

История российских OFDM-модемов, рассказанная участником событий.

Введение

О терминологии. OFDM - это уплотнение с использованием ортогональных разнесенных частот. Об ортогональности разговор пойдет ниже. Я не сторонник использования иностранных терминов, особенно в тех случаях, когда есть равноценный русский. Для OFDM как раз нет равноценного, ибо ни в каком нашем термине нет намека на ортогональность. Как-то в свое время на терминологические вопросы обращалось мало внимания. В заголовок этот термин вынесен потому, что большинству потенциальных читателей он знаком. Далее в тексте вместо OFDM-модемов в тех случаях, когда речь пойдет о российских модемах, будет использоваться термин модемы типа "МС". Как автор, после сделанного пояснения я имею на это право. Кому интересен материал, а термин не нравится выберут для себя - содержание или термин.

Как известно, в КВ диапазоне частотное уплотнение применялось издавна для снижения влияния многолучевости канала. При этом подразумевалось, что для недопущения межканальных влияний подканальные сигналы необходимо разносить по частоте и фильтровать полосовыми фильтрами. В результате значительная часть полосы отводилась на расфильтровку, а достигаемая удельная скорость передачи обычно не превышала 0,5 бит, т.е. скорость в полосе 3100 Гц не превышала 1600 бит/сек.

В 20-30-е годы прошлого столетия теоретически были указаны возможности повышения удельной скорости. Сначала для одноканальной высокоскоростной передачи стали известны результаты Г.Найквиста (1928 г.), а позднее аналогичные результаты были получены Д.В.Агеевым для частотного уплотнения (1935 г.). В обоих случаях были сформулированы условия, позволяющие полностью устранить межсимвольные или межканальные помехи даже при полном перекрытии сигналов во времени или по частоте, соответственно. С этих дат можно было бы начать отсчет эпохи ортогональности, однако сам термин появился и закрепился лет на 20 позднее.

Первым практически реализованным OFDM-модемом, видимо, был американский модем Kineplex TE-202. Информация о нем стала доступной в конце 50-х годов. Удельная скорость передачи сразу удвоилась. С небольшим отставанием модем такого типа появился и в СССР. Правда он решал более простые задачи. Основным его назначением была передача вокодерной информации со скоростью 1200 бит/сек.

Позволю себе небольшое отступление. В наше время термин вокодер известен не только "технарям", но и крутым гуманитариям хотя бы по книге А.И.Солженицина "В круге первом". Напомню, что одной из сюжетных тем в книге было соперничество двух зековских коллективов по преобразованию речевого сигнала в цифровой. Техническая сторона соревнования автором освещена слабо, не для того писался роман. Но описанные события несомненно имели место в действительности. Исторически сложилось так, что вокодер оказался предпочтительнее устройства клиппирования, которое впоследствии смогло найти лишь весьма ограниченное применение. Мне известна всего одна система речевой связи, использовавшая клиппирование - "Линкомпекс".

После разработки вокодера сразу же должен был решаться вопрос - а каким же образом передавать вокодерный сигнал (поток бит со скоростью порядка 1000 в сек) по радиоканалу? Старое частотное уплотнение для этого не годилось, так как из-за различия задержек сигналов в полосовых фильтрах правильно собрать декодированные на приеме символы в единый поток не удавалось. Появилась потребность в некотором новом посреднике между вокодером и радиоаппаратурой. Именно этот посредник и получил название "модем". Сам термин вошел в обиход в 50-х годах прошлого века. Очевидно, разрабатывать модем для вокодера должна была та же самая "марфинская шарашка", бытие зеков в которой и описал А.И.Солженицын.

Задача решалась еще в дополупроводниковую эпоху. Модем был разработан и выпускался для специального применения в системах речевой радиосвязи коротковолнового диапазона. Сейчас о нем практически ничего не известно. Забвению этого модема в немалой степени способствовали царившая в то время закрытость научных разработок и последовавший грандиозный технологический скачок, вызванный появлением полупроводников, а позже - микросхем. А вот следующая разработка аналогичного по назначению устройства - аппаратура передачи дискретной информации "МС-5" известна многим. Ее добрым словом вспоминают до сих пор не только историки отрасли, но и практикующие специалисты и, как оказалось, радиолюбители.

Справедливости ради отметим, что этому модему предшествовал "МС-1". Он разрабатывался и испытывался в 1962-1964 гг. О нем упоминается в книжке А.М.Заездного и др. "Фазоразностная модуляция и ее применение для передачи дискретной информации", изданной в 1967 году. В разработке есть и доля моего

труда. Модем испытывался на радиотрассе Новосибирск-Москва. Одним из результатов этих испытаний было образование в 1965 г. в Ленинградском электротехническом институте связи им.проф.М.А.Бонч-Бруевича научно-исследовательской Лаборатории передачи дискретной информации, существующей и плодотворно работающей до сих пор.

Лабораторный образец модема "МС-5" разрабатывался чуть более двух лет с января 1966 по май 1968 гг. Затем образец более трех лет испытывался на различных коротковолновых радиополосах. Мне довелось быть руководителем группы разработчиков и испытателей образца. Основные результаты разработки и испытаний были опубликованы в изданной в 1970 г. издательством "Связь" брошюре "Аппаратура передачи дискретной информации "МС-5". В числе соавторов книги есть и моя фамилия.

За давностью дел у меня никогда не возникали мысли о необходимости описать кухню, в которой варились идеи разработчиков, и события, сопровождавшие разработку и испытания. Но совсем недавно я изменил свое мнение. Причиной этому послужил интернет, вернее то, что мне встретилось на страницах поисковых систем интернета.

Мои блуждания по всемирной паутине начались сравнительно поздно, осенью 2007 года, когда мне уже перевалило за 70. Так уж сложилось. Но довольно быстро мне попались поразившие меня свидетельства о том, что до сих пор идеи, реализованные в МС-5, интересны специалистам и любителям и, более того, о самой аппаратуре еще помнят.

Приведу некоторые выдержки из сообщений на форуме " Модемы на КВ :: Форум Radioscanner.Ru"

=====

Москва, участник metrolog

Дата: 11 Июн 2007 00:06:47 · Поправил: metrolog (11 Июн 2007 09:31:37) #

Впервые услышал я этот сигнал в начале 90х. Естественно тогда (начальные классы школы) никаких разумных предположений по поводу этого сигнала у меня и быть не могло. Встречался мне он на краях вещательных участков на КВ. По мере прослушивания эфира в дальнейшем ничего так и не прояснилось по поводу этих сигналов. Теперь на Даген принимаю его, встречался он в теме про ЖЗ, еще кое-где, но ответа что это я так и не нашел. В теме про радиоотчет тоже все молчат, впечатление такое, что либо это жуткий баян (как если бы я вещательную станцию поймал и тут выкладывал запись) и просто игнорируется, либо действительно никто не знает что это, но в это мне поверить трудно. Может это закрытая информация :) типа как официально не признаются номерные станции. Но ведь звук-то какой красивый, волнующий..

Привожу запись в АМ. Разновидностей этого сигнала слышно много, этот мне больше всего по звуку нравится.

Думается, что это радиомодем какой, т.к. многие разновидности имеют характерную периодичность звучания.

Сам сигнал, если он имеет информационное наполнение (а это уж наверняка), очевидно, надо принимать в однополосной моде. На КВ такого добра как грязи, желающие посмотреть правильный спектр думаю без труда его найдут. Если ответ появится, то тему переименую.

metrolog Участник с авг 2006 Москва Дата: 11 Июн 2007 00:26:18 #

RadioKoteg, согласен конечно, что из этой конкретной записи выудить что-то уже практически невозможно. Мне интересно, что это такое вообще, а не какая конкретно информация там содержится. Просто звук достаточно характерный. И какое-то подозрительное молчание в связи с этим сигналом. Спасибо за наводку, где искать я понял. Ну насколько я помню, спектр там достаточно плотный, а не "линейчатый", поэтому на несколько PSK/FSK не похоже, хотя конечно всякое бывает, я тут не специалист.

alexis Участник с фев 2006 Дата: 18 Июн 2007 23:22:31 #

Хорошо, развиваем тему. А как могли использовать цифровые технологии, да ещё такие заумные как криптоанные в ТО ВРЕМЯ когда о цифре никто и слыхом не слыхивал.

Я тоже задавался таким вопросом, правда ранее в 80-х годах... когда тоже слышал громоподобные звуки на КВ.

То есть технологии уже существовали тогда и от простого люда это

сознательно скрывалось, не дав прогрессу раньше занять лидирующие позиции, а жаль? В то время компов ещё не было (мощных и современных). Нонсенс!!!
Что же за оборудование в ТЕ ВРЕМЕНА занималось обработкой цифровых потоков. Непонятно. Приоткройте же кто-нибудь завесу тайны?

marvel Участник с фев 2003 Москва Дата: 19 Июн 2007 10:27:28 · Поправил: marvel (19 Июн 2007 10:29:34) #

Ну начнем с того, что еще в середине 60-х был разработан в Электротехническом институте связи имени Бонч-Бруевича многоканальный модем с ортогональными канальными сигналами и фазоразностной модуляцией МС-5 (Министерство Связи-5). Прообраз 12 палочного модема АТ-3004Д. Если интересна более подробная информация, у меня есть книга, подробно описывающая работу этого КВ модема "Аппаратура передачи дискретной информации МС-5 под редакцией А.М. Заездного и Ю.Б. Окунева". Издательство "Связь" Москва 1970. А сигнал скорее всего вот этот <http://signals.radioscanner.ru/signal37/> Code300 все-таки делает попытки его как - то декодировать...

Zmej Участник с дек 2005 Украина Дата: 03 Ноя 2007 01:40:18 #

Да уж интересно, на каком кол-ве микросхем 155й серии был тот "советскийкий модем" в 60х годах?

RadioKoteg Участник с сен 2006 Киев Дата: 03 Ноя 2007 02:25:56 #

Да уж интересно, на каком кол-ве микросхем 155й серии был тот "советскийкий модем" в 60х годах?

за 60 тые не знаю ,а вот за 80 тые ,ну так штук если 155 то и не много ,штук 200 вам хватит :)

а вот операционников было в 4 раза больше ,а кандеров в 10 раз больше ,вообщем модем около 25 ...30 кг ..

Zmej Участник с дек 2005 Украина Дата: 03 Ноя 2007 11:34:13 #

Хех, жестко :)

Делать демодуляторы сложных фазоманипулированных сигналов на рассыпухе...

=====

Из форумного содержания ясно следует, что радиолюбители из разных мест России и бывшего Союза в наше время находят общий интерес в спектральном анализе и декодировании слышимых ими в эфире сигналов модемов типа МС. Более того, некоторые из них держали в руках нашу книгу, и теперь все участники форума знают о том, что мы когда-то делали и справедливо удивляются как нам это тогда удалось сделать.

Следующее (по времени обнаружения) упоминание мне встретилось еще на одном, правда давнем, форуме.

=====

Конференция: Конференция iXBT.com (<http://forum.ixbt.com/>)

Форум: Домашний интернет, модемы (<http://forum.ixbt.com/?id=32>)

URL: <http://forum.ixbt.com/topic.cgi?id=32:2627>

45. astanovoy, 31.05.2001 18:47

Ответ эксперта:

На эту тему ломали копья ровно 30 лет тому назад. В нашей российской спецсистеме огромного масштаба и значения все это давным -давно работает и на эту тему написаны десятки диссертаций в 70-х годах. Вот почему я и говорю, что "сегодняшнее сегодня" -это давно забытое старое.Точно так же, как и эти злосчастные xDSL(включая супер-пупер DMT, CAP, G.SHDSL -все это пережевывание модемных технологий, начиная от работ по DMT начала 60-х (группа А.М.Заездного из Ленинградского Института Связи им. Б.Б.),начала 70-х QAM-CAP(ЦНИИС,ЦНИИТУ и т.п.) и кончая 2000(Т-PCM-все взято почти из V.90-V.92).А енту "ехокомпенсацию" сделали реально в модемах впервые в конце 70-х(Андрющенко, Минкин и др.).

Ну а то, что наши модемы на 9600 bps работают уже более 25 лет на отечественных магистралях от Камчатки до Прибалтики, реализованные с цифровой обработкой сигналов и с адаптивным эквалайзером - знает ли кто-нибудь из наших новоявленных спецов?

=====

После обнаружения в интернете цитированных выше форумов естественным моим желанием было собрать всю информацию, в которой прямо или косвенно упоминается о моих давних делах. Неожиданностей в поиске больше не было, хотя упоминаний было немало. Но авторы были давними знакомцами, коллегами по работе в институте, сотрудниками других организаций, с которыми приходилось взаимодействовать. Эйфория от интернетовских открытий не проходила, а намерение изложить идеи и события на компьютерном диске укреплялось и покоя не предвиделся.

Реализационные особенности модемов типа "МС"

О названии. Мне известны два толкования. По одному из них МС означает многосинусоидальность сигнала, по другому - ведомственную принадлежность к Министерству связи. В зависимости от ситуации использовалось то или иное толкование.

В начале 60-х годов оптимальный алгоритм приема сигналов, включавший операции перемножения принимаемого сигнала на известные на приеме его варианты и интегрирования произведения на длительности сигнала, уже излагался студентам на лекциях. Известны были и два способа реализации этого алгоритма. Разработчики "Кинеплекса" шли по традиционному пути. Они использовали полосовые фильтры. Кстати, название модема может быть истолковано как "кинематическое уплотнение", так как в модеме использованы именно кинематические фильтры. Нововведения разработчиков заключались в повышении добротности фильтров и обнулении напряжений и токов в фильтре перед началом приема очередного сигнала. Анализ показывает, что чем выше добротность, тем ближе свойства такого фильтра к оптимальному приемнику отрезка синусоидального сигнала.

При выборе реализационных основ модемов типа "МС" наш главный идеолог - выдающийся инженер Л.М.Рахович избрал второй, ранее не использовавшийся в мировой практике путь. Он обосновал возможность и технологическую предпочтительность прямой реализации операций перемножения и интегрирования. В результате не только модемы типа "МС", но и все последующие разработки лаборатории и отечественной промышленности, включая и широко применяемый ныне модем АТ-3004Д, стали использовать предложенные Л.Раховичем в начале 60-х годов перемножители и интеграторы.

Стоит отметить, что по устоявшейся терминологии, путь, избранный разработчиками "Кинеплекса", называется пассивной фильтрацией, а реализованный в модемах типа "МС" - активной фильтрацией. Лично мне представляется, что эти термины отражают не только суть процессов, но и сравнительную эмоциональную оценку обоих способов разработчиками модемов. Ведь у пассивных фильтров различны частоты настройки, а это обстоятельство при высокой добротности фильтра всегда требует индивидуальной подстройки. Все активные фильтры конструктивно идентичны и взаимозаменяемы, вовсе не содержат никаких индуктивностей и отличаются только частотами внешних опорных прямоугольных колебаний.

Вторым нововведением Л.М.Раховича является способ определения информационного параметра - разности фаз двух смежных по времени сигналов. В "Кинеплексе" в частотных подканалах применены традиционные фазовые детекторы, для которых требовалось использовать двойной комплект кинематических фильтров. При переходе от однократной к двукратной манипуляции удваивалось и число фазовых детекторов.

В модемах типа "МС" традиционные фазовые детекторы не могли использоваться, так как с выходов интеграторов считывались не синусоидальные сигналы, а постоянные напряжения, пропорциональные синусу и косинусу разности фаз принимаемого и опорного сигналов. Если опорные колебания, подаваемые на активный фильтр, отождествить с некоторой двумерной прямоугольной системой координат, а принимаемый сигнал рассматривать как двумерный вектор с неизвестными амплитудой и фазой, то выходные напряжения интеграторов можно трактовать как проекции принимаемого сигнала на координатные оси. Если располагать проекциями, вычисленными для двух смежных по времени сигналов, то становится возможным определение разности фаз между этими сигналами. Для этого достаточно использовать классические тригонометрические формулы.

Именно таким был выбран реализационный алгоритм определения информационного параметра в модемах типа "МС". Алгоритм включал весовое суммирование произведений проекций. При изменении кратности манипуляции менялось количество суммируемых произведений и их весовые коэффициенты. Поскольку в то время цифровая вычислительная техника находилась в зачаточном состоянии, все вычисления проводились в аналоговом виде. Произведение постоянных напряжений вычислялось

интегрированием одного из них в течение времени, пропорционального другому. Величины проекций могли быть как положительными, так и отрицательными, что требовало применения четырехквadrантных перемножителей. Для этого в зависимости от полярности проекции, определяющей длительность интегрирования, выбиралась полярность проекции, подаваемой на вход интегратора.

Применение активной фильтрации и тригонометрического вычисления разности фаз составили предмет изобретения Л.Раховича, заявленного им в конце 1962 года и на которое он получил авторское свидетельство №177471 в конце 1965 года.

Для реализации алгоритма определения информационного параметра был разработан блок, названный блоком вычисления разностей фаз, который последовательно во времени обрабатывал проекции во всех частотных подканалах. По сути этот блок являлся аналоговой специализированной вычислительной машиной с неплохими точностными и скоростными характеристиками. Этот блок за время порядка 15 мсек определял информационные параметры в 20 частотных подканалах при однократной, двукратной и трехкратной манипуляции. Этот же блок реализовывал сложение частотно или (и) пространственно разнесенных сигналов.

Отметим, что такие термины, как перемножитель и интегратор в то время практически не использовались радиоинженерами. Эти термины были привычными для специалистов, разрабатывавших или использовавших так называемые электронные моделирующие устройства, являвшиеся аналоговыми вычислительными машинами (АВМ) со множеством радиоламп внутри каждой. Тогда часто возникали жаркие дискуссии о том сумеют ли нарождающиеся цифровые вычислительные машины (ЦВМ) превзойти аналоговые по скорости и точности вычислений. Л.М.Рахович хорошо знал специфику и возможности АВМ. Вероятно, поэтому ему удалось, во-первых, разработать "нетленные" алгоритмы реализации модемов, в полной мере остающиеся актуальными и в наше время, и, во-вторых, точно реализовать эти алгоритмы с помощью вычислительной машины доступного в то время типа - АВМ.

Естественно, что по мере развития электроники конструкция наших модемов существенно упрощалась. С появлением микросхем отпала необходимость собственных разработок перемножителей и операционных усилителей, а современные ЦВМ вполне обеспечивают чисто программную реализацию модемов типа "МС". В последнем я убедился лично в конце 90-х годов, когда мне удалось с помощью среднего по классу для того времени компьютера и платы расширения демодулировать групповой сигнал модема АТ-3004Д.

Разработка модема "МС-5"

Разработка началась в январе 1966 года. Нашим заказчиком был московский НИИРадио (НИИР), подведомственный Министерству связи. Нам предстояло разработать и испытать на реальных КВ радиотрассах лабораторный образец аппаратуры, обеспечивающей в стандартной телефонном радиоканале передачу дискретной (цифровой) информации со скоростью не менее 2400 бит в секунду. На все про все отводилось 3 года. Нашими соперниками были лаборатория НИИРадио и группа из Куйбышевского института связи.

Коротко о друзьях-соперниках.

Министерство связи располагало ограниченными производственными возможностями. Его главной задачей конечно была эксплуатация средств связи, но кое-какие разработки, поддерживающие приличное состояние эксплуатируемой техники, оно могло себе позволить. В лаборатории НИИРадио совершенствовалась традиционная для того времени 12-канальная аппаратура частотного уплотнения с целью повысить вдвое скорость передачи и улучшить помехоустойчивость. Последнее намеревались обеспечить применением фазоразностной манипуляции (ФРМ) вместо традиционной частотной и реализацией когерентного приема, а повышение скорости - использованием двукратной манипуляции.

В Куйбышеве Д.Д.Кловский в развитие своих диссертационных результатов руководил разработкой образца одноканального модема, названного им СИИП (система с испытательным импульсом и предсказанием).

Мы уложились во все сроки и успешно провели испытания образца аппаратуры "МС-5". Основные результаты разработки и испытаний изложены в упоминавшейся брошюре, опубликованной практически сразу после окончания темы. Вряд ли целесообразно сейчас повторять то, что было опубликовано почти 40 лет назад. Поэтому в основном речь пойдет о тонкостях и нюансах оставшихся за рамками брошюры.

Параметры сигнала.

В наши задачи не входило сопряжение с каким-либо ранее разработанным модемом, поэтому мы были вольны в выборе параметров сигнала. Эта особенность оказалась существенной и полезной, если учесть, что

мы изначально собирались достичь рекордно высокой скорости работы. Поставленный нами для себя же рубеж был 4800 бит/сек в полосе стандартного телефонного радиоканала. Напомню, что "Кинеплекс" обеспечивал только 3000 бит/сек, а все другие участники не помышляли о скорости выше 2400 бит/сек. В качестве сверхзадачи нами были выбраны реализация скоростей 6000-7200 бит/сек за счет применения трехкратной ФРМ и испытание этого режима в реальных КВ каналах.

Руководствуясь предоставленной свободой, мы выбрали следующие параметры сигнала:

вид манипуляции	ФРМ однократная, двукратная и трехкратная,
число частотных подканалов	20
длительность сигнала	8,333 и 10 мсек,
частотный интервал между подканалами	142 Герца,
частоты первого и последнего подканалов	497 и 3195 Герц,
скорость передачи	100 - 7200 бит/сек с промежуточными

значениями 200, 300, 600, 1000, 1200, 2000, 2400, 4000, 4800 и 6000 бит/сек.

Обилие промежуточных значений скорости передачи может вызвать недоумение. Объяснение весьма простое. Всякое снижение скорости передачи сопровождалось повышением помехоустойчивости приема. Но об этом подробнее будет чуть позже. Дополнительную информацию к обоснованию параметров сигнала можно найти в упоминавшейся выше брошюре.

Обязательным для модемов типа "МС" условием является кратность величин всех подканальных частот некоторой одной частоте. В нашем модеме эта частота равна 71 Герц, и все подканальные частоты являются ее нечетными гармониками (с 7-ой по 45-ю). Другим обязательным условием является выбор длительности обработки каждого сигнала в демодуляторе равной обратной величине частотного разноса между поднесущими, то есть равной 7,04 мсек. При выполнении обоих условий обеспечивалась взаимная ортогональность сигналов в подканалах и отсутствие межканальных влияний, несмотря на то, что спектры подканальных сигналов полностью перекрываются. Разумеется, что манипуляция во всех частотных подканалах должна быть синфазной, а их амплитуды на интервале обработки - постоянными.

Разность между длительностью сигнала и длительностью его обработки составляет 1,293 или 2,94 мсек. Эта разность называется защитным интервалом и используется для уменьшения влияния многолучевости КВ канала.

Отметим, что аббревиатуре ФРМ эквивалентна американская аббревиатура DPSK.

Генерация сетки частот

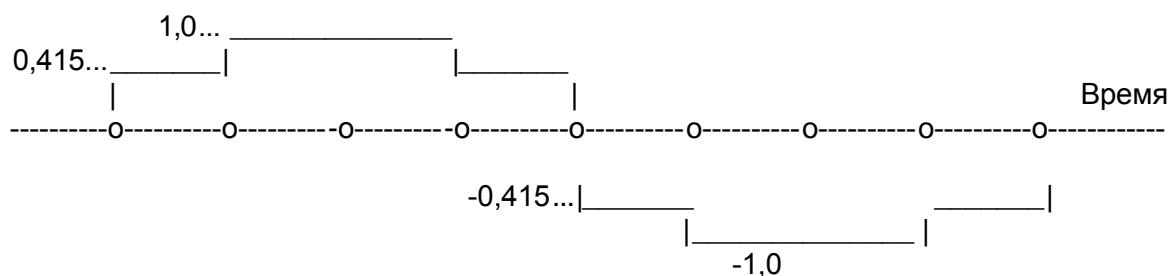
Как отмечалось, для работы активных фильтров необходима подача на них опорных колебаний с относительно высокой стабильностью фазы и частотой, равной подканальной частоте. Все частоты должны порождаться одним кварцевым генератором. Те же самые частоты должны подаваться и на фазовые манипуляторы в модуляционном устройстве модема. Таким образом, в состав модема должен входить специальный блок для генерации сетки частот (ГСЧ). По реализационным соображениям в "МС-5" (как и в "МС-1") ГСЧ генерировал уосьмеренные подканальные частоты. Обычные для нашего времени термостатированные высокостабильные генераторы типа "Флокс" или "Гиацинт" были недоступны, и практически во всех случаях кварцевые резонаторы изготавливались под конкретный заказ. Для решения наших проблем по генерации сетки частот нам необходимы были резонаторы с частотой 281728 Герц. Три таких резонатора в ламповых корпусах были для нас изготовлены нашим заказчиком.

ГСЧ содержал триггерные делители частоты, транзисторные ключевые каскады и другие импульсные устройства. Из аналоговых устройств в ГСЧ применялись электронные модели колебательных контуров с добротностью от 50 до 300 в диапазоне частот до 15 кГц. Каждая модель состояла из 3-х или 4-х операционных усилителей (инверторы и интеграторы), выполненных на транзисторах. Микросхемных операционных усилителей тогда не существовало.

Передающая часть "МС-5"

Разрабатывавшийся нами образец "МС-5" включал автономный блок, предназначенный для установки на передающем конце радиолинии. В блоке размещались ГСЧ, фазовые манипуляторы, выходное устройство, формировавшее аналоговый выходной сигнал блока, а также различные импульсные устройства, распределявшие входной поток информационных символов по подканальным манипуляторам и перекодировавшие эти символы в соответствии с выбранным манипуляционным кодом (кодом Грея).

Реализационной особенностью манипуляторов являлось генерирование выходного сигнала в виде прямоугольных импульсов с частотой следования, равной подканальной частоте. Как известно, такое колебание помимо основной содержит все нечетные гармоники. Для низкочастотной части подканалов эти гармоники совпадают с некоторыми подканальными частотами, в результате чего возникают межканальные влияния. Для устранения этого эффекта выходной сигнал манипулятора формировался двухуровневым. Один период такого сигнала приведен на диагр.1. Более подробно о реализации блока можно узнать в нашей брошюре.



диагр.1

Приемная часть "МС-5"

В стойке, размещавшейся на приемной стороне радиолинии, располагались ГСЧ (такой же, как в передающей части), входные усилители, блоки активных фильтров, аналоговое запоминающее устройство, блок вычисления разностей фаз, устройства синхронизации и управления.

Как известно, для борьбы с замираниями в КВ диапазоне широко применяется пространственно-разнесенный прием. Для реализации такого способа повышения помехоустойчивости обеспечивалось подключение приемной части "МС-5" к выходам двух радиоприемников, для чего в стойке располагались два комплекта входных усилителей, два блока активных фильтров и двойной комплект ячеек памяти в аналоговом запоминающем устройстве.

Активные фильтры

Как отмечалось ранее, для разделения частотных подканалов использовались активные фильтры, образованные последовательным соединением перемножителя и интегратора. Поскольку в "МС-5" использовался некогерентный прием, то для выделения одного подканала необходимо было использовать два активных фильтра, один для выделения синфазной с опорным колебанием компоненты принимаемого сигнала, а другой - для выделения квадратурной компоненты. Таким образом, с учетом реализации разнесенного приема для выделения одного подканального сигнала использовалось 4 активных фильтра.

Активные фильтры, впервые апробированные в модемах типа "МС", получили в дальнейшем весьма широкое, практически повсеместное распространение. Одна из причин называлась. Фильтры весьма технологичны в производстве и применении, идентичны и взаимозаменяемы, не содержат моточных изделий и не требуют никаких настроек. Другой причиной несомненно являлась еще одна идея Л.Раховича. Он предложил заменить аналоговые перемножители - достаточно сложные компоненты АВМ - на знаковые перемножители - сравнительно простые ключевые транзисторные устройства. Платой за эту замену, как и в фазовых манипуляторах, явилась необходимость устранения межканальных влияний на низкочастотные подканалы. При прямоугольном опорном колебании к сигналу, выделяемому, например, в подканале №1 (7-я гармоника частоты 71 Гц), добавляется 1/3 сигнала из подканала №9 (21-я гармоника) и 1/5 сигнала из подканала №17 (35-я гармоника). Для устранения этих воздействий использован тот же прием, что и в манипуляторах - двухуровневое опорное колебание по диагр.1. Применение такого опорного колебания практически не усложнило перемножитель, который оставался ключевым, а величина уровня менялась шунтированием дополнительным ключом части входного резистора интегратора. Уместно напомнить, что первые интегральные микросхемы, пригодные для использования в качестве ключевого перемножителя, например, микросхема "Иртыш", стали доступными примерно через 5 лет.

Значительно большие трудности ожидали нас при разработке операционного усилителя (ОУ). Как известно, ОУ это усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, малым дрейфом нулевого уровня, охваченной глубокой отрицательной обратной связью. Выполнить первые два требования было сравнительно легко, а два других доставили немало забот.

Для обеспечения допустимо малой величины дрейфа нулевого уровня ОУ было предложено использовать периодическую автокомпенсацию дрейфа, выполняемую в течение длительности защитного интервала. Как потом оказалось Л.М.Рахович не был первооткрывателем этого метода. Среди специалистов по АВМ этот

метод был известен как метод Принца, но я точно знаю, что Л.М.Рахович открыл его самостоятельно. Потребовалось немало усилий, чтобы реализовать этот метод в ОУ активного фильтра.

Повышению глубины обратной связи в ОУ обычно препятствуют паразитные фазовые сдвиги в каскадах усилителя. Для обеспечения устойчивости частотная и фазовая характеристики усилителя с разомкнутой обратной связью должны корректироваться. В диапазоне частот, в котором фазовый сдвиг может достичь или превысить 180 градусов коэффициент усиления ОУ с разомкнутой обратной связью должен быть меньше единицы. Частота единичного усиления является важной характеристикой ОУ. Естественным желанием разработчиков является всемерное ее повышение. В нашем ОУ эта частота равнялась 0,5 МГц при усилении на нулевой частоте порядка 100000 и фазовом запасе порядка 20 градусов.

Как показал более чем трехлетний опыт испытаний образца "МС-5", никаких проблем с активными фильтрами не возникало. Образец четырежды модифицировался (об этом подробнее чуть позже) и при каждой модификации никаких идейных новаций в активный фильтр не вносилось, а его конструкция заметно упрощалась благодаря применению появлявшихся к тому времени интегральных микросхем. В частности, в начале 70-х годов стали доступными интегральные микросхемы ОУ серии 140.

Запоминающее устройство

Аналоговое запоминающее устройство оказалось слабейшим звеном в образце "МС-5". Устройство состояло из 160 одинаковых запоминающих ячеек, каждая из которых содержала конденсатор, два кремниевых транзисторных ключа для записи и считывания сигнала, 4 резистора и 3 диода. Конструктивные трудности заключались в выборе типа транзистора, через который производился перезаряд запоминающего конденсатора. Ни один из доступных в то время транзисторов не годился для этой роли. Самым подходящим оказался транзистор П-104 при выбраковке порядка 80%. Качество транзистора ухудшалось постепенно во время работы образца. Ухудшение проявлялось в увеличении тока, протекающего через запертый транзистор, что приводило к разряду конденсатора во время хранения сигнала. За состоянием этих ключей приходилось постоянно следить. Появление в последующем новых типов транзисторов и микросхем позволило устранить этот недостаток.

Блок вычисления разностей фаз

Как отмечалось выше, блок вычисления разностей фаз (БВРФ) был реализован в виде специализированной аналоговой вычислительной машины. Это устройство на каждом тактовом интервале длительностью 8,333 или 10,0 мсек поочередно в каждом частотном подканале вычисляло значения тригонометрических функций разности фаз сигналов на текущем и предыдущем тактовых интервалах, после чего в соответствии с манипуляционным кодом и кратностью манипуляции определяло знаки одного, двух или трех двоичных символов, переданных по этому подканалу.

Дополнительной задачей БВРФ была реализация алгоритмов разнесенного приема. В "МС-5" использовался алгоритм линейного сложения значений тригонометрических функций разности фаз, вычисленных в подканалах, по которым передавалась одна и та же информация. Этот алгоритм теоретически оптимален при одинаковости величин отношения сигнал/шум в разнесенных ветвях. В модификациях "МС-5" использовались и другие алгоритмы разнесенного приема.

Практическая реализация разнесенного приема особых трудностей не представила. Как отмечалось, образец включал два комплекта активных фильтров и поэтому мог подключаться либо к выходам двух радиоприемников системы пространственно-разнесенного приема, либо к выходам верхней и нижней боковой полосы одного радиоприемника в случае загрузки на передатчике обеих полос одним и тем же сигналом. В каждом частотном подканале сигналы с двух разнесенных ветвей обрабатывались поочередно, а результаты обработки суммировались на выходных интеграторах аналоговой части блока.

Описанные виды разнесения - пространственное и частотное - можно назвать внешними по отношению к модему. При их применении скорость передачи не снижалась. Кроме этих видов разнесения в модеме было реализовано внутриполосное частотное разнесение, сопровождавшееся снижением скорости передачи. При этом виде разнесения передаваемая информация дублировалась по двум, четырем или по всем двадцати частотным подканалам с обеспечением максимально возможного частотного расстояния между этими подканалами. Использовались тот же алгоритм разнесенного приема и тот же способ его реализации. Частотные подканалы в БВРФ обрабатывались в следующем порядке - 1, 11, 6, 16, 2, 12, 7, 17 и т.д. В таком же порядке производилось распределение по подканалам информационных символов в передающей части образца. При двукратном частотном разнесении в БВРФ суммировались пары подканальных сигналов (1 и 11, затем 6 и 16, затем 2 и 12 и т.д.). При четырехкратном разнесении суммировались четверки подканальных сигналов (1, 11, 6 и 16, затем 2, 12, 7 и 17 и т.д.).

Синхронизация

Отметим еще одну особенность образца аппаратуры "МС-5". В нашем образце впервые в мировой практике модемов этого типа синхронизация приемной части обеспечивалась непосредственно по результатам обработки многочастотного сигнала без применения каких-либо специальных пилот-сигналов, разрежений в спектре и других приемов, типичных для модемов других разработчиков.

Изготовление образца

Разработка, изготовление и подготовка образца к испытаниям длились чуть больше двух лет. Образец изготавливался в экспериментальных мастерских института. Часть монтажных работ была выполнена на экспериментальном заводе Куйбышевского отделения НИИРадио. Передающая часть образца имела габариты (по памяти) 800x600x400 мм, приемная часть - 800x1400x400 мм. Электропитание приемной части производилось от отдельной лабораторной стойки. Для удобства транспортировки обеспечивалось расчленение приемной части на два субблока. В мае 1968 года образец был полностью подготовлен к проведению линейных испытаний.

Линейные испытания

Впервые мы вышли в эфир в июне 1968 года на трассе Новосибирск - Куйбышев (здесь и далее первым называется пункт передачи). Результаты нас вполне удовлетворили. В 80% времени испытаний образец с использованием пространственно-разнесенного приема обеспечивал вероятность ошибок не хуже 0,004 при скорости 4800 бит/сек, 0,0004 при скорости 2400 бит/сек и 0,0001 при скорости 1200 бит/сек.

На этой же трассе одновременно с нами испытывались два образца аппаратуры частотного уплотнения, разработанные в НИИРадио (НИИР). В 12-тиканальном образце в 80% времени вероятность ошибок при скорости 2400 бит/сек и отсутствии пространственного разнесения была не хуже 0,0015. Второй образец был шестиканальным, использовал частотную манипуляцию и работал с суммарной скоростью 750 бит/сек. В той же доли времени вероятность ошибок была не хуже 0,0007. На базе этого образца НИИР позднее разработал и внедрил в практику КВ радиосвязи аппаратуру АУРК.

В 1969 году мы участвовали в совсем других испытаниях. Это были военные радиопередачи с небольшими мощностями радиопередатчиков (не более 1 кВт) и с работой на случайно выбранной ("непродутой", как говорят радисты) частоте. Условия усугублялись применением относительно низкоэффективных антенн и невозможностью использования пространственно-разнесенного приема. Работали на двух радиопередачах Владивосток - Севастополь (весной) и Ленинград - Москва (летом) в режиме дублирования передаваемой информации по четырем частотным подканалам и двукратной ФРМ со скоростью манипуляции 100 Бод. Результирующая скорость передачи была 1000 бит/сек. На обеих трассах в 50% времени дневных испытаний вероятность ошибок была не хуже 0,01, а в ночное время - 0,1. На этих трассах основное влияние на помехоустойчивость оказывали помехи от других станций. Если исключить сеансы работы на пораженных частотах с вероятностью ошибки близкой к 0,5, то та же самая помехоустойчивость обеспечивалась не в 50%, а в 80% времени работы.

В 1970 году испытания образца также производились на двух радиотрассах. Весной на магистральной КВ радиотрассе Министерства связи СССР Ташкент - Москва наш модем на скорости 4800 бит/сек испытывался совместно с вокодером "Гармония-М", разработанным НИИР. В 80% времени испытаний модем обеспечивал вероятность ошибки не хуже 0,002, то есть примерно такую же, как в 1968 году на трассе Новосибирск - Куйбышев. Сравнительные испытания аналогового и вокодерного телефонных каналов показали несомненное превосходство вокодера. Им обеспечивалась слоговая разборчивость порядка 86%, а аналоговым каналом в тех же условиях - около 55%. По результатам этих испытаний было принято решение об организации на одной из протяженных КВ радиотелефонных линий Министерства связи СССР опытной эксплуатации системы цифровой телефонии на базе вокодера НИИР и нашего модема. Это решение и привело к необходимости первой модификации "МС-5", но об этом позже.

Осенью 1970 года Центральный НИИ связи (ЦНИИС), также подведомственный Министерству связи СССР, на трассе Джалбул - Москва организовал испытания нашего образца с целью фиксации (записи на магнитную ленту) реальных потоков ошибок, возникающих на типовых КВ радиопередачах. Эти испытания проводились для выбора кодов, обеспечивающих "похожесть" КВ радиоканала на каналы кабельных или спутниковых систем связи, что, в свою очередь, облегчило бы включение в эти системы КВ радиовставок. Испытания проводились на скоростях 1200, 2400 и 4800 бит/сек сеансами длительностью 2 часа. При проведении испытаний использовались относительно мощный радиопередатчик и пространственно -

разнесенный прием, но характеристики канала оказались хуже, чем на магистральных КВ радиолиниях Министерства связи. Из-за влияния помех от других станций приходилось на длительности некоторых сеансов трижды, а то и четырежды менять рабочую частоту. В целом в 80% времени испытаний обеспечивалась вероятность ошибки не хуже 0,004 при скорости 4800 бит/сек, 0,002 при скорости 2400 бит/сек и 0,0003 при скорости 1200 бит/сек. Испытания решено было продолжить на следующем этапе работ ЦНИИС, для чего было признано необходимым изготовить макет модифицированного модема типа "МС", но об этом снова чуть позже.

Последние испытания образца "МС-5" проводилось на трассе Ленинград - Севастополь летом 1971 года. Об этих испытаниях в моей памяти и в архиве мало что сохранилось. Помню только, что организаторов в основном интересовала работа на самой низкой скорости передачи и что вместе с нами в испытаниях участвовала группа из Военной академии связи, руководителем которой был известный специалист, автор нескольких хороших книг М.В.Верзунов.

Модификации "МС-5"

В 1970 году после проведения испытаний вокодера "Гармония-М" НИИР убедил Министерство связи СССР в целесообразности организации опытной эксплуатации протяженной вокодерной КВ радиолинии. Решение было принято, а Куйбышевскому отделению НИИР (КОНИИР) было поручено с нашим участием разработать и изготовить 5 образцов модифицированного модема типа "МС". Эта разработка стала именоваться "МС-5М". В отличие от прототипа каждый образец "МС-5М" включал передающую и приемную части. Сейчас мне трудно вспомнить, что существенно нового было внесено в схемную часть новой разработки. Смутные воспоминания говорят о том, что особых изменений не было, так как с ними мы столкнулись при проведении других, более поздних модификаций.

С 1973 по 1975 гг изготовленные в КОНИИР образцы "МС-5М" испытывались первоначально на трассах Москва - Иркутск и Иркутск - Петропавловск Камчатский, а потом и на составной радиотрассе Москва - Петропавловск Камчатский с ретрансляцией в Иркутске. В Москве образец "МС-5М" располагался не на приемном радиоцентре (как раньше было практически всегда), а в радиобюро в известном доме на ул.Горького, 7. Испытания проводились силами НИИР и КОНИИР. Нас привлекали для редких консультаций.

ЦНИИС также решил подготовить для последующих испытаний новый образец модема "МС-5". Разработка началась в 1970 году в Ленинградском филиале ЦНИИС (ЛОНИИС). Образец получил название "МС-7И" (интегральный). В образце использовались 24 частотных подканала, что позволило увеличить длительность защитного интервала до 1,666 мсек (вместо 1,293 в "МС-5"). Было исключено аналоговое запоминающее устройство. Запоминание производилось непосредственно на интеграторах активного фильтра, для чего количество интеграторов в фильтре было увеличено. Зимой 1972 года проводились испытания на той же трассе Джамбул - Москва, а зимой 1973 года - на трассе Иркутск - Москва. Результаты испытаний и последующее моделирование кодозащиты показали, что модемы типа "МС" с соответствующим кодированием в КВ каналах не лучшего качества позволяют обеспечить передачу со скоростью порядка 700-800 бит/сек с вероятностью ошибок не хуже 0,000001.

В последствии разработка "МС-7И" была передана в Киевский филиал ЦНИИС (КОНИИС). Там была проведена дальнейшая доработка образца и осенью 1975 года состоялись его весьма интересные шлейфные испытания с участием серийной аппаратуры передачи данных со скоростью 1200 и 2400 бит/сек. Испытания проводились на трассе Москва - Алма-Ата - Киев - Москва. Один из участков этой трассы был КВ радиовставкой, а другие - стандартными проводными ТЧ каналами.

Последняя (по счету, а не времени) из модификаций нашего модема, в которой нам пришлось участвовать, проводилась в НПО "Красная заря". Объединению была заказана разработка малогабаритного модема типа "МС", устойчивого к климатическим и механическим воздействиям и тем самым пригодного для двойного (как модно сейчас говорить) применения. Требуемая скорость передачи составляла 2400 бит/сек. Работы проводились на конкурентной основе, вторым (конкурентным) исполнителем была упоминавшаяся ранее "марфинская шарашка". Работы начались в самом начале 70-х годов. В 1974 году макет модема проходил лабораторные испытания. В макете широко использовались ставшие тогда доступными микросхемы операционных усилителей 140 серии. О последующих испытаниях мне ничего не известно. Знаю только, что победителем оказалась "шарашка", которая в полной мере использовала в своем образце нашу идею активных фильтров. В 1980 году Ростовское (на Дону) объединение "Алмаз" начало серийный выпуск модема - победителя под широко известным сейчас названием АТ-3004Д. В первые годы перестройки этот модем предлагалось купить любому, кто был в состоянии заплатить требуемую сумму. Модем серийно производится до сих пор. В интернете о нем можно много почитать. Известна еще одна модификация - 20-ти канальный модем АТ-3104.

Последний образец модифицированного модема типа "МС", разработанного и изготовленного под моим руководством и при непосредственном участии назывался, если мне не изменяет память, "МС-15". Этот

образец готовился к испытаниям на КВ ППРЧ радиолинии - то есть радиолинии, использующей псевдослучайную перестройку рабочей частоты. В то время эта тема мало обсуждалась в открытой прессе. Сейчас же только набери "ППРЧ" и Яндекс тут же тебе выдаст более 200 ссылок.

Образец разрабатывался в первой половине 80-х годов с наибольшим возможным в то время уровнем микросхемной интеграции. Его сигнал содержал 32 частотных подканала с расстановкой через 90 Герц. Длительность защитного интервала равнялась 2,22 мсек. Скорости передачи - 2400 и 4800 бит/сек. Обеспечивались следующие способы повышения помехоустойчивости:

- параллельный прием по двум пространственно или частотно- разнесенным ветвям,
- внутриполосное частотное разнесение (с соответствующим снижением скорости) по двум, четырем, восьми и т.д. подканалам образца,
- весовое суммирование разнесенных сигналов в соответствии с величиной отношения сигнал/помеха в разнесенных ветвях,
- корректирующий (15,4) код Рида-Маллера с разверткой кодовых символов по частотным подканалам и приемом в целом с полным перебором вариантов кодового слова.

Для симплексных устройств (предназначенных для передачи в одном направлении) сделанный нами образец был близок к теоретически оптимальному. Модем испытывался на реальной КВ радиотрассе в 1985 или 1986 году (точно уже не помню). "Музыку заказывал" и руководил испытаниями один из промышленных НИИ. Нашей задачей было показать, во-первых, работоспособность образца при времени занятия одной частоты менее 1 сек и, во-вторых, сохранение взаимного синхронизма любого вида (циклового, тактового и др.) передающей и приемной частей образца на всей длительности сеанса испытаний. И то, и другое нам удалось продемонстрировать.

Итоги

Изложенное выше, видимо, позволяет составить представление об истории развития в нашей стране одного из эффективных методов передачи дискретной информации на КВ. Однако, потенциальные читатели конечно прекрасно знают, что OFDM - далеко не единственный метод, реально используемый в диапазоне КВ. Но сам факт его достаточно широкого и давнего по времени применения несомненно свидетельствует о том, что это - хороший метод. Этот метод еще не исчерпал своих потенциальных возможностей. Известны, например, американские разработки модемов Катрин, Дефт, Андефт и др., в которых сделаны попытки реализовать когерентный прием или использовать другой вид манипуляции - частотно-фазоразностную. Известен также весьма эффективный способ адаптивного изменения числа активных подканалов и кратности манипуляции по сигналам, поступаемым из обратного канала связи. Этот способ реализован в проводном (пока) 512-ти канальном модеме Trail-Blazer. Несомненно последуют и другие новации.

PS

Учитывая специфику аудитории, сообщаю, что на стр.4 форума "Модемы на КВ" имеется ссылка на материалы, в которых изложен мой опыт моделирования на РС алгоритмов работы модемов типа "МС" с подзаголовком OFDM - это очень просто.

На случай закрытия форума дублирую ссылку здесь

www.radioscanner.ru/info/article227