

На правах рукописи

НЕМЫКИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АППАРАТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И
УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Специальность 2.2.13 - Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 2023

Диссертационная работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Строганова Елена Петровна

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Абрамов Сергей Степанович, заведующий
кафедрой радиотехнических устройств и
техносферной безопасности Федерального
государственного бюджетного образова-
тельного учреждения высшего образова-
ния «Сибирский государственный универ-
ситет телекоммуникаций и информатики»

кандидат технических наук, профессор
Грачёв Николай Николаевич, профессор-
исследователь, Московский институт
электроники и математики им. А.Н. Тихо-
нова, Департамент электронной инжене-
рии, Федеральное государственное авто-
номное образовательное учреждение выс-
шего образования «Национальный иссле-
довательский университет «Высшая шко-
ла экономики»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Ордена Трудового Красного
Знамени Российский научно-
исследовательский институт радио имени
М.И. Кривошеева» (ФГБУ НИИР)

Защита состоится «14» сентября 2023 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 55.2.002.01 при МТУСИ (ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики») по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, дом 8а, ауд. А-211.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: <http://srd-mtuci.ru/images/Dis-Nemykin/dis-Nemykin.pdf>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 55.2.002.01

д.т.н., доцент

Терешонок Максим Валерьевич

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время приборы радиоэлектроники и радиоэлектронные системы различного назначения должны отвечать высоким требованиям к качеству функционирования в процессе эксплуатации. В частности, это касается радиотехнических систем, используемых в качестве средств радиотехнического обеспечения нормального функционирования сложных технических объектов, отклонение от нормального режима работы которых связано с повышенной опасностью. К таким средствам относятся, в частности, средства обеспечения полета воздушных судов (ВС). Разрабатываются новые перспективные измерительные радиосистемы, в том числе комплексированные системы специального назначения (спутниковые навигационные системы (СНС) и системы наземного базирования) с целью предотвращения возможного подавления сигналов СНС. Разработка и внедрение радиотехнических систем требует повышения точности радиоизмерений в реальных условиях эксплуатации.

Под качеством функционирования аппаратуры радиотехнических систем понимают степень соответствия совокупности присущих характеристик параметрическим требованиям. На качество функционирования радиотехнических систем оказывают влияние различные факторы, из которых можно выделить факторы, непосредственно связанные с работой технического оборудования аппаратуры радиотехнических систем. Например, техническое исполнение элементной базы, как цифровых модулей, так и аналоговых. К тому же, при использовании цифровых методов обработки информации возникают факторы, снижающие качество, в том числе в зависимости от производительности процессоров вычислительных машин и скорости их работы.

К внешним эксплуатационным факторам, влияющим на качество работы радиотехнических систем, относятся характеристики помеховой среды, такие как виды помех, воздействующих на радиотехнические системы в процессе эксплуатации, их интенсивность, вероятностные и корреляционные характеристики и степень изменчивости этих характеристик, а также, при размещении аппаратуры радиотехнических систем на подвижном объекте (ПО), характеристики динамических воздей-

ствий, вызывающих как регулярные, так и случайные изменения оцениваемых в радиотехнических системах параметров.

Следует отметить, что отношение сигнал / помеха, которое обычно указывается в тактико-технических требованиях к аппаратуре радиотехнических систем, с точки зрения его помехоустойчивости, адекватно характеризует только помехи, распределенные по нормальному закону, в то время как распределение атмосферных и промышленных помех, которые являются основными видами непреднамеренных помех для радиоприема в диапазонах частот до 30 и 300 МГц, соответственно, существенно отличается от нормального, так как эти помехи носят преимущественно импульсный характер. Неучет этого обстоятельства при проектировании радиотехнических систем приводит к неоптимальности используемых алгоритмов обработки сигналов, а при проведении полунатурных испытаний радиотехнических систем с использованием модельных комплексов и в процессе его эксплуатации не позволяет достоверно оценить качество его функционирования, в частности его характеристики точности, если речь идет об измерительных радиотехнических системах. К аналогичному результату приводит неучет характеристик динамических воздействий при размещении аппаратуры радиотехнические системы на подвижном объекте.

Следует отметить, что с внедрением цифровых методов обработки информации в практику проектирования радиоэлектронной аппаратуры радиотехнических систем появилась возможность реализации достаточно сложных алгоритмов обработки, реализация которых с помощью аналоговой технологии была невозможна. В связи с этим возрастает актуальность проведенного в диссертации исследования эффективности оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов, синтезированных с учетом существующих аппаратурных ограничений и характеристик внешних воздействий.

Решение перечисленных задач определяет актуальность проводимых в диссертации исследований.

Степень разработанности темы. Поставленные задачи решались на базе моделей и методов обработки сигналов в условиях воздействующих факторов и помех, заложенных такими отечественными и зарубежными учеными, как Левин Б.Р., Тихонов В. И., Пестряков В. Б., Райс С., Миддлтон Д., Хелстром К. и др. Фазовые ра-

диотехнические системы с неидеальными характеристиками в условиях эксплуатации рассматривались в работах Пестрякова В.Б., Фабрика М. А., Кинкулькина И. Е. и др. Рассмотрению негауссовских помех и их влияние на аппаратуру радиотехнических систем посвящены работы Рубцова В.Д., Ольбека В. Н., Эспеланда Л. Р., Болтона Э.С. и др. Статистические методы представлены в фундаментальных работах ученых школ Левина Б. Р., Тихонова В. И., и др.

Целью диссертационной работы является решение важной для теории и практики проектирования и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) научной задачи определения влияния особенностей аппаратурной реализации и условий эксплуатации на качество функционирования радиотехнических устройств и систем и разработка способов уменьшения этого влияния.

Задачи диссертационной работы, решаемые для достижения поставленной цели:

1. Анализ влияния неидеальности радиоэлектронной аппаратуры и перехода на цифровые методы обработки сигнала в условиях помех на эксплуатационные и точностные характеристики радиоэлектронной аппаратуры.
2. Анализ влияния интенсивности помех и их вероятностных характеристик на качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры;
3. Разработка способов уменьшения влияния особенностей аппаратурной реализации радиоэлектронная аппаратура и условий эксплуатации на качество функционирования радиоэлектронная аппаратура.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Доказано, что в радиотехнических системах с частотным разделением каналов, в частности, в приемной навигационной аппаратуре, при неточной настройке канального фильтра в условиях воздействия интенсивных помех возникает сдвиг оценки фазы, причем проводимая калибровка, устраняющая различие в фазовых набегах в частотных каналах, в таких условиях неэффективна вследствие возникновения асимметрии спектра помехи на выходе фильтра.
2. Показано, что в приемной навигационной аппаратуре потребителя в условиях интенсивных помех и воздействующих факторов при низкой производительности вычислителя целесообразно применение метода наименьших квадратов,

обеспечивающего точность фильтрации навигационных параметров близкую к точности, которую дает использование методов оптимальной либо квазиоптимальной линейной фильтрации, требующих больших вычислительных затрат.

3. Разработан алгоритм моделирования атмосферных и промышленных помех, имеющих квазиимпульсный характер с преобладающей импульсной составляющей в диапазонах МВ и декаметрового диапазона, в которых работает большое количество радиотехнических устройств и систем различного назначения, позволяющий описать интерференционную картину при определении вопросов помехоустойчивости аппаратуры радиотехнических систем при ее проектировании и проведении испытаний.

4. Предложены рекомендации по моделированию близкой к реальной помеховой обстановки и использованию адаптивной обработки сигнала в радиоэлектронная аппаратура в условиях изменяющихся характеристик атмосферной или тональной помех, которые позволяют уменьшить влияние аппаратурных ограничений и условий эксплуатации на качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость диссертации заключается в обосновании адекватности использования негауссовых помех и использовании математического аппарата негауссовых процессов для исследования влияния особенностей аппаратурной реализации и эксплуатационных факторов на качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры.

Практическая значимость диссертации: результаты исследования могут использоваться в работе проектных и исследовательских организаций при проектировании и испытаниях радиоэлектронной аппаратуры для того, чтобы уменьшить влияние особенностей аппаратурной реализации и условий эксплуатации на качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры, улучшить эксплуатационные характеристики аппаратуры радиотехнических систем, а также повысить достоверность суждений об оценках характеристик аппаратуры радиотехнических систем при проведении ее испытаний.

Основные результаты диссертации внедрены в АО «Концерн Гранит» и ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении «Московский технический университет связи и информатики», что подтверждается актами о внедрении (Приложения 1, 2, 3).

Методы исследований. При предлагаемом решении поставленных задач были использованы прикладные методы теории вероятностей и случайных процессов, теории оптимальной линейной и оптимальной нелинейной фильтрации, а также методы имитационного математического моделирования с использованием ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В радиотехнических системах с частотным разделением каналов, в частности, в приемной аппаратуре спутниковой радионавигационной связи, проводимая калибровка, устраняющая различие в фазовых набегам в частотных каналах, оказывается неэффективной при неточной настройке канального фильтра в условиях воздействия интенсивных помех вследствие возникновения асимметрии спектра помехи на выходе фильтра.

2. В приемной навигационной аппаратуре потребителя в условиях интенсивных помех и воздействующих факторов при низкой производительности вычислителя целесообразно применение метода наименьших квадратов, обеспечивающего точность фильтрации навигационных параметров близкую к точности, которую дает использование методов оптимальной либо квазиоптимальной линейной фильтрации, требующих больших вычислительных затрат.

3. Разработанный алгоритм моделирования атмосферных и промышленных помех, имеющих квазиимпульсный характер с преобладающей импульсной составляющей в диапазонах метровых и дециметровых волн, основанный на формировании вероятностных характеристик излучений интерференционной огибающей, полученных с использованием логарифмически-нормальной модели для реализации импульсной составляющей таких помех с заполнением интервалов между импульсами фоновой составляющей с нормальным законом распределения, позволяет описать реальную помеховую обстановку для описания параметров помехоустойчивости аппаратуры в процессах проекта и тестирования.

4. Рекомендации по моделированию близкой к реальной помеховой обстановки и использованию адаптивной обработки сигнала в приемной аппаратуре радиотехнические системы с автоматической установкой порога ограничения в зависимости от параметров импульсной (атмосферной или промышленной) или тональной помехи с изменяющимися характеристиками, позволяют уменьшить влияние аппаратных ограничений и условий эксплуатации на качество функционирования радиотехнические системы. Например, при использовании ограничителя с оптимальным порогом ограничения и входной полосе $\Delta f = 3$ кГц в условиях воздействия квазиимпульсной помехи с параметром импульсности $V_d = 15$ дБ, отношение сигнал/шум увеличивается на 23... 27 дБ.

Личный вклад. Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, из публикаций с соавторами в диссертацию включены только личные результаты автора.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, 7 в рецензируемых периодических научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в сборниках, индексируемых базой данных Scopus.

Степень достоверности и апробация результатов.

Результаты работы докладывались и обсуждались на IV отраслевой научной конференции-форуме «Технологии информационного общества» (2010 г.), 65-ой научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню Радио (2010 г.), X международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (2016 г.), Международной научно-практической конференции «Компьютерные, прикладные и инженерные инновации и модернизация отраслей промышленности»– 2018), Конференция «2019 - Системы генерации и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций» (2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications), 2020 International Conference «Engineering Management of Communication and Technology» (EMCTECH, Vienna), Международном научном форуме «Наука и инновации – современные концепции» (Москва, 2022г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 7 – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в сборниках, индексируемых базой данных Scopus.

Соответствие паспорту специальности. Результаты исследования соответствуют паспорту научной специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» по пунктам:

- 4: разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов в радиосистемах телевидения и связи при наличии помех. Разработка методов разрушения и защиты информации;

-9: разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит введение, три раздела, заключение, список литературы и приложения. Объем работы - 135 страниц, 26 рисунков и 1 таблица. Дополнительные сведения изложены на 3 страницах в приложениях. В список литературы включено 97 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов; в кратком виде изложено содержание глав диссертации.

В первой главе диссертации проводится анализ влияния на качество функционирования РЭА особенностей аппаратурной реализации элементов РЭА: влияния неидеальности характеристик элементов РЭА, особенностей цифровой обработки.

Эти вопросы рассматриваются, в основном, применительно к устройствам измерения фазы либо устройствам, использующим ее в качестве сопутствующего параметра. Такие устройства, с одной стороны, на основе использования информация о фазе сигнала позволяют наиболее эффективно выделять сигналы из помех и оценивать их параметры, а с другой стороны, фаза является параметром, наиболее подверженным «разрушению» в процессе распространения радиоволны и прохождении сигнала по цепям РЭА. Проводится рассмотрение влияния неточности настройки фильтра на входе фазоизмерителя на точность оценки фазы квазигармонического сигнала

$$s(t) = A(t) \cos (\omega t + \varphi), \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (1)$$

в условиях действия нормальной помехи $n(t)$. Полагая для общности помеху нестационарной, ее корреляционную функцию можно представить в виде

$$B(t, u) = b_1(t, u) \cos \omega(t - u) - b_2(t, u) \sin \omega(t - u). \quad (2)$$

При этом относительная несимметрия спектра характеризуется отношением $|b_1(t, u)|/|b_2(t, u)|$. Показано, что для случая малой несимметрии спектра оценка максимального правдоподобия фазы асимптотически нормальна с дисперсией и смещением, определяемыми выражениями:

$$\sigma_{\varphi}^2 = d_1^{-1}, \quad (3),$$

где $d_i = \int_0^{\tau} A(t) f_i(t) dt$, $i = 1, 2$.

Несимметрия спектра помехи и, соответственно, смещение оценки фазы сигнала

ла имеет место также в случае малой добротности входного фильтра в виде одиночного колебательного контура, корреляционная функция помехи на выходе которого в предположении стационарности помехи записывается в виде

$$B(t-u) = \sigma^2 \exp[-\alpha(t-u)] [\cos \omega(t-u) + (\alpha/\omega) \sin \omega(t-u)], \quad (3^*)$$

где σ^2 - дисперсия помехи, а отношение α/ω характеризует несимметрию ее спектра.

На рис. 1 приведена зависимость смещения фазы сигнала от α/ω , вычисленная с использованием выражения для нее в (3) для случая гауссовой формы огибающей сигнала $A(t) = A_0 \exp[-\mu(t - \tau/2)^2]$ с максимумом в середине интервала наблюдения τ ,

равного длительности импульса на уровне 0,1. Как видим, смещение оценки фазы за счет несимметрии спектра помехи может быть значительным.

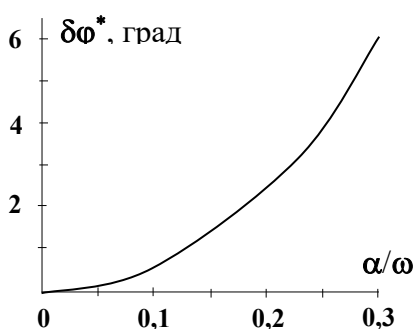


Рис.1 - Зависимость смещения фазы сигнала от отношения α/ω

Хотя в современной РЭА широко используются цифровые методы обработки сигнала, тем не менее, в эксплуатации находится много РЭА, в состав которой входят аналоговые устройства, неидеальность характеристик элементов которых может сказываться на качестве их функционирования.

Было проанализировано влияние неидеальности характеристик элементов аналогового фазоизмерителя следящего типа на его точностные характеристики. Фазовый дискриминатор (ФД) имеет несимметричные зоны ограничения и нечувствительности и несимметричную крутизну либо только несимметричную крутизну (рис.2). С использованием метода статистической линеаризации показано, что наличие нелинейностей в тракте фазоизмерителя приводит к появлению смещения оценки фазы, зависящего от отношения сигнал/шум на входе фазоизмерителя и степени несимметрии характеристик нелинейностей,

$$\psi_{см} = 1/S \left\{ \left[\varphi_{02}(\sigma_v) / K_{01}(\sigma_k) K_{02}(\sigma_v) \sqrt{\Delta f \tau_\phi} \right] + \varphi_{01}(\sigma_k) \right\}, \quad (4)$$

где $S = A/\sigma$, $\varphi_{01}(\sigma_x)$, $\varphi_{02}(\sigma_v)$ и $K_{01}(\sigma_x)$, $K_{02}(\sigma_v)$ - нормированные к σ_x и σ_v смещения регулярных составляющих процессов и статистические коэффициенты передачи по ним.

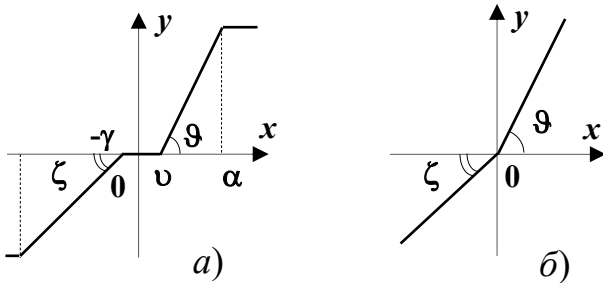


Рис.2 - ФД с несимметричными зонами ограничения и нечувствительности и несимметричной крутизной (а), несимметричной крутизной (б)

Смещение оценки (4) не может быть учтено заранее, поскольку отношение сигнал/шум, как правило, неизвестно, а параметры нелинейностей зависят от случайных факторов: изменения питающих напряжений, климатических воздействий и др. Кроме смещения оценки, обусловленного действием шумов, наличие нелинейностей

приводит к увеличению в $1/K_{01}(\sigma_x) K_{02}(\sigma_V)$ раз ошибки запаздывания.

При использовании цифровых методов обработки информации в РЭА возможно ухудшение качества ее функционирования, вызванное заменой объекта измерения его цифровым эквивалентом. Так, при замене фазы ее эквивалентом в виде измеренного в числе счетных импульсов временного интервала между нулевым переходом опорного колебания и первым нулевым переходом смеси сигнала и помехи возникает смещение оценки, обусловленное вызванными помехой так называемыми «лишними нулями».

Показано, что при цифровом измерении фазы сигнала на поднесущей указанным выше способом имеет место смещение оценки и в условиях, когда в силу узкополосности процесса «лишними нулями» можно пренебречь. Фазовые измерения на поднесущей используются в угломерных радионавигационных устройствах. Кроме того, при введении режима цифровой передачи данных в процессе модернизации существующих связных радиостанций обычно используется фазовая манипуляция на поднесущей, осуществляемая в канале тональной частоты.

При фазовых измерениях на поднесущей измеряется фаза огибающей амплитудномодулированного (АМ) сигнала вида

$$S(t) = A(t) \sin \omega_0 t, \quad (5)$$

где $A(t) = A_c a(t)$, $a(t) = 1 + M \sin(\Omega t - \varphi_0)$. В предположении, что измерения производятся в условиях нормальной помехи с дисперсией σ^2 и эффективной шириной полосы $\delta\Omega$ получено выражение для дифференциальной вероятности пересечений

огибающей смеси сигнала и помехи среднего уровня

$$W_n(\varphi) = (1/2\pi)(\delta\Omega/\Omega)\mathcal{G}\exp(-1/2)\left\{\mathcal{G}^2 + S^2[1 + M\sin(\varphi - \varphi_0)]^2\right\} \times \\ \times I_0\left\{\mathcal{G}S[1 + M\sin(\varphi - \varphi_0)]^2\right\}, \quad (6)$$

где $I_0(\cdot)$ - функция Бесселя нулевого порядка, $S = A_c/\sigma$,

$\mathcal{G} = r_0/\sigma = \sqrt{\pi/2} {}_1F_1\left[(-1/2), 1, (-S^2/2)a^2(t)\right]$, r_0 - средний уровень огибающей смеси, ${}_1F_1(\cdot)$ - вырожденная гипергеометрическая функция, черта означает усреднение.

Дифференциальная вероятность является цифровым эквивалентом плотности вероятностей фазы колебания, модулирующего амплитуду сигнала.

В наиболее интересном для практики случае большого отношения сигнал/помеха ($S \gg 1$) выражение (6) упрощается. При этом приближенное выражение для нормированной дифференциальной вероятности записывается

$$W_{n.норм}(\varphi) = K_n W_n(\varphi) = (SM/\sqrt{2\pi})\exp\left\{-(SM)^2[\varphi - \varphi_0 - (\Delta/M)]^2/2\right\}, \quad S \gg 1, \quad (7)$$

где $K_n = 1/\int_{-\pi}^{\pi} W_n(\varphi)d\varphi \cong \sqrt{2\pi}(\Omega/\delta\Omega)SM$ - нормирующий множитель, $\Delta = (\mathcal{G}/S) - 1 = (r_0/A_c) - 1$.

Смещение оценки в данном случае обусловлено тем, что распределение огибающей смеси в отличие от распределения фазы несимметрично, что приводит к смещению среднего уровня огибающей смеси в сторону увеличения.

Таким образом, использование цифровых методов обработки при фазовых измерениях на поднесущей имеет определенные ограничения. Так, при передаче данных нецелесообразно использование многофазных видов фазовой модуляции во избежание высокой вероятности ошибок, либо применять специальные решения по коррекции ошибок.

Во второй главе диссертации проводится анализ влияния характеристик помеховой обстановки на качество функционирования РЭА.

В диапазонах метровых (МВ) и дециметровых (ДКМВ) волн, в которых работает большое количество РЭА, основными видами помех являются атмосферная и индустриальная помехи, имеющие квазиимпульсный характер с преобладающей импульсной составляющей. Методики же описания помеховой обстановки, используемые при формулировании требований к помехоустойчивости РЭА ориентированы

на нормальную помеху и ограничиваются заданием отношения сигнал/помеха.

Показано, что используемая для вероятностного описания атмосферной помехи модель в виде комбинации импульсной и фоновой составляющих, описываемых соответственно логарифмически нормальной и нормальной моделями, применима и к описанию индустриальной помехи. При этом индустриальная помеха характеризуется меньшей степенью импульсности, определяемой параметром

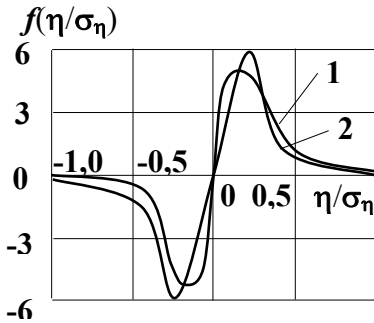
$$V_d = 20 \lg \left\{ \frac{[\overline{E^2(t)}]}{\overline{E(t)}} \right\}, \quad (8)$$

и большей долей c мощности фоновой составляющей σ_Φ^2 в мощности помехи σ_n , описываемой следующими полученными путем анализа известных из литературы экспериментальных распределений помехи эмпирических соотношений:

$$10 \lg c \cong \begin{cases} -1,3 V_d - \text{ для индустриальной помехи,} \\ -2 V_d - \text{ для атмосферной помехи.} \end{cases}$$

Известно, что при слабом сигнале оптимальная обработка смеси сигнала и негауссовой помехи с плотностью вероятностей $W(\eta)$ заключается во включении на входе линейного приемника нелинейного элемента с характеристикой

$$f(\eta) = -d \ln W(\eta) / d\eta. \quad (10)$$



На рис. 3 приведены эти характеристики для атмосферной (кривая 1) и индустриальной (кривая 2) помех, вычисленные в рамках указанной выше модели при значении параметра $V_d = 10$ дБ.

Рис.3 - Вид оптимальной характеристики нелинейного преобразователя в условиях атмосферной (1) и индустриальной (2) помех ($V_d = 10$ дБ)

Из анализа приведенных характеристик с учетом соотношений (9) следует, что оптимизация приемного тракта в условиях квазиимпульсных помех сводится к практически полному подавлению преобладающей импульсной составляющей помехи и сохранению примерно линейной обработки в пределах среднеквадратического значения огибающей фоновой составляющей. При этом коэффициент, характери-

зующий уменьшение дисперсии оценки параметров сигнала в оптимизированном приемнике по сравнению с линейным приемником, работающим в условиях нормальной помехи мощностью σ_η^2 в первом приближении равен коэффициенту увеличения эквивалентного отношения сигнал/помеха за счет нелинейной обработки и определяется выражением

$$K_{opt} = \sigma_\eta^2 \int_{-\infty}^{\infty} f^2(\eta)W(\eta)d\eta \cong 1/c = \quad (11)$$

Поскольку в линейном приемнике при достаточно большом объеме выборки имеет место нормализация помехи, приведенный выигрыш справедлив и по отношению к линейному приемнику, работающему в условиях негауссовой помехи.

Значение параметра V_d при входной полосе приемника 4 кГц, как следует из проводимых в литературе экспериментальных данных, находится для промышленной помехи в пределах 3 - 8 дБ, а для атмосферной - в пределах 8 - 18 дБ. При этом, как следует из (11), выигрыш за счет оптимизации обработки весьма существенен, особенно применительно к случаю воздействия на приемник атмосферной помехи.

Рассмотренный оптимизированный по отношению к квазиимпульсным помехам типа атмосферной и промышленной приемник по структуре близок к схеме ШОУ, включающей в себя идеальный ограничитель с нулевым порогом ограничения и узкополосный линейный фильтр. Отличие заключается в замене оптимального нелинейного преобразователя предельным ограничителем.

Поскольку оптимальный нелинейный преобразователь практически полностью подавляет импульсную составляющую помехи и осуществляет близкую к линейной обработку остаточной фоновой составляющей, которая и определяет в итоге дисперсию оценки параметров сигнала, можно утверждать, что замена оптимального нелинейного преобразователя предельным ограничителем приводит к проигрышу в эквивалентном отношении сигнал/помеха в $4/\pi$ раза или на 1,04 дБ.

Таким образом, схема ШОУ осуществляет близкую к оптимальной, а при $V_d \rightarrow \infty$ асимптотически оптимальную (для случая слабого сигнала) обработку в условиях действия квазиимпульсных помех. Достоинством схемы ШОУ является также то, что она является непараметрическим устройством для широкого класса аддитивных помех с равномерным распределением фазы. Представляет интерес проанализиро-

вать, сохраняет ли она непараметрические свойства при наличии флуктуаций амплитуды и фазы сигнала (фединга), что характерно для ДКМВ диапазона волн, а в высоких широтах при возмущениях ионосферы и для других диапазонов.

Такой анализ был проведен применительно к флуктуирующему сигналу вида

$$s(t) = \lambda(t) A(t) \cos \{ \omega_0 t - [\psi(t) + Q(t)] \}, \quad (12)$$

где $\lambda(t)$ и $Q(t)$ - случайные, в общем случае зависимые, помехи, модулирующие амплитуду $A(t)$ и фазу $\psi(t)$ сигнала. При этом у аддитивной помехи

$$n(t) = E(t) \cos [\omega_0 t - \varphi(t)] \quad (13)$$

полагаем распределение фазы равномерным $W(\varphi) = 1/2\pi$, а распределение огибающей $W(E)$ произвольным, причем флуктуации $E(t)$ и $\varphi(t)$ полагаем независимыми.

Было получено выражение для плотности вероятностей фазы смеси федингующего сигнала и аддитивной помехи для случая слабого сигнала в виде

$$W(\varphi_s) = (1/2\pi) \{ 1 - Naq \cos [\varphi_s - (\psi - \Phi)] \}, \quad (14)$$

где $a = \left[\overline{E^2/2} \right]^{1/2} \left[\overline{E^{-1}} \right]$, $N = \left[\overline{(\lambda \cos \theta)^2} + \overline{(\lambda \sin \theta)^2} \right]^{1/2}$, $\Phi = \arctg \left(\overline{\lambda \sin \theta} / \overline{\lambda \cos \theta} \right)$,

$q = A/\sigma$, $\sigma = \left[\overline{E^2/2} \right]^{1/2}$, черта сверху означает усреднения по ансамблю реализаций.

При нормальной аддитивной помехе параметр « a » в (14) равен $\sqrt{\pi/2}$.

Плотность вероятностей фазы смеси (14) фазы сигнала (12) и помехи (13) с точностью до коэффициента N при косинусе и дополнительной фазы Φ в аргументе косинуса совпадает с плотностью вероятностей фазы нефлуктуирующего сигнала и помехи (13). При этом оценка фазы сигнала ψ по критерию максимума правдоподобия, полученная по n независимым выборочным значениям фазы смеси, определяется в обоих случаях выражением

$$\psi^* = \arctg (Y/X), \quad X = \sum_{i=1}^n q_i \cos \varphi_{s_i}, \quad Y = \sum_{i=1}^n q_i \sin \varphi_{s_i}, \quad q_i = A_i/\sigma. \quad (15)$$

При высокой точности оценки фазы сигнала, реализуемой при $n \gg 1$, ее оценочные значения распределены по нормальному закону. При этом в случае флуктуирующего сигнала смещение и дисперсия оценки определяются выражениями:

$$\delta\psi^* = \overline{\psi^*} - \psi = \Phi, \quad (16)$$

$$\sigma_{\psi^*}^2 = 2 / \left(N^2 a^2 \sum_{i=1}^n q_i^2 \right). \quad (17)$$

В отсутствие же флуктуаций сигнала смещение оценки отсутствует, а в выражении (17) для дисперсии оценки отсутствует множитель N^2 .

Таким образом, при сделанных допущениях структура приемника с предельным ограничением смеси, реализуемую в виде квадратурного линейного фильтра, остается квазиоптимальной как при произвольном законе распределения огибающей аддитивной помехи $W(E)$, так и при произвольном совместном распределении флуктуаций амплитуды и фазы сигнала $W(\lambda, \theta)$, то есть алгоритм (15) является непараметрическим в указанном расширенном смысле. При этом наличие сложной мультипликативной помехи приводит в общем случае к смещению оценки фазы.

В процессе эксплуатации на РЭА воздействуют различные помехи. Так, на РЭА, работающие в МВ и ДКМВ диапазонах волн, наряду с атмосферной и индустриальной помехами, имеющими квазиимпульсный характер, могут воздействовать узкополосные помехи от мешающих радиотехнических средств. При этом задача подавления указанных помех накладывает на приемный тракт противоречивые требования. Так, для подавления квазиимпульсных помех используются ограничитель или бланкирующее устройство, запирающее приемник на время действия импульсов помехи. Такая обработка при действии узкополосных помех приводит к ухудшению помехоустойчивости приемника, поскольку приводит к обогащению спектра помехи. В результате при дискретной выборке с частотой взятия отсчетов F_0 «пораженными» оказываются частоты f_n , имеющие расстройку относительно частоты сигнала f_0 равную $|f_n - f_0| = (K/M)F_0$, где K и M целые несократимые числа. При этом при оценке фазы сигнала приемником, выполненном по схеме ШОУ с предельным ограничителем, имеет место ошибка, максимальное значение которой равно

$$\delta\varphi_{\max} = (1/M) \operatorname{arctg} \left[a_m^n (1 - a_m)^{2M} \right], \quad (18)$$

где $a_m = A_{n_{\text{МАКС}}} / A_c \leq 1$ - максимум отношения помеха/сигнал.

Для подавления узкополосных помех используются режекторные фильтры. Однако при совместном действии узкополосной и квазиимпульсной помех в результате режекции части спектра последней появляются осцилляции после окончания импульсов - своего рода узкополосная помеха, снижающая эффективность последующей нелинейной обработки смеси. На рис. 4 приведена предложенная структура

входных цепей приемника, позволяющая компенсировать паразитные продукты режекции узкополосной помехи.

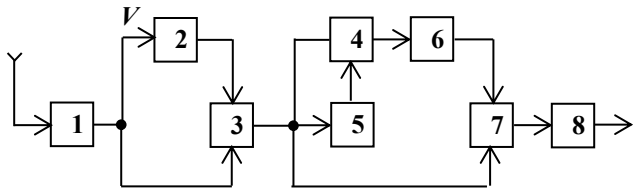


Рис. 4

Здесь обозначено: 1 - входной фильтр с полосой пропускания Δf , 2 и 6 - идентичные узкополосные фильтры с полосой пропускания Δf_c , 3 - вычитающее устройство, 4 - ключ, 5 - ждущий генератор отпирающих импульсов, 7 - сумматор, 8 - нелинейный преобразователь с характеристикой

(10) либо выполненный в виде предельного ограничителя. При превышении импульсами с выхода режекторного фильтра (блоки 2 и 3) порогового уровня, выбираемого равным среднеквадратическому значению огибающей фоновой составляющей квазиимпульсной помехи, ждущий генератор 5 вырабатывает импульсы, отпирающие ключ 4 на время длительности импульсов примерно равное $1 / \Delta f$.

Показано, что благодаря частичной компенсации паразитных продуктов режекции узкополосной помехи, имеющей место при суммировании колебания с выхода режекторного фильтра и реакции фильтра 6 на входные импульсы, они уменьшаются примерно в $3(\Delta f_c / \Delta f)^2$ раз и при достаточно узкополосном селекторе нелинейная обработка смеси в преобразователе позволяет практически реализовать потенциальную точность оценки параметров сигнала, характеризуемую показателем (11).

Использование фазы сигнала в качестве информативного параметра обычно позволяет обеспечивать наиболее высокие эффективность выделения сигнала из помех и точность оценки его параметров. Однако в условиях интенсивных помех и флуктуаций параметров сигнала, например, вызванных движением ПО, снижение информативности фазы, вызванное ее «перескоками» в соседние фазовые циклы, может служить причиной ухудшения качества функционирования РЭА, что делает целесообразным исключение фазы из вектора измеряемых параметров.

В третьей главе рассматриваются пути уменьшения влияния аппаратных ограничений и условий эксплуатации РЭА на качество ее функционирования.

Показано, что неучет отличия распределения атмосферной и индустриальной

помех от нормального на этапах проектирования и испытаний РЭА, работающей в МВ или ДКМВ диапазонах волн, приводит к существенному ухудшению качества ее функционирования. В работе предложен сравнительно простой способ моделирования указанных помех при полунатурных испытаниях РЭА.

Известные способы стохастического моделирования негауссовых помех предполагают использование четырехмерного совместного распределения амплитуды и фазы помехи, которое, как правило, неизвестно. Моделирование квазиимпульсных помех типа атмосферной и промышленной предложено производить путем формирования реализации импульсной составляющей помехи по известным распределениям длительности выбросов помехи $W_d(x)$ и интервалов между ними $W_i(x)$, полученным в рамках логарифмически нормальной модели, обеспечивающей хорошее совпадение с экспериментальными данными и простое согласование с ними через параметр V_d . Интервалы между импульсами заполняются коррелированным нормальным шумом с интервалом корреляции, обратно пропорциональным эффективной полосе пропускания входного фильтра приемника, моделирующим фоновую составляющую помехи, дисперсия которой также определяется через параметр V_d .

Реализация импульсной составляющей помехи формируется в системе координат с логарифмической шкалой по оси ординат расстановкой по оси времени выбросов огибающей помехи, имеющих в этих координатах вид прямоугольных треугольников. При этом уровень импульсов устанавливается, начиная с верхнего до уровня фоновой составляющей. Основанием для выбора такой аппроксимации импульсов служит экспоненциальный характер импульсов на выходе одиночного контура, используемого обычно во входных цепях приемника. При логарифмической шкале по оси ординат такие импульсы преобразуются в прямоугольные треугольники.

Параметры очередного импульса на текущем уровне огибающей помехи E_0 - пиковое значение и длительность на уровне среднеквадратического значения огибающей фоновой составляющей помехи определяются с использованием распределений $W_d(x)$ и $W_i(x)$, тангенс же угла наклона K гипотенузы импульса относительно основания численно равен коэффициенту затухания импульса α , совпадающего с эффективной полосой пропускания входного фильтра. Если пиковое значение этого импульса больше пикового значения импульса, сформированного на предыдущем

уровне, то, поскольку импульсы, превышающие этот уровень, уже сформированы, данный импульс аннулируется, а на его месте формируется следующий.

Процесс формирования отсчетов импульсной составляющей помехи сводится к просмотру всех моментов выборки в пределах реализации помехи. Если момент отсчета t_{om} попадает в интервал между начальной (t_n) и конечной (t_k) координатами очередного импульса, то амплитуда помехи в этом момент принимается равной

$$A = (t_k - t_{om}) K \cong (t_k - t_{om}) \Delta f. \quad (19)$$

Фаза φ в отсчетной точке определяется на основании равномерного распределения и остается постоянной для всех отсчетов в пределах импульса.

После нахождения амплитуды и фазы формируются отсчеты квадратурных компонент помехи $A \sin \varphi$ и $A \cos \varphi$. Целесообразность перехода к ним обусловлена тем, что в современных приемниках часто используется квадратурный выход, облегчающий последующую фильтрацию и снижающий при цифровой обработке требования к производительности вычислителя. При попадании момента отсчета в интервал между выбросами помехи формирование отсчетов квадратурных компонент фоновой составляющей помехи производится из двух независимых процессов с дисперсиями равными половине дисперсии фоновой составляющей.

Достоинством предлагаемого способа формирования квазиимпульсных помех при полунатурных испытаниях РЭА является возможность адаптации модели через параметр V_d к условиям эксплуатации РЭА, поскольку в литературе приводятся экспериментальные данные о зависимости V_d от условий радиоприема: географического района, времени года и времени суток (для атмосферной помехи); высоты точки приема над промышленным районом (для промышленной помехи) и от частотного диапазона и входной полосы пропускания приемника (для обоих видов помех).

Наряду с разработкой рассмотренного выше способа моделирования помеховой обстановки, имеющей место при эксплуатации РЭА и разработкой алгоритмов обработки сигнала, оптимизированных к распределению помех, либо инвариантных к нему повышение качества функционирования РЭА и уменьшение его зависимости от условий эксплуатации возможно с использованием адаптивных способов приема сигналов в условиях помех с изменяющимися характеристиками. Предложен адаптивный способ приема импульсного сигнала в условиях атмосферной помехи, явля-

ющей одним из основных видов непреднамеренных помех в ДКМВ и низкочастотной части МВ диапазона волн и отличающейся значительной изменчивостью.

Выше отмечалось, что при использовании для подавления преобладающей по мощности импульсной составляющей квазиимпульсной помехи в качестве нелинейного преобразователя ограничителя с порогом на уровне среднеквадратического значения фоновой составляющей выигрыш в дисперсии оценки параметров слабого сигнала приближается к потенциально достижимому, вытекающему из теории оптимальной оценки параметров сигнала в условиях негауссовых помех. Показано, что для атмосферной помехи алгоритм формирования порога ограничения имеет вид

$$U_n = \left[\overline{E_\phi^2(t)} \right]^{1/2} = \left[\overline{E(t)} \right]^2 / \left[\overline{E^2(t)} \right]^{1/2}, \quad (20)$$

где $E(t)$ и $E_\phi(t)$ - соответственно огибающие помехи и ее фоновой составляющей, а черта сверху означает усреднение.

Как видим, формирование порога заключается в выделении в паузе сигнала огибающей помехи с помощью амплитудного детектора, усреднения и преобразований, выполняемых, например, с использованием микропроцессорной техники. При этом усреднение должно производиться в течение интервала времени T_y , удовлетворяющего условию $\tau_k \ll T_y \leq \tau_n$, где τ_k и τ_n - соответственно интервал корреляции помехи и длительность паузы сигнала. Заметим, что адаптивный порог (20) будет отслеживать изменение уровня фоновой составляющей помехи как из-за изменения степени ее импульсности, так и из-за изменения интенсивности помехи.

Показано, что в случае воздействия на приемник, снабженный ограничителем с адаптивным порогом (20), помехи с постоянной амплитудой E_0 типа тональной или узкополосной с частотной либо фазовой модуляцией порог будет поддерживаться на уровне амплитуды помехи: полагая в (20) $E(t) = E_0$, получаем $U_n = E_0$. Ограничение же такой помехи нежелательно, так как это приводит к снижению помехоустойчивости приема за счет обогащения спектра помехи.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований получены следующие основные научные результаты:

1. Доказано, что в радиотехнических системах с частотным разделением каналов, в частности, в приемной навигационной аппаратуре, при неточной настройке канального фильтра в условиях воздействия интенсивных помех возникает сдвиг оценки фазы, причем проводимая калибровка, устраняющая различие в фазовых набегах в частотных каналах, в таких условиях неэффективна вследствие возникновения асимметрии спектра помехи на выходе фильтра.

2. Показано, что в приемной навигационной аппаратуре потребителя в условиях интенсивных помех и воздействующих факторов при низкой производительности вычислителя целесообразно применение метода наименьших квадратов, обеспечивающего точность фильтрации навигационных параметров близкую к точности, которую дает использование методов оптимальной либо квазиоптимальной линейной фильтрации, требующих больших вычислительных затрат.

3. Разработан алгоритм моделирования атмосферных и промышленных помех, имеющих квазиимпульсный характер с преобладающей импульсной составляющей в диапазонах МВ и декаметрового диапазона, в которых работает большое количество радиотехнических устройств и систем различного назначения, позволяющий описать интерференционную картину при определении требований к помехоустойчивости аппаратуры радиотехнических систем на этапах ее проектирования и испытаний.

4. Предложены рекомендации по моделированию близкой к реальной помеховой обстановки и использованию адаптивной обработки сигнала в приемной аппаратуре радиотехнические системы с автоматической установкой порога ограничения в зависимости от параметров импульсной (атмосферной или промышленной) или тональной помехи с изменяющимися характеристиками, которые позволяют уменьшить влияние аппаратурных ограничений и условий эксплуатации на качество функционирования радиотехнических систем. Проведенное численное исследование показало, что при использовании ограничителя с оптимальным порогом ограничения и входной полосе $\Delta f = 3$ кГц в условиях воздействия квазиимпульсной поме-

хи с параметром импульсности $V_d = 15$ дБ, отношение сигнал/шум увеличивается на 23... 27 дБ.

5. Полученные результаты нашли свое практическое применение для теории и практики проектирования и эксплуатации радиоэлектронных устройств и систем различного назначения в АО «Концерн ГРАНИТ», в Испытательном центре МТУСИ в виде методик для проведения испытаний радиоэлектронного оборудования, а также используются в курсе лекций и лабораторном практикуме по курсу «Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах» кафедры «Метрология, стандартизация и измерения в инфокоммуникациях» МТУСИ. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждается соответствующими актами. Для практического применения результаты исследования рекомендуется использовать проектным и исследовательским организациям при проектировании, испытаниях, а также организациям, осуществляющим разработку испытательных комплексов для радиоэлектронной аппаратуры радиотехнических систем различного назначения.

Список публикаций автора по теме диссертации:**В изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования материалов диссертаций:**

1. Немыкин, А.А. Погрешность фазовых измерений на поднесущей / А.А. Немыкин, Е.П. Строганова // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 2. – С. 60-61.
2. Немыкин, А.А. Сравнительный анализ точностных характеристик систем синхронизации связной и навигационной радиоэлектронной аппаратуры с фазовой и частотной автоподстройкой в условиях интенсивных помех / А.А. Немыкин, Е.П. Строганова // Т-Comm. – 2010. – № 10. –С. 133-136.
3. Немыкин, А.А. Построение приемного тракта в условиях совместного действия импульсных и узкополосных помех/ А.А. Немыкин // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. –С. 13-15.
4. Немыкин, А.А. Модель атмосферных и промышленных помех, адаптированная к условиям эксплуатации приемной радиоэлектронной аппаратуры/ Е.П. Строганова, А.А. Немыкин // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – № 2. –С. 48-53.
5. Немыкин, А.А. Неидеальность характеристик элементов при измерениях фазы / А.А. Немыкин // Вестник связи. – 2016. – № 3. –С. 8-10.
6. Немыкин, А.А. Сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов фильтрации флуктуирующих параметров в условиях ограниченной производительности вычислителя / А.А. Немыкин // Т-Comm. – 2016. – № 4. –С. 26-30.
7. Немыкин, А.А. Алгоритм обработки и качество оценки сигнала при аддитивных помехах / А.А. Немыкин // Вестник связи. – 2018. – № 12. –С. 27-29.

Работы, опубликованные автором в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science, Scopus Web of Science, Scopus Astrophysics, Data System, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, Agris, GeoRef:

8. Nemykin, A.A. Comparative Analysis of the Accuracy And Dynamic Characteristics of Navigate Radio Electronic Equipment with Phase and Frequency Auto Surveying in Intensive Inferences/ A.A. Nemykin// IEEE /Publication Year: 2019, Page(s): 1 – 4.

9. Nemykin, A.A., Stroganova E.P. Analysis of Moving Radio Electronic Measuring Instruments Characteristics/ A.A. Nemykin, E.P. Stroganova// IEEE/ Publication Year: 2020, Page(s): 1 – 4.

Другие статьи и материалы конференций:

10. Немыкин, А.А. Влияние неидеальности характеристик элементов фазоизмерителя на точность измерения фазы в условиях помех / А.А. Немыкин // 65-я научная сессия, посвященная Дню Радио, труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. – М.: ООО «Инсвязьиздат»– 2010. –С. 84-87.

11. Немыкин, А.А. Адаптивный прием импульсного сигнала в условиях атмосферных помех / А.А. Немыкин // 65-я научная сессия, посвященная Дню Радио, труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. – М.: ООО «Инсвязьиздат»– 2010. –С. 121-122.

12. Немыкин А.А. Влияние точности настройки фильтра фазоизмерительного устройства на качество оценки фазы квазигармонического сигнала в условиях помех / А.А. Немыкин // 65-я научная сессия, посвященная Дню Радио, труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. – М.: ООО «Инсвязьиздат»– 2010. –С. 122-124.

13. Немыкин А.А. Влияние динамики движения подвижного объекта на точностные характеристики размещаемого на нем навигационного измерителя / А.А. Немыкин // 65-я научная сессия, посвященная Дню Радио, труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. – М.: ООО «Инсвязьиздат»– 2010. –С. 87-91.

14. Немыкин, А.А. Реализация адаптивного приема импульсного сигнала в условиях атмосферных помех./ А.А. Немыкин// Сборник трудов X международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». – М.: МТУСИ - 2016. –С. 193.

15. Немыкин, А.А. Оптимизация приемного тракта в условиях атмосферных и промышленных помех / Е.П. Строганова, А.А. Немыкин// Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Компьютерные, прикладные и инженерные инновации и модернизация отраслей промышленности»– 2018.- вып.4, –С. 12-18.