

**III-я Всероссийская конференция по волоконной оптике**

**12-14 октября 2011 г.**

**Пермь**

**Потенциальные возможности применения  
управляемых дисперсией солитонов для  
реконструкции ВОЛП**

**Бурдин В.А., Дашков М.В., Волков К.А.**



**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**



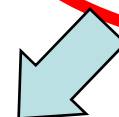
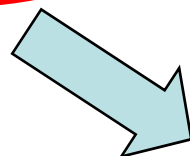
*Рост потребностей в увеличении пропускной способности сетей связи в условиях роста стоимости недвижимости делает актуальной задачу реконструкции волоконно-оптических линий передачи, введенных в эксплуатацию*

Рост стоимости  
земли и  
недвижимости



Увеличение затрат  
на прокладку  
кабеля и  
оборудование НП

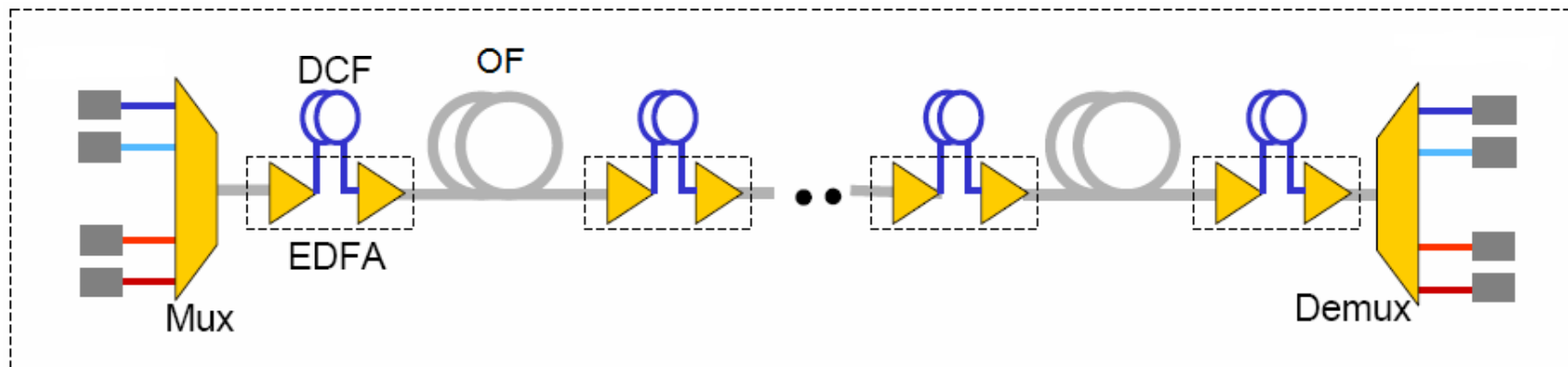
Непрерывный рост  
потребностей в  
увеличении  
скорости передачи

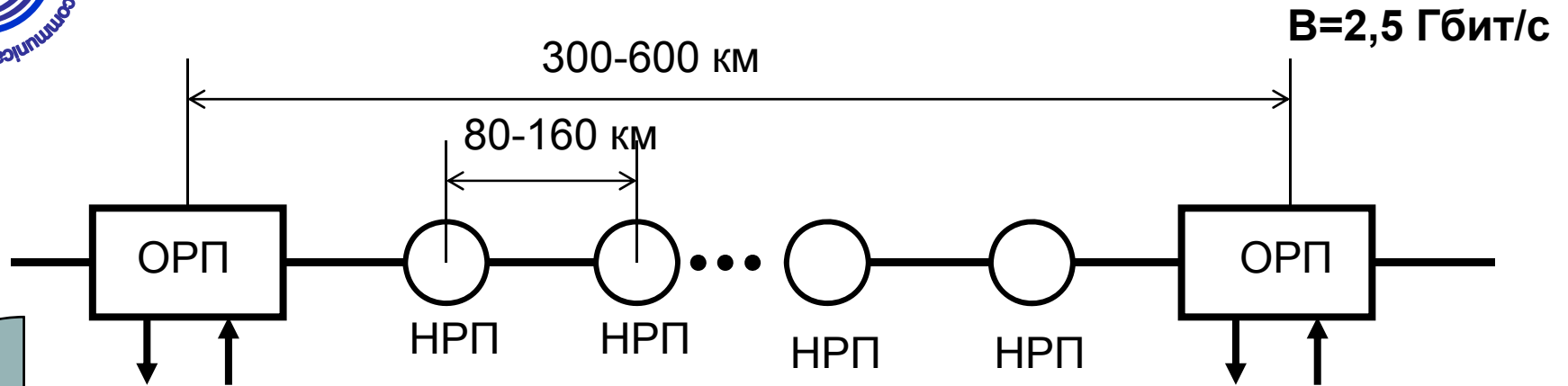


Реконструкция ВОЛС без  
замены ОК и оборудования  
дополнительных НП

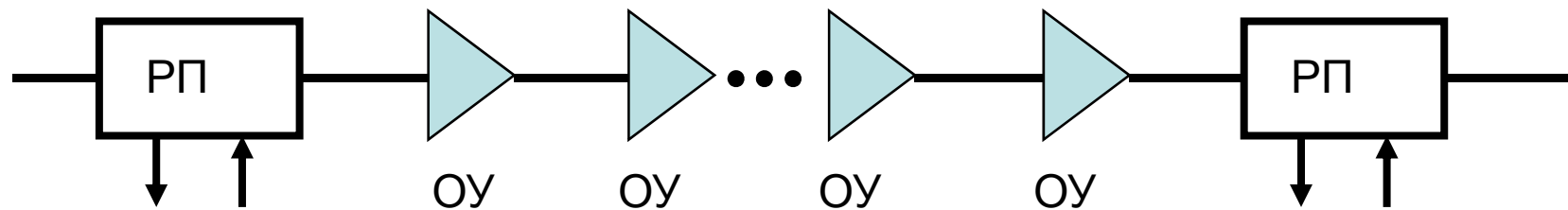
## ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОЛП

- Увеличение пропускной способности линии передачи при заданных расстояниях между усилителями и регенераторами
- Увеличение длины регенерационного участка (РУ) и/или усилительного участка (УУ) длины при заданной скорости передачи в канале





Одномодовые ступенчатые ОВ  
(рекомендации ITU-T G.652)



Скорость передачи  
на одной несущей  **$V=10$  Гбит/с**

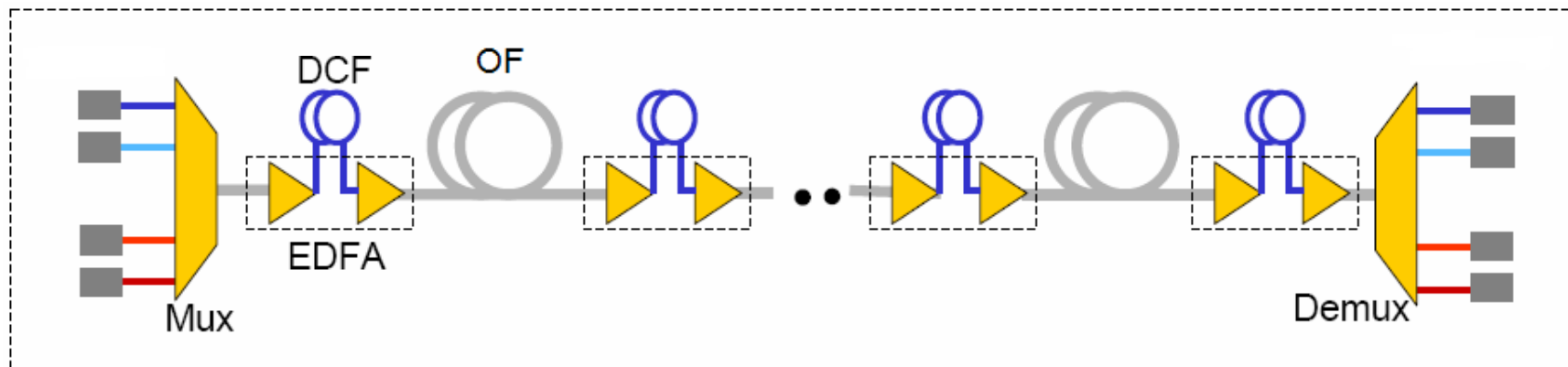
**$V=10$  Гбит/с**

**40 Гбит/с**

**80 Гбит/с и более**

# Как увеличить пропускную способность ВОЛС ?

- увеличение числа ОВ линии передачи;
- увеличение скорости передачи в оптическом канале;
- увеличение числа оптических каналов (оптических несущих).



## Что ограничивает длину РУ и скорость передачи в оптическом канале?

### Оптические MUX/DeMUX, OADM

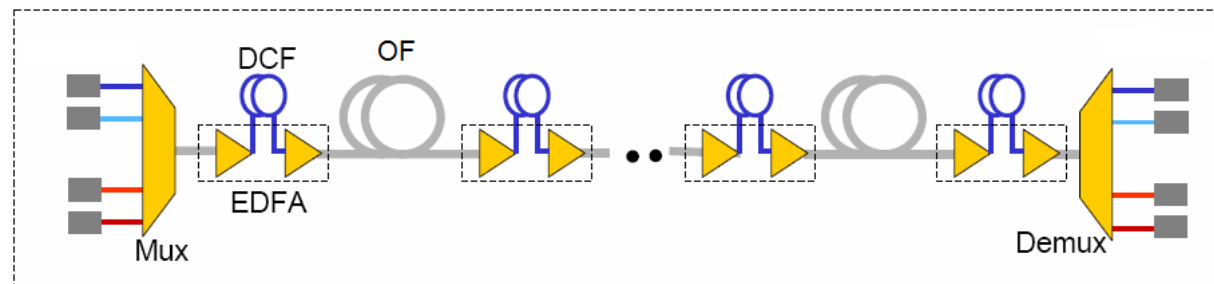
- искажения за счет спектральной фильтрации
- переходные помехи

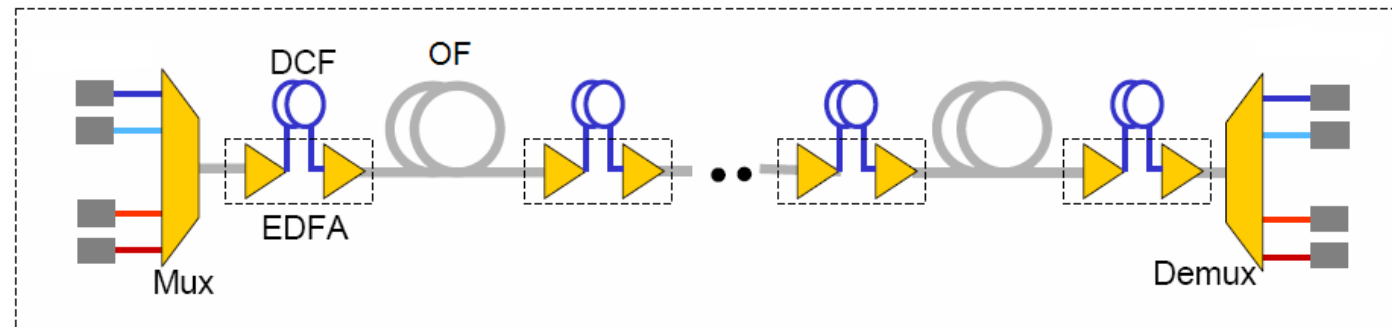
### Оптическое волокно

- хроматическая дисперсия и ее спектральная характеристика
- нелинейность
- поляризационная модовая дисперсия
- потери

### Оптические усилители

- собственные шумы
- неравномерность спектральной характеристики усиления





## Как увеличить скорость передачи в оптическом канале на длине РУ?

- увеличить оптическое усиление при выравнивании его по длине РУ;
- применить помехозащищенные коды и коррекцию ошибок (FEC);
- применить методы модуляции и линейного кодирования (форматов модуляции) с низкой чувствительностью (толерантных) к дисперсии;
- компенсировать хроматическую дисперсию.

## Способы увеличения скорости передачи в оптическом канале на длине РУ

1. Выравнивая усиление оптического сигнала по длине РУ за счет рамановского усиления при встречной накачке можно увеличить OSNR на 7-10 дБм
2. Применяя упреждающую коррекцию ошибок (FEC – forward error correction), можно увеличить OSNR до 8,8 – 10,3 дБм
3. За счет применения форматов модуляции толерантных к дисперсии можно увеличить OSNR от 1-1,5 дБ до 4-4,5 дБ.

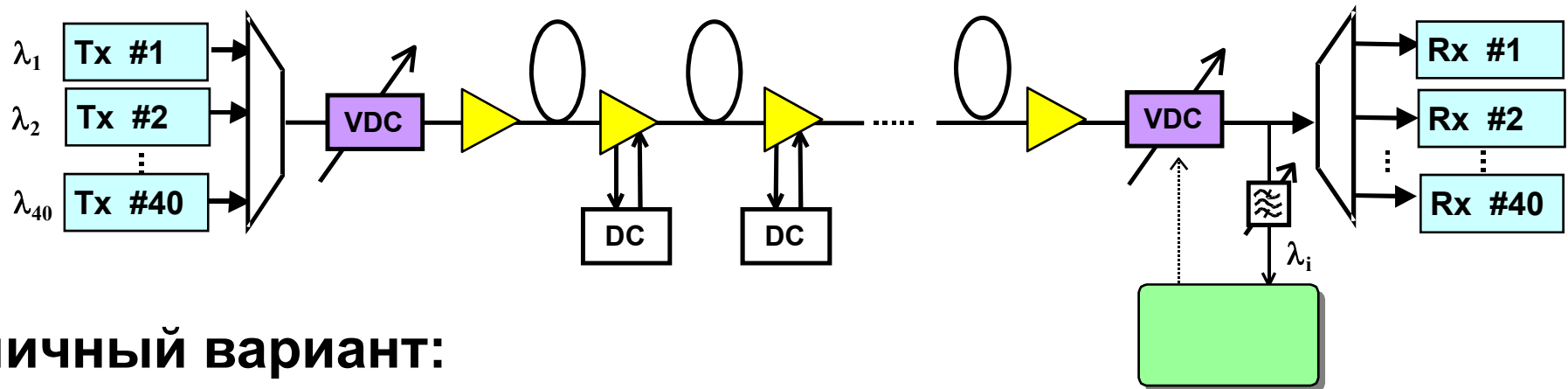
В том числе, за счет применения:

- фазовой (PSK) или дифференциальной фазовой (DPSK) манипуляции вместо манипуляции по интенсивности (OOK – on-off keying))
- линейного кодирования с возвратом к нулю (RZ) вместо линейного кодирования без возврата к нулю (NRZ – non return zero) (форматы CS-RZ, RZ-DPSK, RZ-PDPSK, RZ-DQPSK и др.)

**В комплексе эти меры могут дать увеличение OSNR до 24 дБм.**



При скорости передачи 10 Гбит/с и выше необходима компенсация хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии

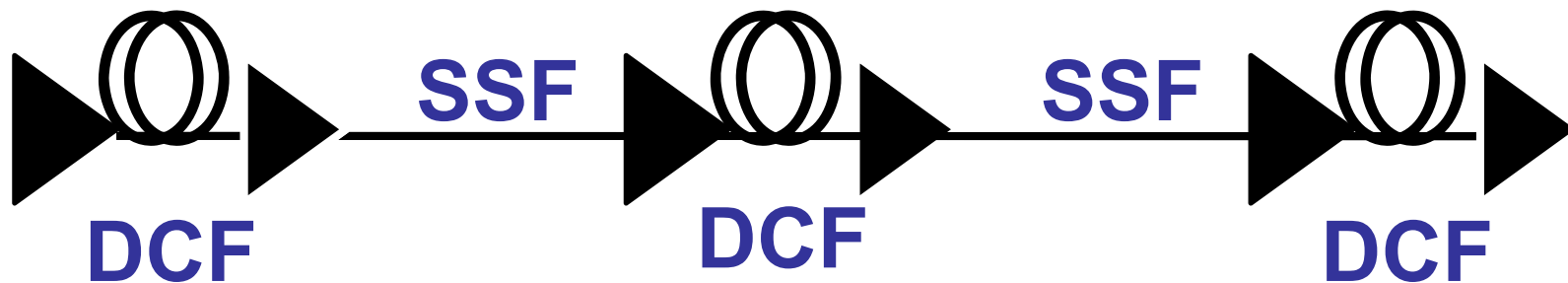


Типичный вариант:

Грубая компенсация хроматической дисперсии в оптическом диапазоне + адаптивная электронная компенсация

Перспективное направление – квазисолитонный режим передачи в линии с управлением дисперсией

**Возможности реконструкции ВОЛП с переходом на скорости 10-20 Гбит/с в одном оптическом канале на основе технологий передачи управляемых дисперсией солитоноподобных импульсов подтверждены экспериментально**



Nakasawa M., Kubota H., Suzuki K., Yamada E., Sahara A. Recent progress in soliton transmission technology//Chaos, v.10, No.3, 2000.- pp. 486-514

## Применение управляемых дисперсией солитонов для реконструкции ВОЛП с увеличением скорости передачи в канале до 10-20 пс/нм/км

1. Передача со скоростью 10 Гбит/с на расстояние до 1000 км по обычному ступенчатому ОВ при расстоянии между ОУ 100 км и компенсации хроматической дисперсии дифракционной Брэгговской решетке  
**Grudinin A.B., Durkin M. et al. Straight line 10 Gb/s soliton transmission over 1000 km of standard fibre with in-line chirped fibre grating for partial dispersion compensation//Electron. Lett., v.33, 1997.- pp.1572-1580**
2. Передача со скоростью 10 Гбит/с на расстояние до 2244 км по обычному ступенчатому ОВ при расстоянии между ОУ 102 км и компенсирующем ОВ длиной 17,3 км  
**Favre F., Le Guen D., Georges T. Experimental evidence of pseudoperiodical soliton propagation in dispersion-managed links//J. Lightwave Technol. V.17, No.6, 1999/ - pp.1032-1036**
3. Передача со скоростью 10 Гбит/с на расстояние до 16500 км по обычному ступенчатому ОВ при расстоянии между ОУ 13.6 и 18.1 км и компенсирующем ОВ  
**Penketh I.S. et al. 10 Gbit/s dispersion-managed soliton transmission over 16,500 km in standard fiber by reduction of soliton interactions**
4. Передача со скоростью 20 Гбит/с на расстояние до 1100 км по обычному ступенчатому ОВ при расстоянии между ОУ 100 км и компенсирующем ОВ длиной 15,8 км  
**Zitelli M., Favre F., Le Guen D., Del Burgo S. Numerical and experimental investigation of power and wavelength margins for 20-Gb/s dispersion-managed soliton transmission system on standard fiber**

Экспериментально подтверждена возможность передачи в одном канале 40 Гбит/с на расстояние 1160 км при длине УУ – 75 км (среднее значение остаточной дисперсии 0,03 –0,04 пс/нм/км).

*Harper P., Alleston S.B., Bennion I., Doran N.J. 40 Gbit/s dispersion managed soliton transmission over 1160 km in standard fibre with 75 km span length// Electronics Letters, v.35, No.24, 1999.- pp.2128-2130*

Теоретически и экспериментально показано, что есть оптимальная точка приема. Причем расстояние от нее до усилителя пропорционально накопленной дисперсии. Соответственно, для каждого канала – разное расстояние.

Govan D.S., Forysiak W., Doran J. Long-distance 40-Gbit/s soliton transmission over standard fiber by use of dispersion management//Optics Letters, v.23, No.19, 1998.- pp.1523-1525

Mezentsev V.K., Turitsyn S.K., Doran N.J. System optimization of 80 Gbit/s single channel transmission over 1000 km of standard fiber// Electronics Letters, v.36, No.23, 2000.- pp.

05.12.2011

Экспериментально подтверждена возможность передачи в одном канале 40 Гбит/с на расстояние 6400 км при длине УУ – 26.5 км (среднее значение остаточной дисперсии 0,005 –0,025 пс/нм/км).

25 DCF + 1.5 км SSF

Демонстрируется чувствительность системы к возмущениям. Авторы делают вывод о том, что DMS не может быть практически использовано для систем.

*Holzlohner R., Ereifej H. N., Grigoryan V.S., Carter G.M., Menyuk C.R. Experimental and theoretical characterization of a 40-Gb/s long-haul single-channel transmission system//Journal of Lightwave technology, v.20, No.7, 2002.-pp.1124-1131*

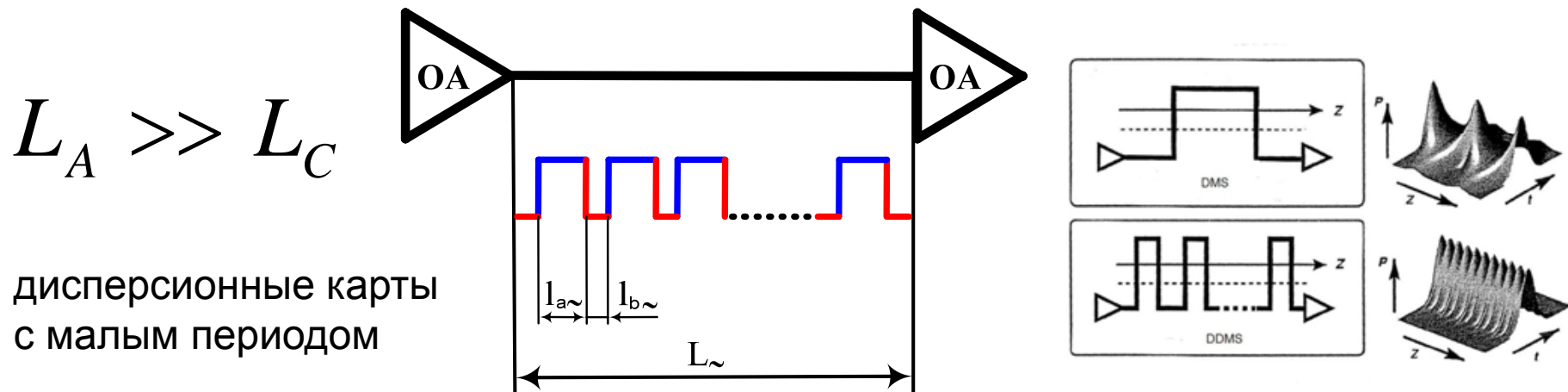
## Проблемы передачи управляемых дисперсией солитонов

- Эффект Гордона-Хауса (джиттер)
- взаимодействие солитонов
- Сдвиг частоты радиоимпульса

### Пути решения

- Управление солитонами (2R или 3R регенератор)
- Рамановское усиление со встречной накачкой
- Чередование импульсов с ортогональной поляризацией
- Оптимизация параметров импульсов на входе, в том числе чирпирование

## DDMS – densely dispersion managed soliton «плотное» управление солитонами



Turitsyn S.K., Fedoruk M.P., Gornakova A. Reduced-power optical solitons in fiber lines with short-scale dispersion management//Optics Letters, v.24, No.13, 1999.- pp.869-871

Liang A., Toda H., Hasegawa A. High speed optical transmission with dense dispersion managed soliton// ECOC'99, P3.8, v.1, 1999.-pp.386-387

# Сравнение DMS и DDMS при передаче со скоростью 160 Гбитс

Fatome J., Pitois S., Tchofo-Dinda P., Erasme D., Millot G. Comparison of conventional and dense dispersion managed systems for 160 Gb/s transmissions// Optical Communications , v.260, 2006.- pp.548-553.

## 1. DMS

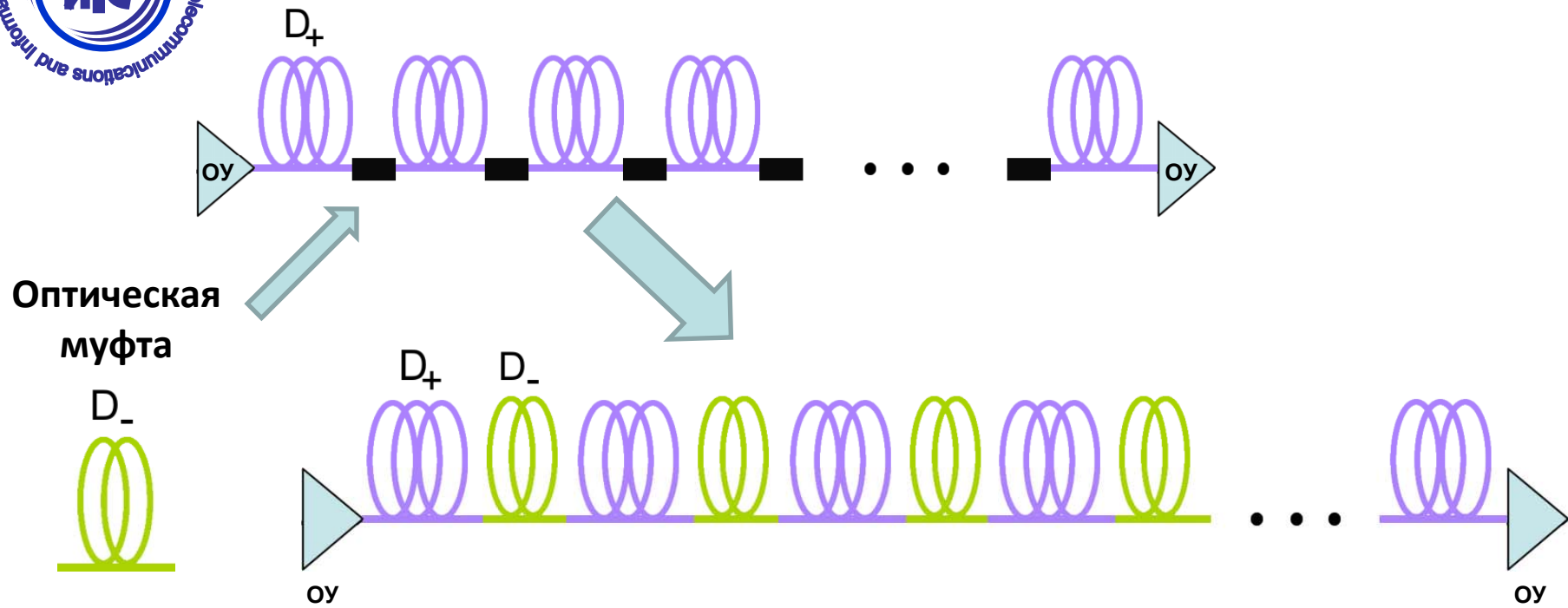
SSF 100 км + DSF 17 км, расстояние между ОУ -100 км

## 2. DDMS

NZ-DSF с положительной и отрицательной дисперсией,  
Расстояние между ОУ – 16 км

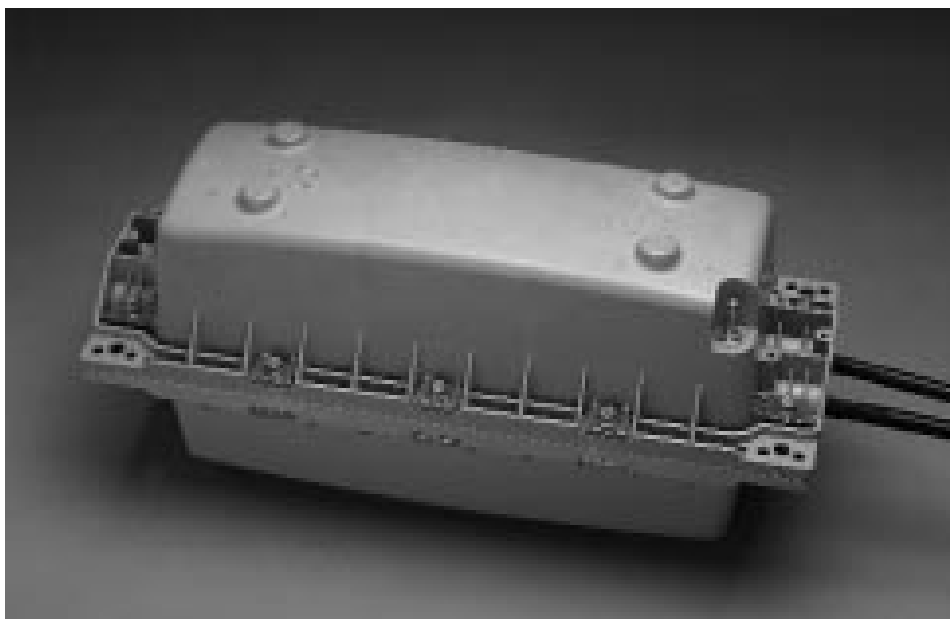
DDMS обеспечивает передачу на расстояние примерно в два раза больше. Эффект снижается из-за ПМД.





Реализация DDMS для реконструкции ВОЛП

$$FOM = |D| / \alpha$$



$$FOM = |D| / \alpha$$

Mishra M., Konar S. Interaction of soliton in dispersion managed optical communication system with asymmetric dispersion map//Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2007,v.21, No. 14.- pp.2049-2058.

Driben R., Malomed B.A., Chu P.L.  
 Transmission of pulses in dispersion-managed fiber link with extra nonlinear segments//Optics Communications, 2005, v.245.- pp. 227-236



05.12.2011

## Основная математическая модель для описания эволюции оптических импульсов в ОВ

### Обобщенное нелинейное уравнение Шредингера (ОНУШ):

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

$$A(z, t) = E(z, t) \exp \left[ \int_0^z G(s) ds \right]$$

Дисперсионный параметр:

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

$$iA_z + d(z)A_{tt} + \varepsilon c(z) |A|^2 A = 0$$

эффективный коэффициент  
нелинейности

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

### МНУШ ( уравнение Габитова-Турицына)

## Численный алгоритм решения ОНУШ :

Метод Фурье расщепления по физическим процессам

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \tilde{D}A + \tilde{N}A$$

$\tilde{D}$  - оператор линейной части,

$\tilde{N}$  - нелинейный оператор

## Приближенное решение МНУШ на основе вариационного подхода:

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

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

Периодические  
граничные  
условия:

$$L_p = \max\{Z_a, L\},$$

$$\begin{cases} T(0) = T(L_p), \\ M(0) = M(L_p) \end{cases}$$

## Аналитическое решение МНУШ с периодически изменяющимися параметрами

$$j \frac{\partial A}{\partial Z} - \frac{D(Z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + R(Z) \cdot |A|^2 \cdot A = 0$$

$$A(Z) = \sqrt{C \cdot P(Z)} \cdot \eta \cdot \operatorname{sech}[\eta P(Z)t] \cdot \exp[0.5P(Z)t^2] - j0.5\eta^2 [P(Z) - P(0)]$$

$$P(Z) = P_0 \left[ 1 + P_0 \int_0^Z D(z) dz \right]^{-1}$$

$$R(Z) = P(Z)D(Z) / C$$

Условие распространения СИ

$$\left[ 1 + P_0 \int_0^Z D(z) dz \right] \cdot \exp \left[ -C \int_0^Z R(z) dz \right] = 1$$

$$L_d = \frac{t_{OS}^2}{1.665^2 |\beta|}$$

$$N = \frac{z_a}{2L_d \sqrt{\left(\frac{\varepsilon T}{t_{OS}}\right) - 1}}$$

$$\varepsilon = 0,55$$

$$\varepsilon = 1,5$$

Fatome J., Fortier C., Pitois S. Practical design rules for single-channel ultra high speed dense dispersion management telecommunication systems//Optics Communications, v.282, No.7, 2009.- pp.1427-1434

Искажения оптических импульсов рассчитывали путем решения ОНУШ методом split-step

## Расчеты выполнялись для ОВ

- На длине волны 1550 нм диапазона С для ступенчатых одномодовых ОВ SMF28 и SMF28e с коэффициентом хроматической дисперсии  $D=17$  пс/(нм·км), коэффициентом затухания  $=0.22$  дБ/км и параметром нелинейности  $\gamma=3$  Вт<sup>-1</sup>/км.
- Для типичных компенсирующих ОВ, у которых на длине волны 1550 нм коэффициент хроматической дисперсии  $D= -100$  пс/(нм·км), коэффициент затухания  $=0.42$  дБ/км и параметр нелинейности  $\gamma=11$  Вт<sup>-1</sup>/км.

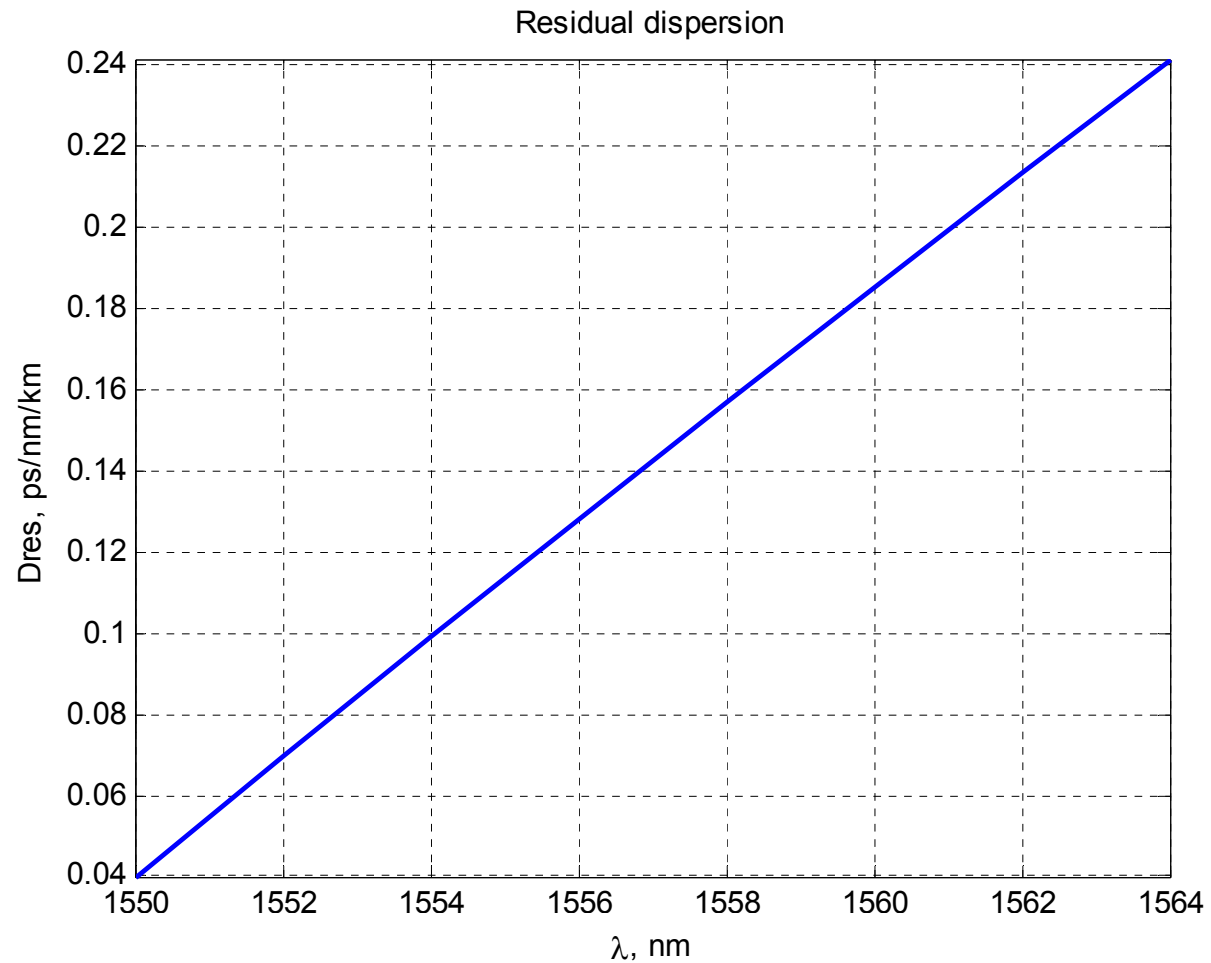
Параметр шум–фактора ОУ принимали равным 5 дБ.

Качество передачи оценивали по коэффициенту ошибок BER, который рассчитывали на основе концепции Q–фактора

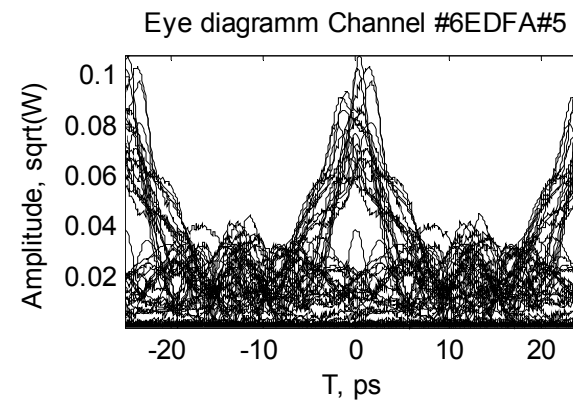
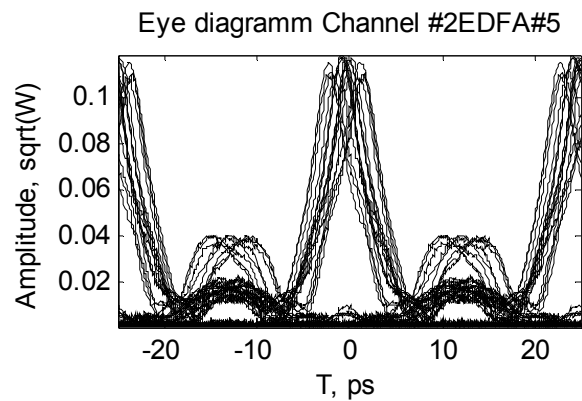
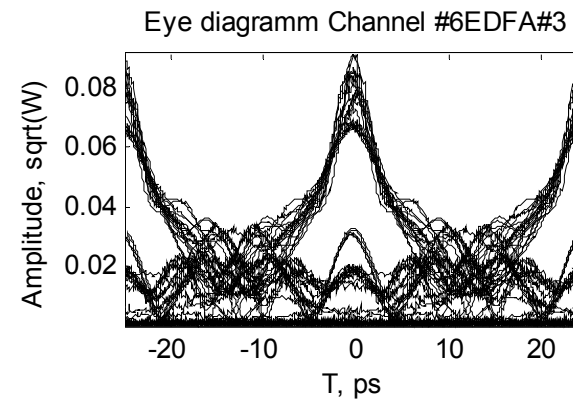
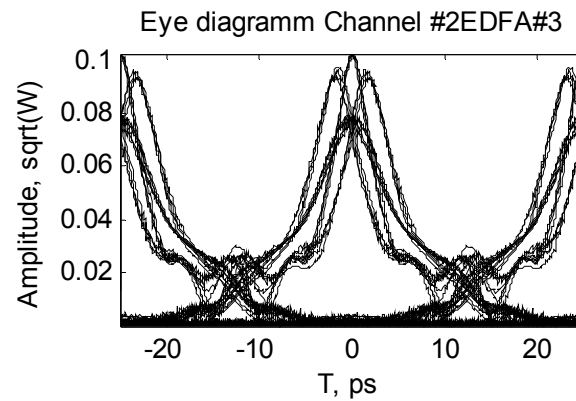
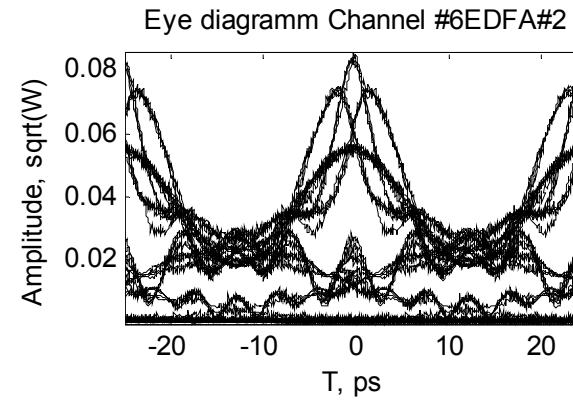
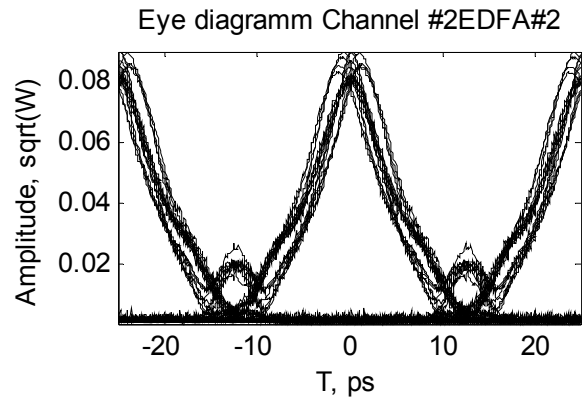


## Пример

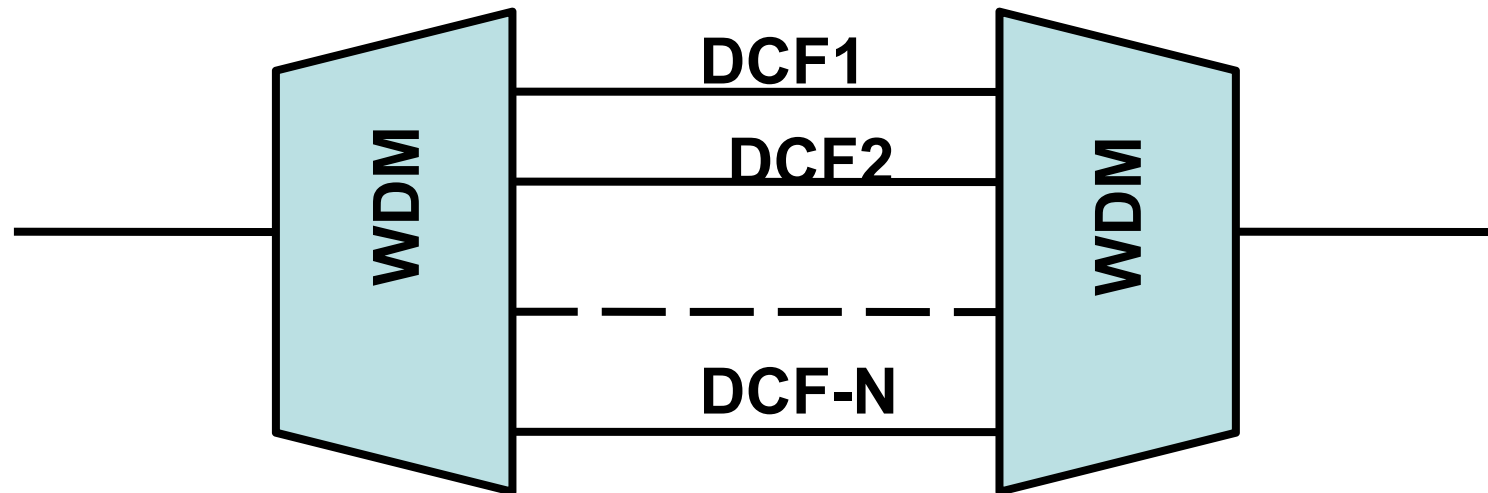
1. Длина РУ= 600 км
2. Длина УУ = 120 км
3. Всего 5 УУ (5 ОУ на выходе каждого УУ)
6. Максимальное значение мощности на выходе ОУ 10 мВт
7. На участке 30 периодов
8. Длина SMF на периоде 4 км
9. Длина DCF на периоде 0,666 км
10. Количество каналов 8.



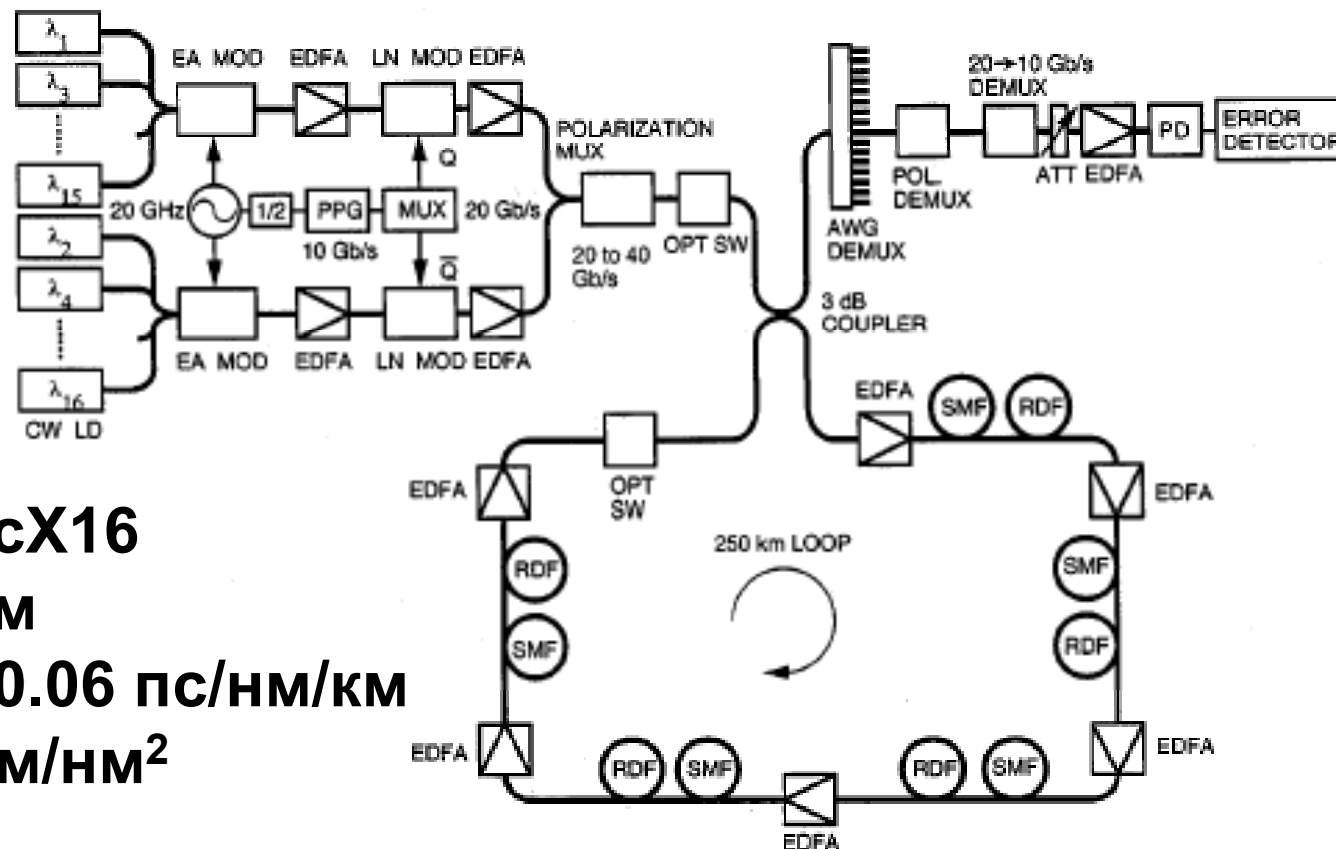
Среднее значение дисперсии.



Чтобы обеспечить  $Q > 6$  нужно снижать среднее значение остаточной дисперсии в канале до  $0,04 - 006$  пс/нм/км



Через интервалы кратные длине УУ включаются устройства для выравнивания хроматической дисперсии в каналах



**WDM 40Гбит/сX16**

**1550 – 1565 нм**

**$D_m = +0.02 - + 0.06$  пс/нм/км**

**$S = 0.005$  пс/км/нм<sup>2</sup>**

Nakasawa M., Kubota H., Suzuki K., Yamada E., Sahara A. Recent progress in soliton transmission technology//Chaos, v.10, No.3, 2000.- pp. 486-514

## Выводы

1. Передача со скоростью 40 Гбит/с на основе DMS при длине УУ свыше 120 км на расстояния свыше 600 км по SSF с  $Q > 6$  возможна, если средняя дисперсия в линии на оптической несущей канала не превышает 0.06-0.08 пс/нм/км
2. Преимущества DDMS по сравнению с DMS возрастают с уменьшением длины УУ. При больших длинах УУ (100 км и более) они проявляются слабо.
3. Можно рекомендовать компенсацию наклона спектральной характеристики средней остаточной дисперсии через 200-250 км.



---

Спасибо!