

На правах рукописи

МАСЛЕННИКОВ Роман Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ, ВНОСИМЫХ
РАДИОЧАСТОТНЫМ ТРАКТОМ, НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
БЕСПРОВОДНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ**

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 – 2011

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Мальцев А.А.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Есипенко В.И.

кандидат технических наук, Аверин И.М.

Ведущая организация:

ФНПЦ ФГУП "НПП "ПолеТ"

Защита состоится «_____» _____ 2012 г. в _____ на
заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском
государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу:
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.

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Вопросам воздействия искажений, вносимых радиочастотным трактом, на беспроводные системы связи, посвящено большое количество работ, начиная с середины прошлого столетия. Например, воздействие нелинейных искажений на радиосистемы изучается, начиная с 40-х годов XX века (Van Vlek J.H., Middleton D., 1943), а влияние фазовых флуктуаций было подробно рассмотрено в 60-х годах в работах Стратоновича Р.Л., 1961, Малахова А.Н., 1968.

Однако изучение влияния искажений, вносимых радиочастотным трактом, на системы радиосвязи остается актуальным до настоящего времени, что обусловлено несколькими современными тенденциями научно-технического прогресса.

Во-первых, огромные тиражи выпускаемых и продаваемых пользовательских устройств беспроводной связи (более одного миллиарда устройств ежегодно) позволяют разрабатывать и выпускать такие системы в виде специализированных интегральных схем, что требует высоких первоначальных инвестиций, однако позволяет сделать стоимость интегральной схемы (или набора интегральных схем), реализующей систему связи, не превышающей нескольких долларов США. В настоящее время достигнуты большие успехи в разработке сверхбольших интегральных схем (СБИС) для систем беспроводной связи, позволяющие совместить в одном полупроводниковом кристалле все необходимые функции, включая радиочастотные блоки передатчика и приемника, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, блоки цифровой обработки сигналов, встраиваемые процессоры для реализации программных функций и другие специализированные аппаратные модули.

Основной полупроводниковой технологией, используемой для производства массовых СБИС к настоящему времени стала технология КМОП (комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник; – англ. CMOS, Complementary-metal-oxide-semiconductor). Однако КМОП технология оптимизирована для цифровых интегральных схем, составляющих основную область ее применения. Недостатком использования данной технологии для разработки аналоговых и радиочастотных модулей являются худшие, с точки зрения построения аналоговых блоков, характеристики, а преимуществом – существенно более низкая цена изготовленных по данной технологии микросхем.

Результаты анализа наиболее современных коммерческих систем беспроводной связи показывают, что КМОП технология используется для подавляющего большинства массовых беспроводных систем связи. В этой связи получила распространение концепция (в англоязычной литературе – парадигма) “грязного радиочастотного тракта” (“Dirty RF”) (Fettweis G., 2005). В соответствии с данной концепцией радиочастотные и аналоговые блоки производятся на самой дешевой КМОП технологии, однако все возникающие в аналоговых и радиочастотных блоках искажения учитываются при разработке системы связи,

а также, если возможно, то компенсируются в цифровой части системы. Учет влияния аналоговых искажений происходит путем детального изучения механизмов их воздействия и выбора параметров системы связи таким образом, чтобы влияние данных искажений не приводило к существенному ухудшению характеристик системы связи.

Другой важной тенденцией, обуславливающей актуальность выбранного направления исследования является появление новых типов сигналов, для которых влияние искажений, вносимых радиочастотным трактом не изучено, или изучено не достаточно.

Традиционной схемой модуляции сигнала является модуляция с одной несущей частотой (Single Carrier – SC). В SC системе связи передача информации осуществляется путем модуляции последовательно следующих временных символов. Увеличение скорости передачи данных в SC системе связи приводит к увеличению частоты следования временных информационных символов (и, соответственно, увеличению рабочей полосы частот системы). В каналах с многолучевым распространением сигнала увеличение частоты следования временных символов в SC системе ведет к появлению межсимвольной интерференции, для устранения которой необходимо применение алгоритмов эквализации. Следует отметить, что при сильной межсимвольной интерференции алгоритмы эквализации для SC систем становятся очень сложными вычислительно, а также мало эффективными, позволяя устранять интерференцию лишь при очень малых уровнях аддитивного шума в канале связи.

Технологией, которая позволила существенно увеличить эффективность работы широкополосных систем беспроводной связи в каналах с сильной частотной селективностью является технология ортогонального частотного уплотнения многих поднесущих или OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) (Bingham J.A.C., 1990, van Nee, R.D.J., Prasad N., 2000).

OFDM является робастной схемой модуляции, обеспечивающей эффективную эквализацию сигнала в многолучевых частотно-селективных каналах связи. Технология модуляции сигналов OFDM применена в большинстве современных беспроводных систем связи, включая беспроводные сети Wi-Fi, системы беспроводного широкополосного доступа WiMAX, системы цифрового телевидения DVB-T, перспективную систему связи четвертого поколения LTE и многие другие.

Однако OFDM системам также присущ ряд существенных недостатков по сравнению с традиционной модуляцией с одной несущей частотой. Одним из основных таких недостатков является более высокая чувствительность OFDM модуляции к искажениям, вносимым аналоговыми и радиочастотными блоками.

Таким образом, влияние искажений аналоговых и радиочастотных блоков является важным фактором при выборе между SC и OFDM модуляциями, поэтому задача анализа таких искажений и механизмов их влияния является актуальной.

Следует отметить, что сравнительно недавно для работы в частотно-селективных каналах были предложены новые системы с одной несущей частото-

той, позволяющие проводить эквализацию в частотной области (Single carrier with frequency domain equalization – SC-FDE) (Pancaldi F, 2008). Такие SC-FDE системы по эффективности эквализации сигналов практически сравнимы с OFDM системам связи и изучение влияния искажений, вносимых радиочастотным трактом на SC-FDE системы связи, также является актуальной задачей.

Дополнительным фактором, обуславливающим важность выбранного направления исследований, является использование современными системами беспроводной связи новых частотных диапазонов. Наиболее актуальным учетом искажений, вносимых радиочастотным трактом, является для перспективных систем передачи данных диапазона 60 ГГц, разработка которых началась в последние несколько лет.

В большинстве стран (включая США, Японию и страны западной Европы) спектральный диапазон в районе частоты 60 ГГц является нелицензируемым, т.е. может использоваться без получения разрешений на отдельные устройства. Диапазон 60 ГГц был сделан свободным для использования из-за наличия в нем спектральной линии поглощения кислорода, приводящей к дополнительным потерям около 11 дБ/км, что ведет к неэффективности использования этого диапазона для радиоэлектронных средств, работающих на большие расстояния, но практически не влияет на беспроводные локальные и персональные сети с дальностью до 100-300 м. При этом величина нелицензируемого миллиметрового диапазона, например, в США составляет 7 ГГц (57-64 ГГц), что во много раз больше размеров частотных диапазонов 2.400 – 2.483 (83 МГц) и 5.150-5.850 ГГц (700 МГц), используемых системами локальной беспроводной передачи данных в настоящее время. Высокая несущая частота систем 60 ГГц диапазона не позволяет получить достаточно хороших характеристик аналоговых и радиочастотных блоков и делает вопрос анализа влияния рассматриваемых искажений на системы связи диапазона 60 ГГц особенно актуальным.

Основные типы аналоговых искажений, которым уделяется наибольшее внимание проводимых в данной области исследований, включают в себя:

- Фазовые флуктуации (фазовый шум) генераторов радиочастотных сигналов.
- Нелинейные искажения усилителя мощности.
- Шум квантизации аналого-цифровых преобразователей.

Проблема исследования фазовых флуктуаций генераторов сигнала является традиционной проблемой статистической радиофизики (Малахов А.Н., 1968). В последнее время большое внимание получили исследования фазового шума в интегрированных генераторах радиочастоты в беспроводных системах связи. Наибольший интерес представляют исследования влияния фазового шума в OFDM системах связи, где, в отличие от SC систем, возможности компенсации фазового шума ограничены. Ввиду высокой практической значимости, влияние фазового шума на OFDM системы связи активно изучалось в течение последних пятнадцати лет (см., например, Pollet T. *et al*, 1995, Petrovic D. *et al*, 2007). В большинстве исследований влияние фазового шума на OFDM системы связи рассматривалось для каналов распространения сигналов без временной дисперсии, обладающих равномерными частотными характеристиками во всей

полосе OFDM системы (частотно-плоские каналы). Использование данного предположения позволило получить важные аналитические результаты, объясняющие механизмы влияния фазового шума на OFDM системы. Однако более общий случай частотно-селективного канала распространения сигнала, соответствующий большинству реальных беспроводных каналов связи, в литературе не изучен.

Влияние нелинейных искажений является важным фактором для выбора типа модуляции системы связи. Традиционным преимуществом систем связи с одной несущей частотой (SC систем) считалось низкое отношение пиковой мощности сигнала к средней мощности (пик-фактор) (Peak-to-Average Power Ratio – PAPR), а недостатком OFDM систем – более высокий пик-фактор по сравнению с SC системами и, следовательно, большая чувствительность к нелинейным искажениям усилителя мощности на передатчике.

Влияние нелинейных характеристик усилителя приводит к искажению сигнальных созвездий передаваемого сигнала, а также изменению формы спектра сигнала. Оба данных типа искажений должны быть ограничены. Как правило, сравнение влияния нелинейных искажений выполняется с точки зрения сравнения максимальных уровней выходной мощности (уровней ослабления сигнала относительно насыщения усилителя), которые могут быть использованы в различных конфигурациях беспроводных систем связи для удовлетворения требованиям на предельную максимальную величину нелинейных искажений.

Имеющиеся литературные источники (см., например, Smulders P. *et al*, 2007, Nsenga J. *et al*, 2007) позволяют получить значения требуемого ослабления сигнала для отдельных конфигураций SC и OFDM систем, и отдельных значений моделей усилителей мощности. Однако, детальный анализ, позволяющий систематически сравнить влияние нелинейных искажений усилителя мощности с учетом амплитудно-амплитудных (AM/AM) и амплитудно-фазовых (AM/PM) искажений на SC и OFDM системы, в литературе отсутствует.

Современные системы беспроводной связи традиционно включают в себя как аналоговые и радиочастотные, так и цифровые блоки обработки сигналов. Основными функциями аналоговых и радиочастотных блоков является перенос сигнала с видеочастоты на частоту несущей на передающей стороне и обратный перенос радиосигнала с несущей частоты на видеочастоту на приемной стороне. В свою очередь цифровые блоки осуществляют все операции по формированию передаваемого видеосигнала на передатчике и восстановление переданной информации по принятому видеосигналу на приемнике.

Интерфейсом между аналоговыми и цифровыми блоками обработки сигналов являются аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП). Оба данных типа преобразователей неизбежно вносят в передаваемый и принимаемый сигналы шумы квантования, вызванные ограниченной точностью этих модулей, которая определяется их разрядностью. При этом практически наиболее значимы свойства шумов квантования АЦП, так как повышение разрядности и улучшение характеристик АЦП, как правило, достигается существенно сложнее, чем для ЦАП.

В литературе описаны отдельные результаты по анализу влияния шума квантования АЦП для беспроводных систем связи (см., например, Dardari D., 2006), однако отсутствует детальный сравнительный анализ, который позволял бы определить необходимую разрядность АЦП для различных типов систем связи, использующих различные схемы модуляции и кодирования, а также работающих в различных типах каналов связи с различной частотной селективностью.

Цель диссертации

Целью диссертации является детальное изучение влияния искажений, вносимых радиочастотным трактом, в беспроводные широкополосные системы связи с одной (SC) и многими (OFDM) несущими частотами:

- изучение механизмов воздействия фазового шума на OFDM системы связи в частотно-плоских и частотно-селективных каналах, изучения влияния фазового шума на характеристики вероятности битовой ошибки в OFDM системах связи.
- выполнение детального сравнительного анализа SC и OFDM систем связи с точки зрения влияния нелинейных искажений усилителя мощности с учетом амплитудно-амплитудных (AM/AM) и амплитудно-фазовых (AM/PM) искажений.
- проведение детального сравнительного влияния шума квантования АЦП для SC и OFDM систем передачи данных в каналах связи с различной частотной селективностью. Исследование влияния шума квантования АЦП на характеристики вероятности битовой ошибки в беспроводных системах связи.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Изучены механизмы влияния фазового шума (фазовых флуктуаций) опорного генератора несущей частоты на OFDM системы беспроводной передачи данных, работающие в частотно-плоских каналах связи без временной дисперсии и многолучевых частотно-селективных каналах связи. Показано, что влияние фазового шума на OFDM системы является более сильным в частотно-плоских, чем в частотно-селективных каналах распространения сигнала.
2. Проведен детальный сравнительный анализ влияния нелинейных искажений усилителя мощности на характеристики SC и OFDM систем связи, с учетом амплитудно-амплитудных и амплитудно-фазовых искажений.
3. Выполнен сравнительный анализ влияния шума квантования аналого-цифровых преобразователей (АЦП) на характеристики SC и OFDM систем передачи данных в частотно-плоских и частотно-селективных каналах связи.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных в диссертации результатов при проектировании современных беспроводных широкополосных систем связи. Приведенные в работе данные могут быть использованы для оценки влияния искажений, вносимых радиочастотным трактом, на характеристики современных систем связи с одной несущей частотой и многими ортогональными несущими частотами. На основании результатов выполненной работы получены три патента на изобретения [5-7].

Полученные в диссертации результаты могут быть востребованы учреждениями, занимающимися вопросами разработки современных систем радиосвязи (например, ФНПЦ ФГУП "НПП "Полет", Нижегородский завод им. М.В. Фрунзе и другие).

Апробация результатов и публикации

Результаты выполненных в диссертации исследований опубликованы в 14 работах. Среди них 4 статьи в рецензируемых научных журналах [1-4], 3 патента на изобретения [5-7], и 7 тезисов докладов на конференциях [9-14].

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- Международной конференции IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Канны, Франция, 2008).
- Международной конференции IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2010) (Лас-Вегас, США, 2010).
- Международной конференции European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP'2010) (Барселона, Испания, 2010).
- Международных конференциях “Цифровая обработка сигналов и её приложение (DSPA 2007, 2010)” (Москва, 2007, 2010).
- Десятой нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2005).
- 10-й научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию ННГУ и 100-летию со дня рождения Г.С. Горелика (Н.Новгород, 2006).

Исследования, результаты которых приведены в диссертации, выполнены при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры современной России” (государственный контракт № 02.740.11.0003).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 105 страниц, включая 32 рисунка, 9 таблиц и список литературы из 89 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу влияния фазовых флуктуаций (фазового шума) генераторов несущей частоты на OFDM системы связи.

В разделе 1.1 предложена модель OFDM системы связи, подверженной воздействию фазового шума (см. рис. 1).

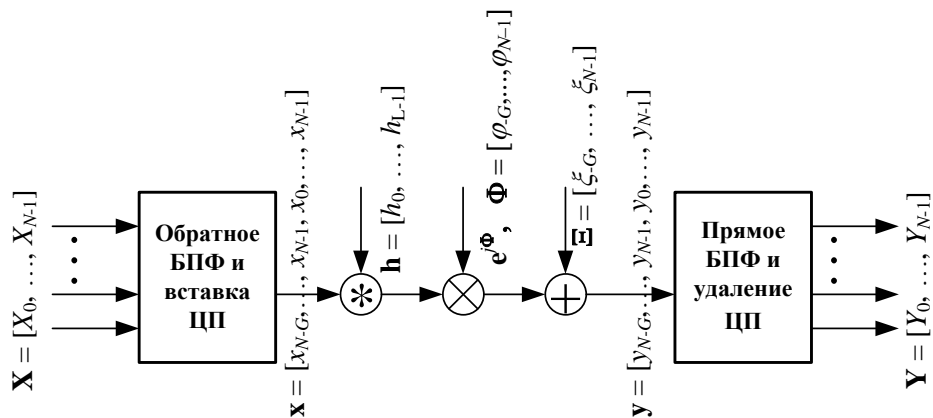


Рис. 1. Блок-диаграмма OFDM системы передачи данных, подверженной воздействию фазового шума генераторов несущей частоты

В разделе 1.2 введены модели фазового шума 1 и 2 (МФШ1 и МФШ2), которые определяются зависимостями спектральной плотности мощности (СПМ) фазового шума генератора несущей частоты от величины частотной расстройки (см. рис. 2). Используемые в работе модели фазового шума МФШ1 и МФШ2 соответствуют характеристикам реальных интегрированных опорных генераторов частотного диапазона 60 ГГц.

В разделе 1.3 исследовано влияние общей фазовой ошибки на каждом OFDM символе. Показано, что компенсация общей фазовой ошибки (ОФО), выполняемая в большинстве практических OFDM систем связи, приводит к устранению влияния низкочастотных компонент фазового шума (с частотами меньшими частоты следования OFDM символов) (см. рис. 2). Отмечено, что после компенсации ОФО на каждом OFDM символе, СПМ остаточного фазового шума может быть условно представлена состоящей из резонансной области и области шумового плато. Компоненты шума неортогональности между поднесущими, обусловленные этими двумя областями фазового шума, имеют различные свойства.

В разделе 1.4 рассмотрены свойства шума неортогональности между поднесущими OFDM символа, вызываемые фазовым шумом для случая одной активной поднесущей. Показано, что для одной активной поднесущей компенсация ОФО приводит к практическому устранению влияния фазового

шума на данную поднесущую, однако не влияет на мощность шума неортогональности (или интерференции) между поднесущими.

В разделе 1.5 рассмотрены характеристики шума неортогональности для OFDM системы в частотно-плоском канале. Показано, что мощность шума неортогональности может быть представлена состоящей из двух компонент, обусловленных резонансной областью и областью шумового плато. Шум неортогональности вызванный резонансной областью кривой СПМ фазового шума пропорционален мощности сигнала, передаваемого на ближайших (по отношению к анализируемой) поднесущих. В свою очередь шум неортогональности обусловленный областью шумового плато одинаково воздействует на все поднесущие и пропорционален общей мощности OFDM сигнала во всей частотной полосе.

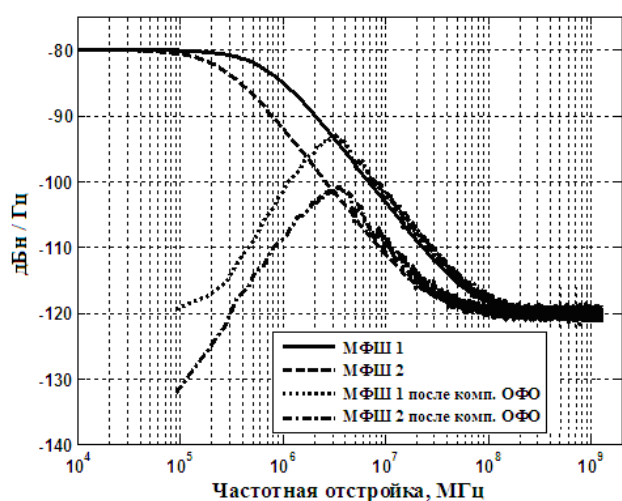


Рис. 2. СПМ фазового шума для МФШ1 и МФШ2 до и после компенсации общей фазовой ошибки

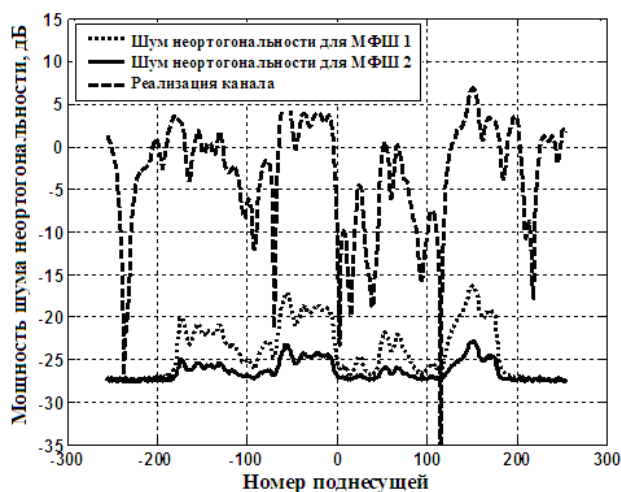


Рис. 3. Пример реализации частотно-селективного канала связи и соответствующие величины мощности шума неортогональности для МФШ1 и МФШ2

В разделе 1.6 рассмотрено влияние фазового шума на OFDM систему в частотно-селективном канале. Показано, что в частотно-селективных каналах связи шум неортогональности имеет распределение мощности по частотам, повторяющее передаточную функцию канала связи, однако с менее глубокими провалами, ограниченными равномерно распределенным шумом неортогональности обусловленным областью шумового плато СПМ фазового шума (см. рис. 3).

В разделе 1.7 проведено исследование влияние фазового шума на вероятность битовой ошибки в OFDM системе связи. Влияние фазового шума оценивалось как мощность аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), воздействие которого было бы эквивалентно воздействию рассматриваемой модели фазового шума. Было получено, что для частотно-плоского канала связи мощность эквивалентного АБГШ приблизительно равняется мощности шума неортогональности на активных поднесущих OFDM символа. Для частотно-селективного канала связи мощность эквивалентного АБГШ шума была оценена как на 4-5 дБ меньшая, чем для частотно-плоского канала связи.

В разделе 1.8 приведены выводы по первой главе.

Во второй главе диссертации представлен детальный сравнительный анализ влияния нелинейных искажений для систем с одной (SC) и многими (OFDM) несущими частотами.

В разделе 2.1 определены рассматриваемые модели OFDM и SC-FDE систем связи и дано их краткое описание.

В разделе 2.2 введены модели высокочастотных усилителей мощности. Рассмотрены несколько моделей усилителей мощности, включая модели, основанные на экспериментальных измерениях усилителей диапазона 60 ГГц, и общепринятые модели, используемые для анализа усилителей всех частотных диапазонов.

Амплитудно-амплитудные (AM/AM) и амплитудно-фазовые (AM/PM) характеристики для одной из рассматриваемых моделей описываются следующими уравнениями:

$$y = F_{AM-AM}(x) = \frac{Gx}{\left(1 + \left|\frac{Gx}{V_{SAT}}\right|^{2p}\right)^{\frac{1}{2p}}}, \quad \theta = F_{AM-PM}(x) = \frac{Ax^q}{\left(1 + \left(\frac{x}{B}\right)^q\right)}.$$

Здесь x - амплитуда входного сигнала усилителя мощности, y - амплитуда выходного сигнала усилителя мощности, θ - изменение фазы выходного сигнала в усилителе мощности. Параметры нелинейной модели усилителя были выбраны равными: $G = 16$, $V_{SAT} = 1.9$ В, $p = 1.1$, $A = -345$, $B = 0.17$ и $q = 4$.

Для наглядности характеристики $F_{AM-AM}(x)$ и $F_{AM-PM}(x)$ этой модели показаны на рис. 4. (а) и (б) соответственно.

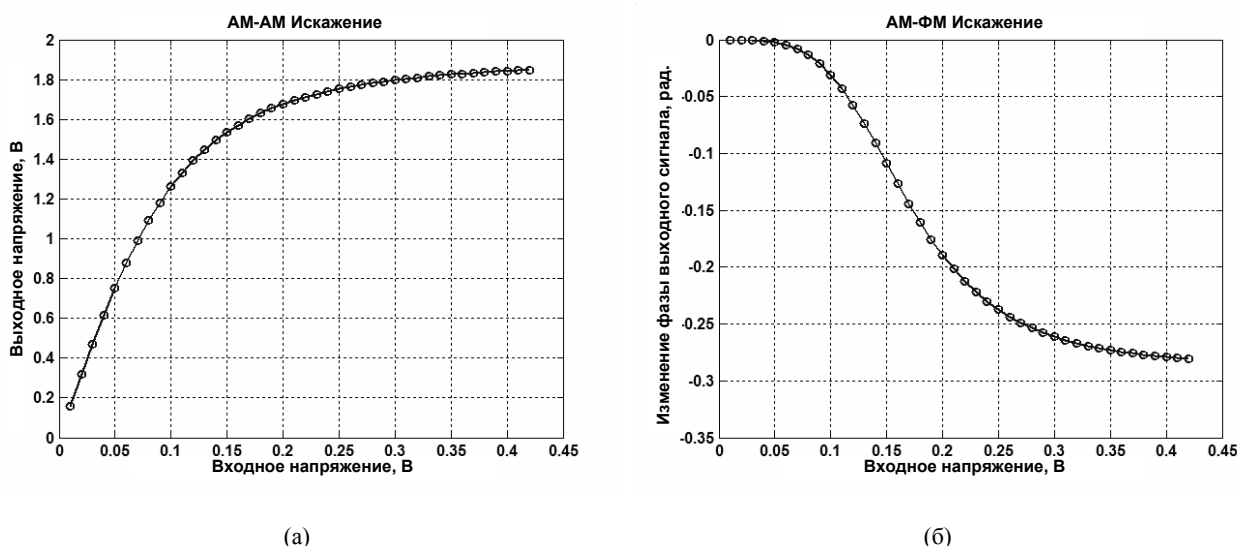


Рис. 4. Характеристики AM/AM и AM/ФМ искажений для “IEEE” модели усилителя мощности

В разделе 2.3 введены характеристики величины векторной ошибки (ВВО, англ. – Error Vector Magnitude – EVM) и спектральной маски. ВВО явля-

ется мерой величины нелинейных искажений, вносимых непосредственно в сам передаваемый сигнал, и определяется как относительная мощность дополнительного шума, возникающего после прохождения сигналом усилителя мощности. Спектральная маска сигнала накладывает ограничение на мощность излучения в соседних частотных каналах, которое также возрастает при воздействии нелинейных искажений. Превышение передаваемым сигналом установленного спектрально маской уровня мощности побочного излучения может привести к блокированию радиоустройств, работающих в смежных частотных каналах.

В разделе 2.4 приведены результаты анализа для ограничений на уровень выходной мощности, накладываемых ВВО, для различных моделей усилителей и различных схем модуляции и кодирования, используемых SC и OFDM системами. Пример зависимости ВВО от выходной мощности сигнала для OFDM и SC систем с 4-КАМ модуляцией показан на рис. 4.

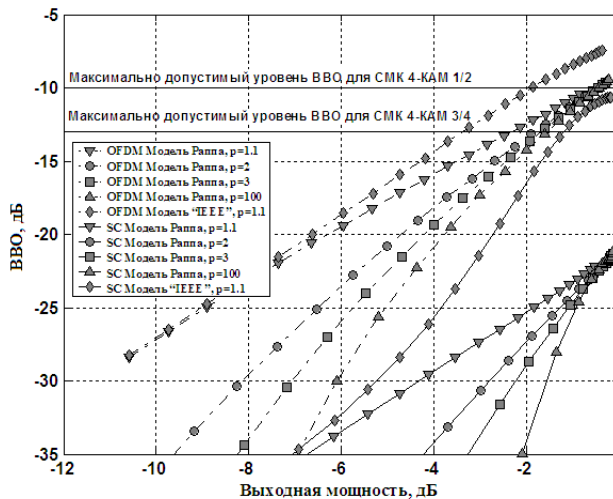


Рис. 4. ВВО для OFDM и SC систем с 4-КАМ модуляцией в зависимости от выходной мощности сигнала (относительно уровня насыщения усилителя)

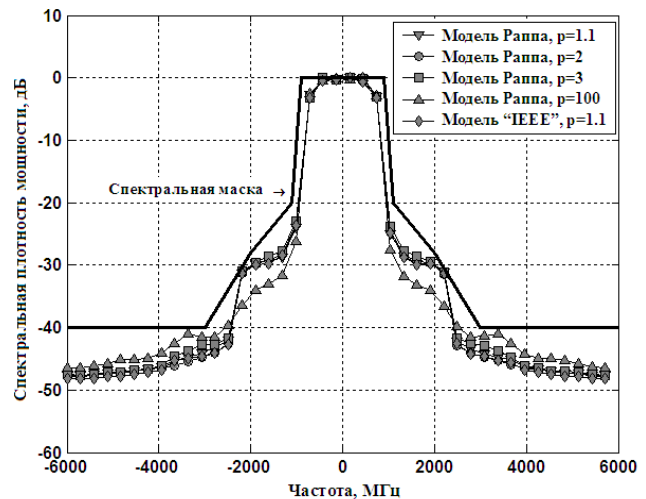


Рис. 5. Спектральная маска и СПМ передаваемого сигнала SC системы, использующей 4-КАМ модуляцию, для различных моделей усилителя мощности

В разделе 2.5 приведены результаты для ограничений в уровне выходной мощности, следующие из требований на спектральную маску передаваемого сигнала. Пример спектров выходного сигнала, удовлетворяющих требованиям спектральной маски, для SC системы с 4-КАМ модуляцией и различных моделей усилителей мощности показан на рис. 5.

В разделе 2.6 приведены обобщенные результаты анализа, которые одновременно учитывают требования на ВВО и спектральную маску. Показано, что спектральная маска является ограничивающим фактором для всех СМК OFDM системы связи за исключением 16-КАМ 3/4 и абсолютно всех СМК SC системы связи. Из результатов анализа сделан вывод, что для большинства рассмотренных схем модуляций и кодирования и моделей усилителей мощности SC система имеет некоторые преимущества над OFDM системой. Однако достигаемый при этом выигрыш не превышает 1.0 - 1.5 дБ.

В разделе 2.7 сделаны выводы по второй главе работы.

В третьей главе был выполнен анализ влияния шума квантования АЦП на беспроводные системы передачи данных.

В разделе 3.1 введены модели OFDM и SC систем, использовавшихся в исследовании.

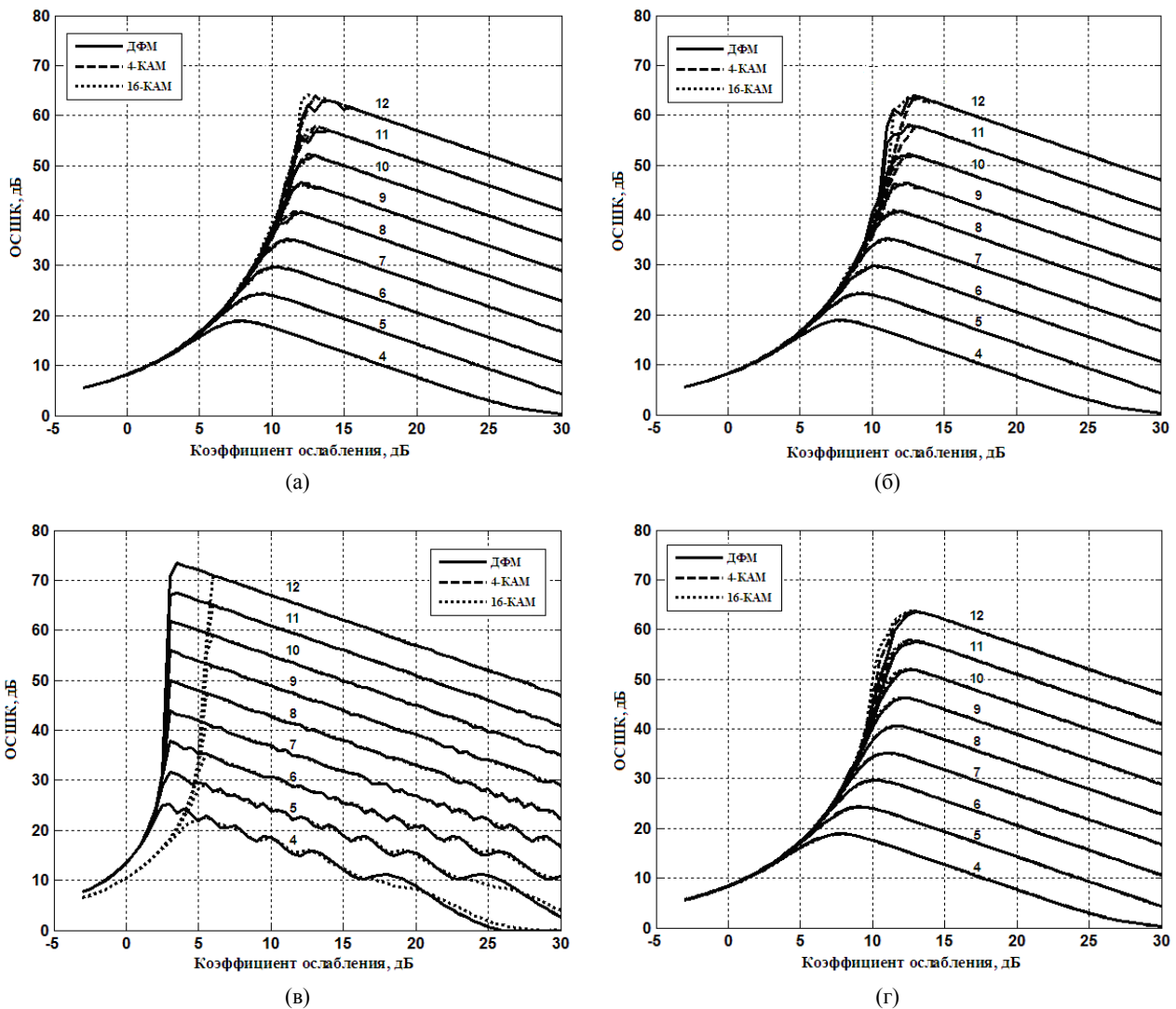


Рис. 6. ОСШК в зависимости от величины коэффициента ослабления для OFDM системы в АБГШ (а) и релейском (б) каналах и SC системы в АБГШ (в) и релейском (г) каналах для разрядности АЦП от 4 до 12 бит

В разделе 3.2 рассмотрена используемая модель аналого-цифрового преобразования.

В разделе 3.3 выполнен анализ шума квантования АЦП путем вычисления отношения мощности сигнала к мощности шума квантования АЦП (ОСШК) для различных значений коэффициентов ослабления амплитуды сигнала относительно полной шкалы АЦП (см. рис. 6).

Результаты анализа позволили получить требуемые значения для разрядности АЦП для OFDM и SC систем передачи данных в частотно-селективных и частотно-плоских каналах связи. Показано, что для частотно-плоских каналов связи без временной дисперсии система SC может иметь разрядность АЦП на 1-2 бита меньшую, чем OFDM система для обеспечения такого же уровня шума квантования. В тоже время для каналов связи с сильной частотной селективностью, которые преобладают в беспроводных системах передачи данных, величины разрядности АЦП, необходимые для работы OFDM и SC систем связи совпадают.

В разделе 3.4 исследовано влияние шума квантования АЦП на характеристики вероятности битовой ошибки в SC и OFDM системах связи. Показано, что для целей данного исследования шум квантования АЦП эквивалентен аддитивному белому гауссовскому шуму такой же мощности.

В разделе 3.5 приведены выводы по третьей главе.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследовано влияния фазового шума (фазовых флуктуаций) генераторов несущей частоты на OFDM системы передачи данных. Показано, что шум неортогональности (интерференции) между поднесущими, вызванный влиянием фазовых флуктуаций, может быть представлен в виде суммы двух компонент, одна из которых имеет равномерное частотное распределение, а другая повторяет частотное распределение передаточной функции канала связи. В результате, совокупный шум неортогональности является равномерно распределенным по активным поднесущим OFDM символа в частотно-плоском канале связи, но имеет неравномерное распределение в частотно-селективных каналах, приблизительно повторяющее передаточную функцию канала связи.
2. Проведено исследование влияние фазового шума на вероятность битовой ошибки в OFDM системе связи в частотно-плоских и частотно-селективных каналах распространения сигнала. Получено, что в частотно-селективных каналах фазовый шум имеет более слабое влияние на OFDM системы связи (на 4-5 дБ в мощности эквивалентного аддитивного белого гауссовского шума), чем в частотно-плоских каналах.
3. Выполнен детальный сравнительный анализ влияния нелинейных искажений усилителя мощности на SC и OFDM системы связи с учетом амплитудно-амплитудных (AM/AM) и амплитудно-фазовых (AM/PM) искажений. Показано, что для большинства схем модуляции и кодирования и моделей усилителей мощности SC система имеет некоторые преимущества над OFDM системой. Однако достигаемый при этом выигрыш не превышает 1.0 - 1.5 дБ и не может рассматриваться как существенный для принятия решения о выборе типа модуляции.
4. Проведено исследование эффективности применения цифровых схем предварительного искажения сигналов. Было получено, что такие схемы позволяют увеличить выходную мощность систем связи для SC систем на 1.5 – 3.4 дБ и для OFDM систем на 1.9 – 2.7 дБ.
5. Выполнен анализ шума квантования аналого-цифровых преобразователей на SC и OFDM системы связи. Показано, что для частотно-плоских каналов связи без временной дисперсии система SC может иметь разрядность АЦП на 1-2 бита меньшую, чем OFDM система для обеспечения такого же уровня шума квантования. В тоже время для каналов связи с сильной частотной се-

лективностью величины разрядности АЦП, необходимые для работы OFDM и SC систем связи практически совпадают.

6. Выработаны практические рекомендации по выбору параметров OFDM и SC систем связи с учетом характеристик фазовых шумов генераторов опорных частот, нелинейных искажений усилителя мощности и разрядности аналого-цифровых преобразователей.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В., Ломаев А.А., Сравнительный анализ влияния нелинейных искажений усилителя мощности в системах беспроводной связи с одной и многими ортогональными несущими частотами // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 2010. Т.53. № 8. С. 3-15.
2. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В., Влияние фазового шума на OFDM системы передачи данных // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т.53. № 8. С. 3-15.
3. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В., Исследование влияния шума аналого-цифрового преобразования на беспроводные системы связи диапазона 60 ГГц // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т.53. № 9. С. 3-15.
4. Maltsev A., Maslennikov R., Sevastyanov A., Khoryaev A., Lomayev A. Experimental investigations of 60 GHz wireless systems in office environment // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2009. V. 27, N. 8, P.1488-1499.
5. Sadri A.S., Maltsev A., Maslennikov R., Khoryaev A., Sergeyev V. "Systems for communicating using multiple frequency bands in a wireless network" // Патент на изобретение США № 7,653,163. 2010.
6. Sadri A.S., Maltsev A., Maslennikov R., Khoryaev A., Sergeyev V. "Communication within a wireless network using multiple frequency bands" // Патент на изобретение США № 7,720,036. 2010.
7. Maltsev A., Kesselman A., Maslennikov R., Khoryaev A., Sevastyanov A. "Techniques for wireless personal area network communications with efficient spatial reuse" // Патент на изобретение США № 8,064,828. 2011.
8. Maltsev A., Maslennikov R., Maltsev A., Jr., Khoryaev A., Shilov M. Performance analysis of spatial reuse mode in millimeter-wave WPAN systems with multiple links // Proceedings of IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2008. P. 1-4.
9. Maltsev A., Maslennikov R., Lomayev A., Khoryaev A., Sevastyanov A. Comparison of power amplifier non-linearity impact on 60 GHz single carrier and OFDM systems // Proceedings of IEEE Consumer communications and networking conference (CCNC) 2010, Las Vegas, USA, Jan 2010, 5 P.

10. Maltsev A., Maslennikov R., Sevastyanov A., Lomayev A., Khoryaev A., Davydov A., Ssorin V. Characteristics of indoor millimeter-wave channel in application to perspective WLAN system. // Proceedings of the 4th European conference on antennas and propagation (EuCAP) 2010, Barcelona, Spain, 2010, 5 P.
11. Мальцев А.А., Пестрецов В.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В. Разработка специализированного АЛУ для эквализации сигнала в OFDM системах радиосвязи // Труды 9-ой международной конференции по цифровой обработке сигналов и её приложениям (DSPA 2007). М., 2007. С.515-518.
12. Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В. Анализ влияния шума аналого-цифрового преобразования на беспроводные системы связи с одной и многими ортогональными несущими частотами // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск XII-1 (Труды конференции Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA'2010), М., 2010, С. 268-271.
13. Пестрецов В.А. Масленников Р.О., Хоряев А.В. Исследование влияния выбора конечной разрядности вычислительных алгоритмов на эффективность ММО-систем радиосвязи // Труды десятой нижегородской сессии молодых ученых. Нижний Новгород, 2005. 2 с.
14. Колчин Д.И., Хоряев А.В., Масленников Р.О. Влияние фазового шума на характеристики OFDM систем связи // Труды 10-й научной конференции по радиопрофизике, посвященной 90-летию ННГУ и 100-летию со дня рождения Г.С. Горелика. Н.Новгород. 2006.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Влияние фазового шума на OFDM системы передачи данных в частотно-селективных каналах связи

- 1.1. Модель OFDM системы
- 1.2. Модель фазового шума
- 1.3. Влияние компенсации общей фазовой ошибки на одном OFDM символе
- 1.4. Свойства шума неортогональности для случая одной активной поднесущей
- 1.5. Влияние фазового шума на OFDM систему передачи данных в частотно-плоском канале связи
- 1.6. Влияние фазового шума на OFDM систему передачи данных в частотно-селективном канале связи
- 1.7. Исследование влияния фазового шума на вероятность битовой ошибки в OFDM системах связи
- 1.8. Заключение по первой главе

Глава 2. Влияние нелинейных искажений усилителя мощности в системах беспроводной связи с одной и многими несущими частотами

- 2.1. Модели систем связи с одной (SC) и многими (OFDM) несущими частотами
- 2.2. Модели усилителя мощности
- 2.3. Характеристики нелинейных искажений сигнала
- 2.4. Результаты анализа для ограничений, накладываемых ВВО
- 2.5. Результаты анализа для ограничений, накладываемых спектральной маской
- 2.6. Общее влияние нелинейных искажений усилителя мощности с учетом требований на ВВО и спектральную маску
- 2.7. Заключение по второй главе

Глава 3. Исследование влияния шума аналого-цифрового преобразования на беспроводные системы связи

- 3.1. Модели OFDM и SC систем связи
- 3.2. Модель аналого-цифрового преобразования
- 3.3. Исследование характеристик шума аналого-цифрового преобразования
- 3.4. Исследование влияния шума аналого-цифрового преобразования на вероятность битовой ошибки в беспроводной системе связи.
- 3.5. Заключение по третьей главе

Заключение

Список литературы