



Иголина Юлия Валерьевна

**ОБНАРУЖЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ЛЮДЕЙ ПРИ
РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ
ПОМЕЩЕНИЙ ЧЕРЕЗ СТЕНУ**

Специальность: 2.2.16

Радиолокация и радионавигация
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: - **Гаврилов Константин Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Официальные оппоненты: - **Кошелев Виталий Иванович**,
доктор технических наук., профессор, заведующий
кафедрой «Радиотехнические системы» ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический
университет имени В.Ф. Уткина»

- **Майстренко Евгений Владимирович**,
кандидат технических наук, начальник отдела по
научно-исследовательской работе АО «Концерн
радиостроения «Вега»

Ведущая организация: - АО «Радиотехнический институт имени академика
А.Л. Минца», 127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10,
стр. 1

Защита состоится «15» марта 2022 года в «10:00» на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=161971

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Среди радиолокационных систем (РЛС) малой дальности особое место занимают радары зондирования через стену. Их отличия от традиционных РЛС заключаются в дальности действия ограниченной размерами помещений (порядка 20...30м), искажениями сигналов при прохождении их через стены и рассмотрением в качестве целей живых людей. Однако, главной особенностью РЛС зондирования через стену (РЗЧС) является наличие большого числа интерференционных помех, обусловленных переотражениями полезных сигналов от стен, пола и потолка помещения, а также от множества предметов интерьера. Объекты радиолокационного наблюдения – живые люди, не относятся к классу точечных целей и характеризуются флуктуирующими значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР), сильно меняющейся в пространстве и во времени.

Указанные особенности РЗЧС приводят к тому, что известные методы обнаружения и сопровождения целей, применяемые в традиционных РЛС, становятся непригодны, так как приводят к недопустимо большому числу ложных тревог, пропуску полезных целей и большим погрешностям измерения координат целей. Таким образом, актуальными являются алгоритмы обнаружения и сопровождения целей в РЗЧС, которые сохраняют работоспособность при наличии сильных интерференционных помех и обеспечивают приемлемые значения частоты появления ложных отметок и пропусков целей.

Разработкой таких алгоритмов на протяжении последних 15-20 лет занимались многие исследователи в нашей стране и за рубежом. Это Сосулин Ю.Г., Иммореев И.Я., Линников О.Н., Ивашов С.И. и зарубежные ученые Daniels David J., Moeness G. Amin. Алгоритмы обнаружения и сопровождения людей требуют высокого разрешения по дальности (порядка 0,5м и выше), что возможно при использовании радаров со сверхширокополосными (СШП) сигналами.

В большинстве случаев для радиолокационного обнаружения живых людей в РЗЧС использовались характерные признаки таких целей: перемещение в плоскости помещения, шевеление конечностями, наличие дыхания и сердцебиения. Этим признакам целей соответствуют определенные свойства радиолокационных

сигналов: перемещение по каналам дальности и(или) азимута, определенные значения частоты колебаний амплитуды и фазы и др.

Очевидно, однако, что использование какого-либо одного признака является недостаточным для построения эффективных алгоритмов обнаружения и сопровождения целей в РЗЧС. Необходимо использовать максимально возможное число признаков, каждый из которых характеризует отличительные свойства полезных целей. Такой подход и определил основную цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка эффективных алгоритмов обнаружения и сопровождения людей при радиолокационном зондировании помещений через стену при использовании множества информативных признаков, характеризующих различные свойства полезных радиолокационных сигналов.

Для достижения поставленной цели ставятся и решаются следующие основные **задачи работы**:

1. Определение изменения параметров радиолокационных сигналов при распространении через различные стены строительных конструкций и их влияние на точность измерения координат целей в РЗЧС.
2. Определение набора признаков полезных сигналов, отражающих отличительные свойства радиолокационных целей.
3. Разработка методики оценки информативности признаков.
4. Разработка алгоритма обнаружения и сопровождения целей в РЗЧС при использовании методов теории распознавания образов.
5. Разработка статистической модели функционирования РЗЧС и моделей радиолокационных сигналов для тестирования и оценки эффективности полученных алгоритмов.
6. Проведение натурных экспериментов с макетом РЗЧС, подтверждающих достоверность полученных теоретических результатов.

Методы исследования

При решении перечисленных задач были использованы методы математического анализа, теории вероятности и математической статистики, статистического моделирования.

Научная новизна работы

1. Разработан метод построения алгоритмов обнаружения и сопровождения людей в РЗЧС, основанный на использовании множества признаков полезных сигналов.
2. Предложен метод расчета информативности признаков, позволяющий получать количественные оценки информативности и на этой основе проводить ранжирование признаков.
3. Предложен интегральный признак усредненных разностей сигналов, полученных при различных значениях межкадровых интервалов, имеющий высокую эффективность при обнаружении целей с негармоническими и нестационарными микроперемещениями в пространстве.
4. Разработана методика оценки погрешностей измерения координат целей при зондировании помещений с учетом геометрических и электрических параметров стен и перегородок.

Практическая ценность результатов работы заключается в помощи при проведении контртеррористических операций, контроле помещений с опасными для человека условиями (радиация, угроза взрыва, химического заражения и т.д.), обнаружении и контроле перемещения людей за оптическими непрозрачными преградами, дистанционном досмотре транспортных средств и др.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный метод обнаружения и сопровождения людей в РЛС зондирования через стену, основанный на использовании статических и динамических признаков при формировании первичных отметок целей, позволяет существенно повысить вероятность обнаружения целей при снижении числа ложных обнаружений более чем в 2 раза по сравнению с методами обнаружения, основанными на использовании лишь одного признака.
2. Методика анализа информативности признаков, характеризующих радиолокационные сигналы при отражениях от живых людей, позволяет получить количественную оценку информативности признаков, проводить их ранжирование по степени информативности и находить оптимальные значения параметров

зондирующих сигналов, обеспечивающих наилучшие характеристики обнаружения целей.

3. Использование признака усредненной межкадровой разности сигналов позволяет по сравнению с известными методами межкадровой (череспериодной) компенсации существенно повысить вероятность обнаружения целей с негармоническими и нестационарными колебаниями до значений 0,9...0,95 при малых отношениях сигнал-шум порядка 3...7дБ.

Публикации

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 7 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных в ВАК РФ и тезисы докладов на 3-х научных конференциях.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы обсуждались на: московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике», 2015 год, г. Москва, МАИ(НИУ); XII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», 2018 год, г. Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова; международной конференции En&T-2018, 2018 г., г. Долгопрудный, МФТИ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 127 машинописных листах, включая 30 рисунков и 7 таблиц, и состоит из введения, перечня сокращений, четырех глав, заключения, одного приложения и списка литературы из 109 наименований, включая работы автора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ***введении*** приведен обзор литературы по методам и алгоритмам обнаружения и сопровождения людей при радиолокационном зондировании помещений через стену. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы. Приведен перечень научных результатов и описана практическая ценность результатов работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В ***Главе 1*** рассмотрены структура, принцип работы и основные характеристики РЛС зондирования помещений через стену при использовании СШП-сигналов со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ). СЧМ-сигнал представляет собой

последовательность из $(N+1)$ радиоимпульсов с дискретными значениями частот $f_i = f_0 + n \cdot \Delta f$, $n=0, \dots, N$, где Δf – шаг изменения частоты. ширина спектра которого $\Delta F = (N + 1) \cdot \Delta f$. Путем выбора значений N и Δf обеспечиваются необходимые значения разрешающей способности по дальности ΔR и максимальной однозначной дальности РЛС R_{max} , которые определяются формулами:

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta F}, \quad R_{max} = \frac{c}{2\Delta f} \quad (1)$$

Описан метод обработки СЧМ-сигнала, основанный на вычислении обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) комплексных сигналов на выходе квадратурного фазового детектора. В макетах РЛС, использованных при проведении натуральных экспериментов, были получены значения разрешающих способностей $\Delta R = 0,08 \dots 0,2$ м.

Выбор начальной частоты СЧМ-сигнала f_0 определяется проникающей способностью радиоволн через стены и перекрытия (кирпичные, бетонные и т.д.) помещений и составляет значения от сотен МГц до единиц ГГц.

Описан метод пространственно-временного многоканального по азимуту приема СЧМ-сигналов, при котором разрешение по азимуту обеспечивается за счет использования линейки приемных антенн и составляет величину порядка 16° .

Проведен анализ свойств целей – живых людей, характеризующихся эффектом микроперемещений в результате движения, шевеления и наличия дыхания и сердцебиения. Введена многоточечная нестационарная модель перемещения цели, которая использована при статистическом моделировании полезных сигналов.

С учетом свойств, используемых строительных материалов определены типовые значения геометрических и электрических характеристик стен и перегородок современных помещений. Эти значения использованы при исследовании влияния стены на точность измерения координат целей в РЗЧС. Получены аналитические выражения погрешностей измерения координат – дальности δR и угла $\delta \theta$ при зондировании помещений через стену:

$$\delta R = R \left(\frac{\cos \theta_0}{\cos \beta} - 1 \right) + h \left(\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \beta} \right), \quad \delta \theta = \beta - \theta_0, \quad (2)$$

где R – дальность до цели от РЛС; θ_0 – угол наблюдения цели (в горизонтальной плоскости); α , β – углы падения и преломления луча при прохождении электромагнитных волн через стену; h – толщина стены; ε – диэлектрическая

проницаемость материала стены. Показано, что для наиболее распространенных значений параметров стен ($h \approx 0,5\text{м}$, $\varepsilon \approx 4$) и размеров помещений, ошибки измерения дальности δR и тангенциальных координат $\delta l = R \cdot \delta \theta$ находятся в пределах $0,1 \dots 1\text{м}$.

Данные, полученные от РЗЧС после первичной обработки, формируются в виде двумерной матрицы комплексных отсчетов в координатах «дальность-азимут»:

$$S_m^{(k)} = \{s^k(n, m), n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M\}, \quad (3)$$

где k – номер кадра ($k = 1, 2, \dots$); n, m – номера ячеек (элементов разрешения) по дальности и углу соответственно;

$$s^k(n, m) = A^{(k)}(n, m)e^{-j\varphi^{(k)}(n, m)} \quad (4)$$

– комплексный отсчет (n, m) -й ячейки.

В **Главе 2** на основе анализа свойств полезных сигналов вводятся признаки $z_p^{(k)}(n, m), p = 1, \dots, P$, характеризующие наличие цели в каждом элементе разрешения (n, m) «дальность-азимут» для текущего кадра $k=1, \dots, K$.

Совокупность признаков образует вектор признаков $\mathbf{Z}^{(k)}(n, m) = [z_1^{(k)}(n, m), z_2^{(k)}(n, m), \dots, z_p^{(k)}(n, m)]$, элементы которого вычисляются на основе значений комплексных сигналов $s^{(k)}(n, m)$.

Все признаки принимают бинарные значения из множества $\{0,1\}$ и определяют статические и динамические свойства цели.

Первый признак характеризует наличие отраженного сигнала на основе значения его амплитуды и вычисляется по формуле:

$$z_1^{(k)}(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } s^{(k)}(n, m) \geq h_1^{(k)}, \\ 0 & \text{при } s^{(k)}(n, m) < h_1^{(k)}, \end{cases} \quad (5)$$

где $h_1^{(k)}$ – порог обнаружения в k -м кадре. Возможно использование фиксированного (при $h_1^{(k)} = h_1$), либо адаптивного порога $h_1^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots$. Во втором случае порог зависит от значений сигналов во всех элементах разрешения текущего k -го кадра. В работе использовался адаптивный порог, вычисленный по формуле:

$$h_1^{(k)} = \tilde{s}^{(k)}(n), \quad n = 1, \dots, n_x n_y, \quad (6)$$

где $\tilde{s}^{(k)}(n)$ – вариационный ряд убывающих чисел, построенный по всем значениям $s^{(k)}(n, m)$ ($n = 1, \dots, n_x; m = 1, \dots, n_y$). При этом,

$$\tilde{s}^{(k)}(1) = \max_{n,m} s^{(k)}(n, m), \tilde{s}^{(k)}(n_x, n_y) = \min_{n,m} s^{(k)}(n, m).$$

Согласно (5), (6) значение порога $h_1^{(k)}$ определяет максимально допустимое число обнаруживаемых целей в каждом k -м кадре.

Второй признак относится к динамическим, учитывает изменение амплитуды отраженного сигнала в результате микроперемещений цели и вычисляется по формуле:

$$z_{2(l)}^{(k)}(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } d^{(k)}(n, m) \geq h_2^{(k)}, \\ 0 & \text{при } d^{(k)}(n, m) < h_2^{(k)}, \end{cases} \quad (7)$$

где $d^{(k)}(n, m) = |s^{(k)}(n, m) - s^{(k-l)}(n, m)|$ – абсолютная величина изменения амплитуды сигнала между k -м и $(k-l)$ -м кадрами для каждого элемента разрешения (n, m) . При варьировании значений $l = 1, 2, \dots$ для второго признака используется обозначение $z_{2(l)}^{(k)}(n, m)$. В случае $l = 1$ значение $z_2^{(k)}(n, m) \equiv z_{2(1)}^{(k)}(n, m)$ совпадает с череспериодной разностью в известном методе череспериодной компенсации (ЧПК) сигналов неподвижных целей. Использование же значений $l > 1$ позволяет согласовать период формирования кадров T_k со средней скоростью перемещения цели, добиваясь наибольшей информативности признака $z_{2(l)}^{(k)}(n, m)$ (см. Главу 4).

Как и для признаков $z_1^{(k)}(n, m)$, можно использовать адаптивный порог $h_2^{(k)}$, вычисляемый на основе вариационного ряда значений $\tilde{d}^{(k)}(n)$.

Третий признак – усредненное значение амплитуды сигнала за несколько кадров:

$$z_3^{(k)}(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } sr_{n_s}^{(k)}(n, m) \geq h_3^{(k)}, \\ 0 & \text{при } sr_{n_s}^{(k)}(n, m) < h_3^{(k)}, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$sr_{n_s}^{(k)}(n, m) = \frac{1}{n_s} \sum_{l=0}^{n_s-1} |s^{(k-l)}(n, m)| \quad (9)$$

– среднее значение амплитуды сигнала в элементе разрешения (n, m) при усреднении за последние n_s кадров ($n_s \geq 2$).

Значение n_s должно быть не очень большим, таким, чтобы за время усреднения $n_s T_k$ перемещение цели не превысило бы размеры Δr элемента разрешения. Так, при $\Delta r \leq 1\text{ м}$ и $T_k = 0,2\text{ с}$ получим значения $n_s \leq 7$.

Четвертый признак характеризует усредненное значение изменения амплитуд за несколько кадров:

$$z_4^{(k)}(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } sd_{n_s}^{(k)}(n, m) \geq h_4^{(k)}, \\ 0 & \text{при } sd_{n_s}^{(k)}(n, m) < h_4^{(k)}, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$sd_{n_s}^{(k)}(n, m) = \frac{1}{n_s} \sum_{l=0}^{n_s-1} d^{(k-l)}(n, m) \quad (11)$$

среднее значение абсолютной разности амплитуд сигнала в элементе разрешения (n, m) при усреднении за последние n_s кадров.

Используя центрирование значений разностей $d^{(k)}(n, m)$ для n_s кадров, получим пятый признак, характеризующий локальное значение дисперсии амплитуд сигналов:

$$z_5^{(k)}(n, m) = D\{|s^{(k)}|, |s^{(k-l)}|, \dots, |s^{(k-n_s+1)}|\}, \quad (12)$$

где $s^{(k)} = s^{(k)}(n, m)$; $D\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – оператор вычисления дисперсии чисел (x_1, x_2, \dots, x_n) . Общее число кадров, используемых при вычислении признаков $z_5^{(k)}$, равно $n_s = 1, \dots, n_0$. Выбор значения n_s зависит от величины T_k . Для введения зависимости $z_3^{(k)}(n, m)$ и $z_4^{(k)}(n, m)$ признаков от параметра усреднения n_s для них используем также обозначения $z_{3(n_s)}^{(k)}(n, m)$ и $z_{4(n_s)}^{(k)}(n, m)$. Экспериментально установлено, что при значениях $T_k = 0,1 \dots 0,5\text{ с}$, в задачах обнаружения людей наиболее целесообразные значения $n_s = 3 \dots 7$.

Несмотря на использование одних и тех же данных при вычислении признаков $z_4^{(k)}$ и $z_5^{(k)}$, между ними имеется важное смысловое отличие. Значение признака $z_5^{(k)}$ почти не оказывает влияние на «медленное» изменение среднего значения амплитуды полезного сигнала, которое может быть вызвано не только микроперемещениями цели (шевелением, дыханием и т.д.), но также и

погрешностями аппаратуры – тепловым трендом постоянных составляющих сигналов фазовых детекторов, аппаратурных помех и наводок.

Процедура обнаружения и сопровождения целей при отображении вторичной информации с интервалом времени следования кадров основана на использовании статистик:

$$\lambda^k(n, m) = f\left(z_1^{(k)}(n, m), z_2^{(k)}(n, m), z_3^{(k)}(n, m), z_4^{(k)}(n, m), z_5^{(k)}(n, m)\right), \quad (13)$$

являющихся некоторой функцией признаков. В общем случае функциональная зависимость в (15) может быть различной. В работе применен следующий алгоритм вычислений данных статистик:

$$\lambda^{(k)}(n, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu^{(k)}(n, m) \geq h_\lambda, \\ 0 & \text{при } \mu^{(k)}(n, m) < h_\lambda, \end{cases} \quad (14)$$

где

$$\mu^{(k)} = \sum_{l=1}^5 z_l^{(k)}(n, m). \quad (15)$$

Обнаружение целей в каждом элементе разрешения (n, m) текущего k -го кадра на основе статистики (13) соответствует задаче бинарного распознавания методом голосования при использовании вектора признаков $\mathbf{Z}^k(n, m) = (z_1^{(k)}(n, m), z_2^{(k)}(n, m), z_3^{(k)}(n, m), z_4^{(k)}(n, m), z_5^{(k)}(n, m))$. При этом, порог в (13) может принимать значения $h_\lambda \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

В работе, на основе экспериментальных данных, получено оптимальное значение порога $h_\lambda = 2$.

При решении различных задач распознавания образов основной проблемой является выбор множества признаков, используемых для классификации образов. В связи с этим большой интерес представляет задача оценки информативности признаков, решение которой позволит либо исключить малоинформативные признаки, либо заменить их другими, более информативными признаками.

Используемый метод имеет простое логическое обоснование и основан на вычислении отношения среднего значения проекции межклассового расстояния образов на ось базисного вектора признака к среднему значению проекции

внутриклассового расстояния образов. Вычисленное таким образом отношение и является количественным определением информативности признака.

Смысл данного определения поясняется с помощью рис. 1, на котором схематически представлены множества образов двух классов ω_1 и ω_2 ($U = 2$) в двумерном пространстве признаков R^2 ($Q = 2$). На рисунке обозначено: r_{12} – вектор, направленный от образа 1-го к образу 2-го классов и усредненный по всем образам классов ω_1 и ω_2 ; $e_{r_{12}}(q) = (e_q, r_{12})$ – проекция вектора r_{12} на базисный вектор; $e_q, q = 1, 2, d_{uq}$ – среднее значение “разброса” образов u -го класса вдоль направления базисного вектора e_q q -го признака.

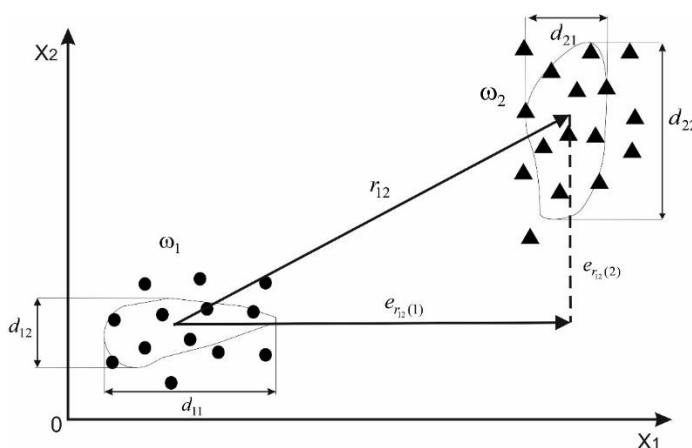


Рис. 1 – Схематическое изображение образов двух классов в двумерном пространстве признаков

Абсолютные значения проекций $e_{r_{12}}(q)$, характеризуют информативность q -го признака. При одинаковых значениях таких проекций на различные оси признаков, информативность признаков будет зависеть также и от средней величины внутриклассового разброса образов по этим признакам (отличия в величинах d_{11} и d_{12} на рис. 1). Таким образом, информативность q -го признака может быть вычислена по формуле:

$$I_q = \frac{|e_{r_{12}}(q)|}{\frac{1}{U} \sum_{u=1}^U d_{uq}} \quad (16)$$

Выражение (16) обобщается на случай произвольных значений U и Q . Вычислим для q -го признака величину проекции среднего значения межклассового расстояния $r_{ug(q)}$ для двух классов u и g с числом образов W_u и W_g соответственно. С учетом введенных обозначений образов классифицированной выборки получим:

$$r_{ug(q)} = \frac{1}{W_g W_u} \sum_{i=1}^{W_u} \sum_{j=1}^{W_g} |x_q^{(i,u)} - x_q^{(j,g)}|. \quad (17)$$

При наличии U классов образов число возможных пар классов равно $2/(U(U-1))$, поэтому среднее значение проекции межклассового расстояния образов на ось базисного вектора признака равно

$$r_q = \frac{2}{U(U-1)} \sum_{u=1}^{U-1} \sum_{g=u+1}^U r_{ug(q)} \quad (18)$$

Величина $d_{u(q)}$ среднего значения внутриклассового разброса образов u -го класса вдоль направления базисного вектора e_q (т.е. для q -го признака) может быть вычислена путем усреднения проекций расстояний между всеми парами образов данного класса на ось Ox_q согласно формуле

$$d_{u(q)} = \frac{2}{W_u(W_u-1)} \sum_{i=1}^{W_u-1} \sum_{j=i+1}^{W_u} |x_q^{(i,u)} - x_q^{(j,u)}| \quad (19)$$

Таким образом, окончательное выражение для вычисления информативности q -го признака принимает вид

$$I_q = \frac{r_q}{\frac{1}{U} \sum_{u=1}^U d_{uq}}. \quad (20)$$

Следует отметить, что введенное определение информативности I_q допускает множество модификаций, связанных с различиями в использовании метрики пространства признаков, методах усреднения проекций расстояний и др. Кроме того, информативность признаков должна быть связана с их влиянием на показатели качества процедуры распознавания. При этом вычисление значений I_q согласно (20) является простым и эффективным методом анализа информативности признаков.

Глава 3 посвящена статистическому моделированию принимаемых сигналов при зондировании помещений через стену.

Существуют различные виды моделей целей, которые подразделяют на простые и сложные. В данной работе рассматриваются сложные сосредоточенные цели, для которых разработаны как модели отраженных сигналов, так и траектории перемещения целей.

В качестве исследования использована модель человека, находящегося в помещении и перемещающегося по нему от стены к стене по прямой линии или по кругу.

Для формирования одного кадра требуется создать сигнал во всех азимутальных каналах. В данном моделировании было использовано 11 азимутальных каналов, в одном из каналов был реализован полезный сигнал, т.к. рассмотрен пример с одной

целью. Остальные десять каналов реализованы без полезного сигнала. В общем случае количество полезных сигналов в канале зависит от количества заданных целей. Как было описано ранее, после формирования полезного сигнала требуется его «размножить» на требуемое количество кадров с учетом перемещения цели от кадра к кадру. Пример сходства модели сигнала и реального сигнала показан на рисунке 1, данное сходство проиллюстрировано с помощью нескольких кадров, следующих подряд, в случаях с модельным и с реальным сигналами.

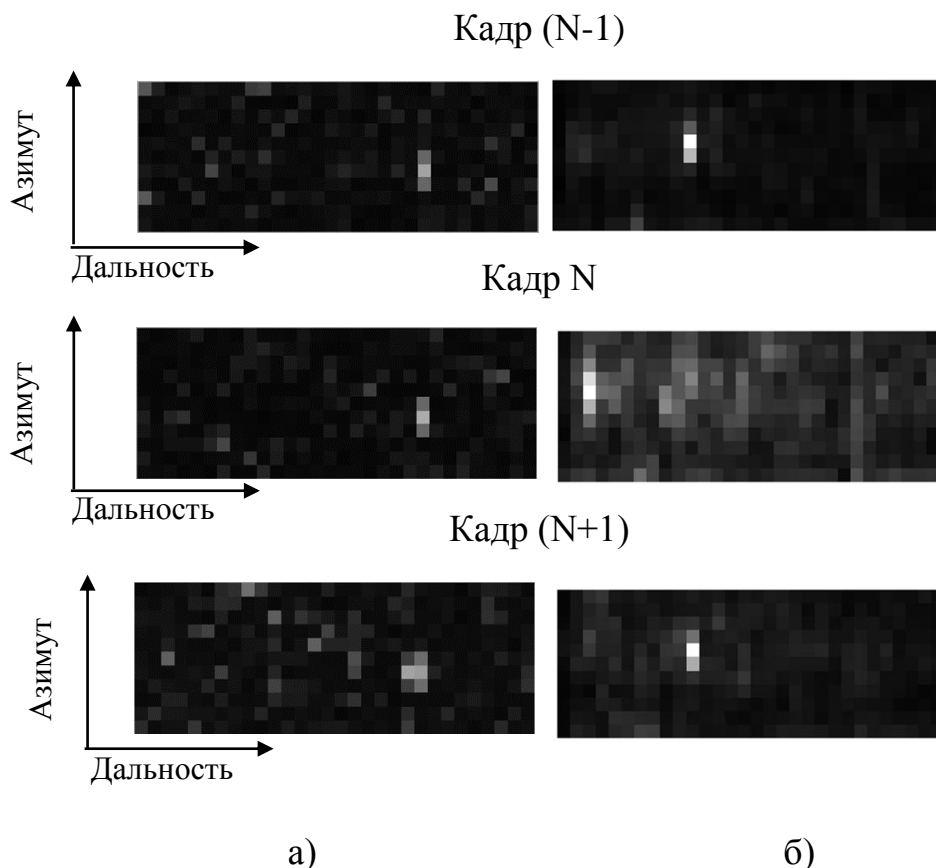


Рис. 2 – Примеры реализации модельного сигнала (а) и реального (б) сигналов для трех последовательных кадров.

Приведенное отображение показывает сходство кадров по своему виду. Далее разработанные модели сигналов использовались для анализа информативности признаков и для исследования эффективности различных алгоритмов. Разработанный программный комплекс состоит из основной и нескольких вспомогательных подпрограмм. Подпрограммы выполняют функции первичной обработки модельного сигнала. Основная программа производит вычисления для обнаружения и сопровождения целей. Такие как, вычисление значений признаков, выбор критерия обнаружения и так далее. Основная программа является

универсальной, поэтому имеет возможность работать с модельным и реальным сигналами.

Для отладки различных алгоритмов и оценки их эффективности при вторичной обработке сигналов нужно иметь достаточно большой объем экспериментальных данных. Получение большого объема экспериментальных данных весьма затруднительно, так как это связано с проведением натуральных экспериментов, поэтому целесообразно проводить исследования с помощью сигналов, которые можно смоделировать на компьютере. С этой целью разработан комплекс программ, позволяющий моделировать сигналы в виде последовательности кадров, как это делается в реальном радаре. Для этого в среде Matlab разработан комплекс, состоящий из следующих подпрограмм:

1. Модель движения живого человека представляет собой траекторию передвижения человека.
2. Программа формирования полезного сигнала представляет собой математическое представление сигнала, описанное ранее.
3. Модель формирования интерференционных помех.

Далее сигналы проходят обработку, описанную ранее, основанную на использовании фазового детектора, обратного преобразования Фурье и взятия модуля. После формирования соответствующих сигналов происходит запуск основной программы, которая проводит основные вычисления и обработки.

Алгоритм программы включает следующие пункты:

1. Выбор программы работы с реальными данными или с моделями.
2. Ввод исходных данных, таких как: параметры зондирующего сигнала, количество кадров, количество каналов по азимуту и дальности, задание количества целей, число критерия обнаружения (описание ниже в пункте 5).
3. Формирование полного массива кадров, а также массива с координатами целей для проведения сравнительного анализа в дальнейшем. Формирование массивов целей возможно только при работе с моделью сигнала.
4. Вычисление всех информативных признаков, описанных в главе 2, для массива принимаемого сигнала.
5. Использование критерия обнаружения K_{II} из N_{II} . В данном случае N_{II} – это общее количество признаков, K_{II} – количество признаков, используемых в данный момент.

Для улучшения эффективности подхода, используются не все признаки одновременно, а наиболее эффективные в данной ситуации. Количество используемых признаков задается заранее.

6. Для исключения близкорасположенных целей происходит программное объединение ячеек, содержащих 3-5 элементов разрешения (число, согласованное с разрешающей способностью по дальности и размером цели).

7. При пропадании и скачков целей используется накопление координат целей за несколько кадров. Это позволяет сделать траекторию движения цели непрерывной.

8. Вывод на экран итогового расположения цели.

Данный программный комплекс позволяет получать достоверные результаты обнаружения, как с помощью моделей, так и с помощью реальных сигналов.

Глава 4 посвящена результатам экспериментальной проверки разработанных алгоритмов.

Рассмотренный метод обработки вторичной информации на основе подходов теории распознавания образов прошел апробацию при обработке сигналов многоканальной РЗЧС. Экспериментальные данные были получены с помощью макета РЗЧС. Интервал времени следования кадров равен 0,2 с, общее время наблюдения в различных экспериментах варьировалось от 30 с до 2 мин.

Эксперименты проводились в различных условиях – внутри помещений и на открытых территориях (для оценки результата без погрешности смещения при прохождении сигнала через стену) при различном числе и траекториях передвижения целей (людей). Эффективность результатов вторичной обработки данных оценивалась с помощью показателей качества N_F, N_M, R_m, R_0 (ниже описаны в таблице 1).

На представленных ниже рисунках в качестве примера приведены результаты эксперимента на открытой местности, для случая одной цели (рис. 2 а, человек ходил по прямой от локатора и обратно) и двух целей (рис. 3 а, два человека ходили навстречу друг к другу).

На рис. 3 а, 4 а представлены двумерные яркостные картины сигналов после первичной обработки последовательных трех кадров с номерами $k, (k+1), (k+2)$ для двух случаев: одна цель (рис. 3) и две цели (рис. 4), находящиеся в контролируемой зоне. Далее, на рис. 3 б, 4 б изображены результаты вторичной обработки

соответствующих кадров, где обнаруженные в каждом кадре цели обозначены в виде белых прямоугольников на черном фоне всей зоны. На рис. 3 (в-ж) и 4 (в-ж) белые прямоугольники соответствуют единичным значениям признаков $z_1^{(k)}$, $z_2^{(k)}$, $z_3^{(k)}$, $z_4^{(k)}$ и $z_5^{(k)}$ для каждого кадра $k = k_0, k_0+1, k_0+2$.



а) исходные кадры с номерами $k = k_0, k_0+1, k_0+2$ - матрица $S^{(k)}$,



б) результаты вторичной обработки - матрица $S^{(k)}$,



в) признак превышения порога - $z_1^{(k)}$,



г) разность двух соседних кадров, признак - $z_2^{(k)}$,



д) средняя амплитуда за 5 кадров, признак - $z_3^{(k)}$,



е) средняя разность за 5 кадров - $z_4^{(k)}$,



ж) усредненная дисперсия за 5 кадров - $z_5^{(k)}$,

Рис. 3 – Изображения кадров в градациях серого цвета по результатам первичных данных (а) при наличии одной цели; итоговый результат вторичной обработки (б); значения признаков $z_1^{(k)}$ (в), $z_2^{(k)}$ (г), $z_3^{(k)}$ (д), $z_4^{(k)}$ (е), $z_5^{(k)}$ (ж)

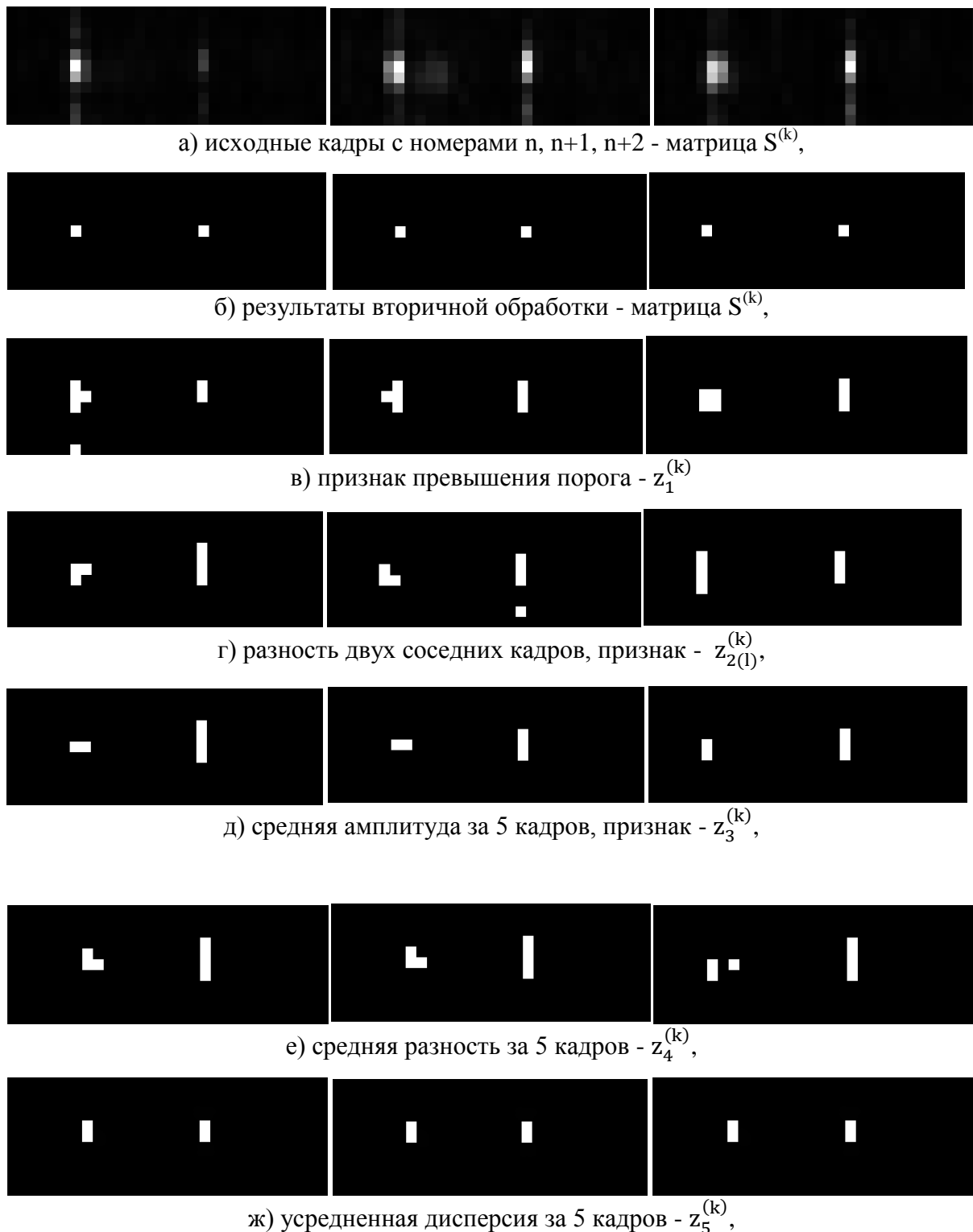


Рис. 4 – Изображения кадров в градациях серого цвета по результатам первичных данных (а) при наличии двух целей; итоговый результат вторичной обработки (б); значения признаков $z_1^{(k)}$ (в), $z_{2(l)}^{(k)}$ (г), $z_3^{(k)}$ (д), $z_4^{(k)}$ (е), $z_5^{(k)}$ (ж)

Рис. 3 б, 3 4 свидетельствуют о безошибочном обнаружении и сопровождении целей в течение трех выбранных кадров. Для оценки эффективности работы алгоритма в динамике используются показатели эффективности N_F, N_M, R_m, R_0 , значения которых для рассмотренных случаев рассчитывались на интервале времени $24c$ (число обрабатываемых кадров $K=120$). Результаты расчетов показателей эффективности представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели эффективности вторичной обработки, число обрабатываемых кадров К=120

Показатели качества вторичной обработки:	N_F (доля в %) (число кадров, содержащих ложные отметки)	N_M (доля в %) (число кадров, в которых были пропуски целей)	R_m (в числе элементов разрешения)	R_0 (в числе элементов разрешения)
одна цель	0	0	1	0,3
две цели	3 (2,4%)	2 (1,6%)	1	0,3

Приведенные в таблице 1 значения показателей свидетельствуют о весьма эффективной вторичной обработке. Число ложных отметок возрастает с увеличением числа полезных целей, находящихся в контролируемой зоне. При этом в случае обнаружения и сопровождения двух целей число ложных отметок появляется в течение времени, составляющем всего лишь 2,5 % от общей длительности наблюдения.

Результаты моделирования и расчетов информативности сведены в Таблицу 2 (для случая одной цели - Ц1 и для случая двух целей - Ц2), где для удобства сравнения признаков введена их нормировка по величине максимальной информативности (последний столбец).

Таблица 2 – Случай одной цели

Признак	Значение информативности (*100)		Нормированное значение информативности	
	Ц1	Ц2	Ц1	Ц2
$z_1^{(k)}$	2,18	2,1	0,103	0,287
$z_{2(1)}^{(k)}$	0,68	0,59	0,032	0,081
$z_{2(2)}^{(k)}$	0,72	0,74	0,034	0,101
$z_{2(3)}^{(k)}$	0,84	0,82	0,039	0,112
$z_{2(4)}^{(k)}$	0,93	0,98	0,044	0,134
$z_{2(5)}^{(k)}$	0,90	0,89	0,042	0,121
$z_{3(3)}^{(k)}$	0,82	0,79	0,038	0,108
$z_{3(5)}^{(k)}$	1,16	1,09	0,054	0,149
$z_{3(7)}^{(k)}$	1,26	1,18	0,059	0,161
$z_{3(9)}^{(k)}$	1,02	1,05	0,048	0,143
$z_{4(7)}^{(k)}$	0,48	0,39	0,022	0,053
$z_5^{(k)}$	21,10	7,31	1	1

Из анализа результатов таблицы видно, что показатели информативности признаков для первого (Ц1) и второго (Ц2) случаев практически одинаковы. При этом наибольшую информативность имеет признак «усреднения дисперсии» ($z_5^{(k)}$), значение которого превышает информативность других признаков в несколько раз. Далее идет признак «максимума амплитуды в текущем кадре» ($z_1^{(k)}$), значение которого превышает информативность других признаков почти в 2 или более раз. На третьем месте по информативности находится признак «усреднения амплитуды за n_s кадров» ($z_3^{(k)}$), причем наибольшее значение информативности получается при значении $n_s = 7$. Несколько меньшее значение информативности (примерно на 20%) имеет признак «разности амплитуд, вычисленной через l кадров» ($z_{2(l)}^{(k)}$) при $l = 3$. Самую низкую информативность имеет признак $z_4^{(k)}$ для ряда значений $n_s = 2, \dots, 9$.

Таким образом, проведенный анализ позволил проранжировать используемые признаки в порядке убывания из информативности в следующем виде:

$I(z_5^{(k)}) \approx 7,3 - 21,1$ - признак усреднения дисперсии за 5 кадров;

$I(z_1^{(k)}) \approx 2,1$ - признак превышения порога;

$I(z_3^{(k)}) \approx 1,18$ (при $n_s = 7$) - признак усреднения амплитуды за 7 кадров;

$I(z_{2(l)}^{(k)}) \approx 0,98$ (при $l = 4$)- признак разности двух кадров через 4 кадра;

$I(z_4^{(k)}) \approx 0,39$ (при $n_s = 7$) - признак средней разности за 7 кадров.

Следует отметить, что оптимальные значения параметров n_s и l , обеспечивающие максимальную информативность соответствующих признаков, получены для периода следования кадров $T_k = 1с$ и при изменении этого периода могут быть другими.

В заключении приведены основные результаты диссертации:

1. Описаны особенности построения РЗЧС, основными из которых являются: малая дальность действия (не более 50 м) и высокая разрешающая способность (не хуже 1м). Описан алгоритм пространственной фильтрации сигналов, приходящих с различных угловых направлений линейной антенной решетки в случае использования зондирующего СЧМ сигнала.

2. Проведен анализ видов стен, а также влияние геометрических и электрических характеристик стен, таких как толщина и диэлектрическая проницаемость на точность измерения координат целей.
3. Рассмотрены характеристики живых людей, как радиолокационных целей при решении задач обнаружения и сопровождения. Основными характеристиками этих целей являются: ЭПР, частота и амплитуда дыхания, сердцебиения, шевеления.
4. Рассмотрен принцип действия РЗЧС. Приведена структурная схема одноканальной многочастотной РЗЧС, использующая СЧМ сигнал.
5. Рассмотрены свойства СЧМ сигнала, проведен анализ его автокорреляционной функции (АКФ). Описан метод оптимального приема и обработки СЧМ сигнала.
6. Описан алгоритм формирования двумерных кадров данных в координатах «азимут*дальность» и перевод их в декартову систему координат.
7. Описаны признаки подвижных целей, полученные на основе анализа СЧМ сигналов при отражении от людей. Сделаны выводы о возможности использования модуля разности комплексных отсчетов для обнаружения полезных сигналов.
8. Описаны пять признаков целей, которые условно можно разделить на статические и динамические. Последние формируются на основе результатов некоторой последовательности предшествующих кадров и характеризуют свойства полезных сигналов в течение ограниченного интервала времени. Введен новый признак на основе дисперсии отсчетов межкадровых сигналов, характеризующий степень изменчивости амплитуды сигнала в каждом элементе (n,m) .
9. Предложен метод вторичной обработки сигналов в РЛС малой дальности, основанный на использовании методов теории распознавания образов. Суть предлагаемого подхода заключается во введении различных признаков полезных целей (объектов, подлежащих обнаружению и сопровождению), формируемых в каждом элементе разрешения (азимут-дальность) двухкоординатной РЛС. Значения признаков – бинарные (0 или 1), определяются путем сравнения функций амплитуд сигналов первичной обработки с адаптивными порогами. Результирующая статистика, формируемая на основе пяти введенных признаков, также принимает бинарные значения, которые определяются методом голосования: цель считается обнаруженной, если два или более признаков принимают единичное значение.

10. Введен метод расчета информативности признаков, основанный на вычислении среднего нормированного значения межклассового расстояния образов. Получены формулы для расчетов среднего значения проекции межклассового расстояния и среднего значения внутриклассового разброса образов, используемые при расчете информативности признаков.

11. Описаны виды целей и их математические модели при компьютерном моделировании. Также описаны виды сигналов мешающих отражений и шумов. Приведены выражения для вышеописанных сигналов.

12. Представлен алгоритм работы и блок-схема программного комплекса, реализующего задачу обнаружения людей за стеной. Также приведен код программы для реализации поставленной задачи. Приведено описание программ.

13. Представлены результаты тестирования разработанного алгоритма, полученные на основе компьютерного моделирования и натуральных экспериментов. Анализ информативности введенных признаков показал, что наибольшей информативностью обладает признак «дисперсия». Его информативность превышает информативность других признаков в 3...10 раз в зависимости от числа целей и условий зондирования.

14. Для оценки качества вторичной обработки введены показатели эффективности, учитывающие появление ложных отметок и пропуски целей в течение заданного интервала времени наблюдения. Представлены результаты вторичной обработки данных, полученных на основе натурального эксперимента с макетом радара. Оценки значений показателей эффективности вторичной обработки разработанного метода продемонстрировали высокие результаты, подтверждающие целесообразность его применения на практике.

Список публикаций по теме диссертации

1. Гаврилов К.Ю., Игоница Ю.В. Вторичная обработка данных в РЛС малой дальности действия // Инновации в авиации и космонавтике-2015, Москва, 2015, с. 129-130.

2. Гаврилов К.Ю., Игоница Ю.В., Козлов Р.Ю. Обнаружение и сопровождение людей при радиолокационном зондировании помещений через стену // XII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» 2018. С.78-79

3. Гаврилов К.Ю., Игоница Ю.В., Линников О.Н. Оценка ошибок измерения координат целей в радарах зондирования через стену // Информационно-измерительные и управляющие системы Т. 17, № 1 2019. С. 46-54.
4. Гаврилов К.Ю., Игоница Ю.В., Линников О.Н., Трусое В.Н. Метод вторичной обработки информации в РЛС малой дальности // Информационно-измерительные и управляющие системы Т. 14, № 11 2016. С. 4-15.
5. Гаврилов К.Ю., Игоница Ю.В., Линников О.Н., Панявина Н.С. Оценка разрешающей способности по дальности при использовании сигналов со ступенчатой модуляцией // Информационно-измерительные и управляющие системы Т.13, № 5, 2015. С. 23-32.
6. Гаврилов К.Ю., Игоница Ю.В., Линников О.Н. Анализ информативности признаков при вторичной обработке сигналов в РЛС малой дальности // Информационно-измерительные и управляющие системы Т. 16, № 5, 2018. С.11-17.
7. Игоница Ю.В. Вторичная обработка радиолокационной информации на основе методов распознавания образов// En&T-2018, Долгопрудный, 2018. С. 26-28