

УДК 621.382 621.395

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА НА УРОВЕНЬ ПОМЕХИ ОБРАТНОГО РАССЕЙЯНИЯ В ДУПЛЕКСНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ БЕЗ ОПТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

В.Н. УРЯДОВ, А.Г. МАКСИМЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 8 октября 2003

Проведен анализ влияния релеевского рассеяния на помехоустойчивость одноволоконных дуплексных систем передачи без оптического разделения направлений передачи с учетом характеристик оптического приемника. Показаны пути уменьшения этой помехи выбором линейного кода оптического сигнала, коэффициента лавинного умножения фотодетектора и частотных характеристик оптического приемника.

Ключевые слова: оптические системы связи, волоконная оптика, релеевское рассеяние.

Введение

Существующие типы дуплексных волоконно-оптических систем передачи (ДВОСП), активно эксплуатируемые в настоящее время большинством телекоммуникационных компаний, требуют прокладки двух волокон для обеспечения двусторонней передачи. На определенном этапе в ходе эксплуатации такого оборудования ставится задача наращивания пропускной способности системы ввиду постоянно растущего спроса на услуги связи от обычной телефонной до широкополосного доступа в Интернет. Это заставляет разработчиков систем связи искать такие решения, которые позволяют гибко увеличивать производительность сети. Прокладка дополнительных волоконно-оптических кабелей связи (ВОКС) в таком случае оказывается экономически неэффективной ввиду ее высокой стоимости по отношению к стоимости каналообразующего оборудования. Наиболее перспективной технологией, позволяющей создать гибкие разветвленные оптические сети с практически неограниченными возможностями роста полосы пропускания, является технология волнового мультиплексирования WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [1]. Однако ее использование во многих случаях не окупается из-за значительной стоимости высокотехнологичного уплотняющего оборудования. Таким образом, создание экономически эффективных ВОСП, позволяющих гибко наращивать пропускную способность, все еще является открытой задачей.

Весьма интересным направлением развития ВОСП по этому пути является создание дуплексных систем, работающих по одному волокну без оптического разделения встречных потоков. Преимуществом таких систем является их относительная дешевизна, которая объясняется отсутствием необходимости в прокладке дополнительного волокна для организации двусторонней передачи, а также отсутствием в системе дорогостоящих схем разделения потоков. Как дополнительное преимущество, следует отметить совместное использование таких ВОСП с технологией волнового мультиплексирования WDM, что в перспективе позволит еще гибче на-

рацивать пропускную способность сети связи, предоставляя потребителю услуги на любой требуемой скорости.

Возможности создания таких ВОСП были исследованы в литературе [2, 3], однако целый ряд факторов, влияющих на качество дуплексной передачи по одному волокну, остался неисследованным, в частности влияние характеристик приемника на уровень помехи обратного рассеяния.

Теоретический анализ

Запишем выражение для коэффициента передачи огибающей обратного рассеяния в волокне [3]:

$$H(j\omega) = \frac{h_R}{1 + j\omega\tau}, \quad (1)$$

где $h_R = 0,5 \cdot S \frac{\alpha_R}{\alpha}$, α_R — затухание релейского рассеяния, α — полное затухание ВС; S — коэффициент, определяющий захваченную волокном и направляемую обратно часть рассеянного во всех направлениях света; $\tau = \frac{l}{V_a \alpha}$ — постоянная времени обратного рассеяния, V_a — групповая скорость распространения излучения в ВС.

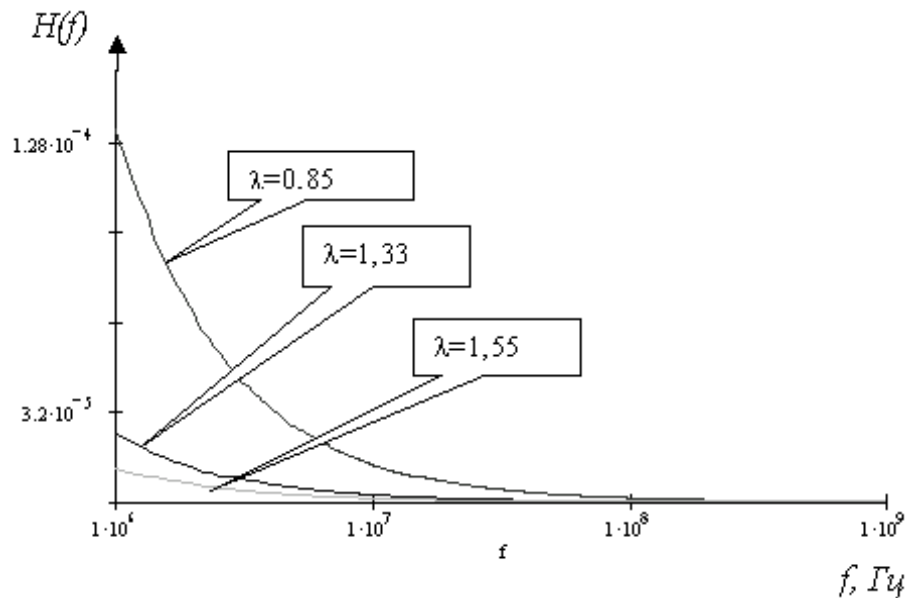


Рис. 1. Зависимость коэффициента передачи обратного рассеяния от скорости передачи и длины волны

Следует отметить, что с увеличением частоты значение $H(f)$ уменьшается (рис. 1). Помеху обратного рассеяния можно разделить на постоянную составляющую и переменную, влияние которых на чувствительность фотоприемного устройства различно. Определим мощность обеих составляющих помехи для случайной последовательности импульсов длительностью и с периодом следования T . Эту операцию будем проводить с учетом используемых в ВОСП линейных кодов, каждый из которых имеет свой энергетический спектр. Ограничим наше рассмотрение кодами NRZ-L, RZ и BI-M и оценим влияние обратного рассеяния на сигнал в линейном тракте, закодированный одним из кодов.

В результате действия обратного рассеяния его спектральные характеристики изменяются в соответствии с формулой

$$W(f) = G(f) |H(f)|^2. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет определить спектральную плотность помехи для различных кодов, представленных на рис. 2.

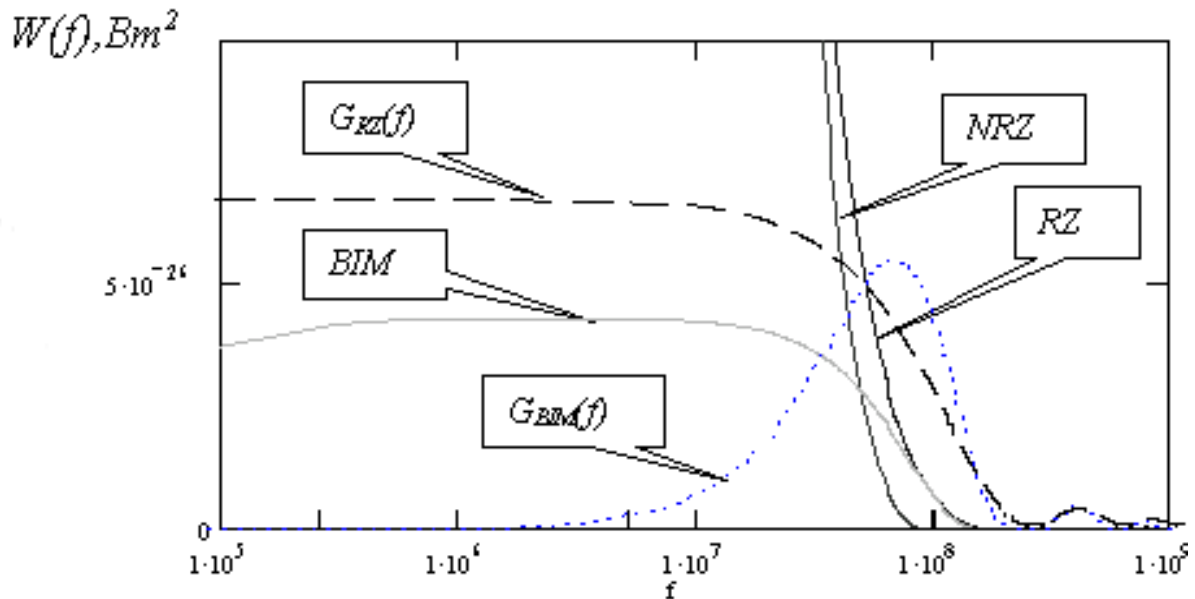


Рис. 2. График зависимости спектральной плотности мощности помехи рассеяния от частоты для различных кодов ($B=108$ бит/с, $P_{cp}=1$ мВт, $\lambda=0,85$ мкм)

Из рисунка видно, что релейское рассеяние в различной степени влияет на разные линейные коды. Так, например, энергетический спектр биимпульсного кода подвергся наименьшему влиянию, что объясняется малой концентрацией энергии на низких частотах, на которых влияние релейского рассеяния особенно ощутимо, но оно может быть уменьшено соответствующей фильтрацией. Энергетические спектры линейных сигналов с кодами RZ и NRZ в одинаково высокой (по сравнению с биимпульсным кодом) степени подвержены влиянию рассеяния. Это объясняется высокой концентрацией энергии на низких частотах и самой шириной спектра кодов, при которой помеха полностью накладывается на сигнал, так как вся попадает в его спектр. График показывает, что с ростом частоты влияние рассеяния на сигнал уменьшается, поэтому высшие дискретные составляющие как более высокочастотные по сравнению с непрерывной составляющей можно в дальнейших расчетах не учитывать ввиду их чрезвычайной малости.

Запишем выражение для определения дисперсии помехи рассеяния:

$$\overline{\sigma^2} = \int_{-\infty}^{\infty} W_{NRZ-L}(f) df = P_{\sim}. \quad (3)$$

На рис. 3 представлен график зависимости дисперсии переменной составляющей помехи рассеяния для трех линейных кодов от скорости передачи (для наглядности график совмещен с зависимостью теплового шума приемника от скорости передачи).

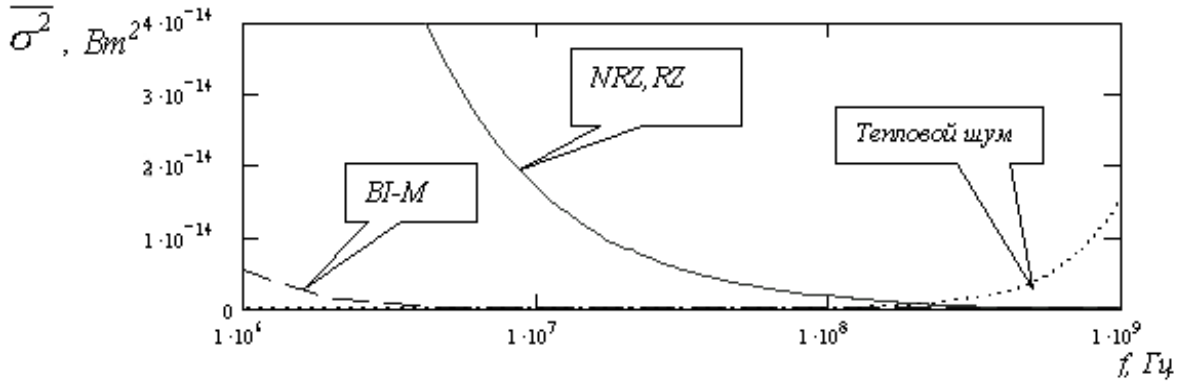


Рис. 3. Зависимость дисперсии переменной составляющей помехи рассеяния для различных кодов ($P_{cp}=1$ мВт, $\lambda=0,85$ мкм)

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что спектральная плотность помехи за счет отражения по Релею зависит от линейного кодирования, а также от скорости передачи. Следует отметить, что эти зависимости незначительны, так как на спектр помехи влияет постоянная времени обратного рассеяния $\tau = \frac{l}{V_a \alpha}$, ограничивающая спектр обратного

рассеяния.

Все рассмотренные выше коды имеют постоянную составляющую, следовательно, она также будет влиять на сигнал и определится как $P_{ad} = P_{cp} h_R = 2,595 \cdot 10^{-6}$ Вт для NRZ кода.

Усилительные цепи приемного оптического модуля (ПРОМ) содержат разделительные емкости, следовательно, постоянная составляющая рассеяния никак не повлияет на сигнал в последующих узлах приемного модуля, однако повлияет на шум фотодиода, выступив в качестве дополнительного источника дробового шума. Выражение для ее спектральной плотности мощности можно записать, воспользовавшись формулой Шоттки [4]

$$G_D(f) = 2qP_{cp} h_R \frac{\eta q}{h\nu} M^{2+x} df, \quad (4)$$

где q — элементарный электрический заряд; M — коэффициент лавинного умножения фотодиода (для $p-i-n$ -фотодиодов $M=1$); x — параметр избыточного шума фотодиода, который лежит в пределах (0,5–1).

Известно, что во входных цепях оптического приемника происходит интегрирование сигнала ввиду наличия собственных и паразитных емкостей, следовательно, происходит ограничение спектра сигнала. Также известно, что при проектировании приемного модуля и стараются подобрать элементы входной цепи ПРОМ таким образом, чтобы ширина полосы пропускания была равна $\Delta f = 0,5-0,7$ В — линейной скорости передачи. Таким образом, обеспечивается отсутствие межсимвольных искажений в сигнале для правильной работы порогового устройства, при этом коэффициент передачи входной цепи считается постоянным в пределах этой полосы частот.

Для оценки влияния рассеяния на сигнал используем выражение для определения отношения сигнал/шум. Постоянная и переменная составляющие помехи рассеяния войдут в эту формулу в качестве слагаемых к дробовому и тепловому шумам соответственно, подставим туда их проинтегрированные значения:

$$S/N = \frac{P_{ad}^2 \left(\frac{\eta q}{h\nu} \right)^2 M^2}{2q \left(\frac{\eta q}{h\nu} (P_{ad} + P_{ad} h_R) + I_t \right) BM^{2+x} + \frac{4kTF_y B^2 C_\Sigma}{K} + P_{ad}^2 \left(\frac{\eta q}{h\nu} \right)^2 M^2}, \quad (5)$$

где I_c — темновой ток фотодиода (типичное значение $2 \cdot 10^{-7}$ А); F_y — шум-фактор предусилителя; k — постоянная Больцмана; T — температура; $K=10-100$ — определяет степень интегрирования во входной цепи.

Построим зависимость ОСШ оптического приемника с ЛФД от коэффициента лавинного умножения, используя вышеприведенную формулу (рис. 4).

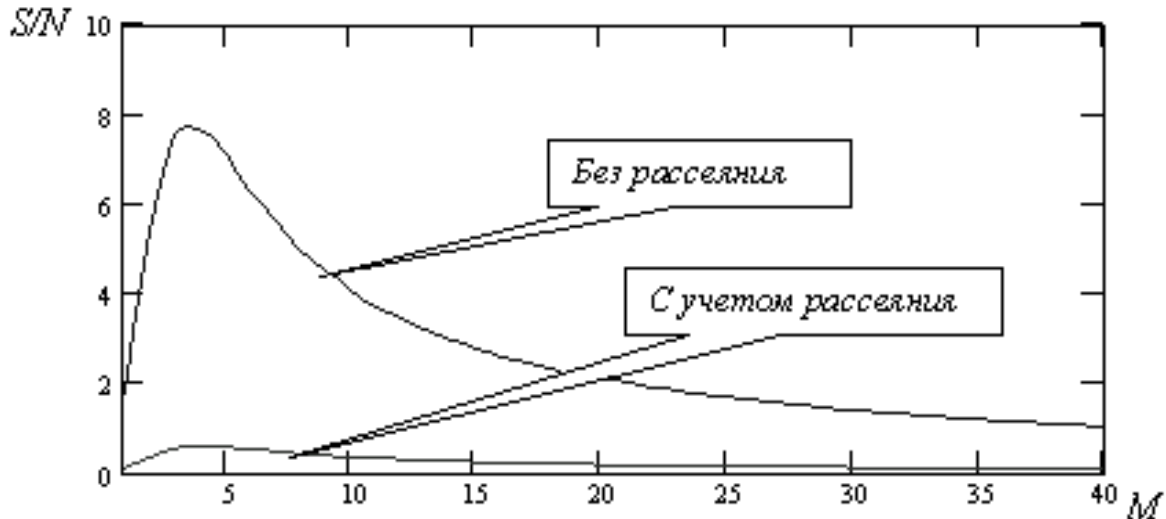


Рис. 4. Зависимость ОСШ приемника с ЛФД от коэффициента лавинного умножения ($B=108$ бит/с, $x=1$, $\lambda=0,85$ мкм)

Известно, что если это выражение рассмотреть как функцию от коэффициента лавинного умножения M , то она имеет оптимальное значение $M_{\text{опт}}$, при котором достигается максимальное значение отношения сигнал/шум:

$$M_{\text{итд}} = \left[\frac{4kTF_y B + 2P_{\sim}^2}{xqBR_H \left(P_{\text{ид}} \frac{\eta q}{h\nu} + I_c + P_{\text{ср}} h_R \frac{\eta q}{h\nu} \right)} \right]^{\frac{1}{2+x}} \quad (6)$$

На рис. 4 видны оптимальные значения коэффициента лавинного умножения, которые получаются при равенстве шумовых составляющих: переменной (релеевской и тепловой) и дробовой — $M_{\text{опт}}=4,2$ для случая с учетом рассеяния и $M_{\text{опт}}=2,8$ для случая без его учета.

Если построить зависимости M от скорости передачи для случая без учета релеевского рассеяния и для случая с учетом рассеяния, то можно заметить, что в последнем случае рассеяния график имеет явный оптимум, который обусловлен равенством шумовых составляющих — тепловой и релеевской (рис. 5).

Таким образом, тепловой шум является доминирующим только на скоростях больших оптимальной.

Результаты сравнения между собой пороговых мощностей приемников с ЛФД и $p-i-n$ -фотодиодами приведены на рис. 6 (коэффициент лавинного умножения выбран оптимальным).

Из рис. 6 следует, что приемник с ЛФД обладает более высокой чувствительностью, чем приемник с $p-i-n$ -фотодиодом, это особенно заметно в случае учета влияния релеевского рассеяния, при котором для приемника с ЛФД не только заметен выигрыш по чувствительности, но и отсутствие оптимума по скорости передачи.

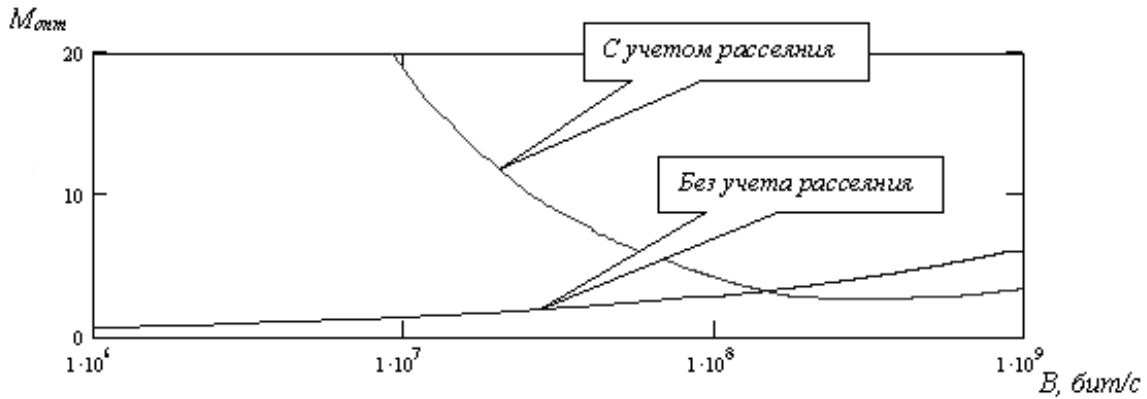


Рис. 5. Зависимость оптимального коэффициента лавинного умножения от скорости передачи ($\chi=1$, $\lambda=0,85$ мкм, $I_c=1,2 \cdot 10^{-8}$ А)

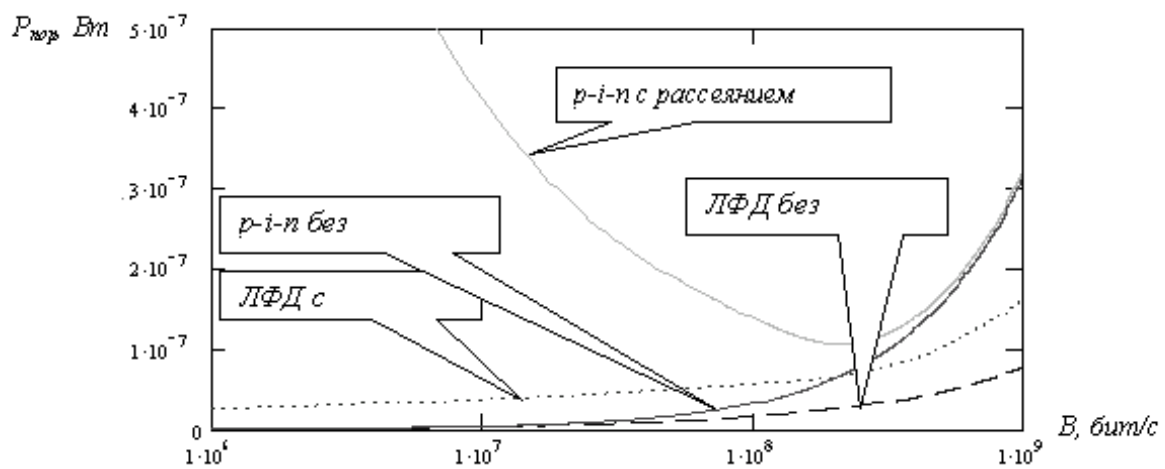


Рис. 6. Зависимость пороговой чувствительности оптического приемника с ЛФД и $p-i-n$ от скорости передачи для разных условий ($\chi=1$, $\lambda=0,85$ мкм)

Заключение

Анализируя результаты расчетов, можно заметить, что дробовая составляющая шума, обусловленного релеевским рассеянием, доминирует над переменной составляющей того же шума, если их сравнивать по степени влияния на ОСШ. Уровень дробовой составляющей напрямую связан с уровнем оптической мощности в волокне. Что касается переменной составляющей, то ее уровень снижается по мере увеличения скорости передачи и зависит от выбранного линейного кода. Код ВІ-М имеет явное преимущество в помехозащищенности по сравнению с RZ и NRZ, которое, как уже отмечалось выше, объясняется малой концентрацией энергии кода на низких частотах, где уровень помехи рассеяния относительно высок. Поэтому для уменьшения влияния переменной составляющей релеевского рассеяния на помехоустойчивость дуплексных ОСП в качестве линейного кода таких систем следует выбирать код с малой или даже нулевой диспаратетностью, что соответствует малой концентрации энергии на низких частотах, к таким кодам относятся: СМІ, ЕР-1, ЕР-2, ВІ-Л, ВІ-С, блочные коды mBnB и др.

Если анализировать влияние дробовой составляющей, то она является принципиально неустранимым фактором ОСП, однако есть способы ее уменьшения. Одним из таких способов является осуществление гетеродинного приема.

OPTICAL RECEIVER CHARACTERISTICS INFLUENCE ON RALEIGH SCATTERING NOISE LEVEL IN BIDIRECTIONAL FIBER-OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS WITHOUT OPTICAL DIVISION

V.N. URYADOV, A.G. MAKSIMENKO

Abstract

Rayleigh scattering influence on the noise-immunity of single fiber single wavelength bidirectional systems is studied taking into consideration the optical receiver frequency characteristics. The ways of noise reduction by the selection of optical signal line code, APD gain and optical receiver frequency characteristics are shown.

Литература

1. *Жирар А.* Руководство по технологии и тестированию систем WDM. М., 2001.
2. *Алишев Я.В., Урядов В.Н.* Перспективные информационные технологии в волоконно-оптических сетях телекоммуникаций. Мн., 2003.
3. *Мацнев Е.В.* // Электросвязь. 1989. № 11.
4. *Унгер Г.* Оптическая связь. М., 1979.
5. *Алишев Я.В., Урядов В.Н., Воробьев В.Л., Чердиченко Н.М.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.. 2001. № 3.
6. *Щелкунов К.Н., Широков Г.А., Кушнир В.Ф., Блушке А.* Линейные сигналы в цифровых волоконно-оптических системах передачи. Л., 1987.