

## ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Одегов Н.А.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)*

## ОЦІНКИ ГРАНИЧНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ У МАГІСТРАЛЬНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ

*Одегов М.А.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)*

## EVALUATIONS OF THE LIMIT TRANSMISSION SPEED IN THE MAGISTRAL FIBER OPTICAL SYSTEMS

*Odegov N.A.*

*O.S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odesa, 65029, Ukraine.  
[onick\\_64@ukr.net](mailto:onick_64@ukr.net)*

**Аннотация.** Исследуемым объектом являются волоконно-оптические системы передачи операторов национального класса. Длина регенерационных участков принимается равной приблизительно 100...500 км. Принципиально важным считается использование стандартного волокна. Целью статьи является получение оценок потенциальной скорости передачи для этого класса объектов. В качестве показателей эффективности рассматриваются: спектральная эффективность в узкочастотных каналах, суммарная скорость передачи во всем частотном диапазоне, суммарная скорость передачи с учетом длины регенерационного участка. Выполнен анализ значений этих показателей для промышленных и экспериментальных систем передачи. Показано, что суммарная скорость передачи для реально используемых систем может достигать 8...20 Тбит/с. При этом используется полоса в диапазонах S-C-L общей шириной порядка 20 ТГц. Частотные каналы имеют равную ширину в различных частотных планах от 12,5 до 100 ГГц. Дано уточнение теоремы отсчетов для дисперсионного канала и показано, что скорость передачи в таком канале может быть существенно меньше скорости Найквиста. Предложена методика расчета потенциальной скорости передачи для систем с полосой пропускания порядка 200...300 ТГц. Показано, что в этом случае скорость передачи можно увеличить приблизительно на порядок. Приведены расчеты для частотного плана с неравномерной шириной полос отдельных каналов. При этом ширина полос выбирается из условия равных скоростей передачи. При этом скорость передачи на расстоянии 100 км может быть теоретически увеличена до 500...1500 Тбит/с при использовании уже проложенного кабеля.

**Ключевые слова:** волоконно-оптические системы передачи, стандартное оптическое волокно, дисперсия, коэффициент дисперсии групповых скоростей, максимальная скорость передачи, теорема отсчетов.

**Анотація.** Досліджуваним об'єктом є волоконно-оптичні системи передачі операторів національного класу. Довжина регенераційних ділянок приймається рівною приблизно 100...500 км. Принципово важливим вважається використання стандартного волокна. Метою статті є отримання оцінок потенційної швидкості передавання для цього класу об'єктів. Як показники ефективності розглядаються: спектральна ефективність у вузькочастотних каналах, сумарна швидкість передачі в усьому частотному діапазоні, сумарна швидкість передачі з урахуванням довжини регенераційної ділянки. Виконано аналіз значень цих показників для промислових й експериментальних систем

*Одегов Н.А.*

61

передачі. Показано, що сумарна швидкість передачі для реально використовуваних систем може досягати 8...20 Тбіт/с. При цьому використовується смуга в діапазонах S-C-L загальною шириною близько 20 ТГц. Частотні канали мають рівну ширину в різних частотних планах від 12,5 до 100 ГГц. Надано уточнення теореми відліків для дисперсійного каналу і показано, що швидкість передачі в такому каналі може бути істотно менше швидкості Найквіста. Запропоновано методику розрахунку потенційної швидкості передачі для систем із смугою пропускання близько 200...300 ТГц. Показано, що в цьому випадку швидкість передачі можна збільшити приблизно на порядок. Наведено розрахунки для частотного плану з нерівномірною шириною смуг окремих каналів. При цьому ширина смуг вибирається з умови рівних швидкостей передачі. При цьому швидкість передачі на відстані 100 км може бути теоретично збільшена до 500...1500 Тбіт/с при використанні вже прокладеного кабелю.

**Ключові слова:** волоконно-оптичні системи передачі, стандартне оптичне волокно, дисперсія, коефіцієнт дисперсії групових швидкостей, максимальна швидкість передачі, теорема відліків.

**Abstract.** The object under study are fiber-optic transmission systems of national-class operators. The length of the regeneration sections is assumed to be approximately 100...500 km. Of fundamental importance is the use of standard fiber. The aim of the article is to obtain estimates of the potential transmission rate for this class of objects. The following are considered as performance indicators: spectral efficiency in narrow-frequency channels, total transmission rate in the entire frequency range, total transmission rate taking into account the length of the regeneration section. The analysis of the values of these indicators for industrial and experimental transmission systems. It is shown that the total transfer rate for actually used systems can reach 8...20 Tbit / s. In this case, a band is used in the S-C-L bands with a total width of the order of 20 THz. Frequency channels have equal width in different frequency plans from 12.5 to 100 GHz. The refinement of the sampling theorem for the dispersion channel is given and it is shown that the transmission rate in such a channel can be significantly lower than the Nyquist speed. A method for calculating the potential transmission rate for systems with a bandwidth of about 200...300 THz is proposed. It is shown that in this case, the transmission rate can be increased by approximately an order of magnitude. The calculations for the frequency plan with an uneven bandwidth of individual channels are presented. In this case, the bandwidth is selected from the condition of equal transmission speeds. At the same time, the transmission speed at a distance of 100 km can theoretically be increased to 500...1500 Tbit / s when using an already laid cable.

**Key words:** fiber optic transmission systems, standard optical fiber, dispersion, group velocity dispersion coefficient, maximum transmission speed, sampling theorem.

В статье [1] сделан вывод о том, что в ближайшее время может возникнуть необходимость радикального технического перевооружения волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Причина: резкое возрастание объемов обрабатываемого трафика на узлах агрегации [2]. В этих условиях содержательной научно-технической задачей является сравнение эффективности промышленных ВОСП и экспериментальных ВОСП с некоторыми теоретически достижимыми пределами по различным показателям. Понятно, что данная задача не может быть решена в рамках одной статьи. Поэтому ограничимся достаточно узкой целевой направленностью.

**Целью статьи** является установление теоретических пределов скорости передачи ВОСП с длиной регенерационных (РУ) участков порядка 100...500 км. При этом полагается, что в линейно-кабельных сооружениях используется проложенный в настоящее время оптический кабель (ОК) со стандартным одномодовым волокном (ОВ). Использование таких ВОСП характерно для опорных (магистральных) сетей национальных операторов.

**Используемые показатели и база сравнения.** В качестве характеристик эффективности ВОСП с точки зрения пропускной способности в разных аспектах используются три основных показателя.

1. Показатель спектральной эффективности (ПСЭ [(бит/с)/Гц]) – скорость передачи в бит/с на герц полосы канала. Данный показатель удобен для сравнения скорости передачи в узкополосных системах или в отдельных частотных каналах (в современных ВОСП от 25 до 100 ГГц, или от 0,2 до 0,8 нм в окрестности длины волны порядка 1550 нм).

2. Общая или суммарная скорость передачи в многоканальной ВОСП (ССП [бит/с]). Данный показатель подразумевает, что возможные длины РУ ВОСП соответствуют назначению систем передачи и не превышают их максимальной длины.

3. Суммарная скорость передачи с учетом достигнутой длины РУ  $L$  (ССПД). Определяется как произведение  $ССП \cdot L$  [(бит/с) • км]. Данный показатель наиболее удобен для сравнения экспериментальных (рекордных) ВОСП.

Рассмотрим значения ПСЭ и ССП для современных промышленных ВОСП выбранного класса. Интерфейсы этих ВОСП, в основном, соответствуют рекомендациям МСЭ-Т G.698.1. Данный стандарт предусматривает использование трех волновых диапазонов: S – от 1460 до 1530 нм; C – от 1530 до 1565 нм; L – от 1565 до 1625 нм. Общий диапазон S-C-L делится на частотные полосы шириной 100 ГГц (порядка 0,8 нм в длинах волн). Линейная скорость передачи в каждом частотном канале от 2,5 Гбит/с до 10 Гбит/с (точнее, от 2,4 до 10,71 Гбит/с). В каналах используется бинарное кодирование класса NRZ 10 G (без возврата к нулю – кодирование NRZ). Предполагается использование ОВ по стандартам G.652, G.653 и G.655. В большинстве реальных ВОСП используется стандартное волокно G.652. В частности, таким волокном по умолчанию комплектуется кабель типа ОКЛБг производства ПАТ «Одескабель» [4].

Как видим, для данного стандарта значение ПСЭ составляет максимум 0,1 (бит/с)/Гц для отдельного частотного канала. Общая полоса от 1460 до 1625 нм соответствует частотам от 184,62 до 205,48 ТГц. Ширина полосы, таким образом, составляет примерно 20,86 ТГц. Соответственно, в такой полосе можно организовать до 200 частотных каналов шириной 100 ГГц каждый. Тогда значение ССП будет 2 Тбит/с. Реально применяются мультиплексоры с 16...96 частотными каналами. При этом ССП не превышает 1 Тбит/с. С учетом типичных длин РУ реальных ВОСП порядка 80...100 км показатель ССПД составляет максимум 200 (Тбит/с) • км. Более современный стандарт G.694.1 [5] предполагает использование частотной сетки в тех же диапазонах S, L, C с шагом 50, 25 и 12,5 ГГц. Само по себе уменьшение ширины полос отдельных каналов имеет, разве что, маркетинговый смысл: сдать в аренду побольше «лямбд». С технической точки зрения такая операция скорее вредна, поскольку увеличивает накладные расходы на обработку данных из большего количества подканалов. В предположении, что скорость передачи в отдельном канале также будет достигать 10 Гбит/с, для сетки с шагом 12,5 ГГц получим, соответственно, увеличение всех показателей в 8 раз: ПСЭ = 0,8 (бит/с)/Гц; ССП = 8 Тбит/с; ССПД = 1600 (Тбит/с) • км.

В экспериментальных ВОСП [6] значения ПСЭ достигает значений 2 (бит/с)/Гц и более. При этом используются различные методы уплотнения: применение квадратурно-амплитудной модуляции (от QAM-16 до QAM-256); поляризационного уплотнения и т.п. При этом не совсем понятно, о какой общей полосе идет речь и какова длина РУ.

Рекордные значения ССП достигают по отдельным источникам 20 Тбит/с на расстоянии 6860 км (показатель ССПД  $\approx$  140000 (Тбит/с) • км) [7] и даже порядка 160 Тбит/с на расстоянии 1000 км (ССПД  $\approx$  160000) [8]. Сведения о способе кодирования информации присутствуют в том и другом случае. Важные сведения об организации волоконно-оптической линии передачи (ВОЛС) – отсутствуют. Так, не ясно как на каких дистанциях организованы точки усиления или регенерации сигнала. А эта информация принципиально важна для решаемой задачи. Например, в сообщении [9] говорится о достигнутом значении ССП = 15,5 Тбит/с на расстоянии 10000 км (ССПД = 155000). Более внимательное ознакомление с сообщением показывает, что по трассе ВОЛС предполагается установка промежуточных усилителей через каждые 80 км. Опять-таки не понятно, не выполняют ли усилители частично функции регенераторов (например, частичное шумоподавление). Более понятная информация дается в источнике [10], где значение ССП = 400 Гбит/с на расстоянии 12800 км (ССПД = 5120 (Тбит/с) • км). В данном случае

передача осуществляется без промежуточного усиления. Шумоподавление осуществляется на стороне приема.

Применяемые для увеличения рассматриваемых показателей методы неравнозначны для исследуемого класса ВОСП. Например, методы распараллеливания информационных потоков в нескольких волокнах или в нескольких сердцевинах одного и того же волокна [4] теоретически абсолютно логичны. А вот с экономической точки зрения практически неприменимы: перекладка существующего кабеля требует огромных затрат – от \$500000 за 100 км кабеля.

С учетом противоречивости значений показателей, выполним анализ возможных пределов скорости передачи на основе фундаментальных научных положений.

**Теорема отсчетов для канала с дисперсией.** Доступный для ВОСП диапазон длин волн в различных источниках [4, 11, 12] и для разных условий приблизительно ограничивается полосой от 500 до 2000 нм (или, от 150 до 600 ТГц). Общая ширина полосы при этом составляет 450 ТГц. Далее ограничимся рассмотрением полосы частот от 200 до 500 ТГц. Условно положим, что на стороне приема выполняется перенос спектра сигнала в низкочастотную область. Для канала без искажений в соответствии с теоремой отсчетов (Найквиста-Котельникова) [13] потенциальная скорость передачи в такой полосе может достигать соответственно ССП = 600 Тбит/с. При этом речь идет о бинарном, точнее, двухуровневом кодировании «без возврата к нулю» (NRZ), что соответствует названным выше стандартам DWDM [3,5]. Для восстановления сигнала применяется разложение по отсчетам в ряд Уиттекера:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(m\Delta t) \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta t} (t - m\Delta t) \right], \quad \Delta t = \frac{1}{F_d}, \quad F_d \geq 2F_{\max}, \quad (1)$$

где  $s(n\Delta t)$  – значение сигнальной функции (отсчет) в точке  $m\Delta t$ ;  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;  $F_d$  – частота дискретизации, которая, в общем, может быть больше удвоенной верхней границы полосы частот  $F_{\max}$  (в нашем случае 300 ТГц).

Прямое использование представлений вида (1) возможно при относительно низких частотах  $F_{\max}$ , например для восстановления оцифрованных речевых сигналов. При этом предполагается, что есть некий аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), который действительно способен дать последовательность отсчетов с шагом  $\Delta t$ . Применительно к ВОСП такое представление не является конструктивным. В самом деле, для восстановления данных из канала шириной 50 ТГц требовалось бы выполнять отсчеты сигнальной функции с шагом  $\Delta t = 10$  пс, что, конечно, далеко выходит за пределы быстродействия современных полупроводниковых АЦП. Вместе с тем, представление (1) дает некоторую информацию о передаче сигналов со скоростью Найквиста. Но данная оценка для ВОСП, в общем, некорректна. Покажем это.

Идеальное восстановление сигнала в промежуточных точках  $t: m\Delta t < t < (m+1)\Delta t$  (в чем, собственно, и смысл теоремы отсчетов) требует суммирования бесконечного количества функций. Практически приходится ограничиться некоторым конечным числом таких функций [14]. Каким именно числом? Рассмотрим случай четных сигнальных функций  $s(t)$ . Этого достаточно для качественного анализа.

Поскольку теорема отсчетов включает в рассмотрение исключительно функции с конечной энергией, т.е. функции, интегрируемые с квадратом, то «хвосты» этих функций убывают при  $|t| \rightarrow \infty$ . Тогда найдется такой временной отрезок  $\pm T(\varepsilon)$ , что

$$\frac{1}{E_s} \int_{-T(\varepsilon)}^{T(\varepsilon)} s^2(t) dt \geq 1 - \varepsilon, \quad E_s = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt, \quad (2)$$

где  $E_s$  – энергия сигнала. Иными словами, в отрезке  $\pm T(\varepsilon)$  сосредоточивается почти вся энергия сигнала, за исключением некоторой доли энергии  $\varepsilon$ , величина которой зависит от конкретной решаемой задачи. Интервал  $\pm T(\varepsilon)$  далее будем называть расчетным носителем сигнала (РНС), а его протяженность  $2T(\varepsilon)$  – расчетной длительностью сигнала (РДС) с параметром  $\varepsilon$ . Тогда на РНС будет сосредоточено приблизительно  $2M$  отсчетов с шагом  $\Delta t$ . Здесь мы не учитываем незначительных краевых эффектов, т.е. если  $T(\varepsilon) \gg \Delta t$ , то  $M \approx T(\varepsilon)/\Delta t$ .

С учетом конечного числа слагаемых ряда (1) на РНС, в итоге суммирования будет определена не сигнальная функция  $s(t)$ , а какая-то другая функция:

$$s^*(t) = \sum_{m=-M}^M s(m\Delta t) \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta t} (t - m\Delta t) \right] \neq s(t). \quad (3)$$

Поскольку функции  $\operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta t} (t - m\Delta t) \right]$  взаимно ортогональны, то можно показать, что параметр  $\varepsilon$  одновременно является мерой различия функций  $s^*(t)$  и  $s(t)$ :

$$\frac{1}{E_s} \|s(t) - s^*(t)\|^2 = \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^{\infty} [s(t) - s^*(t)]^2 dt \approx \varepsilon. \quad (4)$$

В принципе, выбирая параметр  $\varepsilon$  в формуле (2) сколь угодно малым, можно сделать также и сколь угодно малой ошибку аппроксимации (4). Здесь, конечно, есть небольшая математическая тонкость: сходимость в среднеквадратическом еще не является сильной (поточечной) сходимостью. Но для более-менее гладких функций, которые и рассматриваются в большей части, можно считать эти сходимости эквивалентными. Как повлияет на полученные выводы учет искажений в канале ВОСП?

Пренебрегая наличием шумов в канале и полагая, что сигнал недостаточно мощный, чтобы вызывать нелинейные эффекты, преобразование в среде ВОЛС можно представить в виде линейного оператора [15]:

$$s_z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega) H(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad G_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (5)$$

$$H(\omega) = H_{att}(\omega) H_{disp}(\omega), \quad H_{att}(\omega) = e^{z\mu(\omega)}, \quad H_{disp}(\omega) = e^{-jz\varphi(\omega)},$$

где  $s_0(t)$  и  $s_z(t)$  – сигналы на входе и выходе ВОЛС;  $G_0(\omega)$  – спектральная плотность сигнала в точке ввода;  $H(\omega)$  – общий частотный коэффициент передачи (ЧКП);  $H_{att}(\omega)$  – частотный коэффициент передачи по затуханию (ЧКЗ);  $H_{disp}(\omega)$  – частотный коэффициент передачи по дисперсии (ЧКД);  $z$  – расстояние от точки ввода (длина РУ). Здесь речь идет о низкочастотной составляющей сигналов, которые и несут информацию. Неявно предполагается, что выполнен перенос спектра в среднюю точку  $\omega_0 = 0$ .

Проанализируем в самом общем плане влияние отдельных компонентов произведения функций (5) на спектр сигнала. ЧКД влияет на фазовый спектр сигнала, но не изменяет амплитудного и, тем самым, энергетического спектра. Соответственно, если  $G_0(\omega)$  – финитная функция, ограниченная полосой частот  $\pm \Omega_{\max}$ , то и произведение  $G_0(\omega) H_{disp}(\omega)$  будет ограничено ровно этой же полосой. ЧКЗ может сузить полосу

произведения  $G_0(\omega)H_{att}(\omega)$ , но не может ее расширить. В типичных полосах отдельных каналов DWDM (12,5...100 ГГц), где значение  $\Omega_{max}$  находится в пределах 25...200 пГрад/с, можно считать ЧКЗ постоянной функцией. При соответствующем усилении на стороне приема влиянием ЧКЗ на форму сигнала вообще можно пренебречь. Тогда считаем, что полоса сигнала на стороне передачи и на стороне приема одинаковы. При этом сигнал претерпевает дисперсионное уширение.

Допустим, что вследствие дисперсии РДС сигнала  $s_z(t)$  на стороне приема удвоилась по сравнению с РДС сигнала  $s_0(t)$  на стороне передачи. Тогда для восстановления сигнала  $s_z(t)$  с той же ошибкой  $\varepsilon$ , что и на стороне передачи, очевидно, надо будет в сумме (3) уже не  $2M$ , а  $4M$  слагаемых. При этом шаг отсчетов  $\Delta t$  не изменяется, поскольку полоса  $\pm \Omega_{max}$  остается неизменной. Но требуемое количество отсчетов все-таки увеличилось вдвое. Это эквивалентно тому, что для функции  $s_0(t)$  вдвое уменьшился шаг отсчетов  $\Delta t_z = \Delta t / 2$ .

Таким образом, приходим к выводу: *удлинение импульса на стороне приема в  $\alpha$  раз эквивалентно сокращению частотной полосы на стороне передачи в те же  $\alpha$  раз*. Следует ли из этого, что скорость Найквиста также уменьшится всего в  $\alpha$  раз? Такого вывода сделать нельзя по двум причинам.

Первая: для обеспечения теоретического максимума скорости передачи необходимо, чтобы сигнальные функции удовлетворяли одному из критериев Найквиста в зависимости от способа детектирования на стороне приема [16]. Но вследствие преобразований (5) в ОБ сигналы существенно изменяют свою форму и на стороне приема могут уже не удовлетворять критериям Найквиста.

Вторая: сумма (3), включающая в данных предположениях  $2\alpha M$  слагаемых, даст приближение с ошибкой порядка  $\varepsilon$  сигнала  $s_z(t)$  на стороне приема. Но этот сигнал, по сути, нам не нужен. Он является лишь искаженным образом сигнала на стороне передачи  $s_0(t)$ . Именно сигнал  $s_0(t)$  содержит информацию, заложенную в него источником сообщения. Для восстановления сигнала  $s_0(t)$  на основании суммы (3) необходимо выполнить дополнительные преобразования в виде операции свертки:

$$s_0(t) = \sum_{m=-\alpha M}^{\alpha M} \int_{-\infty}^{\infty} s_z(m\Delta t) \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta t} (t - m\Delta t) \right] h^{-1}(t - \tau) d\tau, \quad h^{-1}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{H(\omega)} e^{-j\omega t} d\omega,$$

где  $h^{-1}$  – импульсная характеристика некоторого преобразователя, выполняющего обратное преобразование по отношению к преобразованию (5). Частично функции такого преобразования выполняют усилители и компенсаторы дисперсии [17]. Но пассивные компенсаторы дисперсии решают задачу в относительно небольших полосах частот. Мы же рассматриваем сверхширокополосные ВОСП.

Уточним полученные качественные выводы на относительно простой модели.

**Параметрические решения.** Условно положим, что допустимое затухание не должно превышать 40 дБ, а длина усилительных участков по трассе ВОЛС не может быть меньше 10 км. Тогда значение коэффициента затухания не должно превышать 4 дБ/км, что выполняется для рассматриваемого диапазона длин волн (рис. 1 [6]). Будем полагать, что на стороне приема затухание сигнала скомпенсировано полностью, причем без деформации спектра за счет неидеальных характеристик промежуточных усилителей. Тогда в определении оператора (5) ограничимся рассмотрением ЧКД.

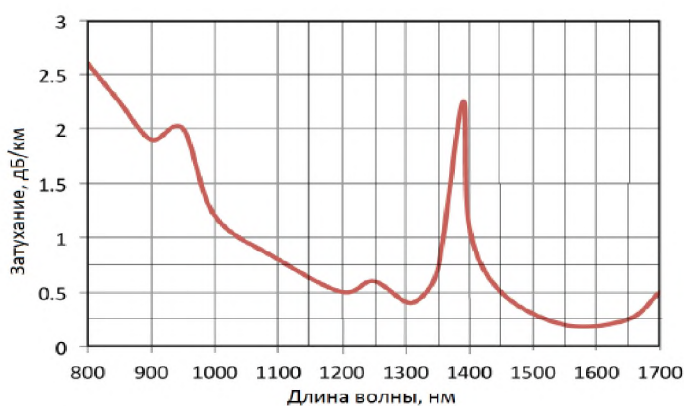


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента затухания от длины волны

В условиях решаемой задачи достаточно рассмотреть модель ЧКД в виде дисперсии групповых скоростей (ДГС) [11]:

$$s_z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega) \exp[j\omega t - \beta_2(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2] d\omega, \quad (6)$$

где  $\beta_2$  – коэффициент дисперсии групповых скоростей (КДГС);  $\omega_0$  – несущая (центральная) частота излучения лазера. График зависимости КДГС от длины волны для кварцевого стекла дан на рис. 2.

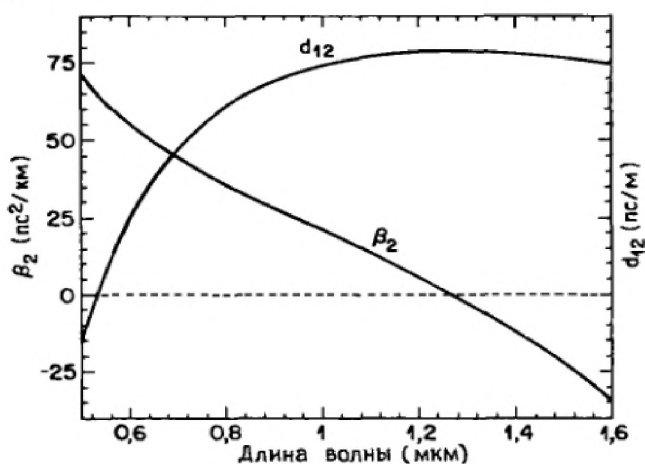


Рисунок 2 – Зависимость КДГС от длины волны [11]

Эквивалентные определения КДГС в модели (6) даются формулами:

$$\beta_2(\omega_0) = \left. \frac{d}{d\omega} \frac{1}{V_{gr}(\omega)} \right|_{\omega_0} = - \frac{V_{gr}'(\omega_0)}{V_{gr}^2(\omega_0)} = \frac{1}{c} \left[ 2 \left. \frac{dn(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega_0} + \omega_0 \left. \frac{d^2n(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega_0} \right], \quad (7)$$

где  $V_{gr}(\omega)$  – зависимость групповой скорости от частоты;  $c$  – скорость света в вакууме;  $n(\omega)$  – зависимость коэффициента преломления от частоты. График на рис.2 построен с использованием формулы Селмейера. На рис. 3 даны аналогичные графики, рассчитанные по таблицам [18]. Заметим, что на рис. 2 и 3 дана размерность КДГС [пс<sup>2</sup>/км]. Для решаемой задачи тот же коэффициент с учетом порядка дифференцирования в формулах (6) удобно представить в эквивалентной размерности [пс/(ТГц•км)]. Поскольку модель (6) является фактически аппроксимационной формулой, то она применима для относительно узких полос частот. Тогда размерность КДГС приводится к виду [пс/(ТГц•км)] с соответствующим учетом порядков. Также КДГС лучше представить в зависимости от частоты, что показано на рис. 4.

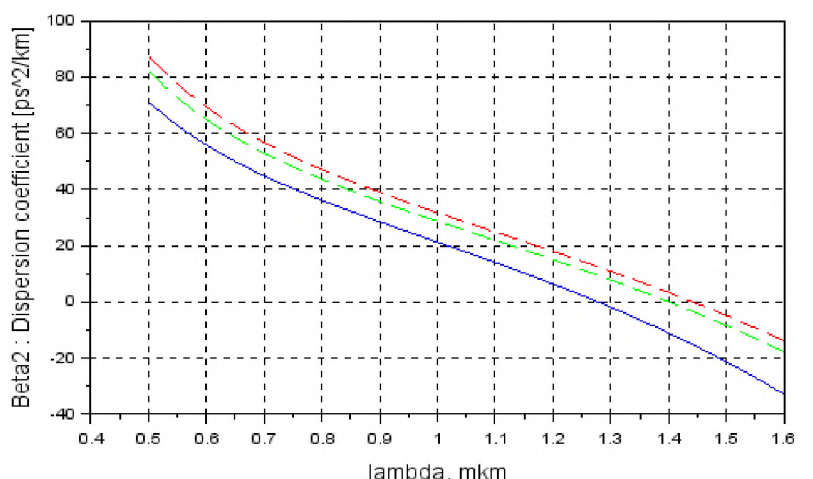


Рисунок 3 – Зависимости КДГС от длины волны для материалов SiO<sub>2</sub>, 94% SiO<sub>2</sub>6%GeO<sub>2</sub>, 87% SiO<sub>2</sub>13%GeO<sub>2</sub> (чем выше график, тем больше содержание двуокиси германия)

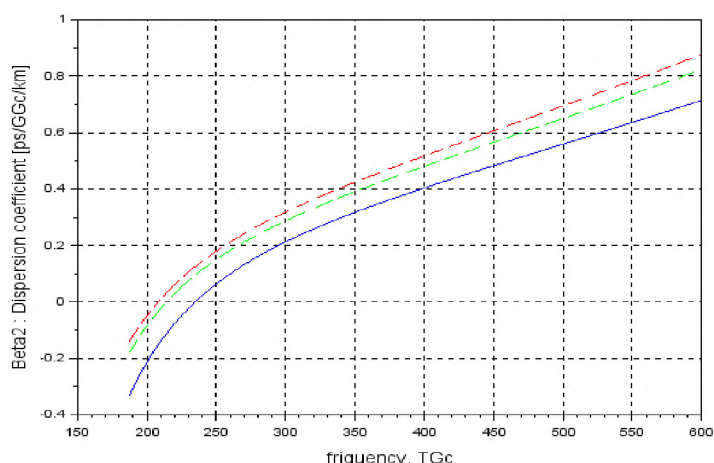


Рисунок 4 – Зависимости КДГС от частоты для материалов SiO<sub>2</sub>, 94% SiO<sub>2</sub>6%GeO<sub>2</sub>, 87% SiO<sub>2</sub>13%GeO<sub>2</sub> (чем выше график, тем больше содержание двуокиси германия)

Из графиков на рис. 3 и 4 видно, что в коротковолновой области (в области высоких частот) значения КДГС для выбранных материалов могут достигать значительных величин. Так, при значении порядка 0,5 [пс/(ГГц•км)] (на частоте несущей порядка 450...500 ГГц) расчетное значение дисперсии для канала шириной порядка 100 ГГц на расстоянии 100 км составляет примерно 5000 пс. Скорость передачи в таком канале не может превысить 0,2 Гбит/с. Соответственно, при умеренном значении КДГС порядка 1 [пс/(ГГц•км)] получим оценку предельной скорости передачи не более 10 Гбит/с. Здесь мы неявно положили, что длительность импульса на стороне приема приблизительно равна дисперсионному приращению:  $T_c(z) \approx \Delta T(z)$ . Для более точного анализа следует учитывать, что  $T_c(z) = T_0 + \Delta T(z)$ , где  $T_0$  – длительность импульса на стороне передачи. Оценка приращения длительности сигнала на стороне приема дается формулой [1]:

$$\Delta T(z) = 6|\beta_2(\omega_0)|z\sqrt{\Delta\Omega^2}, \quad \Delta\Omega^2 = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G_0^2(\omega) d\omega, \quad E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G_0^2(\omega) d\omega, \quad (8)$$



где  $\Delta\Omega^2$  – эффективная ширина спектра сигнала, а под частотой  $\omega$  понимается отклонение от несущей  $\omega_0$ . В таком представлении приращение длительности импульса не зависит от вида спектральной плотности. Но общая длительность импульса на стороне приема зависит также и от вида спектральной плотности.

Рассмотрим теоретический пример, когда спектральная плотность сигнала равномерна в полосе частот:  $G_0(\omega) = \text{rect}[-\Omega, \Omega]$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 50$  ГГц (рис. 5).

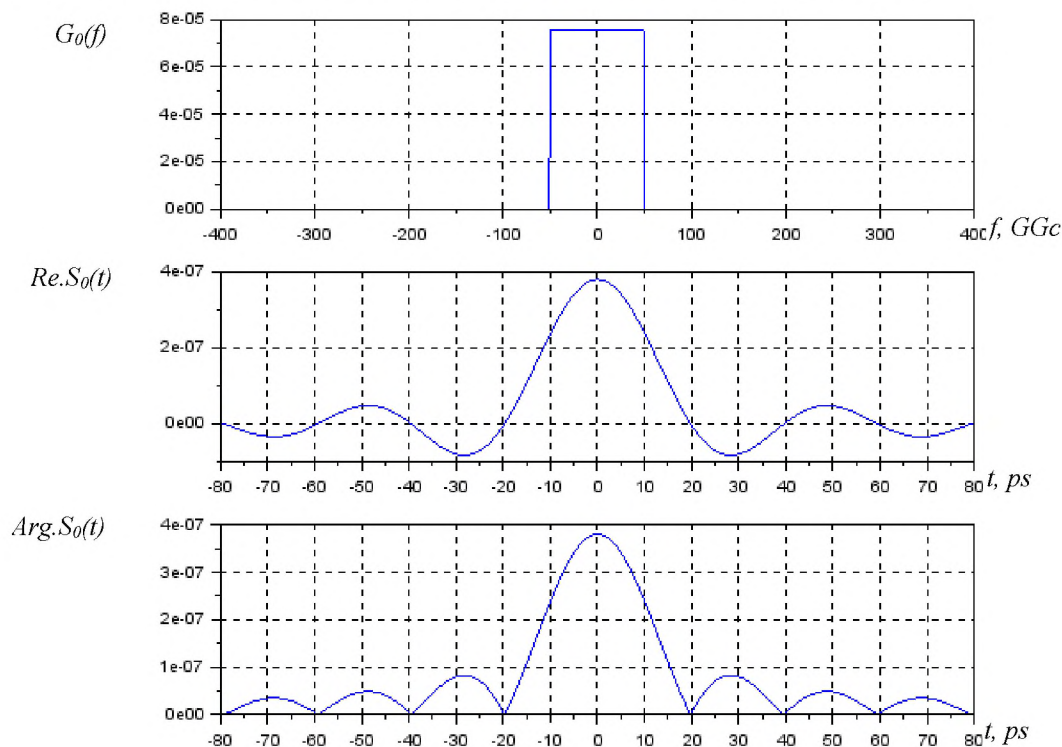


Рисунок 5 – Спектральная плотность и временные функции простейшего сигнала Найквиста

Во временной области такой сигнал имеет вид функции  $\text{sinc}(x)$  и удовлетворяет первому критерию Найквиста [16]. Скорость передачи в заданной полосе теоретически может достигать 200 Гбит/с. При этом не учтены эффекты эволюции формы сигнала, что показано на рис. 6. Как видим, уже на относительно коротком расстоянии порядка 20 км сигнал существенно изменяется и перестает удовлетворять критерию Найквиста. С учетом начальной длительности сигнала порядка 10 пс на расстоянии 100 км при КДГС = 1 [пс/(ГГц•км)] значение  $T_c(100 \text{ км}) \approx 110$  пс и скорость передачи будет ограничена 10 Гбит/с. Как видим, в условиях дисперсии скорость передачи уменьшилась в данном случае в 20 раз по сравнению со скоростью Найквиста!

Если считать явление дисперсии принципиально неустранимым, то оптимальным сигналом для передачи в узкополосном канале при бинарном кодировании будет импульс с минимальной базой:  $\Delta T \Delta F \rightarrow \min!$  Данный критерий несколько уточнен применительно к решаемому классу задач и введено понятие критерия минимума приведенной базы [1]:

$$T_c(z=L)\Delta F(z=0) \rightarrow \min! , \quad (9)$$

где длительность сигнала определяется на стороне приема ( $z=L$ , где  $L$  – длина линии передачи), а ширина спектра – на стороне передачи. В той же работе показано, что критерию (9) удовлетворяет гауссов импульс. Пример эволюции такого импульса дан на рис. 7. Для импульсов Найквиста со спектральной плотностью в виде приподнятого косинуса критерий (9) удовлетворяется при коэффициенте скругления равном единице [19].

В этих случаях скорость передачи удается увеличить приблизительно в 1,5 раза по сравнению с сигналом с равномерной спектральной плотностью, если передача осуществляется на частотах, близких к точке нулевой дисперсии.

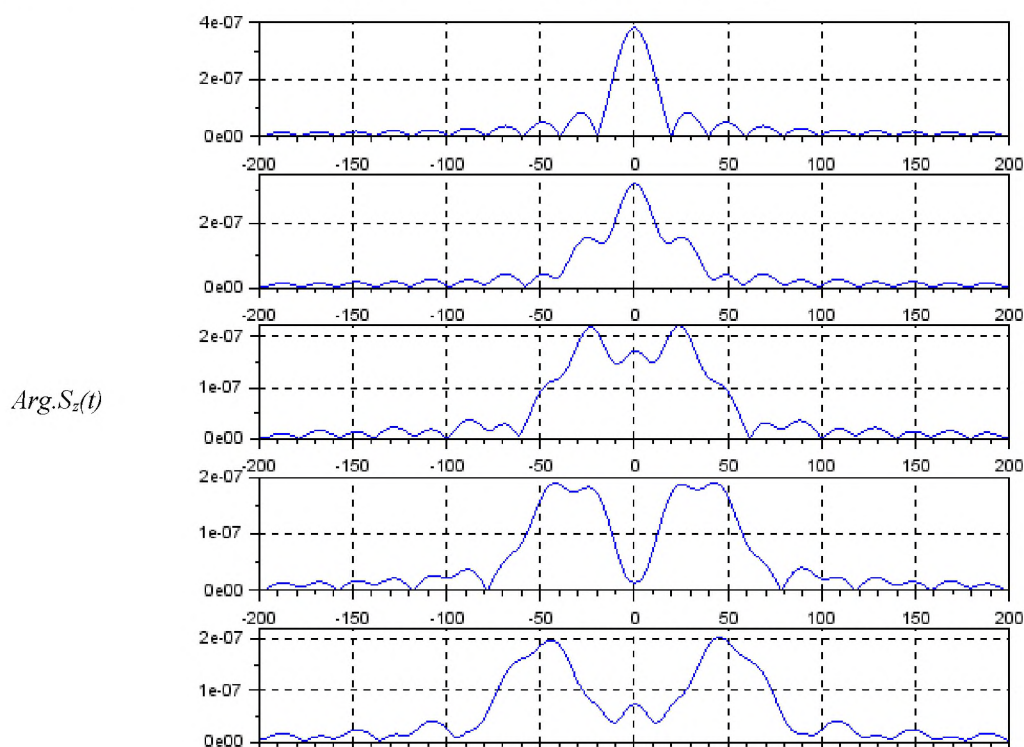


Рисунок 6 – Эволюция модуля импульса с равномерной спектральной плотностью на расстоянии 0, 20, 40, 60 и 80 км при КДГС = 10 пс/(ТГц•км)

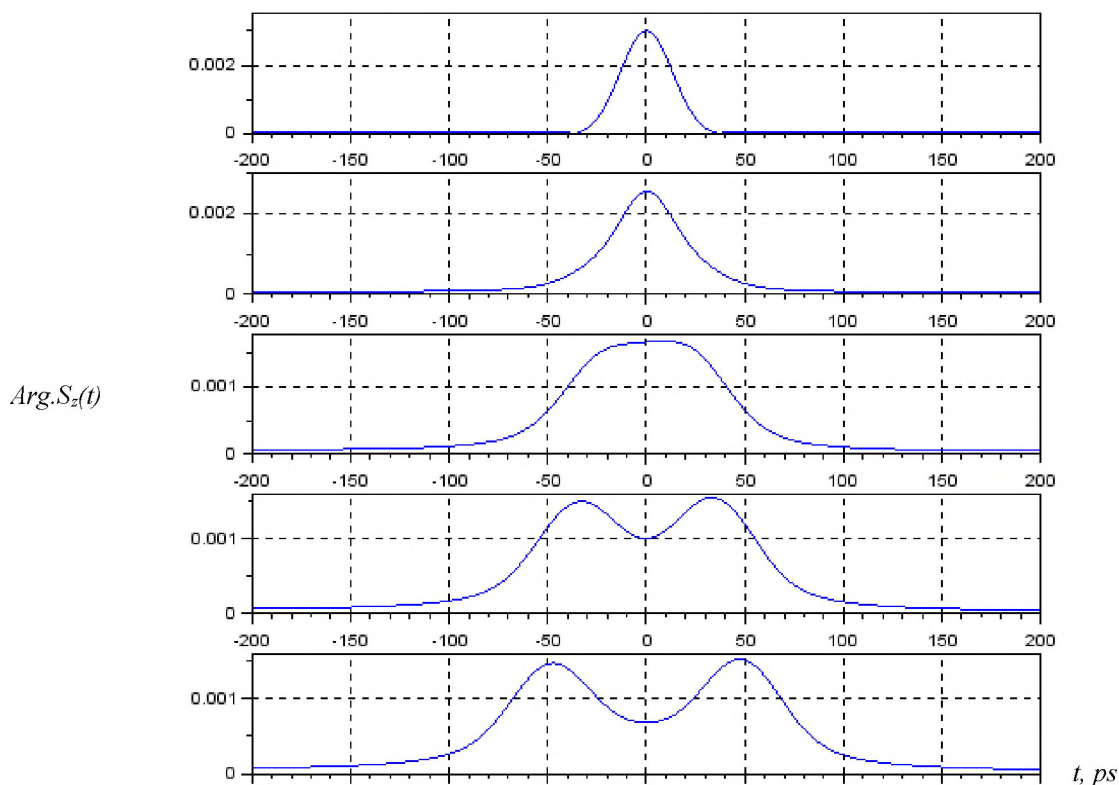


Рисунок 7 – Эволюция модуля импульса с гауссовой спектральной плотностью на расстоянии 0, 20, 40, 60 и 80 км при КДГС = 10 пс/(ТГц•км)

**Параметрические оценки для сверхширокополосных ВОСП.** Рассмотрим ВОСП с общей шириной полосы порядка  $\Delta F_{\Sigma} = 200$  ТГц (рис. 8). Положим, что на стороне передачи база сигнала  $T_0 \Delta F_1 \approx 1$ , где  $\Delta F_1$  – ширина полосы отдельного канала при равномерном частотном плане. Общее количество таких каналов будет  $M = \Delta F_{\Sigma} / \Delta F_1$ . Тогда максимальное значение ССП на расстоянии  $z$  определяется:

$$W_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M W_m, \quad W_m = [T_0 + \beta_2(f_{0m})z\Delta F_1]^{-1}, \quad (10)$$

где  $\beta_2(f_{0m})$  – значение КДГС в окрестности центральной частоты  $f_{0m}$  для  $m$ -го канала.

Анализ графиков на рис. 3 и рис 4. показывает, что в широком диапазоне длин волн и частот КДГС хорошо аппроксимируется кубическим полиномом. Но в полосе частот 300... 500 ТГц достаточно точной является аппроксимация линейной функцией.

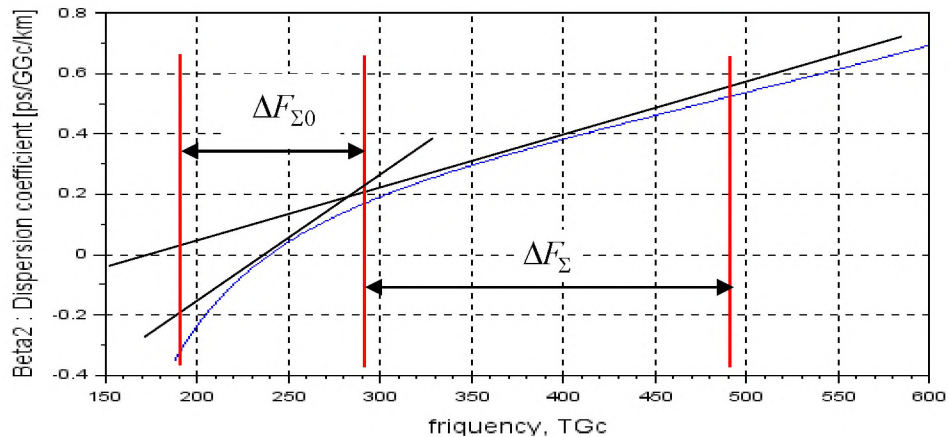


Рисунок 8 – Кусочно-линейная аппроксимация КДГС

Тогда в обозначенной полосе можно приблизительно считать, что  $\beta_2(f_{0m}) \approx \Delta\beta_2(300 \text{ ТГц}) + \Delta\beta(f_{0m} - 300 \text{ ТГц})$ , где градиент  $\Delta\beta \approx 0,2$  [пс/(ТГц•км)] на каждые 100 ТГц. Формулу (10) представим для данного случая в виде:

$$W_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M W_m = \sum_{m=1}^M \frac{1}{T_0 + z\Delta F_1[\beta_2(f_{01}) + m\Delta\beta]}, \quad f_{01} = 300 \text{ ТГц}. \quad (11)$$

Расчеты по формуле (11) для первой полосы шириной 100 ТГц на расстоянии 100 км дают приблизительную оценку  $W_1 \approx 0,5$  Гбит/с, а для последней полосы  $W_{2000} \approx 0,167$  Гбит/с. Соответственно, значения ПСЭ будут примерно 0,005 (бит,с)/Гц и 0,00167 (бит/с)/Гц. Более точные значения основных показателей для этого случая и для разных частотных планов даны в табл. 1.

Таблица 1 – Значения показателей скорости передачи в полосе 300... 500 ТГц ( $L = 100$  км)

Полоса канала $\Delta F_1$ , ГГц	Количество каналов М	Максимум ПСЭ в канале, (бит/с)/Гц	Минимум ПСЭ в канале, (бит/с)/Гц	ССП $W_{\Sigma}$ , Тбит/с	ССПД $W_{\Sigma} \cdot 100 \text{ км}$ , Тбит/с•км
100	2000	4.97018E-03	1.66389E-03	0,55	55
50	4000	1.95886E-02	3.98406E-03	1,59	159
25	8000	7.40056E-02	8.81057E-03	4,25	425
12,5	16000	2.42241E-01	1.84758E-02	10,3	1003

Анализ табл. 1 показывает, что значение ПСЭ уменьшается при использовании высокочастотных каналов. В то же время, уменьшение ширины полос приводит к

существенному увеличению показателя ССП. Данные выводы довольно очевидны, поскольку в условиях большой дисперсии длительность сигнала на стороне приема будет в наибольшей степени определяться его дисперсионным расширением. Менее очевидно, что даже в условиях сильной дисперсии значение ССП может достигать довольно больших значений порядка 0,5...10 Тбит/с. В окрестности точки нулевой дисперсии (200...300 ТГц на рис. 8) значение градиента  $\Delta\beta$  примерно вдвое больше, чем в ранее рассмотренном случае. Но при этом достигается гораздо большее значение ПСЭ вблизи точки нулевой дисперсии. Расчеты для этого случая даны в табл. 2.

Таблица 2 – Значения показателей скорости передачи в полосе 200...300 ТГц ( $L = 100$  км)

Полоса канала $\Delta F_1$ , ГГц	Количество каналов М	Максимум ПСЭ в канале, (бит/с)/Гц	Минимум ПСЭ в канале, (бит/с)/Гц	ССП $W_\Sigma$ , Тбит/с	ССПД $W_\Sigma \cdot 100\text{км}$ , Тбит/с·км
100	1000	7.14286E-01	2.49377E-03	1,45	145
50	2000	9.09091E-01	4.97512E-03	2,63	263
25	4000	9.75610E-01	9.90099E-03	4,60	460
12,5	8000	9.94273E-01	2.04090E-02	8,10	810

Как видим, использование сверхширокополосной передачи в полосе порядка 300 ТГц теоретически позволяет передавать информацию со скоростью от 2 Тбит/с приблизительно до 20 Тбит/с. При этом используется двухуровневое кодирование формата NRZ. Но даже и в этом случае получается увеличение основного параметра ССП примерно в 2-10 раз по сравнению с промышленными ВОСП. Хотя, полученные оценки все-таки в 30 раз меньше скорости Найквиста. Значения ССП на расстояниях 300 и 500 км будут, соответственно, примерно в 3 и 5 раз меньше, а значения ССПД останутся приблизительно такими же.

В рассматриваемой модели зависимость  $\beta_2(f_{0m})$  представлена кусочно-линейной аппроксимацией в двух диапазонах частот. Аналогичный подход применяется и в стандарте МСЭ-Т 656 [20]. Более точные оценки получаются численными методами, но они не значительно отличаются от приведенных выше. Вместе с тем, ряд важных факторов, снижающих скорость передачи, не учтен: другие виды дисперсии, энергетические потери, наличие нелинейных эффектов и прочее. С другой стороны, скорость передачи может быть значительно увеличена за счет компенсации дисперсии. Главный недостаток нашего анализа заключается в том, что оценки получены для материала сердцевины SiO<sub>2</sub>.

Дисперсионные характеристики реальных ОВ можно приблизительно оценить по формулам стандарта [20]. Здесь в полосе длин волн 1460...1550 нм (193,55...205,48 ТГц) коэффициент хроматической дисперсии  $D_{cr}$  [пс/(нм·км)] рассчитывается по формуле:  $2,6(\lambda - 1460)/90 + 1$ , а в диапазоне 1550...1625 нм (184,62...193,55 ТГц) по формуле:  $4,72(\lambda - 1550)/75 + 9,28$ , где параметр  $\lambda$  берется в нм. Вычисления по данным формулам дают:  $D_{cr}(1460 \text{ нм}) = 1,0$ ;  $D_{cr}(1550 \text{ нм}) = 3,6$ ;  $D_{cr}(1625 \text{ нм}) = 7,5$  [пс/(нм·км)]. Переведем эти значения из отношений к длине волны к полосе 1 ТГц. Одному нанометру соответствуют полосы: 140,74 ГГц вблизи длины волны 1460 нм, 124,87 ГГц вблизи длины волны 1550 нм и 113,61 вблизи длины волны 1625 нм. Тогда, выполнив необходимые расчеты, получим значения градиента КДГС в расчете на каждые 100 ТГц:  $\Delta\beta \approx 0,18$  [пс/(ГГц·км)] для диапазона 193,55...205,48 ТГц и  $\Delta\beta \approx 0,41$  [пс/(ГГц·км)] для диапазона 184,62...193,55 ТГц. Как видим, полученные значения хорошо согласуются с ранее принятыми для расчетов по табл. 1 и 2. При этом наблюдается аналогичная закономерность: при удалении от точки нулевой дисперсии в сторону высших частот градиент КДГС

постепенно уменьшается.

Вывод о том, что повышение пропускной способности ВОСП следует искать только на пути расширения общей полосы используемых частот, является преждевременным. Здесь мы рассмотрели передачу информации на относительно низком – канальном – уровне модели OSI-7. Приемнику информации нужны, в итоге, не биты и не сигналы, а целостное сообщение. В сетях с коммутацией пакетов не исключен случай, когда фрагменты одного и того же сообщения будут передаваться в разных частотных каналах. Тогда суммарная скорость передачи будет зависеть от минимальной канальной скорости и в пределе достигнет величины  $W_{\Sigma} = MW_1 / M \equiv W_1$ . Тогда, какой смысл увеличивать общую полосу, если можно ограничиться одним каналом с минимальной дисперсией? Конечно, в каналах с малой скоростью передачи можно передавать служебный трафик, широковещательные пакеты и т.п. Но принципиальным выходом, на наш взгляд, является разработка частотных планов с неравными полосами ширины частотных каналов.

Оптимальным частотным планом в этом смысле был бы такой, в котором скорость передачи в отдельных каналах будет одинаковой. Примем, что в условиях сильной дисперсии длительность импульса на стороне приема будет слабо зависеть от его длительности на стороне передачи. Тогда условие равенства скоростей в каналах будет:  $\beta(f_m)\Delta F_m = \beta(f_k)\Delta F_k \quad 1 \leq m, k \leq M$ , где  $\beta(f_m)$  – значение КДГС внутри полосы  $m$ -го канала;  $\Delta F_m$  – ширина этого канала;  $M$  – общее количество каналов по частотному плану. Для рассмотренного выше случая полосы 300...500 ТГц и для линейной аппроксимации

КДГС справедлива рекуррентная формула:  $\left( \beta_0 + \Delta\beta \sum_{k=1}^{m-1} \Delta F_k \right) \Delta F_m = \beta_0 \Delta F_1$ , где

$\beta_0 \approx 0,2$  пс/(ТГц · км) – значение КДГС для минимальной частоты 300 ТГц;  $\Delta\beta \approx 0,2 \cdot 10^{-5}$  пс/(ТГц<sup>2</sup> · км) – градиент КДГС. Для расчетов частотных планов более удобной является эквивалентная рекуррентная формула:

$$\frac{1}{\Delta F_m} = \frac{1}{\Delta F_{m-1}} + \frac{\Delta\beta}{\beta_0} \frac{\Delta F_{m-1}}{\Delta F_1}, \quad 2 \leq m \leq M. \quad (12)$$

Вычислительная процедура запускается с начальным условием, в котором задается значение ширины первой полосы  $\Delta F_1$ . Процедура останавливается по достижении одного

из условий:  $\sum_{k=1}^m \Delta F_k \geq \Delta F_{\Sigma}$  или  $\Delta F_m \leq \Delta F_M$ . Значение  $\Delta F_M$  находится из условия:

$\Delta F_M (\beta_0 + \Delta\beta \Delta F_{\Sigma}) = \Delta F_1 \beta_0$ . В нашем случае  $\Delta F_M \approx \Delta F_1 / 3$ . Варианты расчета частотных планов по алгоритму (12) даны на рис. 9. На рис. 10 дан график относительной ошибки вычисления скорости передачи для частотного плана с  $\Delta F_1 = 37,5$  ГГц,  $\Delta F_M = 12,5$  ГГц. Как видим, относительная разница скоростей в разных частотных каналах пренебрежимо мала.

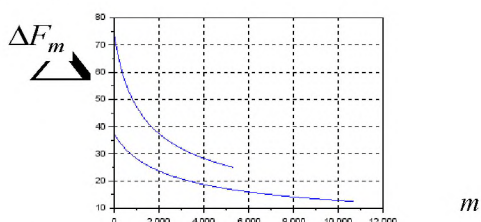


Рисунок 9 – Частотные планы равных скоростей для  $\Delta F_M = 25$  ГГц и  $\Delta F_M = 12,5$  ГГц

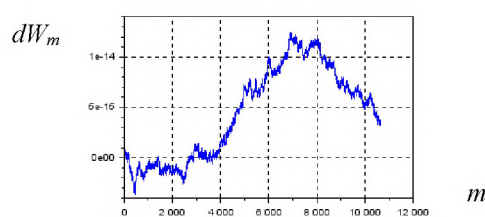


Рисунок 10 – Относительная ошибка  $dW_m = (W_m - W_1) / W_1$

Основные характеристики частотных планов равных скоростей даны в табл. 3. Здесь

самая минимальная полоса для плана с 21330-ю каналами взята равной 6,25 ГГц, что соответствует разрабатываемым в настоящее время перспективным стандартам МСЭ.

Таблица 3 – Характеристики планов равных скоростей (полоса 300...500 ТГц,  $L = 100$  км)

М	F1, ГГц	FM, ГГц	Min СПЕ, (бит/с)/Гц	Max СПЕ, (бит/с)/Гц	ССП, Тбит/с	СПД, Тбит/с•км
4000	100,0	33,33	0,005	0,015	2,0	200
5333	75,00	25,00	0,009	0,027	3,6	360
8000	50,00	16,67	0,020	0,060	8,0	800
10670	37,50	12,50	0,036	0,107	14,2	1420
21330	18,75	6,25	0,142	0,427	56,8	5680

Сравнение данных табл. 1 и 3 позволяет сделать выводы об эффективности частотного плана равных скоростей передачи:

- свойство равенства скоростей в разных каналах инвариантно к длине РУ;
- при равных полосах каналов (для плана по табл. 1 это равные полосы для всех каналов, а для плана по табл. 3 это минимальная ширина полосы) общее количество каналов меньше примерно в 1,5 раза, что существенно для технической реализации;
- при тех же условиях разница СПЕ в низкочастотных и высокочастотных каналах примерно в 3 раза меньше;
- передача данных с равной скоростью в отдельных частотных каналах существенно упрощает решение последующих задач маршрутизации и агрегации сообщений;
- главное: показатели ССП и СПД приблизительно в 1,5 раза больше.

Если к данным табл. 3 добавить данные из диапазона 200-300 ТГц (рис. 8), то суммарные значения ССП и СПД увеличатся примерно вдвое. Итак, при двухуровневом кодировании и при использовании SF-волокна [20] значения ССП на длине РУ 100 км могут достигать для плана равных скоростей примерно 30 Тбит/с, если минимальная ширина полосы 12,5 ГГц и примерно 100 Тбит/с, если минимальная ширина полосы 6,25 ГГц. Данные значения уменьшаются соответственно в 3 и 5 раз при длине РУ 300 и 500 км.

Главный вывод состоит в том, что возможности повышения скорости передачи магистральных ВОСП национальных операторов с длинами РУ 100...300 км далеко не исчерпаны. Одним из направлений повышения эффективности ВОСП можно считать расширение полосы передачи с ныне используемых 20 ТГц до 200...300 ТГц. Использование частотных планов равных скоростей позволяет, в принципе, достичь суммарной скорости передачи до 30...100 Тбит/с на длине РУ 100 км при использовании SF-волокна и бинарном кодировании NRZ. Как видим, для каналов с дисперсией теория сигналов Найквиста оказывается неприменимой, поскольку дает завышенные оценки скорости передачи и не учитывает зависимости этого показателя от длины линии.

Дополнительные возможности повышения скорости передачи можно получить за счет поляризационного мультиплексирования (примерно 3...5 каналов в каждом частотном канале, разнесенных по поляризации) и/или сигнального уплотнения с применением алфавитов сигналов (еще примерно на порядок). Таким образом, показатель ССП может достигать при современном уровне развития техники теоретического предела до 300...1500 Тбит/с на расстоянии 100 км без регенерации. Подчеркнем, что речь идет о передаче в одном стандартном волокне.

Дополнительными методами повышения пропускной способности сверхширокополосных ВОСП можно считать применение полосовой фильтрации на стороне приема с предварительным выделением нескольких широких полос. Приблизительно, такие полосы должны иметь ширину порядка 30 ТГц. Для каждой такой полосы на стороне приема используются компенсаторы дисперсии с характеристиками,

согласованными с дисперсией в данной полосе. В то же время, полученные оценки позволяют избежать грубых ошибок при проектировании перспективных ВОСП: вряд ли реально достижимые скорости передачи будут на порядки больше тех, что дают приведенные выше расчеты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Одегов Н.А. Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 42–72.
2. Odegov N.A. Analysis of non-stationary quasi-periodic internet traffic by the method of instant spectra / N.A. Odegov, D.G. Bahachuk, O.O. Hordienko // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2019. – №1. – С. 121-134.
3. Многоканальные приложения DWDM с одноканальными оптическими интерфейсами // Рекомендация МСЭ-Т G.698.1. – 2005. – 19 с.
4. Официальный сайт ПАТ «Одескабель». Каталог продукции. Волоконно-оптические кабели [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://odeskabel.com/products/vok-kabeli.html>.
5. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // Recommendation ITU-T G.694.1. – 2012. – 16 p.
6. Фокин В.Г. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов // Новосибирск: ФГБОУ ВПО «СибГУТИ». – 2015. – 161 с.
7. 20 Tbit/s transmission over 6860 km with sub-Nyquist channel spacing / J. Cai, C.R. Davidson, A. Lucero et al. // Journal of Lightwave Technology . – 2012. – Vol. 30. – P. 651–657.
8. Установлен новый рекорд скорости передачи данных по оптоволокну [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dailytechinfo.org/infotech/10161-ustanovlen-novyy-rekord-po-skorosti-peredachi-dannyh-po-optovoloknu.html>.
9. Alcatel Boosts Fiber Speed to 100 Petabits in Lab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gigaom.com/2009/09/28/alcatel-lucent-boosts-fiber-speeds-by-10x-in-lab/>
10. Xiang Liu, A. R. Chraplyvy, P. J. Winzer, R. W. Tkach & S. Chandrasekhar. Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit. Nature Photonics (2013). DOI:10.1038/nphoton.2013.109.
11. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
12. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
13. Худяков Г.И. Теорема отсчетов теории сигналов и ее создатели / Г.И. Худяков // Радиотехника и электроника. – 2008, Т. 53, № 9. – С. 1157–1168.
14. Гоноровский М.С. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский М.С. – М: Радио и связь, 1986. – 512 с.
15. Одегов Н.А. Зависимость длительности и формы оптических сигналов от неравномерности коэффициента затухания / Н.А. Одегов, А.И. Гузун // Вісник ХНУ, 2019, № 1. – С. 201-210.
16. Сукачев Э.А. Введение в теорию сигналов Найквиста / Э.А. Сукачев // Одесса: Освіта України. – 2016. – 108 с.
17. Бурдин В.А. Компенсация хроматической дисперсии на регенерационных участках линий передачи сетей связи / Бурдин В.А. // ISSN 0013-5771 // Электросвязь. – № 7. – 2006. – С. 28–33.
18. Одегов Н.А. Методика синтеза моделей зависимостей дисперсионных характеристик от частоты и состава оптического волокна / Н.А. Одегов, А.А. Грушенко, В.В. Костюк, Р.С. Резник // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – № 1. – С. 68-76.
19. Odegov N.A. Optimization methods of optical signals by the criterion of the minimum of the presented base / Odegov N.A., Staren'kyu I.V., Kostjuk V.V. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – № 2. – С. 35-47. DOI 10.33243/2518-7139-2018-1-2-35-47.
20. Характеристики волокна и кабеля с ненулевой дисперсией для широкополосной оптической передачи. Рекомендация МСЭ-Т G.656. – 2006. – 20 с.

REFERENCES:

1. Odegov N.A. "Osnovyi teorii approksimatsii opticheskikh signalov gaussovyimi impulsami." VIsnik Hmel'nitskogo natsionalnogo univ'ersitetu. "Tehnichni nauki." № 5 (2018): 42–72.
2. Odegov N.A., Bahachuk D.G., Hordienko O.O. "Analysis of non-stationary quasi-periodic internet traffic by the method of instant spectra." Proc. of the O.S. Popov ONAT. №1 (2019): 121-134.
3. "Mnogokanalnyie prilozheniya DWDM s odnokanalnyimi opticheskimi interfeysami: Rekomendatsiya MSE-T G.698.1." (2005).
4. "Katalog produktsii. Volokonno-opticheskie kabeli. ", <https://odeskabel.com/products/vok->

kabeli.html.

5. "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. Recommendation ITU-T G.694.1." (2012).

6. Fokin V.G., Ibragimov R.Z. "Opticheskie sistemy s terabitnymi i petabitnymi skorostyami peredachi." Novosibirsk: FGOBU VPO "SibGUTI" (2015): 161 p.

7. J. Cai, C.R. Davidson, A. Lucero et al. "20 Tbit/s transmission over 6860 km with sub-Nyquist channel spacing." Journal of Lightwave Technology, Vol. 30. (2012): 651–657.

8. "Ustanovlen novyy rekord skorosti peredachi dannyh po optovoloknu.", <https://www.dailytechinfo.org/infotech/10161-ustanovlen-novyy-rekord-po-skorosti-peredachi-dannyh-pooptovoloknu.html>.

9. "Alcatel Boosts Fiber Speed to 100 Petabits in Lab.", <https://gigaom.com/2009/09/28/alcatel-lucent-boosts-fiber-speeds-by-10x-in-lab/>

10. Xiang Liu, A. R. Chraplyvy, P. J. Winzer, R. W. Tkach & S. Chandrasekhar. "Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit." Nature Photonics (2013). DOI:10.1038/nphoton.2013.109.

11. Agraval G. "Nelineynaya volokonnaya optika." Moskva: "Mir" (1996): 323 p.

12. Gauer Dzh. "Opticheskie sistemy svyazi" Moskva: "Radio i svyaz" (1989): 504 p.

13. Hudyakov G.I. "Teorema otschetov teorii signalov i ee sozdateli." Radiotekhnika i elektronika. Vol 53, № 9. (2008): 1157–1168.

14. Gonorovskij M.S. "Radiotekhnicheskie cepi i signaly." Moskva: "Radio i svyaz" (1986): 512 P.

15. Odegov N.A., Guzun A.I. "Zavisimost' dlitel'nosti i formy opticheskikh signalov ot neravnomernosti koefficienta zatuhaniya." VIsnik Hmelnitskogo natsionalnogo univ'sitetu. «Tehnichnl nauki». № 1 (2019): 201-210.

16. Sukachev E.A. "Vvedenie v teoriyu signalov Najkvista" Odessa: "Osvita Ukraini." (2016): 108 P.

17. Burdin V.A. "Kompensatsiya hromaticheskoy dispersii na regeneratsionnykh uchastkakh liniy peredachi setej svyazi." Elektrosvyaz. № 7. (2006): 28–33.

18. Odegov N.A., Grushenko A.A., Kostyuk V.V., Reznik R.S. "Metodika sinteza modelej zavisimostej dispersionnykh harakteristik ot chastoty i sostava opticheskogo volokna." Proc. of the O.S. Popov ONAT. № 1 (2018): 68-76.

19. Odegov N.A., Staren'kyy I.V., Kostyuk V.V. "Optimization methods of optical signals by the criterion of the minimum of the presented base." Proc. of the O.S. Popov ONAT. № 2. (2018): 35-47.

20. "Harakteristiki volokna i kabelya s nenulevoj dispersiej dlya shirokopolosnoy opticheskoy peredachi. Rekomendatsiya MSE-T G.656." (2006).

DOI: 10.33243/2518-7139-2019-1-2-61-76