

В. В. Глазков, К. П. Лихоеденко

**АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ
ОБЪЕКТОВ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

Разработан алгоритм работы тракта обработки входного сигнала для системы обнаружения подвижных объектов автотранспортной техники. Построена функциональная схема выделения информативного параметра из входной реализации. Рассчитаны рабочие характеристики обнаружителя. Показана возможная реализация алгоритма обнаружения.

E-mail: wave@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: обнаружение, автотранспортная техника, миллиметровый диапазон, коэффициент начальной регрессии, статистическое моделирование.

Повышение эффективности функционирования систем ближнего действия с неконтактным радиолокационным датчиком напрямую связано с улучшением показателей качества обнаружения и распознавания целей на фоне подстилающих поверхностей. Поэтому к современным радиолокационным системам предъявляется ряд жестких требований: высокая помехоустойчивость, автономность работы, всепогодность, всеуточность, высокая разрешающая способность. Одним из возможных путей удовлетворения этих требований является использование миллиметрового диапазона длин волн.

Работа в миллиметровом диапазоне длин волн дает ряд существенных преимуществ. Во-первых, удается улучшить массогабаритные характеристики антенной системы, что особенно важно для автономных систем. Во-вторых, удается сузить ее диаграмму направленности, что повышает разрешающую способность всей системы. Таким образом, использование миллиметрового диапазона длин волн, особенно для автономных систем, является одним из путей повышения их эффективности.

Однако при разработке таких систем следует учитывать ряд обстоятельств, главным из которых является существенная зависимость характеристик отражения подстилающих поверхностей и объектов автотранспортной техники от условий наблюдения. Вследствие этого необходимо разработать алгоритм, по возможности инвариантный к изменению указанных параметров и имеющий удовлетворительные рабочие характеристики.

В работе [1] приведено описание экспериментальной установки, предназначенной для выделения селективных признаков моторизованных объектов на фоне подстилающих поверхностей, основанных на

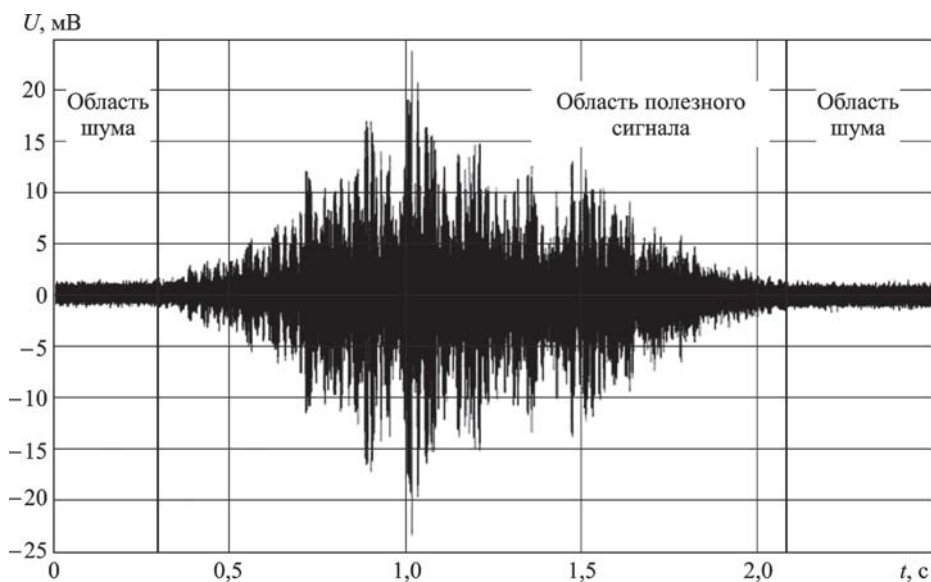


Рис. 1. Экспериментальная реализация сигнала доплеровской частоты при наличии цели

спектрально-поляризационных отличиях отраженных сигналов. Данная установка работает в K_a -диапазоне длин волн. Анализ реализаций сигнала частоты Доплера позволил получить данные об отражающих свойствах объектов нескольких классов при различных ракурсах наблюдения.

Цель настоящей работы — на основе этих данных построить алгоритм обнаружения подвижной автотранспортной техники на фоне подстилающей поверхности.

Пример типичной реализации сигнала на выходе фильтра доплеровских частот, полученный при помощи установки, работающей в K_a -диапазоне длин волн, приведен на рис. 1. На рисунке можно выделить область шума в начале и в конце реализации (сигнал помехи от подстилающей поверхности) и область полезного сигнала (аддитивная смесь сигнала и шума).

Анализ реализации показывает, что интенсивность полезного сигнала быстро и хаотично изменяется, что объясняется сильной изрезанностью диаграммы обратного рассеяния объекта при изменении ракурса наблюдения. Поэтому в области полезного сигнала имеются участки, где он сильно зашумлен. При этом отношение сигнал/шум (ОСШ) может принимать значения, много меньшие единицы, что необходимо учитывать в алгоритме принятия решения.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ экспериментальных данных;
- построить алгоритм принятия решения;

- определить рабочие характеристики алгоритма;
- реализовать алгоритм.

В настоящее время проводится много работ в области алгоритмов принятия решения при радиолокационном обзоре. Однако условия ближней радиолокации накладывают значительные ограничения на данные алгоритмы. Поэтому работы именно в этом узком направлении составляют лишь небольшую часть от общего числа. Современные алгоритмы обнаружения и распознавания целей в ближней радиолокации разрабатываются на кафедре “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством В.К. Хохлова. В его монографии [2] представлены и обоснованы новые методики и алгоритмы принятия решения в условиях ближней радиолокации.

Анализ экспериментальных данных. Полученные реализации содержат существенную с точки зрения селекции объектов на фоне подстилающих поверхностей информацию о структуре полезного сигнала и помехи. Для выявления информативного параметра, по которому целесообразно реализовывать алгоритм принятия решения, необходимо провести многосторонний анализ имеющихся данных.

Спектральный анализ. В целях получения качественной картины частотно-временной структуры сигнала была построена спектрограмма сигнала (рис. 2).

В области помехи спектр практически равномерно распределен по всему частотному диапазону. В области полезного сигнала при попадании объекта в диаграмму направленности антенны в спектре начинает

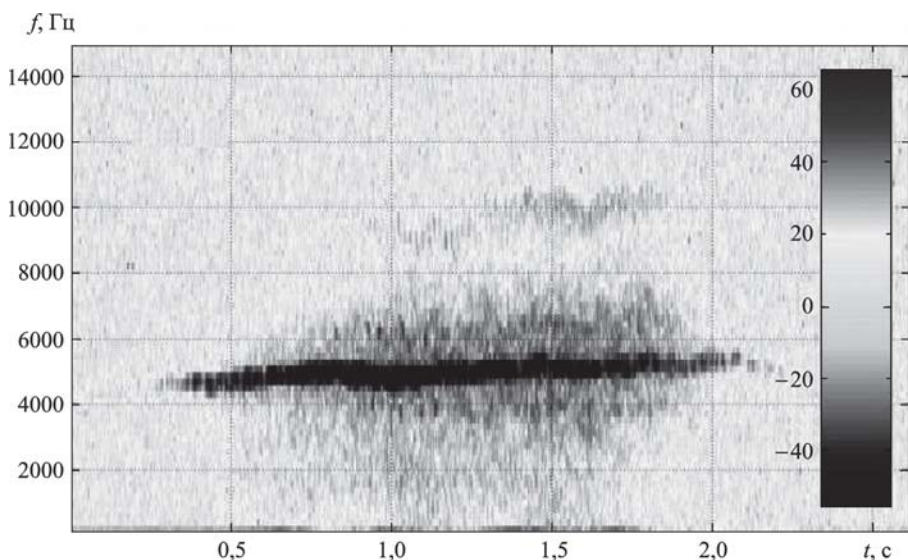


Рис. 2. Спектрограмма сигнала доплеровской частоты

выделяться составляющая, соответствующая центральной частоте Доплера. Данная составляющая сосредоточена в области 5 кГц, что соответствует в K_a -диапазоне длин волн несущего колебания радиальной скорости объекта около 90 км/ч. Изменение скорости цели приводит к сдвигу спектральных составляющих по оси частот. Необходимо отметить, что из-за больших собственных шумов в области низких частот тракта выделения сигнала доплеровской частоты нижняя граница рабочего диапазона ограничена значением 10 Гц.

Таким образом, видно, что в данном случае шум является широкополосным, а полезный сигнал доплеровской частоты — узкополосным. Для оценки относительной ширины спектра реализаций построим энергетический спектр для различных временных интервалов (рис. 3).

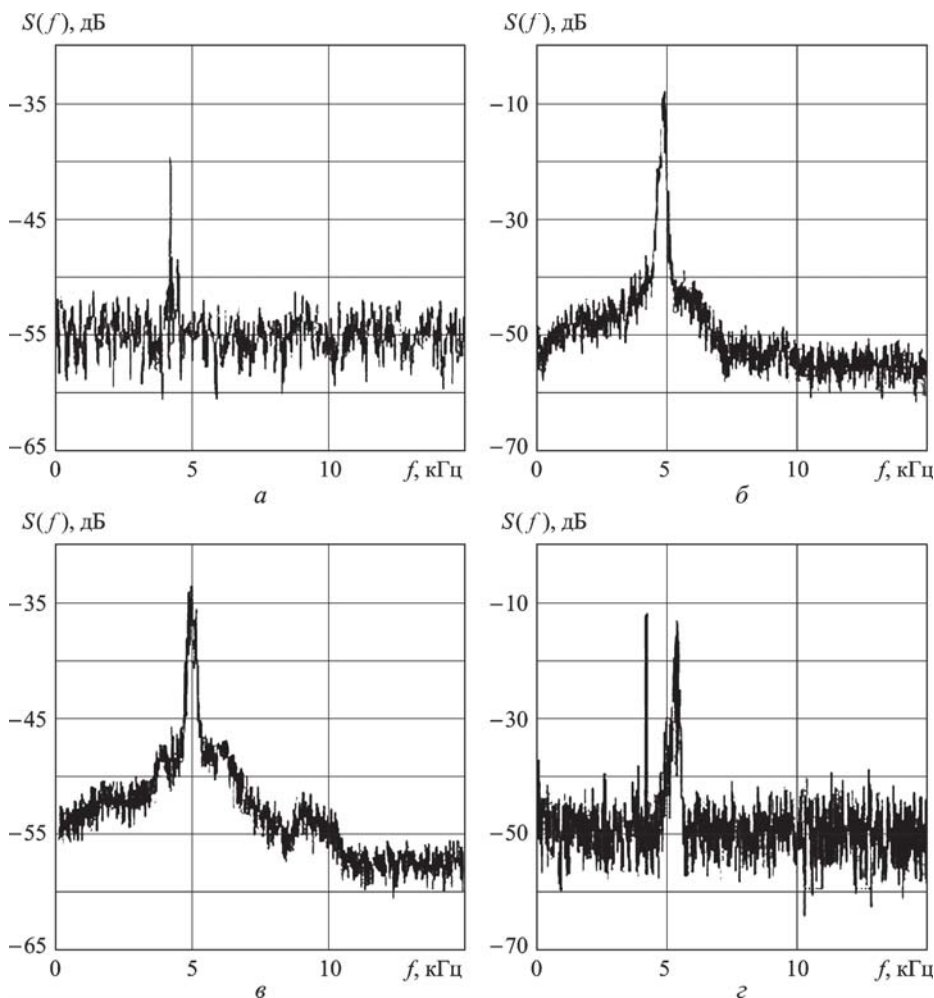


Рис. 3. Энергетический спектр сигнала доплеровской частоты в различные временные интервалы:

t_1, \dots, t_4 (а, ..., г соответственно)

Анализ показал, что средняя частота спектра сигнала доплеровской частоты составляет 4600...5400 Гц, а ширина спектра $\Delta f_{0,7} = 150 \dots 800$ Гц. Тогда относительная ширина полосы энергетического спектра $\alpha_c = 0,03 \dots 0,17$. Для шума относительная ширина полосы энергетического спектра $\alpha_n \geq 1$.

Временной анализ. Проведем временной анализ экспериментальных данных. По отсчетам длительностей интервалов времени τ_i между последовательными нулями исследуемой реализации вычисляются скользящие выборочные оценки коэффициента начальной регрессии (КНР) длительностей в соответствии с выражением

$$\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}(n) = \frac{\sum_{i=n}^{n+N} \tau_i \tau_{i+1}}{\sum_{i=n}^{n+N} \tau_i^2}, \quad (1)$$

где N — объем выборки; n — координата начала выборки, отсчитываемая вдоль реализации сигнала; τ_i — длительность i -го интервала.

По результатам измерений строятся графики $\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}(n)$, отражающие зависимость КНР от времени, т.е. изменение выборочных оценок $\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}$ вдоль реализации.

Результаты вычислений сильно зависят от объема выборки N , по которой сглаживают данные. На рис. 4 приведены графики $\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}(n)$ при различных значениях N . При увеличении объема выборки, по которой сглаживают оценку $\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}$, график становится более гладким, так как происходит компенсация участков сигнала с малым ОСШ.

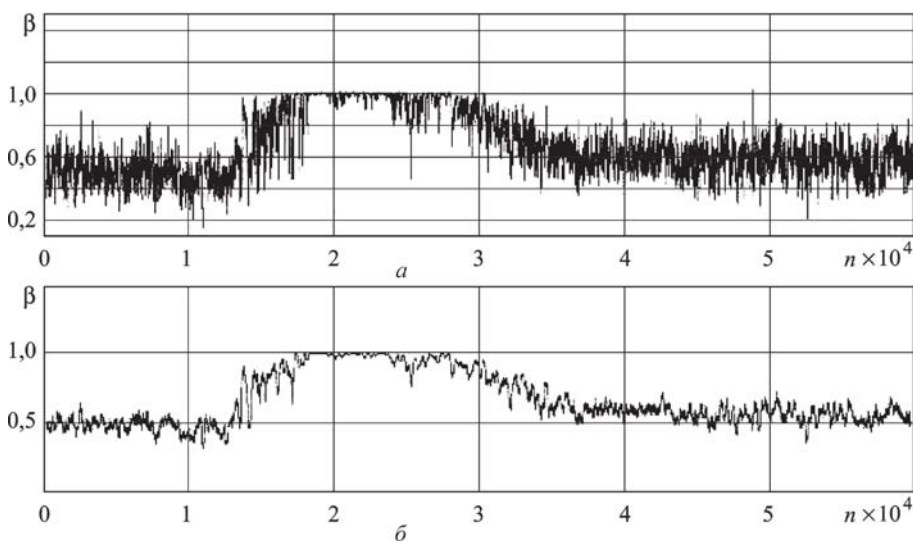


Рис. 4. Зависимость КНР интервалов между нулями входной реализации β от номера интервала для объема выборки $N = 20$ (а) и 50 (б)

Построение алгоритма принятия решения. В классической задаче обнаружения проводят вычисление коэффициента правдоподобия и сравнение его с порогом. Для реализации такого алгоритма необходима априорная информация о статистической структуре сигнала во всем диапазоне условий встречи.

В условиях ближней локации приходится иметь дело со следующими ограничениями:

- время принятия решения составляет менее одной миллисекунды;
- входной сигнал является нестационарным;
- динамический диапазон входного сигнала может достигать 60 дБ;
- устройство принятия решения должно иметь высокие массогабаритные показатели и малое энергопотребление, так как оно применяется в малогабаритной автономной аппаратуре.

Поэтому построить адекватную статистическую модель сигнала сложно. Кроме того, оптимальные обнаружители в классической задаче обнаружения содержат корреляторы. Основной операцией, ограничивающей быстродействие корреляторов, является перемножение двух сигналов. Построить коррелятор, осуществляющий перемножение в широком динамическом диапазоне сигналов, на интервале принятия решения систем ближней локации с заданной точностью технически сложная задача.

Для преодоления трудностей, связанных с нестационарностью сигналов, целесообразно обрабатывать сигнал не целиком, а выделять информативные признаки, инвариантные к условиям встречи. Анализ экспериментальных данных показал, что в качестве такого информативного признака можно использовать относительную ширину полосы энергетического спектра α сигнала доплеровской частоты. Данный параметр слабо зависит от условий встречи, а зависит только от типа цели и конструкции приемного устройства. Прямой анализ спектра сигнала затруднен из-за сложности построения устройств, реализующих его, и ограниченного времени принятия решения. В работе [2] показано, что относительная ширина полосы энергетического спектра сигнала α и коэффициент начальной регрессии интервалов между нулями входной реализации $\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}$ имеют однозначную функциональную зависимость. Это утверждение было подтверждено экспериментально. Поэтому имеется возможность перейти от спектральной обработки к более простой с точки зрения технической реализации — временной обработке.

Анализ $\beta_{\tau_i \tau_{i+1}}$ можно выполнить напрямую (1). Однако такая обработка содержит операцию деления, реализация которой затруднена в условиях ограниченности габаритных размеров устройства принятия решения и времени обработки.

В работе [2] для алгоритма принятия решения предложено использовать регрессионный алгоритм следующего вида:

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (\tau_i + \tau_{i+1} - K |\tau_{i+1} - \beta_{\tau_i/\tau_{i+1}} \tau_i|) \geq U_{\text{пор}}, \quad (2)$$

где n — число отсчетов τ_i в интервале времени обработки T ; $\beta_{\tau_i/\tau_{i+1}}$ — КНР интервала τ_i на τ_{i+1} ; $U_{\text{пор}}$ — порог принятия решения; K — весовой коэффициент, определяющий ширину области принятия решения.

К достоинствам регрессионного метода можно отнести следующее:

— инвариантность рабочих характеристик алгоритма к закону распределения значений интервалов между нулями входных сигналов, а также инвариантность к средней частоте энергетического спектра процесса и дисперсии последнего;

— алгоритм (2) предполагает обработку нестационарных сигналов и помех, оперирует начальными статистическими характеристиками и не требует времени на отслеживание задержек;

— при аппаратной реализации используются только операции весового суммирования, детектирования и сравнения с порогом.

К недостаткам регрессионного метода можно отнести неоптимальность областей принятия решения, а также необходимость оптимизация параметра K для достижения требуемых рабочих характеристик алгоритма, что при большой размерности входного вектора значительно усложняет решение задачи.

Для реализации алгоритма необходимо определить параметр $\beta_{\tau_i/\tau_{i+1}}$. В реальных системах за время принятия решения можно обработать до 20 интервалов, поэтому сглаживание КНР интервалов между нулями необходимо проводить по $N = 20$ отсчетам. На рис. 5 приведены гистограммные оценки КНР интервалов между нулями входной реализации для случая шума и аддитивной смеси сигнала и шума.

По 100 реализациям были получены следующие оценки статистических характеристик распределений: $M [\bar{\beta}_{\tau_i/\tau_{i+1}}] = 0,48$, $D [\bar{\beta}_{\tau_i/\tau_{i+1}}] = 0,008$ — для шума; $M [\bar{\beta}_{\tau_i/\tau_{i+1}}] = 0,92$, $D [\bar{\beta}_{\tau_i/\tau_{i+1}}] = 0,010$ — для аддитивной смеси сигнала и шума.

Определение рабочих характеристик алгоритма. С точки зрения теории распознавания образов лучший способ оценки разделимости классов в многомерном признаковом пространстве и определения потенциальных рабочих характеристик алгоритма основан на вычислении многомерной плотности распределения вероятностей (ПРВ)

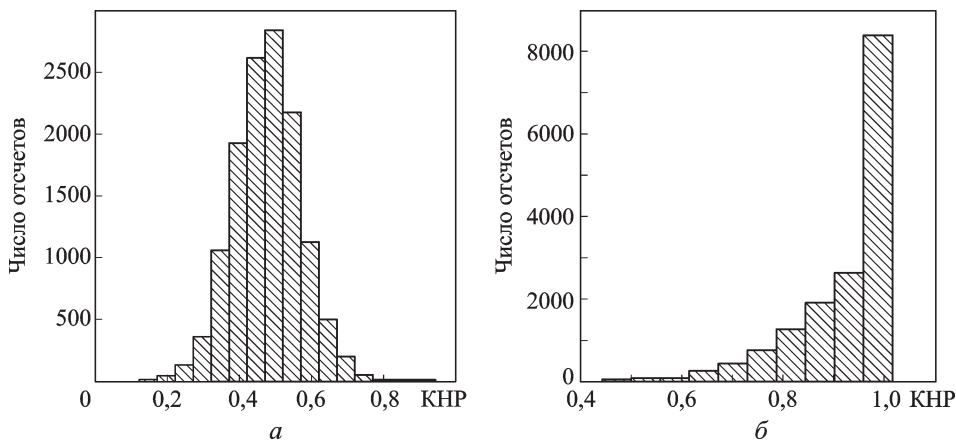


Рис. 5. Гистограммные оценки распределения КНР интервалов между нулями входной реализации для шума во входной реализации (а) и аддитивной смеси сигнала и шума (б)

информативных параметров:

$$P_{\text{л.т}} = \int_V p(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n | \alpha_{\text{ш}}) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n;$$

$$P_{\text{пр}} = \int_{\bar{V}} p(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n | \alpha_c) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n,$$

где $P_{\text{л.т}}$, $P_{\text{пр}}$ — вероятности ложных тревог и пропусков; $p(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n | \alpha_{\text{ш}})$ и $p(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n | \alpha_c)$ — многомерные условные плотности распределения интервалов между нулями при шуме и аддитивной смеси сигнала и шума на входе алгоритма; V — область классификации полезного сигнала в признаковом пространстве.

Решить данную задачу точно аналитически на практике не всегда возможно вследствие высокой вычислительной сложности и неопределенности корреляционных соотношений между отдельными интервалами τ_k . Поэтому для оценки рабочих характеристик алгоритма целесообразно воспользоваться методом статистического моделирования с допущением о стационарности сигнала и шума. На основе спектрального анализа экспериментальных данных (см. рис. 3) показано, что шум можно рассматривать как полосовой белый шум, а энергетический спектр сигнала можно аппроксимировать гауссоидой.

Для статистического моделирования используется метод формирующего фильтра (ФФ). В методе ФФ нормальный стационарный случайный процесс $y(t)$ с заданной корреляционной функцией $R(\tau)$ представляется как результат воздействия белого шума $x(t)$ на линейную систему с передаточной функцией $K(j\omega)$. Энергетический спектр $G_y(\omega)$ этого процесса можно записать как

$$G_y(\omega) = |K(j\omega)|^2.$$

В этом случае цифровое моделирование случайного процесса $y(t)$ сводится к моделированию формирующего фильтра с частотной характеристикой $K(j\omega)$ и полосового белого шума с верхней частотой, заведомо превышающей ширину спектра сигнала $y(t)$.

Гауссовский энергетический спектр описывается следующим выражением:

$$S(\omega) = \frac{\pi}{a\omega_0} \exp \left[-\pi \frac{(\omega \pm \omega_0)^2}{(a\omega_0)^2} \right].$$

Здесь a — относительная ширина полосы энергетического спектра; ω_0 — центральная частота.

Автокорреляционная функция сигнала с гауссовским энергетическим спектром имеет вид

$$R(\tau) = \exp \left[-\frac{(a\omega_0)^2 \tau^2}{4\pi} \right] \cos(\omega_0 \tau).$$

Задаваясь наибольшим значением относительной ширины спектра $a = 0,17$ и значениями центральной частоты $\omega_0 = 5$ кГц и вероятности ложных тревог ($P_{л.т} = 10^{-3}$), проведем моделирование работы алгоритма в зависимости от параметра алгоритма K и ОСШ. Для каждого набора параметров K и ОСШ было проведено по 10000 испытаний. На рис. 6 приведен график зависимости вероятности пропуска $P_{пр}$ в зависимости от этих параметров при разном числе обрабатываемых интервалов между нулями.

Реализация алгоритма. При реализации алгоритма целесообразно его разделить на модуль выделения информативного параметра и модуль обработки сигнала.

Первый модуль является аналоговым блоком, который из входной реализации выделяет интервалы между нулями и передает их во второй модуль. Кроме того, модуль выделения информативного параметра проводит детектирование огибающей сигнала доплеровской частоты для оценки энергетики сигнала.

Второй модуль — это цифровой блок и предназначен для реализации разработанного алгоритма.

Функциональная схема устройства принятия решения приведена на рис. 7.

Устройство работает следующим образом. На полосовой фильтр 2, который выделяет из всего диапазона частот рабочий интервал, через усилитель 1 поступает входной сигнал — сигнал частоты Доплера. После него сигнал поступает на обработку: выделяются положительный и отрицательный полупериоды на компараторах 3 и 4; выделяется огибающая сигнала доплеровской частоты на амплитудном детекторе 5 и фильтре нижних частот 6. Таким образом, на выходе модуля обработки

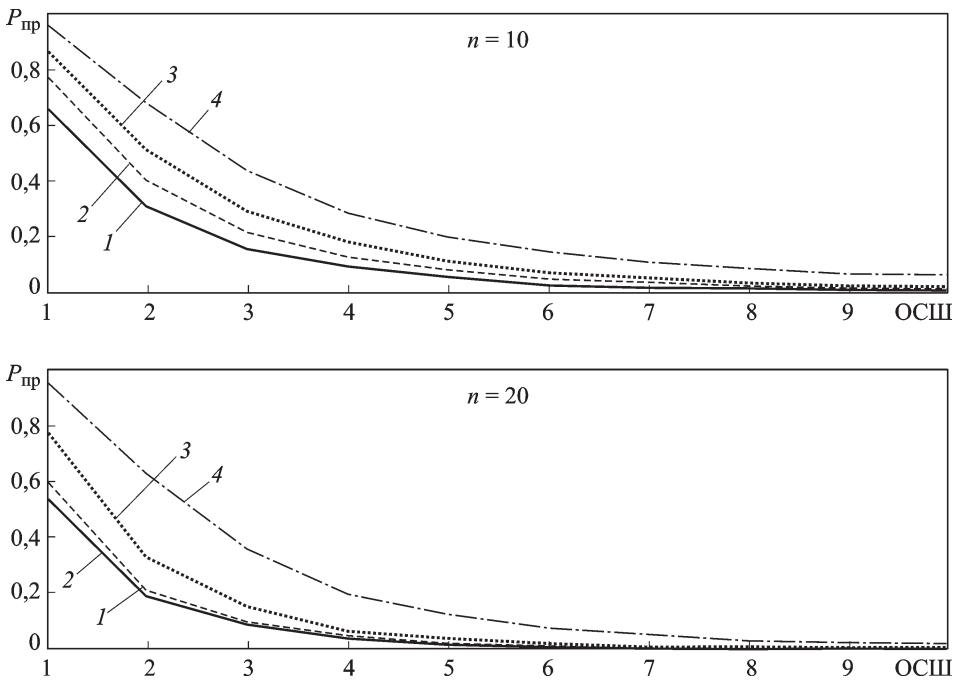


Рис. 6. Зависимость вероятности пропуска $P_{пр}$ от ОСШ и параметра алгоритма K при обработке $n = 10$ и $n = 20$ интервалов между нулями входной реализации:

$K = 0,1$ (1); $1,0$ (2); $2,0$ (3) и $5,0$ (4)

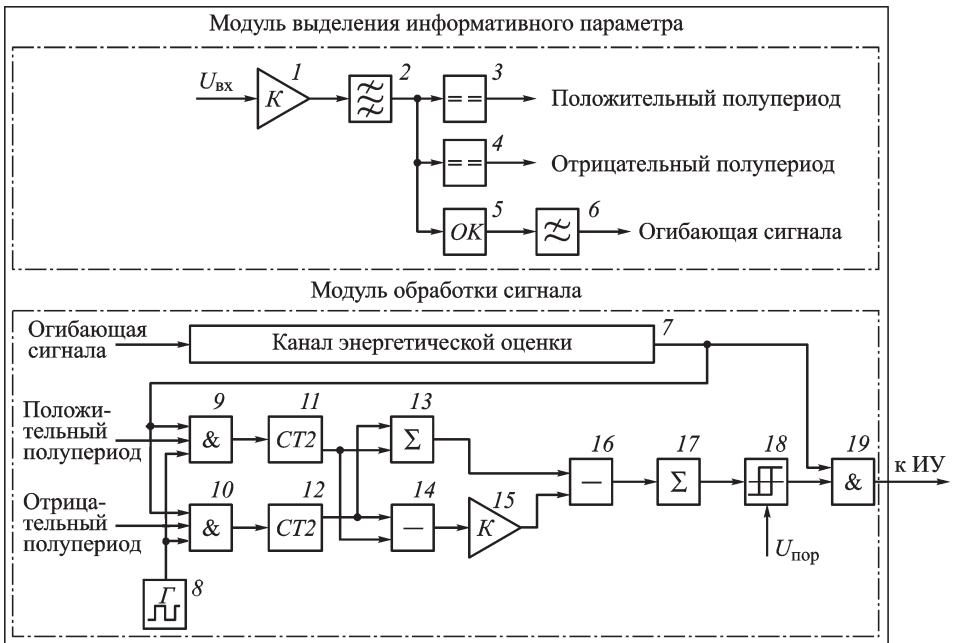


Рис. 7. Функциональная схема устройства принятия решения

сигнала имеется три сигнала: два — с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), содержащие информацию о длительностях интервалов между нулями входной реализации, и один — аналоговый сигнал, т.е. огибающая сигнала доплеровской частоты.

Данные сигналы поступают на модуль обработки сигнала. Огибающая сигнала оценивается в канале энергетической оценки 7, из которого выдается сигнал разрешения работы цифровой части схемы.

На цифровую часть схемы подается два сигнала с ШИМ. Они управляют работой конъюнкторов 9 и 10, которые передают сигнал с генератора 8 на счетчики 11 и 12. Таким образом, происходит преобразование данных об интервалах между нулями в цифровую форму.

Эти данные обрабатываются накопителем 13 и вычитателем 14. Накопитель проводит суммирование интервалов между нулями, а вычитатель оценивает ошибки предсказания одного интервала по другому. Через весовой множитель 15 сигнал с вычитателя вычитается из сигнала с накопителя на элементе 16. Полученный сигнал накапливается в накопителе 17 в соответствии с выбранным числом обрабатываемых интервалов между нулями входной реализации и сравнивается с порогом в пороговом устройстве 18. В случае превышения порога выдается сигнал срабатывания через конъюнктор 19 — принятие решения о наличии цели.

Достоинством такой схемы реализации алгоритма является тот факт, что большая часть обработки проводится в цифровой форме, а аналоговая часть сведена к минимуму. Это позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели устройства.

Выводы. Показана принципиальная возможность построения алгоритма обнаружения подвижных объектов на фоне подстилающей поверхности. В качестве полезного сигнала используется сигнал доплеровской частоты, причем несущее колебание системы лежит в K_a -диапазоне длин волн. Из-за собственных шумов рабочий диапазон доплеровских частот снизу ограничен значением 10 Гц, что в K_a -диапазоне длин волн соответствует минимальной скорости объекта обнаружения 0,2 км/ч. В качестве информативного параметра используется относительная ширина спектра сигнала доплеровской частоты. Экспериментально показана связь относительной ширины спектра входного сигнала с коэффициентом начальной регрессии интервалов между нулями входной реализации. Поэтому в алгоритме принятия решения используется не спектральная обработка, а временная, реализация которой значительно проще, что позволяет упростить габаритные показатели и снизить энергопотребление устройства принятия решения.

Рабочие характеристики алгоритма были получены методом статистического моделирования. При этом было промоделировано два

типа сигналов: полосовой белый шум (как модель шума) и аддитивная смесь сигнала с гауссовским энергетическим спектром и полосового белого шума при различных значениях ОСШ (как модель отраженного от цели сигнала). При заданной вероятности ложных тревог $P_{л.т} = 0,001$ была построена зависимость вероятности пропуска $P_{пр}$ в зависимости от ОСШ и параметра алгоритма K .

На основе полученного алгоритма приведен пример возможной реализации этого алгоритма в аналогово-цифровом устройстве, которое имеет хорошие массогабаритные показатели и является гибким по отношению к рабочему диапазону частот входных сигналов. Кроме того, данное устройство обрабатывает сигналы в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С е л е к т и в н ы е признаки моторизованных наземных целей в миллиметровом диапазоне длин волн / А.Б. Борзов, К.П. Лихоеденко, И.В. Муратов и др. // Оборонная техника. – 2006. – № 1–2. – С. 54.
2. Х о х л о в В. К. Обнаружение, распознавание, пеленгация объектов в ближней локации: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 336 с.

Статья поступила в редакцию 7.07.2009

Виталий Владимирович Глазков родился в 1985 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области обработки сигналов.

V.V. Glazkov (b. 1985) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Post-graduate of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of signal processing.



Константин Павлович Лихоеденко, родился в 1962 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1985 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области ближней радиолокации.

K.P. Likhoedenko (b. 1962) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1985. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of short-range radar.

