

Фазовая самомодуляция излучения в волоконно-оптических линиях связи

В.Ю.Гольшев, Е.А.Жуков, И.Э.Самарцев, Д.Г.Слепов

Исследованы оптические нелинейные эффекты – фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция и вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна, оказывающие основное влияние на качество информационного сигнала при передаче данных в волоконно-оптических линиях связи. Проведен теоретический расчет мощности стокового излучения при вынужденном рассеянии Манделштама–Бриллюэна с учетом нелинейного уширения спектра оптического сигнала вследствие фазовой самомодуляции. Рассмотрен механизм искажения информации за счет совместного действия самомодуляции и хроматической дисперсии. Основные результаты теоретических расчетов были проверены экспериментально.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция, четырехволновое смешение, вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна.

1. Введение

Для повышения дальности передачи информации в современных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) используются эрбиевые усилители, работающие с излучением, длина волны которого находится вблизи 1.5 мкм. Однако при увеличении мощности излучения в световоде возникают различные оптические нелинейные явления, такие как вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кросс-модуляция (ФКМ), вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна (ВРМБ), четырехволновое смешение [1, 2]. ФСМ и ФКМ – наиболее значимые оптические нелинейные эффекты в ВОЛС с малым числом участков, в которых нет оптических усилителей. Фазовые самомодуляция и кросс-модуляция возникают вследствие зависимости показателя преломления нелинейной среды, в которой распространяется излучение, от интенсивности света (так называемый эффект Керра) и могут приводить при определенных условиях к уширению оптических импульсов.

При рассмотрении эффекта Керра следует обращать особое внимание на спектр передаваемого оптического сигнала и способ кодирования информации. В качестве источника излучения в ВОЛС обычно используются полупроводниковые лазерные диоды с очень узким собственным спектром излучения (~10 МГц). Для передачи информационного сигнала ток диода модулируется с заданной частотой, что приводит к модуляции интенсивности генерируемого света (так называемая прямая модуляция). В настоящей работе, если это не оговаривается отдельно, рассматривается кодирование информационного сигнала, при котором единичные биты представ-

ляются высоким уровнем мощности излучения, а нулевые – низким, причем передача любых двух последовательных единиц происходит без сброса мощности излучения до величины, соответствующей логическому нулю.

Эффект Керра в оптических линиях связи может играть как положительную, так и отрицательную роль. Уширение спектра, обусловленное ФСМ и ФКМ, приводит к повышению порога ВРМБ. При этом для скоростей передачи информации 2.5 Гбит/с в случае прямой модуляции лазерного диода ВРМБ становится пренебрежимо малым. С другой стороны, совместное действие эффекта Керра и дисперсии групповых скоростей (ДГС) световых импульсов вызывает искажение их формы, что увеличивает вероятность ошибки при передаче информации. При определенных условиях эффект Керра может приводить к возникновению фазового шума. Ограничение ширины линии излучающего лазерного диода, обусловленное собственным фазовым шумом, было получено в [3]. В работах [4, 5] рассматривалось влияние спонтанного излучения оптических усилителей на фазовый шум и уширение линии сигнала.

До сих пор вычисление порога ВРМБ проводилось без учета эффекта Керра. А совместное действие ФСМ, ФКМ и дисперсии в ВОЛС учитывалось только при расчете степени уширения оптических импульсов [6]. Заметим также, что экспериментальные данные, характеризующие влияние ФСМ и ФКМ на число ошибок при передаче информации в ВОЛС и подтверждающие приводимые теоретические расчеты, практически отсутствовали.

Настоящая работа посвящена изучению ограничений, накладываемых ФСМ и ФКМ на дальность оптической связи в волокне. Сделан теоретический расчет порога ВРМБ при учете ФСМ, который получил экспериментальное подтверждение. Приводятся также результаты измерений минимально допустимой мощности излучения, поступающего с выхода линии на оптический фотоприемник, для заданного коэффициента ошибок, резкое увеличение которого обусловлено совместным

В.Ю.Гольшев, Е.А.Жуков, И.Э.Самарцев, Д.Г.Слепов. НТО «ИРЭ–Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1; e-mail: vglyshev@ntoire-polus.ru

Поступила в редакцию 6 июня 2006 г.

действием эффекта Керра и дисперсии. Проводится качественный анализ полученных данных.

2. Влияние ФСМ излучения на ВРМБ

Вынужденное рассеяние Манделъштама – Бриллюэна заключается в рассеянии света в обратном направлении, которое происходит на акустических колебаниях среды. При достижении некоторого критического значения входной мощности излучения интенсивность рассеяния лавинообразно увеличивается, что приводит к деградации качества связи. Спектр рассеянного света в области 1.5 мкм сдвинут относительно исходного в длинноволновую область на 10 ГГц, и его ширина Γ составляет примерно 20 МГц.

В работе [7] критическая мощность ВРМБ P_{cr} определяется как мощность излучения накачки, вводимого в световод, для которой мощность рассеянного света, измеряемая в начале световода, равна P_{cr} . При этом предполагается отсутствие истощения накачки за счет ВРМБ. Заметим, что при учете истощения накачки это определение неприменимо, т. к. полное преобразование накачки в рассеянное излучение невозможно из-за закона сохранения энергии. Реальная же эффективность преобразования пороговой мощности накачки в мощность рассеянного излучения составляет порядка процента. Для типичных параметров одномодового волокна P_{cr} задается выражением

$$P_{cr} \approx 21 \frac{\alpha A}{g_0}. \quad (1)$$

Обозначения используемых при расчетах параметров и их значения для стандартного одномодового связного волокна в области длин волн вблизи 1.5 мкм приведены ниже.

Коэффициент потерь световода α (м ⁻¹)	.....	5×10^{-5}
Нелинейный коэффициент γ (Вт ⁻¹ ·м ⁻¹)	.....	1.621×10^{-3}
Число поперечных мод световода M	.....	2
Температура T (К)	.....	300
Полная ширина спектра ВРМБ-усиления на половине высоты Γ (Гц)	.....	2×10^7
Пиковый коэффициент усиления ВРМБ g_0 (Вт ⁻¹ ·м ⁻¹)	.....	4×10^{-11}
Эффективная площадь поперечного сечения сердцевинки волокна A (м ²)	.....	5×10^{-11}
Частота акустических фононов (бриллюэновская частота) ν_{Br} (Гц)	.....	1.11×10^{10}
Частота излучения накачки ν_p (Гц)	.....	1.93×10^{14}

Порог ВРМБ зависит не только от параметров световода, но и от ширины линии сигнала [6, 8, 9]. Если спектры коэффициента усиления ВРМБ $g(\nu)$ и накачки имеют лоренцевский профиль, то для пороговой мощности по-прежнему справедлива формула (1), но максимум функции $g(\nu)$ дается выражением

$$g_{max} \approx \frac{\Gamma}{\Gamma + \Gamma_p} g_0, \quad (2)$$

где Γ_p – ширина линии накачки. Таким образом, в случае $\Gamma_p \gg \Gamma$ ВРМБ-усиление уменьшается в Γ_p/Γ раз.

В общем случае коэффициент усиления ВРМБ, а следовательно и пороговая мощность, определяется сверткой спектров спонтанного рассеяния Бриллюэна и излучения накачки на линейной стадии развития процесса [8, 9]. В связи с этим тип модуляции (амплитудная, фазовая или частотная) играет существенную роль. В [10] подробно рассмотрены различные типы модуляции передаваемого сигнала. В работах [9, 11] получены зависимости коэффициентов усиления ВРМБ для амплитудной, фазовой и частотной модуляции входного сигнала от скорости передачи данных в оптическом волокне. Рассчитанные на основании этих результатов пороговые мощности для входных сигналов с амплитудной модуляцией и для различных скоростей передачи данных (622, 1000, 1250 и 2500 Мбит/с) составляют около 15 дБм. Здесь и далее мощность, выраженная в дБм, определяется как десятичный логарифм мощности, выраженной в милливаттах.

Мы провели измерение порога ВРМБ в одномодовом световоде длиной 200 км. При этом в качестве источника излучения использовался немодулированный лазерный диод с распределенной обратной связью, имеющий длину волны излучения $\lambda = 1550$ нм и ширину спектра около 15 МГц.

На рис.1 соответствующая зависимость мощности сигнала на выходе волокна от подаваемой на вход мощности изображена сплошной линией. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными пороговыми значениями. Для немодулированного излучения рассчитанная нами пороговая мощность составила около 9.7 дБм. Штриховой линией на рис.1 показана аналогичная зависимость при передаче чередующейся последовательности нулей и единиц со скоростью $B = 2500$ Мбит/с. Порог ВРМБ при прямой модуляции лазерного диода в исследуемом диапазоне мощностей входного сигнала (1–400 мВт) достигнут не был, что не соответствует теоретическим оценкам (18–19 дБм). Мы объясняем это уширением спектра передаваемого сигнала, которое вызвано ФСМ излучения [10].

Формы спектра сигнала после прохождения 200 км световода показаны на рис.2. Измерения проводились при помощи оптического анализатора спектра с разрешением 0.2 нм. Спектры нормированы на максимальную

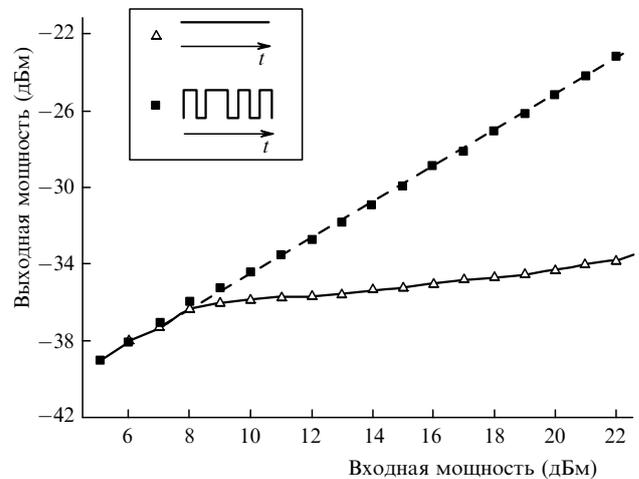


Рис.1. Зависимости мощности сигнала на выходе одномодового волокна длиной 200 км от оптической мощности на его входе при подаче на вход непрерывного сигнала (Δ) и сигнала в виде битовой последовательности (■).

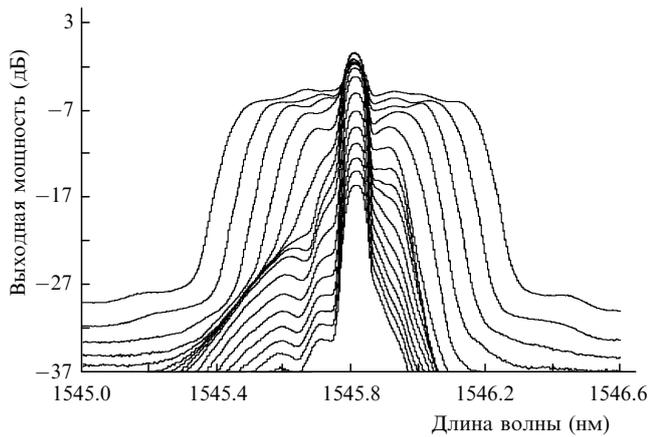


Рис.2. Спектры сигнала на выходе одномодового волокна длиной 200 км при передаче последовательности импульсов со скоростью 2500 Мбит/с для различных входных мощностей (мощности увеличиваются для кривых, расположенных снизу вверх).

спектральную плотность мощности. Различные кривые соответствуют изменению мощности излучения, вводимого в линию связи, от 3 до 25 дБм. Из рис.2 видно, что с увеличением мощности на входе линии связи спектр сигнала значительно уширяется по уровню –10 дБ. Уширение спектра линии с $\lambda = 1545.8$ нм происходит в пределах разрешения анализатора (0.1 нм).

В опубликованных ранее работах при расчетах пороговых мощностей ВРМБ влияние ФСМ не рассматривалось. Нами была построена аналитическая модель развития ВРМБ, учитывающая эффект ФСМ, на основании которой проведен теоретический расчет критической мощности [12 – 14]. Коэффициент преобразования накачки в стоксово излучение в длинных линиях связи ($L \gg \alpha^{-1}$, где L – длина волокна) имеет вид

$$\Psi(\chi) = Mk_B T \frac{2\pi^{3/2} v_p}{3^{3/4} v_{Br}} \left(\frac{\Gamma\chi}{\tau} \right)^{1/2} \frac{\gamma}{\alpha} G(\chi)^{-3/2} \exp G(\chi), \quad (3)$$

где k_B – постоянная Больцмана; $\chi = \langle v^2 \rangle_0 \tau / \Gamma$ – нормированная среднеквадратичная ширина спектра накачки; $\langle v^2 \rangle_0$ – среднеквадратичная ширина спектра накачки в начале световода; τ – период следования импульсов;

$$G(\chi) = \frac{3^{3/4}}{32} \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right)^{1/2} \frac{g_0}{\gamma A \chi}.$$

При выводе формулы (3) были сделаны следующие допущения. Во-первых, предполагалось отсутствие истощения накачки за счет ВРМБ. В этом случае коэффициент преобразования накачки должен быть всегда много меньше единицы ($\Psi(\chi) \ll 1$). Во-вторых, считалось, что область допустимых значений ширины спектра накачки ограничена сверху:

$$\chi \ll \frac{3^{3/4}}{32} \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right)^{1/2} \frac{g_0}{\gamma A} = 75.$$

Зависимость $\Psi(\chi)$ показана на рис.3. При расчете использовались значения параметров, приведенные выше.

Воспользуемся определением критической мощности ВРМБ, введенным в работе [3]: $P_{cr} = P_p(0) = P_s(0)$, где $P_p(0)$ и $P_s(0)$ – мощности накачки и сигнала в начале световода соответственно. С учетом закона сохранения энергии это определение имеет смысл только для реше-

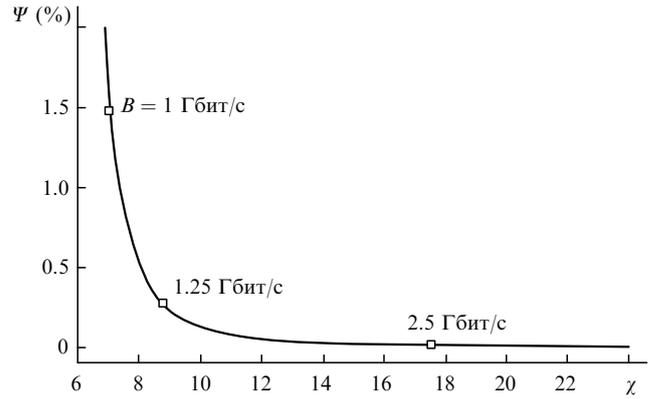


Рис.3. Коэффициент преобразования накачки в ВРМБ Ψ как функция нормированной среднеквадратичной ширины спектра накачки χ в начале световода.

ния, полученного в отсутствие истощения накачки за счет обратного рассеяния. При $\Psi = 1$ порогу ВРМБ соответствуют нормированная среднеквадратичная ширина спектра накачки $\chi_{cr} = 4.8$ и скорость передачи информации $B_{cr} = 680$ Мбит/с. С увеличением скорости передачи данных B эффективность преобразования накачки резко уменьшается, а порог ВРМБ не может быть достигнут при сколь угодно больших мощностях. В этом случае нелинейное уширение спектра накачки «доминирует» над процессом ВРМБ. Таким образом, для $B > 1$ Гбит/с и достаточно больших мощностей сигнала (выражение (3) получено в приближении $P_p \gg 35$ мВт) рассеяние Мандельштама – Бриллюэна в ВОЛС пренебрежимо мало.

На рис.3 квадраты соответствуют значениям Ψ , рассчитанным для различных скоростей передачи данных в ВОЛС. Для оценки среднеквадратичной ширины спектра импульсной накачки с гауссовым профилем использовалась формула [6] $\langle v^2 \rangle_0 \approx 2(B/\pi)^2 \ln 2$. Заметим, что полученные значения эффективности ВРМБ завышены. Это обусловлено следующим. Во-первых, передаваемые импульсы имеют более крутые фронты по сравнению с импульсами гауссовой формы, особенно при низких скоростях передачи данных. Во-вторых, в случае прямой модуляции лазерного диода, являющегося источником сигнала, его линия генерации приобретает chirпированную структуру, что приводит к еще большему уширению спектра излучения. Поэтому уже для $B \sim 622$ Мбит/с эффект ВРМБ достаточно мал.

3. Совместное действие ФСМ и ДГС

Было проведено измерение деградации отношения сигнал/шум на выходе линии связи длиной 100 км при подключении компенсатора дисперсии на входе или выходе линии. Результаты представлены на рис.4. Измерялось увеличение минимально допустимой мощности на фотодетекторе для заданного коэффициента ошибок, нормированное на мощность излучения, соответствующую предельному случаю, когда нелинейные эффекты отсутствуют. Если компенсирующее волокно находилось на выходе линии, деградации отношения сигнал/шум из-за ФСМ обнаружено не было. При расположении компенсатора дисперсии в начале линии указанная деградация имела место, т. к. в этом случае компенсируется только дисперсионное уширение начального импульса, до того как он спектрально уширился за счет ФСМ.

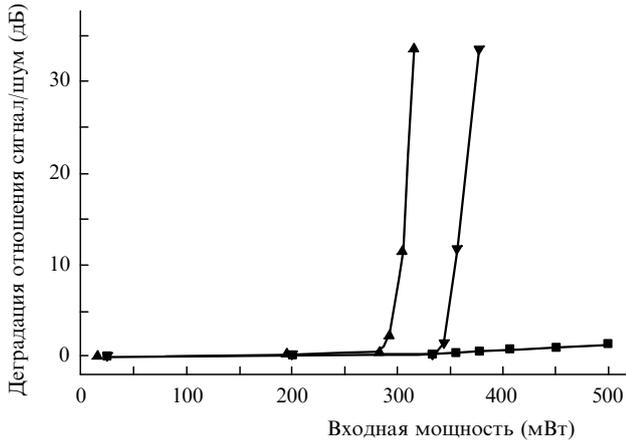


Рис.4. Зависимости деградации отношения сигнал/шум за счет совместного влияния ФСМ и ДГС на выходе ВОЛС длиной 100 км от оптической мощности на входе линии, полученные в отсутствие компенсатора дисперсии (▲) и при установке его в начале (▼) и в конце (■) линии связи.

Мы провели экспериментальное измерение деградации отношения сигнал/шум на выходе ВОЛС длиной 100 км в зависимости от входной оптической мощности для нескольких информационных каналов. Комбинировались три близких канала: 23-й ($\lambda = 1558.98$ нм), 25-й (1557.36 нм), 27-й (1555.75 нм), и один удаленный – 35-й (1549.32 нм). Номера каналов приведены согласно стандартной сетке ИТУ. Результаты измерений представлены на рис.5. Определим пороговую мощность при совместном действии ФСМ и ДГС как мощность на входе линии, при которой начинается резкое увеличение минимально допустимой мощности на фотодекторе для заданного коэффициента ошибок. При добавлении к 27-му близким каналам – 25-го и 23-го – пороговая мощность падает, а при совместном действии 27-го и 35-го каналов она практически не отличается от таковой для одного 27-го канала.

Качественное объяснение полученным данным можно дать, рассмотрев систему уравнений, описывающую распространение трех оптических сигналов вдоль оси световода z [6]:

$$i \frac{\partial A_1}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A_1 + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial \tilde{t}^2} - \gamma(|A_1|^2 + 2|A_2|^2 + 2|A_3|^2) A_1,$$

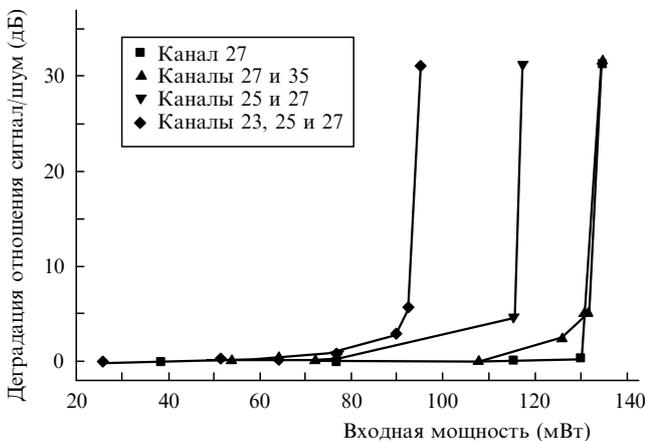


Рис.5. Зависимости деградации отношения сигнал/шум за счет совместного влияния ФСМ и ДГС на выходе ВОЛС длиной 100 км от оптической мощности на входе линии при различных комбинациях используемых информационных каналов.

$$i \frac{\partial A_2}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A_2 - i d_2 \frac{\partial A_2}{\partial \tilde{t}} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial \tilde{t}^2} - \gamma(|A_2|^2 + 2|A_1|^2 + 2|A_3|^2) A_2, \quad (4)$$

$$i \frac{\partial A_3}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A_3 - i d_3 \frac{\partial A_3}{\partial \tilde{t}} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_3}{\partial \tilde{t}^2} - \gamma(|A_3|^2 + 2|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_3,$$

где A_i – амплитуды оптических волн каналов ($i = 1, 2, 3$); β_2 – параметр ДГС; $\tilde{t} = t - z/v_g$ – время, измеряемое в системе отсчета, движущейся с групповой скоростью импульса v_g ; $d_i = (v_{g1} - v_{gi})v_{g1}^{-1}v_{gi}^{-1}$ – параметр расстройки групповых скоростей ($i = 2, 3$). Это уравнение решается только численно. Нелинейный член в уравнении (4) обычно много больше, чем дисперсионный. Однако, несмотря на это, ДГС нельзя рассматривать как возмущение. Из-за большой частотной модуляции, наводимой ФСМ, даже слабое влияние дисперсии ведет к существенному изменению формы импульса. Спектральное уширение, обусловленное ФСМ, пропорционально максимальному фазовому набегу $\phi_{\max} = \gamma[|A_1(0)|^2 + 2|A_2(0)|^2 + 2|A_3(0)|^2] \alpha^{-1} [1 - \exp(-\alpha L)]$. Для одного канала максимальный фазовый набег примерно равен $\gamma P_0 \alpha^{-1}$, для двух – $3\gamma P_0 \alpha^{-1}$ и для трех – $5\gamma P_0 \alpha^{-1}$ (здесь P_0 – начальная мощность накачки). Исходя из этого, при добавлении одного канала пороговая мощность должна уменьшиться в три раза, а при добавлении двух – в пять раз. Экспериментальные данные говорят о более слабой зависимости пороговой мощности от числа каналов. Это обусловлено тем, что в расчетах не учитывалось дисперсионное разбегание импульсов, за которое в уравнении (4) отвечают члены с коэффициентом d_i . Два спектральных канала взаимодействуют на длине световода порядка $t_0/|d_i|$, где t_0 – длительность импульса. Для скорости передачи $B = 2.5$ Гбит/с каналы 27 и 35 «разбегаются» на расстоянии менее 1 км, что много меньше длин нелинейного и дисперсионного взаимодействий. Поэтому они не успевают эффективно провзаимодействовать, что хорошо видно на рис.5. Кривые для одного (27-го) и двух (27-го и 35-го) каналов практически повторяют друг друга.

4. Заключение

В настоящей работе приведены результаты расчета эффективности ВРМБ в волоконно-оптической линии связи при учете влияния ФСМ. Сделаны оценки верхнего предела эффективности преобразования накачки в стоксово излучение в стандартном одномодовом световоде в области 1.5 мкм при различных скоростях передачи информации. При прямой модуляции лазерного предающего диода со скоростью более 622 Мбит/с вынужденное рассеяние Мандельштама – Биллюэна пренебрежимо мало (его эффективность меньше 6.6%). В данном случае нелинейное уширение, вызванное ФСМ, «преобладает» над ВРМБ. Приведены результаты измерений минимально допустимой мощности излучения, поступающего с выхода линии на оптический фотоприемник, для заданного коэффициента ошибок в зависимости от входной оптической мощности и числа каналов. Показано, что ФСМ и ФКМ существенно снижают порог ВРМБ. Использование компенсатора дисперсии на вы-

ходе оптической линии связи позволяет скомпенсировать искажение импульсов, вызванное совместным действием само- и кросс-модуляции, а также дисперсии. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании современных волоконно-оптических систем дальней связи.

1. Stolen R.H. *Proc. IEEE*, **68**, 1232 (1980).
2. Chraplyvy A.R. *J. Lightwave Technol.*, **8**, 1548 (1990).
3. Iwashita K., Matsumoto T., Tanaka C., Motosugi G. *Electron. Lett.*, **22**, 791 (1986).
4. Gordon J.P., Mollenauer L.F. *Opt. Lett.*, **15**, 1351 (1990).
5. Ryu S. *J. Lightwave Technol.*, **10**, 1450 (1992).
6. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (London: Acad. Press, 1995).
7. Smith R.G. *Appl. Opt.*, **11**, 2489 (1972).
8. Lichtman E., Friesem A.A. *Opt. Commun.*, **64**, 544 (1987).
9. Aoki Ya, Tajima K., Mito I. *J. Lightwave Technol.*, **6**, 710 (1988).
10. Cotter D. *Electron. Lett.*, **18**, 504 (1982).
11. Lichtman E., Waarts R.G., Friesem A.A. *J. Lightwave Technol.*, **7**, 171 (1989).
12. Gaeta A., Boyd R.W. *Phys. Rev. A*, **44**, 3205 (1991).
13. Bao X. et al. *Opt. Lett.*, **24**, 510 (1999).
14. Гольшев В.Ю., Жуков Е.А., Самарцев И.Э., Слепов Д.Г. *ЖТФ*, **74**, 66 (2004).