

**О новых способах увеличения
информационной емкости
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ЛИНИЙ СВЯЗИ**

**Ю.И. Шокин, М.П. Федорук,
С.К. Турицын, Е.Г. Шапиро**

Информационная ёмкость

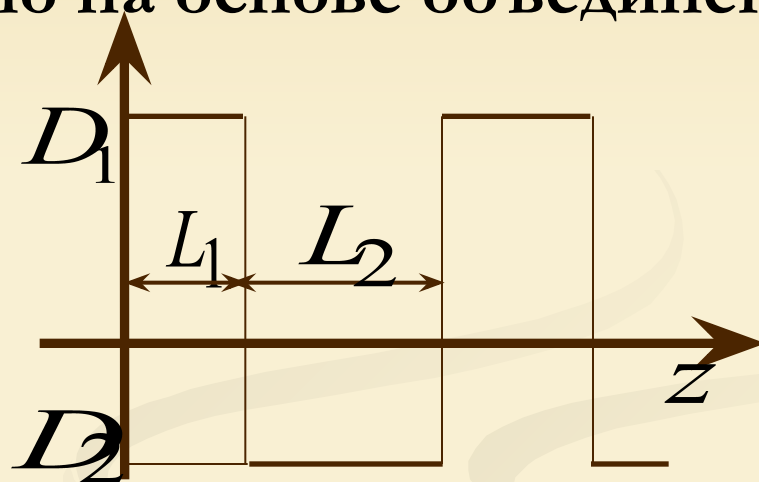
Дальнейшее увеличение информационной ёмкости (BL , где B – пропускная способность линии, L – дальность передачи) возможно на основе объединения технологий:

а) Дисперсионное управление:

$$D_{ave} = (L_1 D_1 + L_2 D_2) / (L_1 + L_2) \approx 0$$

D_{ave} - средняя дисперсия

$L_{period} = L_1 + L_2$ - период



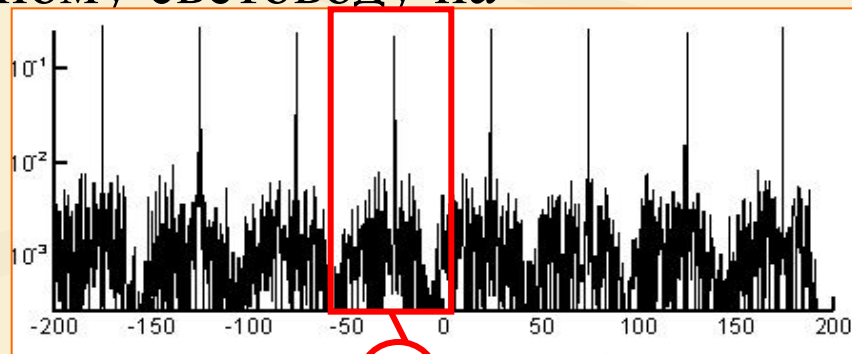
б) Спектральное уплотнение:

Передача данных по одному волоконному световоду на различных частотах

Пропускная способность: $B = B_1 \times N$

B_1 - скорость передачи в одном канале

N - число каналов



Каналы (№): 1 2 3 4 5 6 7 8

Две основные задачи:

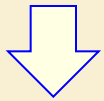
- Изучение фундаментальных свойств оптических импульсов (**дисперсионно - управляемых солитонов**) в системах с периодически меняющимися коэффициентами дисперсии и нелинейности.
- **Оптимизация** конкретных конфигураций волоконно-оптической линии связи с целью увеличения информационной ёмкости.

Математическая модель: А

Основная математическая модель для описания эволюции
оптических импульсов в волоконных световодах:

Обобщенное нелинейное уравнение Шредингера (ОНУШ):

$$i \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{\lambda_0^2 D(z)}{4\pi c_1} \frac{\partial^2 E}{\partial^2 t} + \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}} |E|^2 E = i \left[-\gamma(z) + r_k \sum_{k=1}^N \delta(z - z_k) \right] E = iG(z)E$$



$$A(z, t) = E(z, t) \exp \left[\int_0^z G(s) ds \right] \Rightarrow iA_z + d(z)A_{tt} + \varepsilon c(z) |A|^2 A = 0$$

$E(z, t)$ - медленная комплексная огибающая электромагнитного поля

$$nZ_a = mL = Z_0$$

Дисперсионный параметр: $d(z) = \lambda_0^2 D(z) / 4\pi c_1$

$$\varepsilon c(z) = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}} \exp \left[2 \int_0^z G(s) ds \right] - \text{эффективный коэффициент нелинейности.}$$

Математическая модель: А

Численный алгоритм реализации ОНУШ :
Метод Фурье расщепления по физическим процессам

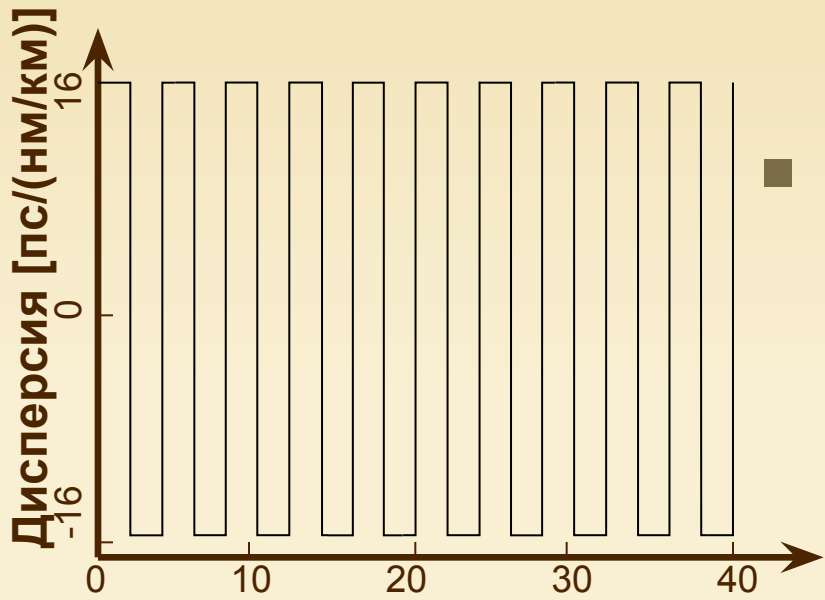
\tilde{D} - оператор линейной части,
 \tilde{N} - нелинейный оператор, тогда

$$iA_z + d(z)A_{tt} + \varepsilon c(z)|A|^2 A = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial A}{\partial z} = \tilde{D}A + \tilde{N}A$$

И формально решение выглядит так:

$$A(z+h, t) = \exp\left[\int_{z+h/2}^{z+h} \tilde{N}(s) ds\right] \exp[h\tilde{D}] \exp\left[\int_z^{z+h/2} \tilde{N}(s) ds\right] A(z, t)$$

Математическая модель: А



■ Примеры вычислений:

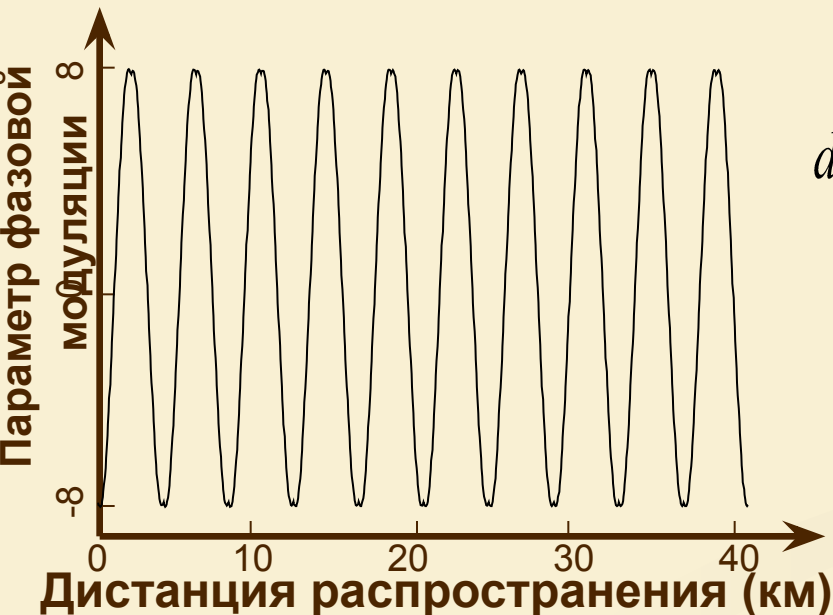
**Мелкомасштабная
дисперсионная карта**

$$d(Z) = d + \langle d \rangle \quad \text{при} \quad k/J < z < (k+a)/J$$

$$d(Z) = \frac{a}{a-1} d + \langle d \rangle \quad \text{при} \quad (k+a)/J < z < (k+1)/J$$

$$k = 0, 1, \dots, J-1$$

$$\text{где } J = 10 \text{ и } a = 1/2$$

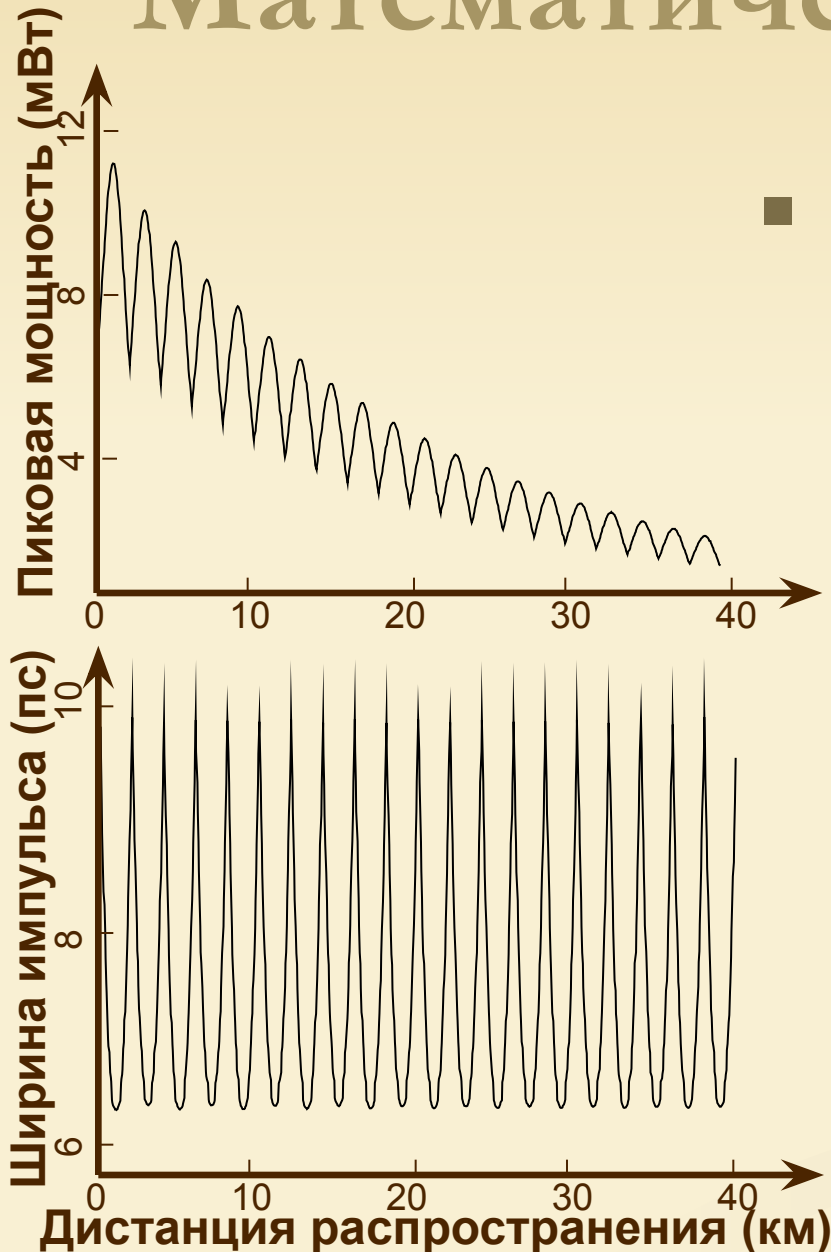


Математическая модель: А

■ Примеры вычислений:

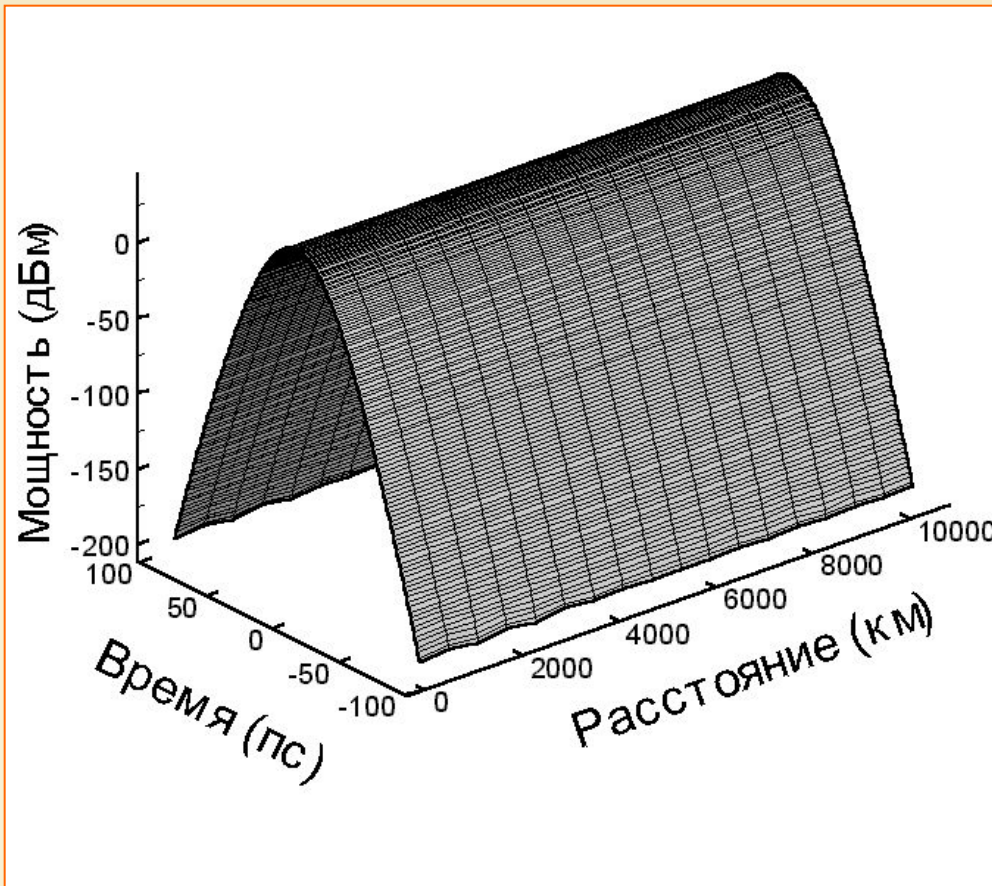
Мелкомасштабная дисперсионная карта

Представлена эволюция основных параметров ДУ-солитона на периоде усиления.



Математическая модель: А

■ Солитоны с рамановским усилением



- **Отличие Рамановского усиления:**

Усиление не
сосредоточенное, а
распределенное

$$g_r = g_0 e^{-2\gamma_p(L-z)}$$

g_r - коэффициент усиления

L - длина участка усиления

g_0 - мощность обратной накачки

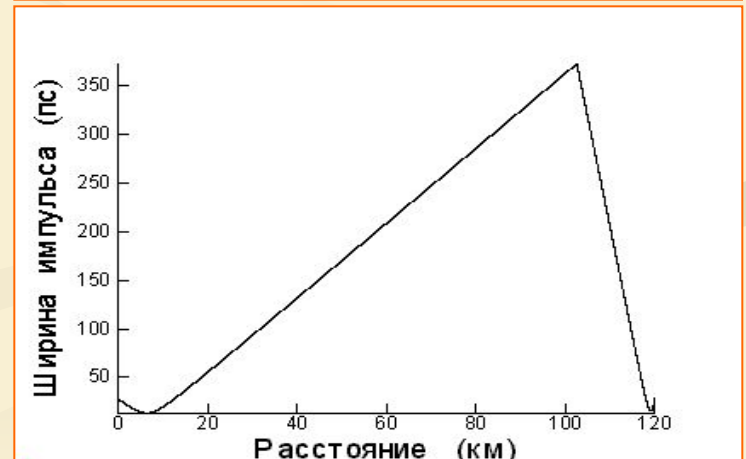
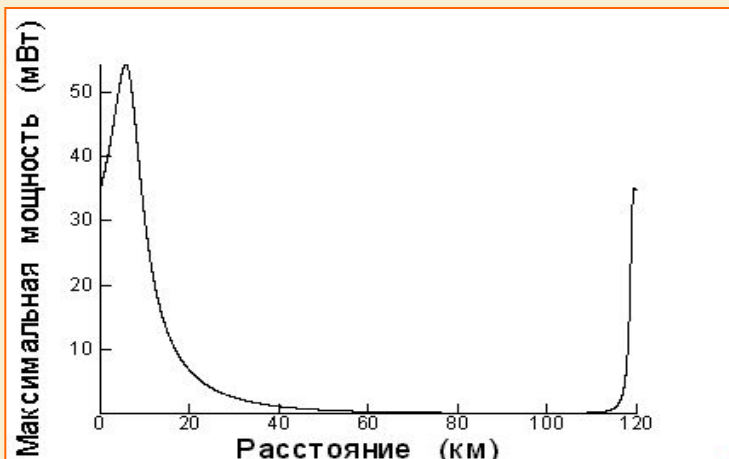
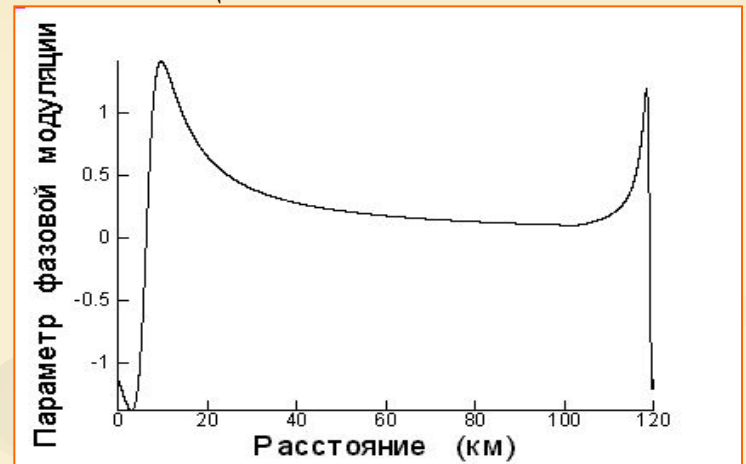
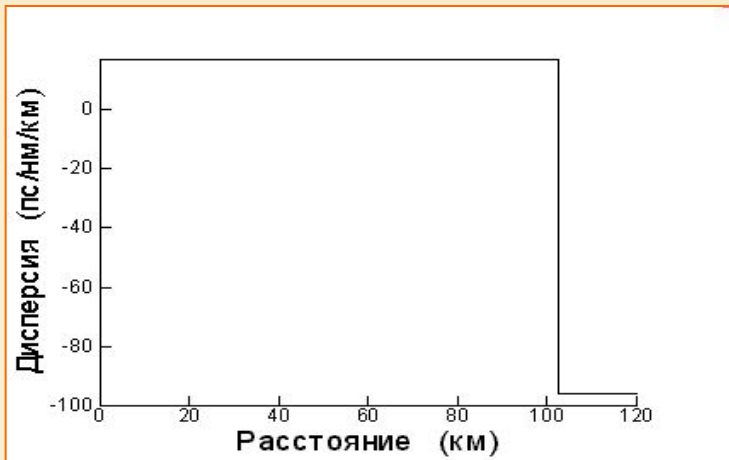
“Медленная” динамика импульса в точках $z = nZ_a$

$n=0, 1, 2$

Математическая модель: А

Солитоны с рамановским усилением

Изменение основных параметров солитонного импульса в течении 1 периодической секции



Математическая модель: Б

В предположении, что $\varepsilon = L_D / L_{NL} \ll 1$, где L_D дисперсионная длина, L_{NL} нелинейная длина, имеет место

Усредненное (path-averaged) уравнение спектральной области

$$i\Psi_z - \langle d \rangle \omega^2 \Psi + G(\Psi, \omega) = 0, \text{ где}$$

Ψ - усредненная комплексная огибающая в спектральной области

$$G(\Psi, \omega) = \varepsilon \iiint T(\Delta\Omega) \Psi^*(\omega_1) \Psi(\omega_2) \Psi(\omega_3) \times \\ \times \delta(\omega + \omega_1 - \omega_2 - \omega_3) d\omega_1 d\omega_2 d\omega_3$$

$T(\Delta\Omega) = \int_0^1 c(z) \exp[iR(z)\Delta\Omega] dz$ — интеграл от скалярного оператора, определяющего тип ВОЛС

$$\frac{dR}{dz} = d(z) - \langle d \rangle \text{ и } \Delta\Omega = \omega^2 + \omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2$$

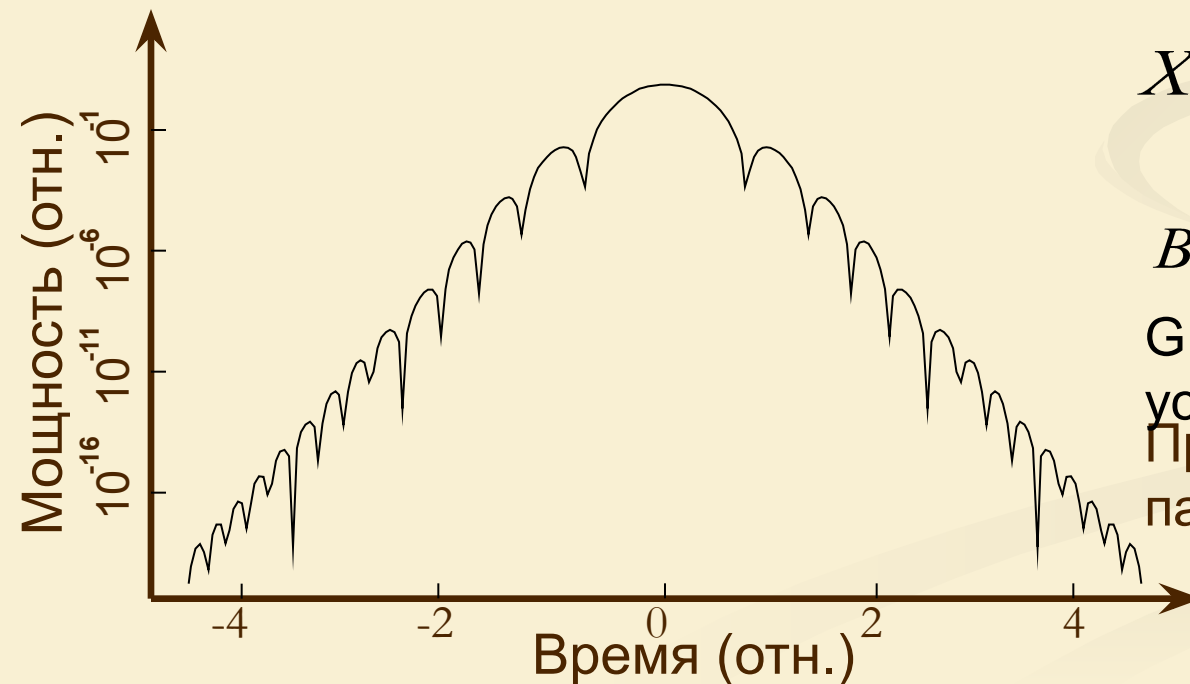
Математическая модель: Б

Распространение в линии $L \gg Z_a$ (Long-scale)

Где L - период дисперсионной компенсации

Z_a - период усиления

$$T(X) = B(G) \cdot \frac{\sin(KX)}{K} \cdot \frac{1}{1 + (2X/\ln G)^2} \cdot \left\{ \frac{\cos X}{\sin X} + \frac{2X}{\ln G} \cdot \frac{G+1}{G-1} \right\}$$



$$X = \frac{\Delta\Omega \cdot Z_a d}{2L} = \frac{\Delta\Omega d}{4K}$$

$$B(G) = \frac{(G-1)}{G \cdot \ln G}$$

G -
усиление,
При

параметрах:

$$K = \frac{L}{Z_a}$$

$$\langle d \rangle = 0.005$$

$$d = 0.5$$

$$K = 5$$

Математическая модель: Б

Распространение в линии $L \ll Z_a$ (Short-scale)

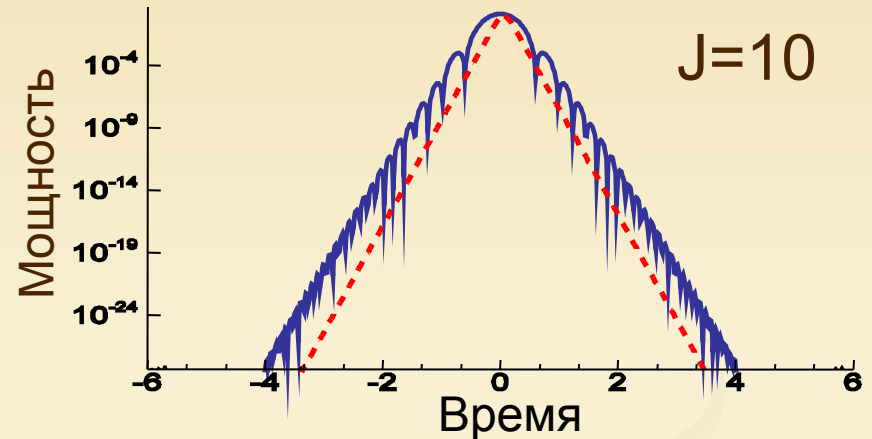
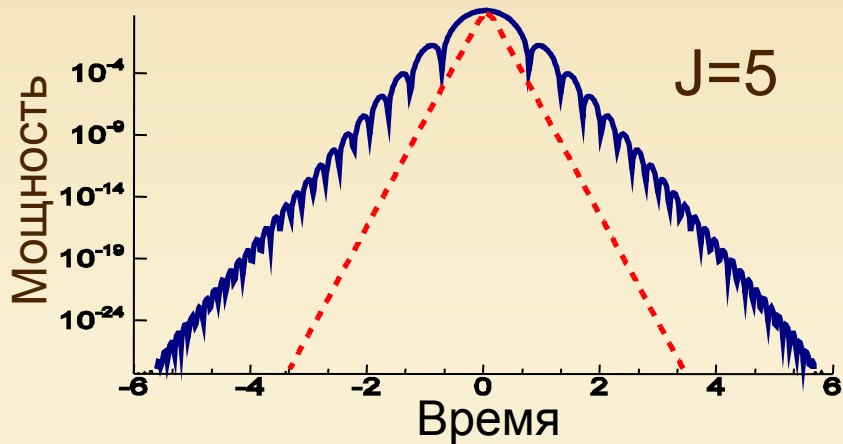
Перепишем $T_{\omega 123}$ как $T_{\omega 123} = B(G) \cdot F(a, Z, Y)$

$$\text{Где } F(a, Z, Y) = \left[1 + \frac{iY}{Z - iY} \left(1 - \frac{Z}{(e^z - 1)} \cdot \frac{e^{(1-a)Z + iaY} - 1}{(1-a)Z + iaY} \right) \right] \times e^{-iaY/2}$$

При параметрах

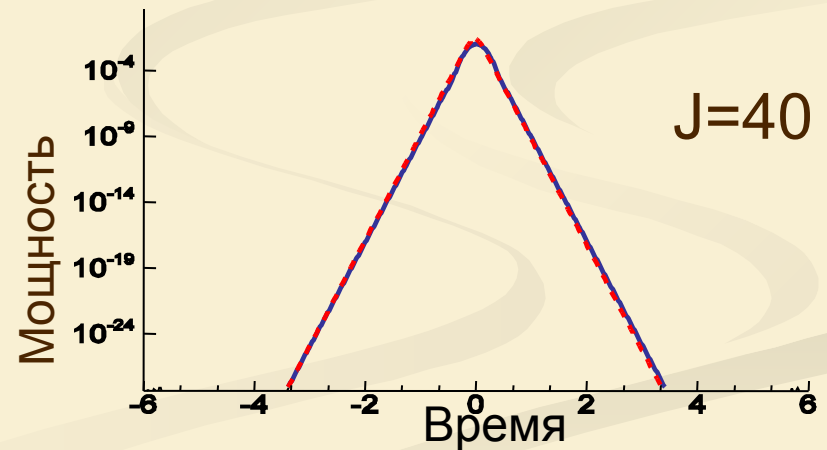
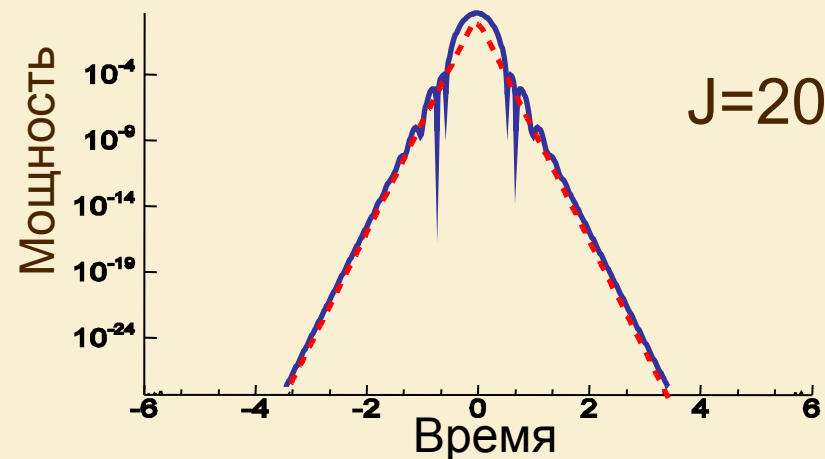
$$\begin{cases} J = Z_a / L \\ Y = d\Delta\Omega Z_a / J \\ Z = 2\gamma Z_a / J \end{cases}$$

Математическая модель: Б



Синий - дисперсионно-управляемый солитон

Красный - фундамен. солитон нелин. ур. Шредингера с постоянными коэффициентами



Т.е. при $J \rightarrow \infty$ дисперсионно-управляемый солитон переходит в фундаментальный.

Математическая модель: В

ТМ-модель обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$A(z, t) = N \frac{Q(z, x)}{\sqrt{T(z)}} \exp \left[i \frac{M(z)}{T(z)} t^2 \right]$$

$A(z, t)$ - Распределение оптического поля

$$\begin{cases} \frac{dT}{dz} = 4d(z)M, \\ \frac{dM}{dz} = \frac{d(z)}{T^3} - \frac{c(z)N^2}{T^2}. \end{cases}$$

Периодические граничные

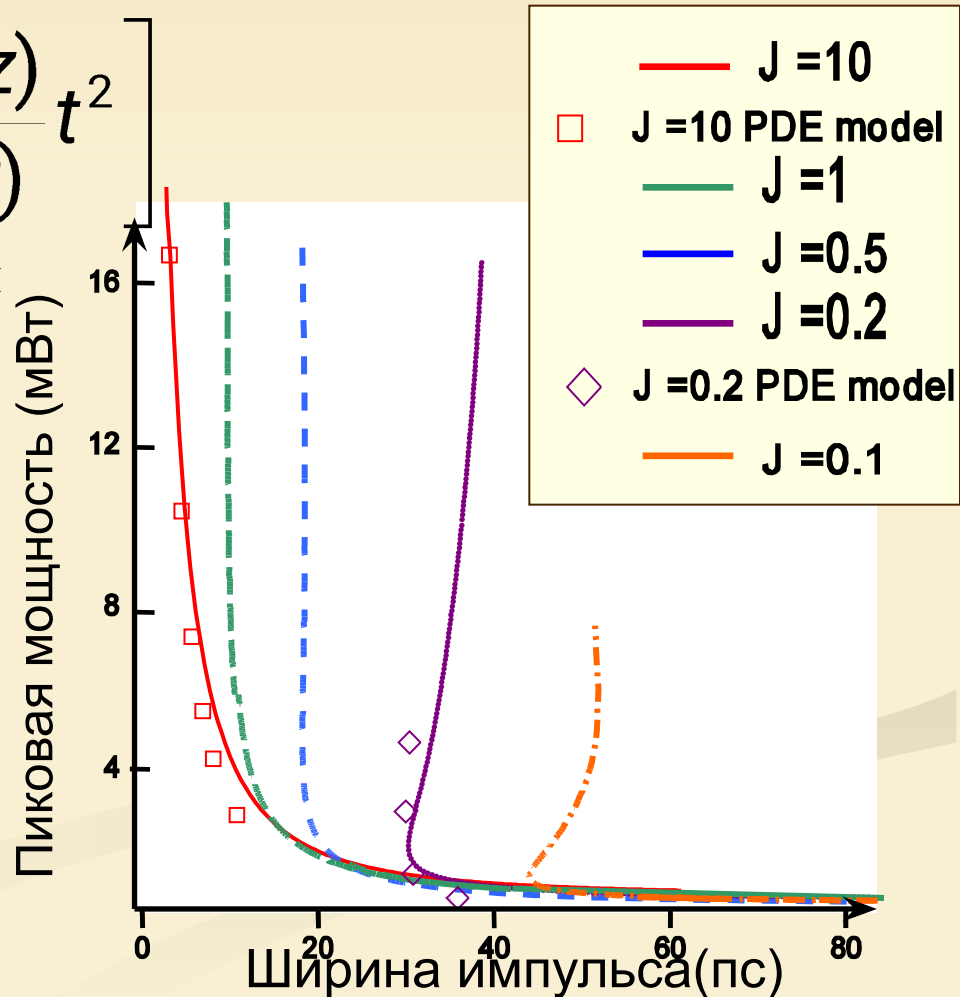
условия:

$$L_p = \max\{Z_a, L\}, \quad \begin{cases} T(0) = T(L_p), \\ M(0) = M(L_p) \end{cases}$$

Параметр

$$L = Z_a / J, \quad Z_a = 40 \text{ км}$$

для различных J



Математическая модель: Γ

Квазилинейная модель: (быстрый численный алгоритм)

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + d(z) \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \sigma(z) |A|^2 A = iG(z)A$$

Производим замену

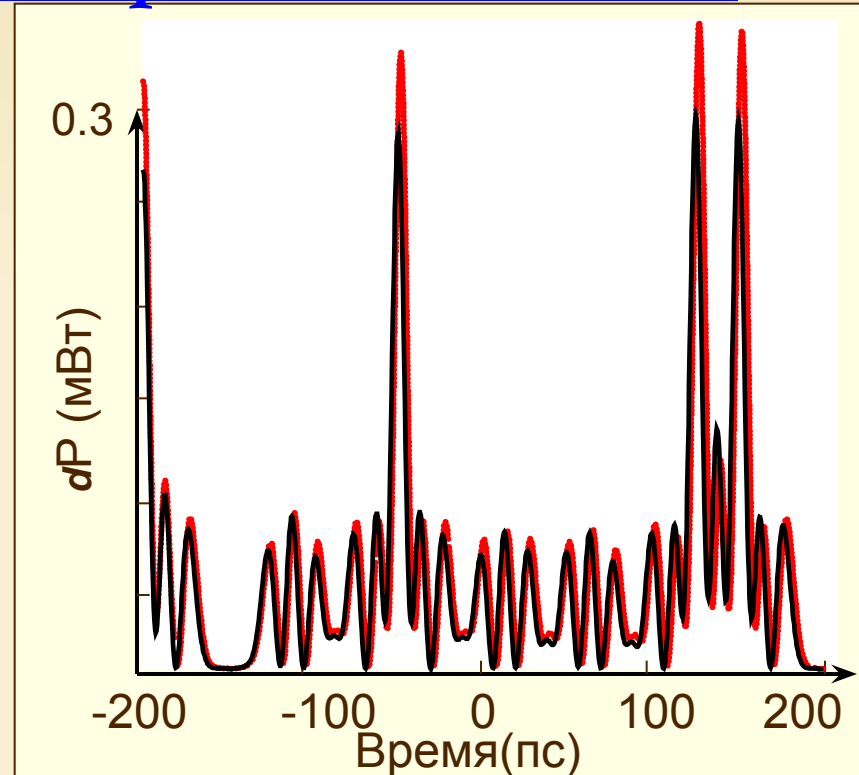
$$A(z, t) = e^{g(z) + i(R(z) + \langle d \rangle z) \Delta} X(z, t)$$

где $\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial t^2}$ и $g(z) = \int_0^z G(s) ds$

$R(z) = \int_0^z (d(s) - \langle d \rangle) ds$ тогда

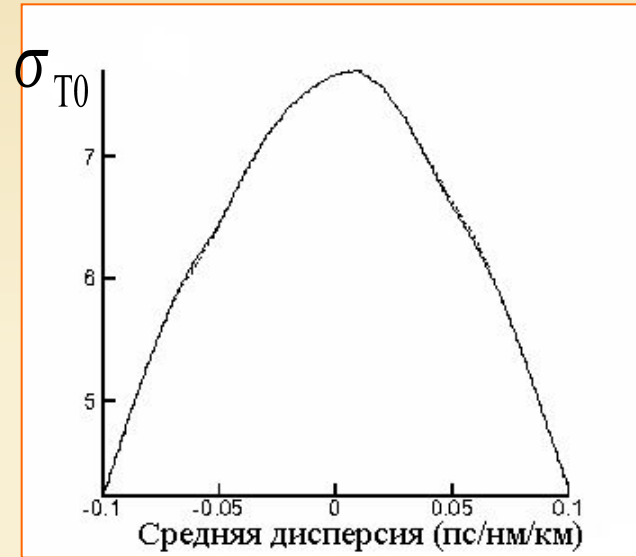
$$A(z, t) = e^{i \langle d \rangle n \Delta} (B_0(t) + n \Delta X(t))$$

при $\Delta X(t) = i \int_0^1 c(s) e^{-iR(s)\Delta} \left[\left| e^{iR(s)\Delta} B_0(s) \right|^2 e^{iR(s)\Delta} B_0(s) \right] ds$



Решение получено: из
 ур-я Шредингера по
квазилинейной теории

Математическая модель: Г

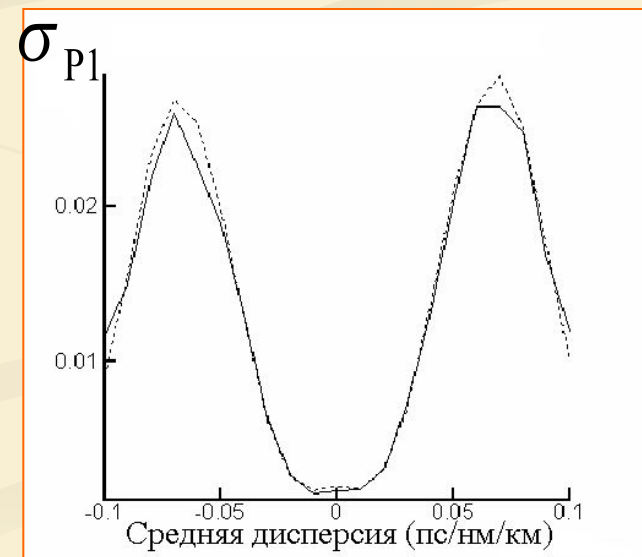
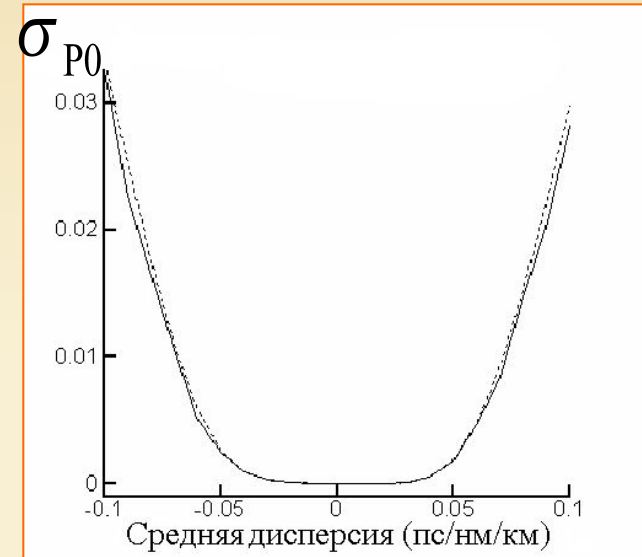


$$\sigma_P = \left[\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_T = \left[\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2 \right]^{1/2}$$

P – Мощность

T – Время



Проблемы оптимизации

- Главная задача – увеличение битовой скорости и дистанции распространения
- Критерием качества для цифровых приемников является частота появления ошибочных битов (BER).

Современный стандарт: $BER \leq 10^{-9}$

1 ошибочный бит на приемнике на 10^9 переданных битов

$$BER(Q) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$$

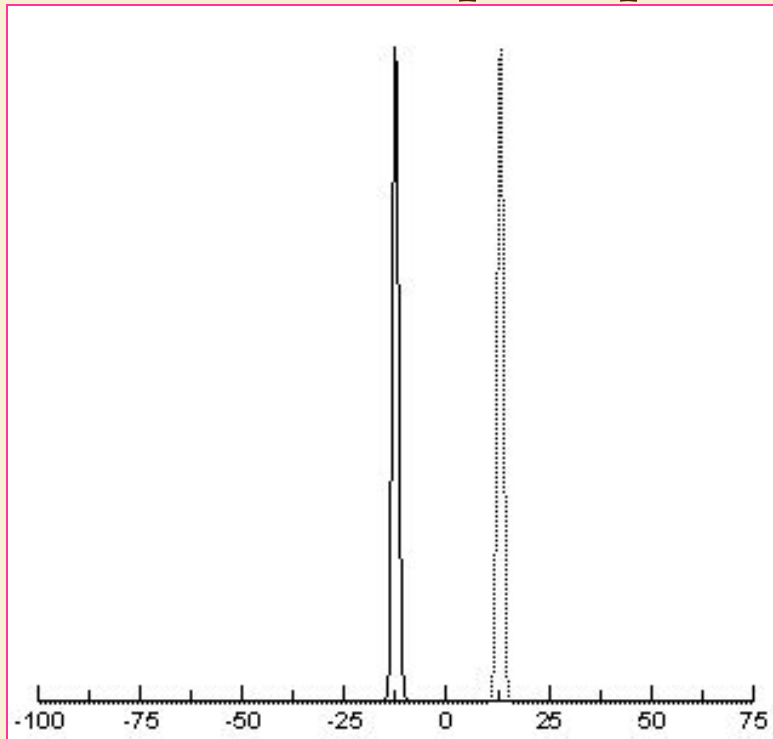
В предположении гауссовой статистики, где $Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

μ_i мат. ожидание 0 и 1;

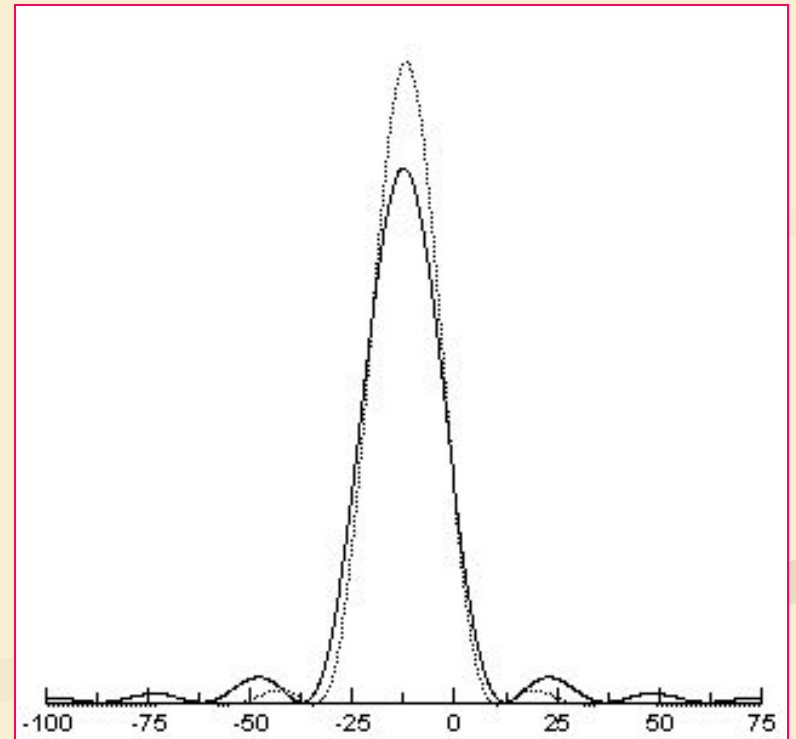
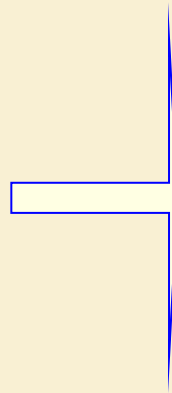
σ_i соответствующая дисперсия (средне-квадратичные отклонения)

Новые способы увеличения пропускной способности: **А. Новый спектрально-плоский формат**

Основная идея : изменение формы импульса под действием
оптического фильтра.



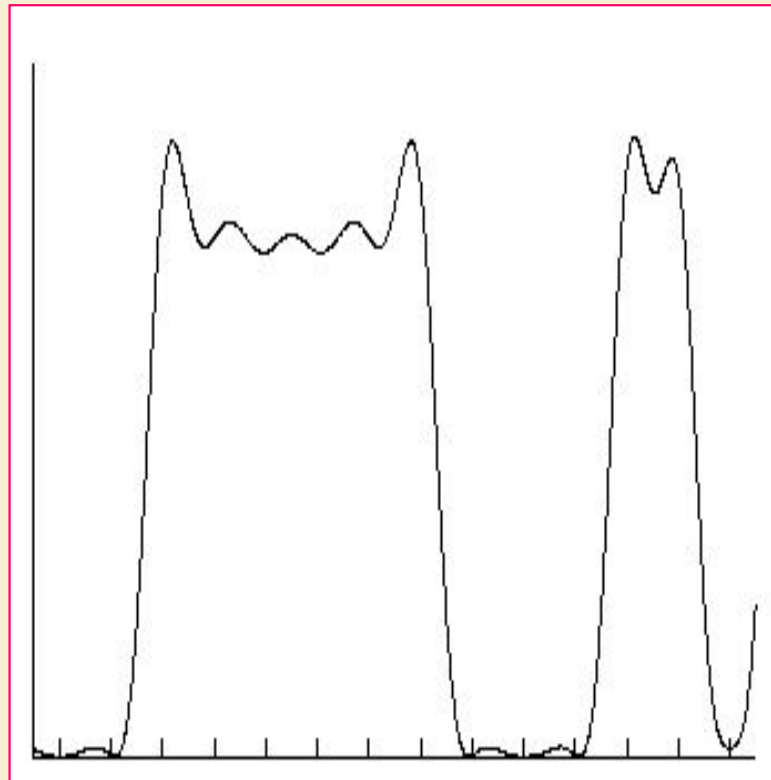
Гауссовский импульс



Sinc-образный импульс

Новые способы увеличения пропускной способности:

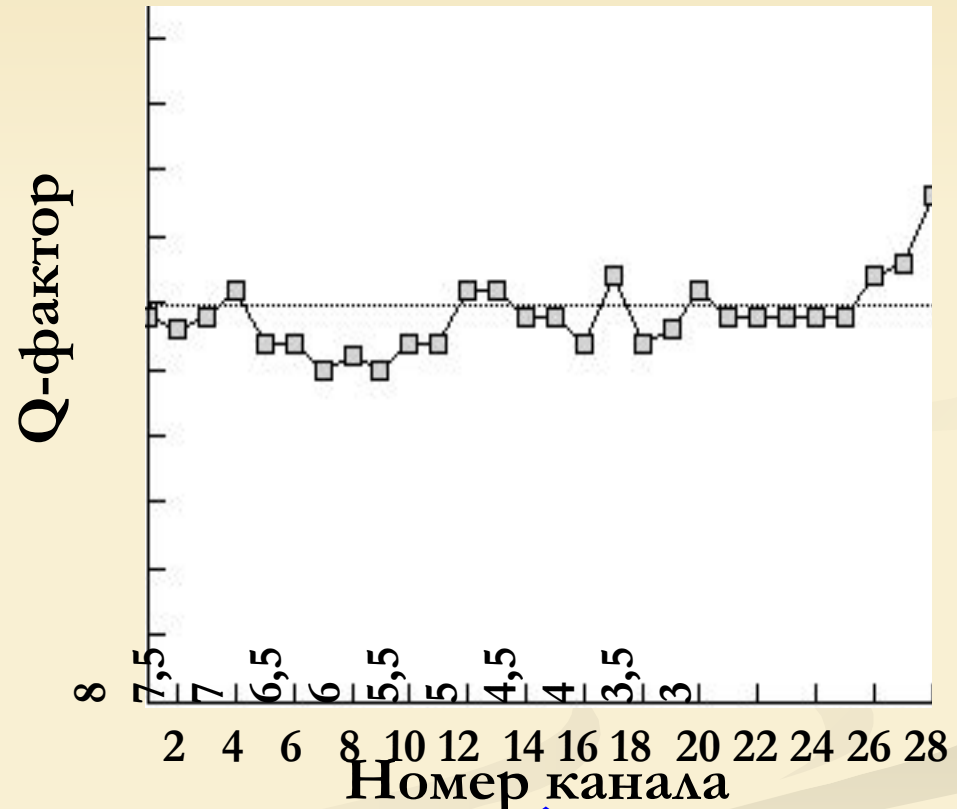
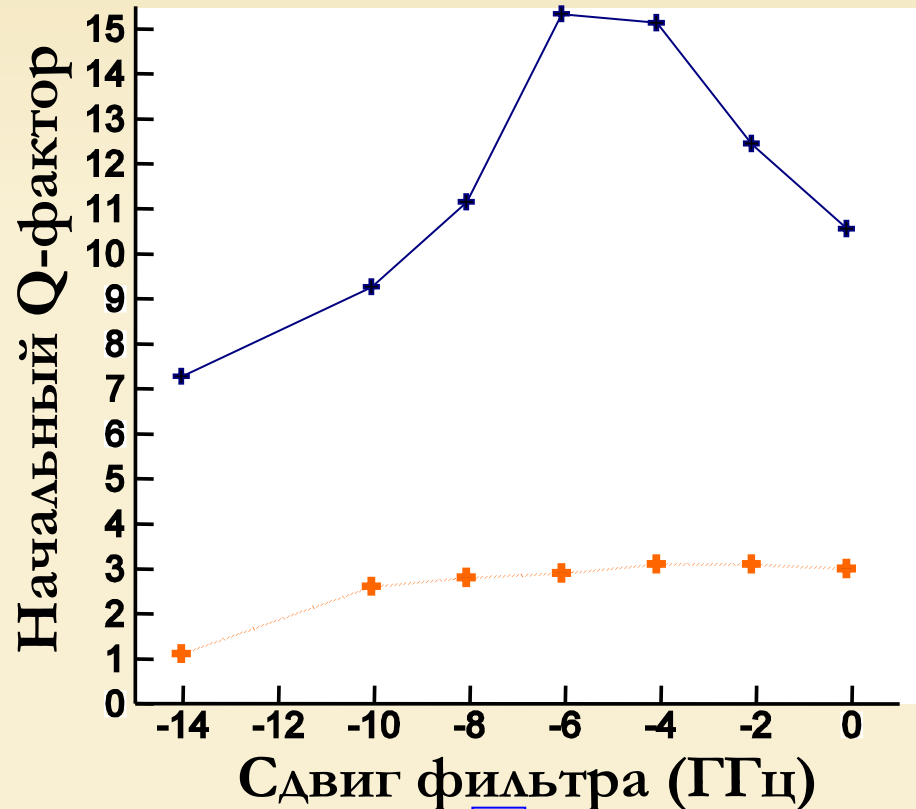
A. Новый спектрально-плоский формат



Последовательность
импульсов

Новые способы увеличения пропускной способности:

А. Новый спектрально-плоский формат



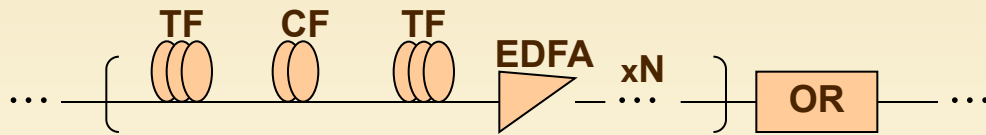
Формат ООК непригоден для многоканальной передачи.

28 канальная система, после прохождения импульсами 1030 км

Новые способы увеличения пропускной способности:

Б. Использование оптических регенераторов

Периодическая линия оптоволоконной связи с усилителем EDFA:

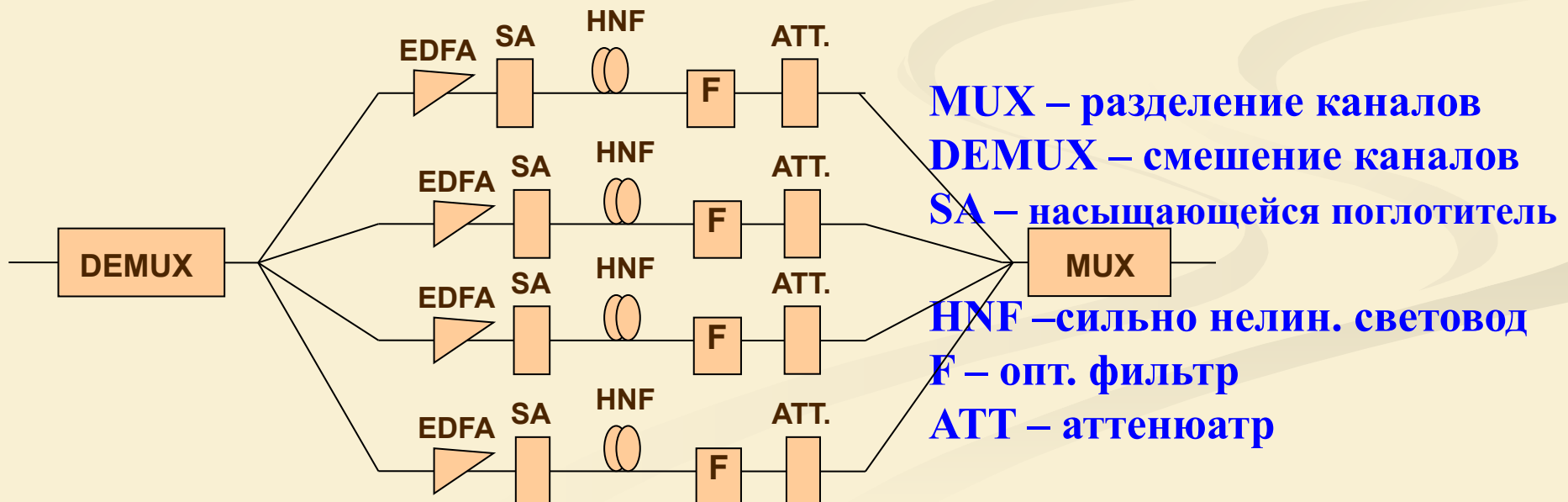


TF – трансмиссионное волокно

CF – компенсирующее волокно

OR – оптический регенератор

Использование оптических регенераторов:



Новые способы увеличения пропускной способности:

Б. Использование оптических регенераторов

Входной сигнал запускается в оптический регенератор:

- усиливается усилителем EDFA
- насыщается в поглотителе

Функция потерь $\alpha(t)$

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\alpha - \alpha_0}{\tau} - \frac{\alpha P(t)}{\tau P_{sat}}$$

в насыщающемся поглотителе:

Где

- $P(t) = |A(t)|^2$ распределение мощности сигнала
- α_0 - постоянные потери
- P_{sat} - пороговая мощность насыщения
- τ - время спада импульса

Мощность импульса на выходе: (T – передаточная функция)

$$P_{out}(t) = T P_{in}(t) = [1 - \alpha(t, P_{in}(t))] P_{in}(t)$$

Новые способы увеличения пропускной способности:

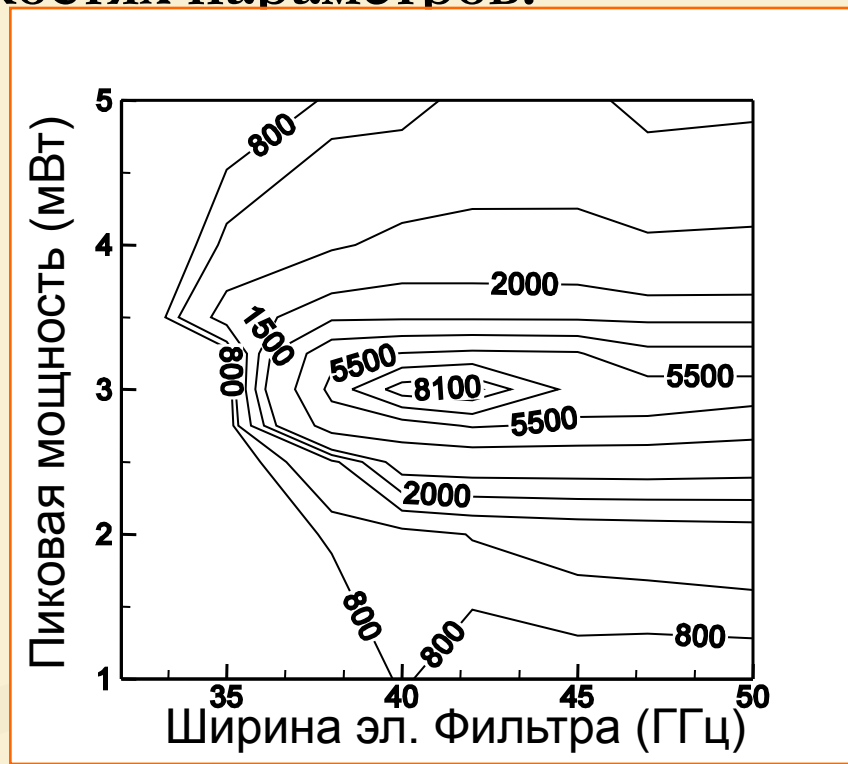
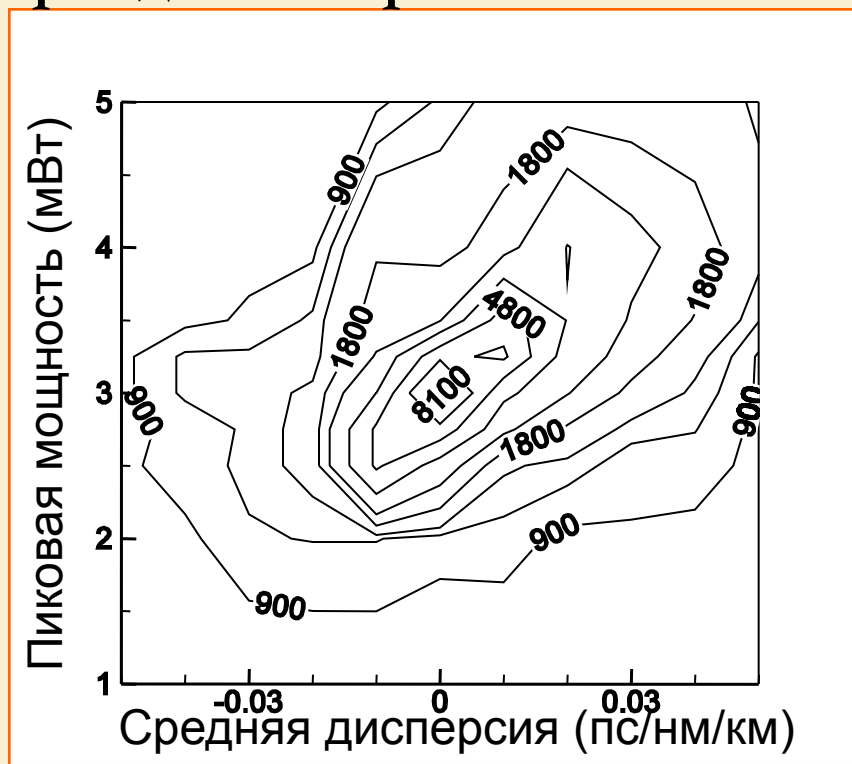
Б. Использование оптических регенераторов

Оптимизации симметричной линий связи

$TL(20\text{км})+RTL(20\text{км})+TL(20\text{км})+EDFA$

Изолинии

пройденного расстояния в плоскостях параметров:

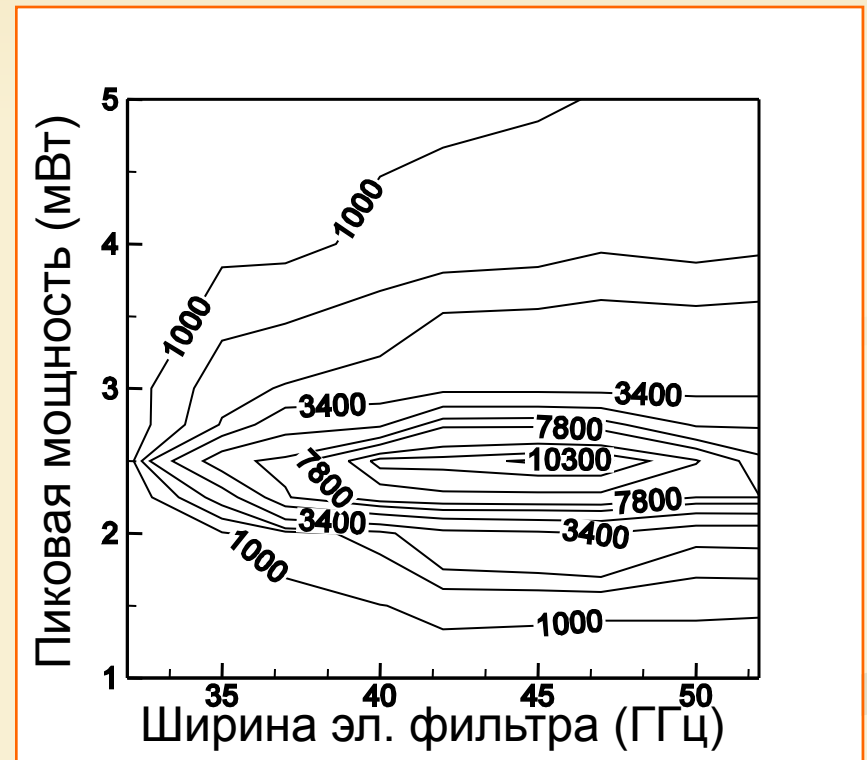
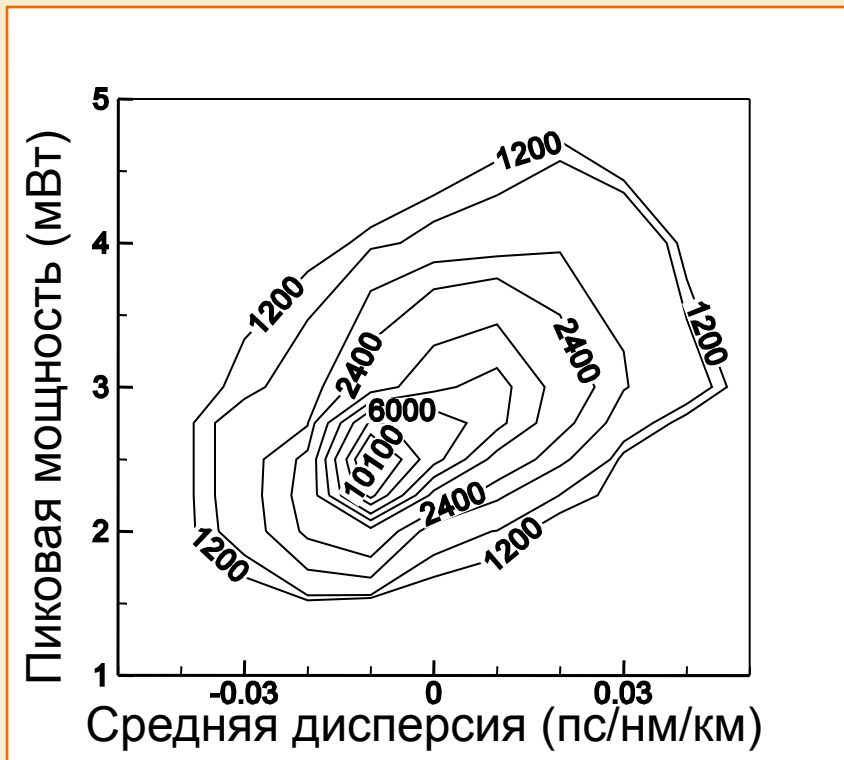


В аналогичной системе без регенераторов – дистанции менее 2000км

Новые способы увеличения пропускной способности:

Б. Использование оптических регенераторов

Линия связи: PSCF(20км)+RDF(20км)+PSCF(20км)+EDFA



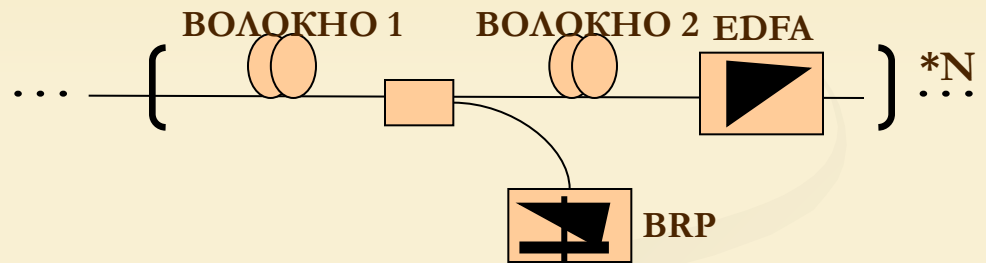
Выбираем: опт. регенератор
пиковую мощность импульса
среднюю

Свыше 10000км

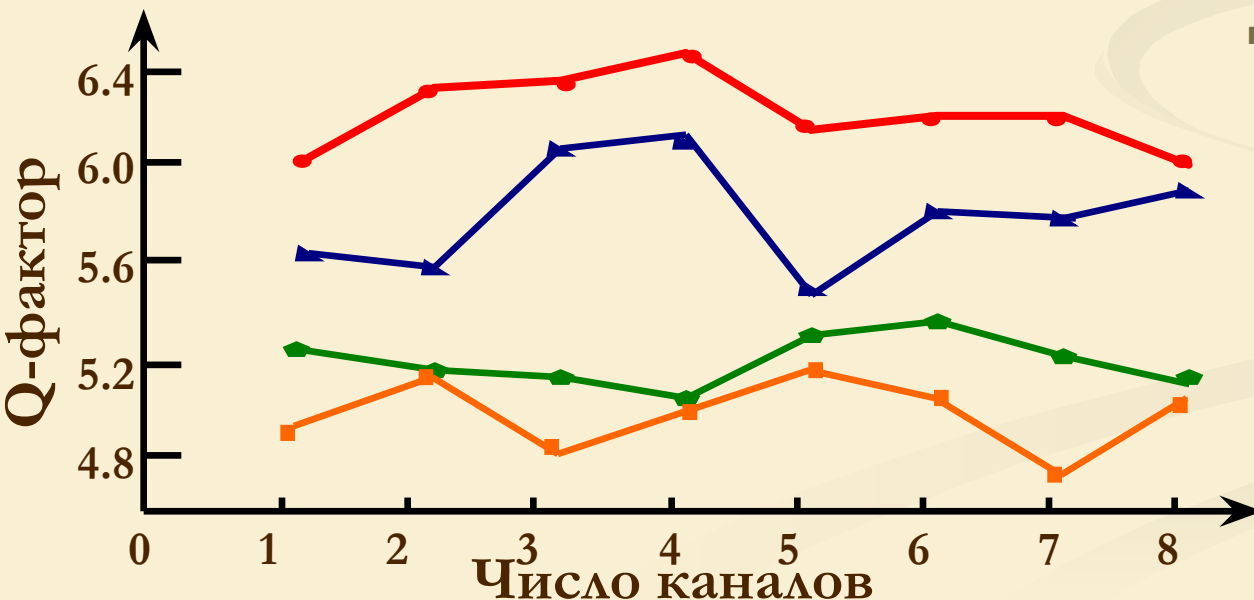
Новые способы увеличения пропускной способности:

В. Нелинейный несолитонный режим передачи данных с большой отрицательной средней дисперсией на секции

Принципиальная схема линии ...



BRP – рамановский усилитель



■ Зависимость Q-фактора после 1700км от числа каналов для средней дисперсии:

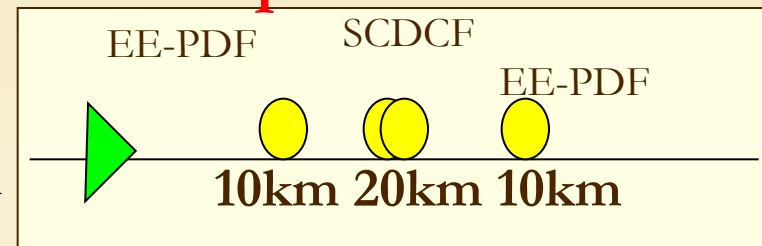
- -0.005 пс/нм/км
- -0.25 пс/нм/км
- -0.5 пс/нм/км
- -0.7 пс/нм/км

Новые способы увеличения пропускной способности:

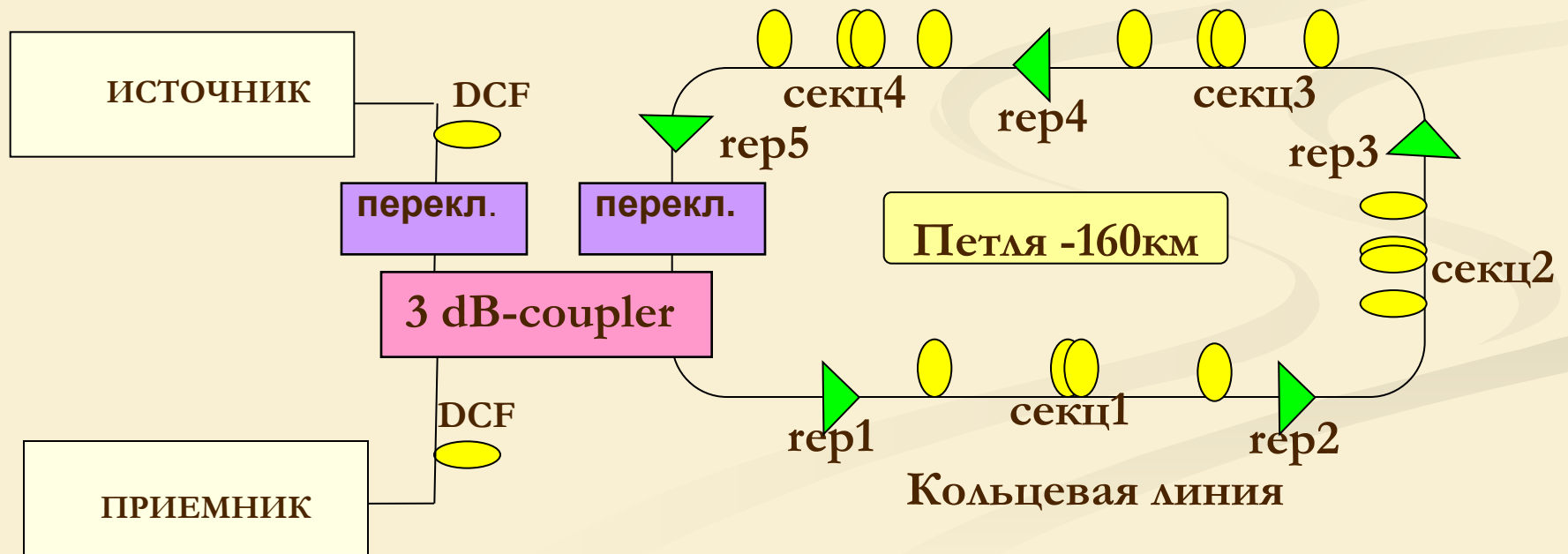
Г. Использование гибридных и рамановских схем усиления

Конфигурация одиночной секции в эксперименте лаборатории (KDD Japan):

980nm-pumped EDFA Средние потери на секции=9.5dB



Принципиальная схема эксперимента.



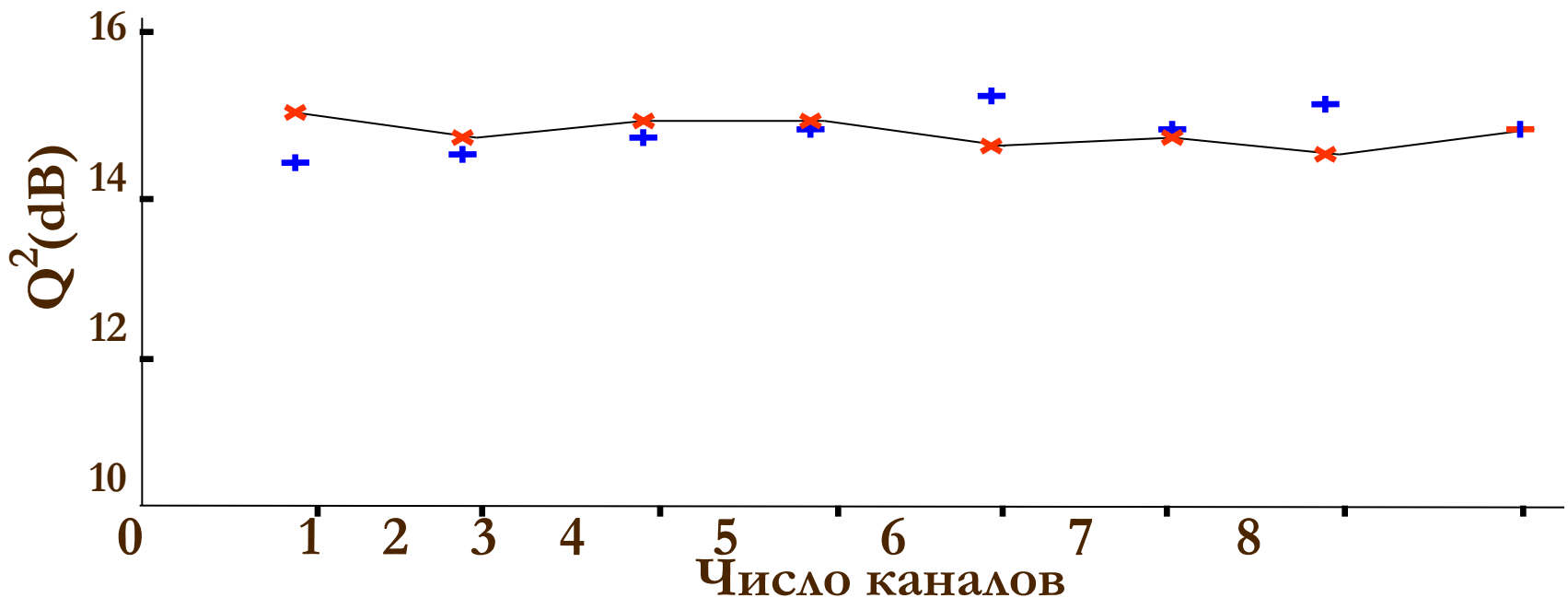
Новые способы увеличения пропускной способности:

Г. Использование гибридных и рамановских схем усиления

Сравнение численных экспериментов и результатов моделирования (Система многоканальной передачи)

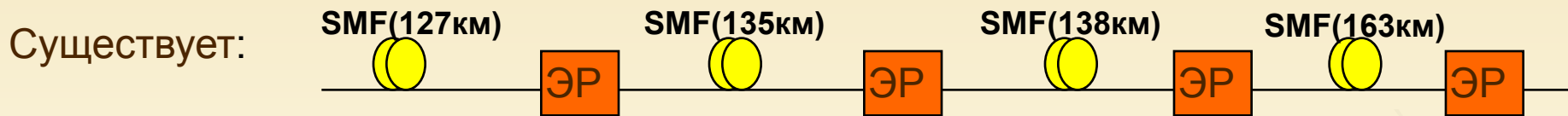
Экспериментальные данные

Численное моделирование

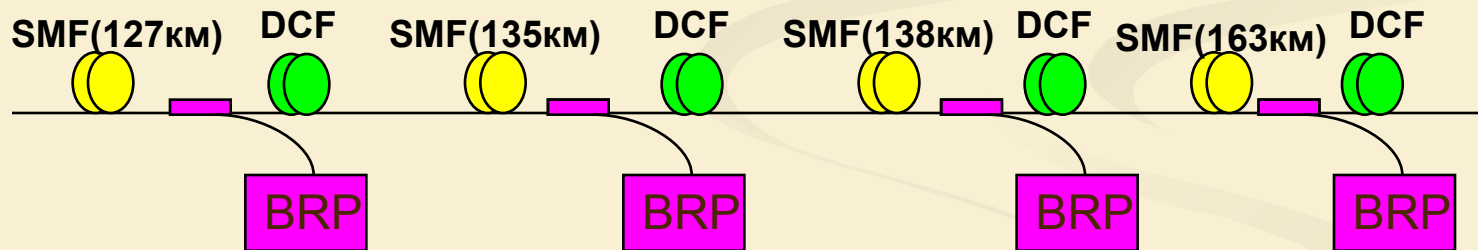


Новые способы увеличения пропускной способности:

Г. Использование гибридных и рамановских схем усиления Оптимизация линии Новосибирск-Омск.



ЭР – электрические регенераторы, ограничивают скорость - 2,5Гбит/сек



Предлагается:

BRP – рамановский усилитель

Заменить ЭР на DCF (волокно с компенсацией дисперсии) и использовать рамановский усилитель (BRP) на каждом участке SMF+DCF

Скорость распространения 160Гбит/сек=4х(40Гбит/сек)

Новые способы увеличения пропускной способности:

Г. Использование гибридных и рамановских схем усиления Оптимизация линии Новосибирск-Омск.

Q-фактор после прохождения линии передачи в худшем из 4 каналов:



Фиксированы:

Средняя мощность
0,5дБм

Ширина импульса
8пс



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ