

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(МИНТРАНС РОССИИ)  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА (РОСАВИАЦИЯ)  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»  
(ФГБОУ ВО СПбГУ ГА)**

**Красноярский филиал**

Факультет технической эксплуатации транспортного радиоэлектронного  
оборудования

Кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования

Специальность 11. 02. 06 «Техническая эксплуатация транспортного  
радиоэлектронного оборудования (по видам транспорта)»

Конкурсная работа

**Расширение возможностей радиолокационных систем путем реализации  
алгоритмов классификации воздушных объектов**

Фыркова Татьяна Алексеева  
3 курс, группа Р-31

Научный руководитель: Бодикова Т. Н.

г. Красноярск  
2021

## Содержание

	стр.
Введение .....	3
1 Анализ спектра амплитудных флуктуаций .....	4
2 Классификация по величине эффективной поверхности рассеяния радиолокационных объектов .....	14
Заключение .....	18
Список использованных источников .....	19

## Введение

Радиотехническое обеспечение безопасности полетов воздушных судов предполагает использование различных радиоэлектронных систем, в том числе и радиолокационных. К числу радиолокационных систем (РЛС) относятся средства первичной и вторичной радиолокации. Предпочтительными в Гражданской авиации являются системы вторичной радиолокации. Однако ряд особенностей первичных РЛС не позволяют отказываться от их практического применения. Во-первых, обнаружение и определение местоположения воздушных судов является однопозиционным и не зависит от наличия средств активного ответа. Во-вторых, первичные РЛС позволяют: определять метеобстановку на трассах полета, обнаруживать стаи птиц, которые являются опасными для полетов объектами. В-третьих, первичные РЛС позволяют обнаруживать различные объекты, не оборудованные ответчиками.

В процессе получения и обработки радиолокационной информации решаются следующие основные задачи: обнаружение целей, измерение параметров их движения, обнаружение и сопровождение траекторий целей, объединение информации от различных источников. Одно из важнейших направлений современной радиолокации – создание методов получения наиболее полной информации, содержащейся в радиолокационных сигналах и помехах. Составной частью данного направления является классификация обнаруженных воздушных объектов (ВО). Классификация позволяет реализовать разделение воздушных объектов по различным классам, в том числе на реальные и помеховые.

Современный уровень развития теории и техники радиолокации, обеспечивает в большинстве случаев классификацию воздушных объектов только по классам. В перспективе становится актуальной задача индивидуальной классификации типов объектов даже внутри одного класса. Информативность отдельных признаков классификации неодинакова, но, очевидно, увеличение числа используемых признаков в целом повышает вероятность правильного принятия решения.

Целью данной работы является представление алгоритмов и устройств классификации воздушных объектов по сигналам первичных радиолокационных средств. Представлены только некоторые признаки из возможных для реализации алгоритмов классификации.

## 1 Анализ спектра амплитудных флуктуаций

Анализ спектра амплитудных флуктуаций позволяет реализовать ряд задач обработки с целью получения информации, необходимой для обнаружения, оценки помеховой обстановки, классификации принятых сигналов с целью определения классов воздушных объектов и разделения сигналов на полезные и помеховые<sup>1</sup>.

В зависимости от вида сигнала принятого от различных воздушных объектов, спектр амплитудных флуктуаций может значительно меняться. На рис. 1.1 изображены пачки отраженных сигналов от различных воздушных объектов (простой объект и объект с большим числом «блестящих» точек).

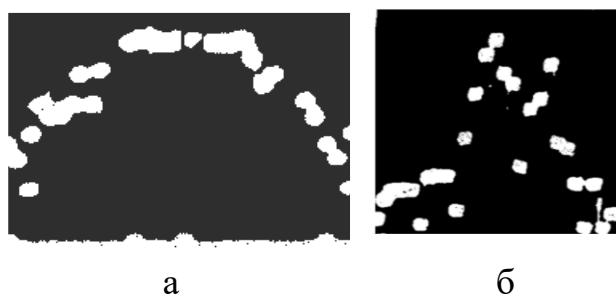


Рисунок 1.1 – Пачки отраженных сигналов от различных объектов

Синтез устройства анализа спектра амплитудных флуктуаций проведем для сигналов импульсных. Отметим, что импульсные сигналы применяются в радиолокационных системах. За основу устройства анализа спектра амплитудных флуктуаций положим схему череспериодного вычитания сигналов, используемую в системах селекции движущихся целей первичных средств наблюдения.

Для оценки ширины спектра амплитудных флуктуаций наиболее простыми и достаточно эффективными являются схемы череспериодного вычитания (ЧПВ). По величине остатков можно судить о степени флуктуаций импульсов пачки отраженного сигнала.

Для схемы однократного череспериодного вычитания (ЧПВ)

$$U_{\text{вых}}(t) = U(t) - U(t - T_{\text{п}}),$$

где  $U_{\text{вых}}(t)$  – напряжение на выходе схемы ЧПВ;

$U(t)$  – напряжение на входе схемы ЧПВ;

$U(t - T_{\text{п}})$  – напряжение, задержанное на период повторения  $T_{\text{п}}$ .

---

<sup>1</sup> Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Сколника. Пер. с англ. Под общей ред. В. С. Вербы. В 2-х книгах. – М.: Техносфера, 2014. – 672с.

По сути дела, схема ЧПВ является фильтром, выделяющим информативные составляющие спектра амплитудных флюктуаций<sup>2</sup>.

Частотная характеристика схемы однократного ЧПВ может быть определена как отношение комплексных амплитуд выходных и входных сигналов, при условии, что на вход подан гармонический сигнал:

$$\dot{K}(f) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} \Big|_{U_{\text{ВХ}}(t)=e^{i2\pi ft}} = 2ie^{-i\pi ft} \sin(\pi f T_{\text{П}}).$$

Амплитудно-частотная характеристика определится по формуле:

$$K(f) = |\dot{K}(f)| = 2|\sin(\pi f T_{\text{П}})|.$$

При включении последовательно двух схем ЧПВ результирующая АЧХ находится по следующей формуле:

$$|K'(f)| = |K(f)|^2 = 4\sin^2(\pi f T_{\text{П}}) = 2(1 - \cos(2\pi f T_{\text{П}})).$$

На рис.1.2 изображены различные характеристики, поясняющие предлагаемый способ фильтрации.

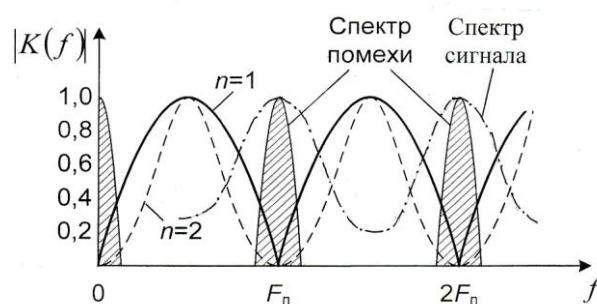


Рисунок 1.2 – Характеристики, поясняющие способ фильтрации

На рисунке сплошной линией изображена амплитудно-частотная характеристика схемы однократного ЧПВ, штриховой линией – двукратной схемы ЧПВ. В случае слабофлюктуирующих сигналов (спектр амплитудных флюктуаций узкий) уровень сигнала на выходе схемы ЧПВ мал. Во втором случае на выходе схемы ЧПВ будет наблюдаться значительный уровень остатков. Дальнейшая пороговая обработка позволяет классифицировать сигналы с различным спектром амплитудных флюктуаций.

<sup>2</sup> Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

Схема однократного ЧПВ осуществляет, по сути дела, оценку ширины спектра амплитудных флюктуаций сигналов. Для получения более достоверных оценок целесообразно усреднить полученные результаты путем некогерентного накопления.

Устройство спектрального анализа сигналов предлагается выполнить в соответствии со структурой, изображенной на рис. 1.3.

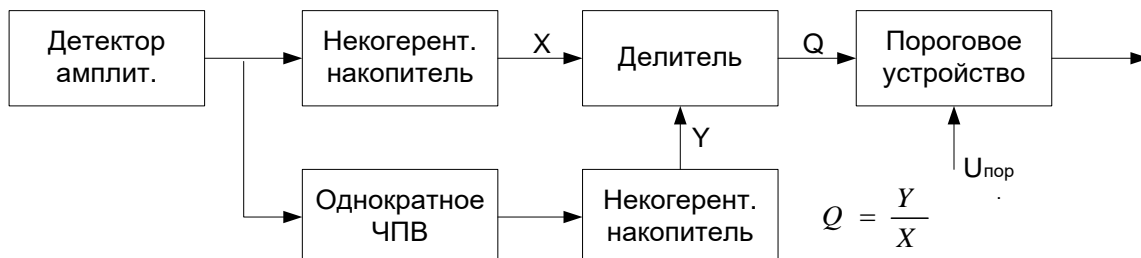


Рисунок 1.3 – Устройство спектрального анализа сигналов

В процессе работы устройства осуществляется накопление импульсов сигнала с выхода амплитудного детектора приемника и накопление сигналов, прошедших схему ЧПВ. Если обеспечить сравнение двух накопленных сигналов, то их отношение будет меняться в зависимости от степени флюктуации амплитуды входных импульсов. С ростом амплитудных флюктуаций отношение сигналов увеличивается, так как возрастет уровень сигналов на выходе схемы ЧПВ. Пороговая обработка позволяет классифицировать сигналы с различной степенью амплитудных флюктуаций.

Для определения аналитического выражения для отношения накопленных сигналов учтем, что АЧХ схемы ЧПВ при условии, что на вход подан гармонический сигнал имеет следующий вид:

$$K_1(\omega) = 2 \left| \frac{\sin \omega T_{\Pi}}{2} \right|.$$

А АЧХ схемы некогерентного накопителя можно записать как:

$$K_2(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 - 2\beta \cos \omega T_{\Pi} + \beta^2}}.$$

В этом случае мощность сигналов на выходе некогерентного накопителя входного сигнала равна

$$P_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) |K_2(\omega)|^2 d\omega,$$

где  $S(\omega)$  – энергетический спектр входного сигнала.

Во второй цепи накопления

$$P_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) |K_1(\omega)|^2 |K_2(\omega)|^2 d\omega.$$

Отношение сигналов

$$Q = \frac{P_1}{P_2} = 2\beta - (1 + \beta^2) + \frac{(1 - \beta^2)(1 - \beta\rho)}{1 + \beta\rho},$$

где  $\rho$  – коэффициент межпериодной корреляции;

$\beta$  – коэффициент обратной связи некогерентного накопителя.

На рис. 1.4 изображены характеристики результата работы устройства классификации сигналов по спектру амплитудных флюктуаций.

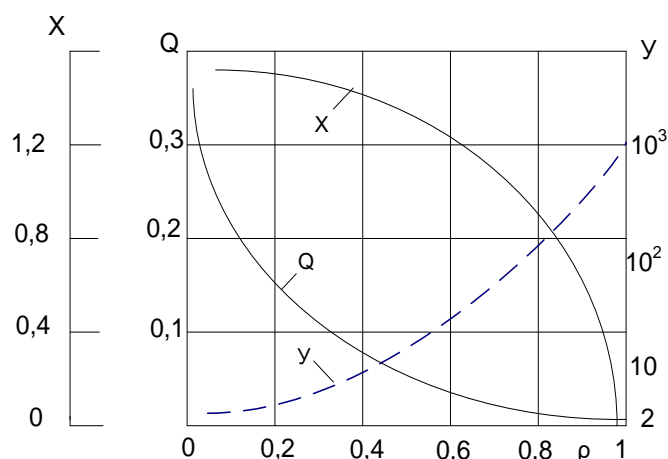


Рисунок 1. 4 – Характеристики классификации сигналов в зависимости от коэффициента межпериодной корреляции

С увеличением коэффициента межпериодной корреляции  $\rho$  отношение мощностей  $Q$  монотонно убывает, стремясь к 0 в случае полной корреляции импульсов пачки. На выход порогового устройства в зависимости от величины порога, будут проходить сигналы с различными коэффициентами межпериодной корреляции (с различной степенью амплитудных флюктуаций).

При наличии двух каналов обработки предлагается выполнить устройство классификации сигналов в соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 1.5.

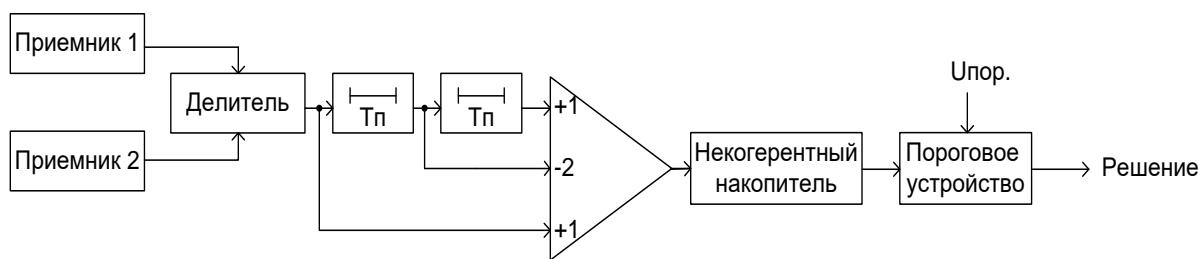


Рисунок 1.5 – Структурная схема устройства классификации сигналов

Принцип работы устройства классификации состоит в следующем. Сигналы двух каналов обработки (частотных или поляризационных) поступают на вход делителя, с выхода которого подаются на схему двукратного череспериодного вычитания. Дальнейшая обработка предполагает некогерентное накопление остатков вычитания и сравнение результата с порогом. Пороговая обработка реализует окончательную классификацию сигналов с различным спектром амплитудных флуктуаций.

При решении конкретных задач достаточно эффективными являются исследования, проводимые с помощью моделирования на ЭВМ. При построении алгоритма функционирования устройства классификации решаются последовательно следующие задачи:

- а) известная программа работы устройства переводится на язык математики, в результате чего создается математическая модель системы;
- б) формируются входные сигналы с заданными характеристиками;
- в) оценивается эффективность работы системы.

Математическая модель устройства классификации сигналов предполагает выполнение следующих операций: линейное детектирование, некогерентное накопление, череспериодное вычитание сигналов, деление двух составляющих, сравнение с порогом.

В качестве оценки эффективности работы устройства классификации выбрана вероятность правильной классификации сигналов с различными коэффициентами межпериодной корреляции в зависимости от отношения сигнал/шум. Для этого воспользуемся аппаратом функций различимости. При оценке результатов главным является знание закона распределения случайной величины, который в точности неизвестен.

Для статической обработки сигналов, состоящих из большого количества отсчетов, широко применяются гистограммы. Гистограмма это график, в котором по оси  $x$  откладываются возможные значения для каждого отсчета сигнала, а по оси  $y$  – количество отсчетов сигнала, имеющих данное значение. Сумма всех величин гистограммы должна соответствовать количеству отсчетов сигнала:



$$N = \sum_{i=0}^M H_i,$$

где  $N$  – количество отсчетов сигнала;

$M$  – максимально возможное значение сигнала;

$H_i$  – количество отсчетов сигнала с заданным значением (отображенным на гистограмме).

Для выявления закона распределения отношения  $Q$  на вход устройства подавались 256 случайных реализаций сформированного входного сигнала. При обработке каждой реализации  $Q$  принимало определенное значение. Совокупность значений  $Q$  представили первичный статистический материал. Была реализована процедура получения исходных данных для построения гистограмм. По этим данным построена гистограмма для числа разрядов равным 13 (рис.1.6).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

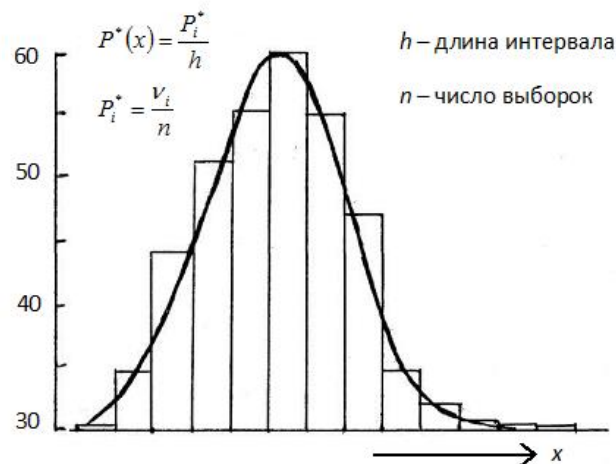


Рисунок 1.6 – Гистограмма и выравнивающая функция для числа разрядов 13

При ограниченном числе реализаций статистическому распределению свойственны случайности и стоит вопрос о подборе для статистического ряда теоретической кривой распределения, выражающей существенные черты статистического материала. Исходя из приведенных гистограмм, исследуемая величина  $Q$  может иметь нормальное распределение

Задача выравнивания статистического ряда заключается в рациональном выборе параметров  $m$  и  $\sigma$ . При этом параметры теоретического распределения  $m$  и  $\sigma$  должны совпадать с соответствующими статистическими характеристиками полученного распределения  $m_x$  и  $D_x$ .

Рассмотрим случай, когда входной сигнал представлял последовательность импульсов с коэффициентом корреляции  $\rho_c = 0,9$  и отношением сигнал/шум  $q = 20$  дБ. Число разрядов выбрано 13.

Относительная частота попадания  $Q$  в разряд равна

$$P_i = \Phi\left(\frac{x_{i+1} - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_i - m}{\sigma}\right),$$

где  $x_i, x_{i+1}$  – границы  $i$ -го разряда.

Выборочные характеристики  $m_x^*$  и  $D_x^*$  определим по формулам ( $N$  – число разрядов)

$$m_x^* = \sum_{i=1}^N r_i \cdot p_i^*;$$

$$D_x^* = \sum_{i=1}^N r_i^2 \cdot p_i^* - (m_x^*)^2.$$

Для нашего случая

$$m_x^* = \sum_{i=1}^{13} r_i \cdot p_i^* = 0,2516017$$

$$D_x^* = \sum_{i=1}^{13} r_i^2 \cdot p_i^* - (m_x^*)^2 = 4,227974 \cdot 10^{-5}.$$

На одном графике (рис. 1.6) приведены гистограмма и выравнивающая ее кривая распределения случайной величины  $Q$ . Из графиков видно, что теоретическая кривая распределения  $f(x)$  сохраняет в основном существенные особенности статистического распределения  $Q$ , т. е. нормальный закон аппроксимирует выборочное распределение.

Для окончательного решения о том, что  $Q$  распределено по нормальному закону, проверим согласованность теоретического и эмпирического распределений, пользуясь критерием согласия  $\chi^2$  с уровнем значимости  $\alpha = 0,01$ . Для этого воспользуемся следующей формулой.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(v_i - nP_i)^2}{nP_i},$$

где  $n$  – число опытов.

При подстановке  $P_i$ , вычисленных по формуле, получим расхождение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{13} \frac{(v_i - nP_i)^2}{nP_i} = 14,6$$

Оценочными значениями заменены два параметра нормального закона. Поэтому число степеней свободы будет равно:  $k = 13 - 1 - 2 = 10$ .

Из таблиц значения  $\chi^2$  в зависимости от  $k$  и  $\alpha$  для  $k = 10$  и  $\alpha = 0,01$  находим

$$\chi_{k;\alpha}^2 = 23,21.$$

Таким образом,

$$\chi^2 = 14,6 < \chi_{k;\alpha}^2 = 23,21.$$

Это свидетельствует о том, что гипотезу о нормальном распределении случайной величины  $Q$  можно считать правдоподобной.

При решении многих практических задач применяются или экспериментальные методы или критерии, связанные не с самой вероятностью ошибок, а с ее границами.

При наличии двухальтернативных ситуаций для классической процедуры анализа оптимальная система должна определять отношение правдоподобия или его логарифма и сравнить его с порогом. Отношение правдоподобия определяется следующим образом:

$$l(x) = \frac{W(x/w_1)}{W(x/w_2)} \geq \frac{W(w_2)}{W(w_1)},$$

где  $W(w_1)$ ,  $W(w_2)$  – априорные вероятности признаков  $w_1$  и  $w_2$ ;

$W(w_2)/W(w_1)$  – пороговое значение отношения правдоподобия;

$w_1, w_2$  – признаки, характеризующие принадлежность сигнала к различным классам

Введем понятие характеристической функции<sup>3</sup>. Она определяется следующим образом

$$\gamma(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} W(x/\omega_2)^\varepsilon \cdot W(x/\omega_1)^{1-\varepsilon} dx, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – действительное число от 0 до 1.

Прологарифмировав (1) и взяв выражение со знаком минус, получим функцию, которую можно назвать функцией различимости, обладающую свойством аддитивности для независимых признаков

<sup>3</sup> Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов: Пер. с англ. / Под ред. А. А. Дорофеева. – М.: Наука, 1979. – 367с.

$$\vartheta(\varepsilon) = -\ln \gamma(\varepsilon) = -\ln \int_{-\infty}^{\infty} W(x/\omega_2)^\varepsilon \cdot W(x/\omega_1)^{1-\varepsilon} dx. \quad (2)$$

Функция различимости может служить критерием делимости сигналов по различным классам. Учитывая, что  $\varepsilon$  в окрестности оптимального значения обладает малой чувствительностью, положим  $\varepsilon = 0,5$ .

Функция различимости при  $\varepsilon = 0,5$  имеет вид

$$\vartheta(0,5) = B = -\ln \int_{-\infty}^{\infty} [W(x/\omega_1)W(x/\omega_2)]^{\frac{1}{2}} dx, \quad (3)$$

где  $B$  – расстояние Бхаттачария.

При использовании границы Чернова, учитывая, что  $[W(\omega_1) \cdot W(\omega_2)]^{1/2} \leq 0,5$  и полагая  $\varepsilon = 0,5$  средняя вероятность ошибки для случая двухальтернативной классификации определится следующим образом:

$$P_{\text{ср}} \leq 0,5 \int_{-\infty}^{\infty} [W(x/\omega_1) \cdot W(x/\omega_2)]^{\frac{1}{2}} dx. \quad (4)$$

Функция различимости тесно связана с качественными характеристиками классификации, в частности с вероятностью правильного решения задачи

$$D = 1 - P_{\text{ср}} = 1 - 0,5e^{-B}. \quad (5)$$

Таким образом, определив значение функции различимости, можно рассчитать вероятностные характеристики качества классификации различных радиолокационных объектов.

Для сигналов с нормальным законом распределения

$$B = \frac{(m_1 - m_2)^2}{4(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} - \frac{1}{2} \ln \frac{2\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}.$$

По известному  $B$  рассчитана вероятность правильной классификации. Для одного сигнала коэффициент корреляции задан 0,95. Число импульсов в пачке анализируемых сигналов равно 32.

Относительно сигнала с коэффициентом корреляции  $\rho_c = 0,95$  рассчитаны характеристики правильной классификации сигналов с другими коэффициентами  $\rho_c$ . Результаты расчетов приведены на рис. 1.7.

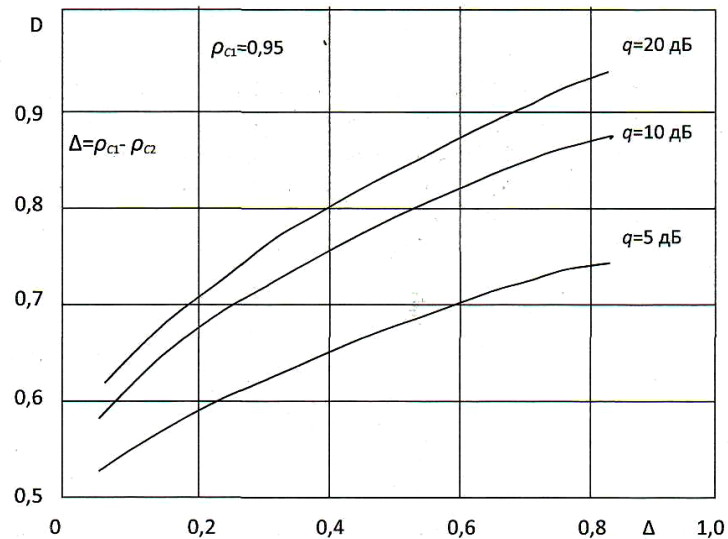


Рисунок 1.7 – Вероятность правильной классификации

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующее:

- вероятность правильной классификации зависит от соотношения коэффициентов межпериодной корреляции классифицируемых сигналов, и увеличивается по мере роста отношения сигнал/помеха  $q$ , достигая максимальной величины при  $q \sim 30$  дБ. Дальнейшее увеличение отношения  $q$  приводит к незначительному росту вероятности правильной классификации  $D$ ;
- вероятностные характеристики классификации улучшаются по мере увеличения числа анализируемых импульсов (увеличения времени анализа).

Таким образом, в качестве выводов можно отметить следующее.

1. Для оценки эффективности работы предложенного устройства проведено моделирование с использованием возможностей компьютера.
2. Для задания различной интенсивности сигнала формировался специальный вектор, представляющий выборку нормального процесса с математическим ожиданием и дисперсией определяющими величину и степень его флюктуации.
3. В качестве оценки эффективности работы устройства выбрана вероятность правильной классификации сигналов с различными коэффициентами межпериодной корреляции в зависимости от отношения сигнал/шум.
4. Для расчета статистических характеристик анализируемых сигналов использовались гистограммы как наиболее быстрые алгоритмы расчета.
5. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о достаточно высокой эффективности работы устройства и целесообразности его практического применения.

## 2 Классификация по величине эффективной поверхности рассеяния радиолокационных объектов

Одним из возможных сигнальных признаков для классификации воздушных объектов в радиолокационных системах является их эффективная поверхность рассеяния (ЭПР).

Физически всякий отражающий (рассеивающий) электромагнитные волны объект в радиолокации является источником вторичного излучения. Характер вторичного излучения объектов радиолокационного наблюдения (радиолокационных целей) зависит от их формы, размеров, электрических свойств, а также от длины волны и поляризации падающего поля<sup>4</sup>. Аналитически значение ЭПР отражающего объекта  $\sigma$  определяется следующим образом

$$\sigma = \frac{P_{np}(4\pi R^2)^2}{P_C S_A G}.$$

ЭПР цели не зависит ни от интенсивности излучаемой волны, ни от расстояния между РЛС и целью. Величина ЭПР  $\sigma$  зависит от формы и размеров отражающего объекта, а также от длины волны. В общем случае необходимо учитывать поляризационные характеристики антенны РЛС и объекта, а также среды распространения.

Реальные радиолокационные цели имеют сложную геометрическую форму. Принимаемый сигнал является результатом интерференции множества волн, отраженных от отдельных частей цели. Даже небольшое изменение взаимного положения цели и локатора вызывает существенные изменения фазовых соотношений интерферирующих волн и, как следствие, мощности принимаемого сигнала. Таким образом, ЭПР – случайная величина.

Эффективная поверхность рассеяния определяется рядом факторов, к которым можно отнести: линейные размеры объекта, геометрическую форму, угловое положение объекта относительно РЛС, параметры зондирующих сигналов. Для большинства воздушных объектов поле вторичного излучения носит интерференционный характер.

Для определения ЭПР воздушных объектов наиболее целесообразен метод, основанный на непосредственных измерениях энергии принятого сигнала с последующим пересчетом ее величины в значения ЭПР.

Возможны два подхода в определении ЭПР.

---

<sup>4</sup> Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

1. Диаграмма направленности антенны имеет достаточно большое число парциальных лучей в угломестной плоскости. Оценка обеспечивается непосредственным измерением энергии принятых сигналов.

2. В системах с однолепестковой диаграммой направленности все сложнее, так как ДНА отличается от диаграммы в свободном пространстве.

Определение величины ЭПР проводится в два этапа. На первом этапе необходимо провести усреднение энергии принятого сигнала. При быстрых флюктуациях импульсов пачки усреднение может проводиться в течение времени однократного облучения цели. В случае дружных флюктуации импульсов пачки необходимо усреднение за несколько циклов обзора. Для РЛС с совмещенным приемо-передающим раскрытием антенны оценка ЭПР может быть получена по формуле

$$\hat{\sigma} = \frac{(4\pi^3) \cdot r^4}{G^4(\varepsilon) \cdot \lambda^2 \cdot \mathcal{E}_u} \cdot \frac{\hat{\mathcal{E}}_{np}}{F^4(\beta, \varepsilon)}, \quad (2.1)$$

где  $r$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  – дальность, азимут и угол места цели в сферической системе координат;

$G(\varepsilon)$  – коэффициент усиления антенны;

$\lambda$  – длина волны излучаемых РЛС колебаний;

$\mathcal{E}_u$  – энергия зондирующего сигнала, излученного к цели;

$\hat{\mathcal{E}}_{np}$  – оценочное значение энергии принятого сигнала;

$F(\beta, \varepsilon)$  – множитель направленности по полю, учитывающий влияние Земли (множитель Земли).

Реальные радиолокационные объекты имеют в своем большинстве размеры, значительно превышающие длину волны. Сложность формы диаграммы обратного вторичного излучения приводит к флюктуациям амплитуды отраженных сигналов. Распределение амплитудных флюктуаций описывается в общем случае  $m$  распределением Накагами и в активной радиолокации связаны с распределением ЭПР, которое соответствует гамма-распределению

$$W(\sigma) = \left(\frac{K_m}{2\bar{\sigma}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma^{m-1}}{\bar{\sigma}}\right) \cdot e^{-\frac{m\sigma}{\bar{\sigma}}},$$

где  $K_m = \frac{2m^m}{\Gamma(m)}$  – нормирующий коэффициент;

$\Gamma(m)$  – гамма-функция (для целых  $m \geq 2$ ;  $\Gamma(m) = (m-1)!$ ;  $\Gamma(0) = \Gamma(1) = 1$ ;

$m$  – номер распределения;

$\bar{\sigma}$  – оценка ЭПР цели.

Задача классификации объектов радиолокации заключается в разделении целей, имеющих различные ЭПР<sup>5</sup>. Решение о классификации целей необходимо принимать по результатам наблюдения в течении  $N$  обзоров. Относительные различия средних ЭПР классифицируемых объектов определяются выражением

$$\Delta = 10 \cdot \lg \frac{\overline{\sigma}_1}{\overline{\sigma}_2}, \text{ дБ.}$$

При двухальтернативной классификации для гипотез:  $H_1$  – объект имеет величину  $\overline{\sigma}_1$ , амплитуды имеют  $m_1$  распределение Накагами и  $H_2$  – объект с ЭПР  $\overline{\sigma}_2$  и  $m_2$  распределением Накагами, логарифм отношения правдоподобия при классификации по  $N$  обзорам и независимым флюктуациям мгновенных значений ЭПР ( $\sigma_i$ ) от обзора к обзору, определяется следующим выражением

$$\ln l = \ln \frac{W_2(\sigma)}{W_1(\sigma)} = N \ln \left[ \frac{\Gamma(m_2) \cdot m_1^{m_1} \cdot \overline{\sigma}_2^{m_2}}{\Gamma(m_1) \cdot m_2^{m_2} \cdot \overline{\sigma}_1^{m_1}} \right] + (m_1 - m_2) \sum_{i=1}^N \ln \sigma_i + \left( \frac{m_2}{\overline{\sigma}_2} - \frac{m_1}{\overline{\sigma}_1} \right) \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (2.2)$$

Входящие в (2.2) величины  $\sigma_i$  могут быть определены, исходя из (2.1). Оптимальный алгоритм заключается в сравнении  $\ln l$  с порогом.

На основании (2.2) синтезируемое устройство для классификации радиолокационных объектов по различиям их ЭПР может быть выполнено в соответствии со структурами, представленными на рис. 2.1, 2. 2.

При различных законах распределения амплитуд отраженных сигналов схема имеет вид, представленный на рис. 2.1.

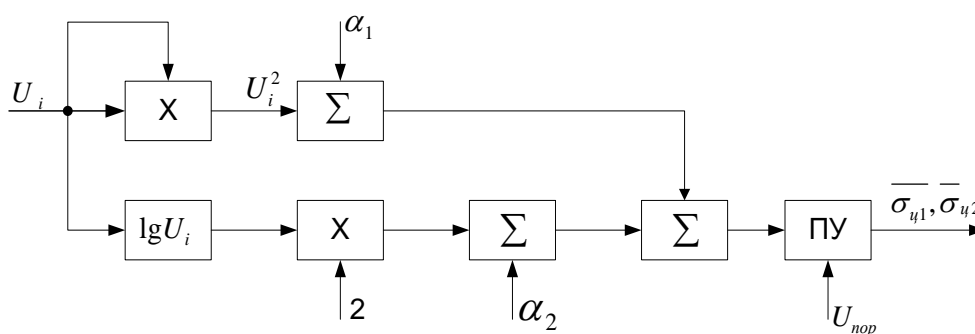


Рисунок 2.1 – Устройство классификации при различных законах распределения амплитуд

<sup>5</sup> Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.



Весовые коэффициенты равны

$$\alpha_1 = \frac{\overline{\sigma_1} m_1 - \overline{\sigma_2} m_2}{\overline{\sigma_1} \cdot \overline{\sigma_2}}; \quad \alpha_2 = m_1 - m_2,$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  - ЭПР распознаваемых объектов;

$m_1$  – распределение Накагами первого объекта;

$m_2$  – распределение Накагами второго объекта.

При  $m_1 = m_2$  устройство упрощается, так как не требуются элементы, обеспечивающие нелинейное преобразование значений  $\sigma_i$ .

На рис. 2.2 изображена структура классификатора при условии одинаковых законов распределения амплитуд ( $m_1 = m_2 = s$ ).

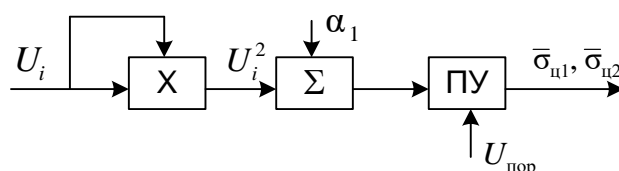


Рисунок 2.2 – Устройство классификации при равных законах распределения амплитуд

Весовой коэффициент определяется выражением

$$\alpha_1 = \frac{s(\overline{\sigma_1} - \overline{\sigma_2})}{\overline{\sigma_1} \cdot \overline{\sigma_2}}.$$

Проведена оценка погрешности измерения ЭПР в зависимости от отношения сигнал/шум и числа накапливаемых отсчетов. На рис.2.3 изображена зависимость относительной среднеквадратической ошибки (СКО) измерения ЭПР.

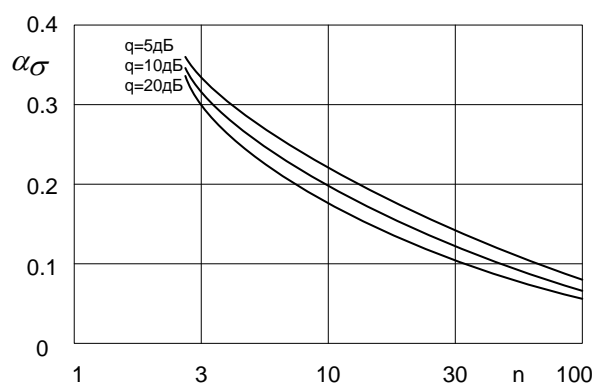


Рисунок 2.3 – Зависимость относительной СКО измерения ЭПР цели от отношения сигнал/ помеха  $q$  и числа накапливаемых некоррелированных отсчетов

Из приведенных на рисунке 2.3 графиков следует, что погрешность в оценке ЭПР менее 20% имеет место при отношении сигнал/шум  $q \geq 20$  дБ и интегрировании не менее 7–10 некоррелированных отсчетов пачки принятого сигнала. При этом полагается, что погрешности тракта измерения малы и их компенсация может быть осуществлена.

Проведенные расчеты показывают, что за время одного-двух обзоров классифицировать объекты по величине ЭПР с вероятностью правильной классификации  $D \geq 0,9$  возможно только в случае, если объекты имеют относительные различия ЭПР более 12 дБ. Учет модели флюктуации ЭПР предполагает усложнение структуры устройства, однако обеспечивает выигрыш в числе обзоров для классификации в 2-3 раза в зависимости от ситуаций.

### **Заключение**

Классификация воздушного объекта – это принятие решения о принадлежности ВО к тому или иному классу (типу) на основе полученных его радиолокационных характеристик. Различные классы (типы) ВО составляют определенный алфавит. Выбор алфавита классов предопределяет как эффективность использования алгоритмов и устройств классификации, так и трудности возникающие при его реализации, а значит и стоимость их преодоления.

Информация, используемая для классификации ВО, содержится в совокупности принимаемых радиолокационных сигналов. Для того чтобы классифицировать ВО, используют определенные измеренные признаки цели, которые сопоставляют в соответствии с алгоритмом классификации с известными (аналогичными) признаками.

Развитие методов и техники классификации сигналов в радиолокации идет в настоящее время по трем основным направлениям: классификация по узкополосным сигналам, с помощью многочастотных сигналов и по широкополосному сигналу. В устройствах классификации используются все доступные признаки с применением устройств внутри-межпериодной, межобзорной и межканальной обработки, траекторного анализа.

Предложенные в работе алгоритмы и устройства классификации целесообразно реализовать для разделения сигналов на полезные (от реальных объектов) и помеховые. В частности возможен вариант исключения из обработки, за счет классификации, сигналов дискретных пассивных помех («ангел эхо»), относящихся к категории малоразмерных, малоскоростных воздушных объектов. Отраженные от них сигналы имеют узкий спектр амплитудных флюктуаций импульсов пачки.

## Список использованных источников

1. Обнаружение и распознавание объектов радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А. В. Соколова. – М.: «Радиотехника», 2006. – 176 с.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Сколника. Пер. с англ. Под общей ред. В. С. Вербы. В 2-х книгах. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
4. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Пер. с англ. / Под ред. А. А. Дорофеева. – М.: Наука, 1979. – 367 с.