

На правах рукописи



Ашряпов Марат Игоревич

**РАСПОЗНАВАНИЕ ЖЕСТИКУЛЯЦИЙ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭТАЛОННЫХ МАСШТАБИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ**

Специальность: 2.2.16.

Радиолокация и радионавигация

(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», на кафедре 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование».

Научный руководитель: **Охотников Денис Александрович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Мякинков Александр Валерьевич**, доктор технических наук, доцент, директор учебно-научного института радиоэлектроники и информационных технологий, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Семенов Виталий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ООО «Новые телеком решения», руководитель отдела разработки радиоэлектронных систем

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»

Защита состоится 17 сентября 2024 г. в 14 часов 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/?ELEMENT_ID=179873

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
24.2.327.01, канд. техн. наук



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современное развитие технических средств зачастую не обходится без интеграции в своем составе систем управления. Принципы управления базируются на использовании устройств пультов, систем голосового управления. Упомянутые принципы прошли множество этапов развития, устранения недостатков. Особенности применения ограничены факторами взаимодействия человека и устройства. Так, в случаях утери пульта невозможна дальнейшая эксплуатация объекта управления. В случаях голосового управления, не всегда может быть обеспечена тишина, в особенностях при использовании в промышленных цехах, складах с излишней зашумленностью.

В данной работе предлагается исследование нового пути развития принципа управления, основанного на наблюдении жестикуляций человека в радиолокационном диапазоне длин волн на основе радиолокационного датчика захвата движений, и последующим распознаванием отраженного сигнала [5].

Преимущество системы со сверхширокополосной технологией (СШП), применяемой в основе датчика слежения за движением, обусловлено высоким пространственным разрешением за счет широкой полосы зондирующего сигнала. Появляется возможность фиксирования динамики наблюдаемого объекта.

Идея бесконтактного управления основывается на наблюдении движений человека при жестикуляциях рукой. Параметры флуктуаций скорости руки, эффективной площади рассеяния, длительность жестикуляций, угол наблюдения формируют уникальный сигнал. Такой сигнал может быть обработан классическим корреляционным детектором с целью выявления взаимосвязи входного сигнала и эталона. Задача распознавания усложняется для флуктуирующего сигнала. С практической стороны, сигнал, регистрируемый от фигуры жестикуляций отличается в каждом эксперименте, по причине низкой повторяемости скоростей. Поэтому, коэффициент корреляции снижается вместе с вероятностью распознавания.

Для повышения вероятности распознавания предложен усовершенствованный коррелятор на основе масштабируемого сигнала эталона, который позволяет распознать и классифицировать радиолокационные сигналы с флуктуацией по времени.

Предложенный метод распознавания жестикуляций человека, находит применение в решении задач дистанционного и бесконтактного управления техническими средствами.

Целью диссертационной работы является решение прикладной научной задачи повышения вероятности распознавания флуктуирующих сигналов, регистрируемых при наблюдении жестикуляций руки человека на основе масштабируемых эталонов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Разработана математическая модель классификатора радиолокационных сигналов, позволяющего оценить взаимосвязь между эталонным сигналом и анализируемым входным сигналом.
2. На основе математической модели разработан масштабируемый коррелятор.
3. Разработан алгоритм распознавания жестов с использованием масштабируемого коррелятора.
4. Исследовано влияние флуктуации длительности входного сигнала на оценку вероятности распознавания.
5. Исследовано влияние дальности зондирования на вероятность распознавания.
6. Разработан макет СШП радиолокационного датчика регистрации доплеровских сигналов.
7. С целью подтверждения работоспособности метода распознавания, провести натурные испытания макета радиолокационного датчика.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы цифровой обработки сигнала, методы оценки на основе метрики, методы анализа сигнала на основе вейвлет преобразования, методы математического моделирования на ЭВМ.

Научная новизна работы.

1. Предложен алгоритм формирования опорного сигнала коррелятора.
2. Разработан многомасштабный коррелятор для распознавания входного флуктуирующего сигнала.
3. Исследовано влияние флуктуаций длительности сигнала на вероятность распознавания.

Практическая и теоретическая значимость результатов работы заключается в разработке методики распознавания флуктуирующих радиолокационных сигналов отраженных от жестикулирующего человека, применяемого в задаче бесконтактного и дистанционного управления бытовыми техническими средствами, колесными роверами.

1. Разработана структурная и принципиальные схемы СШП датчика.
2. Предложен принцип формирования масштабируемого эталона.
3. Предложена методика многомасштабного анализа флуктуирующего входного сигнала, позволяющая классифицировать сигнал в соответствии с формой опорного эталона.
4. Разработаны скриптовые файлы сценариев для программы MATLAB, которые были использованы в ходе моделирования алгоритма распознавания флуктуирующего сигнала.
5. Разработана система распознавания жестикуляций человека, основанная на принципе регистрации микро перемещений, посредством сверхширокополосного радарного датчика.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика распознавания радиолокационного сигнала, основанная на анализе входного доплеровского сигнала, регистрируемого при наблюдении

моторики руки человека и эталонного сигнала, позволяет повысить вероятность распознавания до 25%, в сравнении с классическим коррелятором.

2. Преобразование эталона в масштабируемое семейство функций позволяет повысить на 10-15% вероятность правильного распознавания входного сигнала, флуктуирующего по длительности.

3. С увеличением дистанции зондирования в пределах от 1 до 10 метров снижается результативность методики распознавания; введение дополнительного сигнального эталона, сформированного с учетом увеличенной дальности зондирования, снижает ошибку распознавания на больших дистанциях.

Достоверность полученных результатов. Обеспечивается на основе математической модели поступательных и возвратно-поступательных движений человека. Подтверждается моделированием алгоритма распознавания флуктуирующего сигнала. Подтверждается серией натуральных экспериментов, поставленных на основе разработанного устройства сверхширокополосного радарного датчика для наблюдения движений человека.

Личный вклад автора. Проведен сравнительный анализ методов вторичной обработки флуктуирующих радиолокационных сигналов [6-7]. Разработана методика, алгоритм и программное обеспечение для распознавания радиолокационных СШП сигналов, отраженных от человека при наблюдении движений и жестикуляций. Разработан квадратурный коррелятор на основе многомасштабной обработки для детектирования низкочастотного сигнала по его копии (опорному эталону). Разработано устройство распознавания жестикуляций человека на основе СШП радиолокационного датчика.

Реализация и внедрение результатов работы.

1. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2023-0005 и внедрена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», НПЦ РИМ, акт внедрения от 20.09.2023 г.

2. Разработанный макет и программное обеспечение сверхширокополосного радарного датчика внедрены в учебный процесс на кафедре 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

3. Внедрена методика распознавания флуктуирующего сигнала в разработки предприятия ООО «МЕДИКОМ», акт внедрения № 5 от 10.10.2023 г.

Публикации. Научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 9 рецензируемых изданиях, в том числе 4 работы опубликованы в рецензируемых изданиях Перечня ВАК. Кроме того, результаты диссертационной работы представлены на 5 международных и всероссийских научных конференциях.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертация соответствует п. п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям и является законченной научно-квалификационной работой.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 128 машинописных листах, включая 70 рисунков, 7 таблиц. Текст диссертации состоит из введения, перечня сокращений, условных обозначений, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы из 107 наименований, включая работы автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы. Поставлена цель научной работы, определены решаемые задачи. Описаны методы и средства исследования. Приведена практическая ценность и научная новизна. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена разработке устройства сверхширокополосного радарного датчика для наблюдения движений человека [1]. В главе определяется понятие моторики человека (жестикуляций). Определяются основные характеристики движений, такие как скорость перемещения руки $V_p = 0,2$ м\с, время наблюдения движений $T_{\text{обзора}} = 0,5...2$ с, амплитуда размаха $R_{\text{движения}} = 0,1...1$ м.

Тип и параметры зондирующего сигнала (ЗС) напрямую зависит от решаемых задач. Вид ЗС представляет собой синусоидальное колебание короткой длительности, без внутриимпульсного заполнения. Такой сигнал обладает высоким пространственным разрешением и позволяет регистрировать мелкую моторику руки. Сигнал сверхкороткой длительности $\tau_u = 2$ нс обладает широкой полосой частот $\Delta f = \frac{1}{\tau_u} = 500$ МГц, которая определяет класс радиолокационной системы. Такие СШП сигналы обладают преимуществом пространственного разрешения $\Delta R = \frac{c}{2\Delta f_0} = \frac{c\tau_u}{2}$, где c – скорость света.

Тогда как пространственное заполнение импульса достаточно мало, что также обеспечивает работу системы в ближней зоне. Минимальный период формирования импульсов T_{min} в радарных системах определяет однозначную определяемую дальность R_{max} (из условий до 10 м) $T_{\text{min}} \geq \frac{2R_{\text{max}}}{c}$. Максимальный период повторения $T_{\text{max}} \leq \frac{1}{f_{d\text{max}}}$ определяется максимальной доплеровской частотой $f_{d\text{max}} = 2V_{\text{max}} / \lambda$, где V_{max} – скорость перемещения руки в радиальном направлении, λ – длина волны.

Форма излучаемого сигнала – импульсная, выражается как $S(t) = A_s A(t) \sin(2\pi ft + \phi)$, где: A_s – амплитуда сигнала; $A(t)$ – закон амплитудной модуляции (оглабающая сигнала); ϕ – начальная фаза.

Структурная схема радарного датчика изображена на рис.1.

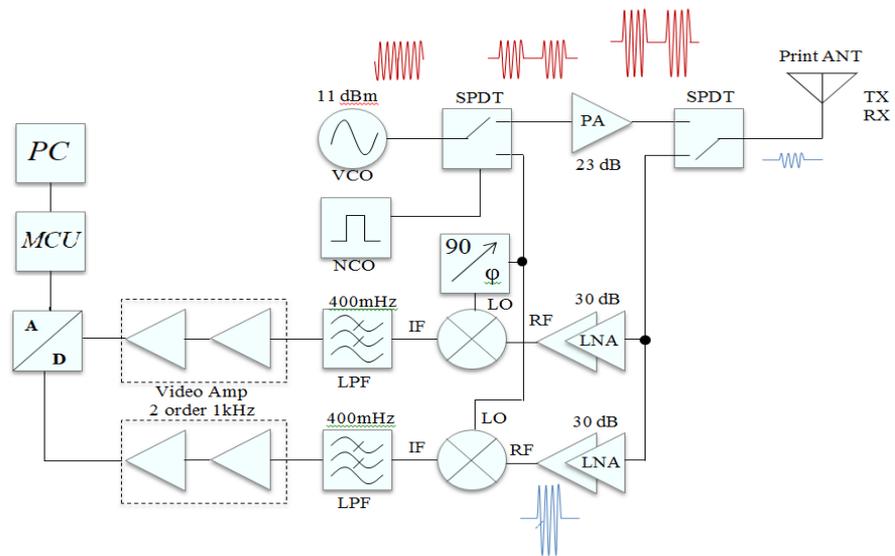


Рис. 1 Структурная схема сверхширокополосного датчика

В состав устройства входят следующие модули: генераторный модуль (генератор управляемый напряжением (VCO), усилитель (PA), пин-диодный переключатель (SPDT)), антенную систему, приемный модуль (малозумящий усилитель (LNA), смеситель, фильтры нижних частот (LPF), вычислительный модуль).

Приёмо-передающая антенная система представляет собой решетку из 8 связанных излучателей, рис. 2, а). Параметры антенны: центральная резонирующая частота 6350 МГц; полоса частот 800 МГц; ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости по уровню 3 дБ, 19 градусов, по горизонтали 38 градусов; коэффициент усиления не менее $G=12$ дБи; КСВ близко к 2 (в полосе 590 МГц). Фото устройства изображено на рис. 2, б)



Рис. 2 а) - фото антенной решетки; б) – фото радарного датчика

СШП радарный датчик обладает следующими характеристиками: дистанция зондирования $r=10$ м; мощность передатчика $P_{\text{им}}=0.01$ Вт; длина волны $\lambda=5$ см; центральная частота $f_0=6.5$ ГГц; длительность импульса $\tau_{\text{им}}=2$ нс; период повторения $T_{\text{повт}}=2$ мкс; полоса пропускания приемника $B=500$ МГц.

Глава 2 посвящена моделированию регистрируемого сигнала при наблюдении движений. Моторика человека может быть рассмотрена на простых движениях (в случае моделирования), таких как перпендикулярные или параллельные взмахи рукой. А также сложные, это могут быть отдельные жесты, регистрируемые под разными углами наблюдения, с присутствием эффекта ускорения\замедления.

Рассмотрим модель сигнала, отраженного от объекта совершающего поступательное и возвратно-поступательное движение. В квадратурных каналах сигнал $U_{\text{ex}}(t)$ смешивается с опорным сигналом $U_0(t)$ и интегрируется в течение времени T . В случае неподвижного объекта (местные предметы (МП)), задержка импульса составит $t_r=2R/c$. При нескольких неподвижных объектах, сигнал выражен суммой, где E_i – амплитуда i -го отражателя, $\omega=2\pi f$ – круговая частота, φ_i – фаза i -го отражателя:

$$U_{\text{ex}}(t) = \sum_{i=1}^n E_i \sin\left(\omega\left(t - \frac{2R}{c}\right) + \varphi_i\right). \quad (1)$$

Преобразование сигнала U_{ex} в квадратурном демодуляторе позволяет выделить комплексную огибающую. Квадратуры двух сигналов ортогональны. Квадратурное преобразование запишем в виде выходных напряжений:

$$U_I = E_{rx} \cos(\omega_{rf}t + \varphi_{rf}) \cdot E_g \cos(\omega_{lo}t + \varphi_{lo}) = \\ = \frac{E_g E_{rx}}{2} \left[\cos\left(\underbrace{\omega_{rf}t - \omega_{lo}t}_{\text{Разностная частота (0 ПЧ)}} + \varphi_{rf} - \varphi_{lo}\right) + \cos\left(\underbrace{\omega_{rf}t + \omega_{lo}t}_{\text{Суммарная частота}} + \varphi_{rf} + \varphi_{lo}\right) \right]; \quad (2)$$

$$U_Q = E_{rx} \cos(\omega_{rf}t + \varphi_{rf}) \cdot E_g \sin(\omega_{lo}t + \varphi_{lo}) =$$

$$= \frac{E_g E_{rx}}{2} \left[\sin \left(\underbrace{\omega_{rf}t - \omega_{lo}t + \varphi_{rf} - \varphi_{lo}}_{\text{Разностная частота (ОПЧ)}} \right) + \sin \left(\underbrace{\omega_{rf}t + \omega_{lo}t + \varphi_{rf} + \varphi_{lo}}_{\text{Суммарная частота}} \right) \right], \quad (3)$$

где E_g, E_{rx} – амплитуды гетеродина и принятого сигнала; ω_{rf}, ω_{lo} – круговая частота входного сигнала и гетеродина; $\varphi_{rf}, \varphi_{lo}$ – фаза входного сигнала и гетеродина. Отраженные эхосигналы МП, в том числе от силуэта человека, являются частью регистрируемого сигнала. В квадратурных каналах появляется постоянная составляющая, возрастающая с числом источников отражения. Напряжение в квадратурных каналах спроецируем на комплексную плоскость, огибающую принятого сигнала $\vec{r} = \sqrt{U_I^2(t) + U_Q^2(t)}$ представим суммой векторов, рисунок 2.5.

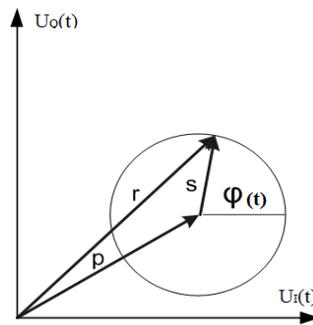


Рис. 3 Суммарный вектор \vec{r} состоит из векторов амплитуд: \vec{p} – для отраженных сигналов от МП, \vec{s} – отраженных сигналов подвижного объекта

Напряжение на выходных каналах смесителя представлено в виде комплексной огибающей от множественных эхосигналов МП:

$$P_I = \frac{E_g}{2} T \sum_{i=1}^n E_i \cos(\Delta\varphi_i); \quad (4)$$

$$P_Q = \frac{E_g}{2} T \sum_{i=1}^n E_i \sin(\Delta\varphi_i), \quad (5)$$

где E_g – амплитуда гетеродина; E_i – сумма амплитуд принятого сигнала; T – время накопления; $\Delta\varphi_i = \omega_0 t - \omega_0 \left(t - \frac{2R_i}{c} \right) - \varphi_i = \omega_0 \left(\frac{2R_i}{c} \right) - \varphi_i$ – разность фаз для i -го отражателя.

Предположим, рука человека представлена в виде абстрактной модели, в которой, элементарные отражатели образуют взаимную систему. Изменение дистанции R_i i -го отражателя, соответствует изменению дистанции R до объекта.

Напряжение на выходе квадратурного демодулятора, обусловлено сигналом от подвижного объекта на фоне неподвижных МП за время интегрирования T :

$$U_I(t) = \frac{E_g}{2} T \sum E_i \cos \left[\omega_0 \left(\frac{2R(t)}{c} \right) - \varphi_i \right] + P_I \quad (6)$$

$$U_Q(t) = \frac{E_g}{2} T \sum E_i \sin \left[\omega_0 \left(\frac{2R(t)}{c} \right) - \varphi_i \right] + P_Q \quad (7)$$

где P_Q - Q-я низкочастотная составляющая от неподвижного объекта; P_I - I-я низкочастотная составляющая от неподвижного объекта; $R(t)$ - закон изменения дистанции. В зависимости от изменения дистанции зондирования, комплексный вектор может описывать как полный круг, так и колебаться в четвертях тригонометрической плоскости за некоторый период времени, рис. 4. При малом изменении $R(t)$ за период интегрирования (от t до $t + T$), изменение фазы незначительно, поэтому $\omega_0 \frac{2R(T)}{c} \ll \pi$.

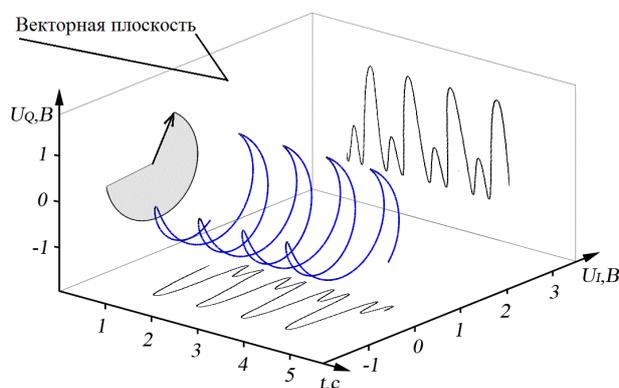


Рис. 4 Проекция векторов на оси для возвратно-поступательного движения

При поступательном движении, объект имеет постоянную радиальную скорость V . $R(t) = Vt$ - т.е. функция изменения дистанции. Фазовый вектор совершает полный оборот 2π . Напряжение в каналах смесителя:

$$U_I(t) = \frac{E_g E_{rx}}{2} T \cos \left[\left(\frac{4\pi Vt}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right] + P_I, \quad (8)$$

$$U_{\varrho}(t) = \frac{E_g E_{rx}}{2} T \sin \left[\left(\frac{4\pi V t}{\lambda} \right) + \Delta\varphi \right] + P_{\varrho}, \quad (9)$$

А также, при возвратно-поступательном движении. Закон движения описан выражением $R(t) = \Delta R \sin(\Omega t + \theta)$, где ΔR - размах амплитуды движения; $\Omega = 2\pi F$ - круговая частота; θ - начальная фаза движения объекта.

Тогда, сигнал на выходе двух квадратур определяется выражениями:

$$U_I(t) = \frac{E_g E_{rx}}{2} n T_0 \cdot \cos \left[2\omega_0 \left(\frac{\Delta R \cdot \sin(\Omega t + \theta)}{c} \right) + \Delta\varphi \right] + P_I, \quad (10)$$

$$U_{\varrho}(t) = \frac{E_g E_{rx}}{2} n T_0 \cdot \sin \left[2\omega_0 \left(\frac{\Delta R \cdot \sin(\Omega t + \theta)}{c} \right) + \Delta\varphi \right] + P_{\varrho}, \quad (11)$$

Таким образом, длина волны, расстояние до объекта, определяют фазу сигнала, чем больше амплитуда движений, тем больше вектор совершает полных оборотов. Отражение от МП расценивается как постоянная составляющая. Учитывая нулевые скорости при возвратно-поступательном движении, постоянная составляющая интерпретируется полезным сигналом. Перекрытие спектра движущегося объекта и спектра МП, приводит к потере части сигнала при фильтрации.

Математическую модель поступательного движения с ускорением, можно описать сигналом с линейной частотной модуляцией:

$S_{on}(t) = A_0 \cdot e^{j \left(\varphi_0 + 2\pi \left(f_0 t + 0.5 b \frac{1-t^2}{n} \right) \right)}$, $t \in [0, \tau_u]$, где: $f_0 = 0$ - начальная частота; $b = (f_1 - f_0) / \tau_u$ - параметр скорости изменения частоты ЛЧМ, при длительности $\tau_u = 1$ с (f_1 - конечная частота ЛЧМ); $\Delta F = f_1 - f_0$ - ширина спектра сигнала; $f_u = (f_1 + f_0) / 2$ - центральная частота спектра сигнала; $\frac{1}{n}$ - число дискретов сигнала, $n \leq 1$; φ_0 - начальная фаза; A_0 - амплитуда. Модель такого сигнала будет применена далее.

Глава 3 посвящена методу распознавания сигналов на основе корреляционной обработки, с применением эталонных масштабирующих функций [4].

Необходимость разработки новой методики для распознавания априорно неизвестных сигналов обусловлена проблематикой неточного знания. Видоизменяемость регистрируемого сигнала при наблюдении движений человека зависит от дальности зондирования (изменение фаз отраженного сигнала при изменении дистанции), скорости жестикуляций (число отсчетов сигнала возрастает, либо уменьшается), угла обзора, а так же и других факторов. В таком случае, классический корреляционный анализ не позволяет достоверно оценить исследуемый сигнал.

В основу решения задачи классификации, положен метод корреляционной обработки, который модифицирован с учетом неточного знания длительностей функций различных жестов. Кроме того, в рассматриваемом случае особенность метода корреляционной обработки заключается в комплексном виде регистрируемого сигнала $\mathbf{X} = \{x(t_k), k = 1, \dots, K\}$ и эталона $\mathbf{Y} = \{y(t_k), k = 1, \dots, K_0\}$. Заметим, что длительность эталона определяется числом отсчетов K_0 , которое существенно меньше числа отсчетов K анализируемой выборки (реализации).

Формирование набора шаблонов (эталонов) является важным этапом подготовки априорных данных. Эталон формируется из сигнала, полученного при наблюдении жестикуляций человека. Представляет собой две сигнальные последовательности, с действительной и мнимой частью сигнала.

Корреляционная обработка проводится методом скользящего окна, состоящего из K_0 отсчетов, которое «проходит» по всем отсчетам наблюдаемого сигнала \mathbf{X} . Важной особенностью предлагаемого алгоритма обработки является наличие нескольких эталонов, используемых для распознавания одного и того же жеста (сигнала). Отличия эталонов одного класса (жеста) заключаются в их различной длительности, что обусловлено различным временем формирования однотипных жестов в различных экспериментах.

Далее будем считать, что число распознаваемых жестов равно M – это число классов распознаваемых образов, и для каждого класса $m = 1, \dots, M$ введем масштабируемый по времени длительности эталонный сигнал с параметром

масштаба a . Таким образом, множество эталонов, используемых для распознавания M видов жестов, будем обозначать как $Y_{(m,a)} = \{y_{(m,a)}(t_k), k=1, \dots, k_a\}$.

Заметим, что число отсчетов эталона k_a зависит от параметра масштаба a .

Формирование корреляционных коэффициентов происходит отдельно для действительной и мнимой частей комплексных отсчетов $x(t_k)$ и $y(t_k)$. В результате скользящей корреляционной обработки массива данных, с помощью набора эталонов, формируются два вектора корреляционных коэффициентов действительной $\text{Re}\{\}$ и мнимой части $\text{Im}\{\}$ наблюдаемого сигнала:

$$r_{(m,a)}^{(\text{Re})}(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k_a} \left(\text{Re}\{x(t_{k+i-1})\} - \text{Re}\{\bar{x}(t_k)\} \right) \left(\text{Re}\{y_{(m,a)}(t_i)\} - \text{Re}\{\overline{y_{(m,a)}}\} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k_a} \left(\text{Re}\{x(t_{k+i-1})\} - \text{Re}\{\bar{x}(t_k)\} \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{k_a} \left(\text{Re}\{y_{(m,a)}(t_i)\} - \text{Re}\{\overline{y_{(m,a)}}\} \right)^2}}, \quad r \in (-1, 1), \quad (12)$$

где $\text{Re}\{\bar{x}(t_k)\} = \sum_{i=1}^{k_a} \text{Re}\{x(t_{k+i-1})\}$ – среднее арифметическое значение

обрабатываемого сигнала в момент времени t_k , вычисленное на множестве k_a

последовательных отсчетов; $\text{Re}\{\overline{y_{(m,a)}}\} = \sum_{k=1}^{k_a} \text{Re}\{y_{(m,a)}(t_k)\}$ – среднее арифметическое

значение для эталона; m, a – индексы класса эталона и его масштаба

соответственно; k – номер текущего оцифрованного отсчета.

Коэффициенты $r_{(m,a)}^{(\text{Im})}(t_k)$ вычисляются аналогичным образом при замене в (12) функций и индексов «Re» на «Im» (т.е. при использовании мнимых частей последовательностей $x(t_k)$ и $y(t_k)$). На выходе коррелятора формируется вектор данных, характеризующих степень коррелированности входных отсчетов с эталоном в момент времени t_k для каждого из m эталонов при различном индексе масштабирования a . Результат обработки одного уровня масштабирования выражается набором коэффициентов $r_{(m,a)}(t_k)$:

$$r_{(m,a)}(t_k) = r_{(m,a)}^{(\text{Re})}(t_k) + r_{(m,a)}^{(\text{Im})}(t_k) \quad (13)$$

Масштабирование эталона предполагает растяжение или сжатие сигнальной последовательности с последующей аппроксимацией. Так как коэффициенты

откликов коррелятора зависят от степени совпадения эталона с входным сигналом, используемое масштабирование позволяет добиться детализирующего эффекта, подобно принципу вейвлет анализа.

В качестве итогового признака для каждого класса m использовано максимальное значение коэффициента корреляции среди множества всех масштабируемых коэффициентов:

$$r_m = \max_a \{r_{(m,a)}\} \quad (14)$$

Корреляционный отклик для сигналов различных классов имеет вид колоколообразной функции с одним максимумом. Поэтому для классификации образов сигналов при корреляционной обработке необходимо выявить максимумы откликов для каждого класса $m=1, \dots, M$. Поиск точки локального максимума позволяет в каждый момент времени t_k получить значение признака, характеризующее сходство входного сигнала и эталона.

Узел ФНЧ, сглаживает сигнал, устраняя «гребешки». Вершины корреляционного отклика, как правило, состоят из нескольких отсчетов. Лишние отсчеты необходимо удалить, оставив только один локальный максимум (ЛМ).

Пороговое устройство (ПУ) предназначено для проверки результата коррелятора по уровню. Доверительный интервал определен по шкале Чеддока в пределах от 0,6...1 (заметная и сильная связь). Результаты находящиеся ниже порога распознавания – игнорируются. ПУ имеет один и более входов, если существует необходимость объединения нескольких корреляторов. Число выходов ПУ соответствует числу корреляторов. Наличие сигналов на соответствующих выходах ПУ, являются индикаторами откликов корреляторов на входной сигнал, поступающий с радарного датчика.

На рис. 5 поясняются этапы обработки низкочастотного сигнала, регистрируемого АЦП. Смоделированный входной сигнал соответствует поступательному движению руки в пространстве, рис. 5, а).

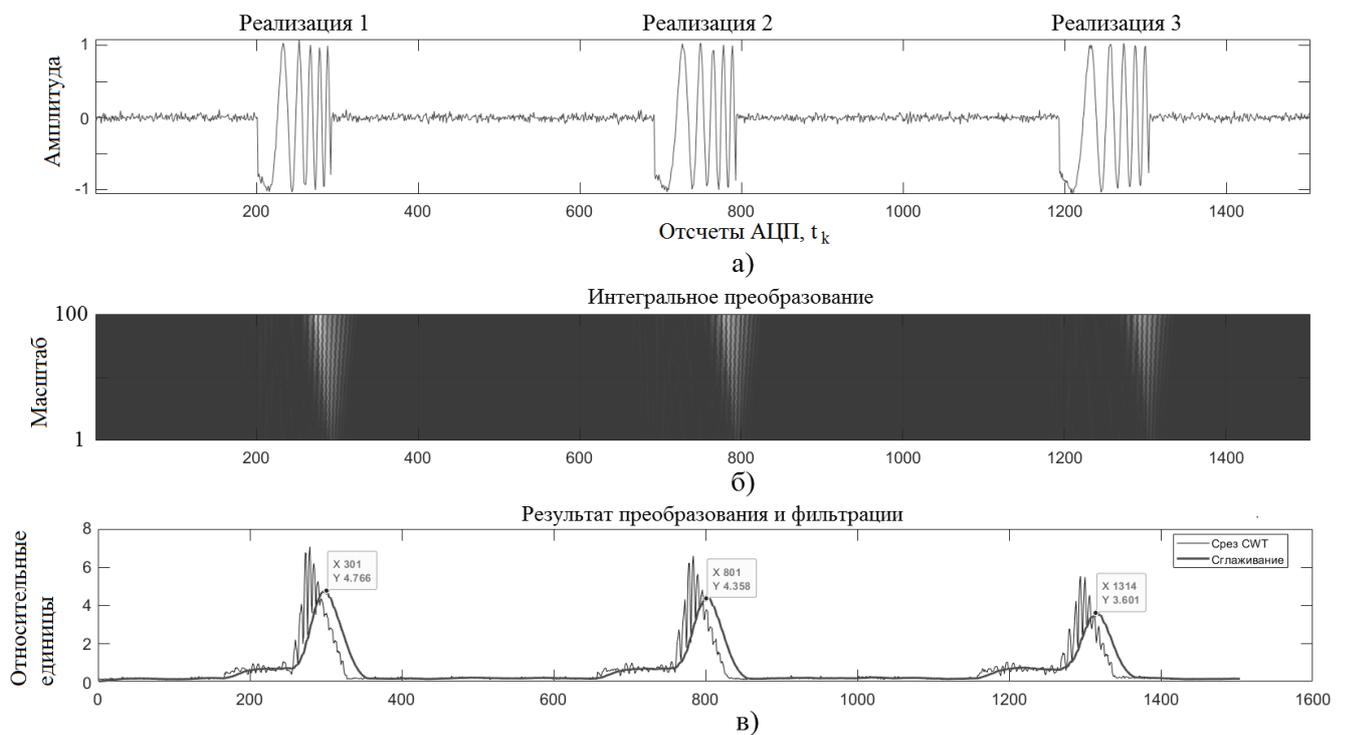


Рис. 5 Эпюры а) входного сигнала; б) результат интегрального преобразование CWT; в) срез CWT по масштабу 500 с обработкой в ФНЧ

За время наблюдения $T = 15$ с, присутствует 3 “условных” движения (реализации), каждое из которых имеет отличную длительность. Первая реализация содержит 100 отсчетов АЦП (или 1 с наблюдения), длительность каждой последующей на 10 точек больше.

На рис. 5, б) изображено разложение входного сигнала в соответствии с интегральным преобразованием CWT, в качестве анализирующего сигнала выбран вейвлет Морле (подробнее в источниках [2-3]).

На рис. 5, в) срез результирующего сигнала «гребешки» сглаживаются ФНЧ. Для каждого пика найден нормируемый локальный максимум корреляции.

На рис. 6 изображена аналогия результата преобразования CWT при использовании собственного многомасштабного коррелятора для анализа входного сигнала.

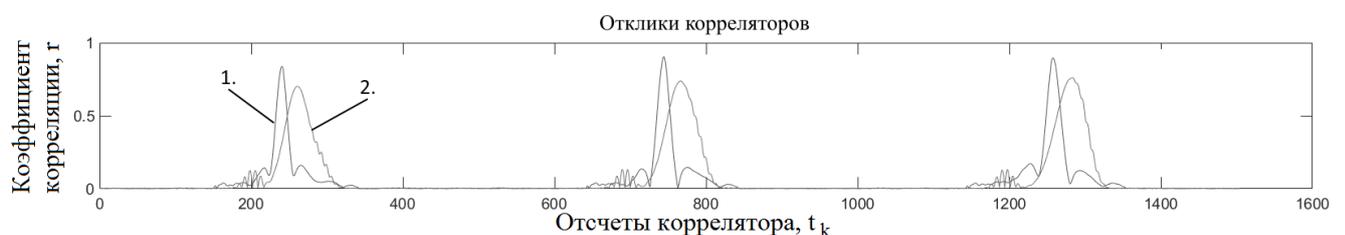


Рис. 6 Сравнение откликов корреляторов на основе 1 – опорного сигнала эталона; 2 – вейвлета Морле

Задача распознавания флуктуирующего низкочастотного сигнала может быть рассмотрена с точки зрения интегральных преобразований. Для алгоритма SWT, характерна обработка в частотной области, анализируемый сигнал, представлен произведением входного сигнала и анализируемого окна. Однако, такой подход предпочтителен при анализе сигнала для временной локализации фазовых скачков и частотных компонент [8]. Классический корреляционный анализ обладает высокой избирательностью. Данная работа объединяет в себе оба метода [9]. Опорный эталонный сигнал (эталон) конструируется из входного сигнала на этапе обучения, а затем масштабируется в растянутые и сжатые копии (аппроксимация МНК), по аналогии с принципом вейвлет преобразования.

В таблице 1. Приведены результаты сравнения двух типов корреляторов. За счет высокой избирательности обработки во временном домене, возросла эффективность коррелятора на основе эталона, выраженная абсолютным корреляционным коэффициентом.

Таблица 1. Сравнение корреляционных коэффициентов

| Разница по длительности между анализируемым сигналом и опорным (эталонном) | Интегральный коррелятор SWT (Морле) | Коррелятор на основе эталона |
|--|-------------------------------------|------------------------------|
| | Корреляция | |
| В случае идентичности | ~0.7 | ~0.9 |
| 10% расхождение | ~0.65 | ~0.85 |
| 20% расхождение | ~0.6 | ~0.85 |

Отклик коррелятора напрямую зависит от опорного сигнала. На рис.7 приведены диаграммы двух корреляторов, классического и многомасштабного, а также срез результата SWT преобразования. Вместо опорной функции вейвлета Морле использована копия сигнала, аналогичная для классического коррелятора. Если опорные сигналы многомасштабного коррелятора аппроксимировать полиномом n-ой степени методом МНК, можно добиться равномерного снижения коэффициента корреляции (уровень 0.6), для каждой реализации, невзирая на разную длительность анализируемого сигнала, но в пределах 20...25%

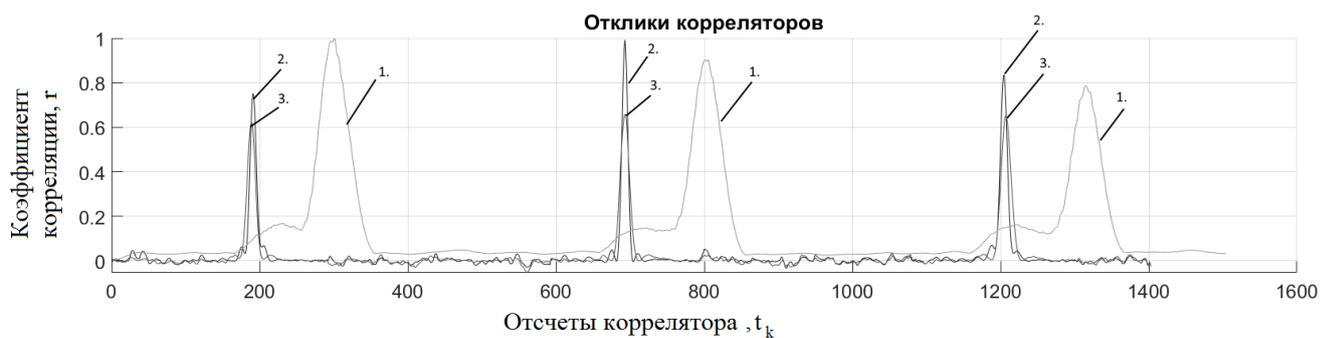


Рис. 7 Отклики коррелятора на входной сигнал.

1 – интегральный коррелятор CWT; 2 – классический коррелятор; 3 – коррелятор с многомасштабным эталоном

Глава 4 посвящена натурному подтверждению работоспособности коррелятора с многомасштабным опорным эталоном, предназначенного для распознавания флуктуирующего сигнала.

Радарный датчик закреплен на высоте не более 1.5 м. Дистанция радиолокационного наблюдения до 5 метров. Движения руки человека описывают траектории жестикуляций, характерные для написания символов алфавита: «а», «б», «в», «г», «д», «е». На рис. 8 изображены сигналы и траектории, характерные для некоторых фигур. Далее определены 6 жестикуляционных фигур («а», «б», «в», «г», «д», «е»), которым соответствуют сигналы, рис 9, а) – б).

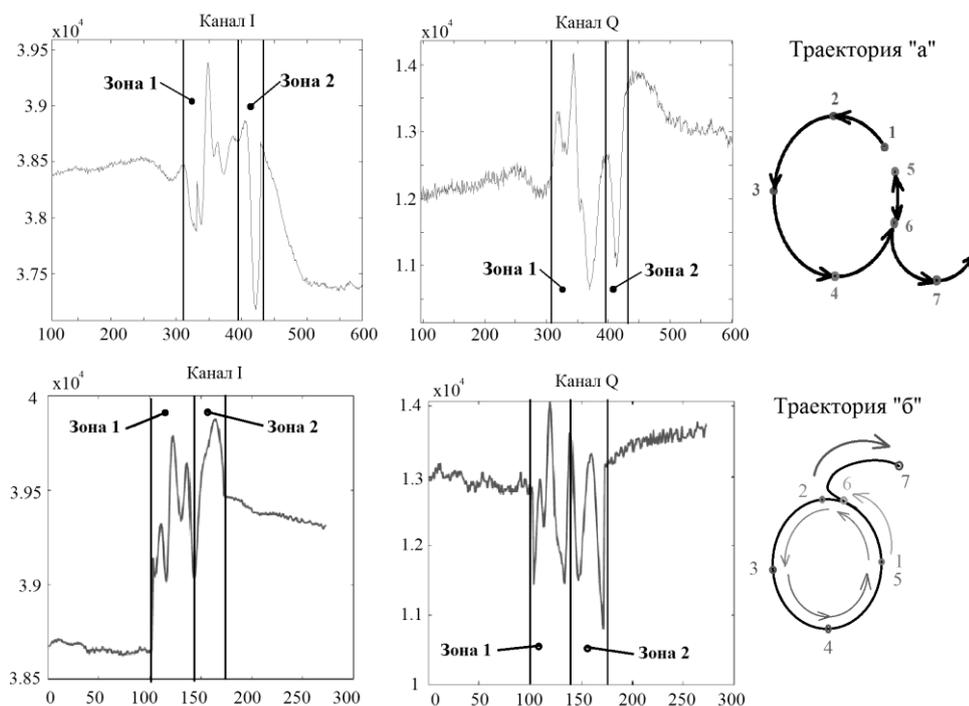


Рис. 8 регистрируемые сигналы для фигур «а», «б», а также их траектории

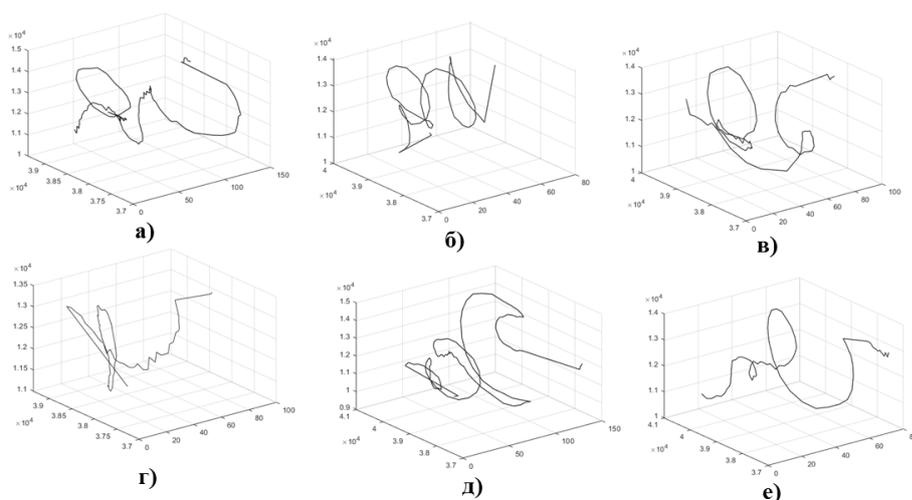


Рис. 9 Регистрируемые АЦП сигналы I/Q-ой квадратуры при наблюдении 6 фигур жестикуляций

Позиция человека и направление жестикуляций выбраны таким образом, что наблюдаемое движение формирует наибольший доплеровский сдвиг частоты регистрируемого сигнала. Средняя скорость жестикуляций 0,1...0,2 м/с. Результат обработки входного сигнала (состоящего из 10 реализаций ложных фигур и 10 реализаций «а») для коррелятора с масштабируемым эталоном «а» представлен на рис. 10. Хорошо видно, что 7 реализаций из 10 превышают заданный порог 0,6.

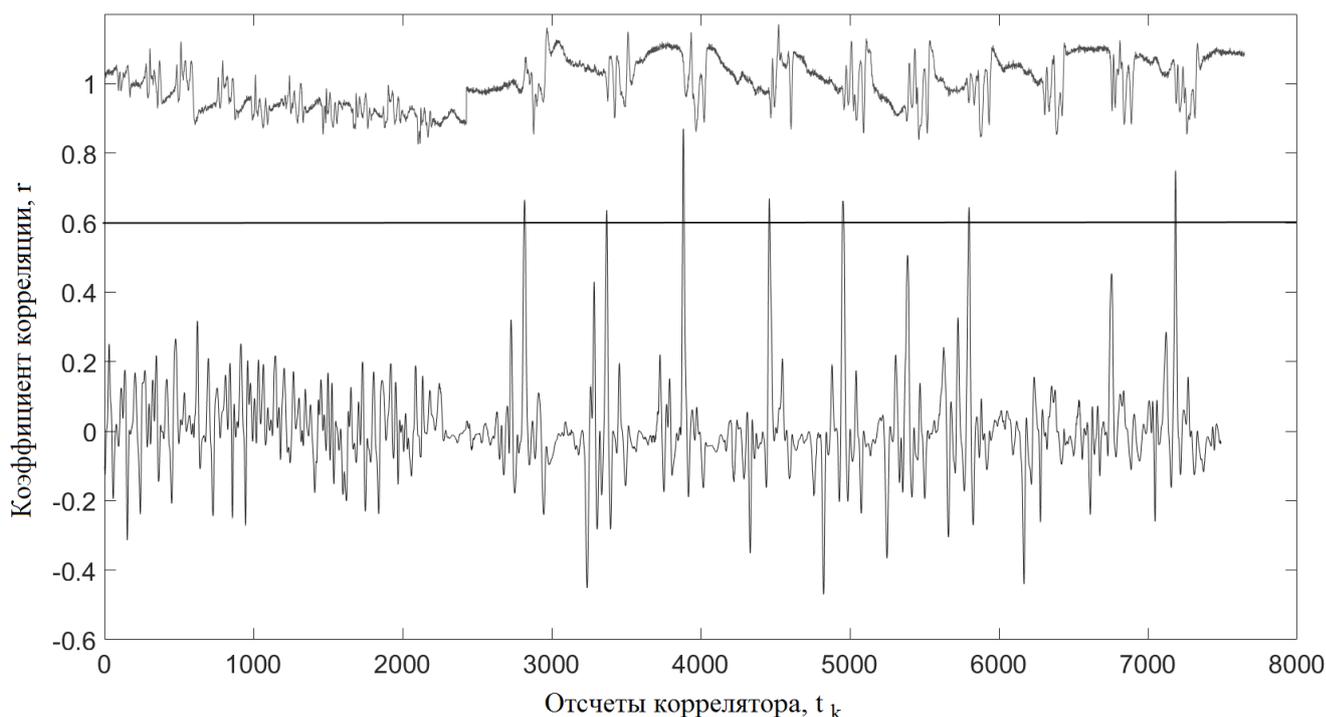


Рис. 10 Верхняя эпюра – входной сигнал; нижняя – отклик коррелятора

Основным показателем распознавания можно считать вероятность обнаружения (распознавания) $p_{обн}$, которая рассчитывается для каждого класса распознавания, таблица 2.

Таблица 2. Вероятностные результаты

| Фигура | Вероятности правильного распознавания, $p_{обн}$ |
|--------|--|
| «а» | 0.77 |
| «б» | 0.82 |
| «в» | 0.75 |
| «г» | 0.87 |
| «д» | 0.76 |
| «е» | 0.84 |
| «з» | 0.74 |

Таким образом, достигается избирательная селекция флуктуирующего сигнала по длительности в сравнении с априорным подобием, т.е. эталоном. Полученные значения вероятностей распознавания характеризуют эффективность метода, ошибка распознавания достаточно мала. При увеличении числа повторений жестикуляций, можно добиться повышения вероятности правильного распознавания [4]. Данные результаты подтверждают состоятельность метода и обосновывают положения, выносимые на защиту.

Заключение

1. В диссертационной работе предложена методика распознавания радиолокационных сигналов, отраженных от человека. Методика предназначена для систем распознавания жестикуляций человека. Практическая значимость подобной системы заключается в решении задач бесконтактного и дистанционного управления бытовыми техническими средствами, беспилотными роверами.

2. Разработанная методика распознавания, используется совместно с устройством СШП радарного датчика. В первой главе описывается путь построения датчика, обоснован выбор зондирующего сигнала и его параметров.

Предложена структурная схема радиолокационного датчика с одной приемопередающей широкополосной антенной.

3. Выполнен сравнительный анализ результатов корреляции, на сигнал с флуктуациями по длительности, для трех моделей корреляторов: классический, многомасштабный, интегральный.

4. Методика распознавания радиолокационного сигнала, основанная на анализе входного сигнала регистрируемого при наблюдении моторики руки человека и эталонного сигнала, позволяет повысить вероятность распознавания на 25%, в сравнении с классическим коррелятором.

5. В пределах дальности зондирования от 1 до 10 метров существуют зоны, в которых, наблюдаемые движения формируют сигнал, отличающийся от сигнала эталона. Это приводит к снижению результата распознавания сигнала. Дополнительные эталоны, сформированные с учетом зон дальности, снижают число ложных срабатываний при распознавании.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России, номера тем FSFF-2020-0015 и FSFF-2023-0005

Основные результаты исследования опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Ашряпов М.И., Охотников Д.А. Корреляционное детектирование доплеровских сигнатур по вейвлетному шаблону // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 10(20). С. 44–53. DOI: 10.18127/j00338486-202010(20)-06.

2. Ашряпов М.И. Методы распознавания микродоплеровских портретов на основе корреляционного вейвлет-анализа // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2022; Журнал Сибирского федерального университета 2022 15 (6). С. 759–767. DOI:10.17516/1999-494X-0434.

3. Ашряпов М.И. Радиолокационное распознавание доплеровских сигналов методом вейвлетно-корреляционного анализа // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2022. Т. 188. № 3. С. 18–24.

4. Ашряпов М.И. Вероятностная оценка распознавания радиолокационных сигналов регистрируемых при наблюдении движений человека // Цифровая обработка сигналов . 2023. №4. С. 68-72.

Статьи и материалы конференций:

5. Охотников Д.А., Ашряпов М.И. Радиолокационное распознавание траектории движения цели // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016.

6. Ашряпов М.И. Охотников Д.А., Поповская В.А. Распознавание движений человека на основе корреляционной обработки и сверхширокополосной радиолокации // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 2 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. 417 с.

7. Ашряпов М.И., Охотников Д.А. Сверхширокополосное радиолокационное распознавание жестикуляций человека на основе вейвлет анализа.: XII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 26-28 ноября 2018 г. С.98

8. Ашряпов М.И. Охотников Д.А. Распознавание сверхширокополосных сигналов, отраженных от вращающихся лопастей коптера // Вестник РАЕН. 2019. № 3. С. 52–56.

9. Ashryapov, M. I. Detection of Doppler Signatures of Complex Shapes Using the Wavelet Correlation Algorithm / M. I. Ashryapov, D. A. Okhotnikov // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings, Moscow, 15–17 марта 2022 года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744085. – EDN IMHRHZ.