

На правах рукописи

Калинин Владимир Андреевич

**АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ
МОЩНОЙ ВНЕПОЛОСНОЙ ПОМЕХИ НА РАДИОПРИЕМНОЕ
УСТРОЙСТВО**

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Ивлев Дмитрий Николаевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, Мальцев Александр Александрович;

доктор физико-математических наук,
профессор, Есипенко Валентин Иванович.

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Воронежский государственный университет».

Защита состоится «_____» _____ 201__ г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. __, ауд. _____).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «_____» _____ 201__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. н., доцент

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Среди проблем помехоустойчивости радиосистем особое место занимает проблема помехоустойчивости радиоприемных устройств (РПУ) по отношению к мощным помехам, превышающим динамический диапазон входных активных цепей РПУ. Воздействие мощных помех на активные цепи радиоприемного тракта приводит к нелинейным искажениям полезного сигнала. Наиболее остро эта проблема стоит в радиоэлектронных комплексах, системах спутниковой навигации и радиосвязи, системах связи малого радиуса действия. Нелинейные искажения могут возникать в приемнике при попадании на входные активные цепи (такие, как малошумящий усилитель) целенаправленно поставленных блокирующих помех, или при непреднамеренном воздействии на радиоприемное средство мощного сигнала другой радиоэлектронной системы. И в том и в другом случае, если входные фильтры не могут ослабить помеху в достаточной степени, активные входные цепи переходят в нелинейный режим работы, что приводит к сильным нелинейным искажениям и снижению коэффициента усиления полезного сигнала. Подобные искажения могут возникнуть и в передатчике, при попадании мощного сигнала от другого радиопередающего средства на активные цепи передатчика. Результаты различных теоретических и экспериментальных исследований показывают существенное негативное влияние различных систем передачи информации друг на друга, когда такие системы одновременно работают в ограниченной области пространства и используют один и тот же или смежные частотные диапазоны.

Существует достаточно много работ, посвященных описанию нелинейных эффектов, возникающих при прохождении смеси полезного сигнала, шума, мощной помехи (или сигнала большой мощности и шума) по приемному тракту радиотехнического устройства. Подробно рассмотрены явления перегрузки усилительных устройств, перекрестные искажения и явления интермодуляции, вопросы образования комбинационных частот и т.д. Следует отметить, что в этих исследованиях обычно предполагалось, что на первые каскады усиления и преобразовательные каскады поступают сравнительно слабые сигналы, и искажения происходят в блоках дальнейшей обработки сигнала. В последнее десятилетие появилось большое число работ, в которых количественно оценивается влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость цифровых систем связи, на форму энергетического спектра случайных последовательностей. Эти работы позволяют оценить ухудшение качества связи, вызванное нелинейными искажениями, и могут быть полезны при проектировании радиоэлектронных средств.

Относительно недавно были предложены два новых способа выделения полезного сигнала на фоне мощной блокирующей помехи, проникающей на входные активные цепи РПУ [1,2]. Первый источник описывает модель

приёмного устройства, осуществляющего коррекцию нелинейных искажений фазомодулированных сигналов, а метод, предложенный во второй работе, подходит для приёма сигналов произвольного вида. В основе метода, лежит идея компенсации амплитудно-амплитудных и амплитудно-фазовых перекрёстных искажений слабого полезного сигнала, возникающих при работе входного усилителя РПУ в нелинейном режиме, вызванном воздействием на вход РПУ мощной блокирующей помехи. Структура предложенного в работе [2] приемника приведена на рис. 1.



Рис. 1. Упрощённая блок-схема помехоустойчивого приёмника.

Компенсация перекрёстных искажений в предложенном методе осуществляется исходя из получаемой информации о величине этих искажений в каждый момент времени. Величина амплитудных и фазовых искажений полезного сигнала вычисляется с помощью оценки мгновенной мощности помехи на входе усилителя РПУ. Зависимости величин амплитудных и фазовых искажений полезного сигнала от мгновенной мощности помехи на входе усилителя хранятся в специальных корректировочных таблицах, находящихся в памяти РПУ. В каждый момент времени приёмник измеряет мгновенную мощность помехи на входе усилителя и по таблицам определяет степень искажений полезного сигнала, в соответствии с которыми корректирует принимаемый сигнал. Описанный способ предлагается к использованию в цифровых системах связи.

Стоит особо отметить, что метод, предложенный в [2], при использовании сигналов с расширенным спектром может быть так же применен и в случае попадания мощной помехи в полосу полезного сигнала. В таком случае сама помеха устраняется при сжатии спектра передаваемого сообщения в приемнике, нелинейные искажения устраняются с помощью метода амплитудно-фазовой компенсации.

Описанный в [2] метод был использован в качестве основного в ходе выполнения работы. Этот метод нуждается в дополнительном исследовании, так как он не прошел экспериментальной проверки. Кроме того, возможно дальнейшее совершенствование метода, поскольку он учитывает не все особенности работы в нелинейном режиме перегруженного мощной помехой входного каскада РПУ. В то же время, интересным направлением помехоустойчивости информационно-измерительных систем (ИИС) является

разработка способов защиты от мощных помех других радиоприемных устройств, например, радиометров и интерферометров.

Целью работы является повышение устойчивости РПУ к воздействию мощной внеполосной помехи.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Проведение компьютерного моделирования и оценки эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи.
2. Создание лабораторного макета цифровой системы связи, приемник которой реализует исследуемый метод. Проведение с помощью созданного макета экспериментального исследования эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи. Разработка модернизированного метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений.
3. Проведение анализа нелинейных искажений, возникающих в приемниках слабых шумовых сигналов (корреляционном приемнике и модуляционном радиометре) при воздействии мощной внеполосной помехи на вход устройств. Разработка принципов построения приемников слабых шумовых сигналов (радиометров и интерферометра), включающих в себя систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений.
4. Разработка и создание цифрового корреляционного приемника, предназначенного для применения в составе комплекса измерения параметров антенн. С помощью созданного приемника проведение экспериментального исследования эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в корреляционном интерферометре.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально подтверждена эффективность применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи.
2. Усовершенствован метод амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений, к существующей структуре добавлен канал оценки частоты помехи на входе усилителя.
3. Проведен анализ нелинейных искажений, возникающих в корреляционном приемнике и модуляционном радиометре при воздействии мощной внеполосной помехи на вход устройств. Разработан принцип построения корреляционного и модуляционного радиометров, а так же корреляционного интерферометра, имеющих в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений принимаемого сигнала. Получены экспериментальные данные, подтвердившие эффективность применения метода в корреляционном интерферометре.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в результатах анализа нелинейных искажений, возникающих в корреляционном приемнике и модуляционном радиометре при воздействии мощной внеполосной помехи на вход устройств. В обосновании возможности применения метода амплитудно-фазовой компенсации в случае приема узкополосных сигналов любого типа, в том числе шумовых, в корреляционном приемнике и модуляционном радиометре. В результатах анализа влияния шумов на точность измерения параметров и на точность работы метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений.

Практическая значимость работы состоит в разработке лабораторного макета цифровой системы связи, приемник которого реализует метод амплитудно-фазовой компенсации. В экспериментальной оценке эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи. В разработке принципов построения радиометров и интерферометра, имеющих в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений принимаемого сигнала. В экспериментальной оценке эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в корреляционном интерферометре.

Результаты работы могут быть применены при разработке радиоэлектронных средств различного назначения (радиолокационных, связных, навигационных, измерительных и др.), функционирующих в условиях возможного воздействия непреднамеренных и организованных мощных помех. Они были использованы при выполнении работ по Государственному контракту № П1239 от 27 августа 2009 г, «Разработка новых способов повышения помехоустойчивости информационно-измерительных систем против мощных помех» заключенному в рамках реализации мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

Разработанный и созданный в ходе работы корреляционный приемник был использован:

- в ряде хозяйственных ОКР, выполненных ННГУ в интересах Российского космического агентства, в частности, ОКР «Разработка и создание аппаратно-программного комплекса для радиолокационных измерений характеристик и юстировки антенны П2500» и ОКР «Разработка и создание аппаратно-программного комплекса и проведение измерений характеристик и параметров антенны П-2500 радиолокационным и радиометрическим методами»;

- при выполнении Государственного контракта № П683 от 20 мая 2010г. «Развитие и применение радиоинтерферометрических методов для исследования космических объектов и характеристик наземных антенных комплексов», выполненного в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной

целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Разработанный корреляционный приемник доступен для мелкосерийного производства.

Внедрение научных результатов. Полученные в диссертации результаты использованы в научно-исследовательских работах в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, проводимых в рамках мероприятий 1.3.1 и 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. Разработанный корреляционный приемник был использован в серии радиологических измерений на крупнейшей отечественной полноповоротной антенне П2500 с зеркалом диаметром 70 метров, расположенной в центре космической связи Уссурийск.

Апробация результатов работы и публикации

Результаты диссертационной работы представлялись на VII научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 2008), на 13-ой и 14-ой научных конференциях по радиофизике, (Н. Новгород, 2009 и 2010), на Всероссийской Астрономической Конференции «От эпохи Галилея до наших дней» (Нижний Архыз 2010), на международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2011» (Таганрог, 2011).

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК.

Вклад автора

Провел экспериментальные исследования применения метода амплитудно-фазовой компенсации, участвовал в разработке и создании корреляционного приемника для антенных измерений и лабораторного макета цифровой системы связи, предложил модернизированный метод амплитудно-фазовой компенсации, разработал структуры радиометров и интерферометра, имеющих в своем составе системы амплитудно-фазовой компенсации нелинейных искажений, участвовал в радиологических измерениях на 70-ти метровой зеркальной антенне П2500.

Результаты, выносимые на защиту

1. Экспериментально установлено, что метод амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений позволяет с высокой эффективностью принимать сигнал на фоне мощной внеполосной помехи в приемнике цифровой системы связи и корреляционном интерферометре.
2. Предложен усовершенствованный метод амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений с оценкой частоты мощной

помехи и автоматическим обновлением параметров компенсации в приёмнике.

3. Сформулирован принцип построения корреляционного и модуляционного радиометров, а так же интерферометра, имеющих в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 126 наименования. Общий объём диссертации составляет 155 страниц, из них основной текст 143 страниц, библиографический список – 12 страниц. Работа содержит 79 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении излагаются состояние и актуальность темы исследования, краткий обзор известных результатов по теме диссертации, цели и структура работы.

В первой главе Приведено краткое описание эффектов нелинейного взаимодействия полезного сигнала и мощной внеполосной помехи, возникающих в малошумящем усилителе.

Описана модель нелинейных искажений, используемая в качестве базовой при разработке и исследовании метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений. Эффект амплитудно-амплитудной перекрестной модуляции описывается путем задания зависимости относительного амплитудного коэффициента усиления полезного сигнала G_0 от мгновенной мощности помехи на входе усилителя P_i :

$$G_0(P_i) = G(P_i) / G(0), \quad (1)$$

где $G(P_i)$ — вещественный коэффициент усиления полезного сигнала в усилителе при наличии мощной помехи, $G(0)$ — коэффициент усиления полезного сигнала при отсутствии помехи.

Аналогично, эффект амплитудно-фазовой перекрестной модуляции описывается с помощью задания зависимости изменения относительного сдвига фазы сигнала $\Delta\varphi_0(P_i)$ от мгновенной мощности помехи на входе усилителя P_i :

$$\Delta\varphi_0(P_i) = \Delta\varphi(P_i) - \Delta\varphi(0), \quad (2)$$

где $\Delta\varphi(P_i)$ — сдвиг фазы полезного сигнала при прохождении через усилитель при наличии помехи на входе усилителя мощностью P_i , $\Delta\varphi(0)$ — сдвиг фазы полезного сигнала при прохождении через усилитель в отсутствие помехи.

Вводится относительный комплексный коэффициент усиления, описывающий одновременно амплитудно-амплитудную и амплитудно-фазовую перекрестные модуляции:

$$\dot{G}_0(P_i) = G_0(P_i) \exp[j\Delta\varphi_0(P_i)]. \quad (3)$$

Приведены результаты проведенных в работе экспериментальных исследований современных маломощных усилителей (МШУ), показавшие существенность как амплитудных, так и фазовых искажений полезного сигнала во всех исследуемых усилителях при воздействии мощной внеполосной амплитудно-модулированной помехи.

Измерения характеристик $G_o(P_i)$ и $\Delta\varphi_0(P_i)$ проводились согласно схеме, приведенной на рис. 2. Измеритель S-параметров использовался для измерения модуля коэффициента усиления и фазового сдвига полезного сигнала при его прохождении через МШУ. Слабый полезный сигнал с частотой 434 МГц и мощностью -40 дБм с выхода измерителя S-параметров подавался на одно из плеч сумматора, на другое плечо с выхода генератора помехи поступала помеха на частоте 431 МГц с варьируемой мощностью. Сумма сигналов проходила через МШУ, на выходе которого с помощью полосового ПАВ-фильтра выделялась полоса частот полезного сигнала. С выхода фильтра полезный сигнал с той частью интермодуляционных искажений, которые попали в полосу полезного сигнала, поступал в приёмный канал измерителя S-параметров. При каждом измерении производились замеры значений коэффициента усиления и сдвига фазы полезного сигнала для нулевой и для заданной мощности помехи. Значения измеренных параметров G и $\Delta\varphi$ поступают в персональный компьютер, где происходит их запись, обработка и формирование зависимостей $G_o(P_i)$ и $\Delta\varphi_0(P_i)$ по формулам (1) и (2).

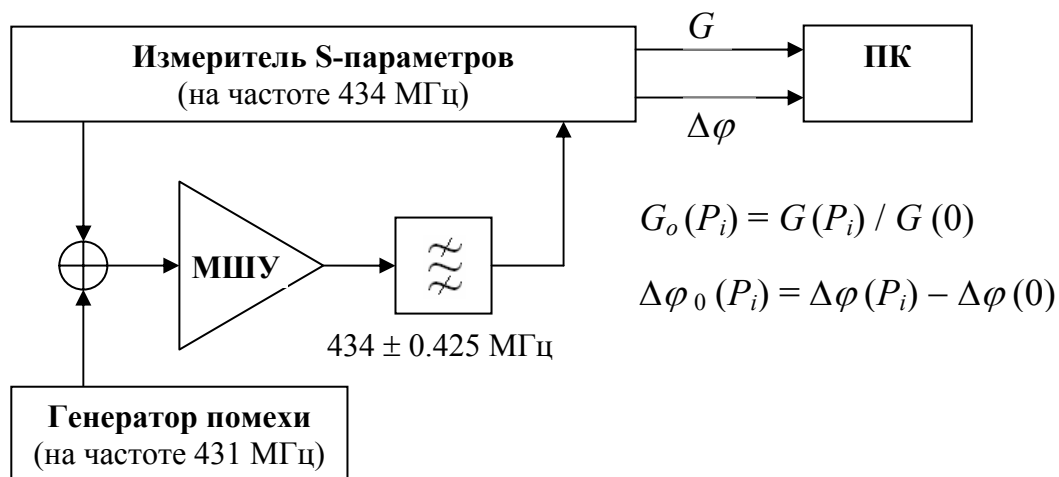


Рис. 2. Схема измерения характеристик $G_o(P_i)$ и $\Delta\varphi_0(P_i)$.

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости сдвига фазы $\Delta\varphi_0$, обусловленного межсигнальной амплитудно-фазовой конверсией и относительного коэффициента усиления G_0 полезного сигнала в МШУ AD8350AR15 от мгновенного значения мощности помехи на входе усилителя P_i .

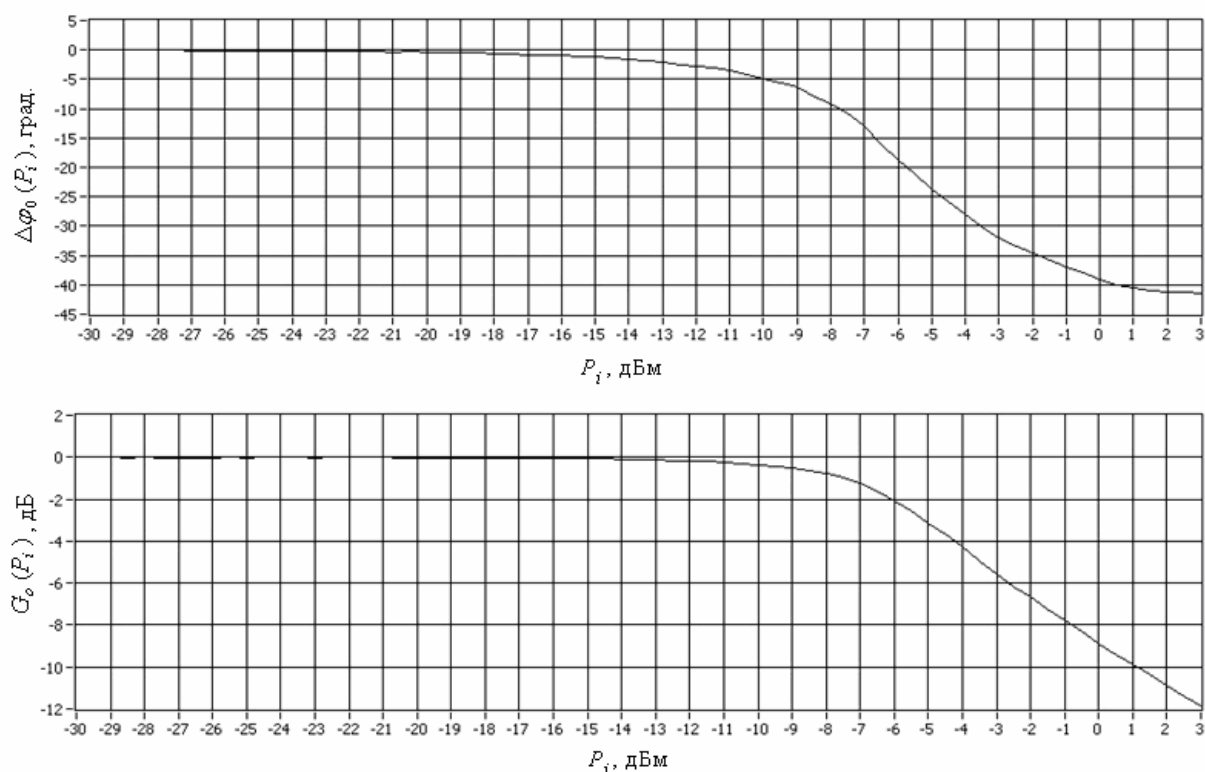


Рис. 3. Зависимости относительного сдвига фазы, обусловленного межсигнальной амплитудно-фазовой конверсией, и относительного коэффициента усиления полезного сигнала в МШУ AD8350AR15 от мощности помехи.

Полученные зависимости являются характерными для большинства современных МШУ. Максимальные величины данных искажений для исследованных усилителей колеблются по фазе в диапазоне от 20 до 160 градусов, а по коэффициенту усиления от 11 до 40 дБ. Такая глубокая модуляция фазы и амплитуды полезного сигнала при быстро меняющейся во времени амплитуде помехи может оказать катастрофическое влияние на качество передаваемой информации в современных системах связи и непременно нуждается в компенсации.

В результате проведенных исследований было установлено также, что значения относительных коэффициентов усиления и сдвига фазы не зависят от мощности полезного сигнала в случае, если его мощность не превышает динамический диапазон усилителя.

Приводятся результаты экспериментального исследования нелинейных перекрестных и интермодуляционных искажений. Полученные в результате экспериментов зависимости показывают, что самая мощная интермодуляционная составляющая 3-го порядка по амплитуде примерно в 40 раз слабее полезного сигнала. Это позволяет говорить о возможности пренебрежения всеми интермодуляционными составляющими, попадающими в полосу полезного сигнала.

Проведены экспериментальные исследования зависимости перекрестных амплитудно-фазовых искажений полезного сигнала в МШУ,

перегруженном мощной помехой, от частоты помехи. Как следует из полученных данных, изменения коэффициента усиления и сдвига фазы полезного сигнала в условиях действия помехи при изменении частоты помехи в пределах нескольких процентов составляют около 5 дБ и 8° соответственно. В случае модуляции сигнала с малым количеством точек в сигнальном созвездии (например, BPSK или QPSK), игнорирование этой зависимости, может не сильно сказаться на качестве принимаемого сигнала, однако, в случае модуляции сигнала с большим количеством точек в сигнальном созвездии (например, QAM-16, QAM-64, PSK-16 и т.д.), это может привести к значительному ухудшению качества работы помехоустойчивого приёмника.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают теоретические выводы, приведенные в работе [2] о том, что наиболее существенными из всех нелинейных искажений, возникающих при воздействии на вход МШУ мощной внеполосной помехи являются амплитудно-фазовые перекрестные искажения полезного сигнала. Таким образом, при компенсации нелинейных искажений необходимо, в первую очередь, компенсировать именно перекрестные искажения. Компенсацию перекрестных искажений можно проводить, путем деления каждого искаженного комплексного отсчета \dot{s} , поступающего с АЦП, на соответствующий комплексный коэффициент усиления МШУ $\dot{G}_0(P_i)$, введенный в (3) по формуле, предложенной в [2]:

$$\dot{s}' = \dot{s} / \dot{G}_0(P_i),$$

где \dot{s}' - значение скорректированного отсчета.

В случае относительно медленного изменения огибающей помехи, компенсация перекрестных искажений приводит к практически полному восстановлению искаженного сигнала. Значения максимальной частоты изменения огибающей мощности помехи, при которой метод будет работать, определяются инерционными свойствами усилителя и канала выделения огибающей помехи.

Во второй главе приводятся результаты проведенного имитационного компьютерного моделирования работы системы амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи. Произведено сравнение вероятности возникновения битовой ошибки в обычном приемнике, не подверженном воздействию мощной внеполосной помехи, с вероятностью возникновения ошибки в приемнике с применением системы амплитудно-фазовой компенсации, на вход которого поступает мощная внеполосная помеха. Для уменьшения негативного влияния шума на точность измерения параметров компенсации используется временное усреднение. Получены количественные оценки интервала усреднения, необходимого для измерения параметров компенсации с заданной точностью при фиксированном отношении сигнал/шум. Блок-схема имитационной модели программы измерения параметров компенсации приведена на рис. 4.

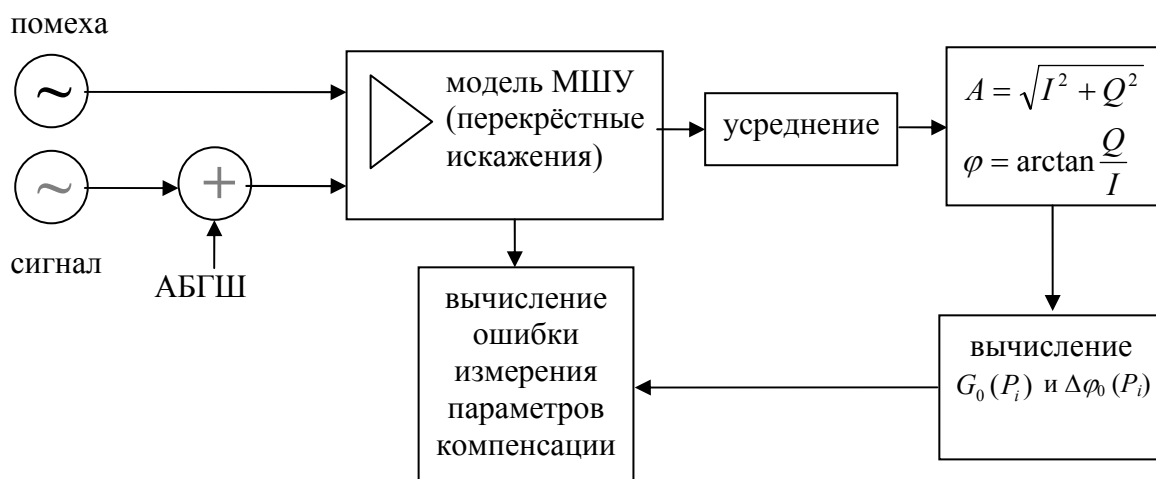


Рис. 4. Блок-схема имитационной модели алгоритма измерения параметров компенсации.

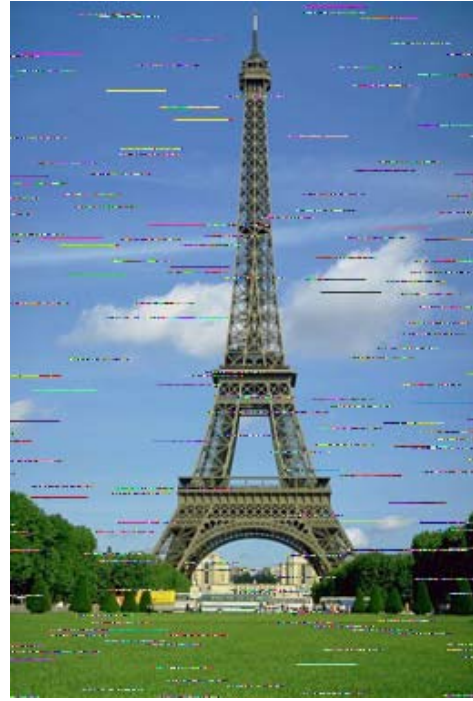
При изменении соотношения сигнал/шум от 10 до 25 дБ, интервал усреднения при измерении параметров компенсации, необходимый для получения приемлемого качества работы помехоустойчивого приемника при воздействии на его вход мощной внеполосной помехи, может меняться от нескольких единиц до нескольких сотен отсчетов. Полученные количественные оценки условий и допустимой точности измерения параметров представляют большой практический интерес при реализации метода.

Создан лабораторный макет цифровой системы связи, в приемнике которого реализован метод амплитудно-фазовой компенсации нелинейных искажений. Полученный макет позволяет на программном уровне гибко менять основные параметры цифровой системы связи, такие как способ модуляции сигнала, состав пакета, передаваемого в системе связи, тип фильтра, несущую частоту сигнала, а так же другие параметры. Программное обеспечение приемника и передатчика макета отображают сигнальные созвездия, глазковые диаграммы, спектр и форму переданного и полученного сигналов. Кроме того, в приемнике макета реализована функция автоматического вычисления вероятности возникновения битовых ошибок в системе связи. Полученный макет позволяет проводить широкий класс лабораторных исследований в области цифровых систем связи, а так же может использоваться в образовательном процессе.

Проведенные на базе созданного макета экспериментальные исследования подтверждают эффективность применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи. Эффективность применения метода была оценена визуально, по изменению качества изображения (рис.5), передаваемого по системе связи, и количественно, путем оценки изменения вероятности возникновения битовых ошибок в системе.



а) без коррекции нелинейных искажений (обычный приёмник)



б) с применением системы амплитудно-фазовой компенсации

Рис. 5. Принятое на фоне мощной помехи изображение при типе модуляции полезного сигнала QPSK.

Метод компенсации перекрестных искажений, реализованный в созданном экспериментальном макете цифровой системы связи, позволил достичь снижения вероятности возникновения битовых ошибок, вызванных нелинейными искажениями усилителя, более чем в 10^5 раз для сигнала с модуляцией QPSK и в 10^4 раз для модуляции QAM-16.

Как уже было сказано выше, искажения полезного сигнала при воздействии мощной внеполосной помехи, в общем случае могут зависеть не только от мгновенной мощности помехи, но и от ее частоты. Предложена усовершенствованная структура построения приемопередатчика цифровой системы связи, компенсирующего перекрестные искажения на основании оценки мощности и частоты помехи. Помимо оценки частоты помехи, в схему добавлена система автоматического измерения параметров компенсации нелинейных искажений. Для реализации системы измерения параметров компенсации предложено совместить принимающую и передающую части системы связи в одном блоке, получив таким образом один приемопередатчик, который будет использоваться на обоих концах системы связи. Обобщенная структура предложенного приемопередатчика представлена на рис. 6. Более подробная структура приведена в диссертационной работе.

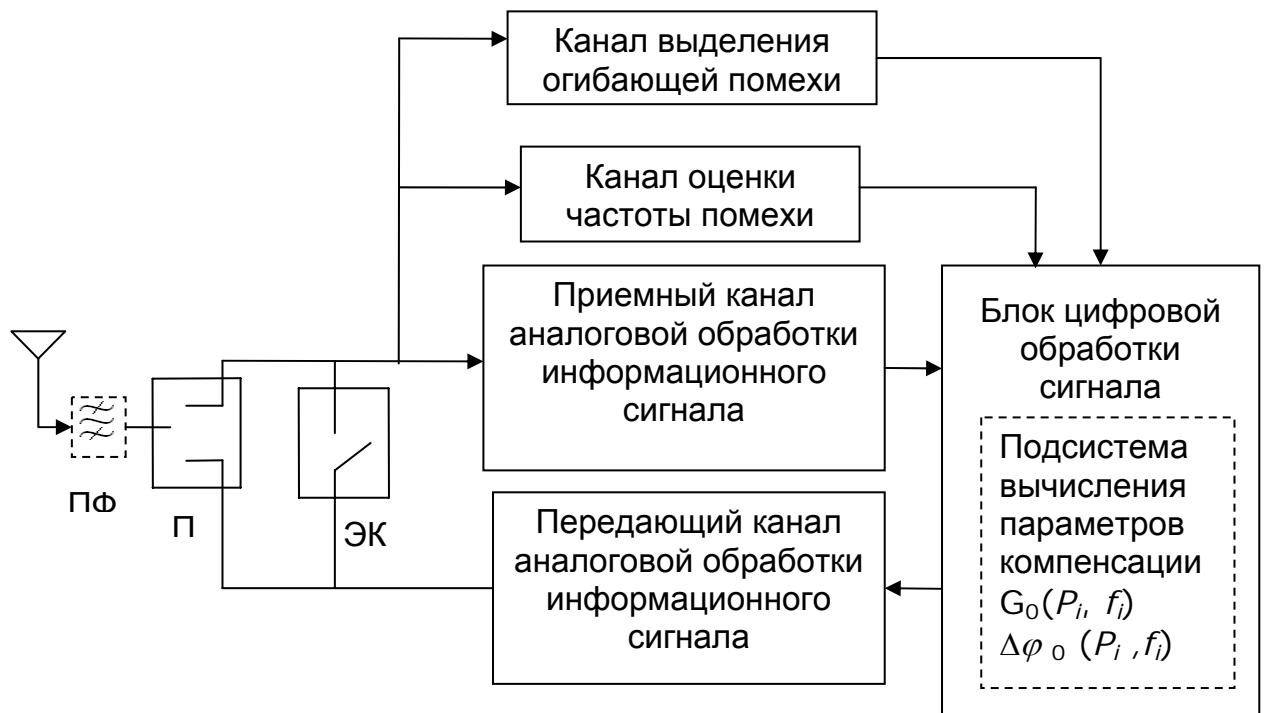


Рис. 6. Обобщенная структурная схема приёмопередатчика с измерением мощности и частоты помехи и системой измерения параметров компенсации.

Прием и передача осуществляются с помощью одной антенны, которая на время передачи приёмопередатчиком сигнала подключается с помощью переключателя П к передающей части системы, а в момент приема – к приёмной части. В процессе измерения параметров компенсации антенна отключается и от приёмной, и от передающей частей приёмопередатчика. В режиме измерения параметров компенсации в качестве полезного сигнала используется сигнал гетеродина приёмной части приёмопередатчика, а помеха генерируется передающей частью, и подается на вход приёмной части одновременно с сигналом через замкнутый ключ ЭК.

Предложенная структура позволит повысить помехозащищенность системы связи. Добавление системы измерения параметров компенсации позволит проводить повторные измерения этих параметров.

В третьей главе описан разработанный и созданный цифровой корреляционный приемник, предназначенный, главным образом, для проведения антенных измерений. Прибор реализован на базе ПЛИС. Он позволяет гибко менять основные параметры измерений: время накопления, полосу и центральную частоту принимаемого сигнала и т. д. Управление приемником осуществляется через компьютер с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Созданный приемник был использован в составе аппаратурно-программного комплекса для измерения характеристик 70-метровой полноповоротной зеркальной антенны П2500 в пункте космической связи «Уссурийск» и обеспечил реализацию высокоточных радиологических измерений в частотных диапазонах 4 ГГц и 11 ГГц, как по сигналам ИСЗ, так и естественных внеземных радиоисточников. Полученные экспериментальные данные – комплексные диаграммы направленности в

широком динамическом диапазоне и распределения поля в апертуре – используются в проводимых в настоящее время в рамках Федеральной космической программы России на 2006-2015 гг. работах по модернизации этой антенны и повышению ее потенциала.

Разработанный прибор может быть использован в других задачах, например, в задачах радиометрии, а так же в образовательном процессе.

Проведен анализ нелинейных искажений, возникающих в приемниках слабых шумовых сигналов при воздействии на вход устройств мощной внеполосной помехи. Предложены структурные схемы построения корреляционного и модуляционного радиометров, а так же корреляционного интерферометра (рис.7), имеющие в своем составе исследуемую систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений.

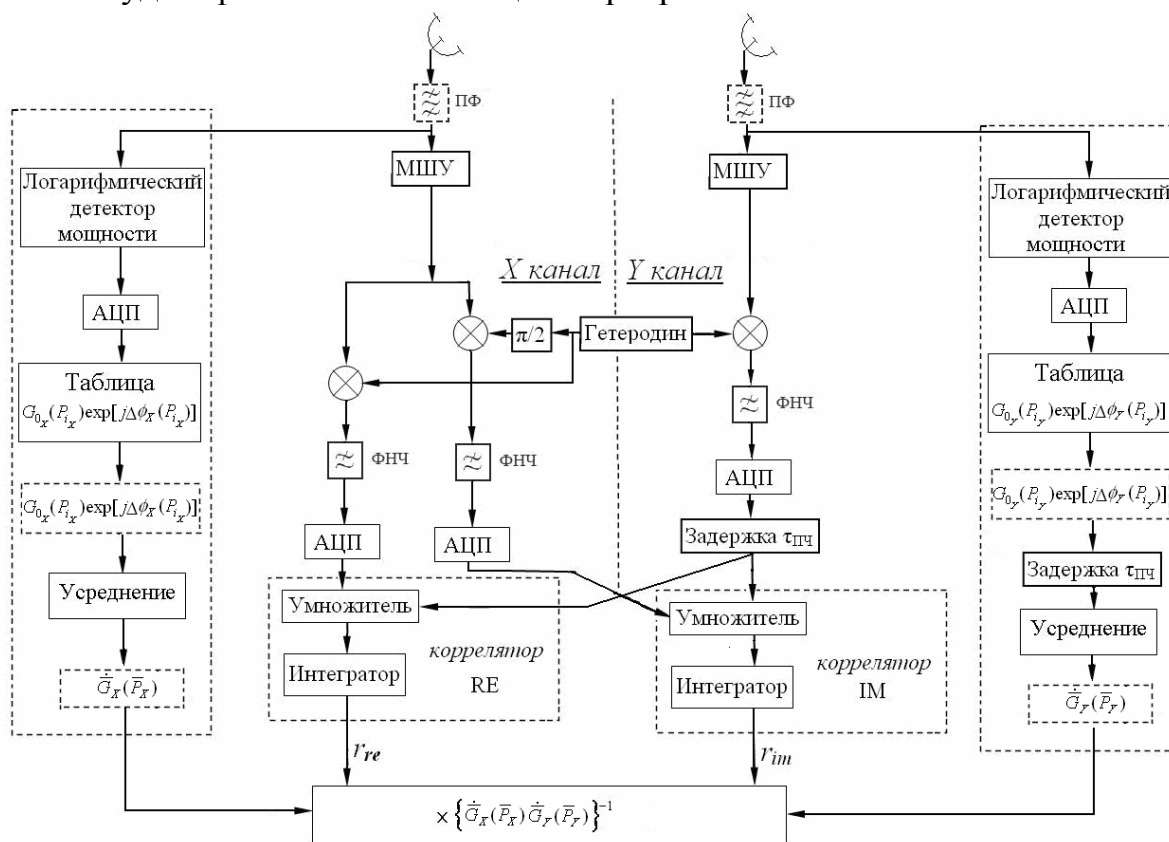


Рис. 7. Структура корреляционного интерферометра, устойчивого к воздействию мощной внеполосной помехи на оба его входа.

В приведенной структуре можно выделить блоки, присутствующие в схеме обычного интерферометра: МШУ, гетеродин, фазосдвигающая цепочка, смесители, фильтры нижних частот (ФНЧ), блоки аналого-цифрового преобразования (АЦП), корреляторы. Оценка мощности помех, присутствующих на входах МШУ интерферометра, а так же вычисление параметров компенсации осуществляется с помощью специальных каналов, подключенных к входам МШУ. Оценка мгновенной мощности помехи происходит с помощью логарифмического детектора мгновенной мощности, далее, с помощью специальной таблицы выбираются мгновенные параметры компенсации $\dot{G}_{0X}(P_{iX})$ и $\dot{G}_{0Y}(P_{iY})$, соответствующие данной мгновенной

мощности помехи. После усреднения получаются значения параметров компенсации $\dot{G}_X(\bar{P}_X)$ и $\dot{G}_Y(\bar{P}_Y)$. Для того, чтобы информация о мощности помехи не опережала полезный сигнал, проходящий через блок задержки $\tau_{ПЧ}$, в соответствующий канал оценки мгновенной мощности помехи вводится такая же задержка $\tau_{ПЧ}$. Сигнал с выходов корреляторов, а так же вычисленные параметры компенсации поступают на вход специального блока, осуществляющего компенсацию. Стоит особо отметить, что блок, осуществляющий компенсацию искажений, расположен после всех остальных блоков цифровой обработки. Возможность проведения компенсации после других этапов цифровой обработки следует из проведенного в диссертации анализа искажений. Такое расположение блока позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку на блок компенсации, и позволяет применять предложенный метод в уже созданных приборах.

С использованием разработанного цифрового корреляционного приемника была произведена экспериментальная оценка эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации в корреляционном интерферометре при воздействии на один из его входов мощной внеполосной помехи. Результат применения системы амплитудно-фазовой компенсации проиллюстрирован на рис. 8 и 9.

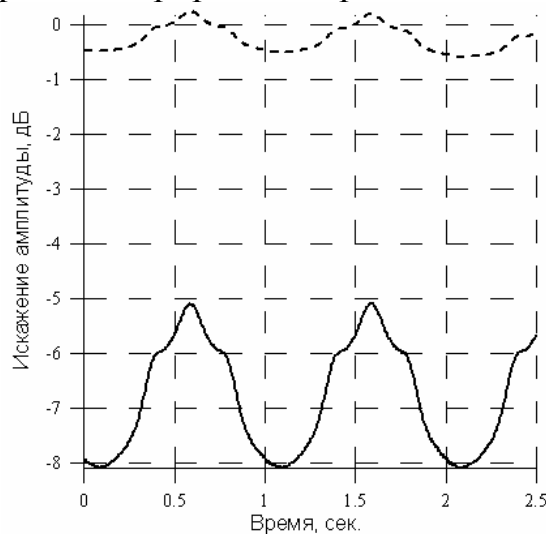


Рис. 8. Искаженное (сплошной линией) и скорректированное (штриховой линией) значения амплитуды комплексного отсчета корреляционной функции. Частота огибающей помехи 1 Гц, синусоидальный сигнал.

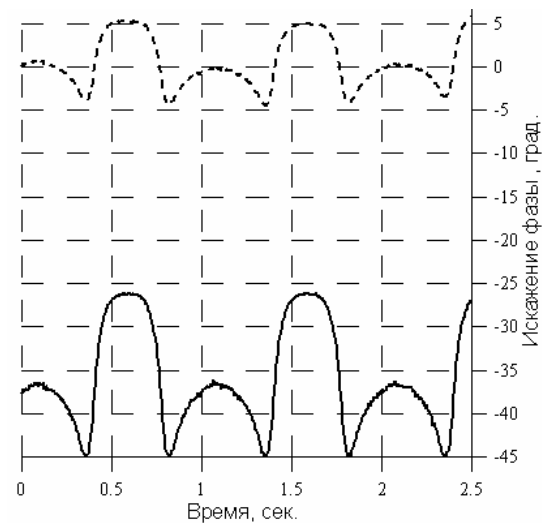


Рис. 9. Искаженное (сплошной линией) и скорректированное (штриховой линией) значения фазы комплексного отсчета корреляционной функции. Частота огибающей помехи 1 Гц, синусоидальный сигнал.

Как видно из сравнения рис. 8 и 9, уровень нелинейных искажений, присутствующих на выходе интерферометра, при применении системы коррекции снижается с 8 до 1 дБ по амплитуде, и с 45 до 5 градусов по фазе.

Полученный результат подтверждает эффективность применения исследуемого метода амплитудно-фазовой компенсации в корреляционном интерферометре.

В заключении приводятся основные выводы и результаты диссертационной работы.

В результате исследований были получены:

1. Имитационная компьютерная модель помехоустойчивого приемника с амплитудно-фазовой компенсацией перекрестных искажений, учитывающая влияние шума на точность измерения параметров и на точность работы системы компенсации искажений. Результаты проведенного компьютерного имитационного моделирования.
2. Лабораторный макет цифровой системы связи. Экспериментальные оценки эффективности применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи. Усовершенствованный метод амплитудно-фазовой компенсации нелинейных искажений, основанный на оценке не только мгновенной мощности, но и частоты мощной помехи.
3. Цифровой корреляционный приемник с перестраиваемыми параметрами работы, предназначенный для применения в составе комплекса измерения параметров антенн.
4. Принцип построения корреляционного и модуляционного радиометров, а так же корреляционного интерферометра, имеющих в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ивлев Д.Н., Орлов И.Я. Устройство обработки фазомодулированного сигнала в приемном канале. // Патент РФ на полезную модель № 53086 от 27.04.06.
2. Ивлев Д.Н. Приём и обработка сигналов от мобильных систем при воздействии мощных помех и множественных отражений. // Кандидатская диссертация. Нижний Новгород, 2006.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Из списка изданий, рекомендованных ВАК:

1. Ивлев Д.Н., Калинин В.А. Приём сигнала на фоне мощной помехи, превышающей динамический диапазон приёмника. // Известия вузов. Радиофизика, т.53, №9-10, 2010 г.
2. Калинин. В. А., Беагон В.С., Калинин А. В. Корреляционный радиометр для антенных и интерферометрических измерений. // Вестник ННГУ. Радиофизика, т.5, №3, 2011 г.
3. Калинин В.А., Ивлев Д.Н., Беагон В.С., Калинин А.В. Метод компенсации искажений, возникающих в корреляционном радиометре при воздействии

на один из его входов мощной внеполосной помехи. // Вестник ННГУ № 3, 2012 г.

Международные и всероссийские конференции:

4. Ивлев Д.Н., Калинин В.А., Балаганин А.В., Экспериментальная цифровая система передачи информации с конфигурируемым физическим уровнем. // Сборник трудов VII научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments», Москва, Россия, 28-29 ноября 2008 г.
5. Калинин А.В., Беагон В.С., Калинин В.А. Разработка на базе промышленных модулей цифровой обработки данных корреляционного радиометра для голографических исследований характеристик радиотелескопов. // Тезисы докладов Всероссийской Астрономической Конференции «От эпохи Галилея до наших дней». Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010 г.
6. Калинин А.В., Беагон В.С., Калинин В.А. Методика и аппаратура радиоголографических исследований характеристик больших зеркальных антенн. // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2011» Таганрог, 27 июня – 2 июля 2011 г.
7. Калинин А.В., Игнатов С.П., Беагон В.С., Калинин В.А. Методика и результаты исследований характеристик антенны П2500 в Уссурийске радиоголографическим методом в С-диапазоне. // Тезисы докладов Всероссийской Астрономической Конференции «От эпохи Галилея до наших дней». Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010 г.

Прочие издания:

8. Ивлев Д.Н., Калинин В.А. Компенсация перекрёстных искажений полезного сигнала в цифровом приёмнике, обусловленных воздействием мощной помехи. // Труды XIII научной конференции по радиофизике. ННГУ. Н. Новгород, 7 мая 2009 г.
9. Калинин В.А. Исследование влияния алгоритмов синхронизации на вероятность битовых ошибок в цифровом приемнике. // Труды XIV научной конференции по радиофизике. ННГУ. Н. Новгород, 7 мая 2010г.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

| | |
|--|------------|
| Список сокращений | 4 |
| Введение | 5 |
| Глава 1. Экспериментальный анализ перекрестных и интермодуляционных искажений, вызванных воздействием мощной внеполосной помехи. | 19 |
| 1.1. Искажения сигнала в усилителе при воздействии на его вход мощной внеполосной помехи..... | 19 |
| 1.2. Анализ перекрёстных и интермодуляционных искажений, возникающих при работе усилителя в нелинейном режиме, вызванном воздействием мощной внеполосной помехи..... | 19 |
| 1.3. Исследование зависимости амплитудных и фазовых перекрёстных искажений полезного сигнала в усилителе от частоты мощной внеполосной помехи..... | 24 |
| 1.4. Описание метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений..... | 40 |
| Выводы..... | 43 |
| Глава 2. Имитационное моделирование и экспериментальное исследование использования метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи. | 45 |
| 2.1. Структура приемника, имеющего в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений..... | 44 |
| 2.2. Моделирование влияния шума на точность измерения параметров компенсации перекрёстных искажений..... | 50 |
| 2.3. Имитационное моделирование работы алгоритма компенсации нелинейных искажений, учитывающие влияние погрешностей измерения параметров компенсации на точность алгоритма. | 58 |
| 2.4. Экспериментальные исследования применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемнике цифровой системы связи..... | 63 |
| 2.5. Структура приемопередатчика, имеющего в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений, основанную на оценке мощности и частоты помехи..... | 82 |
| Выводы..... | 86 |
| Глава 3. Применение метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в приемниках шумовых сигналов. | 88 |
| 3.1. Структуры радиометров и интерферометра, имеющих в своем составе систему амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений..... | 88 |
| 3.2. Цифровой корреляционный приемник для антенных измерений..... | 105 |
| 3.3. Экспериментальные исследования применения метода амплитудно-фазовой компенсации перекрестных искажений в корреляционном интерферометре..... | 131 |
| Выводы..... | 136 |
| Заключение | 138 |
| Литература | 144 |

Подписано в печать201 . Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

Лиц. ПД № 18-0099 от 14.05.2001 г.
603000, Н.Новгород, ул. Б. Покровская, 37