

УДК 621.314

М.Е. Ильченко, д-р техн. наук, Т.Н. Нарытник, канд. техн. наук. В.В. Волков, П.Я.Ксензенко, П.В. Химич

Микроволновая телекоммуникационная система МИТРИС-МЮИ с применением комбинированной модуляции M-QAM/FM

Комбинированная модуляция, которая включает M-кратную квадратурную модуляцию QAM в качестве первичной и частотную модуляцию FM в качестве вторичной, успешно применяется для обеспечения возможности передачи сигналов цифрового телевидения по существующим радиорелейным линиям связи, которые ранее предназначались для передачи одного канала аналогового телевидения с частотной модуляцией. Одним из перспективных направлений развития современных телекоммуникационных систем является повышение спектральной и энергетической эффективности и освоение все более высоких частот сверхвысокочастотного диапазона.

В этой статье описана созданная на базе существующей микроволновой интегрированной теле-радиоинформационной системы МИТРИС, предназначенной для передачи цифровой информации в диапазоне частот 11,7-12,5 ГГц (в частности, распространения телевизионных программ и данных Интернет), телекоммуникационная система МИТРИС-МЮИ с использованием комбинированной модуляции, которая обладает повышенной спектральной эффективностью и способностью обслуживания большой зоны покрытия (в радиусе до 60 км при излучаемой мощности 0,010 Вт/канал) для центральной станции системы. Техническое решение МИТРИС - МЮИ отвечает высоким требованиям ресурсосбережения и экологической безопасности.

The combined modulation which includes M-fold quadrature modulation QAM as primary and frequency modulation FM as secondary, is successfully applied to a possibility of signaling of digital TV on existing radiorelay communication lines which earlier intended for transfer of one channel of analog TV with frequency modulation. One of perspective directions of development of modern telecommunication systems is increase of spectral and power efficiency and implementation of more and more high frequencies of a microwave range.

In this article it is described created on the basis of the existing microwave integrated multimedia system MITRIS intended for transfer of the digital information in a range of frequencies 11,7-12,5GHz (in particular, distributions of television programs and data the Internet), telecommunication system MITRIS-MUI with use of combined modulation, which possesses the raised spectral efficiency and ability of service of the big cover zone (in radius up to 60 km at radiated power 0,010 W/channel) for the central station of system. Technical decision MITRIS – MUI meets high requirements of resource saving and ecological safety.

Введение

Развитие современных телерадиоинформацион-

ных (мультимедийных) систем имеет определившееся направление, которое состоит в повышении энергетической и спектральной эффективности и освоении все более высоких частот. Частотный ресурс до 10 ГГц включительно почти полностью исчерпан, поэтому взгляды разработчиков мультимедийных систем направлены на частотные диапазоны выше 10 ГГц. Относительно этих диапазонов можно утверждать, что использование режима со многими несущими (OFDM) не имеет существенных преимуществ по сравнению с использованием только одной несущей. Это связано с особенностями режима распространения радиосигналов в разных диапазонах частот [1...3]. Поэтому многие авторы считают, что модуляция OFDM в чистом виде эффективна на частотах до 10 ГГц, где она хорошо предотвращает влияние последствий так называемого «многолучевого» режима распространения. Обычно на более высоких участках полосы радиочастот в мультимедийных системах могут использоваться более широкие полосы частот, и поэтому, на первый взгляд, возможно использование простых типов цифровой модуляции с относительно низкой спектральной эффективностью и высокой помехоустойчивостью (например, FSK, GMSK, QPSK и им подобных). Однако очень быстро, даже при применении достаточно широких полос частот, емкость каналов передачи информации при использовании простых типов модуляции будет также исчерпана. Что же препятствует применению сложных типов модуляции, которые обладают высокой спектральной эффективностью, на частотах, превышающих 10 ГГц? Дело в том, что при продвижении в направлении более высоких частот требования к некоторым параметрам системы значительно повышаются. Это касается в первую очередь требований к стабильности частоты и уровню фазового шума гетеродинов. Еще одно требование - это необходимость, при применении сложных типов модуляции, обеспечения значительно большего соотношения сигнал/шум, что приводит к уменьшению энергетического потенциала системы и, в конечном счете, к уменьшению радиуса зоны обслуживания. Преодолеть эти недостатки можно за счет внедрения известной с середины 90-х годов комбинированной модуляции M-QAM/FM.

Разные типы комбинированной модуляции в наше время успешно применяются для обеспечения возможности передачи сигналов цифрового телевидения по существующим радиорелейным линиям связи, которые ранее были предназначены для передачи одного канала аналогового телевидения с частотной модуляцией. Передатчики радиорелейных станций в этом случае работают в режиме компрессии, и поэтому не пригодны для передачи сигналов с модуляцией QAM. Применение

комбинированной модуляции M-QAM/FM позволяет решить эту проблему и осуществить с помощью аналогового радиорелейного канала передачу нескольких цифровых каналов [4]. Описанная в указанной статье система совместной передачи многопрограммного телевизионного потока и потоков данных плесинхронной цифровой иерархии по каналам аналоговых радиорелейных линий разработана с целью удовлетворения возрастающих требований к передаче по каналам первичной сети разнообразной информации значительных объемов. Реализованная в системе 32-х и 64-х позиционная квадратурно-амплитудная модуляция позволила передать по одному из радиоканалов 8-ми ствольной действующей аналоговой многопролетной радиорелейной линии протяженностью более 1000 км шесть программ телевизионного вещания и четыре потока данных E1, обеспечив при этом высокое качество передачи и достижение остаточного BER на уровне 10^{-11} .

Представляется весьма перспективным исследование возможности повышения спектральной эффективности микроволновых телерадиоинформационных систем радиовещательной службы путем применения комбинированной модуляции M-QAM/FM.

В этой статье описана созданная на базе существующей микроволновой интегрированной телерадиоинформационной системы МИТРИС, предназначенной для передачи цифровой информации (в частности распространения цифровых телевизионных программ и данных Интернет), телекоммуникационная система МИТРИС-МЮИ, обладающая минимальной чувствительностью к отмеченным выше влияниям и максимальной способностью к обслуживанию большой зоны покрытия центральной станции системы.

Преимущества комбинированной модуляции

Исследование преимуществ комбинированной модуляции M-QAM/FM проведем на примере широко используемой в Украине и за рубежом отечественной телерадиоинформационной системы МИТРИС в диапазоне частот 11,7-12,5 ГГц. В этой системе, как и в других системах широкополосной связи (BWA), для передачи сигналов цифрового телевидения и данных уже традиционно используются транспортные потоки, соответствующие стандартам DVB. При этом данные, которые обычно поступают из IP - среды (например, из локальной сети Ethernet), могут быть непосредственно встроены в кадры DVB. Могут быть использованы и другие способы инкапсуляции, но при любом из способов структура кадров DVB должна сохраняться.

В системе МИТРИС до последнего времени использовались сигналы по стандарту DVB-S, что было обусловлено использованием в качестве абонентских приемников тюнеров цифрового спутникового телевидения. Но сейчас система МИТРИС используется не только для вещания, но и для передачи значительных объемов цифровой информации, и в первую очередь – предоставления Интернет. Данные, которые поступают из сети Интернет, при помощи маршрутизатора и инкапсуля-

тора встраиваются в структуру кадров DVB, после чего обрабатываются в полном соответствии со стандартом DVB-S и модулируют несущую, формируя созвездие QPSK. Таким образом, в канале передачи сигналы телевидения и данных имеют один и тот же вид независимо от их происхождения.

Однако при этом мы сталкиваемся с трудностями, которые обусловлены недостаточной спектральной эффективностью сигналов стандарта DVB-S (метод модуляции QPSK). Более привлекательным представляется использование сигналов стандарта DVB-C, в соответствии с которым можно воспользоваться сигналами QAM разного уровня, имеющими значительно большую спектральную эффективность. Вместе с тем для передачи таких сигналов имеющиеся на данный момент передатчики и приемники, которые используются в существующих системах МИТРИС, совсем не пригодны.

Прямое использование QAM-модуляции при излучении информационных сигналов в зону обслуживания системы МИТРИС в соответствии со стандартом DVB-C приводит к снижению радиуса действия и помехоустойчивости канала связи, что обуславливает дополнительное уменьшение зоны обслуживания.

Повышение спектральной эффективности канала связи системы МИТРИС-МЮИ достигается за счет использования эффективной многопозиционной амплитудно-фазовой модуляции. Для этого система содержит формирователь цифровых пакетов телевизионного вещания, который формирует транспортные MPEG-потоки для их непосредственного направления на модуляторы M-QAM/FM с использованием ASI интерфейса. Использование многопозиционной модуляции решает задачу повышения спектральной эффективности за счет снижения символьной скорости при равных битовых скоростях (как известно, ширина полосы, занимаемой радиоканалом в эфире, прямо зависит от символьной скорости).

Но при этом значительно повышаются требования к качеству канала передачи и уменьшаются размеры зоны обслуживания за счет того, что сложные типы модуляции требуют значительно большего отношения сигнал/шум на входе демодулятора. Кроме того, канал связи становится совсем не защищенным от последствий «многолучевого» режима распространения радиоволн. Для того, чтобы предотвратить отрицательное влияние этих факторов, предлагается осуществить частотную модуляцию, несущей более высокой частоты полученным радиочастотным сигналом, который уже имеет многопозиционную модуляцию. Таким образом, в сущности, по радиоканалам передаются FM сигналы, которые не только не искажаются при ограничении уровня в СВЧ передатчике, но даже используют это ограничение для исключения паразитной амплитудной модуляции, как это происходит в обычной системе МИТРИС при передаче FM-сигнала. При этом помехоустойчивость канала передачи в зоне покрытия системы практически равняется помехоустойчивости

аналогового канала связи. Нужно отметить, что модуляция M-QAM/FM - это не единственный возможный вариант комбинированной модуляции. В качестве модулирующего сигнала может выступать не только одна несущая с модуляцией QAM, но также групповой сигнал из нескольких несущих, которые промодулированы с применением разных сложных типов модуляции, и даже сигналы OFDM [5...6]. В частности [5] отмечается, что для непосредственной передачи по каналам спутниковой связи сигналов наземного цифрового вещания, которые имеют модуляцию OFDM (что соответствует стандарту DVB-T), предложено дополнительно подвергнуть их модуляции FM. Такой комбинированный метод модуляции получил название OFDM/FM. В техническом решении [6] предложено использование подобной комбинированной модуляции с целью достижения желаемого отношения сигнал/шум (SNR). Благодаря этому методу модуляции достигнуто SNR на уровне 10-12 дБ, что позволяет существенно увеличить расстояние связи. При этом сложные типы модуляции присутствуют только на коротких отрезках тракта обработки сигнала, где условия для их приема и передачи реализовать значительно проще. Главное преимущество заключается в том, что и в эфирном канале, и в наиболее высокочастотной части оборудования благодаря использованию частотной модуляции значительно смягчаются требования к линейности амплитудной и фазовой характеристик трактов приема и передачи, к стабильности частоты и уровню фазового шума оборудования, а также к качеству радиоканала относительно замираний и групповой задержки.

Вместе с тем, повышение числа позиций первичной модуляции не только увеличивает спектральную эффективность, но, во-первых, усложняет прием сигнала, а, во-вторых, усиливает требования к качеству (к линейности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик) той части оборудования МИТРИС-МЮИ, в которой эти сигналы присутствуют в первичном виде.

Исходя из этого, рекомендуется использовать первичную модуляцию QAM-32, QAM-64, (реже QAM-128, QAM-256), которая позволит осуществить прием приемниками-демодуляторами стандарта DVB-C и не предъявит при этом слишком высоких требований к тракту системы МИТРИС.

Таким путем решается задача повышения спектральной эффективности при передаче цифровых высокоскоростных сигналов относительно тех типов модуляции, которые обеспечивают такую же энергетику системы, по каналам существующей сети системы МИТРИС с частотной модуляцией и значительной зоной покрытия при минимальных мощностях излучения.

Еще одно направление использования комбинированной модуляции, которое может иметь перспективу, - это ее использование в интерактивных телерадиоинформационных системах. Наибольшее распространение в последнее время получили системы, которые используют технологию управления сетью (MAC), которая основывается на

предназначенной для кабельных сетей технологии DOCSIS. Адаптированная для использования в беспроводных сетях технология DOCSIS [7] позволяет реализовать достаточно эффективный инструмент для создания самодостаточной разветвленной интерактивной информационной системы с очень большим количеством одновременно активных абонентов (по нашим расчетам до 20-ти тысяч). По этому показателю данная технология превосходит возможности даже того стандарта, который в данный момент привлекает наибольшее внимание и находится в стадии становления, - стандарта WiMAX. Между тем широкомасштабному внедрению технологии DOCSIS мешают некоторые неблагоприятные обстоятельства. Дело в том, что эта технология создавалась для кабельных сетей, поэтому при ее использовании в эфирных сетях, особенно тех, которые предназначены для работы на частотах выше 10 ГГц, разработчик сталкивается с некоторыми неудобствами как на физическом уровне, так и на уровне MAC. Приняв во внимание эти недостатки, группа компаний создала Консорциум для содействия внедрению новой разновидности стандарта DOCSIS, а именно стандарта DOCSIS+, который рассчитан на использование в беспроводных сетях. Сейчас этот стандарт находится на изучении в институте IEEE. Действительно, этот стандарт, принадлежащий к группе стандартов 802.16, решает задачу преодоления недостатков DOCSIS как на физическом уровне, так и на уровне MAC. Но, что касается физического уровня, то предлагаемое решение достигается опять-таки за счет снижения спектральной эффективности в прямом канале. За счет комбинированной модуляции M-QAM/FM часть указанных трудностей, а именно те из них, которые возникают на физическом уровне в прямом канале, можно преодолеть без существенного снижения спектральной эффективности. Это обстоятельство должно было бы привлечь внимание разработчиков стандарта DOCSIS+.

Состав и принципы работы системы

На чертеже Рис.1 приведена структурная схема микроволновой интегрированной телерадиоинформационной системы, которая использует вторичную модуляцию FM, с указанием дополнительно введенного оборудования и его связей. На чертеже Рис.2 показан спектр сигнала на выходе модулятора M-QAM, а на чертеже Рис.3 - спектр сигнала на выходе модулятора FM.

Как показано на Рис.1, система МИТРИС-МЮИ состоит из подсистемы приема, формирования и обработки информации 1, центральной станции 2, которая включает в себя программируемый конвертор-формирователь группового сигнала промежуточной частоты (ПЧ) 3, N-входы которого соединены с выходами N комбинированных модуляторов M-QAM/FM 4, а выход соединен с входом мощного преобразователя в частоты сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ) 5, выход которого через

соединительную радиочастотную линию 6 соединен с передающей антенной 7, а также абонентских приемных станций 8, которые включают в себя антенну 9, малошумящий конвертер 10, селективный

демодулятор - преобразователь частоты 11, тюнер стандарта DVB-C 12, ретрансляторы 13 сигналов центральной станции к абонентским для расширения зоны приема (покрытия).

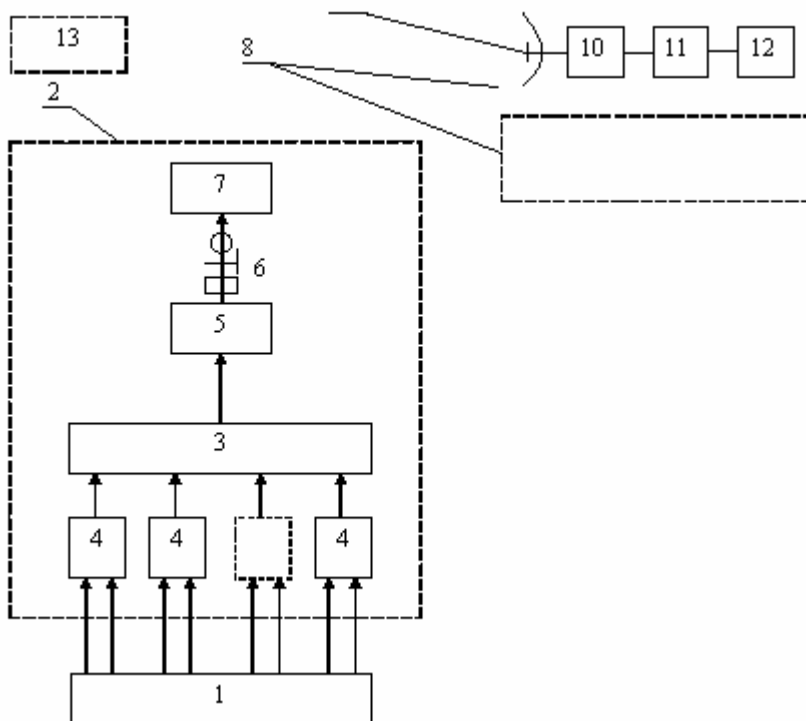


Рис. 1. Структурная схема микроволновой интегрированной телерадиоинформационной системы МИТРИС–МЮИ: 1 – Подсистема приема, формирования и обработки информации; 2 – Центральная станция; 3 – Программируемый конвертер –формирователь группового сигнала промежуточной частоты; 4 – Комбинированный модулятор M-QAM/FM; 5 – СВЧ передатчик; 6 – Соединительная радиочастотная линия; 7 – Антенное устройство; 8 – Абонентская приемная станция; 9 – Антенна абонентской станции; 10 – Малошумящий конвертер; 11 – Селективный демодулятор– преобразователь частоты; 12 – Демодулятор стандарта DVB–С; 13 – Ретранслятор

Телерадиоинформационная система МИТРИС-МЮИ (см. Рис.1) работает следующим образом. Подсистема приема, формирования и обработки информации 1 осуществляет прием и обработку сигналов, поступающих от разных источников, и преобразует их в соответствующий формат для направления на центральную станцию 2 на входы комбинированных модуляторов M-QAM/FM. Частотно-модулированные сигналы разных амплитуд и частот в диапазоне промежуточных частот 0,95...2,15 ГГц с выходов комбинированных модуляторов M-QAM/FM 4 поступают на входы программируемого конвертора-формирователя группового сигнала промежуточной частоты 3, в котором происходит формирование группового радиосигнала. В сформированном групповом сигнале все сигналы равны по амплитуде и отстроены один от другого по частоте на одинаковый выбранный частотный промежуток. Сформированный таким образом групповой сигнал поступает на вход промежуточной частоты (ПЧ) мощного преобразователя 5, в котором производится фильтрация, преобразование и усиление сигналов до достаточного для обеспечения зоны покрытия уровня в рабочий диапазон системы, и через соединительную радиочастотную линию 6 - в антенное устройство 7, с

помощью которого излучается в окружающее пространство. Прием сигналов диапазона СВЧ осуществляется абонентскими приемными станциями 8, в которых принятые сигналы через антенну 9 поступают на малошумящий конвертер 10, и далее после селекции, демодуляции FM сигналов и их преобразования по частоте в селективном демодуляторе - преобразователи 11 поступают в оконечное устройство - тюнер 12 стандарта DVB-C, в котором происходит демодуляция сигналов M-QAM, а также демультимплексирование и декодирование полученного транспортного потока MPEG для направления информации ее получателю (абоненту). Для расширения зоны покрытия в составе системы имеются ретрансляторы 13.

Комбинированный модулятор M-QAM/FM состоит из двух модуляторов, а именно - модулятора M-QAM, который осуществляет многопозиционную амплитудно-фазовую модуляцию, то есть 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM или 256-QAM, и аналогового модулятора FM, который осуществляет частотную модуляцию несущей частоты тем сигналом, который поступает от M-QAM модулятора.

Модулятор M-QAM содержит ASI интерфейс, скремблер, перемежитель, помехозащищающие ко-

деры Рида-Соломона и Витерби, формирователь ансамблей сигналов (mapper) и, наконец, собственно квадратурный модулятор M-QAM (то есть все те блоки, которые необходимы для выполнения требований стандарта DVB-C). Сигналы I и Q, которые поступают от формирователя ансамбля (созвездия), осуществляют в модуляторе амплитудную и фазовую модуляцию квадратурных составляющих несущей частоты в диапазоне частот от 3 до 11 МГц. Эти сигналы вместе образуют сигнал радиочастоты M-QAM. Он имеет для 64-QAM и несущей частоты 5 МГц вид, аналогичный изображенному на рисунке (Рис.2).

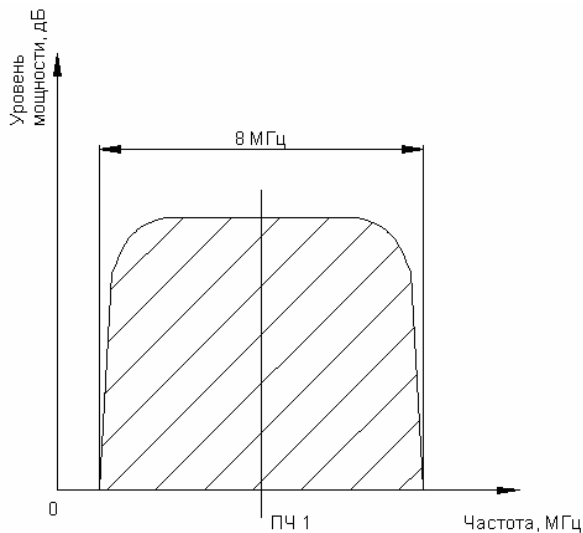


Рис. 2. Спектр сигнала на выходе модулятора M-QAM

Процесс формирования сигнала M-QAM в квадратурном модуляторе может осуществляться как в аналоговой, так и в цифровой форме. В случае использования цифрового модулятора он должен заканчиваться цифро-аналоговым преобразователем, то есть в конечном виде это должен быть аналоговый сигнал.

Сигнал несущей частоты, который получил модуляцию M-QAM, направляется на второй аналоговый модулятор, который предназначен для частотной модуляции несущей, имеющей более высокую частоту, например, 480 МГц, радиосигналом M-QAM. Спектр сигнала после аналогового модулятора FM имеет вид, который воспроизведен на рисунке (Рис. 3).

Спектр полученного сигнала может занимать полосу частот шириной приблизительно 20 МГц. Эта полоса должна быть ограничена с помощью фильтра, который имеет соответствующую полосу пропускания. В приведенном спектре будет присутствовать несущая частота, уровень которой будет зависеть от индекса частотной модуляции. Другие составляющие спектра сигнала, которые являются продуктами частотной модуляции, ограничиваются фильтром.

Сравним параметры комбинированного модулятора M-QAM/FM с параметрами обычного частотного модулятора, а также модулятора QPSK при условии их равной пропускной способности. Для модуляции, например, 64-QAM при фиксированной символьной

скорости 6,952 Мсимв/с битовая скорость равняется 41,71 Мбит/с. При такой скорости транспортного потока может быть передано до 8-ми цифровых телевизионных каналов со сжатием MPEG-2. При комбинированной модуляции 64-QAM/FM канал передачи будет занимать полосу частот 20 МГц. Таким образом, спектральная эффективность для этой технологии будет равняться 41,71 Мбит/с: 20 МГц = 2,08 бит/с/Гц. Это более чем вдвое меньше, чем для исходной модуляции 64-QAM (в среднем 4,8 бит/с/Гц), но значительно больше, чем у тех видов модуляции, которые имеют приблизительно такую же энергетику в радиоканале, то есть QPSK или FSK.

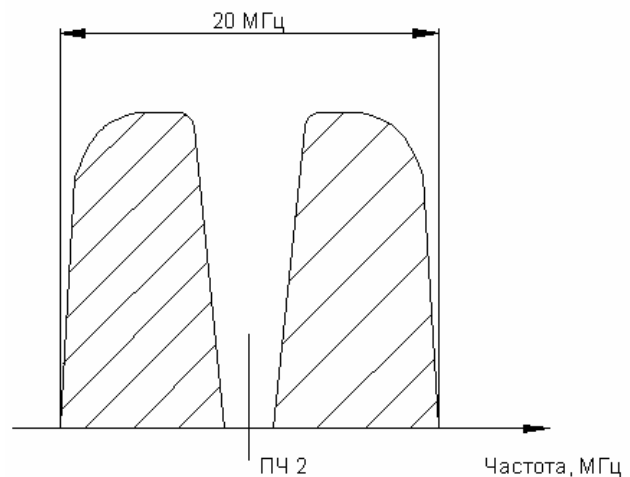


Рис. 3. Спектр сигнала на выходе модулятора FM.

Центральная станция (см. Рис. 1) отличается тем, что частотные модуляторы заменены на комбинированные модуляторы M-QAM/FM поз.4, а подсистема формирования и обработки информации 1 построена таким образом, что на ее выходе присутствуют сигналы видео и аудио стандартного уровня. Комбинированные модуляторы 4 работают на промежуточных частотах, которые находятся в пределах диапазона 0,95 - 2,15 ГГц, а их сигналы преобразуются по частоте и объединяются в один групповой многочастотный сигнал с помощью программируемого конвертора - формирователя группового сигнала 3. Групповой сигнал, который может занимать полосу частот от 900 МГц до 1900 МГц, поступает на мощный преобразователь частоты 5 и далее через фидер 6 к антенному устройству 7.

Отличие в структуре абонентской станции (Рис.1) - это наличие нового устройства, а именно - селективного демодулятора - преобразователя частоты. Данное устройство состоит из двух главных частей:

- селектора каналов, который ничем не отличается от селекторов каналов аналоговых тюнеров спутникового телевидения. На выходе селектора каналов получаем сигнал основной полосы (base band), который имеет вид несущей (или многих несущих частот) в диапазоне частот 3 - 11 МГц, которая модулирована (модулированы) сигналом M-QAM (сигналами M-QAM).
- вспомогательного повышающего преобразователя частоты, который нужен для того, чтобы осу-

ществить преобразование низкой промежуточной частоты в более высокую частоту, на которой возможен прием сигнала обычным тюнером DVB-C, например 480 МГц.

Система МИТРИС-МЮИ имеет следующие основные преимущества:

1. Значительно лучшую энергетику радиоканала. В системе с комбинированной модуляцией одноканальный передатчик может работать в условиях компрессии, что способствует увеличению коэффициента полезного действия (КПД). Для многоканального (группового) передатчика это преимущество менее существенно, но очень существенным остается второе преимущество. Оно обусловлено тем, что отношение сигнал/шум, или помеха/шум для системы с комбинированной модуляцией приближается к тем значениям, которые отвечают обычной частотной модуляции, то есть 10-12 дБ. Для сравнения, наименьшее значение соотношения сигнал/шум для 64-QAM равняется 25 дБ. А это означает, что при прочих равных условиях, расстояние связи, которое обеспечивает система (то есть размеры зоны обслуживания) может быть увеличено в три раза.

2. Менее жесткие требования к стабильности частоты и уровню фазового шума в канале передачи, что связано с использованием когерентного приемника. В этом случае требования к стабильности частоты будут равняться тем, которые справедливы для цифровых систем с частотной модуляцией, то есть не выше 10-5. Для сравнения отметим, что для систем, которые используют 64-QAM, стабильность частоты должна равняться 10-6 и выше.

3. Большую, чем для систем с 64-QAM, стойкость к последствиям режима «многолучевого» распространения сигнала. Наличие отраженных сигналов до определенного уровня не вызывает срывов изображения.

4. Меньшие требования к линейности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик большей части канала передачи. Это обстоятельство предоставляет возможность использовать с минимальной модернизацией существующие аналоговые системы МИТРИС для передачи больших объемов цифровой информации (большого количества ТВ программ) при эффективном использовании радиочастотного спектра и без каких-либо изменений в СВЧ трактах.

Выводы

Использование комбинированной модуляции M-QAM/PM как при модернизации существующих вещательных систем МИТРИС, так и при построении новых интерактивных тедерадиоинформационных (мультимедийных) систем МИТРИС и других систем BWA, предоставляет новые преимущества в смысле

не только получения возможности передачи цифровых сигналов со сложными типами модуляции по каналам, которые предназначались для передачи только аналоговых сигналов, но и значительного повышения спектральной эффективности систем, которые работают на частотах выше 10 ГГц, в том числе и в тех системах, которые находятся в стадии разработки.

Решение МИТРИС-МЮИ для создания телекоммуникационной сети - это передовое высокоэффективное решение, способное вывести качественные надежные телекоммуникационные услуги на массовый рынок и отвечающее высоким требованиям ресурсосбережения и экологической безопасности.

Литература

1. *Згуровский М.З., Ильченко М.Е., Кравчук С.А. и др.* Микроволновые устройства телекоммуникационных систем; в 2-х томах. – Том 2. Устройства передающего и приемного трактов. Проектирование устройств и реализация систем. – К.: ИВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. – 616 с.
2. *Нарытник Т.Н., Бабак В.П., Ильченко М.Е., Кравчук С.А.* Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах. К.: «Техника», 2000г. – 131 с.
3. *Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Омелянюк И.В., Пивнюк А.В., Рогожин М.В.* Проблемы и перспективы построения наземных эфирных сетей цифрового телевидения в Украине.// Матер. XVII Международной Крымской конференции КрыМиКо-2007 "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2006. – Севастополь: 2007. – том 1. – с. 3–8.
4. *Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Войтенко А.Г. и др.* Система передачи многопрограммного телевизионного потока и цифрового потока данных по каналам аналоговых радиорелейных линий. // «Электросвязь». – 2008. – № 3.
5. *K. Anwar, A.U. Priantoro, T. Mara, M. Okava, H. Yamamoto, and K. Ando (Japan).* Digital Terrestrial Transmission over OFDM/FM using Satellite Communication System. From Proceeding (433) Communication. Internet, and Information Technology – 2004.
6. (WO/2005/076488) Frequency Modulated OFDM over various Communication Media (<http://www.wipo.int>).
7. *Ксензенко П.Я., Химич П.В.* МИТРИС: «Телемир», 2007. – №4. – С. 30–33.