

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

Ашряпов М.И., инженер, НПЦ РИМ, МАИ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», e-mail: 3754248124@mail.ru

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF RECOGNITION OF RADAR SIGNALS RECORDED WHEN OBSERVING HUMAN MOVEMENTS

Ashryapov M.I.

A technique for recognizing radar signals recorded when observing human movements using a low-power pulsed radar is presented. The layout of the radar sensor and the principles of generating complex samples of received signals are described. The goal of the work is to develop algorithms for processing radar signals and generating features that allow the recognition of various human hand gestures. The calculation of signal features is based on the calculation of the correlation coefficient when scaling the reference function by duration. Experimental results of assessing the effectiveness of the algorithm in the form of probabilities of correct recognition of various gestures are presented.

Key words: radar sensor, bio-radiolocation, recognition of radar signals, correlation processing, scalable signal.

Ключевые слова: радиолокационный датчик, биорадиолокация, распознавание радиолокационных сигналов, корреляционная обработка, масштабируемый эталон сигнала.

Введение

Современное развитие технологий в области бесконтактного и дистанционного управления бытовой радиоэлектронной аппаратурой достигло существенного прогресса. Новейшие методы управления на основе анализа видеоинформации [1] или обработки звука [2] внедряются не только в бытовые приборы, но и в автомобильные системы, находят применение в управлении беспилотными колесными роверами и во многих других областях человеческой деятельности.

Существующие методы управления техническими объектами не лишены недостатков. К примеру, распространенные системы дистанционного управления с помощью беспроводного пульта становятся бесполезными при его утере. А системы управления на основе распознавания видеоинформации или речевых сигналов могут быть малоэффективны при недостаточном освещении или зашумленности помещений.

В работе предложен альтернативный подход к реализации бесконтактного дистанционного управления, не зависящий от внешних факторов, в котором моторика жестикуляций человека интерпретируется в команды. Для этой цели разработан радиолокационный датчик наблюдения биомеханических характеристик человека: частоты дыхания, сердцебиения, жестов рук и пальцев и др. (рис. 1) [3-5].

Вторичная обработка сигналов радиолокационного датчика связана с возможностью решения задач классификации и распознавания эталонных сигналов, полученных при наблюдении движений человека. Скорость жестикуляций, вид и размах движений влияют на форму сигнала и на конечный результат распознавания. А так-

Представлена методика распознавания радиолокационных сигналов, регистрируемых при наблюдении движений человека с помощью импульсного радара малой мощности излучения. Описан макет радиолокационного датчика и принципы формирования комплексных отсчетов принимаемых сигналов. Целью работы является разработка алгоритмов обработки радиолокационных сигналов и формирования признаков, позволяющих проводить распознавание различных жестов кисти руки человека. В основе вычисления признаков сигнала лежит вычисление коэффициента корреляции при масштабировании эталонной функции по длительности. Приведены экспериментальные результаты оценки эффективности алгоритма в виде вероятностей правильного распознавания различных жестов.

же, большое влияние оказывают флуктуации длительностей сигналов, наблюдаемых при жестикуляциях одного вида (класса). По итогам проведенных испытаний макета датчика выяснено, что изменение длительности входного сигнала в пределах 25 % от среднего значения приводит к существенному снижению вероятности правильного распознавания.



Рис. 1. Сверхширокополосный радиолокационный датчик наблюдения биомеханических характеристик человека

Цель статьи – решение задачи повышения вероятности правильного распознавания сигналов, регистрируемых при наблюдении жестикуляций руки человека, на основе масштабируемых по длительности эталонных сигналов.

Для достижения поставленной цели применяется метод, основанный на корреляционной обработке сигналов. В качестве опорных эталонов используются сигналы с разной длительностью. Процедура изменения длительности эталонных сигналов называется масштабированием.

В статье приведено описание предложенного метода, методика вычисления статистик и принятия окончательных решений. Описаны условия проведения натуральных экспериментов, по результатам которых получены оценки эффективности предложенного метода в виде вероятностей правильного распознавания жестов различного вида (класса). Полученные результаты показали высокую эффективность метода, соответствующую вероятностям правильного распознавания жестов в пределах 0,76...0,87.

Принцип работы радиолокационного датчика.

Модель входного сигнала

В качестве радиолокационного датчика используется импульсный радар малой мощности излучения (не более 0,01 Вт) со следующими параметрами зондирующего сигнала: несущая частота $f_0 = 6,5$ ГГц, длительность импульса $\tau \sim 2$ нс, период повторения импульсов (ППИ) $T_n = 2$ мкс. Зондирующий импульс не имеет внутриимпульсной модуляции, поэтому его комплексная огибающая имеет простой вид:

$$U(t_k) = A_k \exp \left\{ j \left(\frac{2\pi}{\lambda} R(t_k) + \varphi_0 \right) \right\}, \quad (1)$$

$$t_k = (k-1)T_n, \quad k = 1, 2, \dots$$

где A_k – амплитуда сигнала в k -м периоде повторения импульсов; φ_0 – начальная фаза сигнала (случайная величина); $R(t_k)$ – дальность до фазового центра цели (объекта лоцирования) в k -м ППИ; $\lambda = c/f_0$ – длина волны, c – скорость распространения радиоволн.

После приема сигнала, выделения комплексной огибающей и ее оцифровки, можно записать выражение для дискретных отсчетов наблюдений в виде

$$x(t_k) = U(t_k) + \eta(t_k), \quad (2)$$

где $\eta(t_k)$ – пассивные помехи и шумы (комплексные значения). Заметим, что при достаточно большой разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП), различия между дискретными и цифровыми отсчетами при записи наблюдений $x(t_k)$ в (2) можно не учитывать.

Закон фазовой модуляции сигнала $U(t_k)$ определяется функцией $R(t_k)$, которая является определяющей для распознавания различных видов жестов. В класси-

ческой радиолокации линейному движению цели со скоростью V соответствует функция $R(t_k) = V \cdot t_k$. При возвратно-поступательном (или круговом) движении цели с круговой частотой Ω эта функция принимает вид $R(t_k) = \Delta R \sin(\Omega t + \theta)$, где ΔR , θ – размах и начальная фаза колебания.

При распознавании жестов руки человека законы функции $R(t_k)$ являются весьма сложными и не поддаются какому-либо аналитическому описанию. Эти законы можно определить лишь экспериментальным путем, чтобы потом использовать их в качестве эталонов при распознавании аналогичных жестов.

Далее рассмотрим комплексную огибающую сигналов, полученных в ходе натуральных экспериментов при различных видах жестикуляций руки человека. Эти функции представлены на рис. 2, где Фигуры 1...6 соответствуют «написанию» указательным пальцем руки в воздухе шести букв алфавита «а», «б», «в», «г», «д», «е». На рис. 2 по оси абсцисс отложены значения k номеров отсчетов оцифрованного сигнала в двух квадратах.

Как видно из рис. 2, сигнальные функции различных жестов имеют существенные отличия между собой, что и лежит в основе методов распознавания жестов.

Метод распознавания жестов

В основу решения задачи классификации сигнальных функций, имеющих вид, представленный на рис. 2, положен метод корреляционной обработки, который модифицирован с учетом неточного знания длительностей функций различных жестов [6-7]. 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).

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 обра-

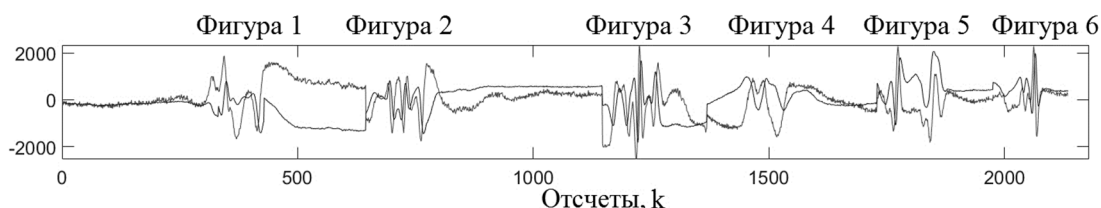
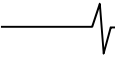


Рис. 2. Диаграммы сигналов двух квадратур



зов, 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 $\mathbf{Y}_{(m,a)} = \{y_{(m,a)}(t_k), k = 1, \dots, k_a\}$. Заметим, что число отсчетов эталона k_a зависит от параметра масштаба a .

$$r_{(m,a)}^{(Re)}(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^{k_a} (\text{Re}\{x(t_{k+i-1})\} - \text{Re}\{\bar{x}(t_k)\})(\text{Re}\{y_{(m,a)}(t_i)\} - \text{Re}\{\bar{y}_{(m,a)}\})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k_a} (\text{Re}\{x(t_{k+i-1})\} - \text{Re}\{\bar{x}(t_k)\})^2 \sum_{i=1}^{k_a} (\text{Re}\{y_{(m,a)}(t_i)\} - \text{Re}\{\bar{y}_{(m,a)}\})^2}}, \quad r \in (-1, 1), \quad (3)$$

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; $\text{Re}\{\bar{y}_{(m,a)}\} = \sum_{k=1}^{k_a} \text{Re}\{y_{(m,a)}(t_k)\}$ – среднее арифметическое значение для эталона; m, a – индексы класса эталона и его масштаба соответственно; k – номер текущего оцифрованного отсчета.

Коэффициенты $r_{(m,a)}^{(Im)}(t_k)$ вычисляются аналогичным образом при замене в (3) 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 $r_{(m,a)}(t_k)$:

$$r_{(m,a)}(t_k) = r_{(m,a)}^{(Re)}(t_k) + r_{(m,a)}^{(Im)}(t_k). \quad (4)$$

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:

$$r_m = \max_a \{r_{(m,a)}\}. \quad (5)$$

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.

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 $\text{Im}\{\}$ части наблюдаемого сигнала:

Описание натурального эксперимента

В ходе проведения натурального эксперимента по распознаванию радиолокационных сигналов, произведена запись входных сигналов, пример реализации которых изображен на рис. 3 а. Эксперимент проводился в следующих условиях. Радиолокационный датчик, закрепленный на штативе, установлен на высоте одного метра от пола. Дистанция зондирования ограничена стробом дальности до 10 метров. Человек находился на расстоянии 2...3 м. Датчик направлен на человека «в профиль», так чтобы частота сигнала Доплера была максимальна. Жестикуляции выполнялись движением руки при вытянутом указательном пальце со скоростью 0,1...0,2 м/с. Жестикуляции описывают фигуры, соответствующие буквам алфавита: «а», «б», «в», «г», «д», «е».

В процессе работы радара были записаны сигналы, регистрируемые при наблюдении жестикуляций различных классов, которые легли в основу эталонов с масштабированием $a \in \{a_1, a_2, a_3\}$ при числе отсчетов $k = (0,9; 1,0; 1,1) \cdot k_a$, где k_a – среднее число отсчетов эталона. Таким образом, использовано три значения масштабного коэффициента для каждого класса m . На каждом шаге эксперимента проводилось повторное воспроизведение жестикуляций заданной последовательности фигур. Регистрируемый входной сигнал обрабатывался коррелятором в соответствии с масштабируемыми эталонами при вычислении статистик r_m ($m = 1, \dots, 6$) (см. (5)), примеры реализаций которых представлены на рис. 3 б-ж.

Как видно из рис. 3 б, для приведенной реализации на интервале отсчетов с номерами 200...400 зарегистрирован отклик (максимум), соответствующий правильному распознаванию фигуры 1. Аналогичные отклики на рис. 3 в, г, д, е, ж свидетельствуют о возможности правильного распознавания фигур 2, 3, 4, 5, 6.

Оценка качества алгоритма распознавания

Оценка качества работы алгоритма сводится к оценке вероятностей правильного распознавания жестов различных классов. Такую оценку можно провести путем вычисления вероятностей превышения статистик r_m заданного порога [8-9]. В силу ограниченности числа экспериментов, проведены выборочные измерения средних значений и дисперсий величин r_m , $m = 1, \dots, M$,

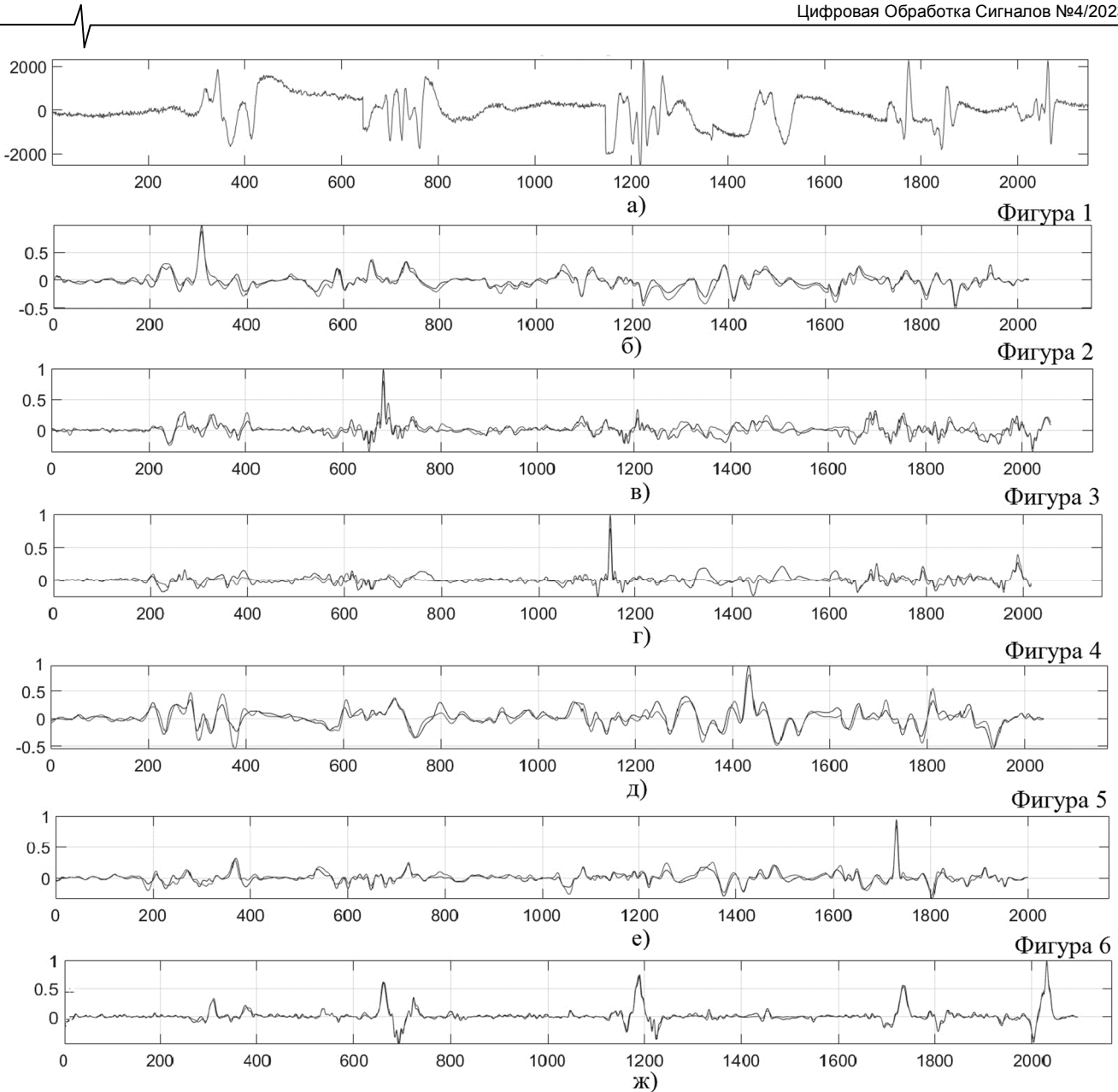


Рис. 3. Временные диаграммы входного сигнала (а) и откликов корреляторов на различные жесты (б, в, г, д, е, ж)

на основе которых получена аппроксимация плотности распределения вероятностей (ПРВ) статистик. В качестве такой аппроксимации использовано обратное нормальное распределение для случайных величин из интервала $[-1, 1]$.

Принятие решения о наличии жеста (сигнала), относящегося к m -у классу, основано на сравнении экстремальной статистики r_m с порогом y_n согласно правилу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Решение: жест класса } m, \\ \text{если } r_m = \max_{v=1, \dots, M} \{r_v(t_k)\} \geq y_n, \end{array} \right. \quad (6)$$

где значение порога y_n выбиралось на основе экспериментальных данных.

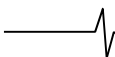
Проведенные эксперименты показали, что наиболее высокая эффективность распознавания (наилучшие вероятности правильного распознавания жестов) достигаются при использовании порога $y_n = 0,2$. Результаты расчетов оценок вероятностей правильного распозна-

ния $p_{пр}$ при проведении серии из 10-и экспериментов для каждого вида жестов, приведены в табл. 1. Расчеты вероятностей были выполнены в программе Matlab, с применением стандартных статистических библиотек [10].

Таблица 1. Экспериментальные оценки вероятностей правильного распознавания фигур жестов (классов)

Фигура	Вероятность $p_{пр}$
«а»	0.77
«б»	0.82
«в»	0.75
«г»	0.87
«д»	0.76
«е»	0.84

Как видно из таблицы, расчетные значения вероятностей правильного распознавания достаточно высоки, они находятся в пределах 0,75...0,87. Тем не менее, ошибка распознавания составляет в среднем 20...30 % на десять повторений. Существенного увеличения веро-



ятности правильного распознавания до значений 0,95 и более, можно добиться путем введения обратной связи при повторении жестов, характеризующихся недостаточной надежностью распознавания (т.е. при малом значении коэффициента корреляции).

Заключение

Работа посвящена теме распознавания радиолокационных сигналов, регистрируемых при наблюдении движений человека, и предназначенная для решения прикладных задач в области бесконтактного дистанционного управления бытовыми приборами.

С целью решения поставленной задачи разработан радиолокационный датчик наблюдения биомеханики человека, способный фиксировать перемещение человека или его отдельных конечностей (жесты), а также микро перемещения, такие как дыхание, сердцебиение и др. Форма комплексной огибающей регистрируемого сигнала при наблюдении движения определяется законом изменения дальности точки отражения, при этом каждой фигуре движения (классу распознавания) соответствует свой уникальный сигнал.

В основу предложенной методики распознавания положен метод корреляционного анализа при использовании набора эталонных сигналов, масштабируемых по длительности. Множество масштабируемых эталонов имеет длительность, которая отличается от среднего значения длительности эталонного сигнала каждого класса не более чем на 25 %.

В ходе проведенного эксперимента получены записи сигналов, зарегистрированных от шести фигур написания букв алфавита. Проведен анализ входного сигнала путем корреляционной обработки при использовании набора масштабируемых эталонов. На основе полученных экспериментальных данных получены оценки вероятностей правильного распознавания (ВПР) различных жестов, при этом среднее значение ВПР составляет значение 0,8.

Работа выполнена в рамках государственного за-

дания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2023-0005.

Литература

1. Коломыцев А.С., Вердиев О.Р. Распознавание жестов на видео. StudNet. 2022. №7. С. 7774–7800.
2. Алексеев И.В., Митрохин М.А. Современные методы распознавания речи для построения голосового интерфейса управления системами специального назначения. Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 2 (50). С. 3–10.
3. Иммореев И.Я., Фесенко М.В. Импульсный сверхширокополосный датчик. Патент на изобретение RU 2369323 С1, 10.10.2009. Заявка № 2008106039/14 от 20.02.2008. [Патент].
4. Иммореев И.Я., Самков С.В., Павлов С.Н. Импульсный сверхширокополосный датчик. Патент на изобретение RU 2321341 С1, 10.04.2008. Заявка № 2006135225/14 от 06.10.2006. [Патент].
5. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радиолокаторы малой дальности для обнаружения и определения параметров живых объектов. Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 1. С. 18.
6. Ашряпов М.И. Радиолокационное распознавание доплеровских сигналов методом вейвлетно-корреляционного анализа. Труды ВНИИЭМ. 2022. Т. 188. №3. С. 18–24.
7. Ашряпов М.И. Методы распознавания микродоплеровских портретов на основе корреляционного вейвлет-анализа. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2022. 15 (6), С. 759–767. DOI:10.17516/1999-494X-0434.
8. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика. Практические работы. Томск: ТУСУР. 2015. 81 с.
9. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика (Современные методы в математике), 2006.
10. Иглин С.П. Теория вероятностей и мат статистика на базе MATLAB. Харьков, 2006. 612 с.

НОВЫЕ КНИГИ

Гаврилов К.Ю., Каменский И.В., Кирдяшкин В.В., Линников О.Н.

Моделирование и обработка радиолокационных сигналов в MATLAB: Учебное пособие. М.: Изд-во Радиотехника, 2020 г. 264 с.: ил.

Рассмотрены методы моделирования радиолокационных сигналов при отражении от сложных целей, принципы моделирования аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов, включающие формирование двумерной матрицы цифровых отсчетов, методы согласованной фильтрации, обнаружения и обработки сигналов в импульсно-доплеровских радиолокационных системах.

Показаны примеры обработки наиболее распространенных видов радиолокационных сигналов – импульсных, с линейной частотной модуляцией и фазо-кодированных сигналов. Приведены программы моделирования и обработки сигналов в среде MATLAB.

Для студентов, аспирантов и инженеров, изучающих и использующих теорию радиолокации и методы моделирования и обработки радиолокационных сигналов. Будет полезна научным работникам и разработчикам радиолокационных систем.

