

УДК 621.396

В.М. ИЛЮШКО¹, В.Я. КАЗИМИРЕНКО², Т.Н. НАРЫТНИК³¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*³ *СП «Институт электроники и связи Украинской академии наук»*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВИЗИРОВАННЫХ АНАЛОГОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОГО ПОТОКА КОМБИНИРОВАННОЙ МОДУЛЯЦИИ

Увеличение объема передаваемой по магистральным направлениям цифровой информации, высокая стоимость развертывания линий передачи цифровой информации на базе современных цифровых технологий – SDH, PDH, линий ВОЛС сделало актуальным использование для передачи цифровых потоков развернутые аналоговые радиорелейные линии (РРЛ). В статье приводится анализ эффективности РРЛ использующих модуляцию потока символов 64QAM и использующих аппаратуру, мачты, антенны радиорелейных станций и линий, развернутых ранее для передачи информации в аналоговом формате.

Ключевые слова: Радиорелейная линия, радиорелейная станция, частотная модуляция, 64QAM, битовая ошибка, длина пролета, DVB-C, DVB-T.

Введение

Возникшая настоятельная необходимость передачи большого числа дополнительных телевизионных программ и цифровых потоков данных, в том числе по радиорелейным линиям (РРЛ), определила необходимость жесткой экономии частотного ресурса при необходимости освобождения полосы радиочастот 3400 – 3600 МГц от использования ее радиорелейными линиями.

Стоимость разворачивания РРЛ современных технологий (SDH, PDH) часто оказывается слишком высокой. Использование технологий ВОЛС эффективно и целесообразно сегодня на магистральных направлениях. На местных и оконечных (особенно в сельских и пригородных районах) она оказывается слишком дорогой и, следовательно, экономически неэффективной.

Поэтому сегодня встала проблема использования имеющейся сети аналоговых РРЛ для передачи информации в цифровом формате.

Вопросам цифровизации линий на основе аналоговых радиорелейных станций (РРС) посвящено ряд публикаций и технических решений [1 – 6], в частности, патентами [5, 6] предлагаются технические решения, позволяющие использовать практически все оборудование аналоговой РРС, до которого добавляется формирователь промодулированного цифрового потока с последующей частотной модуляцией (ЧМ) в передающем тракте и частотной демодуляцией в приемном тракте средствами аналоговой РРС.

Постановка задачи

В работе исследовалась техническая эффективность системы с комбинированной (двойной модуляцией) согласно [5, 6], обеспечивающая максимум экономической эффективности.

Экономическая эффективность максимальна, если использовать существующие мачты, аппаратуру РРЛ. Технические решения, предлагающие пути решения такой задачи представлены в [5, 6]. Повышение эффективности (спектральной, в первую очередь) повысит и экономическую эффективность.

Для повышения спектральной эффективности канала связи целесообразно использовать многопозиционную, например, амплитудно-фазовую (QAM) модуляцию. Ее использование решает задачу повышения спектральной эффективности за счет снижения символьной скорости при равных битовых скоростях. Это позволяет использовать штатное оборудование радиорелейных станций для реализации частотной модуляции символов. Таким образом, по каналу передается ЧМ сигнал, который использует ограничение уровня для подавления паразитной амплитудной модуляции, как у обычной аналоговой радиорелейной линии при передаче ЧМ сигнала.

В работе проводилось исследование эффективности применения комбинированной (двойной) модуляции в условиях реального применения радиорелейных линий (РРЛ).

Анализ проводился на основе алгоритмической модели, передающая часть канала связи которой показана на рис. 1. Стрелка 8 показывает точку ре-

зультату впливу искаження сигналу за рахунок характеристик передаючого тракту ЧМ.

На рис. 2 показана алгоритмічна схема приймної сторони каналу зв'язу.

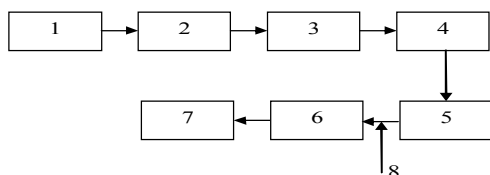


Рис. 1. Алгоритмічна схема передаючого тракту: 1 – джерело інформації (контенту); 2 – апаратура оцифровки контенту та формування потоку SDI, апаратура стиснення мультиплексування та формування загального транспортного потоку (наприклад, ASI); 3 – модулятор за стандартом DVB – C; 4 – перетворювач частоти сигналу; 5 – частотний модулятор; 6 – вихідний лінійний тракт; 7 – антена; 8 – викривлення сигналу при ЧМ

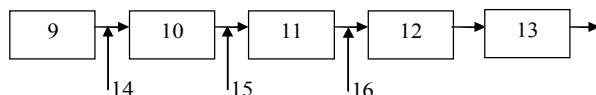


Рис. 2. Алгоритмічна схема приймного тракту: 9 – антена; 10 – приймний лінійний тракт; 11 – демодулятор ЧМ; 12 – цифровий демодулятор; 13 – декодер; 14 – викривляючі фактори на вході лінійного тракту прийомопередатчика; 15 – викривляючі фактори на вході демодулятора ЧМ, які визначають відношення сигнал/шум (реальне в каналі та вимагане для якісного прийому); 16 – викривляючі фактори на вході цифрового демодулятора, які визначають відношення сигнал/шум (реальне в каналі та необхідне для якісного прийому)

Задачею дослідження являлось визначення помехостійкості оцифрованого каналу зв'язу, реалізованого на РРЛ з використанням існуючого мачтового обладнання. При цьому довжина прольоту повинна бути не менше довжини в аналоговій РРЛ, базуючійся на станціях типу «Курс». Потрібно також визначити параметри формувача цифрового потоку, що забезпечують прийнятне якість передачі економічною ефективністю.

Аналіз проводився за наведеною вище алгоритмічною моделлю.

Здесь считалось, что формовщик потока (узлы 2 и 3 алгоритмической модели) выполнены в соответствии со стандартом [7] и искажения, вносимые формовщиком, не превышают требования стандарта. Параметры узлов линейного тракта (узел 4) соответствуют вносимым искажениям на нулевом уровне энергетических потерь [8]. Таким образом, в передающем тракте ожидаемыми источниками мешающих воздействий являются частотный модуля-

тор и тракт 6, соответствующий требованиям, предъявляемым к передаче аналогового частотно модулированного сигнала.

На приемной стороне источником искажений также могут быть штатные узлы линейного тракта и демодулятор ЧМ (ЧМД).

Известно, что повышение индекса модуляции ЧМ приводит к расширению полосы частот, занимаемой частотно модулированным сигналом, и к снижению отношения сигнал/шум на выходе ЧМД.

Для приближенной оценки ширины полосы пропускания ВЧ-тракта при передаче по радиорелейной системе передачи (РРС) используют формулу Карсона [9]

$$\Delta F = 2(\Delta f_{\text{пик}(0,1\%)} + F_{\text{вгр}}) = 2F_{\text{вгр}}(1 + m_{\text{пик}(0,1\%)}),$$

где $F_{\text{вгр}}$ – верхняя частота группового сигнала (приближенно может определяться как $F_{\text{вгр}} = 4\text{кГц} \cdot N$);

$$m_{\text{пик}(0,1\%)} = \Delta f_{\text{пик}(0,1\%)} / F_{\text{вгр}};$$

$m_{\text{пик}(0,1\%)}$ – квазипиковый индекс модуляции, зависящий от квазипиковой мощности $P_{\text{пик}(0,1\%)}$, превышаемой в течение 0,1% времени.

В нашем случае полоса пропускания тракта промежуточной частоты $\Delta F_{\text{ЧМ}}$ определится следующим соотношением:

$$\Delta F_{\text{ЧМ}} \approx 1,1(2\Delta f_D + 2F_{\text{max}}) \approx 27 \text{ МГц},$$

где Δf_D – предельно допустимая девиация промежуточной частоты, $F_{\text{max}} \approx 8,5 \text{ МГц}$ – максимальное значение частоты группового сигнала ТВ ствола.

Отношение сигнал/шум на выходе ЧМД будет зависеть общеизвестным образом от отношения сигнал/шум на его входе и от индекса модуляции.

Так, для ЧМ телевизионных сигналов отношение сигнал/шум (S/N) на выходе демодулятора может быть вычислено следующим образом:

$$S/N = C/N + 10 \log [3(f_{(p-p)} / f_v)^2] + 10 \log (b / 2f_v) + k_w, \text{ дБ},$$

где S/N – размах сигнала яркости по отношению к эффективному значению взвешенного шума, дБ;

C/N – отношение несущая / шум, дБ;

$f_{(p-p)}$ – размах девиации видеосигнала с учетом синхрипульсов, Гц;

f_v – верхняя частота модуляции видеосигнала, Гц (конкретные параметры используемых аналоговых систем цветного телевидения, включающие коэффициент взвешивающего фильтра шумов (шумы треугольной формы) приведены в таблице ниже);

b – полоса частот радиоканала (обычно принимаемая равной $F_{(p-p)} + 2f_v$), Гц;

k_w – коэффициент, обусловленный линейными предискажениями и взвешивающим фильтром в системах ЧМ, дБ.

Передающий и приемный тракты, указанные в алгоритмической модели соединяются эфирным

радиоканалом при распространении, по которому радиосигнал подвергается воздействию ряда факторов: увеличение потерь на трассе распространения на величину в зависимости от длины трассы, ситуации на трассе, в сигнал добавляется тепловой шум различного происхождения, чем уменьшается отношение сигнал/шум на входе приемника; подвергается воздействию фиксированной сигналоподобной помехи и прочим.

Сигнал на входе цифрового демодулятора будет подвержен искажениям, вызванным всеми мешающими факторами – МФ, действующими в канале связи. Степень искажения сигнала определяет помехоустойчивость и помехозащищенность канала связи. Оценка влияния искажения различными факторами при различных видах цифровой модуляции в канале связи по критерию потерь энергии приведена, в частности, в [8]. При этом следует учесть, что в канале связи цифровой сигнал подвергается частотной модуляции, которая с одной стороны сглаживает влияние МФ, а, с другой стороны, ее наличие само является источником МФ.

Так наличие ЧМ, ограничения уровня на входе приводят к уменьшению искажений за счет влияния фиксированной помехи, фазового джиттера и некоторых других. Но ряд факторов не нормируется в канале с ЧМ (или степень нормирования не соответствует требованиям к каналу с определенным видом модуляции).

Целью анализа было определение величины отношения сигнал/шум на входе цифрового демодулятора 12. Было получено выражение, позволяющее оценить величину отношения сигнал/помеха на входе цифрового демодулятора при воздействии в канале передачи гармонического сигнала и узкополосного Гауссова шума на частотный детектор

$$(C/P)_{\text{вых}} = 3(\omega_d / \Omega_{\text{max}})^2 (C/P)_{\text{вх}},$$

где $\omega_d / \Omega_{\text{max}} = m$ – индекс угловой модуляции, $(C/P)_{\text{вх}}$ и $(C/P)_{\text{вых}}$ – отношение сигнал/помеха на входе и выходе, соответственно.

При индексе угловой модуляции, используемом в РРС (в частности «Курс»), при ожидаемом воздействии в канале связи Гауссова шума и гармонической помехи отношение сигнал/помеха на выходе демодулятора ЧМ (или на входе демодулятора цифрового потока) будет превышать значение такого отношения на входе демодулятора ЧМ на величину около 5дБ. То есть, в идеальных условиях в канале связи помехоустойчивость канала с двойной модуляцией будет (в качестве внутренней модуляции используется 64-QAM и стандарт DVB-C) практически равна каналу передачи информации в аналоговом формате с ЧМ и даже иметь некоторый выигрыш. Это позволяет использовать существующие мачты,

антенные системы, созданную инфраструктуру, обеспечивая резервирование, контроль качества и т.п. средствами наличных аналоговых линий связи.

Этим максимально удешевляется прокладка цифровых каналов связи.

Использование алгоритма, базирующегося на такой модели, позволил получить следующие результаты:

Показано, что при использовании комбинированной модуляции в канале связи действуют как помехи, влияние которых достаточно точно предсказуемо, так и факторы, нерегламентированные в аппаратуре передачи информации в аналоговом формате. Так, например, фазовый джиттер не регламентируется при передаче контента в аналоговом формате. Некоторые параметры не удовлетворяют требованиям при передаче цифрового потока. Например, нестабильность частоты при передаче аналогового телевидения нормируется на уровне 10^{-5} , а при передаче потока КАМ-64 требуется 10^{-6} .

Уровень нерегламентированных факторов, во-первых, не известен точно, а во-вторых, он может изменяться в процессе эксплуатации, в том числе за счет износа оборудования, поскольку не контролируется и не поддерживается в процессе технической эксплуатации.

В принципе воздействие таких помех на частотно модулированный сигнал, вносит в него искажения, которые не приводят существенному (заметному) ухудшению качества аналогового телевизионного контента. Однако, искажения в ЧМ сигнале могут приводить к искажениям символов, полученных в результате цифровой модуляции, которые могут привести к недопустимым ошибкам после цифровой демодуляции, требующих специальных процедур для восстановления качества.

Рассматривался вариант использования модуляции 16QAM и 64QAM.

Анализ влияния регламентированных факторов на канал связи в случае использования комбинированной модуляции (DVB-C-ЧМ) в условиях Гауссовой модели канала при выполнении комплекса процедур, связанных с обеспечением значений подавления фиксированных и прочих помех при использовании первичной модуляции 16QAM приводит к выигрышу в требуемом отношении мощности сигнала к мощности шума на входе приемного устройства и создает запас помехоустойчивости приблизительно на 8...9 дБ по сравнению с передачей аналогового сигнала. При этом снижается значение пикфактора. Т. е., обеспечивается достаточная помехоустойчивость на пролете радиорелейной линии, которая практически равна помехоустойчивости аналогового канала связи при минимуме мешающих факторов. При использовании модуляции 64QAM величина

запаса снижается до 2...3 дБ. Хотя использование данной модуляции в принципе позволяет организовать передачу по многопролетной РРЛ, однако, из-за малого запаса даже при условиях, близких к идеальным, воздействие ряда мешающих факторов может привести к условиям неприемлемым для качественной передачи. В число таких факторов, влияние которых может ухудшить качество передачи, входят нерегламентированные факторы, могущие изменить картину, по крайней мере, на нескольких интервалах РРЛ и при воздействии ряда помех (рефракционного или интерференционного типа).

Как говорилось выше, степень влияния нерегламентированных помех существенно зависит от вида (позиционности) модуляции, реальной обстановки на трассе.

В процессе исследований рассмотрено сравнение характеристик передачи каналов DVB-C и DVB-T, поскольку по каналу DVB-T, использующего модуляцию COFDM в принципе возможна передача телевизионного контента, транспортного потока. При этом возможна качественная передача в условиях воздействия отраженных (эхо) сигналов.

Рассматривалась зависимость скорости передачи информационного потока (bit rate) в полосе 8 МГц и модуляций поднесущих 64 - QAM от скорости кодирования при разных значениях защитного интервала в стандарте DVB-T и в стандарте DVB-C (модуляция 64 - QAM, код Рида Соломона 188, 204, 16).

Сравнение пропускной способности каналов DVB - C и DVB - T

Результат показан на рис. 3. Здесь по оси ординат отложено значение пропускной способности в Мбит/с, по оси абсцисс – значения кодовой скорости, четыре кривых приведенные для разных защитных интервалов в стандарте DVB-T. Сдвоенной прямой показана пропускная способность канала в стандарте DVB-C

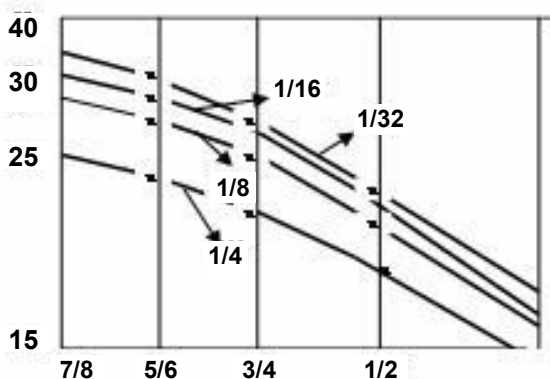


Рис. 3. Зависимость пропускной способности канала связи от конфигурации формирователя цифрового потока – стандарты DVB-C и DVB - T

Сравнение помехоустойчивости каналов DVB-C и DVB-T

Зависимость помехозащищенности при модуляции поднесущих 64 - QAM от скорости кодирования при разных значениях защитного интервала в стандарте DVB-T и в стандарте DVB-C (модуляция 64 - QAM, код Рида Соломона 188, 204, 16) показана на рис. 4.

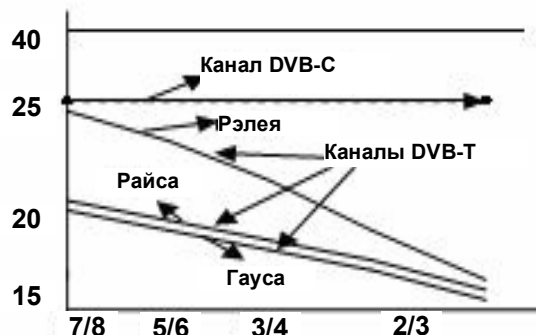


Рис. 4. Зависимость помехоустойчивости в разных моделях канала DVB-T и DVB-C

По оси ординат отложено отношение С/Ш в дБ, по оси абсцисс - скорость внутреннего кодирования для DVB-T; сдвоенная прямая - канал DVB-C. График отображает отношение С/Ш на входе демодулятора: для канала DVB-C при котором на цифровом выходе будет квазибезошибочная последовательность ($BER = 10^{-12}$); для канала DVB-T на выходе декодера Витерби $BER=2 \times 10^{-4}$.

Из приведенной информации видно:

- спектральная эффективность канала DVB-T значительно ниже спектральной эффективности канала DVB-C в первую очередь за счет защитных интервалов и избыточности кодирования (разница больше чем на 10дБ)

- энергетическая эффективность канала DVB-T несколько выше, чем DVB-C за счет использования каскадного кодирования. В частности, в конфигурации с минимальной разницей спектральной эффективности (около 10 дБ) разница в энергетической эффективности складывается около 1дБ.

Анализ и определение схемы формирователя потока с комбинированной модуляцией

Как показано, например, в [7] минимальное расстояние между констелляционными символами в энергетическом пространстве для QAM модуляции составит величину $A\sqrt{E}$, где значение А зависит от вида (позиционности) модуляции, Е - энергия на бит.

То есть, уменьшение расстояния за счет влияния мешающих (искажающих) факторов (МФ) может быть скомпенсировано повышением Е. Степень такого повышения собственно и является потерями энергии. Этот параметр зависит от уровня МФ,

его вида, типа модуляції сигналу, аналізованої величини BER і проч.

Як указувалося в [7], деякі спотворення не можуть бути компенсовані збільшенням енергетики, і вони повинні бути виключені на стадії проектування, наприклад, нелінійні спотворення, або урахувані як шумові втрати, зменшуючи запас по енергетиці, але повинні враховуватися при оцінці помехоустійливості каналу зв'язу і реалізовуватися, як показано, наприклад, в [7].

На базі аналізу досліджень були отримані залежності втрат енергетики для факторів і виду модуляції різного типу. Оцінка велася для рівня BER на вході декодера (виході демодулятора) рівного 10^{-3} , що дозволяє використовувати ці результати для різних протоколів передачі.

Базуючись на наведених вище результатах, робимо висновок, що помехозахищеність каналу зв'язу визначається рівнем шуму (відношенням рівня сигналу до рівню шуму) на вході цифрового демодулятора.

Такий параметр визначається рівнем сигналу на вході прийомного тракту, тобто енергопотенціалом каналу зв'язу (потужністю передатника, коефіцієнтом посилення передаючої і прийомної антен), згасанням сигналу на трасі поширення, рівнем шуму на вході демодулятора. Рівень і характер шуму залежить від шумової обстановки на трасі, втрат у входному прийомному тракті, спотворенням сигналу через неідеальність параметрів передатного і прийомного обладнання.

Параметри шумової обстановки на трасі визначаються при розгортанні лінії, втрати у входних трактах прийомопередатника визначаються якістю обладнання РРЛ. Характеристики модуляційного тракту визначаються використовуваним стандартом.

Як видно з алгоритмічної схеми, на якість передачі впливають як зовнішні, так і внутрішні апаратні шуми. При передачі цифрової інформації з використанням трактів передачі аналогової лінії зв'язу, ряд параметрів такого тракту може відповідати вимогам цифрової передачі, не відповідати, або бути не регламентованими.

На спотворення сигналу впливають нерегламентовані характеристики РРС, з яких згадувалося вище.

Визначення впливу нерегламентованих факторів обладнання РРЛ

Нехай в результаті визначення шумової обстановки встановлено:

На вході прийомного тракту діє сигналподібний шум в смузі сигналу, придушений на 30 дБ. При коефіцієнті модуляції, рівному 0,11 відношення С/П на вході цифрового демодулятора складе

величину на 15 дБ менше, ніж на вході аналогового демодулятора ЧМ. При використанні модуляції 64-QAM на вході цього демодулятора слід мати відношення С/П на рівні близько 30 дБ, тобто на вході демодулятора ЧМ не менше 45...50 дБ.

Наявність складної шумової ситуації суттєво може зменшити запас помехозахищеності при побудові ретрансляційних ліній великої довжини за рахунок накоплення перешкоджень (гауссових, фіксованих і інших).

Вплив нерегламентованих, перешкоджаючих факторів і невідповідність їх параметрів вимогам цифрової передачі також може значно зменшити застосовність такої технології.

Показані в даній частині основні вимоги до тракту передатників і прийомопередатників цифрового ТВ контенту (які в даній ситуації базуються на обладнанні аналогової передачі) часто або не відповідають вимогам, які пред'являються до апаратури цифрової передачі, або не регламентовані в даній конструкції, а, значить, не гарантовані. Тому передбачене планування можна виконати з використанням розрахунку запасу енергетики. Запас енергетики каналу зв'язу визначається як різниця рівня сигналу на вході прийомопередатника в умовах відсутності перешкоджаючих факторів і втрат енергетики з впливу МФ, як показано в [7].

Оскільки зміна рівня Е не тільки змінює евклідове відстань між символами, але і відношення С/Ш, яке може бути реалізовано на вході демодулятора, то виникає можливість визначити відповідність помехоустійливості каналу зв'язу вимогам.

Накопичення спотворень по трасі розраховуються за відомими методиками, і це дозволяє визначити довжину прольотів, кількість прольотів після якого слід виконати оновлення (регенерацію) цифрового потоку, яке зазвичай виконується отриманням вихідної послідовності з подальшою її повторною модуляцією. Коли передбачається використання наявної інфраструктури, то виконується перевірка якості передачі на наявних мачтах і трактах.

Вклад обладнання РРЛ в спотворення сигналу слід виміряти на кожному інтервалі (наприклад, за запропонованою вище методикою).

Попередній оцінювальний критерій до нерегламентованим факторам може бути наступним:

- *нестабільність частоти несучої.*

Як показано вище, невідповідність складає: для аналогового ТВ -500Гц, для цифрового - 100Гц. Допустима помилка оцінки фази коливання (64-QAM, ймовірність помилки - 10^{-6}) для реалізації втрат енергетики 0,5дБ не повинна перевищувати 1°.

Определить величину искажений целесообразно экспериментальным методом.

- *джиттер несущей.*

В РРС не нормируется и для 64 - QAM по критерию "отношения сигнал/эквивалентен гауссов шум" должен складываться на уровне энергетических потерь не меньше 40дБ. Здесь под понятием "эквивалентный гауссов шум" имеется в виду аддитивное энергетическое влияние эквивалентное объединенному влиянию всех причин, которые вызывают джиттер несущей.

Значение джиттера и его влияние на величину искажения символов в канале РРЛ из ЧМ также целесообразно определять экспериментальным методом.

Следует иметь в виду, что некоторые параметры, регламентированные в аналоговой РРЛ, не соответствуют требуемым при передаче цифрового потока. Так, например, нестабильность частоты при передаче телевизионного сигнала в аналоговом формате нормировано по уровню 10^{-5} . Для потока QAM-64 требуется не более 10^{-6} .

Рассчитанное значение помехоустойчивости по стандартному способу, изложенному выше, допускало качественную передачу на расстоянии, равном 6 пролетам. Эксперимент, проведенный на 6 пролетах, показал удовлетворительный результат при наличии на одном из пролетов замираний не более 40 дБ. При увеличении замираний до 42 дБ качество передачи становилось неудовлетворительным. Для учета влияния нерегламентированных и не полностью соответствующих факторов следует определить их влияние на вносимые ими искажения передаваемого сигнала.

Была разработана методика измерения степени влияния указанных факторов на качество передачи по линии связи.

Для исключения влияния факторов на трассе распространения указанная методика основывалась на измерении в условиях Гауссова канала в лабораторных условиях (трасса распространения имитируется волноводным трактом, в который включается аттенюатор для создания потерь, в соответствии с потерями на трассе).

Качество передачи рассчитывается и измеряется по условию одинаковой длины линии связи. Определяется разница между вычисленным и измеренным значениями помехоустойчивости

$$[(P_c/P_{ш})_{\text{вычисл}}]_{\text{дБ}} - [(P_c/P_{ш})_{\text{измер}}]_{\text{дБ}}$$

Полученная разница показывает эквивалентные шумовые потери за счет нерегламентированных и не соответствующих для передачи цифрового потока факторов.

Полученное значение используется для определения параметров передачи, необходимых для решения поставленной задачи.

Выводы

Цифровизация аналоговой РРС с использованием комбинированной модуляции (в качестве первичной – цифровая DVB-C, а в качестве вторичной – аналоговая частотная ЧМ) предоставляет следующие преимущества:

- передается большее число информации в одинаковом частотном ресурсе (повышается спектральная и информационная эффективность) по сравнению с каналом, использующим только ЧМ (канал передачи в аналоговом формате);
- используются аппаратура и наличные средства аналоговых РРС (управление, резервирование и пр.);
- используются имеющееся мачтовое оборудование;
- снижается пикфактор сигнала, а, значит, и стоимость передающих трактов;
- сохраняется существующая сеть РРЛ.

Вместе с тем, при цифровизации аналоговых РРЛ в соответствии с разработанной авторами методологией следует учитывать следующие особенности:

- характеристики трактов РРЛ не полностью соответствуют передаче цифрового потока, что порождает нерегламентированные и несоответствующие требованиям мешающие факторы, что может ограничить число пролетов с требуемым показателем готовности. Это может потребовать снижения порядка модуляции (например, QAM-16 вместо QAM-64);
- занимаемый частотный ресурс существенно превышает требуемый для передачи потока с однослойной (цифровой) модуляцией;
- оборудование РРС должно быть испытано на предмет оценки влияния внутристанционных факторов.

Использование комбинированной модуляции (в качестве первичной – цифровая модуляция COFDM) позволяет осуществлять передачу в условиях воздействия отраженных сигналов, но при этом теряется до четверти пропускной способности. При использовании стандарта DVB-T пропускная способность уменьшается еще сильнее за счет избыточности внутреннего кодирования.

Поэтому использование модуляции COFDM в качестве первичной (внутренней) целесообразно при необходимости передачи небольшого объема информации в условиях воздействия отраженных сигналов (например, при связи морское судно – береговая станция и т.п.). Число пролетов должно быть минимальным из соображения максимального использования частотного ресурса на всех пролетах.

Литература

1. Система передачи многопрограммного телевизионного потока и цифрового потока данных по каналам аналоговых радиорелейных линий [Текст] /

М.Е. Ильченко, Т.Н. Нарытник, А.Г. Войтенко [и др.] // *Электросвязь*. – 2008. – № 3. – С. 10–14.

2. Ильченко, М.Е. Использование метода комбинированной модуляции в микроволновых телекоммуникационных системах передачи данных [Текст] / М.Е. Ильченко, Т.Н. Нарытник, В.М. Илюшко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 2 (36). – С. 71–77.

3. Нарытник, Т.Н. Система передачи многопрограммного телевизионного потока и цифрового потока данных Еврика–ВВВ по каналам аналоговых радиорелейных линий [Текст] / Т.Н. Нарытник, А.Г. Войтенко, В.В. Мироненко // *Матер. XVII Межд. Крымской конференции КрыМиКо–2007 "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*. – Севастополь, 2007. – Т.1. – С. 296–299.

4. Ильченко, М.Е. Особенности модернизации радиорелейных линий в Украине [Текст] / М.Е. Ильченко, В.Я. Казимиренко, Т.Н. Нарытник // *Матер. 19 Межд. Крымской конференции КрыМиКо–2009 "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*. – Севастополь, 2009. – Т.1. – С. 206–209.

5. Пат. 26838 Україна, МПК HD4J 3/00. Система передачи данных по аналоговой радиорелейной линии „Еврика–ВВВ” [Текст] / Ильченко М.Ю. Нарытник Т.М., Казимиренко В.Я., Войтенко О.Г., Волков В.В., Юрченко В.В.; Заявник і патентовласник НТУ України «КПІ». – №и200705423; заявл. 17.05.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. №16. – 6 с.

6. Пат. 11635 Україна, МПК HD4J 3/00 A62B 17/00. Система передачи багатопрограмного транспортного потока по каналах аналогової радіорелейної лінії Еврика–КАМ ЧМ [Текст] / Нарытник Т.М., Казимиренко В.Я., Войтенко О.Г., Сватъев В.І.; Заявник і патентовласник СП «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук. – №и200502645; заявл. 23.03.2005; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 6 с.

7. European Standard EN 300 429 v.1.2.1 (1998–04). Digital Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems [Текст].

8. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації [Текст]: навч. посібник / В.П. Бабак, Т.М. Нарытник, Ю.В. Куц, В.Я. Казимиренко. – К: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 476 с.

9. Скалин, Ю.В. Цифровые системы передачи [Текст]: учебник для техникумов / Ю.В. Скалин, А.Г. Бернштейн, А.Д. Финкевич. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

Поступила в редакцію 28.02.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрой «Приём, передача и обработка сигналов», А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВІЗОВАНИХ АНАЛОГОВИХ РАДІОРЕЛЕЙНИХ СТАНЦІЙ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВОГО ПОТОКУ КОМБІНОВАНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

В.М. Ілюшко, В.Я. Казимиренко, Т.М. Нарытник

Збільшення об'єму передаваної по магістральних напрямках цифрової інформації, висока вартість розгортання ліній передачі цифрової інформації на базі сучасних цифрових технологій - SDH, PDH ліній ВОЛСс зробило актуальним використання для передачі цифрових потоків розгорнуті аналогові радіорелейні лінії (РРЛ). у статті наводиться аналіз ефективності РРЛ що використовують модуляцію потоку символів 64QAM і що використовують апаратуру, щогли антени радіорелейних станцій і ліній, розгорнутих раніше для передачі інформації в аналоговому форматі.

Ключові слова: радіорелейна лінія, радіорелейна станція, частотна модуляція, 64QAM, бітова помилка, довжина прольоту, DVB-C, DVB-T.

AN ANALYSIS OF EFFICIENCY ANALOG RADIO LINES IS ON TECHNOLOGY OF THE USE FOR TRANSMISSION OF DIGITAL STREAM OF THE COMBINED MODULATION

V.M. Ilushko, V.J. Kazimirenko, T.M. Naritnik

Increase of volume of transferrable on main directions digital information, high cost developments of opening out of digital information on the base of modern digital technologies - SDH, PDH, lines of fol did actual the use for the transmission of digital streams the unfolded analog lines. In the article an analysis over of efficiency of line is brought using modulation of stream of symbols 64QAM and using an apparatus, masts, aerials of the stations and lines, unfolded before for an information transfer in an analog format.

Key words: radio line, station, frequency modulation, 64QAM, bit error, length of flight, DVB-C, DVB-T.

Ілюшко Віктор Михайлович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Казимиренко Валерий Яковлевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина, e-mail: vkazim2@gmail.com.

Нарытник Теодор Николаевич – канд. техн. наук, директор Института электроники и связи Украинской академии наук, Украина e-mail: director@mitris.com.