

На правах рукописи



Подстригаев Алексей Сергеевич

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МАТРИЧНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК
СРЕДСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ С ПОНИЖЕННОЙ
НЕОДНОЗНАЧНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена на кафедре «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, Лихачев Владимир Павлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, Дворников Сергей Викторович,
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
профессор

доктор технических наук, профессор, Еремеев Игорь Юрьевич,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
начальник кафедры технических средств комплексной разведки
ракетно-космических объектов

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «05» октября 2016 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «07» июля 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.03
кандидат технических наук, доцент



М. Е. Шевченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Средства радиотехнической разведки (РТР) используются в целях информационно-технического обеспечения войск радиоэлектронной борьбы (РЭБ) для выявления объектов противника и их технических характеристик. Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) средств РТР определяются приемными устройствами.

С учетом непрерывности развития радиолокационных средств необходимо определение основных тенденций развития и создание опережающего технического и технологического задела в построении средств РТР. Поэтому при создании приемника РТР необходимо учитывать приведенные ниже особенности.

Современные РЛС работают в широком диапазоне частот – от сотен мегагерц до десятков гигагерц. Потенциально широкий диапазон рабочих частот (ДРЧ) РЛС обуславливает необходимость использования в средствах РТР приемных устройств с широкой мгновенной полосой обзора.

Применение современными РЛС широкополосных сигналов (ШПС) требует использования соответствующей полосы пропускания аналоговой части приемника. При создании приемника РТР необходимо учитывать, что РЛС могут использовать короткие импульсы, вызывающие трудности при обнаружении и обработке.

В условиях сложной радиоэлектронной обстановки (РЭО) (например, при массированном применении РЛС) потоки импульсных сигналов на входе приемника РТР совпадают по времени прихода, вызывая неоднозначность определения частоты (НОЧ). Для идентификации и разделения источников радиоизлучения (ИРИ), определения типа, экземпляра и режима работы ИРИ необходимо достоверное обнаружение совмещенных по времени сигналов и их частотная селекция.

Важным вопросом при конструировании широкополосных приемных устройств (ШПрУ) РТР является унификация. ШПрУ должны быть универсальными для применения в существующих и перспективных средствах общей и исполнительной РТР (ОИРТР).

Принимая во внимание, что средства РТР должны работать преимущественно в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), а СВЧ-устройства, как правило, требуют макетирования и трудоемкой настройки, необходимо создание подхода, оптимизирующего процесс создания СВЧ-узлов приемника РТР.

Для удовлетворения всех требований в работе предложено использовать приемник, названный матрично-параллельным с пониженной НОЧ.

Таким образом, **объектом исследования** является ШПрУ ОИРТР радиолокационных сигналов. **Предметом исследования** является построение, технико-экономические показатели и технологические аспекты создания широкополосного матрично-параллельного приемника ОИРТР с пониженной НОЧ радиолокационных сигналов.

Научной задачей является поиск способов количественной оценки и снижения НОЧ, принципов построения и проектирования рационального по надежности, стоимости, технологичности проектирования и производства

ШПрУ, обеспечивающего прием ШПС и коротких импульсов, обладающего пониженной НОЧ и повышенной эффективностью в сложной РЭО, универсального для средств общей и исполнительной РТР.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования средств ОИРТР в сложной РЭО, улучшение их технико-экономических характеристик на основе разработки ШПрУ с повышенной пропускной способностью и пониженной НОЧ, рационального по надежности, стоимости, технологичности разработки и производства, отвечающего требованиям унификации в средствах ОИРТР.

Для достижения цели решались следующие **задачи исследования**:

1 Исследовать и систематизировать причины возникновения неоднозначности определения частоты (НОЧ) в приемнике матричного типа. Разработать и исследовать способы количественной оценки НОЧ.

2 Разработать способы снижения НОЧ. Исследовать и сравнить показатели эффективности известных и предложенных способов снижения НОЧ.

3 Разработать принципы построения и проектирования ШПрУ РТР, рационального по надежности и стоимости, обеспечивающего прием ШПС и коротких импульсов, обладающего пониженной НОЧ и повышенной эффективностью в сложной РЭО, универсального для средств ОИРТР.

4 Выявить и проанализировать новые закономерности, обусловленные структурой ШПрУ РТР. Выработать рекомендации по выбору рабочих, промежуточных и гетеродинных частот.

5 Разработать технические решения, повышающие технологичность проектирования и производства ШПрУ РТР.

Методы исследований. В работе использованы методы системного анализа и обобщения известных данных, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, вычислительной математики и программирования, элементы комбинаторики. Теоретические результаты проверены имитационным моделированием на ЭВМ и натурными экспериментами.

В работе получены следующие **научные результаты**:

1. Исследованы вопросы количественной оценки НОЧ, возникающей в матричном приемнике.

2. Впервые получены характеристики обнаружения ШПрУ РТР с учетом НОЧ, возникающей при попадании сигнала в смежную область соседних частотных каналов.

3. Впервые выполнен сравнительный анализ показателей эффективности способов снижения НОЧ матричного приемника, возникающей при попадании сигнала в смежную область соседних частотных каналов.

4. Предложен защищенный патентом РФ № 2587645 способ снижения НОЧ, возникающей при приеме совмещенных по времени и различных по частоте сигналов, снижающий вероятность пропуска сигнала и минимизирующий его задержку перед обработкой.

5. Исследованы принципы построения ШПрУ ОИРТР. Показано, что ШПрУ может быть выполнено на основе предложенной матрично-параллельной схемы с пониженной НОЧ, защищенной патентом РФ № 155553.

6. Предложено введение в состав обнаружителя линии задержки, исключаяющей потерю короткого импульса для обработки (патент РФ № 159589).

7. Разработаны принципы проектирования ШПрУ матрично-параллельного типа с пониженной НОЧ.

8. На основе защищенных патентом РФ № 2577805 технических решений улучшена технология настройки и проверки полосковых СВЧ-узлов ШПрУ.

Теоретическую ценность представляют: классификация НОЧ в матричном приемнике по причинам возникновения; принципы построения ШПрУ РТР; методика проектирования ШПрУ матрично-параллельного типа; методика оценки НОЧ, возникающей при попадании сигнала в смежную область соседних каналов.

Практическая ценность работы:

– разработанные предложения по построению и реализации ШПрУ РТР повышают эффективность средств РТР в сложной РЭО за счет уменьшения количества ложных тревог и увеличения пропускной способности;

– полученные в результате имитационного моделирования характеристики обнаружения матричного приемника РТР с учетом экспериментально полученных характеристик СВЧ-тракта позволяют уточнить вероятность правильного обнаружения сигнала при поддержании заданного уровня ложных тревог при попадании сигнала в смежную область соседних частотных каналов, что повышает достоверность анализа дальности РТР;

– предложения по построению и реализации средств снижения НОЧ, возникающей при приеме нескольких совмещенных по времени и разнесенных по частоте сигналов, попадающих в разные частотные каналы приемника, уменьшают вероятность пропуска радиолокационных сигналов и обеспечивают минимальное время анализа их параметров, что позволяет минимизировать время формирования ответной помехи в средствах исполнительной РТР и уменьшить вынос станций помех относительно объекта прикрытия;

– принципы реализации приспособления для снятия характеристик полосковых СВЧ-устройств, универсального для устройств с различными габаритными, присоединительными размерами и количеством выводов, повышающего оперативность настройки и проверки СВЧ-узлов ШПрУ РТР и обеспечивающего таким образом сокращение сроков создания опытного образца станции помех на 22...25 % и станции РТР на 19...22 %.

Достоверность результатов расчетов и моделирования подтверждается обоснованностью принятых моделей, методик, допущений и ограничений, адекватностью полученных результатов и их близостью к реальным величинам.

Внедрение результатов диссертации

Полученные в работе научные результаты внедрены в производственный процесс и разработки АО «БЭМЗ» (г. Брянск), ПАО «БСКБ» (г. Брянск), ОАО «НВП «ПРОТЕК» (г. Воронеж), АО «КЗРТА» (г. Калуга), учебный процесс БГТУ (г. Брянск), ЧВВИУРЭ (г. Череповец).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Классификация НОЧ в матричном приемнике по причинам возникновения.

2. Методика расчета вероятности ложной тревоги в матричном приемнике с учетом обнаружения сигнала за пределами частотных каналов, позволяющая количественно оценить НОЧ, возникающую при попадании сигнала в смежную область соседних частотных каналов.

3. Принципы построения ШПрУ матрично-параллельного типа, универсального для средств общей и исполнительной РТР.

4. Технология настройки и проверки СВЧ-узлов, повышающая оперативность проектирования и производства ШПрУ и сокращающая таким образом сроки создания опытного образца станции помех на 22...25 % и станции РТР на 19...22 %.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы рассматривались и обсуждались на 11 конференциях: Региональной молодежной научно-технической конференции «Электроника в XXI веке», г. Брянск (2012 г.), МНТК «Наука, Техника, Инновации 2014», г. Брянск (2014 г.), II международной научной конференции «Технические науки: проблемы и перспективы», г. Санкт-Петербург (2014 г.), Международной конференции-конкурсе «Новые горизонты», г. Брянск (2014 г.), третьей всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург (2014 г.), 18-м и 19-м Международных молодежных форумах «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», г. Харьков, Украина (2014, 2015 гг.), X Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск (2014 г.), 24-й и 25-й Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь (2014, 2015 гг.), II Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения», г. Воронеж (2014 г.)

За результаты исследований и разработки по теме диссертации получены дипломы победителя областных конкурсов: «Инженер года Брянской области-2013», «На лучшее изобретение и рационализаторское предложение в 2015 году», «Инновационных товаров, созданных на предприятиях и в организациях Брянской области в 2015 году».

Личный вклад. Автор диссертации является соавтором лежащих в основе диссертации патентов на изобретения и полезные модели, программы для ЭВМ, а также научных статей, в которых отражены основные результаты работы. Экспериментальные данные по характеристикам приемного устройства и приспособления для настройки СВЧ-устройств получены автором лично.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 23 научные работы: 4 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ; 2 патента на изобретение; 2 патента на полезную модель; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 1 учебное издание; 12 работ в сборниках материалов конференций и 1 статья в издании, не входящем в Перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и трех приложений. Основная часть работы изложена на 149 страницах, содержит 26 рисунков и 3 таблицы. Список используемой литературы включает 147 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор известных научных результатов по теме диссертации, обоснована актуальность работы. Сформулированы цель и задачи работы. Определены теоретическая и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена анализу и обобщению принципов построения приемников РТР и технологий обработки сигнала. Показано, что целесообразной для построения приемника РТР является матричная схема, поскольку при приемлемых массогабаритных характеристиках она, в отличие от других схем, обладает устранимыми недостатками: 1) НОЧ различного рода; 2) относительно высокие массогабаритные характеристики; 3) внутрисистемные помехи, вызванные просачиванием мощных сигналов гетеродинов в приемный СВЧ-тракт; 4) низкая технологичность процессов настройки и проверки СВЧ-узлов; 5) невысокая надежность; 6) потеря для дальнейшей обработки короткого импульсного сигнала, а также передней части длинного импульсного сигнала за время срабатывания обнаружителя и открытия частотного канала. Вопросам устранения и уменьшения влияния недостатков посвящены последующие главы. В заключении главы 1 сформулирована научная задача исследования.

Во второй главе с системных позиций исследована проблема неоднозначности определения частоты в матричном приемнике.

Предложена классификация НОЧ по причинам возникновения: 1) наличию паразитных полос пропускания СВЧ-фильтров (НОЧ-1); 2) малой крутизне АЧХ канальных фильтров (НОЧ-2); 3) приему совмещенных по времени сигналов на двух и более частотах (НОЧ-3); 4) возникновению в нелинейных элементах СВЧ-тракта гармоник сигнала в рабочей полосе частот (НОЧ-4).

Разработаны два способа количественной оценки НОЧ-2: с учетом статистических параметров смеси сигнала с шумом и без.

В первом способе для оценки величины НОЧ-2 используется вероятность ложной тревоги (ЛТ) приемника $P_{\text{лт пр}}'$, уточненная с учетом обнаружения сигнала за пределами частотных каналов. Разработана методика расчета $P_{\text{лт пр}}'$.

В общем случае, если сигнал попадает на стыки каналов в каждой ступени матричного приемника, выражение для $P_{\text{лт пр}}'$ имеет вид:

$$P_{\text{лт пр}}' = \sum_{i=1}^M P_{\text{лт Л}\Sigma i}' - \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P_{\text{лт Л}\Sigma i}' P_{\text{лт Л}\Sigma j}' + \sum_{k=1}^{M-2} \sum_{j=1+k}^{M-1} \sum_{i=1+j}^M P_{\text{лт Л}\Sigma i}' P_{\text{лт Л}\Sigma j}' P_{\text{лт Л}\Sigma k}' - \dots + (-1)^{L-1} \prod_{p=1}^L P_{\text{лт Л}\Sigma p}', \quad (2)$$

где $P_{\text{лт Л}\Sigma}' = P_{\text{лт1}}' + (1 - P_{\text{лт1}}') \left[\frac{(L-1)!}{1!(L-2)!} P_{\text{лт}l} - \frac{(L-1)!}{2!(L-3)!} P_{\text{лт}l}^2 + \frac{(L-1)!}{3!(L-4)!} P_{\text{лт}l}^3 - \frac{(L-1)!}{4!(L-5)!} P_{\text{лт}l}^4 + \dots + (-1)^{L-2} \frac{(L-1)!}{(L-2)!1!} P_{\text{лт}l}^{L-2} \right] + (-1)^{L-1} (L-1) P_{\text{лт}l}^{L-1}$ – вероятность ЛТ

L -канальной ступени ($P_{\text{лт1}}'$ и $P_{\text{лт}l}$ – вероятности ЛТ в первом и l -ом каналах). Знак «штрих» означает учет НОЧ-2, т.е. рассмотрение характеристик канала и

сигналов за границами канала. Частотные характеристики каналов в пределах ступени приняты одинаковыми.

Вероятность ЛТ в канале l без учета НОЧ-2 определяется известным выражением

$$P_{\text{лт}l} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{h - T_{\text{н}} \Delta f_{\text{ш}}}{\sqrt{2T_{\text{н}} \Delta f_{\text{ш}}}} \right) \right],$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – интеграл

вероятностей, h – порог обнаружения, N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности белого шума, $T_{\text{н}}$ – время наблюдения входного процесса, $\Delta f_{\text{ш}} \approx 1,1\Delta f_l$ – шумовая полоса канала l (Δf_l – полоса пропускания канала по уровню минус 3 дБ).

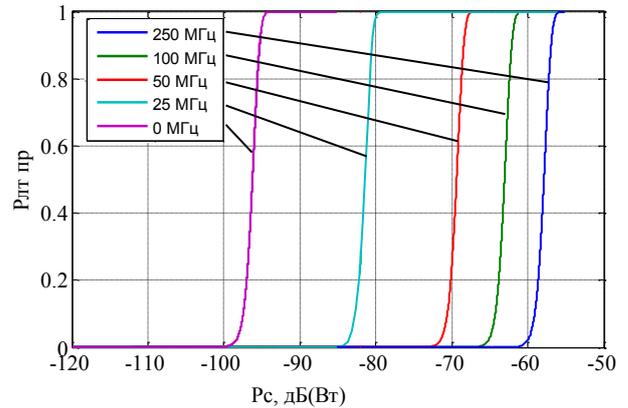


Рисунок 1 – Зависимость вероятности ложной тревоги матричного приемника от мощности сигнала $P_{\text{лт пр}}'(P_c)$ при удалении несущей сигнала от границы канала Δf_{l-1}

Вероятность ЛТ в канале l с учетом НОЧ-2 равна

$$P_{\text{лт}l}' = 1 - \frac{1}{4} \left[1 + \Phi \left(\frac{h - T_{\text{н}} \Delta f_{\text{ш}}}{\sqrt{2T_{\text{н}} \Delta f_{\text{ш}}}} \right) \right] \left[1 + \Phi \left(\frac{h - T_{\text{н}} \Delta f_{\text{ш}} - \frac{Q_l'}{N_0}}{\sqrt{2 \left(T_{\text{н}}^2 \Delta f_{\text{ш}}^2 + \frac{Q_l'}{N_0} \right)}} \right) \right],$$

где $Q_l' = \int_0^{T_{\text{н}}} s_l^2(t) dt$ – энергия, выделяемая полезным сигналом на выходе канала l за время наблюдения $T_{\text{н}}$.

Для двухступенчатого приемника, вторая ступень которого построена по принципу многоканального приемника без преобразования частоты, выражение (2) упрощается:

$$P_{\text{лт пр}}' = P_{\text{лт ЛС1}}' + P_{\text{лт ЛС2}} - P_{\text{лт ЛС1}}' P_{\text{лт ЛС2}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{лт ЛС2}}$ – вероятность ложной тревоги второй ступени без учета НОЧ-2.

Выражение (3) также описывает вероятность ЛТ в приемнике, если во второй ступени используется перенос частоты, но сигнал не попадает на стыки каналов (или его влияние настолько мало, что им можно пренебречь).

На основе предложенного способа оценки НОЧ-2 разработана программа, с помощью которой с учетом измеренных характеристик СВЧ-тракта матричного приемника получены его вероятностные характеристики (рис. 1, 2).

Показано (рис. 1) существенное увеличение вероятности ЛТ при учете НОЧ-2. Так, при отстройке от границы канала на 50 МГц повышение мощности сигнала в одном из каналов на 15 – 20 дБ (т.е. уменьшение дальности до объекта РТР в 5,6 – 10 раз, что характерно для РЛС воздушного базирования) относи-

тельно уровня чувствительности приводит к росту вероятности ЛТ на 2 – 3 порядка. Это обусловлено просачиванием сигнала в соседний канал. Повышение мощности сигнала на величину 30 – 40 дБ (т.е. уменьшение дальности до объекта РТР в 31,6 – 100 раз, характерное, например, для РЛС на беспилотных летательных аппаратах) от уровня чувствительности приводит к безусловной ЛТ.

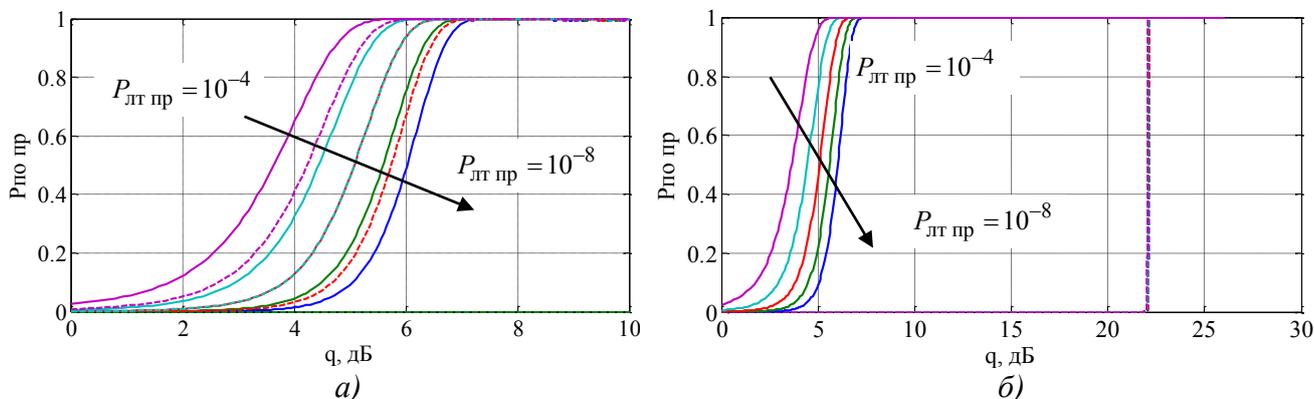


Рисунок 2 – Характеристики обнаружения: сплошная линия – без учета НОЧ-2; пунктирная линия – с учетом НОЧ-2 при отстройке частоты сигнала от границы канала $\Delta f_{l-1} = 50$ МГц и уровне сигнала: а) $P_c = (P_0 + 25)$ дБ(Вт); б) $P_c = (P_0 + 50)$ дБ(Вт)

Полученные в результате численного моделирования и представленные на рис. 2 характеристики обнаружения (с учетом НОЧ-2 при фиксированной $P_{\text{лт пр}}$ для больших и малых уровней мощности мешающего сигнала в смежной области соседних частотных каналов) позволяют: 1) уточнить вероятность правильного обнаружения сигнала при поддержании заданной $P_{\text{лт пр}}$ в случае нахождения частот сигнала в смежной области соседних частотных каналов; 2) оценить, насколько необходимо поднять порог обнаружения в присутствии мощного мешающего сигнала в диапазоне рабочих частот, чтобы поддерживать $P_{\text{лт пр}}$ на заданном уровне.

Для определения погрешности оценки НОЧ-2 в сложной РЭО получены зависимости вероятности ЛТ приемника РТР от мощности сигнала при удалении несущей сигнала от границы канала – при попадании сигнала в один канал и в 20 каналов. Поскольку разница в полученных значениях для рассмотренного ШПрУ не превысила 3 дБ, результаты оценки НОЧ-2 по предложенной методике можно считать достоверными при исследовании его работы в сложной РЭО.

Также предложен способ оценки величины НОЧ-2 по ширине полосы неоднозначности $\Delta f_{\text{НОЧ-2}} = \left[2(L-1)(P_{\text{вх}} - q - P_0) / (S \Delta f_{\text{рч}}) \right] \cdot 100\%$, где $P_{\text{вх}}$ – мощность входного сигнала, q – отношение сигнал-шум, P_0 – чувствительность приемника, S – крутизна скатов АЧХ каналов, $\Delta f_{\text{рч}}$ – ДРЧ приемника. В полосе $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$ мощность входного сигнала с учетом крутизны АЧХ канальных фильтров превышает реальное значение чувствительности и приводит к ЛТ.

Выполнен сравнительный анализ показателей эффективности двух способов снижения НОЧ-2: разделения каналов на две группы с отдельной обработкой сигналов в пределах каждой группы и использования устройства измерения частоты (УИЧ), выполняющего дополнительные измерения частоты на

стыках частотных каналов. В качестве показателей выбраны: ширина полосы неоднозначности $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$, вероятность ЛТ приемника $P_{\text{лт пр}}$ и выигрыш в отношении сигнал-шум Δq . При сравнении цифровым методом протестированных сигналов с выходов соседних каналов полосу неоднозначности предложено определять по выражению $\Delta f_{\text{НОЧ-2}} = \Delta_{\text{АЦП}}/S$, где $\Delta_{\text{АЦП}}$ – разрешающая способность АЦП, установленного на выходе канала после детектора. В полосе $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$ сигналы в соседних частотных каналах не различаются. Оценка по полосе $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$ показывает большую эффективность разделения каналов на группы, поскольку ширина $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$ для этого способа в 23 раза уже ширины $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$, возникающей при использовании УИЧ. Однако, на основе анализа других показателей можно сделать вывод о приблизительно одинаковом эффекте от использования обоих средств снижения НОЧ-2. Отличие проявляется только вблизи стыка частотных каналов.

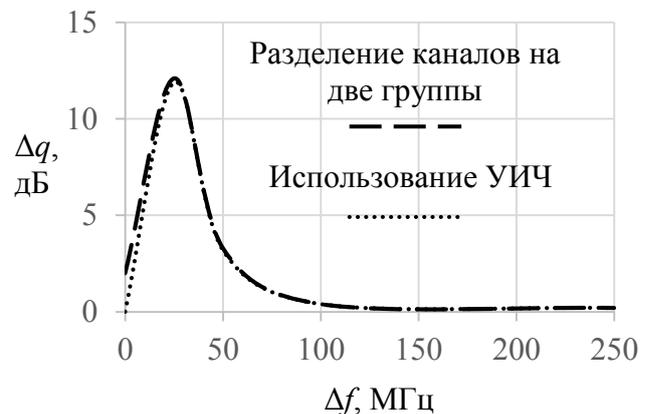


Рисунок 3 – Зависимость выигрыша в отношении сигнал-шум от удаления несущей сигнала от границы канала при использовании средств снижения НОЧ-2

Наибольшую наглядность дает оценка эффективности по выигрышу в отношении сигнал-шум Δq (рис. 3). Показано, что при приеме импульсного сигнала максимальный положительный эффект от использования средств снижения НОЧ-2 достигается в полосе вблизи границы частотного канала и заключается в том, что для заданной $P_{\text{лт пр}}$ мощность мешающего сигнала (или отношение «мешающий сигнал-шум») в соседнем канале может быть больше на величину Δq .

Для снижения НОЧ-3, возникающей в матричном приемнике при приеме совмещенных по времени сигналов, предложено техническое решение, основанное на уточнении измеренных матричным приемником значений частот путем их сопоставления с частотами, определенными УИЧ (рис. 4), дополнительно подключенным ко входу ШПрУ.

Для двухступенчатого приемника целесообразен вариант построения УИЧ, в котором количество K каналов УИЧ на один превышает количество L_1 каналов первой ступени матричного приемника ($K = L_1 + 1$). Ширина по-

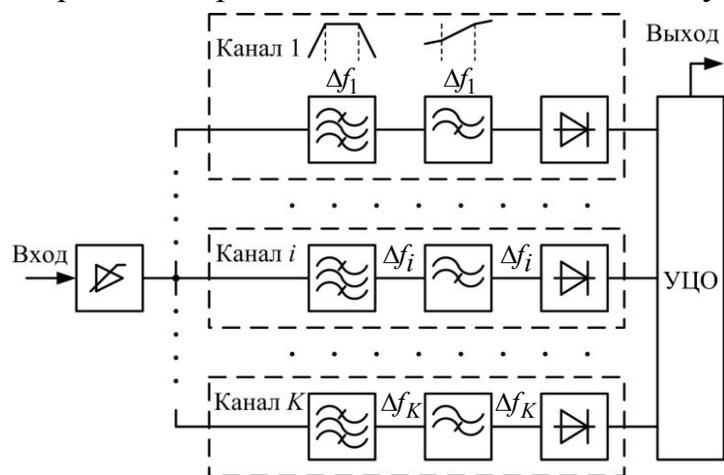


Рисунок 4 – Устройство измерения частоты

лосы пропускания (ПП) канала УИЧ соответствует ширине ПП канала первой ступени. Середины ПП каналов УИЧ соответствуют границам каналов первой ступени приемника.

Максимально возможное количество одновременно обрабатываемых сигналов, для которых снижается НОЧ, соответствует количеству каналов УИЧ. Пропуск сигнала ввиду параллельного обзора и отсутствия линий задержки исключен. Задержка сигнала определяется инерционностью используемых устройств и для решаемых задач пренебрежимо мала. Отсутствие задержки сигнала обеспечивает минимальное время до принятия ответных действий.

В третьей главе обоснованы принципы построения и проектирования ШПрУ РТР, построенного на основе предложенной обобщенной матрично-параллельной схемы, защищенной патентом РФ (рис. 5). Приемник назван матрично-параллельным, т.к. за основу взята матричная схема, выход которой разделен на группы параллельно включенных каналов, на выходе каждой из которых сигнал может быть обработан отдельно. Схема дополнена решениями, направленными на улучшение технических характеристик приемника.

Для снижения НОЧ-1 обнаружители сигнала установлены в тракте промежуточной частоты (ПЧ), а также с помощью режекторных фильтров выполнено подавление паразитных полос пропускания фильтров ПЧ. Это позволяет исключить ложное определение частоты при прохождении в тракт ПЧ сигнала гетеродина и сигналов, перенесенных в паразитные полосы ПЧ из паразитных полос каналов. Уменьшение величины НОЧ-2 обеспечено разделением каналов на группы. Для снижения НОЧ-3 ко входу приемника подключено УИЧ. Для снижения НОЧ-4 необходимо использовать УРЧ, линейный в заданном ДД входного сигнала. При невозможности выполнения данного требования используется аттенюатор.

Снижение уровня вызванных работой гетеродинов внутрисистемных помех обеспечивается путем использования резистивных смесителей с субгармонической накачкой. Упрощение схемно-конструктивного построения ШПрУ достигается: подключением каждого гетеродина к двум смесителям; уменьшением количества каналов ВЧ и гетеродинов за счет дополнительного разбиения на каналы в диапазоне ПЧ.

Для развязки параллельных каналов, подключенных к одному гетеродину, введены узкополосные фильтры, настроенные на частоту гетеродина f_r .

Значительное увеличение чувствительности ШПрУ достигается запиранием частотных каналов ШПрУ в отсутствие сигнала и их открыванием при превышении входным сигналом заданного порога.

Для исключения потери короткого импульса для обработки предложено защищенное патентом РФ техническое решение, основанное на введении в состав обнаружителя линии задержки.

С целью сопряжения по частоте сигнала на выходе приемника в выходных поддиапазонах ПЧ $\Delta f_{ПЧ1}$, $\Delta f_{ПЧj}$, ..., $\Delta f_{ПЧG}$ с устройством обработки сигнала (УОС) при необходимости устанавливаются преобразователи частоты (ПРЧ).

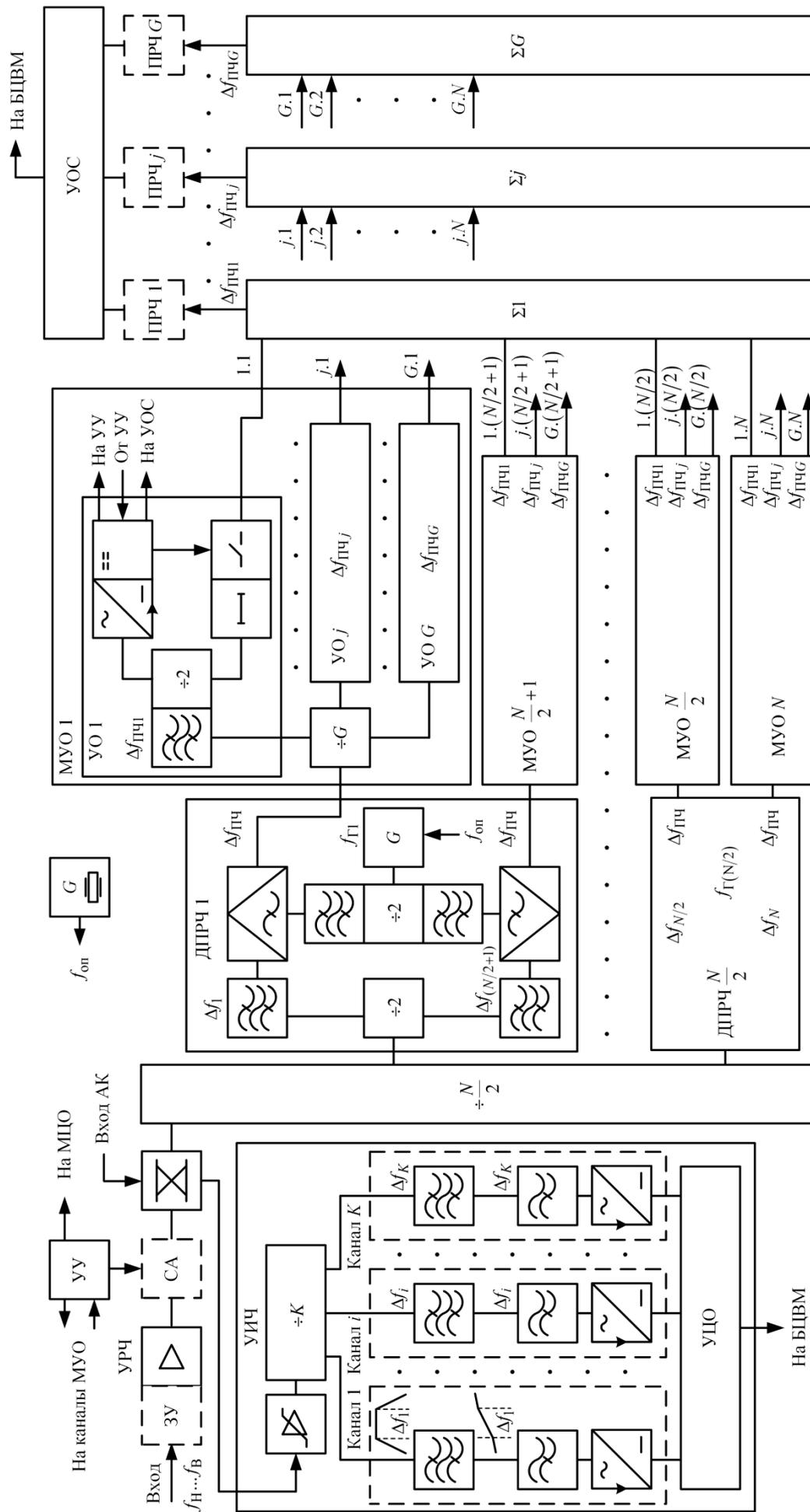


Рисунок 5 – Обобщенная структурная схема приемного устройства матрично-параллельного типа с устройством обработки сигнала ПЧ

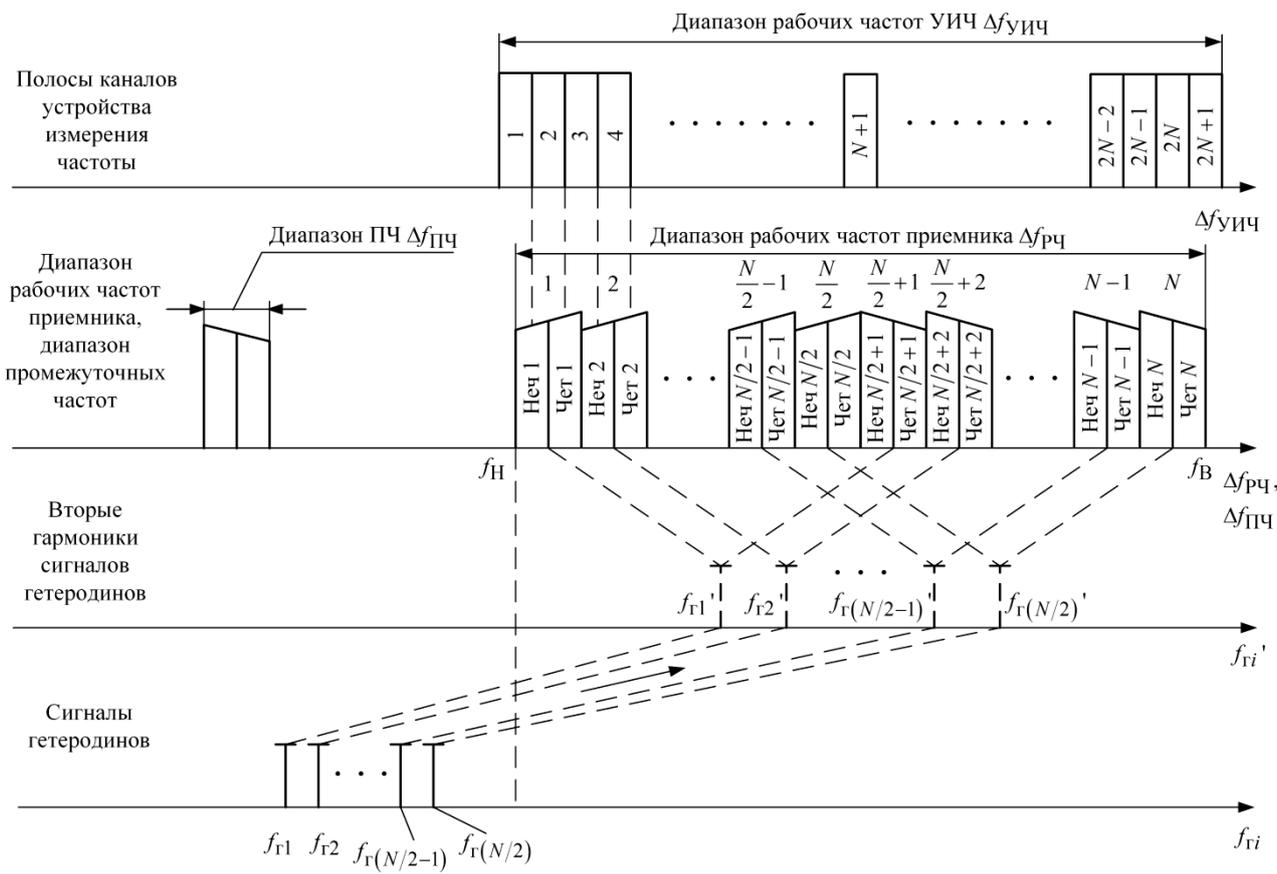


Рисунок 6 – Частотный план приемного устройства матрично-параллельного типа

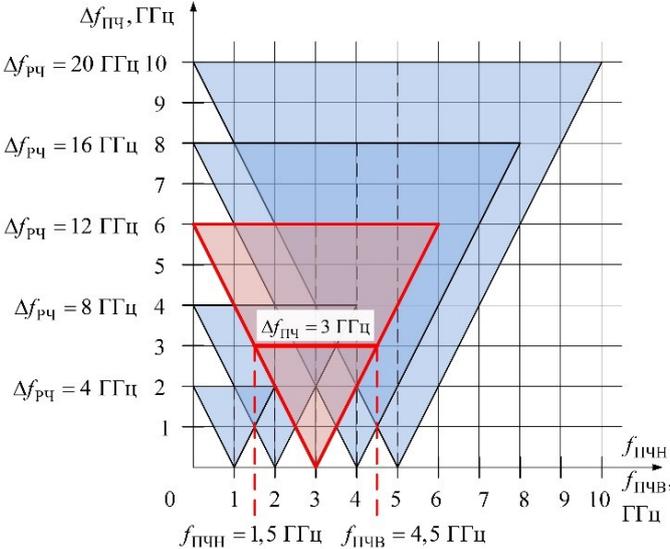


Рисунок 7 – Номограмма выбора границ и ширины полосы ПЧ по заданной ширине полосы рабочих частот

Исходя из решаемых приемником в составе средств ОИРТР задач выбирается тип УОС и количество каналов обработки УОС G , зависящее от требуемого количества одновременно обрабатываемых сигналов. Это позволяет унифицировать СВЧ-часть приемных каналов средств ОИРТР.

Частотный план ШПрУ (рис. 6) описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} f_{ПЧ} = \pm(f_{ck} - 2f_{Гi}); \\ 0 \leq f_{ПЧ} < f_{Гi} < f_H, \end{cases} \quad (6)$$

где $f_{ПЧ}$ – промежуточная частота, f_{ck} – частота входного сигнала, обрабатываемого в k -м канале ДПРЧ ($k = \overline{1, N}$), $f_{Гi}$ – частота гетеродина i -го ДПРЧ ($i = \overline{1, N/2}$), f_H – нижняя граница ДРЧ приемника.

На основе анализа реализаций частотного плана матрично-параллельного приемника в разных частотных исполнениях выявлена закономерность в соотношении рабочих и промежуточных частот: $\Delta f_{РЧ} = 2(2f_{ПЧН} + \Delta f_{ПЧ})$ или

$\Delta f_{\text{РЧ}} = 2(f_{\text{ПЧН}} + f_{\text{ПЧВ}})$, где $f_{\text{ПЧН}}, f_{\text{ПЧВ}}$ – границы диапазона ПЧ (ДПЧ) $\Delta f_{\text{ПЧ}}$.

Согласно закономерности для заданной ширины ДРЧ существует оптимальное соотношение между шириной и граничными частотами ДПЧ. Показано, что при проектировании ШПрУ, исходя из заданной полосы ПЧ, также существует оптимальная полоса рабочих частот, уже и шире которой предложенная структура ШПрУ нереализуема. Поэтому расчет целесообразно вести, исходя из заданной полосы рабочих частот ШПрУ, а полученный в результате ДПЧ, при необходимости, согласовывать со входным частотным диапазоном УОС посредством ПРЧ. Для упрощения выбора границ ДПЧ построены номограммы (рис. 7).

Показана возможность понижения промежуточных частот за счет параллельного включения нескольких схем.

Полученные закономерности и номограммы положены в основу разработанной методики проектирования ШПрУ матрично-параллельного типа. В целом методика основана на известных соображениях и существующих методиках проектирования, но дополнена с учетом технических особенностей схемы: необходимости выбора типа УОС и количества каналов обработки, частотного сопряжения выходного сигнала с УОС, использования множества каналов обработки, средств снижения НОЧ, а также ограничений, налагаемых требованиями к четности количества преобразовательных каналов и отсутствию гетеродинных частот в ДРЧ.

В главе 4 на практике исследована НОЧ и измерены характеристики матричного приемника РТР. Параметры подаваемого на вход сигнала: длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 2$ мкс; период повторения $T = 10$ мкс; мощность $P = (P_0 + 40)$ дБ, где P_0 – чувствительность приемника. На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. НОЧ-1 присутствует в верхней части ДРЧ. При этом сигнал попадает во вторую (паразитную) ПП каналов №№ 1 – 4 и переносится в диапазон ПЧ.

2. НОЧ-2 присутствует в полосе до 180 МГц для каждого соседнего канала первой ступени.

3. В приемнике возникает НОЧ-4. Зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(P_{\text{ВХ}})$, полученные для основной частоты сигнала и второй гармоники, представлены на рис. 8. Анализ схемы показал, что данное явление вызвано гармониками во входном усилителе приемника.

Учитывая, что проектирование средств РТР является многоитерационным процессом, требующим значительных временных затрат на отладку и проверку СВЧ-узлов, для ускорения и упрощения проектирования обоснованы принципы совершенствования техноло-

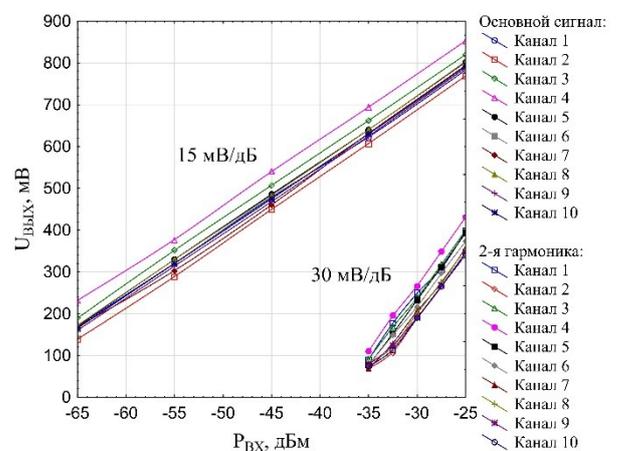


Рисунок 8 – Зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(P_{\text{ВХ}})$ для основного сигнала и второй гармоники

гии настройки и проверки полосковых СВЧ-узлов. Разработано универсальное технологическое приспособление, позволяющее устанавливать полосковые СВЧ-устройства, независимо от количества и расположения входов/выходов СВЧ-энергии, вводов питания и управления. Экспериментально исследованы способы крепления СВЧ-устройств на приспособлении. Обоснована эффективность крепления способом прижатия по сравнению со способами пайки и установки перемычки. В результате использования технологии показано сокращение времени создания опытного образца перспективной станции помех на 22...25 % и станции РТР на 19...22 %.

На основе разработанных принципов построения и проектирования разработан унифицированный приемный модуль (УПМ) ОИРТР. Показана технико-экономическая эффективность УПМ по критерию «эффективность-стоимость».

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Предложена экспериментально подтвержденная классификация неоднозначности определения частоты по причинам ее возникновения.

2. Разработаны способы оценки величины НОЧ-2. Разработана зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ программа, реализующая способ оценки НОЧ-2, учитывающий статистические параметры сигнала и шума.

3. Выполнен сравнительный анализ эффективности двух средств снижения НОЧ-2: использования УИЧ и разделения каналов на две группы. Показан больший эффект на стыке частотных каналов для второго средства. Также показано, что при использовании средств снижения НОЧ-2 эффект достигается в полосе вблизи границы канала и заключается в том, что для заданной вероятности ЛТ мощность мешающего сигнала в соседнем канале может быть больше.

4. Разработаны принципы построения матрично-параллельного ШПрУ РТР с пониженной НОЧ, в том числе основанные на использовании защищенных патентами РФ: обобщенной структурной схемы ШПрУ РТР матрично-параллельного типа; способа снижения НОЧ-3, отличающегося от известных отсутствием пропуска и минимальной задержкой сигнала; технического решения, исключающего потерю короткого импульса для обработки, основанного на введении в состав обнаружителя линии задержки.

5. Разработаны принципы проектирования матрично-параллельного ШПрУ РТР со сниженной НОЧ, в том числе:

– на основе аналитически полученных закономерностей в соотношении рабочих и промежуточных частот построены номограммы для выбора границ ДПЧ при заданной ширине полосы РЧ;

– показана возможность понижения промежуточных частот за счет параллельного включения нескольких схем;

– на основе исследованных особенностей и закономерностей разработана методика проектирования.

6. Обоснованы принципы совершенствования технологии настройки и проверки полосковых СВЧ-устройств. На основе разработанных и защищенных патентом РФ технических решений, реализующих технологию, спроектировано и изготовлено универсальное технологическое приспособление.

7. На примере спроектированного унифицированного приемного модуля ОИРТР показано, что без ухудшения технических характеристик и при соизмеримой стоимости: время наработки до отказа увеличивается более чем на 40 %; обеспечивается возможность обработки ШПС и коротких импульсов; снижается НОЧ; повышается эффективность при работе в условиях сложной РЭО (уменьшается вероятность ЛТ; пропускная способность в части различения сигналов увеличивается в 10 раз, в части обработки сигналов – в 2 раза); мгновенная полоса анализа увеличивается в 2 раза; возможность адаптивного выбора УОС обеспечивает универсальность для средств ОИРТР.

В приложении А представлены экспериментальные данные по исследованию НОЧ в матричном ШПрУ. Приложение Б содержит данные о надежности узлов матричного ШПрУ. В приложении В представлены копии патентов и актов внедрения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания, рекомендованные ВАК России

1 Подстригаев, А. С. Широкополосное приемное устройство станции радиоэлектронной борьбы / А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – № 4 – С. 37 – 44.

2 Подстригаев, А. С. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике / А. С. Подстригаев, В. П. Лихачев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text.pdf>

3 Подстригаев, А. С. Анализ вероятностных характеристик матричного приемника с учетом неоднозначности определения частоты на стыках каналов / А. С. Подстригаев, В. П. Лихачев, М. В. Ляпин, Н. Е. Липаков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2015. – № 4 (38) – С. 17 – 25.

4 Подстригаев, А. С. Технология настройки полосковых СВЧ-устройств / А. С. Подстригаев, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев // Измерительная техника, 2016. – № 5 – С. 66 – 68.

Охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности

5 Пат. 2577805 РФ, МПК G01R 29/00. Приспособление для снятия характеристик СВЧ-устройств / А. С. Подстригаев, Н. И. Фомченкова; заявитель и патентообладатель ОАО «БЭМЗ». – № 2014151345/28; заявл. 17.12.2014; опубл. 20.03.2016, Бюл. № 8. – 6 с. : ил.

6 Пат. 2587645 РФ, МПК G01R 23/00. Способ определения частоты в матричном приемнике и устройство для его осуществления / А. С. Подстригаев, В. П. Лихачев; заявитель и патентообладатель ОАО «БЭМЗ». – № 2015118979/28; заявл. 20.05.2015; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17. – 10 с. : ил.

7 Пат. 155553 РФ, МПК H04B 15/06. Приемное устройство / А. И. Беззуб, А. С. Подстригаев; заявитель и патентообладатель ОАО «БЭМЗ». – № 2014151261/08; заявл. 17.12.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28. – 11 с. : ил.

8 Пат. 159589 РФ, МПК G01S 3/00. Обнаружитель сигнала / А. И. Беззуб, А. С. Подстригаев, В. П. Лихачев; заявитель и патентообладатель АО «БЭМЗ». – № 2015138477/08; заявл. 09.09.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 7 с. : ил.

9 Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016611930. Программа расчета вероятностных характеристик матричного приемника / А. С. Подстригаев, М. В. Ляпин. – № 2015660937; заявл. 13.11.2015; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.02.2016.

Прочие публикации

10 Подстригаев, А. С. Разработка узлов многоканального приемного устройства станции помех / А. С. Подстригаев // Электроника в XXI веке. Региональная молодежная научно-техническая конференция: сб. материалов / под ред. В. А. Хвостова, А. А. Малаханова. – Брянск: БГТУ, ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», 2012. – С. 135 – 139.

11 Подстригаев, А. С. Вопросы модернизации приемной системы станции помех / А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб, В. А. Хвостов // Наука, Техника, Инновации 2014: сборник статей Международной научно-технической конференции (25-27 марта 2014 г., г. Брянск) / Под общей редакцией А. Л. Сафонова. – Брянск: НДМ, 2014. – С. 60 – 64.

12 Подстригаев А. С. Широкополосная приемная система станции РЭБ [Текст] / А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, апрель 2014 г.). – СПб.: Заневская площадь, 2014. – С. 29–32.

13 Подстригаев, А. С. Модернизированная приемная система станции радиоэлектронной борьбы / А. С. Подстригаев // Новые горизонты: Материалы Международной конференции-конкурса, Брянск, 19 марта 2014 года / под ред. О. М. Голембиовской. - Брянск: БГТУ, 2014. – С. 36 – 38.

14 Подстригаев, А. С. Приемная система станции РЭБ / А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб // 18-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 3. – Харьков: ХНУРЭ, 2014. – С. 155 – 156.

15 Подстригаев, А. С. Разработка линии задержки сигнала промежуточной частоты приемного устройства радиолокационных сигналов / А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб, В. А. Хвостов // Сборник трудов третьей всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – С. 216 – 220.

16 Подстригаев, А. С. Универсальное приспособление для настройки микрополосковых СВЧ-устройств / А. С. Подстригаев // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7 – 13 сентября 2014 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т. 2, С. 896 – 897.

(Podstrigaev, A. S., "All-purpose adjuster for microwave microstrip devices," Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014 24th International Crimean Conference, vol., no., pp.896-897, 7-13 Sept. 2014.

doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959682. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp&arnumber=6959682&isnumber=6959272>)

17 Подстригаев, А. С. Частотные соотношения в приемном устройстве сигналов РЛС / А. С. Подстригаев // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014 г.): В 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 58–62.

18 Подстригаев, А. С. Об использовании резистивного смесителя с субгармонической накачкой при реализации приемника станции РЭБ / А. С. Подстригаев // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: Сб. науч. ст. по материалам II Всеросс. НПК (25-27 ноября 2014 г.) в 2-х томах. – Т. 1. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 215 – 218.

19 Подстригаев, А. С. Сравнительный анализ базовых схем приемника станции радиотехнической разведки / А. С. Подстригаев // 19-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 3. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – с. 127 – 128.

20 Подстригаев, А. С. Снижение неоднозначности определения частоты матричным приемником станции РТР в условиях сложной сигнальной обстановки / А. С. Подстригаев // 19-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 3. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – с. 40 – 41.

21 Подстригаев, А. С. Исследование полосы пропускания резистивных смесителей с субгармонической накачкой для станции радиотехнической разведки / А. С. Подстригаев // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6-12 сентября 2015 г.: Материалы конф. в 2-х т. – Севастополь: Вебер, 2015. – Т.1, с. 83 – 84.

22 Подстригаев, А. С. Количественная оценка неоднозначности определения частоты при перекрытии каналов матричного приемника / А. С. Подстригаев, В. П. Лихачев, А. И. Уваров // Вестник Военно-воздушной академии, 2015. – № 2 (23) – С. 169 – 175.

23 Подстригаев, А. С. Проектирование СВЧ-устройств: Практикум / А. С. Подстригаев. – Брянск: БГТУ, 2015. – 123 с.

Подписано в печать 06.07.2016. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ .

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
тел.: (812) 346-28-56