i - M_y)(y_j - M_y)\} = \\ &= \sigma_y^2 \cdot (N + 2N \cdot \sum_{k=1}^{N-1} R_k - 2 \sum_{k=1}^{N-1} k \cdot R_k), \end{aligned} \quad (4)$$

где элементы ковариационной матрицы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{cov}\{(y_i - M_y)(y_j - M_y)\} = \\ = \sigma_y^2 \begin{pmatrix} 1 & R_1 & R_2 & \dots & R_{N-1} \\ R_1 & 1 & R_1 & \dots & R_{N-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{N-1} & R_{N-2} & R_{N-3} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

здесь  $\sigma_y^2$  – дисперсия величины  $y_m$ , определяемая из выражения  $\sigma_y^2 = \exp(2M_z + \sigma_z^2) \cdot [\exp(\sigma_z^2) - 1]$ .

Учитывая (4) и используя выражения для конечных сумм вида

$$\sum_{e=0}^N x^e = (1 - x^{N+1}) / (1 - x)$$

и  $\sum_{e=1}^N e x^e = [x + x^{N+1}(Nx - N - \alpha)] / (1 - x)^2$ ,

получаем:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_y^2 \cdot [N(1 - R^2) + 2R(R^N - 1)] / (1 - R)^2. \quad (5)$$

Выражения (2)-(5) с точностью до величины, порядок малости которой равен  $(1/N)^{1/2}$ , полностью определяют статистику результата некогерентного накопления пачки сигналов в логарифмически нормальных коррелированных помехах от неоднородностей атмосферы в приземной среде (дискретные мешающие отражения типа “ангел-эхо”). При этом следует заметить, что для расчета характеристик обнаружения сигналов на фоне отражений от морской поверхности на основе экспериментальных исследований статистики величины  $U_\Sigma$  можно использовать гамма-распределение. Однако его параметры определяются при этом опытным путем

и не критичны корреляционным характеристикам мешающих отражений, что ограничивает применимость результатов, получаемых при таком подходе.

Найдем теперь параметры  $\mu_1$  и  $\sigma_\Sigma^2$  величины  $U_\Sigma$  для смеси помехи и сигнала от цели, т.е. функцию  $P_{\text{сп}}(U_\Sigma)$ .

При анализе характеристик обнаружения сигналы от целей будем считать детерминированными. Отсюда, основываясь на аддитивном характере смеси помехи и детерминированного сигнала, можно заключить, что дисперсия величины  $U_\Sigma$  при наличии сигнала от цели определяется только дисперсией помехи, т.е. выражается соотношением (5).

Среднее значение величины  $U_\Sigma$  для смеси помехи и детерминированного сигнала с амплитудой  $U$  определим через среднее значение суммы двух векторов – вектора сигнала и «помехового» вектора с модулем, равным  $M_y$ , считая разность фаз этих векторов равномерно распределенной на отрезке  $[0, 2\pi]$ :

$$\begin{aligned} \mu_1 &\approx N \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{M_y^2 + U^2 + 2M_y U \cos \Delta\varphi} d\Delta\varphi = \\ &= N [M_y + U] \frac{2}{\pi} E\left[\frac{2\sqrt{z}}{z}\right], \end{aligned} \quad (6)$$

здесь  $z = U^2 / M_y^2$ ,  $E(k)$  – полный эллиптический интервал второго рода [5].

Соотношения (2)-(5), определяющие статистику величины  $U_\Sigma$  в отсутствие сигнала от цели, приводят к следующему трансцендентному уравнению для определения порога обнаружения  $U_0$ , обеспечивающего требуемый уровень ложной тревоги  $F$ :

$$\gamma(\alpha, \lambda U_0) / \Gamma(\alpha) = F, \quad (7)$$

где  $\gamma(P, X) = \int_0^X t^{P-1} e^{-t} dt$  – неполная гамма-функция.

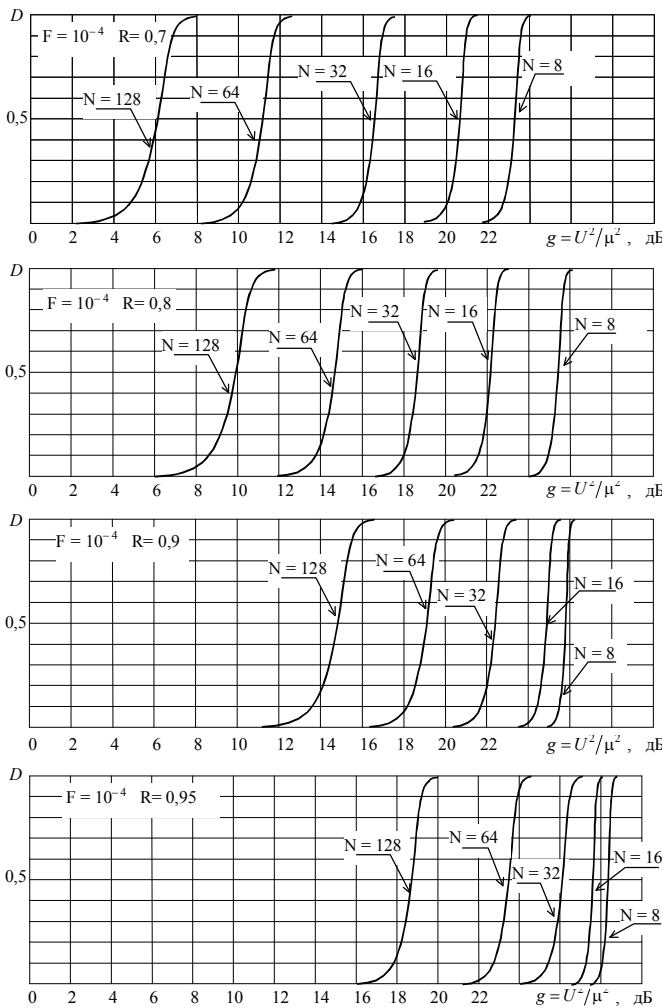
Соответствующим образом вычисляется вероятность правильного обнаружения  $D$  для  $g$  – заданного соотношения сигнал/помеха:

$$\begin{aligned} g &= U^2 / (M_y^2 + \sigma_\Sigma^2), \\ D &= 1 - \gamma(\alpha, \lambda U_0) / \Gamma(\alpha), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\lambda$  и  $\alpha$  определяются на основе выражений (3), (5) и (6).

На ПЭВМ было получено численное решение уравнения (7) методом последовательных приближений с использованием известных приближений гамма-функций. С их использованием вычислялись также и вероятности правильного обнаружения по выражению (8).

На рисунке приведены рассчитанные по выражениям (7) и (8) кривые обнаружения при значениях  $M_z = 0$  и  $\sigma_z = 3$  дБ (наиболее типичные значения параметров логнормального распределения огибающей мешающих отражений) [3] для различных значений объема накопления  $N$  и коэффициента корреляции помех  $R$ .



Кривые обнаружения

Полученные результаты дают не только количественные оценки характеристик обнаружения при накоплении пачки по выходу линейного детектора, но и позволяют оценить влияние параметров РЛС ( $\lambda$ ,  $N$ ,  $F_{\text{СП}}$ ) и корреляционно-спектральных характеристик сигнала ( $R = \exp(-2\pi\Delta f_{\text{П}}/F_{\text{СП}})$ ) на эффективность обнаружения и сопровождения воздушных объектов.

Известно, что эффективным средством отсеивания ложных отметок дискретных мешающих отражений от неоднородностей атмосферы в приземном слое является траекторная (трассовая) обработка. С учетом быстрейшего действия современных вычислительных средств, а также характерных значений темпа локализации и секторного обзора приземной среды в РЛС сопровождения малой и средней дальности можно показать, что так называемая траекторная (вторичная) обработка может отсеять в секторе обзора не более 20100 ложных отметок. При этом, как правило, общее количество обрабатываемых ячеек разрешения ( $105 \dots 10^6$ ) ограничивает внутриобзорный уровень вероятности ложных тревог  $F = 10^{-4}$  [2].

Отсюда следует, что традиционные процедуры некогерентного накопления сигналов по выходу линейного детектора в диапазоне объема пачек  $N = 8128$  и величины коэффициента корреляции помех  $R \geq 0,7$  не могут обеспечить эффективного обнару-

жения и сопровождения малоаметных целей (соотношение сигнал/помеха  $q \approx 0 \dots 10$  дБ).

При наиболее типичных значениях параметров РЛС средств сопровождения малой и средней дальности ( $\lambda = 10$  см,  $F_{\text{СП}} = 24$  кГц, время секторного обзора  $T_{\text{обз}} = 13$  с, а ширина диаграммы направленности  $\Delta\beta_{0,5\text{р}} = 0,51^\circ$ ,  $\Delta\varepsilon_{0,5\text{р}} = 0,5^\circ$ ) объем пачки составляет от 8 до 30 импульсов, а коэффициент корреляции, определяемый быстро флуктуирующей частью мешающих отражений от неоднородностей атмосферы в приемной среде типа «ангел-эхо» ( $\Delta f_{\text{П}} \approx 50180$  Гц), равен примерно  $0,6 \dots 0,8$ .

Следует отметить, что уменьшение степени межпериодной корреляции мешающих отражений за счет уменьшения частоты повторения (следования) зондирующих импульсов, сопровождается пропорциональным уменьшением объема накопления и, следовательно, не может привести к улучшению характеристик обнаружения. Увеличение объема пачки путем расширения диаграммы направленности антенны сопровождается также негативными факторами — уменьшением соотношения сигнал/помеха из-за возрастания фоновых отражений, ухудшением разрешающей способности и точности измерения координат.

Таким образом, количественный и качественный анализ полученных характеристик обнаружения позволяет сделать однозначный вывод о невозможности эффективного решения проблемы обнаружения и сопровождения эхо-сигнала воздушных объектов малой заметности на фоне мешающих отражений от неоднородностей атмосферы приземной среды с помощью традиционных процедур некогерентного накопления сигналов при линейной амплитудной характеристике приемного тракта (детектора). Для эффективного решения задачи требуются новые нетрадиционные методы.

**Литература:** 1. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов.радио. 1970. 560 с. 2. Жирнов В. В., Литвинов В. В., Филлюшкин И. П. Особенности обработки и обнаружения радиолокационных сигналов целей на фоне дискретных мешающих отражений типа «ангел-эхо» // Судостроительная промышленность. Сер. РЛ. К., 1991. Вып. 29. С. 83–88. 3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. Т.1. М.: Сов. радио, 1976. 450с. 4. Дохов А.И., Жирнов В.В. Принципы защиты радиопеленгаторов в условиях воздействия мешающих отражений типа «ангел-эхо» // Радиотехника. Харьков. 1997. Вып. 104. С. 112–119. 5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1977. 832 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2003

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Пуятин Е.П.

**Жирнов Владимир Витальевич**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр. ХНУРЭ. Научные интересы: радиоэлектроника, радио- и оптическая локация, обработка сигналов и информации. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 14-95-48.

**Лебедев Олег Григорьевич**, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры Харьковского института летчиков ВВС. Научные интересы: радиолокация, обработка сигналов. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Культуры, 15, кв. 7, тел. 45-60-10.

**Стрельченко Владимир Иосифович**, науч. сотр. ХНУРЭ. Научные интересы: радиолокация, обработка сигналов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 33-37-39.