

В.В. Чапурский

**Избранные задачи
теории
сверхширокополосных
радиолокационных
систем**

3-е издание, исправленное



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 7

УДК 621.396.96

ББК 32.95

Ч-19

Рецензенты:

главный научный сотрудник Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН д-р физ.-мат. наук, проф.

В.Ф. Кравченко;

проф. кафедры «Радиолокация и радионавигация»

Московского авиационного института

(Государственного технического университета), д-р техн. наук

Ю.Г. Сосулин

Чапурский, В.В.

Ч-19 Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем / В.В. Чапурский. – 3-е изд., испр. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 279 [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4643-8

Приведены постановки и решения ряда новых задач теории разрешения и обработки широкополосных и сверхширокополосных сигналов в радиолокационных системах (РЛС). Применительно к классическим РЛС одноканального построения и к пространственно многоканальным РЛС типа ММО получены и исследованы обобщенные функции неопределенности для скалярных и векторных сверхширокополосных зондирующих сигналов различных видов. Рассмотрены видеоимпульсные, многочастотные и шумовые сигналы. Введено понятие обобщенных многочастотных пачечных сигналов, для которых проанализированы равномерные и неравномерные расстановки частот на основе теоретико-числовых распределений по Голумбу и Костасу. Исследованы методы обработки широкополосных и сверхширокополосных сигналов в классических РЛС и в РЛС типа ММО на основе аддитивных и мультипликативных системных сигнальных функций, в том числе при наблюдении подвижных целей на фоне отражений от местных предметов. Изложены основы теории шумовых РЛС и методов обработки шумовых сигналов.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов технических университетов.

УДК 621.396.96

ББК 32.95

© Чапурский В.В., 2012

© Чапурский В.В., 2017,
с исправлениями

© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
2017

ISBN 978-5-7038-4643-8

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Список основных сокращений	8
Введение	10
1. Математические модели и функции неопределенности скалярных сверхширокополосных сигналов	16
1.1. Характеристики широкополосности и виды сверхширокополосных сигналов	16
1.2. Общее определение функции неопределенности сверхширокополосного сигнала по задержке и скорости	19
1.3. Видеоимпульсные сигналы и их функции неопределенности	21
1.3.1. Модели одиночных видеоимпульсных сигналов	21
1.3.2. Пачечные видеоимпульсные сигналы	26
1.4. Многочастотные сверхширокополосные сигналы и их функции неопределенности	30
1.4.1. Моноимпульсный многочастотный сигнал с прямоугольной огибающей импульса	31
1.4.2. Моноимпульсный многочастотный сигнал с прямоугольным спектром частотных компонент	42
1.4.3. Многочастотные СЧМ-сигналы	49
1.5. Функция неопределенности и разрешающая способность сверхширокополосных шумовых сигналов	52
2. Теория разрешения в сверхширокополосных радиолокационных системах типа ММО	59
2.1. Общая характеристика радиолокационных систем типа ММО	59
2.2. Обобщенные функции неопределенности и пространственное разрешение РЛС с видеоимпульсными антенными решетками	64
2.2.1. Модели сигналов в видеоимпульсных РЛС с антенными решетками	64
2.2.2. Обобщенные функции неопределенности для видеоимпульсных РЛС с антенными решетками	68
2.3. Обобщенные функции неопределенности многочастотных РЛС типа ММО	74
2.3.1. Моноимпульсное излучение частотных компонент	74
2.3.2. Последовательное излучение частотных компонент	82
2.4. Анализ обобщенных функций неопределенности многочастотных РЛС типа RIAS	87
2.4.1. Кольцевая передающая антенная решетка и одиночная приемная антенна	91
2.4.2. Кольцевые разреженные передающая и приемная антенные решетки	95

2.4.3. Физическое заполнение апертуры передающей антенной решетки	99
2.5. РЛС малой дальности с кольцевыми антенными решетками	101
3. Теория сигнальной обработки в одноканальных РЛС малой дальности с зондирующими сигналами разных видов	106
3.1. Выделение биометрической информации на основе монохроматического зондирующего сигнала	107
3.2. Выделение периодических микроперемещений объектов при видеоимпульсном сигнале	112
3.3. Обработка СЧМ-сигналов с подавлением отражений от местных предметов	118
3.3.1. Обработка сигналов при постоянной радиальной скорости цели	118
3.3.2. Выделение периодических микроперемещений объектов на фоне помеховых отражений	125
3.4. Анализ алгоритмов обработки СЧМ-сигналов при наличии интерференции	134
4. Аддитивная и мультипликативная обработка сверхширокополосных сигналов в РЛС типа ММО	144
4.1. Алгоритмы обработки при излучении видеоимпульсных сигналов	145
4.2. Алгоритмы обработки при излучении СЧМ-сигналов	153
4.3. Алгоритмы обработки в многочастотных ММО РЛС с подавлением отражений от местных предметов	159
4.3.1. Алгоритмы обработки при моноимпульсном многочастотном сигнале	160
4.3.2. Алгоритмы обработки СЧМ-сигналов	169
4.3.3. Анализ алгоритмов обработки при наличии периодических микроперемещений объектов	172
4.4. Обработка сигналов в многочастотной ММО-радиолокации при наличии интерференции	175
5. Многочастотные сигналы и системы на основе специальных распределений сетки частот	184
5.1. Общая характеристика многочастотных пачечных сигналов	184
5.2. Обобщенные многочастотные сигналы и их анализ для одноканальных РЛС	188
5.2.1. Выражение для функции неопределенности обобщенного многочастотного сигнала	188
5.2.2. Одиночный ММЧ-импульс с распределением частот по линейке Голомба	193
5.2.3. Распределение частот в пачечных ММЧ-сигналах с постоянным шагом и в соответствии с линейкой Голомба	195

5.2.4. Распределение частот в пачке ММЧ-импульсов в соответствии с массивом Костаса и комплексированием массивов Костаса и Голомба	202
5.3. Обобщенные функции неопределенности РЛС типа ММО с перестановкой частот антенных элементов в импульсах пачки	207
5.3.1. Общий случай РЛС типа ММО с пачечным ММЧ-сигналом	207
5.3.2. Случайные перестановки частот	209
5.3.3. Перестановки частот по Костасу	211
6. Радиолокация на основе шумовых зондирующих сигналов	214
6.1. Корреляционные методы обработки сигналов в шумовых РЛС	214
6.2. Модель для оценки отношения сигнал/помеха в шумовой РЛС малой дальности	223
6.3. Спектральный метод измерения дальности и радиальной скорости при шумовом зондирующем сигнале	229
6.4. Эффективность двойного спектрального анализа в шумовой РЛС при действии отражений от местных предметов	235
6.4.1. Межобзорная компенсация отражений	236
6.4.2. Средние выходные эффекты и отношение сигнал/помеха	241
6.4.3. Количественные оценки отношения сигнал/помеха в шумовой РЛС малой дальности	247
6.5. Анализ одноканальной шумовой РЛС с пространственной рециркуляцией сигнала	252
6.5.1. Взаимно корреляционная обработка с опорным шумовым сигналом	253
6.5.2. Обработка рециркулированного сигнала методом ДСА	254
6.5.3. Взаимно корреляционная обработка с опорным рециркулированным сигналом	257
6.6. Шумовая радиолокация на основе антенных решеток с рециркуляцией сигналов	259
6.6.1. Обобщенная функция неопределенности в шумовой ММО РЛС при отсутствии рециркуляции	261
6.6.2. Обобщенная функция неопределенности в шумовой ММО РЛС при рециркуляции	265
6.6.3. Сравнительный анализ шумовых РЛС с линейной передающей антенной решеткой при наличии и отсутствии рециркуляции	267
Литература	273

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкополосные и сверхширокополосные сигналы находят все большее применение в радиолокации, в системах передачи информации и радиосвязи. Это обусловлено высокими показателями их разрешающей способности по дальности, пропускной способности и скрытности излучения, а также открывшимися в последние годы перспективами их новых радиолокационных применений. Впервые сверхширокополосные сигналы в виде коротких наносекундных и пикосекундных импульсов стали использовать в подповерхностной радиолокации, а также в экспериментальной физике. Данным применениям сверхширокополосных импульсов, получившим впоследствии название видеоимпульсных сигналов, посвящено довольно большое число отечественных и зарубежных монографий. Это позволило автору не излагать в предлагаемой монографии сведения по теории, методам применения, обработки и интерпретации сверхширокополосных сигналов в подповерхностной радиолокации, а сосредоточиться на новых и перспективных направлениях в сверхширокополосной радиолокации, относящихся в большей степени к радиолокационному наблюдению воздушных и наземных объектов. Таким задачам в последние годы уделяется значительное внимание вследствие дополнительных возможностей сверхширокополосной радиолокации, к которым, в частности, относятся:

- создание радиолокационных систем в низкочастотных диапазонах излучения с высоким пространственным разрешением для обнаружения воздушных объектов;
- построение пространственно многоканальных радиолокационных систем с неуправляемыми антенными решетками и цифровым электронным обзором пространства;
- создание радиолокаторов малой дальности для обнаружения людей за радиопрозрачными препятствиями (в завалах, за стенами зданий, скрытых растительностью);
- дистанционный мониторинг дыхания и сердцебиения человека и контактный мониторинг функционального состояния сосудистой системы в медицине;
- построение скрытных радиолокационных систем.

Для данных областей актуален ряд задач теории разрешения и обработки сверхширокополосных сигналов, в число которых необходимо включить не только видеоимпульсные сигналы, но и другие виды зондирующих сигналов, которые в узкополосном и умеренно широкополосном вариантах давно использовали при радиолокации

воздушных и наземных объектов. К таким сигналам, в частности, относятся различные виды непрерывных и квазинепрерывных многочастотных и шумовых сигналов, допускающих также и сверхширокополосные варианты применения. Кроме того, наряду с использованием в классических пространственно одноканальных радиолокационных станциях возможно применение сверхширокополосных сигналов и в перспективных пространственно многоканальных радиолокационных системах типа ММО (Multiple Input – Multiple Output). В настоящее время возможности применения принципа ММО в системах радиосвязи, передачи данных и в радиолокации широко исследуются в теоретическом, экспериментальном и практическом плане за рубежом и в нашей стране. Поэтому развитие теории сверхширокополосных радиолокационных аналогов ММО-систем также является актуальной задачей.

В связи с этим в предлагаемой монографии изложены постановки и решения ряда задач теории разрешения и обработки сверхширокополосных сигналов как в классических радиолокаторах, так и в новых пространственно многоканальных радиолокационных системах обнаружения наземных и воздушных объектов. Автор полагает, что представленные в книге материалы привлекут внимание исследователей к современным проблемам сверхширокополосной радиолокации и будут способствовать ее дальнейшему развитию как в теоретической, так и в практической областях.

Решения большинства представленных в монографии задач оригинальны, а некоторые из них обсуждались и решались при участии Б.Г. Свердлова (гл. 5) и В.И. Калинина (разд. 6.4–6.6), которым автор глубоко признателен. Кроме того, автор пользовался научной поддержкой и советами Б.М. Вовшина, вместе с которым он начинал изучение французской радиолокационной системы RIAS. При формировании содержания монографии были учтены полезные рекомендации сотрудников кафедры РЛ-1 МГТУ им. Н.Э. Баумана – проф. В.И. Меркулова, проф. В.Н. Митрохина и доц. Г.П. Слукина. Также автор выражает благодарность рецензентам монографии – проф. В.Ф. Кравченко и проф. Ю.Г. Сосулину, критические замечания которых позволили заметно улучшить изложение.

Автор надеется, что данная монография будет полезной широкому кругу научных работников, аспирантов и студентов старших курсов, занимающихся исследованиями и разработками в области сверхширокополосных радиолокационных сигналов и систем.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АР	– антенная решетка
АС	– антенная система
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БПФ	– быстрое преобразование Фурье
ВИ	– видеоимпульс, видеоимпульсный
ВИ АР	– видеоимпульсная АР
ВИ РЛС	– видеоимпульсная РЛС
ВИС	– видеоимпульсный сигнал
ВКО	– взаимно корреляционная обработка
ВЧП	– высокая частота повторения
ГШ	– генератор шума
ДН	– диаграмма направленности
ДНА	– диаграмма направленности антенны
ДПФ	– дискретное преобразование Фурье
ДСА	– двойной спектральный анализ
ЗС	– зондирующий сигнал
КИС	– короткоимпульсный сигнал
КНИ	– квазинепрерывное излучение
ЛЗ	– линия задержки
ЛЧМ	– линейная частотная модуляция
ММО	– Multiple Input – Multiple Output (множественный вход – множественный выход)
ММЧ	– моноимпульсный многочастотный
МОК	– межобзорная компенсация
МП	– местный предмет
МП РЛС	– многопозиционная РЛС
МС	– монохроматический сигнал
МЧ	– многочастотный
НЧП	– низкая частота повторения
ОЛП	– обзор летного поля
ОМЧ	– обобщенный многочастотный (сигнал)
ОПА	– одиночная приемная антенна
ОФВН	– обобщенная функция взаимной неопределенности
ОФН	– обобщенная функция неопределенности
ПВО	– пространственно-временная обработка
ПМ	– пространственно многоканальная (система)
ПМ РЛС	– пространственно многоканальная РЛС
ПФ	– полосовой фильтр

RIAS	– Radar à Impulsion et Antenne Syntetic
РЛД	– радиолокационный датчик
РЛПЗ	– радиолокатор подповерхностного зондирования
РЛС	– радиолокационная система (станция)
РФ	– режекторный фильтр
СА	– спектральный анализ
СВЧ	– сверхвысокая частота, сверхвысокочастотный
СДЦ	– селекция движущихся целей
ССФ	– системная сигнальная функция
СЧМ	– ступенчатая частотная модуляция
СЧП	– средняя частота повторения
СШП	– сверхширокополосная (система, РЛС)
ФАП	– фазовая автоподстройка частоты
ФАР	– фазированная антенная решетка
ФВН	– функция взаимной неопределенности
ФВЧ	– фильтр верхних частот
ФД	– фазовый детектор
ФИМ	– фазоимпульсная модуляция
ФКМ	– фазокодовая модуляция
ФН	– функция неопределенности
ФНЧ	– фильтр нижних частот
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ШП	– широкополосный (сигнал)
ШРЛС	– шумовая РЛС
ШС	– шумовой сигнал
ЭОП	– эффективная отражающая поверхность
ЭПР	– эффективная поверхность рассеяния

ВВЕДЕНИЕ

Традиционной областью применения сверхширокополосных (СШП) зондирующих сигналов (ЗС) в радиолокации на протяжении последних трех десятилетий XX в. являлась подповерхностная радиолокация [1–3]. При этом в радиолокаторах подповерхностного зондирования (РЛПЗ) преимущественно использовались ЗС в виде коротких импульсов длительностью от долей до единиц наносекунд. Такие ЗС, не имеющие высокочастотного заполнения, относятся к видеоимпульсным сигналам (ВИС). Для ВИС характерен широкий частотный спектр в полосе частот от единиц или десятков мегагерц до нескольких единиц и даже десятков гигагерц. Впервые столь короткие импульсы стали применять в экспериментальной физике [4–6]. В РЛПЗ кроме ВИС могут использоваться СШП ЗС с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ) [2]. Предпринимались также успешные эксперименты по использованию в подповерхностной радиолокации СШП шумовых ЗС [7].

Совершенствование методов применения СШП-сигналов и интерпретации данных подповерхностного зондирования с помощью РЛПЗ продолжается: выходят многочисленные статьи в зарубежных журналах, издаются работы отечественной школы исследователей [8–10], в частности можно отметить недавно вышедшую книгу по подповерхностной радиолокации [3].

В настоящее время известны и могут применяться следующие виды широкополосных (ШП) и СШП радиолокационных ЗС [11–15]:

- простые короткоимпульсные сигналы (КИС) с достаточно высокой пиковой мощностью и спектром частот шириной десятки мегагерц, имеющие высокочастотное заполнение с центральной частотой, лежащей в дециметровом, сантиметровом или миллиметровом диапазонах длин волн;

- импульсные и непрерывные сигналы увеличенной длительности со специальными видами модуляции – ЛЧМ, фазокодовой модуляцией (ФКМ), с высоким разрешением по дальности и сниженной пиковой мощностью;

- ВИС, не имеющие высокочастотного заполнения, со спектром частот в метровом и дециметровом диапазонах длин волн;

- многочастотные сигналы с одновременным или последовательным излучением частотных компонент, широкий спектр которых также может находиться в метровом или дециметровом диапазонах длин волн;

– шумовые сигналы (ШС).

Важным направлением в создании СШП РЛС, предназначенных для измерения двух или трех координат целей, в отличие от классических узкополосных РЛС аналогичного назначения, является применение специальных пространственно многоканальных антенных систем (АС) типа антенных решеток (АР), в общем случае разреженных, с неуправляемыми по фазам приемными и передающими антенными элементами, которые излучают взаимно ортогональные (по времени, спектру или коду) когерентные сигналы. Это позволяет извлекать дальностную, угловую и, следовательно, пространственную информацию о целях без применения в РЛС механического или электронного сканирования луча. Дальность действия и проникающая способность СШП видеоимпульсных пространственно многоканальных (ПМ) РЛС, применяемых для обнаружения людей, вследствие малой средней мощности излучения ограничены расстояниями в единицы – десятки метров при обнаружении через стены и расстояниями до десятков – сотен метров на открытом пространстве [15]. По этим причинам ВИС пока не нашли широкого практического применения как при обнаружении людей в завалах, так и при информационном обеспечении специальных мероприятий. В этом смысле полезной альтернативой ВИС являются непрерывные и квазинепрерывные ШП и СШП многочастотные (МЧ) ЗС. На их основе также возможно создание обзорных двух- и трехкоординатных ПМ РЛС при достижении существенно большего энергетического потенциала и, следовательно, существенно большей дальности обнаружения и большей проникающей способности через препятствия по сравнению с ВИС.

При излучении МЧ-сигналов в РЛС с ПМ АС [16–18] появляется возможность технически простого увеличения потенциала, ширины полосы излучения и, следовательно, разрешающей способности по дальности за счет распределения требуемой общей энергии и полосы частот сигналов по всем пространственно распределенным элементам передающей АР. Приемная часть АС также представляет собой простую АР из пространственно распределенных, электрически не управляемых элементов. Это заметно упрощает построение высокочастотной части передающей и приемной аппаратуры, особенно в случае СШП РЛС. Подобный принцип, впервые предложенный и реализованный на практике во Франции в конце 1980-х годов, получил название RIAS (Radar á Impulsion et Antenne Synthetic) [16]. РЛС с ПМ АС из пространственно распределенных передающих и приемных элементов, подобные РЛС типа RIAS,

образуют в современной радиолокации новый широкий класс ПМ РЛС. Для ПМ РЛС в последние годы в зарубежных научных публикациях стали использовать название ММО Radar [17]. Аббревиатура ММО, заимствованная из области современных систем связи, расшифровывается как Multiple Input – Multiple Output и применяется к системам со многими передающими и многими приемными антенными элементами. Благодаря использованию принципа ММО в системах связи увеличивают пропускную способность и уменьшают влияние интерференционных замираний [19].

Принципиальным отличием ПМ РЛС от известных многопозиционных РЛС (МП РЛС) [20] является излучение когерентных компонент ЗС, ортогональных от одного передающего элемента к другому. Такой принцип излучения в МП РЛС не использовался, поэтому класс ПМ РЛС можно считать более широким, чем класс МП РЛС. В радиолокации использование принципа ММО оказалось продуктивным не только для РЛС средней и большой дальности, но и для СШП РЛС малой дальности, для которых он предопределяет уменьшение габаритов и сложности построения АС, в том числе за счет небольшого числа элементов разреженных АС.

Обработка сигналов в ПМ РЛС типа ММО с ШП или СШП ЗС имеет все особенности пространственно-временной обработки (ПВО) вектора сигналов на выходе приемной ПМ АС. При этом обработка сигналов может не разделяться на пространственную и временную стадии, характеризующиеся в классическом случае функцией неопределенности (ФН) сигналов по задержке и частоте Доплера и диаграммой направленности (ДН) антенны по азимуту и углу места [21]. Поэтому для построения теории разрешения и оценки основных информационных характеристик ПМ РЛС целесообразно использовать многомерную обобщенную функцию неопределенности (ОФН) сигнала для многоканальных систем [21]. ОФН позволяет не только определить разрешающую способность по дальности, скорости и угловым или пространственным координатам, называемым далее вектором параметров, но и оценить уровень подавления мешающих сигналов, имеющих большие относительные расстройки вектора параметров относительно вектора параметров полезного сигнала. В общем случае ОФН зависит от двух многомерных векторов параметров: вектора параметров цели, закодированного в принимаемых отраженных от цели сигнальных компонентах, и вектора опорных параметров, закодированных в совокупности компонент векторного опорного сигнала в системе взаимно корреляционной обработки (ВКО) вектора принимаемых сигналов.

Необходимо учитывать, что ФН в классической узкополосной радиолокации выводится из понятия взаимно корреляционного интеграла между принимаемым и опорным сигналами, одинаковыми по форме и отличающимися только постоянным множителем интенсивности, задержкой и доплеровским сдвигом. Неискаженность формы принимаемого сигнала относительно опорного или ЗС соответствует отсутствию искажений ЗС в элементах тракта, канале распространения и при отражении от цели, что даже в случае относительно узкополосных импульсных сигналов выполняется лишь приближенно. В этом случае ФН выступает только как интегральная характеристика самого ЗС, позволяющая оценить его потенциальную разрешающую способность. Отсутствие искажений в канале распространения и при отражении от цели соответствует отсутствию или малой дисперсии (частотной зависимости коэффициента передачи), например, атмосферного канала распространения, а также точечной модели цели. В общем случае наличия дисперсии и протяженного характера цели принимаемый СШП-сигнал претерпевает определенные линейные искажения относительно ЗС и классическая ФН уже не позволяет получить точные результаты по разрешающей способности и уровню боковых лепестков в системе корреляционной обработки сигнала. Поэтому для оценки реальной разрешающей способности ШП- и СШП-сигналов в данном случае следует использовать функцию взаимной неопределенности (ФВН) принимаемого и опорного сигналов, а в качестве полезного можно выбрать сигнал, отличающийся по форме от ЗС. Это фактически и осуществляется в РЛПЗ с ВИС при использовании стробоскопического метода обработки, математически соответствующего взаимной корреляции искаженного по форме принимаемого ВИС с задержанной δ -функцией. Известно также, что РЛПЗ с СШП ЛЧМ и СЧМ ЗС также могут успешно работать при зондировании объектов на небольших глубинах залегания в средах с дисперсией [1, 2].

При обнаружении наземных и воздушных объектов в СШП-радиолокации дисперсией в атмосфере можно пренебречь, особенно в низкочастотных (метровом и дециметровом) диапазонах длин волн, а протяженную цель можно заменить совокупностью разрешаемых по задержкам блестящих точек. В связи с этим применение ФН и ОФН в классическом понимании можно считать вполне оправданным, по крайней мере для предварительного сопоставления различных вариантов построения РЛС или ПМ РЛС с СШП ЗС в одинаковых условиях – при отсутствии дисперсии в канале

распространения и использовании модели цели в виде совокупности точечных отражателей.

На протяжении последних десятилетий опубликовано большое число научно-технических статей и монографий, в которых освещаются и разрабатываются вопросы теории и практики применения СШП-радиосигналов. Первая монография по проблематике СШП радиолокационных измерений и сигналов вышла в России более 20 лет назад [22]. Имеются также изданные в достаточном количестве зарубежные монографии по применению ШП- и СШП-сигналов в радиолокации и связи. В классической монографии [12] в основном рассматриваются различные виды ШП РЛС с высокой разрешающей способностью. Наиболее широко теория и приложения СШП радиолокационных сигналов представлены в работах [23, 24]. Однако эти работы не переводились на русский язык, отражают состояние вопроса на уровне более чем десятилетней давности и не содержат имевшихся в то время, а также последних результатов и обобщений в теории классических одноканальных РЛС и ПМ РЛС при разных видах СШП зондирующих сигналов. Фактически большая часть современных зарубежных монографий по СШП-тематике посвящена только СШП-системам связи и передачи информации. Число отечественных научных изданий по теории и применению СШП-сигналов, изданных в последние годы центральными российскими издательствами, невелико [25–28]. Имеются также внутренние издания технических университетов (см., например, монографии [29–31]).

В доступных российскому читателю отечественных научных изданиях не нашли отражения многие вопросы теории разрешения и обработки сигналов в СШП РЛС. Так, не изложены основы теории пространственного разрешения, отсутствуют общие определения и результаты анализа ФН по задержке и скорости для СШП видеоимпульсных и многочастотных ЗС. Для СШП ПМ РЛС (типа ММО) также возможно определение ОФН и разрешающей способности, в частности по пространственным координатам и скорости, что было отражено в работах автора, опубликованных в ряде периодических научных изданий, и в докладах на научных конференциях. Не исследованы методы обработки СШП радиолокационных сигналов в подобных системах. Поскольку в ПМ РЛС типа ММО используют цифровое накопление и цифровой обзор пространства в системе обработки векторных сигналов без какого-либо электронного управления фазами элементов многоэлементной АС, постольку существенный интерес для практических приложений представляют методы

обработки ШП- и СШП-сигналов в ММО-радиолокации на основе статистик в виде суммы или произведения обратных проекций. В разработку этих методов применительно к СШП РЛС с различными видами ЗС также внесен вклад автора данной монографии. Существенную часть теории ШП и СШП РЛС в монографии составляют методы селекции подвижных целей на фоне неподвижных местных предметов (МП), в том числе с учетом интерференционных перетражений полезных сигналов сосредоточенными МП и отражающими поверхностями.

В качестве СШП ЗС можно использовать также случайные ШС, в том числе ЗС, порождаемые генераторами хаотических колебаний [32, 33]. Несмотря на значительное число работ по активной шумовой радиолокации, опубликованных на протяжении большого периода времени в научно-технических журналах (см., например, [13, 32–34]), теория определения отношения сигнал/помеха в шумовых РЛС оставалась незавершенной. Так, при действии отражений от МП и проникающих сигналов передатчика не анализировались детально и не сопоставлялись между собой два основных метода обработки ШС в РЛС на основе методов взаимно корреляционной и двойной спектральной обработки. Не рассматривались также наиболее сложные задачи теории шумовой радиолокации на основе метода рециркуляции сигналов в пространственном кольце обратной связи РЛС – цель – РЛС, в том числе при построении РЛС на принципах системы ММО.

В предлагаемой монографии освещены все перечисленные задачи теории СШП радиолокационных сигналов и систем. Значительная часть теоретических исследований автора оригинальна. Они были впервые опубликованы в различных научных изданиях, а тематика этих публикаций объединена общей проблемой применения СШП-сигналов в перспективных РЛС. Материалы, изложенные в монографии, можно считать введением в теорию разрешения и обработки СШП-сигналов в классических пространственно одноканальных РЛС и в новых ПМ РЛС типа ММО. Рассмотренные задачи имеют разную степень общности, а результаты их решения – различную степень завершенности, что для многих представленных задач допускает их дальнейшее развитие.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СКАЛЯРНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В данной главе рассмотрены ШП- и СШП-сигналы различных видов, используемые в основном в системах радиолокации и радиосвязи. Это не исключает применения предлагаемых математических моделей сигналов и полученных на их основе ФН в акустических и гидроакустических приложениях с учетом отличия скорости распространения волн, длительности, формы и ширины спектра соответствующих колебаний. Общим для анализируемых сигналов является их одномерный или скалярный характер в отличие от многомерных или векторных сигналов, характерных для ПМ-систем излучения и приема сигналов, а также для ансамблей ортогональных сигналов в локации и связи, которые допускают адекватное векторное описание. Скалярный характер сигналов не исключает их комплексного описания, которое удобно не только для узкополосных или умеренно ШП-колебаний, но и для СШП-сигналов, имеющих вид квазигармонических колебаний с небольшим числом периодов.

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ И ВИДЫ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим возможные критерии для классификации сигналов по степени широкополосности. Широкополосность одномерных сигналов часто определяют через условные нижнюю f_n , верхнюю f_b граничные частоты и среднюю частоту $f_{cp} = (f_b + f_n)/2$ их спектра с помощью интуитивно понятного и широко применяемого в теории и на практике параметра относительной широкополосности спектра сигнала [22]:

$$\eta = \frac{f_b - f_n}{f_{cp}} = 2 \frac{f_b - f_n}{f_b + f_n}. \quad (1.1)$$

В соответствии с данным критерием сигналы можно условно считать узкополосными при $\eta \leq 3\%$, широкополосными при $3\% \leq \eta \leq 10\%$ и сверхширокополосными при $\eta > 10\%$ [35]. Используют также и другие определения показателя широкополосности

2. ТЕОРИЯ РАЗРЕШЕНИЯ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ТИПА МІМО

2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ТИПА МІМО

Как отмечалось выше, ПМ РЛС типа МІМО позволяют осуществлять пространственное разрешение и селекцию целей на основе излучения и приема ансамблей когерентных пространственно-временных сигналов при использовании пространственно многоканальных АС, состоящих из некоторого числа в общем случае произвольно расположенных излучающих и приемных элементов при излучении передающими элементами сигналов, взаимно ортогональных от элемента к элементу. Такая ортогональность может достигаться за счет ортогональности по времени, спектральному составу или частоте, а также кодовому разделению сигналов. Принципы работы ПМ РЛС типа МІМО применимы не только в радиолокации, но и в гидроакустике, где их техническое воплощение может быть более простым вследствие использования более низких частот акустического диапазона. В данных системах наиболее естественным образом могут использоваться ансамбли когерентных СШП ЗС. Это обусловлено возможностью разделения общей СШП-полосы излучения ортогональных компонент ЗС между отдельными передающими элементами АС. В частности, использование ММЧ-сигналов обеспечивает возможность создания СШП ПМ РЛС, работающих в низкочастотных диапазонах волн с высоким пространственным разрешением и широкой областью разнообразных практических применений, отмеченных во введении. Уже упоминавшимся примером ПМ РЛС типа МІМО с ММЧ ЗС является РЛС дальнего обнаружения RIAS [48, 16].

Для теории и практических приложений радиолокации несомненный интерес представляют анализ и сопоставление разрешающей способности и селективности различных видов СШП-сигналов и конфигураций АС в РЛС типа МІМО с единых теоретических позиций, основанных на получении и вычислении ОФН по пространственным координатам или по пространственным координатам и скорости. Анализ ОФН позволяет исследовать и сопоставлять не только разрешающую способность, но и уровень боковых лепестков, а также возможную неоднозначность и неопределенность измерений отдельных координат на основе исследования одномерных

3. ТЕОРИЯ СИГНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ В ОДНОКАНАЛЬНЫХ РЛС МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ С ЗОНДИРУЮЩИМИ СИГНАЛАМИ РАЗНЫХ ВИДОВ

В данной главе рассмотрены основные задачи обработки сигналов в простых радиолокационных устройствах малой дальности с импульсным и непрерывным ЗС. При импульсном излучении пространственно одноканальная РЛС содержит одну приемопередающую антенну при осуществлении временной развязки «прием – передача». В случае непрерывного излучения может использоваться пространственная развязка «прием – передача» при применении раздельных передающей и приемной апертур, разнесенных в пространстве, или же общая апертурная антенна со специальными облучателями, имеющими пространственную и поляризационную развязку. Наиболее простым способом управления направлением излучения таких антенн является механический поворот самой антенны. Возможен также вариант пространственно одноканальной РЛС на основе фазированных АР (ФАР) при электронном управлении направлением излучения. Однако и в том и в другом варианте управления антенны имеют один вход на передачу и один выход на прием. С одноканальными входом и выходом антенн связаны одноканальные передатчик и приемник, и это обстоятельство является ключевым при использовании понятия пространственно одноканальной РЛС.

Наиболее простым примером одноканальной РЛС является радиолокационный датчик (РЛД) с узкополосным, например, монохроматическим, сигналом (МС), реагирующий на изменение фазы в принимаемом сигнале, отраженном объектом, дальность до которого изменяется за время наблюдения тем или иным образом в соответствии с перемещениями объекта. Одним из применений РЛД с МС были первые устройства для радиолокационной регистрации малых перемещений человека за радиопрозрачными препятствиями, в том числе микроперемещений, обусловленных колебаниями участков поверхности тела в такт дыханию и сердцебиению [64]. Недостатком РЛД с МС является невозможность селекции целей по дальности, которая присуща модулированным, импульсным сигналам, а также СШП ВИС. Свойством селекции по дальности обладают также многочастотные ШП и СШП ММЧ- и СЧМ-сигналы. Все виды сигналов с селекцией по дальности рассмотрены в гл. 1 при определении потенциальных характеристик разрешения по дальности

4. АДДИТИВНАЯ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ ОБРАБОТКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В РЛС ТИПА МІМО

При излучении ансамблей ортогональных сигналов неуправляемыми передающими элементами АС принимаемые также неуправляемыми приемными элементами АС сигналы обрабатываются в ПМ РЛС типа МІМО в цифровой форме в специализированном цифровом процессоре на основе методов и алгоритмов ПВО векторных сигналов. При этом обзор пространства осуществляется также в цифровой форме без применения механического или электронного сканирования диаграмм направленности. Традиционным методом ПВО в случае неподвижных целей является вычисление достаточной статистики в виде обобщенного корреляционного интеграла [21] принимаемого векторного сигнала с ожидаемым или опорным вектором сигналов, соответствующих расположению цели в некоторой текущей или опорной точке пространства, характеризуемой вектором \vec{r}_0 . Такой алгоритм совпадает с известной статистикой в виде суммы обратных проекций, рассмотренной, например, в работе [54]. Фактически при обобщенной корреляционной обработке принимаемого векторного сигнала с опорным векторным сигналом, сформированным для опорной точки пространства \vec{r}_0 , эта точка пространства как бы проецируется на ССФ, которая является нормированным модулем обобщенного корреляционного интеграла. Когда опорная точка \vec{r}_0 проходит всю пространственную зону наблюдения, происходит построение ССФ во всей этой зоне, в том числе и вблизи заранее не известных точек $\vec{r}^{(p)}$, в которых расположены цели. В этих точках возникают максимумы ССФ, благодаря чему и происходит отображение положения целей, т. е. радиолокационной обстановки. При большем числе антенных элементов происходит и большее когерентное накопление, эквивалентное увеличению коэффициента усиления АС, и снижается уровень боковых лепестков ССФ по пространственным координатам.

В ряде случаев, например для локационных систем малой дальности, увеличение потенциала, в том числе за счет увеличения пространственного накопления, не столь актуально. Однако возникает требование простоты технической реализации, что сопряжено с уменьшением числа элементов АС и увеличением расстояния между ними при сопутствующем появлении дифракционных максимумов. Эти дифракционные максимумы можно частично подавить путем применения СШП ЗС, но все же они являются достаточно

5. МНОГОЧАСТОТНЫЕ СИГНАЛЫ И СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЕТКИ ЧАСТОТ

В классических импульсных узкополосных РЛС при обзоре пространства узким лучом ДНА в каждом угловом направлении излучается конечное число импульсов (в простейшем случае с постоянным периодом повторения), называемое пачкой импульсов или пачечным ЗС. В отличие от одиночного импульса обработка пачки импульсов, отраженных от цели, позволяет увеличить выходное отношение сигнал/шум, а также реализовать доплеровские методы обнаружения движущихся целей на фоне пассивных помех и МП. При этом для определения разрешающей способности и селективности пачки ЗС вычисляют двумерную ФН пачки по задержке и частоте Доплера.

Для РЛС с ШП и СШП многочастотными импульсными сигналами также актуально использование излучения пачек МЧ ЗС и определение их характеристик на основе вычисления ОФН. В равной степени это относится и к ПМ РЛС типа ММО. В связи с этим в данной главе рассмотрен новый широкий класс пачечных обобщенных многочастотных (ОМЧ) сигналов. Получены и сопоставлены ФН различных видов таких сигналов при использовании классической равномерной сетки частот и оптимальных в теоретико-числовом смысле неравномерных частотных распределений с применением линеек Голомба и массивов Костаса, основанных на теории полей Галуа простых чисел. Для ПМ РЛС проведено сопоставление регулярных и случайных распределений частот по передающим элементам АС с распределением частот в соответствии с перестановками Костаса.

5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОЧАСТОТНЫХ ПАЧЕЧНЫХ СИГНАЛОВ

В предыдущих главах изучались ШП и СШП многочастотные радиолокационные ЗС с взаимно ортогональными частотными компонентами, к которым прежде всего относятся ММЧ-сигналы и сигналы с СЧМ. Частотные компоненты ММЧ ЗС излучаются одновременно в пределах одного радиоимпульса. Эти компоненты, как правило, ортогональны по спектру (частоте) при излучении каждого одиночного импульса. При излучении пачки сигналов, состоящей из

6. РАДИОЛОКАЦИЯ НА ОСНОВЕ ШУМОВЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

В течение одного-двух последних десятилетий XX в. интерес к методам шумовой радиолокации [13, 46, 47, 87–89] оставался достаточно высоким, что обусловлено существенным прогрессом в теории и технике формирования СШП ШС и актуальностью разработки СШП РЛС для различных практических применений [27]. Вместе с тем необходимо отметить, что в теории использования ШС в радиолокации было еще много пробелов. Например, отсутствовало систематизированное изложение корреляционных методов обработки ШС при измерении дальности и скорости целей; не были полностью решены вопросы теории разрешения и обработки ШС, в частности при спектральном методе приема СШП ШС; отсутствовали методики расчета и оценки влияния проникающего сигнала передатчика и отражений от МП при использовании шумовых ЗС, а также не освещались вопросы, связанные с пространственно многоканальными шумовыми РЛС (ШРЛС). Поэтому целью этой главы является изложение решения актуальных задач теории и расчета ШРЛС, не нашедших ранее отражения в научно-технических изданиях по ШП- и СШП-радиолокации.

В ШРЛС возможно использование двух методов обработки принимаемых сигналов и выделения традиционных радиолокационных параметров целей – задержки и доплеровского сдвига: взаимно корреляционной обработки (ВКО) и двойного спектрального анализа (ДСА) [32, 34]. Эти методы различаются как принципами обработки, так и практической реализацией, кроме того, имеются дополнительные различия при использовании ШП или СШП ШС, связанные с измерением радиальной скорости движения целей.

6.1. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ШУМОВЫХ РЛС

Для пояснения основных принципов работы ШРЛС с ВКО сигналов рассмотрим упрощенную функциональную схему ШРЛС, приведенную на рис. 6.1, где ГШ – генератор шума; НО – направленный ответвитель; A_1 , A_2 – передающая и приемная антенны; ЛЗ – линия задержки на время τ_d ; τ_{Π} – задержка проникающего сигнала. Двухканальный коррелятор содержит синфазный и квад-

ЛИТЕРАТУРА

1. Подповерхностная радиолокация / под ред. М.И. Финкельштейна. М.: Радио и связь, 1994.
2. *Daniels D.J.* Surface-Penetrating Radar. London, IEE Publishing, 1996.
3. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005.
4. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
5. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / под ред. Г.В. Глебовича. М.: Радио и связь, 1984.
6. *Мелешко Е.А.* Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. *Narayanan R.M., Henning J.A, Dawood M.* Enhanced detection of objects obscured by dispersive media using tailored noise waveforms // Part of SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies For Mines and Minelike Targets III. Orlando, Florida, USA, April 1998. SPIE. Vol. 3392. P. 604–614.
8. Обработка сигналов и изображений в импульсном радиолокаторе подповерхностного зондирования / О.Н. Линников, Ю.Г. Сосулин, Б.Б. Толмазов и др. // Радиотехника и электроника. 2004. № 7. С. 824–839.
9. Метод интерпретации данных радиолокаторов подповерхностного зондирования / Б.А. Юфряков, Б.С. Суриков, Ю.Г. Сосулин и др. // Радиотехника и электроника. 2004. № 12. С. 1436–1451.
10. Радиointроскоп / А.Н. Андрюхин, О.Н. Линников, Ю.Г. Сосулин и др. // Пат. РФ на изобретение 2256904. Оpubл. 20.07.2005. Бюл. 20.
11. *Скосярев В.Н., Осипов М.Л.* Особенности и свойства короткоимпульсной радиолокации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. «Радиоэлектроника». 1999. № 4.
12. *Wehner D.R.* High Resolution Radar. London, UK, Artech House, 1987.
13. *Lukin K.A.* Noise radar Technology for short range applications // Proc. of Intern. Conf. on Radar Systems. May 17–21 1999. Brest, France.
14. *Чанурский В.В.* Функции неопределенности СШП многочастотных сигналов // Тр. конф. «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике». Суздаль. 27–29 сентября 2005. С. 21–25.
15. Широкополосные и сверхширокополосные сигналы и системы // Сб. статей / под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2009.
16. *Dorey G., Garnier G., Auvray G.* RIAS, radar a impulsion et antenne syntetique. Colloque International sur le Radar. Paris, April, 1989. P. 556–562.
17. *Rabideau D.J., Parker P.A.* Ubiquitous MIMO Multifunction Digital Array Radar and the Role of Time-Energy Management in Radar. Project Report Dar-4. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, March 2004.

18. *Чапурский В.В.* Обработка сигналов в многочастотных радиолокационных системах с антеннами из пространственно распределенных передающих и приемных элементов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. Вып. 3 (72). С. 69–79.
19. Outdoor MIMO wireless channels: Models and performance prediction / Gesbert F., Bolcskei H., Gore D.A., Paulary A.J. // IEEE Trans. on Commun. 2002. Vol. 50; No. 12.
20. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993.
21. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
22. *Астанин Л.Ю., Костылев А.А.* Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989.
23. Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems / Edited by James D. Taylor. CRC Press, 1994.
24. Ultra-Wideband Radar Technology / Edition by James D. Taylor. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., CRC Press, 2000.
25. *Кольцов Ю.В.* Методы и средства анализа и формирования сверхширокополосных сигналов. М.: Радиотехника, 2004.
26. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
27. *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
28. *Радзиевский А.Г., Трифонов П.А.* Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009.
29. *Косичкина Т.И., Сидорова Т.В., Сперанский В.С.* Сверхширокополосные системы телекоммуникаций. М.: МТУСИ, 2008.
30. *Нахмансон Г.С.* Обработка широкополосных сигналов в многопозиционных измерительных системах. Воронеж: ВАИУ, 2008.
31. *Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф.* Сверхширокополосные сигналы и процессы. Харьков: Харьковский нац. ун-т им. В.Н. Каразина, 2009.
32. *Poirier J.L.* Quasi-monochromatic scattering and some possible radar applications // Radio Science. 1968. Vol. 3. P. 881–886. (Русский перевод: За рубежомная радиоэлектроника. 1969. № 7.)
33. Широкополосная и сверхширокополосная шумовая радиолокация // Тр. Всерос. науч. конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» / Н.Н. Залогин, В.И. Калинин, Е.А. Мясин и др. Муром. 2003. С. 492–497.
34. Wideband Random Noise Short Range Radar with Correlation Processing for Detection of Slow moving Objects behind the Obstacles: Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar / V.V. Chapursky, V.N. Sablin, V.I. Kalinin, I.A. Vasilyev. Delft, Netherlands, June 21–24 2004. P. 199–202.

35. *Вовшин Б.М.* Сверхширокополосные радиолокационные системы. Новый подход к принципам построения // Тр. Юбилейной НТК, посвященной 30-летию образования ЦНИИРЭС. Ч. 1. Москва. 12–14 сентября. 2001. С. 139–149.
36. *Зайцев Д.Ф.* Применение фотоники в активных ФАР // Антенны. 2003. Вып. 5 (72). С. 34–40.
37. *Бахрах Л.Д., Зайцев Д.Ф.* Сверхширокополосная волоконно-оптическая разводка СВЧ-сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2003. Вып. 5 (72). С. 3–6.
38. *Вовшин Б.М., Свердлов Б.Г.* Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных радиолокационных систем с ортогональными зондирующими сигналами // Тр. Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2002. Харьков. 8–10 октября 2002. С. 62–64.
39. Analysis and Experimental Results on Sparse-array Synthetic Impulse and aperture Radar // Chen Baixiao, Zhang Shouhong, Wang Yajun, Wang Jun. Proceedings of International Radar Conference. Beijing. China. October 2001. P. 76–80.
40. *Дмитриев А.С., Кислов В.В.* Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989.
41. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970.
42. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника. Т. 1. М.: Сов. радио, 1976.
43. *Вовшин Б.М., Жаворонко О.А.* Многомерные функции неопределенности сверхширокополосных видеоимпульсных сигналов в радиолокационной системе с синтезированной апертурой // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44; № 12. С. 1487–1495.
44. *Евсиков Ю.А., Чапурский В.В.* Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. М.: Высш. шк. 1977.
45. *Скосырев В.Н.* Особенности и свойства сверхкороткоимпульсной локации // Сверхширокополосные системы в радиолокации и связи: концепты лекций. Муром: Муромский институт Владимирского государственного университета, 2003.
46. *Чапурский В.В.* Функция неопределенности СШП шумового сигнала // Тр. конф. «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике». Суздаль. 27–29 сентября 2005. С. 25–29.
47. *Калинин В.И., Чапурский В.В.* Эффективность двойного спектрального анализа в шумовой радиолокации при действии отражений от местных предметов // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51; № 3. С. 303–313.
48. The last decades and the future of low frequency radar cjnsepts in France // J.P. Eglizeaud, G. Auffray e. a. International Conference on Radar Systems- RADAR 2004. 18–22 October 2004. Toulouse, France.

49. Through Wall Radar Vision. Time Domain Corp. USA // www.radarvision.com
50. Barnes M.A., Nag S., Payment T. Covert Situational Awareness With Handheld Ultra-Wideband Short Pulse Radar // Proceedings of SPIE. Vol. 4374 (2001).
51. www.cambridgeconsultants.com/icp_throughwallradar.shtml
52. Вовшин Б.М. Сверхширокополосная видеоимпульсная система с синтезированной апертурой для параллельного обзора пространства // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44; № 12. С. 1479–1486.
53. Курикса А.А. Об обратной задаче восстановления распределения источников сигналов в полупространстве по наблюдениям сигналов на поверхности // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45; № 6. С. 717–721.
54. Курикса А.А. Алгоритм обратной проекции в задачах восстановления пространственного распределения источников волн // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47; № 12. С. 1484–1489.
55. Черняк В.С. Оптимизация обнаружения неподвижных людей под завалами строительных конструкций // Сб. статей «Широкополосные и сверхширокополосные сигналы и системы» / под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2009. С. 58–72.
56. Устройства для обнаружения и мониторинга живых и движущихся объектов с использованием короткоимпульсных сверхширокополосных зондирующих сигналов / А.В. Андриянов, М.В. Пугин, Г.С. Икрамов, А.А. Рябинкин // Сб. статей под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2009. С. 73–82.
57. Вовшин Б.М., Гринев А.Ю., Фадин Д.В. Процедуры обнаружения подвижных объектов за преградами // Сб. статей / под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2009. С. 83–94.
58. Dorey J., Blanshard Y., Christophe F. Le Projet RIAS: une approche nouvelle du radar sur surveillance aerienne // Colloque International sur le Radar. Paris. April 1984. P. 505–510.
59. Jianqi Wu, Kai Jiang, Ruilong He. Researches of a New Kind of Advanced Meter Wave Radar // Proceedings of International Radar Conference. Beijing. China. October 2001. P. 71–75.
60. Nicolas M., Pirolli C. Balayage rapid par traitement du signal // L'Ond Electrique. Vol. 49; fasc. 2. Fevrier 1969. P. 214–222.
61. Гинзбург В.М. Формирование и обработка изображений в реальном времени. М.: Сов. радио, 1986.
62. Вовшин Б.М., Пахомов С.В. О разрешающей способности РЛС со сверхбыстрым сканированием луча // Сер. РЭ. Вопросы радиоэлектроники. 1991. Вып. 14. С. 27–38.
63. Кучеров Ю.С., Чапурский В.В. Антенные решетки со сверхбыстрым сканированием луча // Радиотехника и электроника. 1994. № 10. С. 1562–1569.
64. Greneker E.F. Radar Sensing of Heartbeat and Respiration at a Distance with Security Applications // Proceedings of SPIE. Radar Sensor Technology II. Vol. 3066. Orlando, Florida. April 1997. P. 22–27.

65. Радиолокационные методы выделения сигналов дыхания и сердцебиения / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.В. Чапурский // Радиотехника и электроника. 2006. № 10. С. 1224–1239.
66. *Рабинер Л.Р., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1981.
67. Through wall sensing of human breathing and heart beating by monochromatic radar / A.S. Bugaev, V.V. Chapursky, S.I. Ivashov e. a. // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. Vol. 1. June 21–24. 2004. Delft, Netherlands. P. 291–294.
68. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем / С.В. Первачев, А.А. Валуев, В.М. Чиликин и др. М.: Сов. радио, 1973.
69. Microwave Hologram Reconstruction for the RASCAN Type Subsurface Radar // V.V. Chapursky, S.I. Ivashov, V.V. Razevig e. a. // Proceedings of SPIE. Vol. 4758. P. 520–526.
70. *Immoriev I.J., Samkov S.V.* Ultra Wideband (UWB) Radar for the Remote Measuring of Main Parameters of Patient's Vital Activity // Radio Physics and Radio Astronomy. 2002. Vol. 7; No. 4. P. 404–407.
71. *Борисов Ю.П., Пенин П.И.* Основы многоканальной передачи информации. М.: Связь, 1967.
72. Синтез оптимальных устройств первичной обработки сигналов от маневрирующей цели для каналов сопровождения одиночной цели бортовой РЛС с длительным когерентным накоплением / А.Р. Ильчук, Е.Е. Колтышев, В.А. Ладыгин и др. // Радиотехника. 2008. № 10. С. 65–72.
73. *Bugaev A.S., Chapursky V.V., Ivashov S.I.* Mathematical Simulation of Remote Detection of Human Breathing and Heartbeat by Multifrequency Radar on the Background of Local Objects Reflections // Record of 2005 IEEE International Radar Conference. May 9–12. 2005. Arlington, Virginia, USA.
74. *Васильев В.Н., Гуров И.П.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. М.: ВНУ, 1998.
75. Исследование радиолокатора малой дальности со ступенчатой частотной модуляцией при работе внутри помещения / И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.В. Чапурский, А.П. Шейко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 1. С. 31–47.
76. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.
77. *Чапурский В.В.* Аддитивные и мультипликативные алгоритмы обработки сигналов в задачах ММО-локации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13; № 4. С. 68–80.
78. *Чапурский В.В.* Мультипликативная обработка сигналов с подавлением отражений от местных предметов в задачах сверхширокополосной ММО-локации // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. Вып. 1, 2. С. 114–122.
79. *Чапурский В.В.* Анализ интерференционных переотражений в ММО РЛС при мультипликативной обработке // Доклады 19-й Междуна-

родной конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – КрымКо-2009. 14–18 сентября 2009. Севастополь, Украина.

80. *Wonsuk Choi, Tapan K. Sarkar*. Minimum Norm Property for the Sum of the Adaptive Weights for a Direct Data Domain Least Squares Algorithm // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54; No. 3.

81. Многофункциональные радиолокационные системы / под ред. Б.Г. Татарского. М.: Дрофа, 2007.

82. *Van der Varden B.J.* Алгебра. М.: Лань. 2004.

83. *Costas J.P.* A Study of a Class of Detection Waveforms Having Nearly Ideal Range-Doppler Ambiguity Properties // Proceedings of the IEEE. Vol. 72; No. 8. August 1984. P. 996–1009.

84. *Golomb S.W., Taylor H.* Construction and Properties of Costas Arrays // Proceedings of the IEEE. Vol. 72; No. 9. 1984. P. 1143–1163.

85. *Свердлов Б.Г., Чанурский В.В.* Обобщенные многочастотные сигналы на основе теоретико-числовых распределений частот // Радиотехника. 2010. № 9. С. 91–104.

86. <http://www.research.ibm.com/people/s/shearer/grpp.html>

87. Design, performance and applications of coherent ultra-wideband random noise radar / *Narayanan Ram M., Yi Xu, Hoffmeier P.D., Curtis John O.* // Optical Engineering. 1998. Vol. 37; No. 6. P. 1855–1869.

88. *Guosui Liu, Hong Gu, Weimin Su.* Development of Random Signal Radars // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35; No. 3. P. 770–777.

89. Short range Imaging Applications using Noise Radar Technology / *D. Tarchi, D. Leva, K. Lukin e. a.* // Proceedings EuroSAR-2000. 23–25 may 2000. Munich, Germany. P. 361–364.

90. *Калинkevич А.А., Крылова М.С., Турыгин М.С.* Предварительное теоретическое рассмотрение процессов в шумовой радиолокации с пространственной обратной связью // Сб. докладов Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». 1–3 июля 2003. Муром. 2003. С. 415–419.

91. *Калинин В.И.* Сверхширокополосная радиолокация с двойной спектральной обработкой шумовых сигналов // Радиотехника. 2005. № 3. С. 25–35.

92. *Narayanan R.M., Mohammed Dawood.* Doppler Estimation Using Coherent Ultrawide-Band Random Noise Radar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2000. Vol. 48; № 6. P. 868–878.

93. *Чанурский В.В.* К теории спектрального метода измерения дальности и радиальной скорости при шумовом зондирующем сигнале // Тр. юбилейной научно-технич. конф. ЦНИИРЭС «Прогрессивные направления развития радиоэлектронных комплексов и систем». М.: ЦНИИРЭС, 2001. С. 70–75.

94. *Саблин В.Н., Чанурский В.В.* Корреляционные методы обработки сигналов в широкополосных и сверхширокополосных шумовых РЛС // Тр. юбилейной научно-технич. конф. ЦНИИРЭС «Прогрессивные направления

развития радиоэлектронных комплексов и систем». М.: ЦНИИРЭС, 2001. С. 61–69.

95. Калинин В.И. Обнаружение и сопровождение движущихся целей широкополосным интерферометром // Тр. Юбилейной научно-технич. конф. ЦНИИРЭС «Прогрессивные направления развития радиоэлектронных комплексов и систем». М.: ЦНИИРЭС, 2001. С. 83–88.

96. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974.

97. Чапурский В.В. Синтезированная теневая радиоголография в бистатической радиолокации // Радиотехника. 2009. № 3. С. 52–69.

98. Залогин Н.Н., Калинин В.И., Кириллин К.А. Расчет соотношения сигнал/шум для радиолокационной станции, работающей по методу двойного спектрального анализа шумового сигнала // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38; № 2. С. 278.

99. Бакулев П.А. Радиолокация движущихся целей. М.: Сов. радио, 1964.

100. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.

101. Морская радиолокация / под ред. В.И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. С. 196–200.

102. Shalab Gupta, Brown T.R. Noise-Correlating Radar Based on Retro-directive Antennas // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2007. Vol. 43; No. 2. P. 472–479.

103. Калинин В.И., Чапурский В.В., Черепенин В.А. Сверхширокополосная шумовая радиолокация с высоким пространственным разрешением // Доклады 3-й Всероссийской научно-технич. конф. «Радиолокация и радиосвязь». Москва. 2009. С. 194–196.

104. Калинин В.И., Чапурский В.В. Широкополосная шумовая радиолокация на основе многоэлементных антенных систем // Радиотехника. 2007. № 1. С. 19–23.

105. Sharp E.D., Diab M.A. Van Atta Reflector Array // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1960. No. 4. P. 436–438.

106. Залогин Н.Н., Калинин В.И., Кислов В.Я. и др. А. с. 792183. Бюл. 48. 1980.

107. Калинин В.И., Кислов В.Я., Мясин Е.А. и др. А. с. 820430. Бюл. 6. 1983.

108. Калинин В.И., Чапурский В.В. Сверхширокополосная шумовая радиолокация на основе антенных решеток с рециркуляцией сигналов // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53; № 10. С. 1266–1277.

Научное издание

Чапурский Валерий Викторович

**ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Редактор *Л.Т. Мартыненко*

Технический редактор *Э.А. Кулакова*

Корректор *Е.В. Авалова*

Художник *А.С. Ключева*

Компьютерная графика *О.В. Левашовой*

Компьютерная верстка *И.Д. Звягинцевой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 15.01.17. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 17,5. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.