

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭХО-СИГНАЛОВ ЦЕЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЗАМЕТНОСТИ

В.Ф. Зюкин, А.А. Грызо, П.А. Коваленко  
(Харьковский университет Воздушных Сил)

*Предлагается модельный ряд из шести моделей, достаточно полно охватывающий многообразие реальных аэродинамических целей. Известные модели дополнены двумя моделями целей выполненных по технологии снижения радиолокационной заметности.*

***статистические модели, эхо-сигналы, технология снижения радиолокационной заметности***

**Постановка задачи.** При моделировании сигнально-помеховой обстановки в обзорных РЛС РТВ возникает задача выбора моделей эхо-сигналов, и которые с достаточной полнотой охватывают все многообразие входных воздействий. **Цель статьи** – получить конечный ряд моделей, включающий описание флуктуации эхо-сигналов целей, выполненных по технологии снижения радиолокационной заметности. Для всех моделей найти плотности распределения огибающей аддитивной смеси сигнала и шума.

Опишем пачку эхо-сигнала цели в виде вектор-столбца [1]

$$\dot{U}_c = \left\| b_1 \cdot \dot{x}_1 \cdot e^{j\beta_1}, b_2 \cdot \dot{x}_2 \cdot e^{j\beta_2}, \dots, b_N \cdot \dot{x}_N \cdot e^{j\beta_N} \right\|^T. \quad (1)$$

Комплексные отсчеты ожидаемого сигнала  $\dot{x}_i$  детерминированы. Комплексные числа  $b_i \cdot e^{j\beta_i} = \dot{b}_i$  (случайные амплитудные множители  $b_i$  и случайные начальные фазы  $\beta_i$ ) учитывают изменение структуры импульсов пачки за счет флуктуаций, приводящих к нежесткости структуры сигнала. Для их описания вводится вектор случайных параметров  $B = \|b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_N, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_N\|$ .

Для статистического описания пачки эхо-сигналов (1) необходимо определение совместной плотности распределения компонент  $b_i, \beta_i$ :

$$P(B) = P(b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_N, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_N). \quad (2)$$

**1. Анализ последних достижений и публикаций.** Множество вероятностных описаний эхо-сигналов, вытекающих из (2), сведем к ряду

практически важных ситуаций, представленных в табл. 1.

А. Пачка когерентных (дружно флюктуирующих) радиоимпульсов:  $b_i = b$ ,  $\beta_i = \beta$ . Выражение (2) для независимых флюктуаций амплитуды  $b$  и равномерно распределенной в интервале  $[0, 2\pi]$  начальной фазы  $\beta$  приводится к виду  $P(B) = P(b) \cdot P(\beta) = P(b)/(2 \cdot \pi)$ . В частном случае, при  $P(b) = \delta(b-1)$  имеем пачку нефлюктуирующих по амплитуде радиоимпульсов со случайной равновероятной начальной фазой и неслучайной единичной амплитудой. Такой характер могут иметь отражения от объекта с одной блестящей точкой, например, шара (модель 1, табл. 1).

Б. Пачка дружно флюктуирующих по амплитуде некогерентных радиоимпульсов с независимыми флюктуациями начальных фаз  $\beta_i$ :

$$P(B) = P(b) \cdot \prod_i P(\beta_i), \quad P(\beta_i) = \frac{1}{2 \cdot \pi}, \quad 0 \leq \beta_i \leq 2 \cdot \pi. \quad (3)$$

При  $P(b) = \delta(b-1)$  – нефлюктуирующие по амплитуде отражения (например, от шара) (модель 1, табл. 1) при некогерентном излучении РЛС.

В. Пачка независимо флюктуирующих радиоимпульсов:

$$P(B) = P(b, \beta) = \prod_i P(b_i) \cdot P(\beta_i), \quad P(b_i, \beta_i) = \frac{P(b_i)}{2 \cdot \pi}. \quad (4)$$

Г. Пачка радиоимпульсов с произвольной корреляцией между ними (совместная плотность распределения определяется выражением (2)). Важной характеристикой является матрица взаимных корреляционных функций комплексных амплитуд (отсчетов)  $\dot{\Phi}_c = \frac{1}{2} \cdot \langle \dot{U}_c \cdot \dot{U}_c^{*T} \rangle$ .

Элементы матрицы  $\dot{\Phi}_{c,i,k} = \frac{1}{2} \cdot \langle \dot{u}_{c,i} \cdot \dot{u}_{c,k}^* \rangle = \frac{1}{2} \langle b_i \cdot b_k \cdot e^{j(\beta_i - \beta_k)} \rangle \cdot \dot{x}_i \cdot \dot{x}_k^*$  могут быть найдены при известной многомерной плотности распределения вероятности  $P(B)$  (2).

В качестве плотностей вероятности  $P(b)$  ( $P(\beta_i)$ ), для ситуаций А, Б, В часто берут  $n$ -распределение Накагами.

$$P(b) = \frac{2 \cdot n^n}{\Gamma(n)} \cdot b^{2n-1} \cdot \exp(-n \cdot b^2), \quad (5)$$

где  $\Gamma(n)$  – гамма-функция.

Частным случаем распределения амплитудного множителя  $b$  (5) при  $n = 1$  является релеевское, что при равномерном распределении фазы  $\beta_i$  соответствует нормальному распределению квадратурных компонент такого сигнала.

Эта модель описывает распределение амплитуд сигналов, отраженных от целей с большим числом случайно расположенных, независимых

отражающих и равноценных по интенсивности (возможно, случайно перемещающихся, мерцающих) элементов (блестящих точек).

В качестве примера такого объекта для импульсных обзорных РЛС РТВ сантиметрового (дециметрового) диапазонов длин волн выбран бомбардировщик типа В-52 (модель 4, табл. 1).

Выберем, помимо модели 4, еще две, соответствующие параметру  $n = 2$  (модель 3, табл. 1) и  $n = 3$  (модель 2, табл. 1) Плотности вероятности распределения амплитуд эхо-сигнала на фоне шума и примеры соответствующих объектов для этих моделей приведены в табл. 1 ( $q^2$  – отношение мощности сигнала к уровню шума  $\sigma_{ш}^2$ , причем  $\sigma_{ш}^2 = 1$ ,  $U$  – безразмерная случайная величина)

**2. Изложение основного материала.** Вероятностное описание эхо-сигналов целей, выполненных по технологии снижения радиолокационной заметности. Показателем применимости (коэффициент  $K_{ц}$ ) одномодальных законов распределения амплитуды сигналов является отношение среднего значения эффективной поверхности рассеяния  $\langle \sigma_{ц} \rangle$  к медианному значению  $\sigma_{ц,мед}$   $K_{ц} = \langle \sigma_{ц} \rangle / \sigma_{ц,мед}$ . Для широкого класса целей, описываемых распределением (5) значения  $K_{ц}$  близки к единице (табл. 1, модели 1...4).

Отличительной особенностью летательных аппаратов, выполненных по технологии «Стелс» является малая средняя случайная составляющая сигнала, отраженного от объекта, и увеличенная дисперсия этого сигнала. Это означает, что диаграмма обратного рассеяния малозаметного объекта должна иметь лепестковую структуру. Желательно, чтобы «...максимумов, превышающих порог обнаружения, было как можно меньше, а их угловое положение выбиралось бы с учетом распределения углов наблюдения объекта в момент обнаружения» [2]. Реализация этих требований возможна при использовании целей с клиновидными элементами, отражающими при некоторых углах падения почти зеркально. Значение  $K_{ц}$  таких целей значительно превышает соответствующую величину для релеевской цели и достигает  $K_{ц} \leq 10$ .

Вероятностную модель флюктуаций амплитуды эхо-сигналов на фоне шума для таких целей можно получить, воспользовавшись следующими соображениями.

Будем полагать, что цель (цели) с клиновидными отражающими элементами может длительное время наблюдаться в пределах ракурсных углов  $\Theta_i$ , которым соответствует средняя эффективная отражающая поверхность  $\sigma_{цi}$ . При этом условная плотность вероятности для отраженного эхо-сигнала, наблюдаемого на фоне шума, будет соответствовать модели 4 (табл. 1) при условии, что  $q^2 = q_i^2 \sim \sigma_{цi}$ , т.е.  $P4(U) \rightarrow P4(U/q_i^2)$ .

Для других ракурсов  $\Theta_j$  будут другие средние значения отношения сигнал/шум  $q_j^2$  и  $P4(U) \rightarrow P4(U/q_j^2)$ .

Если известна плотность непрерывно распределенной интенсивности сигнала (отношения сигнал/шум) ( $q_i^2 \rightarrow q^2$ )  $W(q^2)$ , то по формуле полной вероятности можем найти безусловную плотность распределения амплитуд эхо-сигнала на фоне шума:

$$P(U) = \int_0^{\infty} P(U/q^2) \cdot W(q^2) dq^2. \quad (6)$$

Распределение  $W(q^2)$  неизвестно, можно считать заданными только некоторые, доступные в экспериментальных исследованиях, статистические характеристики случайной величины  $q^2$ : математическое ожидание  $m = \langle q^2 \rangle$  и дисперсию  $D = \langle (q^2 - m)^2 \rangle$  или относительную величину флуктуаций мощности  $\Delta = \sqrt{D}/m$ . В этом случае распределение вероятности  $q^2$  получится не произвольным, а подчиненным следующим ограничениям:

$$\int_0^{\infty} W(q^2) dq^2 = 1; \quad \int_0^{\infty} q^2 \cdot W(q^2) dq^2 = m; \quad \int_0^{\infty} (q^2 - m)^2 \cdot W(q^2) dq^2 = D.$$

Предлагается в качестве плотности распределения  $W(q^2)$  воспользоваться гамма-распределением, [3] обобщающим основные одномодальные законы распределения и позволяющим аппроксимировать с необходимой степенью точности те существующие законы распределения, которые нельзя получить в виде частных случаев из более простых (Хойта, Релея и т.д.) распределений. В этом случае выражение (6) имеет вид:

$$P(U, m, \Delta) = \int_0^{\infty} \frac{U}{q^2 + 1} \cdot \exp\left(-\frac{U^2}{2 \cdot (q^2 + 1)}\right) \cdot \frac{(q^2)^{\Delta^2 - 1}}{(m \cdot \Delta^2)^{\Delta^2} \cdot \Gamma(\Delta^2)} \cdot \exp\left(-\frac{q^2}{m \cdot \Delta^2}\right) dq^2. \quad (7)$$

Из многообразия моделей, получаемых с помощью выражения (7) для разных  $\Delta$ , выделим две. Модель, описывающую плотность распределения огибающей аддитивной смеси шума и сигнала при параметре  $1,44 \leq K_{\Pi} < 2,22$  ( $0 \leq \Delta < 1,5$  дБ). В частном случае, при значении параметра  $\Delta = -0,9$  дБ ( $K_{\Pi} = 1,5$ ), выражение (7) можно записать в замкнутом виде (полагаем  $\sigma_{\text{ш}}^2 = 0$ ) (распределение Пирсона, модель 5, табл. 1):

$$P5(U, m) = m^{-1} \cdot U \cdot \exp\left(-\sqrt{m^{-1}} \cdot U\right).$$

Другая модель соответствует  $2,22 \leq K_{\Pi} \leq 10$  ( $1,5 \leq \Delta \leq 5$  дБ); част-

ный случай при  $\Delta = 1,5$  дБ ( $K_{ц} = 2,22$ ,  $\sigma_{ш}^2 = 0$ ) дает экспоненциальное распределение  $P_6(U, m) = m^{-1} \cdot \exp(-m^{-1} \cdot U)$ .

Характеристики и примеры воздушных объектов, соответствующих введенным моделям ( $P_5(U, m)$ ,  $P_6(U, m)$ ), также представлены в табл. 1. Кривые 1 ... 6 плотностей распределения для введенных моделей представлены на рис. 1. Среднее значение отношения сигнал/шум для всех моделей ( $q^2$  – модели 1 ... 4;  $m$  – модели 5, 6) на рис. 1 принято равным 20 дБ.

Все кривые унимодальны, с ростом номера модели мода и, как можно показать, медианное значение, смещаются в область малых значений аргумента. По мере увеличения номера модели уровень флуктуаций амплитуды эхо-сигнала относительно среднего значения монотонно возрастает. Отметим, что кривая для релеевского распределения ( $P_4(U)$ ) занимает промежуточное положение среди других распределений.

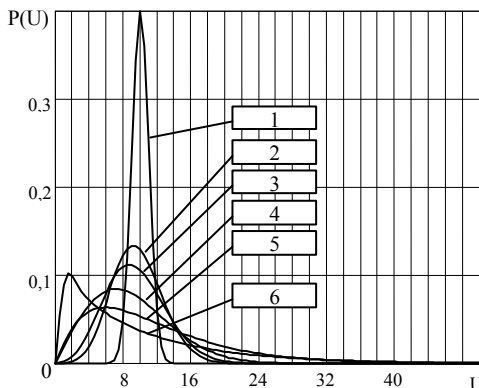


Рис. 1. Плотности распределения вероятности амплитуд эхо-сигналов целей, описываемых различными статистическими моделями

**3. Насколько полно ряд из 6 моделей охватывает все возможные варианты описания?** Вопрос полноты может касаться различных показателей качества радиолокационной информации: надежности обнаружения и сопровождения, точности измерения координат (параметров движения), качества классификации целей. Надежность обнаружения оценим, воспользовавшись условными вероятностями правильного обнаружения  $D$  и ложной тревоги  $F$ . На рис. 2 построено семейство кривых обнаружения для уровня ложной тревоги ( $F = 10^{-6}$ ). Номер кривой соответствует номеру модели в табл. 1.

**Выводы.** Из рассмотрения следует, что предложенные распределения  $P_5(U)$ ,  $P_6(U)$  позволяют более широко охватить возможные условия обнаружения реальных целей.

Общие закономерности для всех кривых соблюдаются: при возрастании уровня относительных флуктуаций сигнала для достижения высоких значений  $D$  ( $D \rightarrow 1$ ) необходимы дополнительные энергетические затраты (растет требуемое пороговое значение  $q^2$ ); при малых значениях  $q^2$  ( $q^2 < 6..10$  дБ) сильно флуктуирующий сигнал наблюдается лучше.

Кривая релейского распределения ( $P_4(U)$ ) дает промежуточные результаты, т.е. такой сигнал можно считать наиболее представительным.

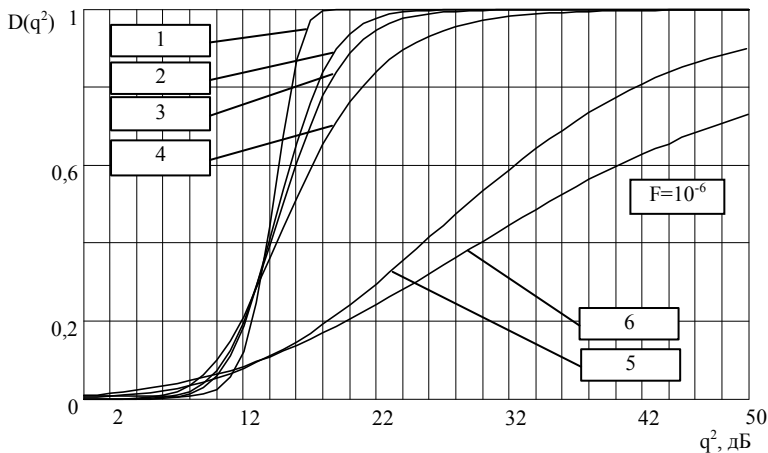


Рис. 2. Кривые обнаружения

Информационное расстояние  $S(q^2)$  (уровень различимости, расстояние Бхаттачари) для любой пары сигналов можно определить с помощью

выражения:  $S(q^2) = -\ln \left( \int_0^\infty \sqrt{P_i(U/q^2) \cdot P_j(U/q^2)} dU \right)$  [4]. Анализ показыва-

ет, что модельный ряд обеспечивает сравнительно равномерное заполнение шкалы информационных расстояний (с шагом 2...5 дБ), в центре которой находится релейский сигнал (при этом  $q^2 = 20$  дБ, число импульсов в пачке  $N = 20$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь. – 1981. – 416 с.
2. Ананьин Э.В., Ваксман Р.Г., Патраков Ю.М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиоэлектроника. – 1994. – № 4.
3. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – М.: Мир, 1984. – 738 с.
4. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник / Под ред. Л.М. Финка. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

Поступила 28.10.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор А.П. Кондратенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил