

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.372.542

Глинка
Павел Андреевич

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МЕАНДР-ФИЛЬТРОВ ПОДСИСТЕМ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СРЕДСТВ РАДИОМОНИТОРИНГА НА
ОСНОВЕ СУБДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра техники и технологии
по специальности 1-39 81 03
«Информационные радиотехнологии»

П. Глинка

Научный руководитель
Козлов Сергей Вячеславович
доктор технических наук, доцент

Минск 2020

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени во многих областях радиоэлектроники, таких как радиосвязь, радиолокация, радионавигация, телеметрия, звуко- и видеозапись, автоматизированное управление и т. п. широкое распространение для обработки, передачи и хранения информации получила дискретная и цифровая техника. Принципиальная особенность функционирования такой техники заключается в необходимости дискретизации электрических сигналов, то есть замены непрерывных (аналоговых) сигналов их дискретными значениями (отсчётами) в фиксированные моменты времени. Основанием правомочности дискретизации служит теорема Котельникова, иногда называемая теоремой отсчётов, указывающая конкретный способ осуществления дискретизации сигналов и последующего их восстановления по дискретным отсчётам. Однако теорема Котельникова подразумевает необходимость соблюдения ряда условий, выполнение которых на практике невозможно. Так, сигналы, имеющие конечную длительность, не могут обладать ограниченным по ширине спектром, а характеристики реальных восстанавливающих фильтров всегда отличаются от характеристик идеальных фильтров. Эти и другие обстоятельства приводят к возникновению погрешности при восстановлении сигнала по его дискретным отсчётам. Величина погрешности существенным образом зависит от частоты дискретизации исходного непрерывного сигнала и характеристик восстанавливающего фильтра.

Одним из приложений цифровой обработки сигналов является создание приемной аппаратуры средств радиомониторинга (РМ). Поиск сигналов в аппаратуре РМ всегда был сложной технической задачей, так как вид и параметры полезного сигнала изначально неизвестны, а несущая частота может иметь неопределенность в диапазоне сотен МГц – единиц ГГц. Для решения этой задачи используются многочисленные типы приемных устройств, однако решение задачи надежного обнаружения априори неизвестных сигналов в широкой полосе частот с минимальными аппаратурными затратами в настоящее время не достигнуто.

Одной из центральных задач РМ является обнаружение и оценка центральных частот спектров априори неизвестных узкополосных сигналов в широкой полосе частот. Известные методы решения этой задачи (многоканальный приёмник, БПФ и т.д.) имеют низкое быстродействие либо большие затраты на реализацию. Перспективным является метод определения частоты на базе меандр-фильтров. Экономичные варианты построения таких фильтров неизвестны и требуется их обоснование.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности подсистемы определения частоты средств радиомониторинга за счёт обоснования быстродействующего метода определения частоты на базе меандр-фильтров с субдискретизацией принимаемых сигналов.

Объект исследования — подсистемы определения частоты средств радиомониторинга.

Предмет исследования — структура, характеристики и алгоритмы функционирования меандр-фильтров на основе субдискретизации принимаемых сигналов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ принципов построения подсистем определения частоты средств радиомониторинга и требования к ним. Уточнение постановки задачи и исходных данных исследования.

2. Обоснование структур и алгоритмов функционирования меандр-фильтров с использованием эффекта субдискретизации принимаемых сигналов.

3. Разработка математической модели и исследование эффективности подсистемы определения частоты на базе меандр-фильтров.

4. Определение путей практической реализации и разработка рекомендаций по построению меандр-фильтров подсистемы определения частоты на основе субдискретизации принимаемых сигналов.

В процессе диссертационных исследований использовались методы теорий радиотехники, цифровой обработки сигналов, компьютерного моделирования и статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

Основные научные результаты исследований состоят в следующем:

– обоснован метод построения меандр-фильтров подсистем определения частоты средств радиомониторинга на основе субдискретизации принимаемых сигналов;

– разработана структура устройства определения частоты средств радиомониторинга на основе субдискретизации принимаемых сигналов;

– обоснованы параметры фильтров нижних (ФНЧ) и высоких (ФВЧ) частот в составе каналов меандр-фильтров подсистемы определения частоты средств радиомониторинга;

– исследована эффективность предлагаемого метода и реализующего его устройства.

Обоснование метода построения меандр-фильтров на основе эффекта субдискретизации принимаемых сигналов выполнено с учетом ограничений по практической реализации. Проведено иллюстративное исследование эффективности подсистем определения частоты на основе меандр-фильтров.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- обоснован метод построения цифровых меандр-фильтров подсистемы определения частоты, заключающийся в аналогоцифровом преобразовании принимаемой реализации сигналов и пропускании ее через набор цифровых фильтров, отличающийся дополнительными операциями прореживания полученной выборки в 2, 4, 8, ... раз с формированием соответствующего числа приемных каналов и использовании в каждом из каналов идентичных пар ФНЧ и ФВЧ с частотой среза, равной четверти частоты дискретизации и одинаковыми видами аппроксимации амплитудно-частотной характеристики, порядком фильтра и числом разрядов импульсной характеристики;

- установлено, что наилучшей эффективностью с позиций использования в подсистемах определения частоты обладают фильтры Баттерворта; достаточным является использование фильтров второго порядка при числе коэффициентов импульсной характеристики, равной 16.

Полученные научные результаты могут быть использованы при построении перспективных средств радиомониторинга.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на XXVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (РЛНС – 2019, г. Воронеж), 55-ой Юбилейной Научной Конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (2019 г.) и 56-ой Научной Конференции Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР (2020 г.).

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Диссертация содержит 39 рисунков, 4 таблицы. Объем диссертации составляет 73 страницы.

В приложении приведена программа для компьютерного моделирования и исследования эффективности подсистемы определения частоты на базе меандр-фильтров с субдискретизацией принимаемых сигналов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, отмечается новизна, формулируется цель и задачи работы, кратко излагается содержание диссертации и основные научные результаты исследований.

В первой главесистематизируются предъявляются требования к подсистемам определения частоты перспективных систем радиомониторинга и создания активных помех, рассматриваются примеры структурных схем подсистем определения частоты. Поясняется сущность и алгоритм функционирования подсистемы определения частоты на базе меандр-фильтров.

Вторая глава посвящена обоснованию структур и алгоритмов функционирования меандр-фильтров с использованием эффекта субдискретизации принимаемых сигналов. В частности, раскрывается сущность субдискретизации принимаемых сигналов и рассматриваются их спектры, затем раскрывается структура и алгоритм функционирования набора цифровых меандр-фильтров на основе субдискретизированной выборки принимаемых сигналов, здесь делается вывод о том, что любые ФНЧ не идеальны. Возможны ситуации неправильного определения частоты, так как крутизна спада АЧХ не бесконечна, и сигнал, центральная частота спектра может вызвать заметный отклик на выходе фильтра и разряд кода частоты будет определен неправильно. Если внести в каждый канал устройства цифровой ФВЧ с той же граничной частотой, что и частота среза ФНЧ, и с помощью схемы сравнения сигналов на выходах фильтров анализировать амплитуду сигналов (определять наибольшее значение), то вероятность определения частоты увеличится (рисунок 1).

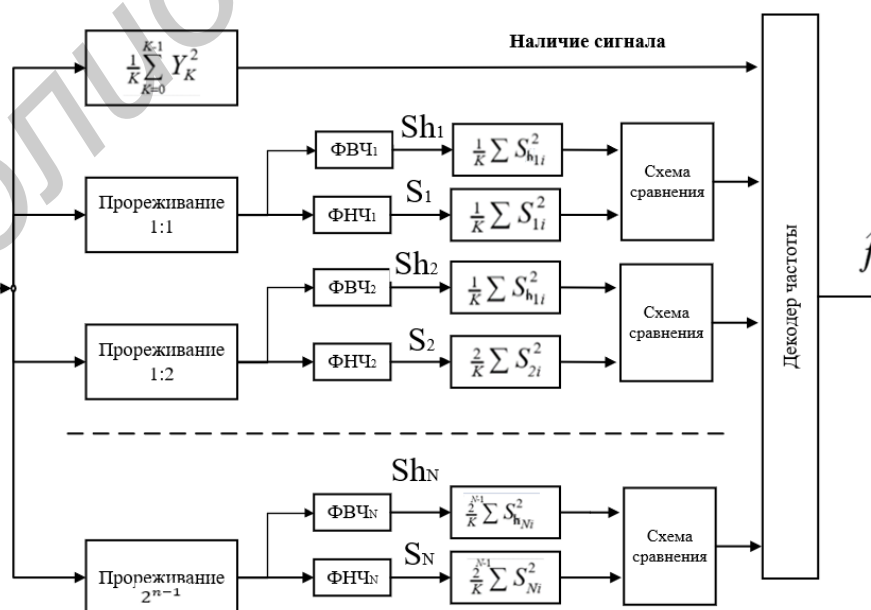


Рисунок 1– Структурная схема устройства определения частоты на базе цифровых меандр-фильтров (ФНЧ и ФВЧ) с субдискретизацией

В третьей главе приведены структура и принципы построения имитационной математической модели для исследования эффективности подсистемы определения частоты на базе меандр-фильтров, Общая структура процедуры моделирования приведена на рисунке 2. Непосредственно программа для моделирования в среде компьютерной математики *MathCad*

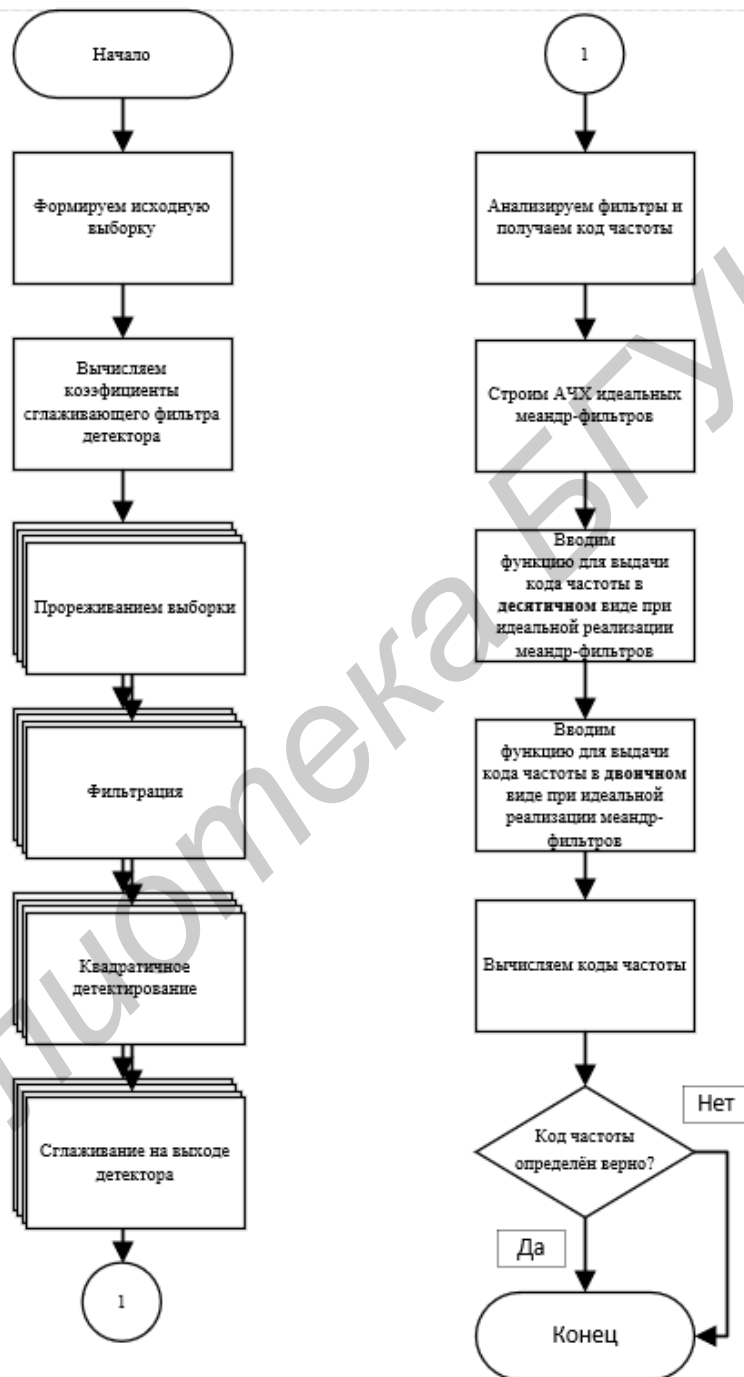


Рисунок 2 Общая структура процедуры моделирования

Для проверки результата строится модель идеальных меандр-фильтров (ФНЧ и ФВЧ) и сигнал пропускается через эти фильтры, после получаем такой же код частоты в двоичном представлении, заранее преобразовав из десятичной

формы представления и сравниваем получившиеся коды, если они равны, то код частоты определён верно

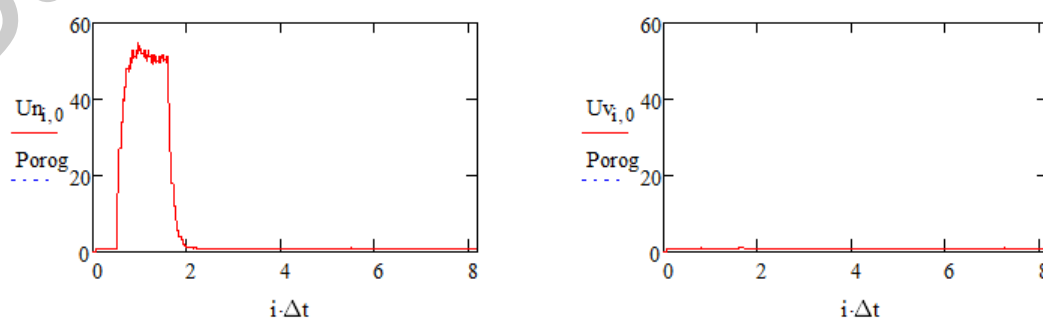
Для контроля правильности моделирования осуществлялось построение графиков зависимостей амплитуд сигнала от времени с прореживанием по частоте и сравнение с результатом идеальных фильтров.

В каждой реализации формируется исходная выборка. Для этого разыгрываются сигнал с заданной амплитудой, но со случайными длительностью T , несущей частотой f_c , временным положением t_z и начальной фазой φ . На этот сигнал накладывался гауссовский белый шум – последовательность независимых нормально распределённых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичным средним квадратическим отклонением (амплитуда сигнала нормируется к СКО шума). Затем вычисляем коэффициенты сглаживающего фильтра детектора, следующим шагом мы прореживаем сигнал, после прореживания сигнал подаётся на параллельно установленные ФНЧ и ФВЧ. Далее сигнал поступает на квадратичный детектор, который фиксирует полученные значения на выходе фильтров, затем происходит сглаживание сигнала на выходе квадратичного детектора. После всех стадий обработки сигнала мы имеем на выходе по 2 сигнала после ФНЧ – $U_n = U_0$ и ФВЧ – $U_m = U_1$ каждой степени прореживания. Теперь полученные сигналы необходимо проанализировать и получить двоичный код частоты.

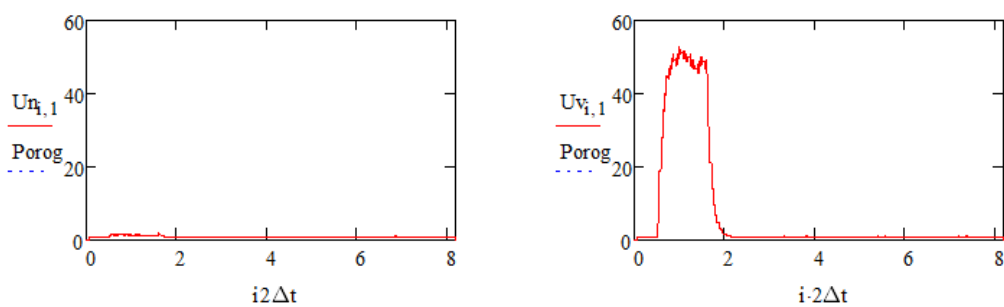
Результат апробации модели мы можем увидеть на скриншотах графиков из программы Mathcad, изображённых на рисунке 3.

Рассматривалась ситуация наличия прямоугольного радиоимпульса с частотой несущей $f_c=153$ МГц при частоте дискретизации 1000 МГц. Слева приведен выход подканала с ФНЧ, справа – с ФВЧ.

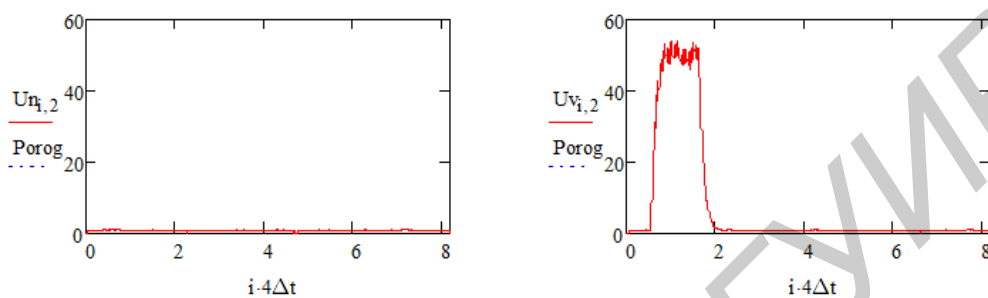
Как видно из рис. 3, сигналы на выходах подканалов дают однозначную оценку частоты. Полученный код (для восьми каналов) будет: 10010110 для частоты $f_c=153$.



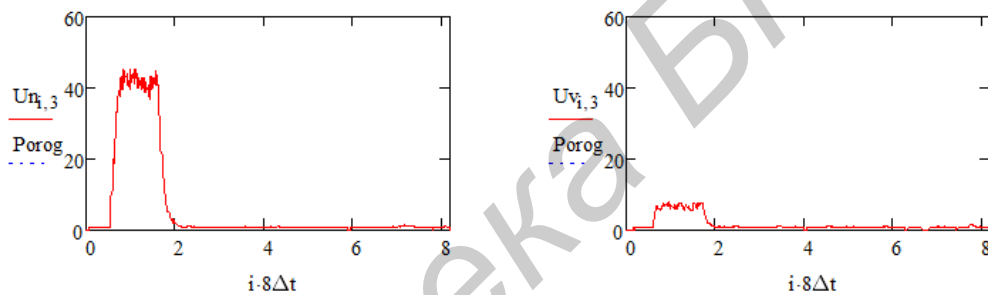
а) сглаженные сигналы на выходе первого канала (без прореживания)



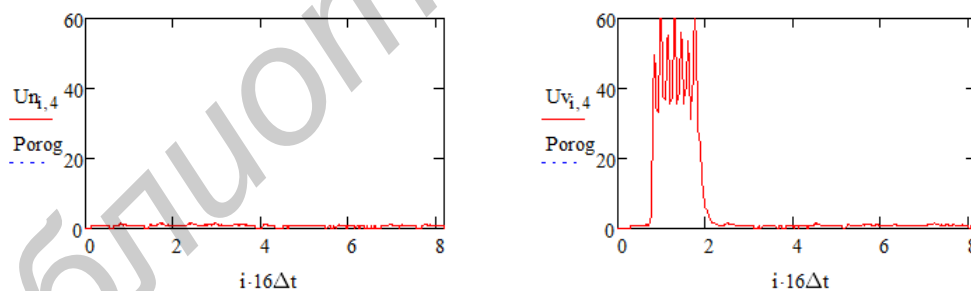
б) сглаженные сигналы на выходе второго канала (прореживание в 2 раза)



в) сглаженные сигналы на выходе третьего канала (прореживание в 4 раза)



г) сглаженные сигналы на выходе четвертого канала (прореживание в 8 раз)



д) сглаженные сигналы на выходе пятого подканала (прореживание в 16 раз)

Рисунок 3. Сигналы на выходе сглаживающих цепей подканалов

Ввиду того, что реальные фильтры имеют конечную крутизну АЧХ в районе частоты среза, то могут быть погрешности при определении кода частоты. Для того чтобы определить истинное значение частоты в модели используются идеальные фильтры (ФНЧ), через которые так же пропускается сигнал. После пропускания заданного сигнала через систему идеальных меандр-фильтров мы получаем код частоты в десятичном виде,

преобразовываем десятичное представление частоты на выходе идеальных меандр-фильтров в двоичное с помощью функции преобразования, затем вычисляем код и сравниваем, если коды совпадают, то частота определена верно.

Важной частью главы является определение путей практической реализации, и разработка рекомендаций по построению меандр-фильтров подсистемы определения частоты на основе субдискретизации принимаемых сигналов. До произведения моделирования, были рассчитаны и проанализированы коэффициенты фильтры нижних верхних частот Баттерворта и Чебышева со следующими характеристиками:

- нормированная частота среза 0,250
- порядок фильтра: 2, 4, 6
- длина импульсной характеристики: 16, 24, 32.

Из полученных зависимостей видно, что, если частота сигнала превышает частоту среза фильтра, но близка к ней, фильтр пропускает сигнал. Поэтому он может обнаружиться на выходе ФНЧ и частота будет определена неверно. Особенно сильно это будет проявляться, если амплитуда сигнала большая. Далее на основе сравнения уровней сигналов на выходах фильтров можно правильно определить код частоты.

В результатах исследования эффективности подсистемы определения частоты на базе меандр-фильтров необходимо отметить, что выбор ФНЧ и ФВЧ очень важен так как от этого зависит правильность определения частоты принимаемого сигнала. В ходе моделирования в Mathcad была рассчитана вероятность правильного определения частоты, в ходе измерения менялись не только параметры фильтров и их виды, но и параметр сигнала, такой как амплитуда (10, 100, 1000). В таблице 1 приведены результаты оценки вероятности правильного определения частоты. Оценки получены методом Монте-Карло при достаточном (1000) числе реализаций.

Таблица 1 Оценки вероятности правильного определения частоты

Модель фильтра:	Фильтры ФНЧ и ФВЧ Баттерворта			Фильтры ФНЧ и ФВЧ Чебышёва		
	2	4	6	2	4	6
Порядок фильтра	2	4	6	2	4	6
Длина импульсной характеристики	16	24	32	16	24	32
Вероятность правильного определения частоты с 8 каналами и амплитудой 10	0.956	0.967	0,967	0,881	0,327	0,021

Вероятность правильного определения частоты с 8 каналами и амплитудой 100	0.978	0.977	0,972	0,88	0,334	0,046
Вероятность правильного определения частоты с 8 каналами и амплитудой 1000	0.982	0.973	0,97	0,879	0,3	0,042

Из приведенных значений можно сделать вывод, что наибольшая вероятность определения частоты принимаемого сигнала будет иметь место при использовании в ФНЧ и ФВЧ с аппроксимацией Баттерворта. Порядок фильтра не критичен и может быть выбран минимальным, равным 2. Длина импульсной характеристики также минимальна и равна 16. Вероятность правильного определения частоты достигает 0,95 при отношении сигнал/шум по напряжению 10 и несколько увеличивается при увеличении отношения сигнал/шум.

Фильтры Чебышева имеют гораздо более худшие характеристики и не обеспечивают требуемой вероятности правильного определения частоты. Причиной этого является асимметрия характеристик ФНЧ и ФВЧ относительно частоты среза.

Выигрыш в требуемом числе фильтров при применении данной системы по сравнению с параллельной системой на основе полосовых фильтров, перекрывающих заданный диапазон разведки, определяется формулой:

$$B_{\Phi} = \frac{N}{\log_2 N}. \quad (3.16)$$

и при большом числе разведываемых каналов является существенным. Например, при исследовании 32 каналов $B_{\Phi} > 6$. Быстродействие системы обнаружения на основе меандр-фильтров определяется длительностью переходных процессов в последнем (самом «узкополосном») фильтре и зависит от ширины его парциальной полосы пропускания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях перед средствами радиомониторинга ставится задача обнаружения и определения параметров импульсных, квазинепрерывных и непрерывных сигналов ИРИ. Используемый ранее вариант построения средства радиомониторинга, многоканальное по частоте приемное устройство и набор подключаемых при обнаружении сигнала на выходе канала приемника измерителей, не обеспечивает требуемое качество функционирования. Направлением совершенствования средств РМ на основе субдискретизации принимаемых сигналов является повышение ее точности в текущей радиоэлектронной обстановке за счет реализации метода построения с использованием меандр-фильтров.

Обоснован алгоритм функционирования устройства определения частоты средства радиомониторинга на базе меандр-фильтров с субдискретизацией сигналов, не имеющего аналогов и разработана имитационная математическая модели для исследования эффективности обработки сигналов в подсистемах определения частоты средств радиомониторинга на основе субдискретизации принимаемых сигналов при реализации предлагаемого алгоритма функционирования.

Проведено исследование подсистемы определения частоты на базе меандр-фильтров и её эффективности применения в условиях реальной радиоэлектронной обстановки методом математического моделирования и установлены следующие закономерности:

1) в качестве ФНЧ в каналах с учетом возможности попадания сигнала на стык амплитудно-частотных характеристик фильтра целесообразно использовать фильтры Баттерворта с максимальным спадом АЧХ и симметрией АЧХ ФНЧ и ФВЧ относительно частоты среза; эффективность определения частоты при использовании фильтров Чебышева гораздо ниже и не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

2) порядок фильтра определяется требованиями достижения заданной вероятности правильного определения центральной частоты с учетом вероятности попадания сигнала на стык частотных характеристик фильтров и ограничений по технической реализуемости; при использовании фильтров Баттерворта порядок может быть минимальным, равным 2

3) введение в устройство второй ветви, структурно идентичной первой, но содержащей вместо ФНЧ фильтры высоких частот (ФВЧ), позволяет на основе совместного анализа выходных сигналов в каждом подканале с высокой

достоверностью определять частоту; дальнейшее совершенствование данного устройства позволит определять факт наличия в принимаемой реализации более чем одного сигнала, а также, в некоторых случаях, грубо определять ширину спектра сигнала.

4) Определены пути практической реализации и разработаны рекомендации по построению меандр-фильтров подсистемы определения частоты на основе субдискретизации принимаемых сигналов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Глинка П.А. Козлов С.В. Построение меандр-фильтров подсистем определения частоты средств радиомониторинга на основе субдискретизации сигналов // «Радиолокация, навигация и связь» (РЛНС – 2019, г. Воронеж). Воронеж: ВГУ. 2019. С. 194-198.

2. Глинка П.А. Козлов С.В, Способ построения меандр-фильтров подсистем определения частоты с использованием субдискретизации сигналов. 55-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР 2020. Минск: БГУИР. 2019. С. 44-45.

3. Глинка П.А. Козлов С.В Построение устройства определения частоты средства радиомониторинга на базе меандр-фильтров с субдискретизацией сигналов 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР 2020. <https://www.bsuir.by/>