

Моделирование высокоскоростных волоконных
линий связи, использующих гибридные схемы
усиления и кодирование информации по разности
оптических фаз

М.П. Федорук¹, С.К. Турицын², А.И. Латкин³, О.В. Штырина¹, А.В. Якасов⁴

¹ *Институт вычислительных технологий СО РАН*

² *Университет Астон, Бирмингем, Великобритания*

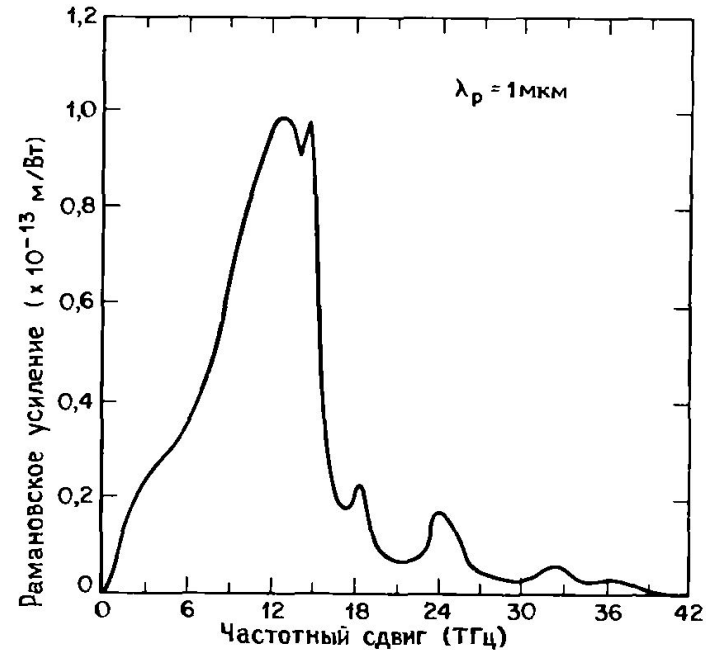
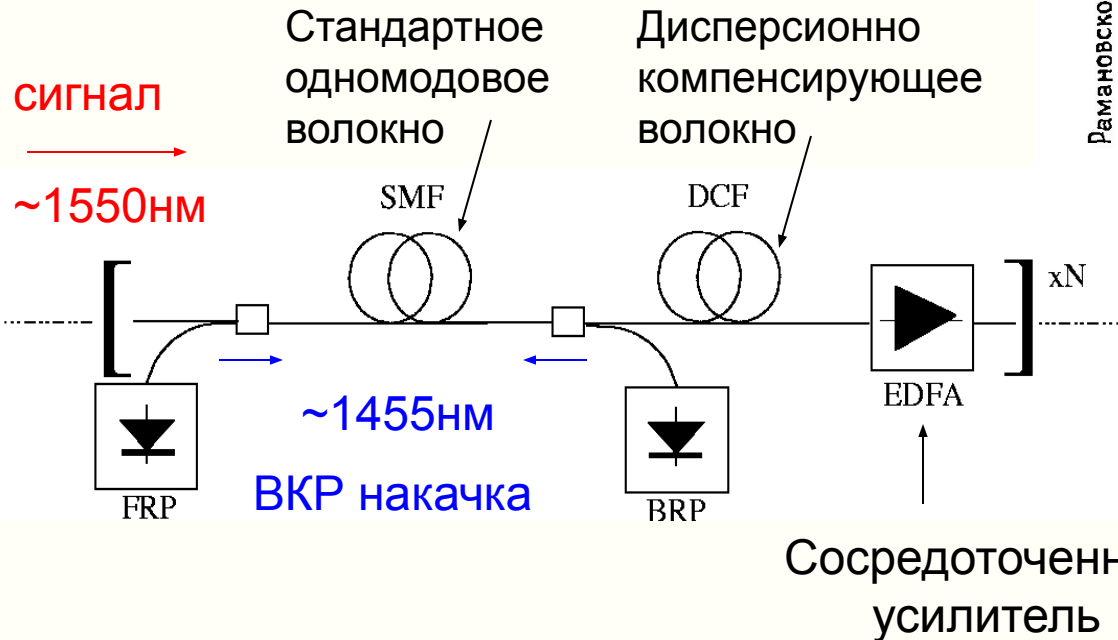
³ *Институт автоматики и электрометрии СО РАН*

⁴ *Новосибирский государственный университет*

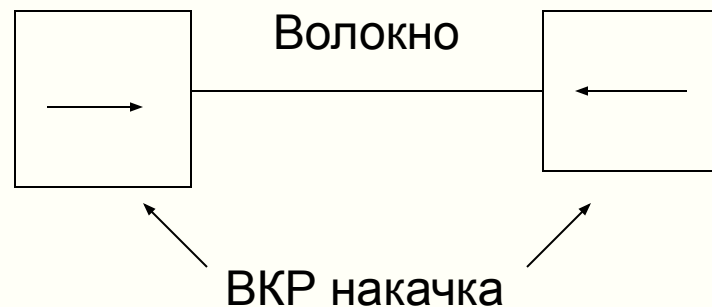
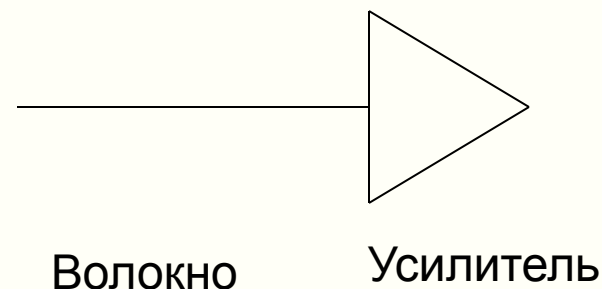
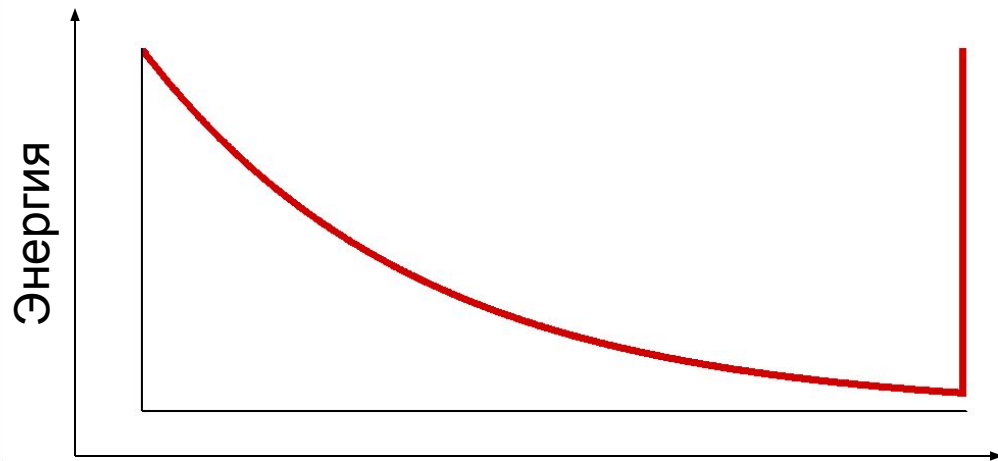
Источник накачки для компенсации потерь в ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Требуется компенсировать затухание в линии связи. ВКР позволяет преобразовывать энергию накачки в энергию сигнала

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$



Достоинства ВКР накачки



Основное преимущество ВКР накачки перед сосредоточенными усилителями – более равномерное распределение мощности, лучшее соотношение сигнал/шум

Распространение сигнала по оптоволокну

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \gamma |A|^2 A = -i \frac{\alpha}{2} A + i \frac{\Gamma(z)}{2} A$$

Дисперсия
групповых
скоростей

Дисперсионный
наклон

Керровская
нелинейность

Линейные
потери

Усиление

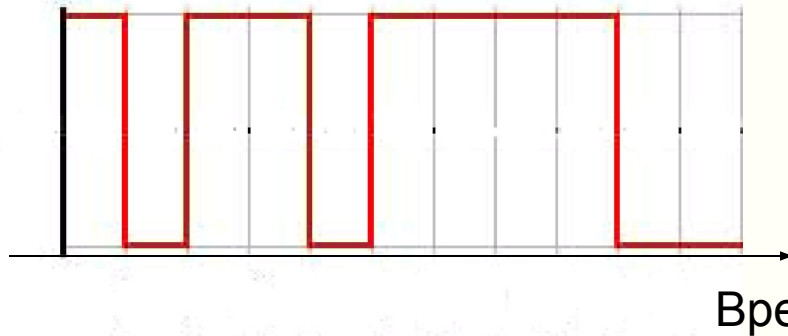
$$\Gamma(z) = \frac{g_R}{A_{eff}} P_{pump}(z) \quad \text{ВКР усиление}$$

$A(z,t)$ – медленно меняющаяся огибающая электрического поля.
Характерная ширина импульса $T \sim 10$ пс, мощность $P \sim 1$ мВт,

Форматы кодирования информации:

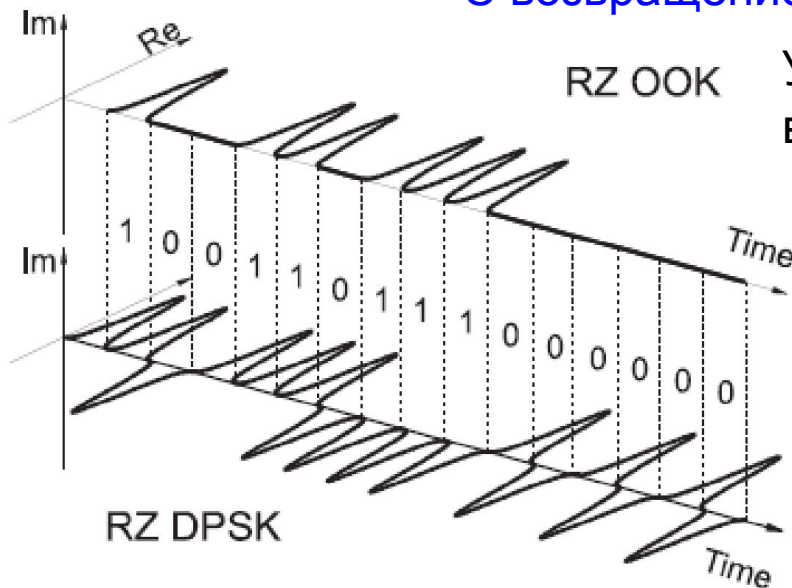
Без возвращения к нулю (NRZ)

1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0



Качество передаваемых данных сильно страдает из-за нелинейных искажений

С возвращением к нулю (RZ)

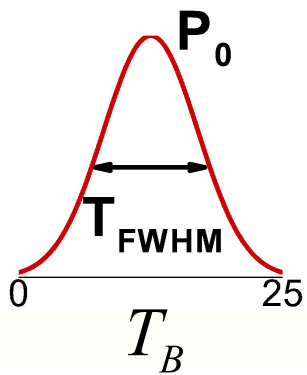


Уединенные импульсы более устойчивы к внутрисимвольным нелинейным искажениям

При скорости 40 Гбит/сек в OOK
Существенны межсимвольные
нелинейных эффектов (ЧВС, ФКМ).

В формате DPSK более равномерное
распределение мощности во времени

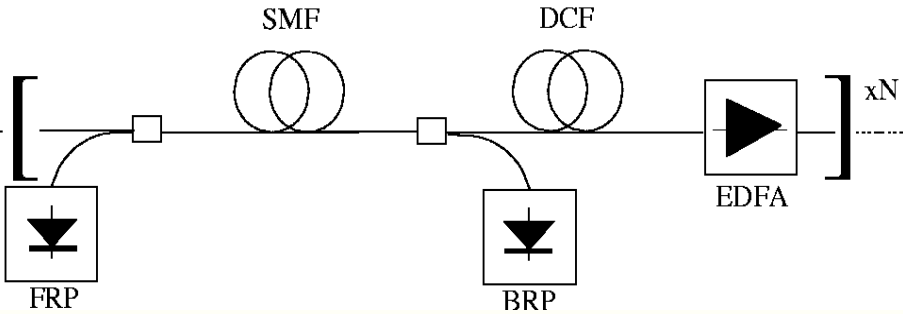
Важнейшие параметры линии связи и сигнала



1. Длительность:
 Duty cycle = T_{FWHM} / T_B

2. Средняя мощность:

для DPSK	для OOK
$\langle P \rangle = P_0 \frac{T_{FWHM}}{T_B} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}}$	$\langle P \rangle = \frac{1}{2} P_0 \frac{T_{FWHM}}{T_B} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}}$



3. Средняя дисперсия:

$$D_{SMF} > 0, \quad \langle D \rangle = \frac{L_{SMF} D_{SMF} + L_{DCF} D_{DCF}}{L_{SMF} + L_{DCF}}$$

$$D_{DCF} < 0,$$

Доля потерь, компенсируемых прямой и обратной накачкой и EDFA:

$$G_{total} = \alpha_{SMF} L_{SMF} + \alpha_{DCF} L_{DCF}$$

$$G_{Raman} = \alpha G_{total} = \frac{g_R}{A_{eff}} \int_0^{L_{SMF} + L_{DCF}} [P_{pump}^+(z) + P_{pump}^-(z)] dz$$

$$\eta = \frac{g_R}{A_{eff}} \int_0^{L_{SMF} + L_{DCF}} P_{pump}^{(-)}(z) dz / G_{Raman}$$

Основные параметры:

Длительность, $\langle D \rangle$, $\langle P \rangle$,
 α - ВКР/все потери
 η - обратная/вся ВКР

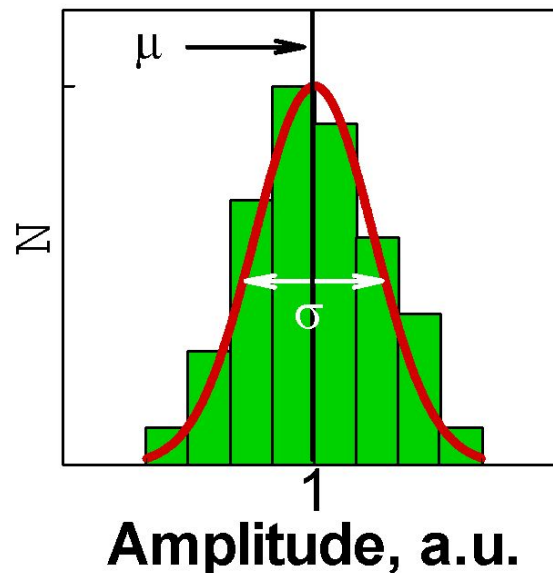
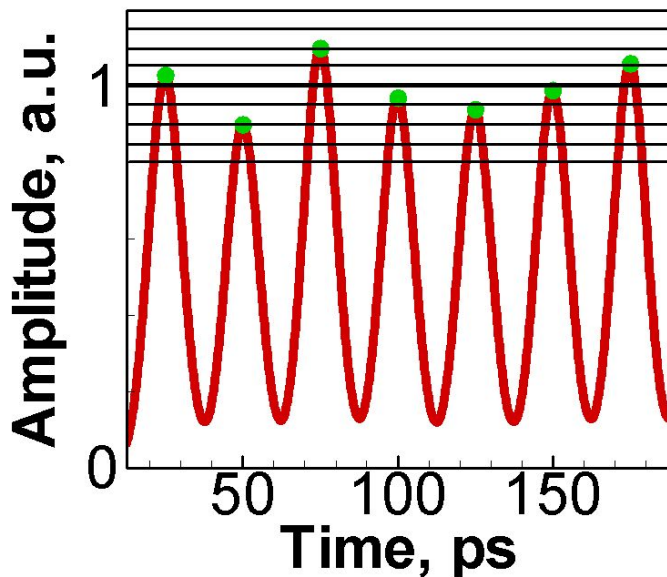
Коэффициент ошибки

BER (bit error rate) - количество ошибочных бит по отношению ко всем битам, характерный критерий качества линии связи $BER < 10^{-9}$. Прямое вычисление BER затруднительно, пользуются упрощенной моделью Q-фактора.

Для ООК: $Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$ $BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$ $BER = 10^{-9} \leftrightarrow Q \approx 6$

$\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1$ - среднее значения и дисперсия интенсивностей «0» и «1» на приемнике

Для DPSK: $Q = \frac{\mu}{\sigma}$ $BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$ $\mu = \langle f_n \rangle, \sigma^2 = \langle f_n^2 \rangle - \langle f_n \rangle^2$



Оптимизация

Дальность передачи – максимальное расстояние при котором $BER < 10^{-9}$

Оптимизация – выбор параметров линии связи (средняя дисперсия, доля ВКР усиления и пр.) и сигнала (мощность, длительность импульса), обеспечивающих максимальную дальность передачи данных.

За счет более равномерного распределения мощности в битовой последовательности, DPSK формат увеличивает дальность передачи

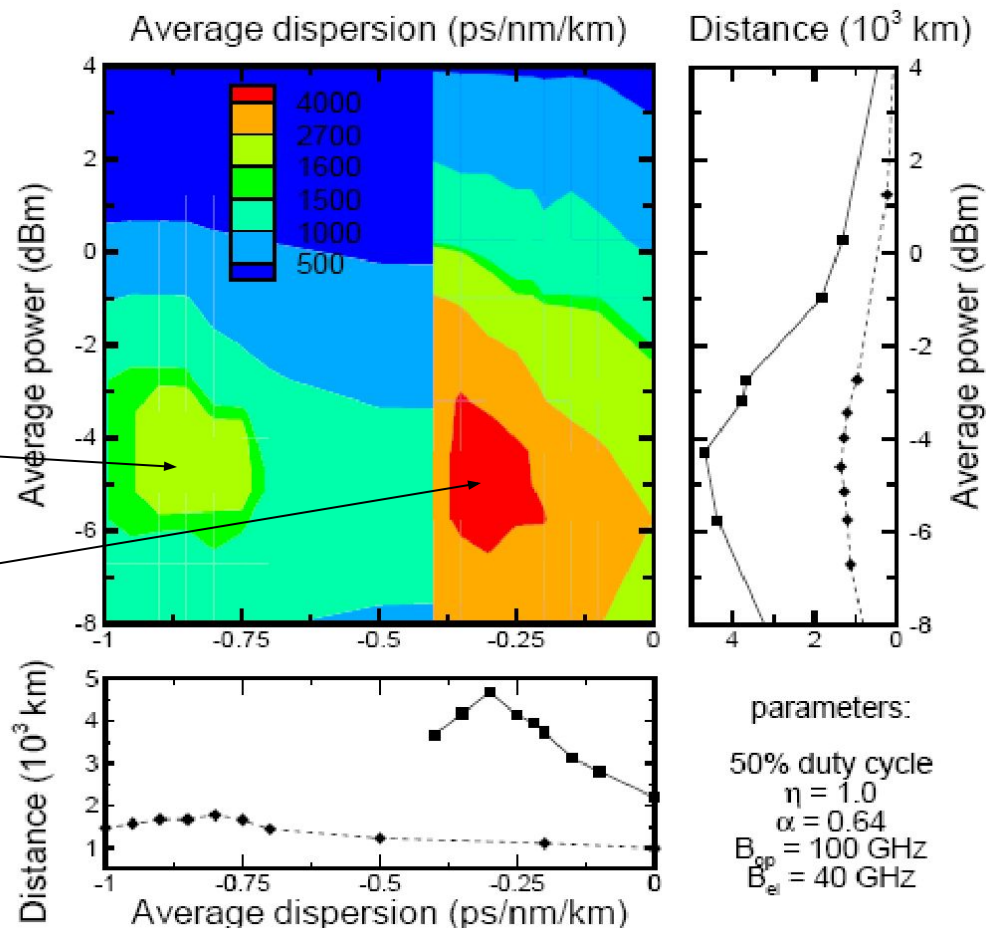
Оптимальные режимы для OOK и DPSK различаются

OOK 2000км

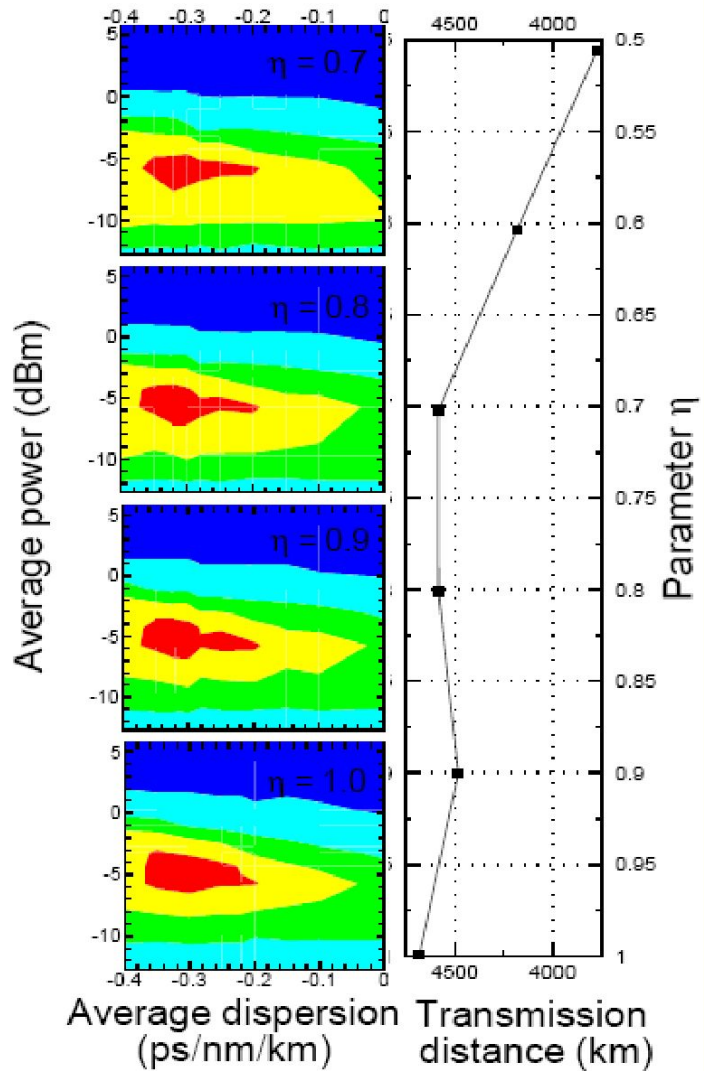
DPSK 4000км

Битовый интервал. Для скорости 40 Гбит/сек $T_B = 25$ пс

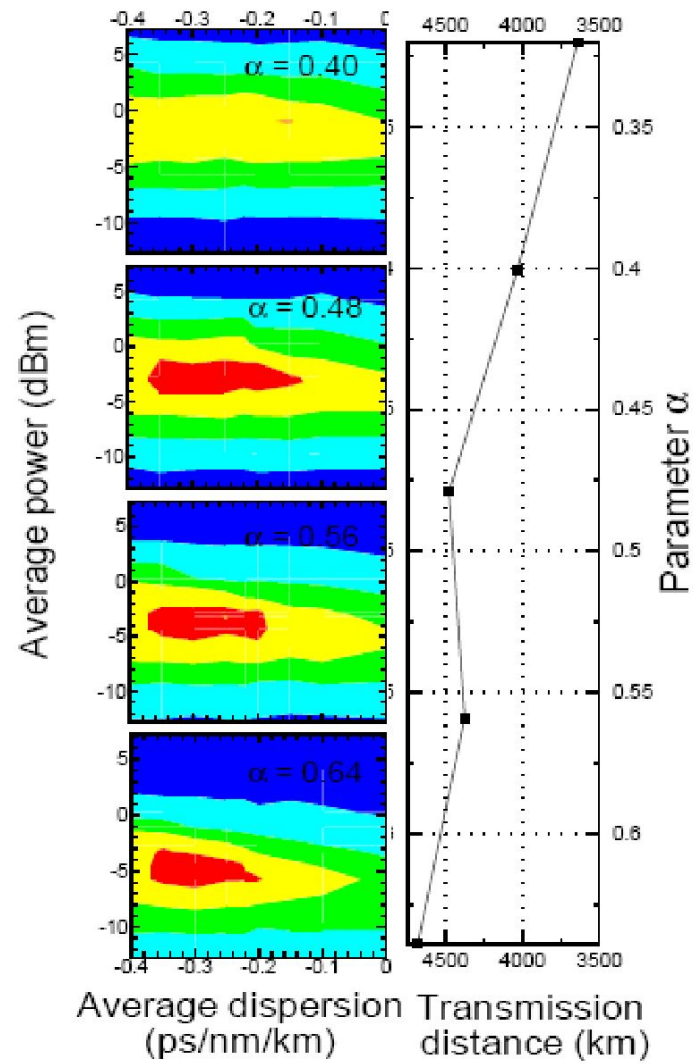
$$T_B [ps] = \frac{1}{B [THz]}$$



Влияние распределения усиления



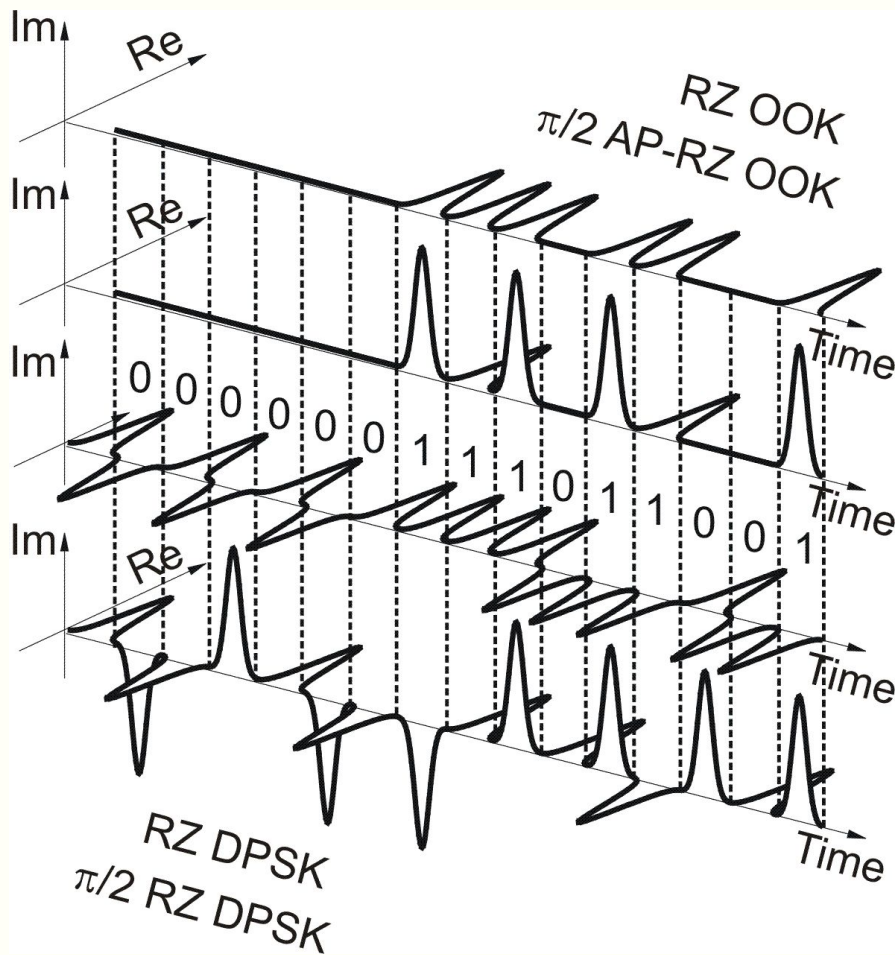
$\eta = 1$ Только обратная
ВКР накачка в SMF



$\alpha = 0.64$

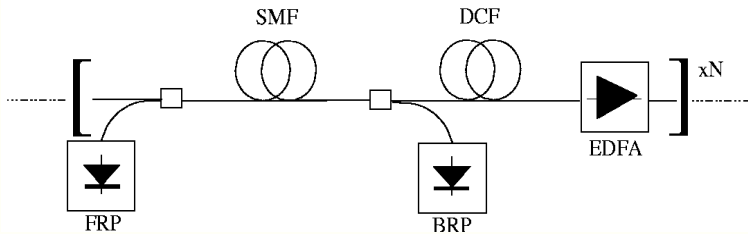
Потери в SMF полностью
компенсируются ВКР накачкой

Форматы с дополнительным сдвигом фазы

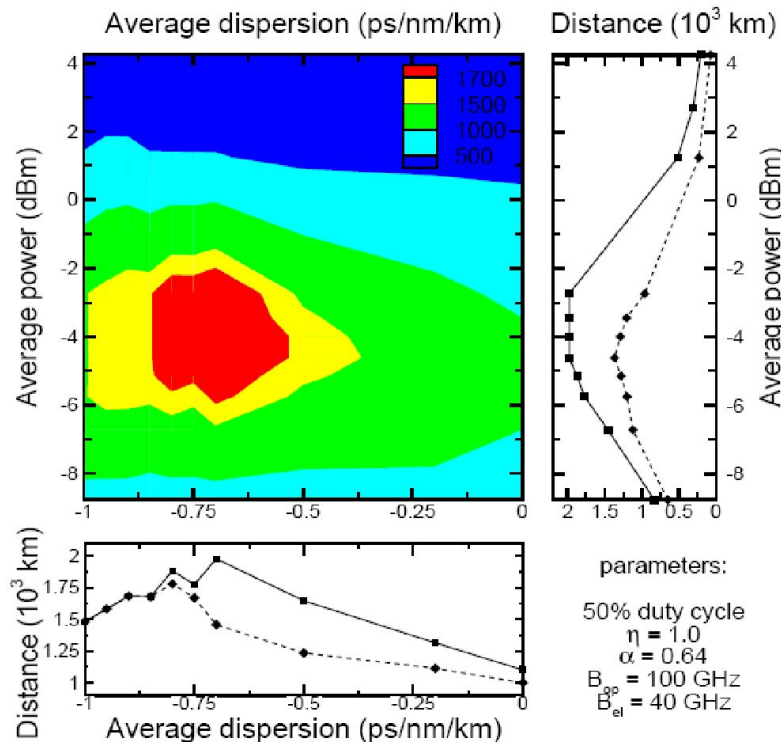


Дополнительный сдвиг фазы позволяет уменьшить влияние межсимвольных взаимодействий в OOK и DPSK (внутриканальное ЧВС), существенных при скорости 40 Гбит/сек и выше

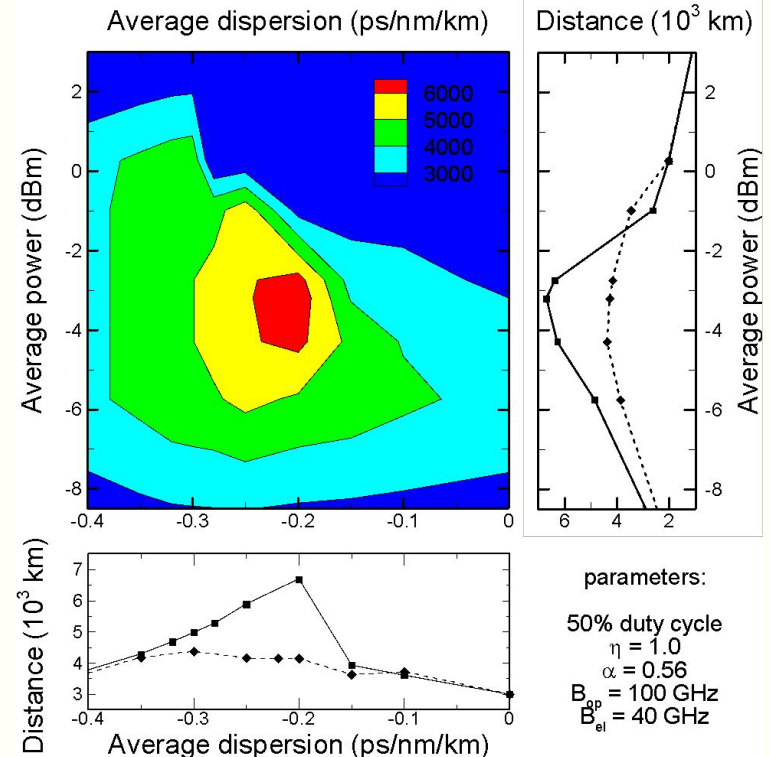
Оптимизация линий, использующих $\pi/2$ APRZ OOK и $\pi/2$ AP-RZ DPSK форматы



Ширина импульсов $T=12.5$ пс

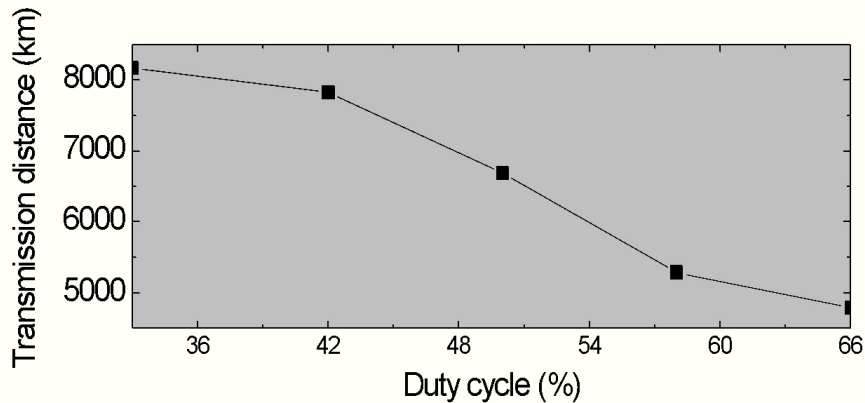


APRZ OOK 2000км

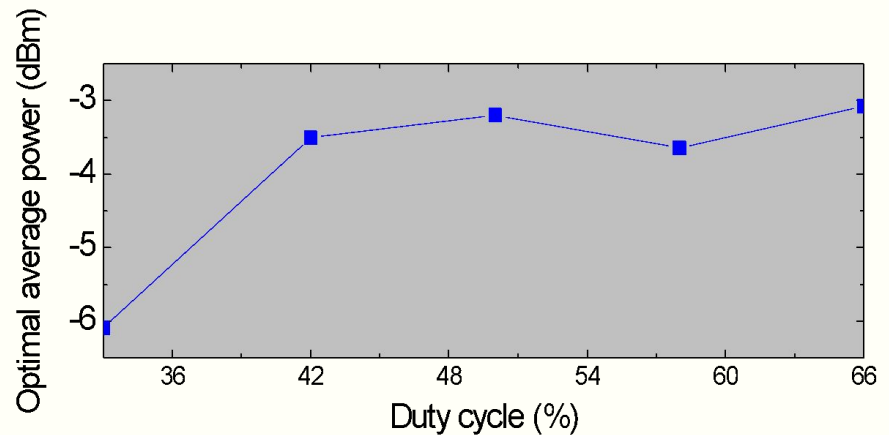
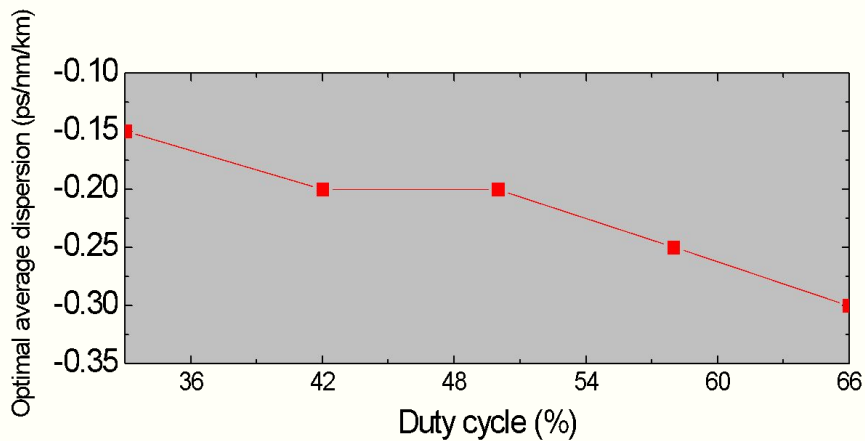


APRZ DPSK 6000км

Влияние длительности импульса на дальность передачи

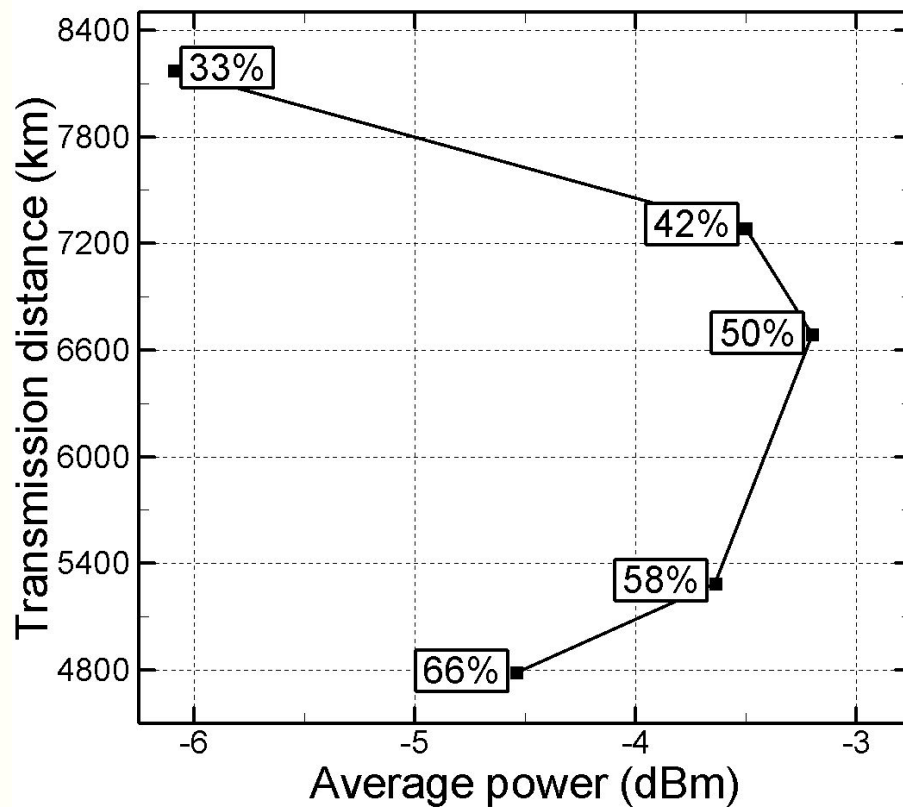
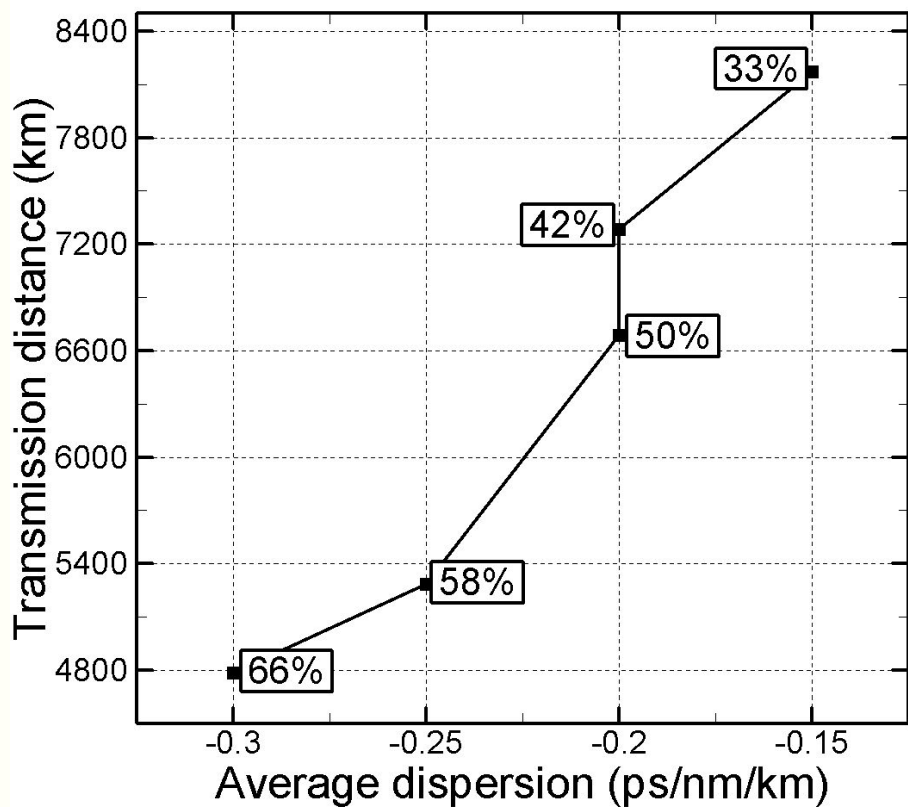


- Дальность передачи падает для широких импульсов
- Для более широких импульсов требуется большая средняя мощность и средняя дисперсия

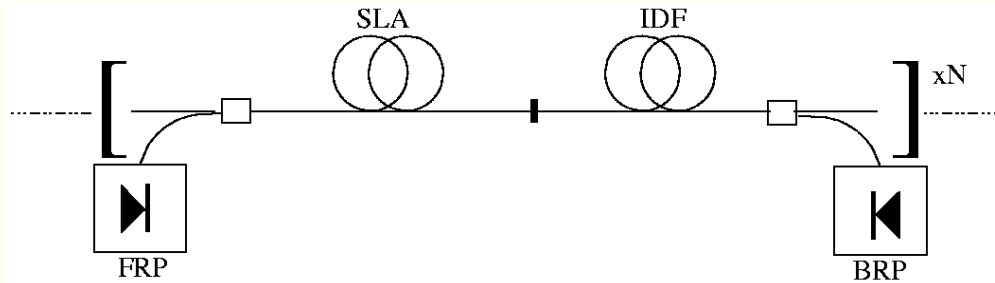


Оптимальные параметры для различных длительностей импульсов

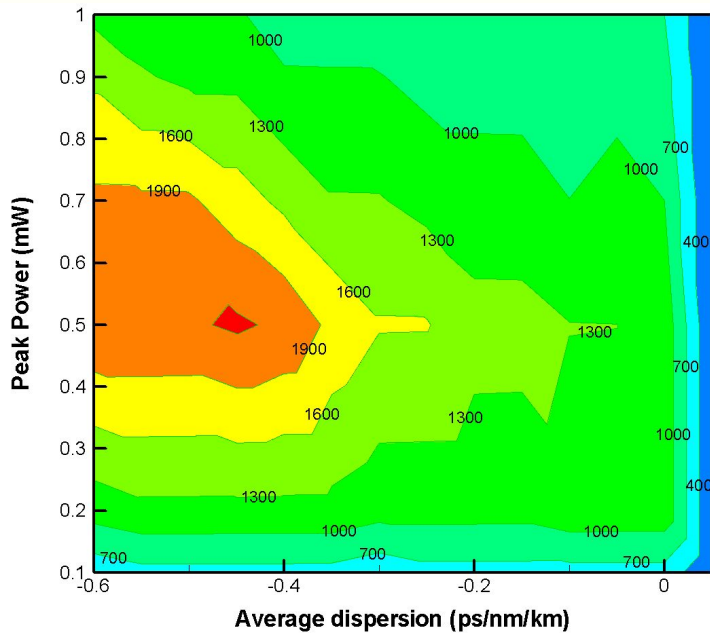
Длительность импульса изменяется от 8 пс до 17 пс



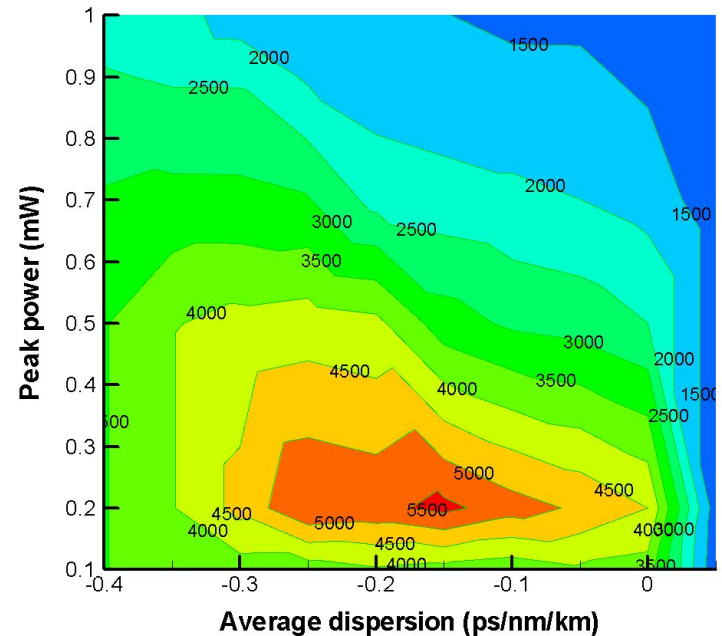
Оптимизация линий связи на основе Ultrawave™ волокон



Максимальная дальность достигается, когда 50-70% потерь компенсируется обратной накачкой

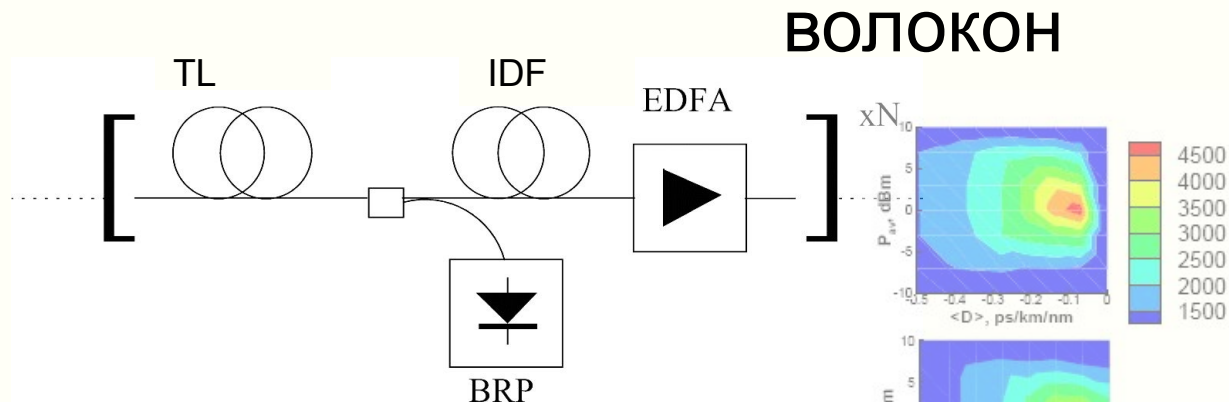


RZ-OOK, 2000 км

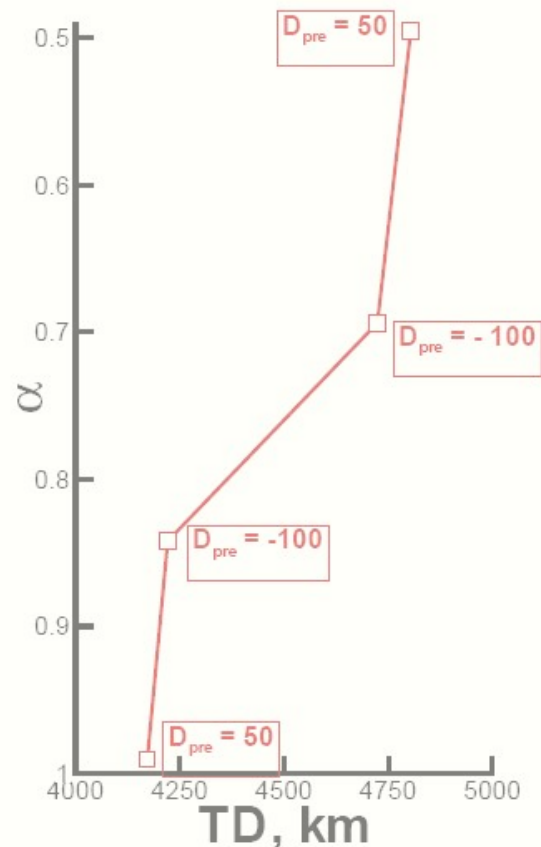
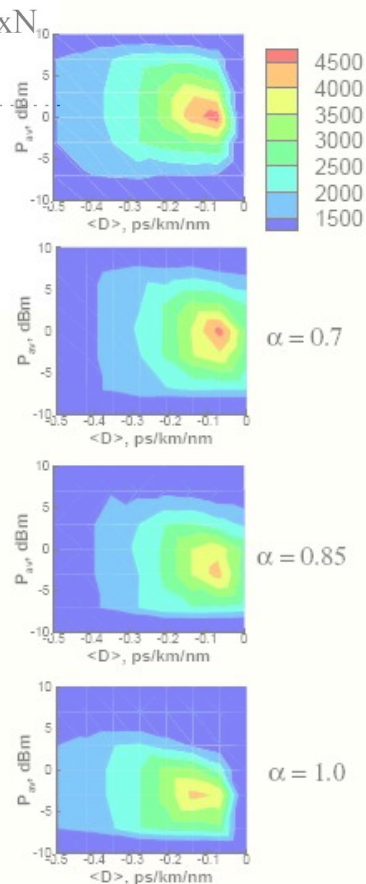


RZ-DPSK, 5600 км

Оптимизация линий связи на основе Teralight™ ВОЛОКОН



Максимальная дальность достигается, когда потери в TL волокне недокомпенсируются ВКР накачкой



RZ-DPSK, 5000 км

Выводы

1. Основным результатом – нахождение оптимальных режимов работы конкретных практически важных конфигураций линий связи. Для различных конфигураций оптимальные режимы различные.
2. Важно уметь управлять длительностью передаваемых импульсов.
3. Важно правильно выбирать соотношение между прямой и обратной накачками, долю ВКР усиления.