

Системы телекоммуникации, связи и защиты информации

УДК 621.372.8

Увеличение пропускной способности оптического канала волоконно-оптической системы передачи

В.А. Брескин, канд. техн. наук, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
ул. Кузнечная 1, Одесса 65023, Украина.

В статье рассмотрены пути увеличения пропускной способности оптического канала существующих ВОСП путём замены передающих и приёмных оптических модулей, использующих АМ-2 на АФМ и КАМ. Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: дисперсионные искажения, переоборудование, корректирующее кодирование, длина регенерационного участка, многопозиционное кодирование, запас по защищённости.

Введение

Непрерывный, экспоненциальный рост трафика [5] требует увеличения пропускной способности существующих линий передачи. В ВОСП эта задача решалась вначале путем перехода от цифровых систем передачи плезиохронной иерархии ЦСП - PDH к цифровым системам синхронной иерархии ЦСП - SDH, а в дальнейшем путём перехода от одноканальных систем передачи (ЦСП - SDH) к многоканальным системам со спектральным разделением ВОСП - СПК (WDM).

Увеличение пропускной способности линий передачи можно решать двумя путями [6]:

- путём реконструкции существующих линий передачи, т.е. строительством новых линий, использующих новые оптические кабели
- путём переоборудования существующих линий, при котором продолжают использоваться уже проложенные ранее кабели, а устаревшее станционное оборудование заменяется на новое.

Ясно, что для операторов, которые имеют и уже эксплуатируют оптические сети связи, второе направление (переоборудование) является экономически более выгодным, так как использует ранее вложенные инвестиции.

Увеличение пропускной способности существующих линий передачи, оборудованных ВОСП - WDM можно осуществить путём расши-

рения используемого частотного диапазона и увеличения скорости передачи цифровых потоков в оптических каналах существующей ВОСП - WDM.

Целью статьи является сравнительная оценка эффективности замены используемого в ВОСП метода двухуровневой амплитудной модуляции на эффективные методы модуляции, в сочетании с многопозиционной передачей и корректирующим кодированием, для увеличения пропускной способности оптических каналов ВОСП.

Основная часть

Непосредственное увеличение скорости передачи в волоконно-оптическом канале ограничивается дисперсионными искажениями.

Известно, что длина участка регенерации ВОСП определяется потерями в оптическом волокне (ОВ) $I_{p,\alpha}$ и дисперсионными искажениями $I_{p,\sigma}$.

$$I_{p,\alpha} = \frac{\text{ЭП} - 2A_{pc} - A_{\text{ЭЗ}}}{\alpha + \frac{A_{nc}}{l_{\text{стр}}}}. \quad (1)$$

Здесь α - коэффициент затухания оптического волокна (ОВ), $l_{\text{стр}}$ - строительная длина кабеля; A_{pc} и A_{nc} - соответственно затухания вносимые разъёмным и неразъёмными соединениями; $A_{\text{ЭЗ}}$ - эксплуатационный запас на изменение затуханий вносимых средой (ОВ), передающим (ПОМ) и приёмным (ПРОМ) модулями ($A_{\text{ЭЗ}} \approx 3 - 6$ дБ); ЭП - энергетический потенциал, который определяется разностью оптических уровней передачи и чувствительности ПРОМ.

Длина регенерационного участка, ограниченная дисперсией ОВ определяется величиной относительной дисперсии z

$$z = \frac{\sigma}{T_T} = \sigma \cdot B. \quad (2)$$

Здесь T_T - длительность тактового интервала, σ - дисперсия,

$$\frac{1}{T_T} = f_T = B, \quad (3)$$

а f_T и B - соответственно тактовая частота и скорость передачи цифрового потока.

Абсолютная величина дисперсии σ равна

$$\sigma = \sigma_{01} \Delta_\lambda l_{p,\sigma}, \quad (4)$$

где σ_{01} - удельная дисперсия волокна с/нм·км; Δ_λ - ширина линии излучения нм.

Подставляя (3) и (4) в (2) получаем

$$l_{p,\sigma} = \frac{z}{\sigma_{01} \cdot \Delta_\lambda \cdot B}. \quad (5)$$

В процессе проектирования фактическая длина участка регенерации определяется, как меньшая из этих двух длин:

$$l_p = \min(l_{p,\alpha}, l_{p,\sigma}). \quad (6)$$

Обычно, для низкоскоростных ВОСП,

$$l_{p,\alpha} < l_{p,\sigma}. \quad (7)$$

Поэтому, для таких ВОСП, фактическая длина участка регенерации l_p определяется $l_{p,\alpha}$.

Увеличение скорости передачи B уменьшает $l_{p,\sigma}$ (5), изменяя соотношение между $l_{p,\alpha}$ и $l_{p,\sigma}$ так, что может наступить неравенство

$$l_{p,\sigma} < l_{p,\alpha}. \quad (8)$$

Для переоборудования, использующего уже сложившуюся сеть, с закреплёнными длинами l_p , реализовать (8) невозможно.

Расчёты показывают, что для ОВ типа SF при использовании WDM, а значит для 3-его окна прозрачности, длина участка регенерации определяется дисперсией. Для ОВ типа DSF дисперсия, как фактор определяющий длину участка регенерации, начинает сказываться на скоростях 2,5 Гбит/с.

При проектировании ВОСП [10], значение относительной дисперсии полагают $z = 0,25$.

Известно, что величина относительной дисперсии z определяет величину межсимвольной интерференции МСИ, которая размывая глаз-диаграмму ухудшает защищённость сигнала от помех. В [2] приведены расчёты по определению связи между z , МСИ и потерей защищённости, используя Е-критерий оценки размытости

глаз-диаграммы. В [7] проведены аналогичные расчёты, использующие D-критерий, который является более пессимистической оценкой влияния величины z на МСИ и соответствующую потерю защищённости. Показано, что увеличение z вдвое с 0,25 до 0,5 ухудшает (увеличивает) допустимую защищённость всего лишь на 1 дБ, что вполне допустимо. Такое увеличение z вдвое, позволяет вдвое увеличить скорость передачи B , не уменьшая длины $l_{p,\sigma}$. Некоторое дополнительное увеличение z также возможно, если есть запас по защищённости A_{33} .

Как правило, в запас по защищённости A_{33} входят эксплуатационный запас (ΔA_{33}) и запас по защищённости за счёт разности номинальной (расчётной) и фактической длины участка регенерации (ΔA_L), т.е.

$$\Delta A_{33} = \Delta A_{ЭЗ} + \Delta A_L - \Delta A_\sigma \quad (9)$$

Важным направлением увеличения информационной скорости передачи в оптическом канале ОК без увеличения влияния дисперсионных искажений является переход к символьной передаче за счёт использования многоуровневого или многопозиционного кодирования.

В настоящее время в ВОЛС в основном используется двухуровневые коды в сочетании с амплитудной модуляцией (AM-2). Однако уже предприняты лабораторные исследования и разработки, использующие для построения ВОСП более эффективные методы модуляции [9,11,12], хорошо известные в технике электросвязи. Это многоуровневая AM (AM-M), многофазовые и многочастотные методы модуляции (ФМ-M и ЧМ-M), комбинированная амплитудно-фазовая модуляция (АФМ-M) и самый эффективный метод модуляции – квадратурная амплитудная модуляция (КАМ-M) [1].

Устройства, реализующие эти эффективные методы передачи и приёма цифрового сигнала, называют высокоскоростными модемами (ВМ).

На рис. 1 представлена упрощённая, обобщённая структурная схема передатчика ВМ. На ней также показаны точки, куда подаётся сигнал с информационной скоростью $B_{и}$, а также формируются канальная скорость $B_{к}$ и символьная скорость $B_{с}$.

Основными блоками этой схемы являются: УЗО - устройство защиты от ошибок, формирующее корректирующий код (КК), М-код - устройство многоуровневого кодирования, преобразующего канальную скорость в символьную, ФНЧ - фильтр низкой частоты, определяющий

основную полосу часто исходного импульсного сигнала, Мод - модулятор, который преобразует исходную полосу частот в требуемую.

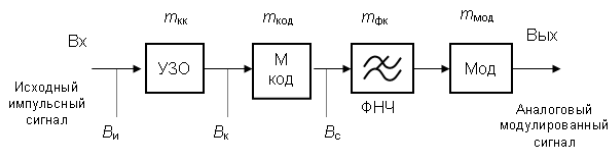


Рис. 1. Упрощённая структурная схема тракта передачи ВМ

На схеме над блоками надписаны коэффициенты, характеризующие эффективность работы этих блоков. С учётом этих коэффициентов, относительная скорость передачи ВМ равна [8]:

$$B_{и} / \Delta F = m_{кк} \cdot m_{фк} \cdot m_{код} \cdot m_{мод} \quad (10)$$

Здесь ΔF - используемая полоса частот ка-

нала; $m_{кк}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение информационной скорости передачи цифрового потока по сравнению с канальной скоростью, за счёт ввода проверочных символов устройством УЗО, $m_{кк} < 1$; $m_{фк}$ - коэффициент, показывающий относительную скорость передачи символьного сигнала в ограниченной полосе частот, $m_{фк} < 2$; $m_{мод}$ - коэффициент, учитывающий соотношение полос входного (основная полоса частот) и модулированного сигнала,

$$m_{мод} = \Delta f_0 / \Delta f_m,$$

Δf_0 - основная полоса частот символьного сигнала, Δf_m - полоса частот модулированного сигнала.

$$m_{мод} = \begin{cases} 0,5 & \text{для АМ - М} \\ 0,5 & \text{для АФМ - М} \\ < 0,5 & \text{для ФМ - М и ЧМ - М} \\ 1 & \text{для КАМ - М} \end{cases} \quad (11)$$

Видно, что методы модуляции ФМ-М и ЧМ-М нецелесообразно рассматривать для увеличения относительной скорости передачи $B_{и}/\Delta F$. Эти методы модуляции позволяют повысить помехоустойчивость, за счёт расширения используемой полосы частот. Примером такого использования ЧМ-М является работа [11], в которой за счёт расширения используемой полосы частот удаётся увеличить помехоустойчивость ВОСП и перекрыть большие расстояния.

Основной эффект увеличения информационной скорости передачи достигается за счёт многопозиционного кодирования и выбранного метода узкополосной модуляции.

$m_{код}$ - степень многопозиционного кодирования (количество бит на символ). Величина $m_{код}$ определяет количество точек сигнального созвездия M :

$$M = \begin{cases} 2^{m_{код}} & \text{для АМ - М} \\ 2^{m_{код}+1} & \text{для АФМ - М} \\ 2^{2m_{код}} & \text{для КАМ - М} \end{cases} \quad (12)$$

Увеличение $m_{мод}$ увеличивает M и при фиксированной величине сигнала уменьшает расстояние между точками сигнального созвездия, ухудшая тем самым, защищённость сигнала от помех и изменяя запас по защищённости $\Delta A_{зз}$. Это обстоятельство учитываем изменяя (9) следующим образом:

$$\Delta A_{зз} = \Delta A_{зз} + \Delta A_L + \Delta A_{кк} - \Delta A_{\sigma} - \Delta A_{мод-М} \quad (13)$$

Здесь $\Delta A_{кк}$ - выигрыш по защищённости за счёт использования корректирующего кодирования; $\Delta A_{мод-М}$ - потеря защищённости при переходе от АМ-2, которое в основном ещё используется в ВОСП, к новому методу модуляции, с количеством точек сигнального созвездия M - МОД-М. Таким образом $\Delta A_{мод-М}$ учитывает действие на потерю защищённости коэффициентов $m_{код}$ и $m_{мод}$ одновременно.

$$\Delta A_{мод-М} = A_{АМ-2} - A_{МОД-М} \quad (14)$$

Напоминаем, что проблема увеличения информационной скорости при переоборудовании может быть частично решена использованием многопозиционного кодирования, при котором осуществляется замена передачи бит по каналу, передачей символов, несущих информацию о группе, состоящей из $m_{код}$ бит.

Дисперсионные искажения ограничивают символьную скорость B_c . При многопозиционном кодировании длина $l_{p,\sigma}$ определяется B_c (в этом случае в формуле (5) $B = B_c$).

Многопозиционное кодирование позволяет увеличить информационную скорость $B_{и}$ при неизменной символьной B_c , т.е. увеличить относительную скорость $\frac{B_{и}}{B_c}$. Нас интересует оце-

нить возможное увеличение $B_{и}$ по сравнению со скоростью при АМ-2 - $B_{АМ-2}$, т.е. величину:

$$b = \frac{B_{и}}{B_{АМ-2}} \quad (15)$$

Используя (10) получаем, что

$$b = 2 \cdot m_{\text{кк}} \cdot m_{\text{код}} \cdot m_{\text{мод}} \quad (16)$$

Фиксируя пиковое значение модулированного сигнала получаем следующие зависимости потерь защищённости $\Delta A_{\text{МОД-М}}$ от относительной скорости b для разных методов модуляции:

$$\Delta A_{\text{МОД-М}} = \begin{cases} \frac{b}{20 \text{Lg}(2^{m_{\text{кк}}} - 1)} \text{ для } \text{АМ-М}, \\ \frac{b}{20 \text{Lg}(\frac{2^{m_{\text{кк}}} - 1}{2})} \text{ для } \text{АФМ-М}, \\ \frac{b}{20 \text{Lg}(\frac{2^{2m_{\text{кк}}} - 1}{\sqrt{2}})} \text{ для } \text{КАМ-М} \end{cases} \quad (17)$$

Ниже (рис. 2) приведены графики зависимостей (17) без учёта работы УЗО, т.е. для $m_{\text{кк}}=1$ и $\Delta A_{\text{КК}}=0$, которые дают численную оценку этим потерям и подтверждают тот факт, что КАМ-М является наиболее эффективным методом многопозиционного кодирования, который позволяет в два - три раза увеличить информационную скорость передачи по сравнению с символьной практически без потери защищённости.

Подстановка (17) в (13) с учётом (16) даёт уравнения (18, 19) для разных методов модуляции, решение которых, позволяет определить

зависимость относительной скорости передачи b достижимой для этих методов модуляции, от составляющих запаса по защищённости (например, ΔA_L).

Пусть в худшем случае $\Delta A_{33} = \Delta A_{\text{ЭЗ}}$; в соответствии с (3) $\Delta A_{\sigma}(z) \approx 1$ дБ; при использовании УЗО с помощью КК $\Delta A_{\text{кк}} = \Delta A_{\text{кк}}(m_{\text{кк}})$. Поэтому

$$\Delta A_{\text{МОД-М}} = \Delta A_L + \Delta A_{\text{КК}}(m_{\text{кк}}) - 1 \quad (18)$$

Выигрыш по защищённости от использования КК Ридда-Соломона связан с ЭВК [4]. Хорошие результаты по аппроксимации $\Delta A_{\text{кк}}(m_{\text{кк}})$ даёт выражение:

$$\Delta A_{\text{кк}}(m_{\text{кк}}) = \left(\frac{1 - m_{\text{кк}}}{c}\right)^d, \quad (19)$$

Для КК длиной блока $n=255$ и достоверностью $p=10^{-10}$ [3], $c=4.088 \cdot 10^{-4}$, $d=0.368$.

В соответствии с (17) относительная, по отношению к символьной, скорость определяется выражением:

$$b = \begin{cases} m_{\text{кк}} \cdot \text{Log}_2 \left(10^{\frac{\Delta A_L + \Delta A_{\text{КК}}(m_{\text{кк}}) - 1}{20}} + 1 \right) \text{ для } \text{АМ-М}, \\ m_{\text{кк}} \cdot \text{Log}_2 \left(2 \cdot 10^{\frac{\Delta A_L + \Delta A_{\text{КК}}(m_{\text{кк}}) - 1}{20}} + 1 \right) \text{ для } \text{АФМ-М}, \\ 2m_{\text{кк}} \cdot \text{Log}_2 \left(\sqrt{2} \cdot 10^{\frac{\Delta A_L + \Delta A_{\text{КК}}(m_{\text{кк}}) - 1}{20}} + 1 \right) \text{ для } \text{КАМ-М} \end{cases}$$

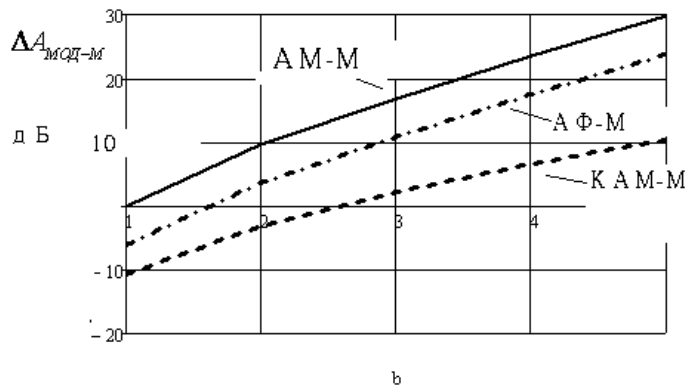


Рис. 2. Зависимость потери защищённости $\Delta A_{\text{МОД-М}}$ от относительной скорости передачи b для разных методов модуляции

Ниже (рис. 3) приведены графики этих зависимостей для $m_{\text{кк}}=1$ и $\Delta A_{\text{КК}}=0$, которые дают численную оценку достижимой величины b , если имеется запас только по длине участка регенерации, а значит и запас по соответствующей защищённости ΔA_L .

Использование АМ-М модуляции для увеличения относительной, по отношению к символьной, информационной скорости требует запаса по $\Delta A_L \approx 10$ дБ, что при коэффициенте затухания оптического волокна $\alpha \approx 0.25 - 0.5$ дБ соответствует длине $l \approx 20 - 40$ км, а значит востребованность, такого метода модуляции, будет редкой.

Эффективным методом формирования запаса по защищённости является корректирующее кодирование (КК). Коэффициент $m_{\text{КК}}$, характеризующий этот метод, по-разному влияет на величину относительной скорости b : увеличивая её за счёт увеличения защищённости $\Delta A_{\text{КК}}$ с одной стороны и уменьшая её, за счёт ввода избыточных, проверочных бит с другой стороны.

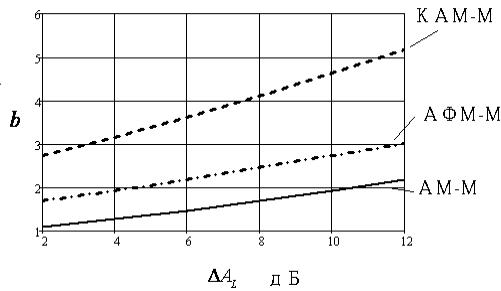


Рис. 3. Зависимость $b(\Delta A_L)$ для разных методов многопозиционной модуляции

Следствием этого двоякого влияния является появление экстремума в зависимости $b(m_{\text{КК}})$, которая приведена на рис. 5 и 6.

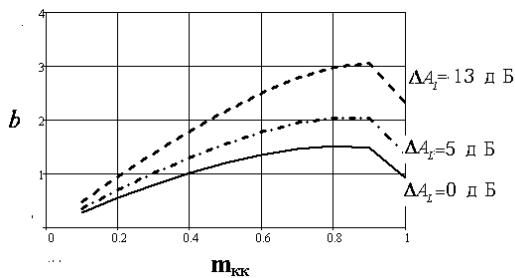


Рис. 4. Зависимость $b(m_{\text{КК}})$ для АМ-М и разных значений ΔA_L

Видно, что использование КК позволяет для увеличения относительной скорости в два раза снизить необходимый запас по защищённости с 10 дБ (рис. 3) до 5 дБ (рис. 4).

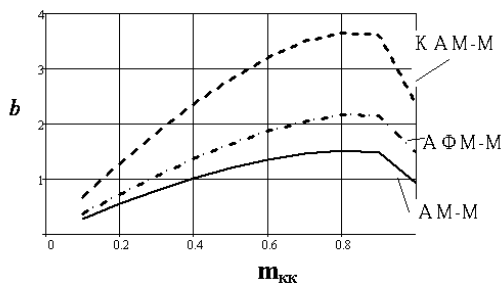


Рис. 5. Зависимость $b(m_{\text{КК}})$ для разных методов многопозиционного кодирования и модуляции при $\Delta A_L = 0$

Из графиков рис. 5 видно, что при нулевом запасе по длине ($\Delta A_L = 0$) АМ не даёт выигрыша относительной скорости передачи, АФМ позволяет получить выигрыш в два раза, КАМ в три раза. Это означает, в соответствии с (12) и (16), что эти выигрыши обеспечивают соответственно АФМ-8 и КАМ-16.

Выводы

Использование комбинированной амплитудно-фазовой модуляции АФМ-8 и квадратурной амплитудной модуляции КАМ-16., в сочетании с корректирующим кодированием Рида - Соломона, позволяет увеличить пропускную способность каналов WDM как минимум в два - три раза.

Литература

1. LI Ying-chun. Optical QPSK/16QAM modulation based on serial-parallel MZM scheme in radio-over-fiber system / Ying-chun LI, Shihuan ZOU, Lin WEI, You-mei CAI, Jia-jun YE, Ru-jian LIN // Journal of Shanghai University (English Edition). — 2011.
2. *Cunningham D.* The IEEE 802.3z Worst Case Link Model for Optical Physical Media Dependent Specification / D. Cunningham, M. Nowell, D. Hanson, L. Kazovsky // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. — 1998.
3. Forward error correction for submarine systems: ITU-T Recommendations G.975-200010-1. — [Approved in 2000-10]. — Geneva — 2001.
4. Банкет В.Л. Помехоустойчивое кодирование в волоконно-оптических системах передачи: материал технической информации / В.Л.Банкет, Ф.В. Топорков // Зв'язок. — 2006. — № 7. — С. 18-21.
5. Бирюков Н.Л. Сети последующего поколения (NGN) и широкополосная связь / Бирюков Н.Л. — Молдова, Кишинев, 04-06.05.2010. — (Региональный форум по развитию МСЭ-D для региона Европы и СНГ).
6. Брескин В. А. Замена оборудования волоконно-оптической системы передачи SDH на WDM / В. А. Брескин // Накові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова — 2007. — № 1.
7. Брескин В. А. Влияние дисперсионных искажений сигнала на длину регенерационной секции волоконно-оптических систем передачи / В. А. Брескин, А. Д. Мазур // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. — 2008. — №1. — С. 80-84.

8. *Брескін В. А.* Модерний метод модернізації ліній передачі металічного кабелю первичної мережі / В.А. Брескін // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова — 2003. — № 2.
9. *Величко М.А.* Нові формати модуляції оптичних системах зв'язі / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // Lightwave Russian Edition. — 2005. — № 4. — С. 21-30.
10. *Корнейчук В. И.* Оптичні системи передачі / В. И. Корнейчук, Т. В. Макаров, И. П. Панфилов. — К.: Техніка, 1994. — 389 с.
11. *Некучаев А.* Символьна передача даних по ВОЛС. Патент — російський, що далі? / А. Некучаев, У. Юсупалиев // Електроніка НТБ. — 2001. — № 6.
12. *Слепов Н.Н.* Сучасні технології цифрових оптичних мереж зв'язі / Слепов Н.Н. — М.: Радио і Зв'язь, 2000. — 468 с.

УДК 621.372.8

Збільшення пропускної здатності оптичного каналу волоконно-оптичні системи передавання

В.О. Брескін, канд. техн. наук, **Г.Д. Мазур**, **Д.М. Розенвассер**

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
вул. Ковальська 1, Одеса 65023, Україна.

У статті розглянуті шляхи збільшення пропускної здатності оптичного каналу існуючих ВОСП шляхом заміни передавальних і приймальних оптичних модулів, що використовують АМ-2 на АФМ та КАМ. Бібл. 12, рис. 5.

Ключові слова: дисперсійні спотворення, переобладнання, коректувальне кодування, довжина регенераційної ділянки, багатопозиційне кодування, запас по захищеності.

Increasing the capacity of the optical channel of fiber-optic transmission system

V.A. Breskin, **A.D. Mazur**, **D.M. Rozenvasser**

O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,
str. Kovalska 1, Odessa 65023, Ukraine.

The paper considers ways to increase the capacity of existing FOTS fiber channel by replacing the optical transmitting and receiving modules with BASK by ASK-PSK and QAM. Reference 12, figures 5.

Key words: dispersion distortion, alteration, error-control coding, regeneration length, M-ary coding, signal-to-noise ratio.

1. *Li Ying-chun.* Optical QPSK/16QAM modulation based on serial-parallel MZM scheme in radio-over-fiber system / Ying-chun LI, Shi-huan ZOU, Lin WEI, You-mei CAI, Jia-jun YE, Ru-jian LIN // Journal of Shanghai University (English Edition). - 2011.
2. *Cunningham D.* The IEEE 802.3z Worst Case Link Model for Optical Physical Media Dependent Specification / D. Cunningham, M. Nowell, D. Hanson, L. Kazovsky // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. - 1998.
3. Forward error correction for submarine systems: ITU-T Recommendations G.975-200010-I. - [Approved in 2000-10]. - Geneva - 2001.
4. *Banket V.L.* Error control coding in optical fiber transmission systems: the material and technical information / V.L.Banket, F.V. Toporkov // Communication. - 2006. - № 7. - S. 18-21. (Rus)
5. *Biryukov N.L.* Next Generation Networks (NGN) and Broadband / Biryukov N.L. - Moldova, Chisinau, 04-06.05.2010. - (Regional Development Forum ITU-D for Europe and CIS).(Rus)

6. *Breskin V.A.* Equipment replacement in fiber optic transmission systems SDH to WDM / V.A. Breskin / / Scientific papers of ONAT after O.S. Popov - 2007. - № 1.(Rus)
7. *Breskin V.A.* Influence of dispersion distortion on the length of the regeneration section of fiber-optic transmission systems / V.A. Breskin, A.D. Mazur / / Scientific papers of ONAT after O.S. Popov. - 2008. - № 1. - pp. 80-84. (Rus)
8. *Breskin V.A.* Modern method of upgrading transmission lines with metal cable primary network / V.A. Breskin / / Scientific papers of ONAT after O.S. Popov - 2003. - № 2. (Rus)
9. *Velichko M.A.* New modulation formats in optical communication / M.A. Velichko, O.E. Nany, A.A. Susyan / / Lightwave Russian Edition. - 2005. - № 4. - pp. 21-30.(Rus)
10. *Korneichuk V.I.* Optical transmission systems / V.I. Korneichuk, T.V. Makarov, I.P. Panfilov. - K.: Technics, 1994. - 389 p.(Rus)
11. *Nekuchaev A.* Character data transmission over fiber optic links. Patent - Russia, what's next? / A. Nekuchaev, W. Yusupaliev / / Electronics NTBs. - 2001. - № 6. (Rus)
12. *Slepov N.N.* The modern technology of digital fiber optic networks / N.N. Slepov - M.: Radio and Communication, 2000. - 468 p.(Rus)

Поступила в редакцию 22 ноября 2012 г.