

ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

РГБ 04

ЛИТЮК Леонид Викторович

**СИНТЕЗ, АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА СИСТЕМ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ
С ВНУТРИДИСКРЕТНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
С ЗАДААННЫМИ СВОЙСТВАМИ СУММАРНОЙ
ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Специальности

- 05.12.01 «Теоретические основы радиотехники»
05.12.17 «Радиотехнические и телевизионные системы и устройства»

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

Таганрог 2000

Работа выполнена в Таганрогском государственном радиотехническом университете (ТРТУ) на кафедре «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» (РТС).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
академик МАИ,
Дятлов Анатолий Павлович
(г. Таганрог, ТРТУ)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Федосов Валентин Петрович
(г. Таганрог, ТРТУ)

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Махонин Георгий Михайлович
(г. Таганрог, НИИ «Бриз»)

Ведущая организация: Таганрогский научно-исследовательский
институт связи (г. Таганрог)

Защита состоится 22 июня 2000 г. в 14.20 на заседании диссертационного совета Д 063.13.03 при Таганрогском государственном радиотехническом университете по адресу: г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Д – 406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Таганрогского государственного радиотехнического университета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 347928, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44, ТРТУ, ученому секретарю Совета.

Автореферат разослан 12 мая 2000 г.

*И.о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 063.13.03
д.т.н., профессор*

Г.М. Балим



3954-01,0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и состояние вопроса. Одной из важнейших задач радиолокации (РЛ) является повышение эффективности обработки полезных сигналов, принимаемых в условиях непрерывно изменяющейся помеховой обстановки. Как известно, применение сложных сигналов (СС) позволяет получить более высокие характеристики радиотехнических систем различного назначения.

Как показывает математический анализ, оптимальные методы обработки СС, в общем случае, не распадаются на внутри- и межпериодную обработки. Однако, сложности технической реализации разработанных алгоритмов на аналоговой элементной базе привели к тому, что раздельный характер указанных видов обработки задавался в качестве основного условия синтеза СС с заданными свойствами. Поэтому основные усилия разработчиков были направлены на поиск таких одиночных СС, которые бы наиболее полно отвечали заданным требованиям.

Существенный вклад в разработку и развитие алгоритмов синтеза, анализа СС и устройств их обработки внесли Кук Ч., Бернфельд М., Вудверд Ф.М., Велти, Френкс Л., Ширман Я.Д., Бакулев П.А., Финкельштейн М.И., Свистов В.М., Варакин Л.Е., Пестряков В.Б., Тартаковский Г.П., Свердлик М.Б., Амиантов А.Н., Ипатов В.П., Филатов К.В., Миддлтон Д., Golay M.J.E., Siaswami R., Budishin S.Z. и другие исследователи.

Появление цифровой обработки сигналов (ЦОС) позволило решить вопросы генерации и обработки СС с высокой степенью точности, ранее не достижимой аналоговыми методами, а также обеспечило возможность длительного накопления обработанных сигналов. Большой вклад в развитие теории и техники ЦОС внесли Гоулд Б., Рейдер Ч., Рабинер Л., Оппенгейм А.В., Шафер Р.В., Константинопидес А.Г., Отнес Р., Эноксон Л., Антонию А., Лихарев В.А., Быков В.В., Липток В.И., Рыжов В.П. и ряд других авторов.

Создание новых современных методов и алгоритмов обработки сигналов связано с учетом потенциальных возможностей микропроцессоров для ЦОС, выполненных по технологии СБИС. К таким микропроцессорам может быть отнесен TMS320C30, обладающий производительностью 2 млрд. операций в секунду и оперирующий одновременно с четырьмя 32-разрядными числами с фиксированной запятой. Отметим, что в настоящее время имеются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с частотой дискретизации, достигающей 200 МГц и имеющие динамический диапазон 72 – 96 дБ. Это позволило разрабатывать алгоритмы обработки СС исключая раздельный характер внутри- и межпериодной обработки и к которым можно отнести алгоритмы, синтезированные для обработки систем сигналов.

Как известно, система сигналов – это множество сигналов, объединяемых единым правилом построения, которое определяет как индивидуальные, так и совместные характеристики сигналов, от которых зависят также и параметры радиотехнических систем, в том числе и радиолокационных станций (РЛС) обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей.

С использованием указанного подхода были синтезированы системы фазоманипулированных (ФМн) сигналов, которые обладают «квазиидеальной» формой суммарного тела неопределенности (ТН), т.е. имеют такое суммарное ТН, у которого отсутствуют боковые лепестки (БЛ) сжатых СС на плоскости (τ, F) , за исключением области $\pm\tau_0$, прилегающей к точке $\tau = 0$, где τ_0 – длительность дискрета ФМн сигнала.

Однако, разработанные ранее алгоритмы обработки предложенных систем СС требуют знания начальной фазы каждого сигнала в этой системе, что затрудняет техническую реализацию устройств, позволяющих получить отклик, описываемый суммарным «квазиидеальным» ТН.

Проведенный анализ также показал, что не были рассмотрены вопросы селекции сигналов отраженных от движущихся целей при использовании систем сигналов и вопросы построения устройств обработки сигналов с минимальным количеством операций перемножения.

Поэтому задача синтеза и анализа систем СС, при обработке которых отсутствовала бы необходимость иметь информацию о начальной фазе каждого принимаемого сигнала, обеспечивающих получение «квазиидеального» суммарного ТН, что позволяет получить более высокую помехоустойчивость РЛС обзора земной поверхности, а также разработка алгоритмов, позволяющих выделять сигналы отраженные от движущихся целей, принимаемых в аддитивной смеси с коррелированной помехой и шумом, и их применение в РЛС селекции движущихся целей, и построения устройств обработки сигналов с минимальным количеством операций перемножения, является актуальной.

Целью работы является синтез и анализ систем радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией, обладающих «квазиидеальным» суммарным ТН, и их применение в задачах обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей, принимаемых в аддитивной смеси с сигналами, отраженными от подстилающей поверхности и шумом, а также построения устройств обработки сигналов с минимальным количеством операций перемножения.

Задачи, которые были решены для достижения поставленной цели, а именно:

- синтезированы системы радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией, обладающие «квазиидеальным» суммарным ТН;
- проанализированы свойства полученных систем СС и определены требования к законам внутридискретной модуляции;
- предложен алгоритм селекции сигналов движущихся целей, принимаемых на фоне отражений от земной поверхности и использующий предложенные системы СС;
- проведен сравнительный анализ сигналов с различными законами внутридискретной модуляции с целью их более эффективного применения для задач обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей;
- предложены способы обработки синтезированных систем сигналов и устройства, их реализующие;

- рассмотрены вопросы анализа всепропускающих цифровых комплексных ячеек (ВЦКЯ), на основе которых могут быть реализованы согласованные фильтры (СФ);
- проведены экспериментальные исследования путем машинного моделирования на ЦВМ эффективности применения систем СС в когерентно-импульсных РЛС обзора земной поверхности и когерентно-импульсных РЛС селекции сигналов движущихся целей.

Методы исследования. В работе были использованы методы теории матриц и матричного анализа, линейной теории дискретных сигналов и цепей, методы теории систем сигналов, метод комплексной отгибающей, методы теории статистических решений, методы цифровой обработки сигналов и цифрового спектрального анализа, аппарат Z-преобразования, методы статистического моделирования.

Научная новизна. Основные научные результаты работы:

- предложен метод получения систем радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией с суммарным «квазиидеальным» ТН, у которого отсутствуют БЛ на всей плоскости (τ, F) , за исключением области $\pm\tau_d$, прилегающей к точке $\tau = 0$;
- разработаны алгоритмы, использующие предложенные сигналы в задачах обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей;
- проведен путем моделирования на ЦВМ сравнительный анализ ТН и спектральных характеристик одиночных СС с различными базами и законами модуляции;
- разработан алгоритм, определены свойства и предложена структура ВЦКЯ с минимальным количеством операций перемножения и определены ее характеристики;
- разработана методика моделирования на ЦВМ предложенных систем СС и оценена эффективность их использования в РЛС.

Практическая ценность. Основными практическими результатами работы являются:

- предложены способы и структуры устройств, их реализующие, позволяющие обрабатывать системы радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией для решения задач обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей;
- определены области наиболее эффективного применения соответствующих законов внутридискретной модуляции для решения задач обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей;
- предложена структура ВЦКЯ с минимальным количеством перемножителей без ухудшения ее характеристик;
- на основании разработанной методики путем машинного моделирования на ЦВМ определена эффективность предложенных алгоритмов обработки.

Основные положения, выносимые на защиту:

- метод получения систем радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией (ЧМ) с «квазиидеальным» суммарным ТН;

- алгоритмы, использующие предложенные системы СС в задачах обзора земной поверхности и селекции движущихся целей;
- способы и структуры устройств, позволяющие обрабатывать предложенные системы СС в задачах обзора земной поверхности и селекции движущихся целей;
- метод построения ВЦКЯ с минимальным количеством операций перемножения;
- модели сигналов и помех для использования в расчетах на ЦВМ;
- методика оценки эффективности применения предложенных систем СС в РЛС обзора земной поверхности и РЛС селекции движущихся целей.

Внедрение результатов работы. Результаты использовались в хозяйственной работе № 11390, в учебном процессе Таганрогского государственного радиотехнического университета (ТРТУ) и в работах Таганрогского научно-исследовательского института связи (ТНИИС).

Акты внедрения, приводимые в приложении, подтверждают, что результаты работы внедрены:

- в учебный процесс ТРТУ при подготовке учебного пособия и лабораторной работы по курсу «Методы и устройства цифровой обработки сигналов в радиоприемных устройствах»;
- в промышленности – в работы ТНИИСа с условным экономическим эффектом, составляющим 102000 рублей.

Апробация работы. Научные и практические результаты диссертационной работы докладывались, представлялись, обсуждались и опубликованы в трудах Международных и Всероссийских конференций в 1993 – 1998 гг.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 15 работ, среди которых два патента РФ (№ 2107926 и № 2143709), две статьи (одна в печати), 9 тезисов докладов, отчет по НИР и авторские материалы объемом 2,1 п.л. в учебном пособии объемом 5,9 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на русском языке и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержащих характеристики обнаружения РЛС обзора земной поверхности, характеристики обнаружения РЛС селекции движущихся целей и акты внедрения. Общий объем диссертации 235 с. Основной текст диссертации содержит 145 машинописных страниц, 65 рисунков по тексту на 33 страницах, 2 таблицы, список литературы из 102 наименований на 10 с. Приложения составляют 47 с.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, дается краткое описание содержания диссертации и ее объем.

В первой главе для синтеза системы радиолокационных ФМн сигналов, обладающих «квазиидеальным» суммарным ТН, был использован математиче-

ский аппарат, описывающий систему ФМн сигналов, которые могут быть представлены в виде ортогональной матрицы X размером $N \times N$. Набор импульсных характеристик согласованных фильтров для этой системы сигналов также можно представить в виде столбцов матрицы H размера $N \times N$.

Тогда матрица $V = HX$ будет диагональной матрицей, элементы главной диагонали которой соответствуют откликам СФ в момент окончания сигналов.

Для получения «квазиидеального» суммарного ТН такой системы сигналов необходимо иметь информацию о начальной фазе каждого сигнала, описанного матрицей X .

Для ликвидации этого недостатка в диссертационной работе предложено ввести внутридискретную частотную модуляцию (ЧМ), закон изменения которой определяется знаком кода ФМн сигнала. Такие сигналы предложено называть радиолокационными ФМн сигналами с внутридискретной частотной модуляцией или просто с внутридискретной модуляцией.

При использовании ФМн сигналов с двумя состояниями фазы ($0, \pi$) количество законов внутридискретной ЧМ будет равно двум. Определены требования к характеристикам модулирующих функций для «положительных» и «отрицательных» значений дискретов, которые должны иметь равные полосы занимаемых частот, быть ортогональными друг другу, иметь одинаковые изменения при одинаковых знаках и величине доплеровского сдвига частоты F_d и изменения их ТН при $F_d \neq 0$ должны быть симметричны относительно точки $\tau = 0$.

Обработку таких систем сигналов предложено проводить в три этапа: внутридискретная, внутримпульсная, межпериодная.

Полученная система сигналов после первого этапа обработки на соответствующих выходах согласованных фильтров дискретов (СФД), описывается матрицей размера $(2N+1) \times N$, причем, четным позициям соответствуют элементы, знаки которых совпадают со знаком кода ФМн сигнала, а на нечетных позициях расположены элементы, описывающие БЛ сжатых дискретов.

После проведения второго и третьего этапов обработки выходной эффект описывается матрицей-строкой размера $1 \times (4N+1)$, у которой на нечетных позициях расположены величины, равные нулю, за исключением центрального, а на четных позициях расположены величины, описывающие БЛ сжатых дискретов.

Для устранения этого недостатка в диссертационной работе предложено дополнительно ввести инверсную, относительно рассмотренной, систему радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной ЧМ.

После проведения первого этапа ее обработки, относительно рассмотренной матрицы, получается инверсная матрица размера $(2N+1) \times N$, причем четным позициям соответствуют элементы, знаки которых совпадают со знаком кода инверсного ФМн сигнала, а на нечетных позициях расположены элементы, описывающие инверсные БЛ сжатых дискретов, и которые равны по модулю инверсной матрице.

После проведения второго и третьего этапов обработки над инверсной матрицей сигналов выходной эффект описывается матрицей-строкой размера $1 \times (4N+1)$, у которой на нечетных позициях расположены величины, равные ну-

лю, за исключением центрального, а на четных позициях расположены величины, описывающие БЛ сжатых дискретов, модули которых на одноименных позициях равны по величине модулям неинверсной системы сигналов, а их знаки противоположны. Суммирование этих матриц-строк описывает суммарное ТН $\chi(\tau, F)$, которое на всей плоскости (τ, F) представлено выражением

$$\chi(\tau, F) = \sum_{i=1}^{2N} \chi_{iM}(\tau, F) \begin{cases} \neq 0 & \text{при } |\tau| \leq \tau_d, \\ = 0 & \text{при } \tau_d < |\tau| \leq (N-1)\tau_d, \end{cases}$$

где $\chi_{iM}(\tau, F)$ — ТН каждого парциального сигнала из системы предложенных сигналов.

В работе рассмотрено применение системы ФМн сигналов на основе использования D-кодов, которые описываются модифицированной матрицей Адамара с элементами ± 1 . В качестве примера были рассмотрены матрицы размера 8×4 и 16×8 . Показано, что применение предложенного подхода позволяет получать «квазиидеальные» суммарные ТН. Была показана возможность использования упрощенных процедур анализа, связанных с уменьшением размерности рассматриваемых матриц для указанных видов СС.

Также рассмотрено влияние искажающих факторов на обработку систем радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной модуляцией для случаев, когда входной процесс подвергается бинарному квантованию и когда используется весовая обработка в СФД, и рассмотрено влияние ограничений длины разрядной сетки весовых коэффициентов.

Показано, что бинарное квантование не оказывает влияния на форму суммарного ТН на плоскости (τ, F) в области за пределами $\pm \tau_d$ относительно точки $\tau = 0$, т. е. не появляются БЛ. Это позволяет сделать вывод о том, что сохраняется «квазиидеальная» форма суммарного ТН независимо от числа используемых разрядов АЦП.

Рассмотрение весовой обработки отдельных дискретов показало, что влияние формы используемого весового окна в СФД приводит только к изменению формы и величины основного пика в суммарном ТН и не приводит к появлению БЛ за пределами области $\pm \tau_d$ относительно точки $\tau = 0$. Также показано, что ограничение длины разрядной сетки весовых коэффициентов не приводит к появлению БЛ в суммарном ТН за пределами области $\pm \tau_d$ относительно точки $\tau = 0$.

На основе рассмотренной системы сигналов был предложен способ импульсной радиолокации системой фазоманипулированных сигналов и рассмотрена структура РЛС, его реализующая.

Способ импульсной радиолокации заключается в том, что формируют систему из $2N$ радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной модуляцией, каждый из которых излучают, принимают, сжимают в соответствующих СФД, результаты сжатия которых сжимают в соответствующем СФ ФМн сигнала и когерентно суммируют с другими сигналами системы, прошедшими аналогичную обработку и имеющими разнополярные БЛ на одинаковом удалении от главного пика и однополярные главные пики, что позволяет компенсировать БЛ вне области $\pm \tau_d$ относительно точки $\tau = 0$.

Рассмотрена структурная схема РЛС, реализующая предложенный способ, описана ее работа, приведены временные диаграммы прохождения системы сигналов через ее основные узлы, как для случая без весовой обработки отдельных дискретов, так и с весовой обработкой.

Во второй главе предложен алгоритм селекции сигналов движущихся целей, принимаемых в аддитивной смеси с коррелированной помехой, с использованием систем радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной модуляцией (описанных в первой главе), который имеет следующий вид:

- формируется модифицированная \mathbf{H} -матрица Адамара размером $2N \times N$, состоящая из строк, принадлежащих модифицированным матрицам $\mathbf{H}_{N \times N}$ и $\bar{\mathbf{H}}_{N \times N}$, где знак « $\bar{\cdot}$ » означает инверсию элементов; в сформированной $\mathbf{H}_{2N \times N}$ -матрице размером $2N \times N$, строки располагаются таким образом, чтобы расстояние по Хэммингу между ее нечетными и четными строками было максимально, т. е. нечетные строки принадлежат матрице $\mathbf{H}_{N \times N}$, а четные – матрице $\bar{\mathbf{H}}_{N \times N}$;
- сформированные на основе $\mathbf{H}_{2N \times N}$ -матрицы радиолокационные ФМн сигналы с внутридискретной модуляцией проходят обработку в СФД, с выходов которых появляются сигналы, описываемые сигнальной матрицей $\mathbf{X}_д$ размером $2N \times (2N+1)$;
- сформированные сигналы поступают на соответствующим образом настроенные СФ ФМн сигналов, которые описываются матрицей импульсных характеристик $\mathbf{H}_д$ размера $(2N+1) \times 2N$; в результате прохождения ФМн сигналов через СФ ФМн формируются отклики, которые могут быть записаны в виде строк матрицы $\mathbf{K}_д$ размером $2N \times (4N+1)$;
- производится вычитание из элементов, расположенных на нечетных строках матрицы $\mathbf{K}_д$, элементов расположенных на четных строках матрицы $\mathbf{K}_д$ и находящихся на одноименных столбцах; в результате получается матрица $\Delta\mathbf{K}_д$ размером $N \times (4N+1)$;
- определяются те строки в матрице $\Delta\mathbf{K}_д$, крайние элементы которых с обеих сторон имеют одинаковые знаки и в дальнейшем над этими строками никаких математических преобразований не осуществляется;
- определяются те строки матрицы $\Delta\mathbf{K}_д$, у которых крайние левые элементы, кроме нулевых, имеют противоположные знаки относительно знаков строк, которые были определены ранее и у которых одинаковые знаки с обеих сторон;
- все элементы строк матрицы $\Delta\mathbf{K}_д$ с противоположными знаками крайних элементов умножаются на -1 (инвертируются), что приводит к появлению матрицы $\Delta\mathbf{K}_{дл}$ размера $N \times (4N+1)$;
- производится поэлементное суммирование полученных разностей, расположенных на одноименных столбцах в матрице $\Delta\mathbf{K}_{дл}$ размера $N \times (4N+1)$, в результате чего получается матрица-строка $\Delta\mathbf{K}_{длс}$ размером $1 \times (4N+1)$, у которой все правые элементы, кроме элемента расположенного рядом с центральным,

равны нулю и которая переписывается в виде диагональной матрицы размером $(4N+1) \times (4N+1)$;

- определяются те строки матрицы $\Delta K_{д}$, у которых крайние правые элементы, кроме нулевых, имеют противоположные знаки относительно знаков строк, которые были определены ранее и у которых одинаковые знаки с обеих сторон;
- все элементы матрицы $\Delta K_{д}$ с противоположными знаками строк умножаются на -1 (инвертируются), что приводит к появлению другой матрицы $\Delta K_{дп}$ размера $N \times (4N+1)$;
- производится поэлементное суммирование полученных разностей, расположенных на одноименных столбцах в матрице $\Delta K_{дп}$ размера $N \times (4N+1)$, в результате чего получается матрица-строка $\Delta K_{дпс}$ размером $1 \times (4N+1)$, у которой все левые элементы, кроме элемента расположенного рядом с центральным, равны нулю и которая переписывается в виде диагональной матрицы размером $(4N+1) \times (4N+1)$;
- полученные диагональные матрицы перемножаются друг на друга и получается диагональная матрица $\Delta K_{дс}$ размером $(4N+1) \times (4N+1)$, которая имеет все нулевые элементы кроме трех элементов на главной диагонали – центрального и двух расположенных рядом с ним и которые описывают результирующий отклик, соответствующий сигналам движущихся целей.

Приводятся примеры применения указанного алгоритма на основе использования модифицированных матриц Адамара размерами 8×4 и 16×8 , которые подтвердили его правильность.

Показана возможность использования упрощенных процедур анализа, связанных с уменьшением размерности рассматриваемых матриц, за счет отдельного рассмотрения матриц описывающих БЛ сжатых дискретов и матриц описывающих их основные пики.

На основе указанного алгоритма был предложен способ селекции движущихся целей и рассмотрена структура РЛС, его реализующая.

Способ селекции движущихся целей заключается в том, что формируют систему из $2N$ радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной модуляцией, каждый их которых излучают, принимают, сжимают в соответствующих СФД, результаты сжатия которых сжимают в соответствующем согласованном фильтре ФМн сигнала и производят вычитание четного сигнала из нечетного, которые имеют максимальное расстояние по Хэммингу, результаты вычитаний системы сигналов сортируют и соответственно инвертируют, далее их накапливают в двух группах и полученные результаты синхронно перемножают, что позволяет выделить сигналы движущихся целей, принимаемых в аддитивной смеси с сигналами отраженными от подстилающей поверхности, с одновременным подавлением БЛ вне области $\pm \tau_d$ относительно точки $\tau = 0$.

Рассмотрена структурная схема РЛС селекции движущихся целей, реализующая предложенный способ, описана ее работа, приведены временные диаграммы прохождения системы сигналов через ее основные узлы.

Рассматривается влияние вида законов внутридискретной модуляции (ЛЧМ, квадратичная и кубическая ЧМ) для различных значений баз дискретов на форму АЧХ рассматриваемой РЛС. Анализ полученных результатов моделирования на ЦВМ показал, что вне зависимости от базы участок режекторной характеристики, соответствующий диапазону радиальных скоростей цели от нулевой до оптимальной, аппроксимируется функцией $K(\omega T) = \sin^2(k\omega T/2)$, где k — коэффициент, зависящий от параметров модулирующей функции дискрета. При этом диапазон однозначности по частоте намного превышает частоту повторения зондирующих сигналов.

В третьей главе на основании требований и выдвинутых критериев, которым должны удовлетворять сигналы, законы модулирующих функций которых однозначно связаны со знаком кода ФМн сигнала, определяются их характеристики, необходимые для решения задач обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей. Получены выражения в дискретной форме записи, описывающие комплексные отгибающие со спадающими и нарастающими законами ЧМ (ЛЧМ, квадратичная и кубическая ЧМ). На основании этих выражений получены соотношения, позволяющие определить базы сигналов в цифровой форме при их фиксированных длительности и нормированной частоте дискретизации для различных законов модуляции. Получены выражения, описывающие импульсные характеристики соответствующих СФД.

На основании полученных выражений рассмотрена методика моделирования сигналов с внутридискретной ЧМ и их прохождение через соответствующий СФ. Из полученных выражений рассчитаны значения баз пачек СС в зависимости от количества импульсов в пачке. Определены значения величин бинов для различных баз дискретов используемой системы сигналов при их фиксированных длительности и нормированной частоте дискретизации.

На основе полученных выражений были построены ТН отдельных дискретов для значений баз 8, 16, 32, 48, 64, 96, 128 для падающего и нарастающего законов изменения частоты для ЛЧМ сигнала и сигналов с квадратичной и кубической ЧМ. Также были построены ТН исследуемых сигналов с весовой обработкой, в качестве которой было выбрано окно Хэмминга.

Для проведения сравнительного анализа ТН ЛЧМ сигналов были приняты в качестве «эталонных». Из сравнительного анализа полученных результатов видно, что ТН сигналов у которых порядок модулирующей функции более высокий, имеют меньшую зависимость от доплеровского сдвига частоты. Также были исследованы спектральные характеристики указанных видов сигналов на основе использования дискретного преобразования Фурье. Из сравнительного анализа спектров видно, что чем больше база сигнала, тем шире спектр (при фиксированных длительности и нормированной частоте дискретизации), а увеличение порядка полинома модулирующей функции приводит к появлению пика. Это связано с тем, что имеет место большая относительная длительность колебания, частота которого изменяется незначительно в пределах длительности дискрета.

Сокращение затрат оборудования при построении СФ для СС с непрерывной фазовой функцией, по сравнению со случаем применения цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой, может быть получено при использовании ВЦКЯ. При этом методы синтеза таких устройств достаточно хорошо разработаны.

В диссертационной работе рассматриваются особенности и характеристики ВЦКЯ, у которой диапазон однозначности находится в пределах $\omega T \in [0, 2\pi]$. Определены характеристики рассматриваемой ВЦКЯ и ее основные свойства. Предложена структурная схема ВЦКЯ, которая позволяет с меньшими затратами оборудования (сокращение составляет четыре действительных множителя) производить необходимые операции без ухудшения рассматриваемых характеристик. Проанализирована зависимость группового времени задержки от значения параметров элементарной ВЦКЯ. Показано, что чем больше величина модуля ($\gamma_r < 1$), тем сильнее скорость изменения величины группового времени задержки в более узком диапазоне частот и имеет место независимость этих значений от величины фазового сдвига ($0 \leq \varphi_r < 2\pi$), которые сказываются только на местоположении этих величин на оси ωT .

В четвертой главе по характеристикам обнаружения оценивается эффективность РЛС, использующих системы радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией, рассмотренные в предыдущих главах. При этом вероятность правильного обнаружения \hat{D} является функцией $\hat{D} = f(F, n, q, m, D_n)$, где F – вероятность ложной тревоги (ЛТ); n – число импульсов в пачке; q – отношение сигнал/помеха или сигнал/шум; m – параметр, характеризующий закон внутридискретной модуляции; D_n – база пачки из n импульсов.

В качестве моделей сигналов, поступающих на обработку с выхода линейного тракта приемника, используется их представление в виде узкополосных случайных процессов, статистические характеристики которых описываются $2n$ -мерной нормальной плотностью распределения вероятностей. В этом случае корреляционная матрица порядка $2n \times 2n$ полностью описывает характеристики процесса. Конкретный вид матрицы определяется энергетическим спектром сигнала и величиной доплеровского смещения средней частоты зондирующего сигнала.

Рассматриваются модели, когда: полезный сигнал представляет собой отражение от подстилающей поверхности и принимается на фоне собственных шумов приемника, что характерно для задач обзора земной поверхности; полезный сигнал представляет собой сигнал, отраженный от движущейся нефлуктуирующей цели, принимаемый в аддитивной смеси с сигналом, отраженным от подстилающей поверхности, и собственными шумами приемника, что характерно для задач селекции движущихся целей.

Аппроксимации энергетических спектров полезного сигнала и коррелированной помехи приняты в виде резонансных спектров, что соответствует экспоненциальным функциям корреляции и позволяет исследовать эффективность предложенных алгоритмов при наиболее неблагоприятных условиях.

Определены граничные условия, позволяющие упростить алгоритмы формирования сигналов и помех для различных задач. Показано, что при отношении сигнал/шум $\ll 1$, что характерно для задач обзора земной поверхности, можно заменить коэффициент межпериодной корреляции, величина которого находится в пределах $0,95 - 0,999$, на величину равную единице. При этом погрешность при отношении сигнал/шум равном единице не превышает 2,5%. Показано, что для задач селекции сигналов движущихся целей подобная аппроксимация не применима.

Рассмотрены особенности применения метода экстремальных статистик для случая, когда в задачах обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей используется предложенная система сигналов. Описывается методика определения уровней порогов по заданной вероятности ЛТ F , уровни которой были приняты равными 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} .

Для определения значений уровней порогов для заданных вероятностей ЛТ F , через последующие модели устройств обработки пропускались либо шум, либо помеха соответственно. По результатам прохождения определялись параметры полученного распределения, на основании которых вычислялись значения порогов.

Характеристики обнаружения были получены при прохождении системы сигналов через модель, описывающую алгоритм работы когерентно-импульсной РЛС обзора земной поверхности для случаев многоазрядного представления обрабатываемой смеси, бинарно-квантованного ее представления и при использовании весового окна Хэмминга. По этим характеристикам обнаружения были построены соответствующие пороговые характеристики.

Полученные характеристики показали, что чем больше база сигнала, тем меньше требуется отношение сигнал/шум на входе устройства для получения одинаковых значений \hat{D} . Чем меньше порядок модулирующей функции m отдельного дискрета при одинаковых значениях вероятности правильного обнаружения на уровне $0,5\hat{D}$ и одинаковых значениях вероятности ЛТ F , тем требуется меньшее отношение сигнал/шум на выходе. Эти выигрыши составляют от 2 до 8 дБ и их величины возрастают при малых базах.

Использование бинарного квантования и весовой обработки приводит к выигрышу относительно случая многоазрядного представления входной смеси на 3 - 4 дБ и 2 - 3 дБ соответственно.

Проведен сравнительный анализ предложенных систем СС со случаем использования систем ФМН сигналов без внутридискретной модуляции.

Построены характеристики обнаружения для случая прохождения системы сигналов через модель, описывающую алгоритм работы РЛС селекции движущихся целей при многоазрядном представлении входной смеси и при использовании весовой обработки. По полученным характеристикам обнаружения были построены соответствующие пороговые характеристики.

Характеристики обнаружения строились для оптимальной и «слепой» скоростей цели. Коэффициент корреляции помехи был принят равным $0,999$, а сигнала - $0,995$.

Анализ полученных характеристик показал, что увеличение порядка модулирующей функции m при одинаковых значениях сигнал/помеха на входе и вероятностей ЛТ F , приводит к выигрышу от 1 до 4 дБ. Это связано с тем, что такие сигналы имеют большой «участок» по времени, где частота изменения относительно незначительна и сильнее проявляется эффект Доплера.

Анализ показал, что выигрыши в пороговых сигналах для оптимальной скорости движения цели, по сравнению со случаем ее движения на «слепой» скорости достигают значений до 20 дБ при больших значениях баз и 26 – 28 дБ при малых значениях баз из приведенного их ряда.

Проведен сравнительный анализ эффективности предложенных алгоритмов селекции движущихся целей с эффективностью описанных в литературе систем двукратного череспериодного вычитания.

В заключение сформулированы результаты работы, которые состоят в следующем.

1. Синтезированы системы радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной частотной модуляцией, обладающие «квазиидеальной» формой суммарного ТН. Проведен анализ полученной системы сигналов. Определены требования, которым должны удовлетворять модулирующие функции, описывающие законы внутридискретной модуляции. Показано, что применяемые D-коды различной размерности позволяют получать суммарные «квазиидеальные» ТН.

2. Предложен алгоритм селекции сигналов движущихся целей на основе использования свойств и особенностей предложенных систем радиолокационных ФМн сигналов с внутридискретной модуляцией и проведен его анализ. Рассмотрены возможности упрощенного анализа алгоритмов обработки без ухудшения качества полученных результатов.

3. Предложен способ импульсной радиолокации системой ФМн сигналов с внутридискретной ЧМ и устройство, его реализующее. Предложен способ селекции сигналов движущихся целей на основе использования свойств предложенной системы сигналов и устройство, его реализующее.

4. Рассмотрено влияние параметров используемых сигналов на характеристики устройства селекции сигналов движущихся целей. Показано, что полученная АЧХ описывается функцией $\sin^2(k\omega T/2)$, причем ее диапазон однозначности намного превышает частоту повторения зондирующих сигналов.

5. Получены расчетные соотношения, позволяющие определить эффективность применения соответствующих законов внутридискретной модуляции в зависимости от вида решаемых задач. Проведен сравнительный анализ полученных в результате моделирования ТН и спектров сигналов.

6. Предложена и проанализирована ВЦКЯ, особенностью которой является то, что осуществление операций перемножения комплексных чисел в цепях прямой и обратной связи достигается меньшим числом перемножителей. Получены выражения, позволяющие проанализировать зависимость скорости изменения величины группового времени задержки ВЦКЯ от частоты в зависимости от величины модуля γ_r .

7. Разработана методика определения эффективности (по характеристикам обнаружения) алгоритмов обработки предложенной системы СС методом статистического моделирования для задач обзора земной поверхности и селекции сигналов движущихся целей. Разработаны модели сигналов и помех, приводится методика определения уровней порогов.

8. Получены характеристики обнаружения для РЛС обзора земной поверхности и РЛС селекции движущихся целей. Показано, что в случае использования предложенных систем СС в задачах обзора земной поверхности целесообразно использовать ЛЧМ сигнал в качестве внутридискретной модулирующей функции. В задачах селекции движущихся целей – кубическую внутридискретную ЧМ. А для совместного решения задач целесообразно использовать квадратичную ЧМ.

Приложения. В приложении 1 приведены полученные характеристики обнаружения для когерентно-импульсной РЛС обзора земной поверхности. В приложении 2 приведены полученные характеристики обнаружения для РЛС селекции движущихся целей. В приложении 3 приведены акты внедрения полученных результатов в учебный процесс Таганрогского государственного радиотехнического университета и в работы Таганрогского научно-исследовательского института связи с условным экономическим эффектом 102000 рублей.

Опубликованы по теме диссертации следующие работы:

1. Липюк Л.В. Выделение сигналов движущихся целей при использовании систем фазоманипулированных сигналов с внутридискретной модуляцией // Радиотехнические цепи, сигналы и устройства. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998, С. 37 – 42.

2. Липюк Л.В. Синтез и анализ систем сложных сигналов с «квазиидеальным» телом неопределенности // Известия ВУЗов России. «Радиоэлектроника». 1993. № 2 (в печати).

3. Липюк Л.В. Моделирование случайных процессов и их прохождение через линейные и нелинейные цепи // Вторая Всероссийская научная студенческая конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Тезисы докладов. Таганрог, 1994. С. 242 – 243.

4. Липюк Л.В. Компенсационный метод подавления боковых лепестков // Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Новые информационные технологии. Информационное, программное и аппаратное обеспечение». Тезисы докладов. Таганрог, 1995. С. 194 – 195.

5. Липюк Л.В. О некоторых особенностях обработки сложных сигналов, предназначенных для описания характеристик природной среды // Международный конгресс студентов, аспирантов, молодых ученых «Молодежь и наука – третье тысячелетие». Материалы Международного научного симпозиума «Природа и человек: взаимодействие и безопасность жизнедеятельности». Тезисы докладов. Таганрог, 1996. С. 13-14.

6. Липюк Л.В. О некоторых свойствах сложного сигнала с нелинейной частотной модуляцией // Третья Всероссийская научная конференция студентов

и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления»). Тезисы докладов. Таганрог, 1996. С. 22.

7. Литюк Л.В. Синтез и анализ ансамбля фазоманипулированных сигналов с внутريدискретной модуляцией // Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, микроэлектроника, системы связи и управления». Тезисы докладов. Таганрог, 1997. С. 23 – 24.

8. Литюк Л.В. О некоторых особенностях определения потенциальной эффективности РЭС // Московская студенческая научно-техническая конференция «Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве». Тезисы докладов. М.: 1997. С. 94 – 95.

9. Литюк Л.В. Некоторые особенности обработки систем сложных сигналов, представленных в бинарно-квантованной форме. // «Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности». Сборник трудов. ч. II. «Моделирование, управление и обработка информации в технических и человеко-машинных системах». Таганрог, 1998. С. 166 – 167.

10. Литюк Л.В. Сравнительный анализ эффективности применения внутريدискретных модулирующих функций систем сложных сигналов. // Четвертая Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Тезисы докладов. Таганрог. ТРТУ, 1998. С. 16 – 17.

11. Литюк Л.В. О некоторых особенностях расчета характеристик обнаружения РЛС картографирования земной поверхности // Четвертая Всероссийская научная конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Тезисы докладов. Таганрог, 1998. С. 18 – 19.

12. Литюк Л.В. Системы сложных сигналов с внутريدискретной частотной модуляцией / В кн. Литюк В.И. Методы расчета и проектирование цифровых многопроцессорных устройств обработки радиосигналов: Учебное пособие. Ч. 4: Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. С. 55 – 89.

13. Патент РФ № 2107926. Способ импульсной радиолокации системой фазоманипулированных сигналов / Л.В.Литюк. Оpubл. в Бюл. изобр. 1998. № 9. С. 377.

14. Патент РФ № 2143709. Способ селекции движущихся целей / Л.В.Литюк. Оpubл. в Бюл. изобр. 1999. № 36. С. 235.

15. Исследование методов формирования и обработки на многопроцессорных вычислительных системах шумоподобных сигналов цифровых систем связи. Отчет о НИР / ТРТУ. 11390; № ГР 01.9.70005355; Инв. № 02.9.70004845. Таганрог, 1997. 198 с.

Соискатель



Л.В.Литюк

ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

347928, г. Таганрог, ГСП-17А, Некрасовский, 44.

Тел. (863-44) 6-16-32, факс (863-44) 6-50-19, телетайп «Кварц»,

e-mail: treutc@tagn.iasnet.ru