

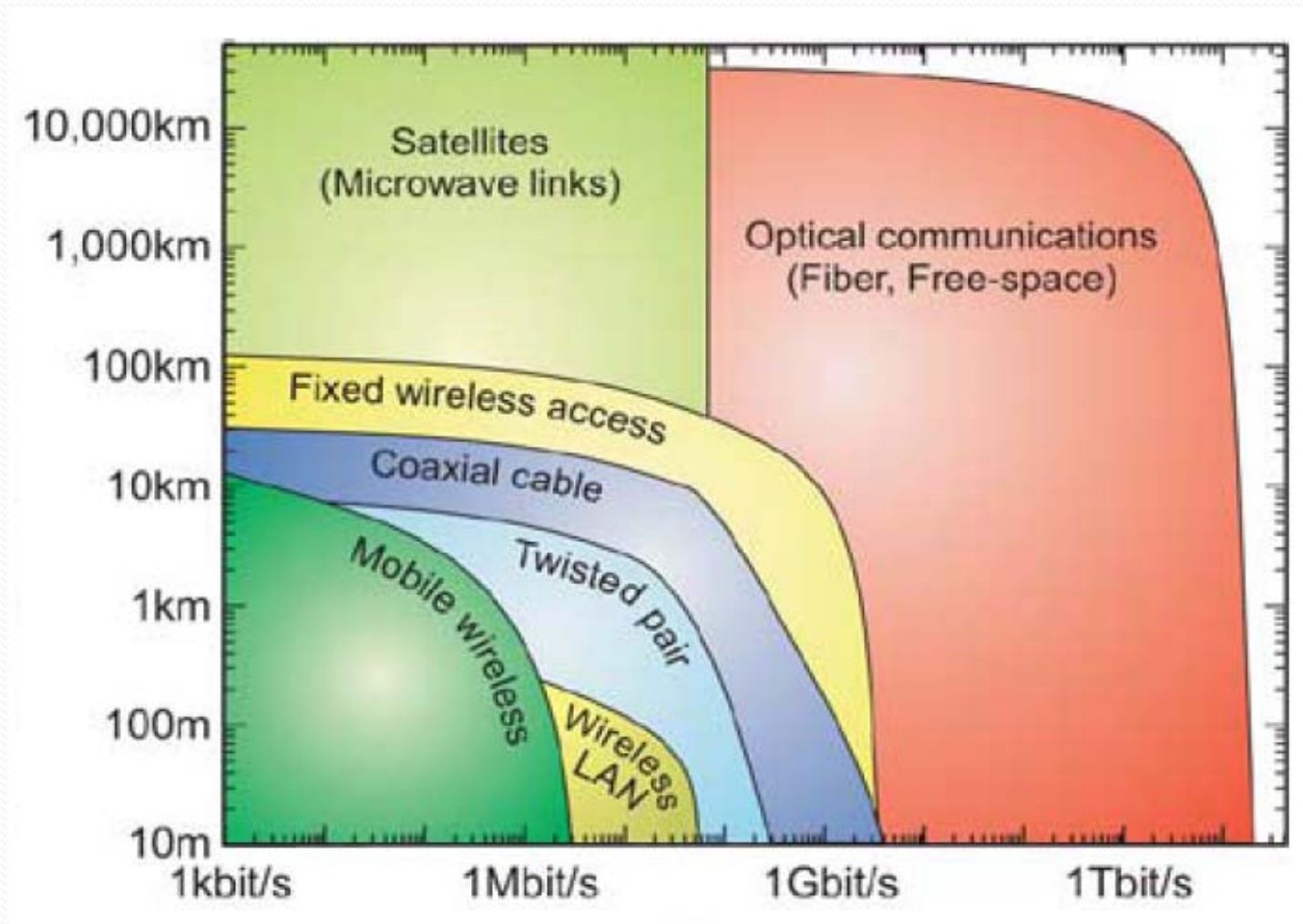
Моделирование сверхскоростных телекоммуникационных линий СВЯЗИ

М.П. Федорук

ИВТ СО РАН (г. Новосибирск)
НГУ (г. Новосибирск)

Всероссийская конференция
по волоконной оптике
Пермь-2011

Сравнительная диаграмма возможностей различных видов связи



Современные достижения в скорости передачи информации по оптоволоконным линиям

Расстояние, км	Пропускная способность, Тбит/с	Количество каналов	Скорость канала, Гбит/с
117	10.9	273	40
165	101.7	370	275 *
300	10.2	256	42.7
4000	2.6	64	42.7
6100	6.0	149	42.7
10000	1.6	40	42.7

* D.Qian et al. 101.7-Tb/s PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3x55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation // OFC/NFOEC 2011.

Пути совершенствования оптических систем связи

Увеличение пропускной способности канала

Сближение передающих каналов

Расширение частотного окна

Увеличение спектральной эффективности

Проблемы

дисперсия оптоволокна

нелинейность

нелинейность

поляризационная модовая дисперсия

перекрёстное взаимодействие каналов

Решения

Новые зоны усиления

Применение новых форматов модуляции

Рамановское усиление

Многоуровневое кодирование

Решения

Дисперсионное управление
Новые типы световодов
Предкоррекция ошибок



Всё более сложные системы



Проблемы оптимизации: многопараметрическая задача

Нужно оптимизировать:

- Входную мощность сигнала
- Длительность несущих импульсов
- Входной параметр фазовой модуляции (pre-chirping)
- Расстояние между оптическими усилителями
- Расстояние между каналами (в системах со спектральным уплотнением)
- Среднюю дисперсию
- Вариацию дисперсии вдоль одной секции (dispersion map strength)
- Кумулятивную дисперсию на входе в линию (в каждом канале)
- Кумулятивную дисперсию на выходе из линии
- Долю потерь, компенсируемых прямой и обратной накачкой (ВКР-усиление)
- Долю потерь, компенсируемых ВКР- и EDFA-усилителями
- Формат данных
- ...

Необходим массивный численный счёт!



Основные определения

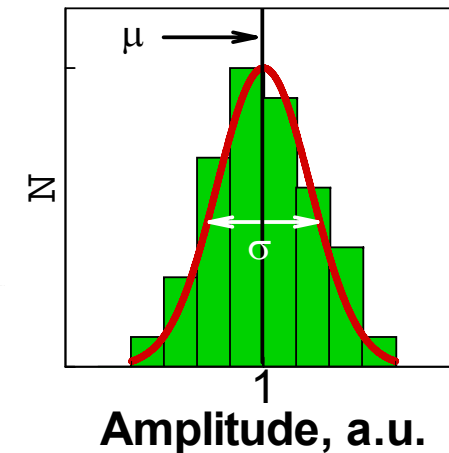
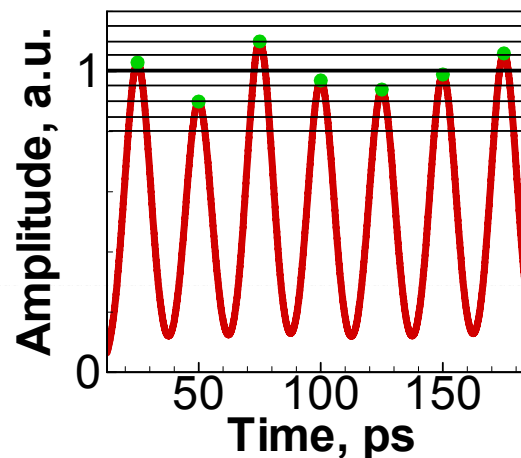
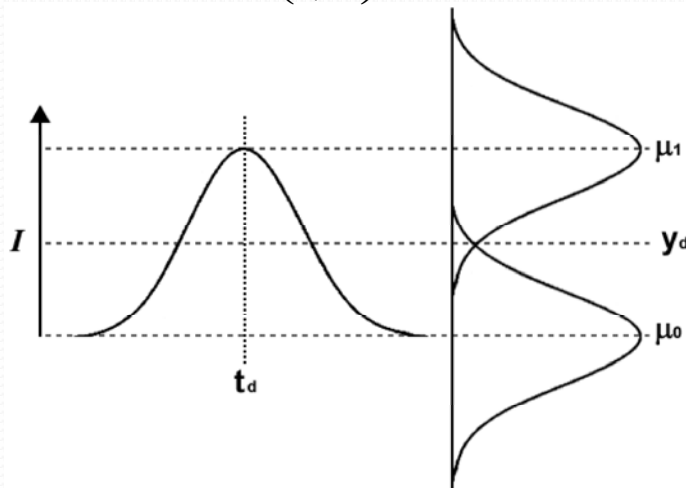
BER (bit error rate) - количество ошибочных бит по отношению ко всем битам; характерный критерий качества линии связи $BER < 10^{-9}$. Прямое вычисление BER затруднительно, поэтому пользуются упрощённой моделью Q-фактора.

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.

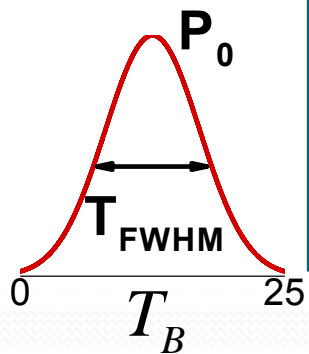
Концепция Q-фактора (справедлива только для гауссовой статистики!)

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad Q = \frac{\mu}{\sigma} \quad \mu = \langle f_n \rangle, \sigma^2 = \langle f_n^2 \rangle - \langle f_n \rangle^2$$





Важнейшие параметры линии связи и сигнала



1. Длительность:

$$\text{Duty cycle} = T_{FWHM} / T_B$$

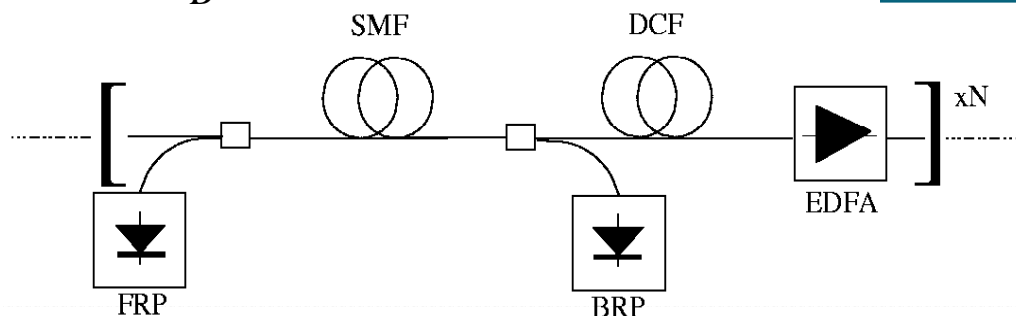
2. Средняя мощность:

для DPSK

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

для OOK

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



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:

Форматы кодирования

Длительность, $\langle D \rangle$, $\langle P \rangle$

α - ВКР/все потери

η - обратная/вся ВКР

Задачи многопараметрической оптимизации волоконно-оптических линий связи

Нелинейное уравнение Шредингера:

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

Дисперсия групповых скоростей

Дисперсионный наклон

Керровская нелинейность

Линейные потери

Усиление

Основные классы методов:

- Методы, основанные на использовании БПФ;
 - Конечно-разностные методы;
 - Конечно-элементные методы;
 - Методы сплайн-коллокации;
 - Симплектические методы;
 - Методы, основанные на решении ОЗТР.
-

Метод расщепления по физическим процессам с использованием БПФ

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

Метод второго порядка:

$$\psi_2(h) = \exp\left[\int_{z+h/2}^{z+h} \tilde{N}(s) ds\right] \exp[h\tilde{D}] \exp\left[\int_z^{z+h/2} \tilde{N}(s) ds\right]$$

Метод четвертого порядка:

$$\psi_4(h) = \psi_2(\eta h) \psi_2([1-2\eta]h) \psi_2(\eta h)$$

$$A(z+h, t) = \psi_i(h) A(z, t)$$

Компактная диссипативная схема для нелинейного уравнения Шредингера vs Метод расщепления по физическим процессам с использованием БПФ

Преимущества:

- Простота реализации;
- Хорошая распараллеливаемость;
- Линейное число операций.

Недостатки:

- Низкая скорость сходимости;
- Сложность обобщения на случай дисперсий высших порядков.

Преимущества:

- Быстрая скорость сходимости;
- Легко обобщить на случай дисперсий высших порядков.

Недостатки:

- Сложность распараллеливания;
- Необходимость использования БПФ (число узлов 2^n и равномерность сетки).

Если достаточно учесть только дисперсию второго порядка предпочтительнее, использовать экономичные компактные разностные схемы повышенного порядка точности

Компактная диссипативная схема для нелинейного уравнения Шредингера

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{b}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - s f, \quad f = |A|^2 A$$

Разностная схема с весами имеет вид:

$$i \frac{A^{n+1} - A^n}{h} = \frac{b}{2} \Lambda (\alpha A^{n+1} + (1 - \alpha) A^n) - s (\alpha f^{n+1} + (1 - \alpha) f^n), \quad f = |A|^2 A.$$

При весе $\alpha \geq 1/2$ имеет место абсолютная устойчивость, так как:

$$\rho_k = \frac{l + r(\alpha - 1)\psi_k}{l + r\alpha\psi_k}, \quad r = \frac{2bh}{\tau^2}, \quad \psi_k = \sin \frac{k\tau}{2}$$

по модулю не превосходит единицы, а при меньших весах устойчивости нет вовсе!

Компактная диссипативная схема для нелинейного уравнения Шредингера

Схема повышенной точности $O(h^2 + \tau^4)$

$$i \frac{A^{n+1} - A^n}{h} = \frac{b}{2} \Lambda (\alpha A^{n+1} + (1 - \alpha) A^n) - s \left(\frac{f^{n+1} + f^n}{2} + \frac{\tau^2}{12} \Lambda f^n \right),$$

сильной устойчивости нет!

Увеличим вес схемы: $\alpha = \frac{1}{2} + ch - \frac{t}{3r}, \quad r = 2b \frac{h}{\tau^2}, \quad c > 0.$

Т.е. добавим в уравнение искусственное диссипативное слагаемое $ch^2 \frac{\partial A}{\partial z}$,

Квадрат модуля для коэффициента возрастания гармоник

$$|\rho_k|^2 = 1 - \frac{2cqr^2\psi_k^2}{|t + r\alpha\psi_k|^2}$$

Итерационный процесс имеет вид:

$$\left(iE - \frac{\tau q}{4} \Lambda \right) \frac{v^{k+1} - A^n}{q} - \frac{b}{2} \Lambda A^n + s \left(\frac{|v^k|^2 v^k + |A^n|^2 A^n}{2} + \frac{\tau^2}{12} \Lambda |A^n|^2 A^n \right) = 0.$$

Необходимость использования НРС

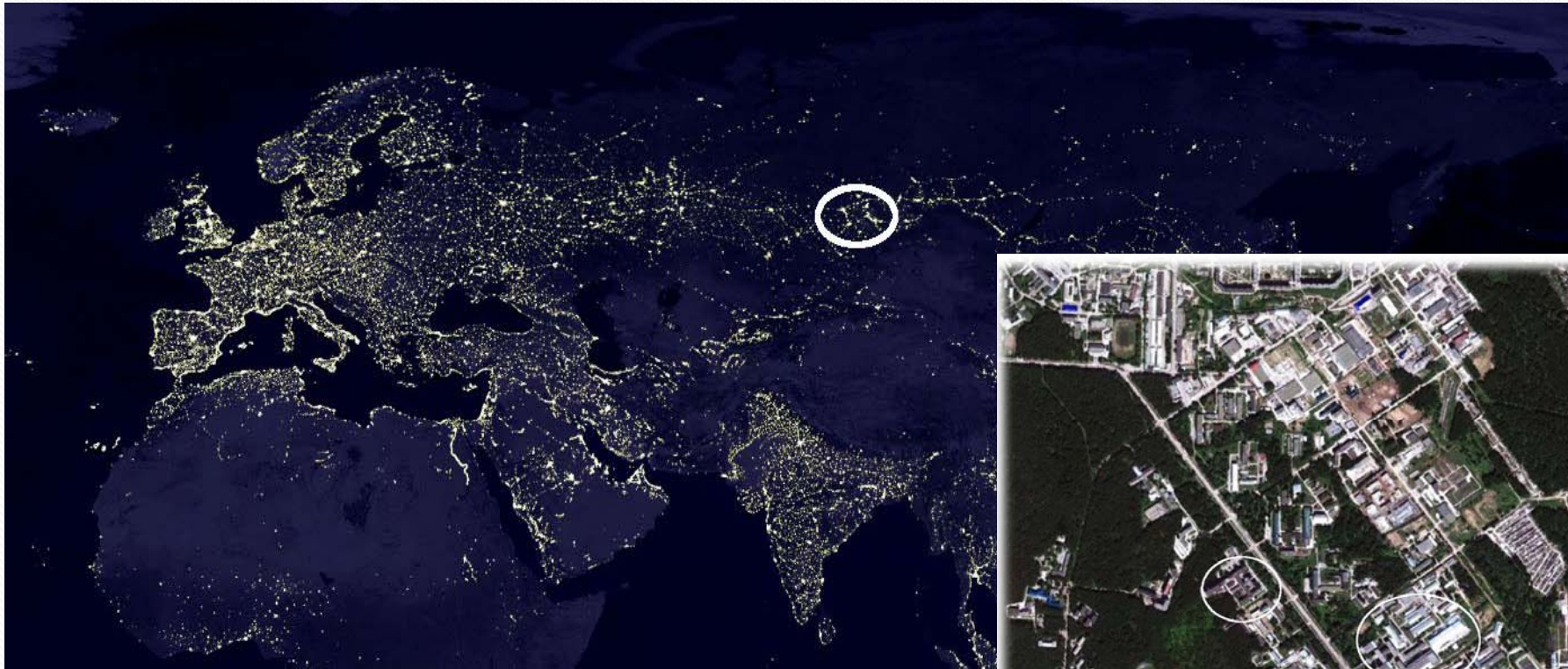
Многопараметрическая оптимизация магистральных линий связи (6000 – 10 000 км), прямой счет статистики ошибок. Число точек по эволюционной переменной $\sim 10^5$ по временной переменной $\sim 10^6$

Области применения НРС

- Задачи многопараметрической оптимизации волоконно-оптических линий;
- Прямой счет статистики ошибок в волоконно-оптических линиях связи.

Способы распараллеливания

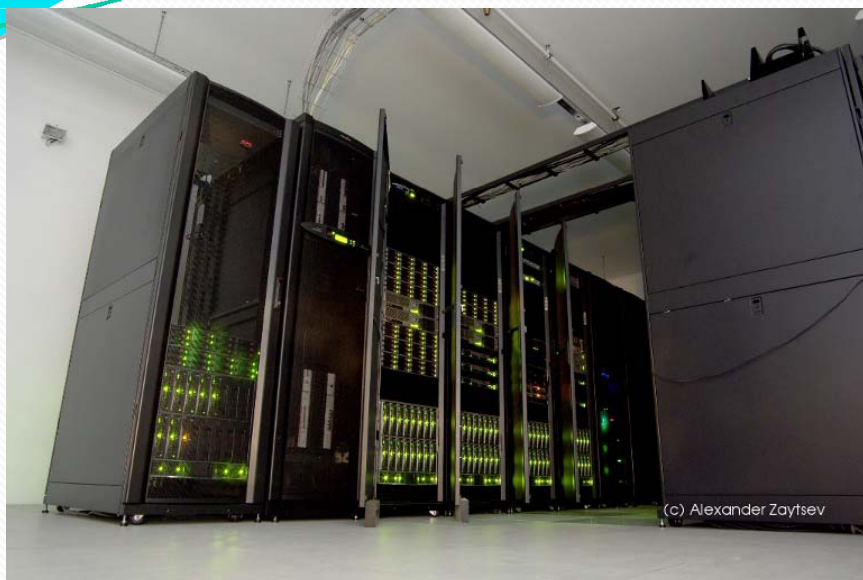
- распараллеливание по данным;
- декомпозиция расчетной области.



Earth at Night

C. Mayhew & R. Simmon (NASA/GSFC),

NOAA/NGDC, DMSP Digital Archive



Кластер ИВЦ НГУ



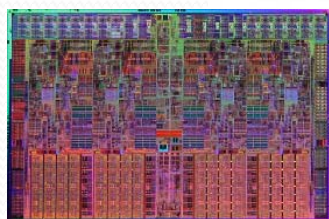
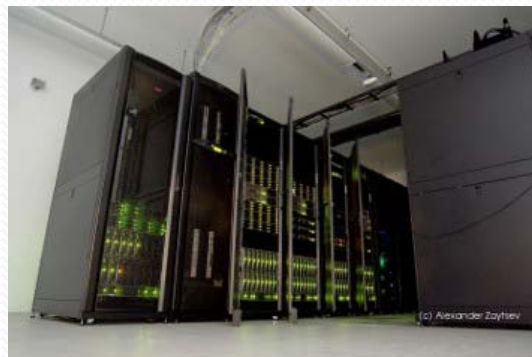
Кластер НК-30Т в ССКЦ СО РАН



Высоконадежная система хранения в ИВТ СО РАН (133 ТБ)



Сервер с общей памятью
8 процессоров Intel Xeon X7560
2 Тбайт оперативной памяти

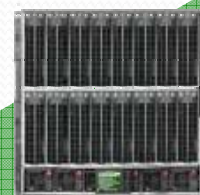


Intel Xeon X5670
2.93 ГГц, 6 ядер

Двухпроцессорный узел
24 Гбайт, 140 Гфлопс



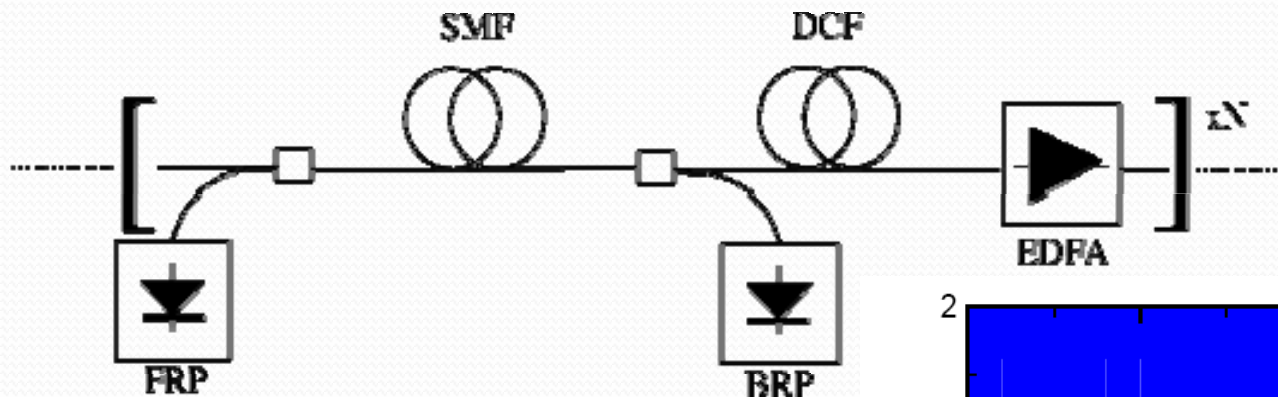
Двухузловой модуль HP 2xBL220c
производительность: 281 Гфлопс



Шасси HP c7000, 16 модулей
производительность: 4.5 Тфлопс

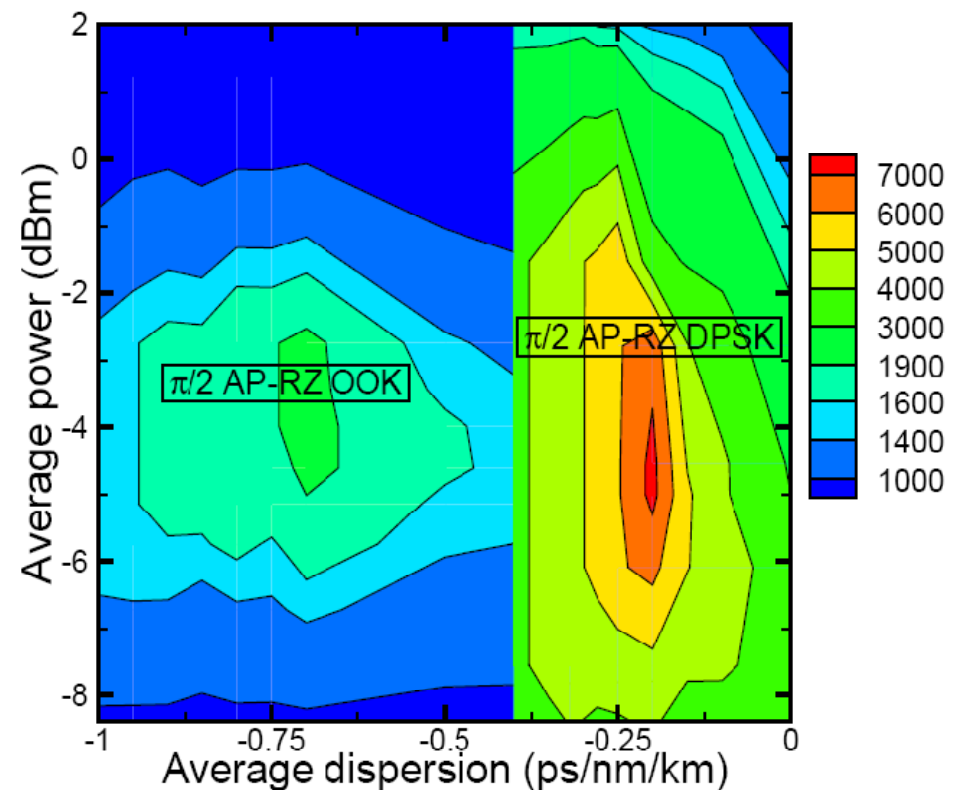
Кластер ИВЦ НГУ
96xBL220cG7+96xBL220cG6 +
64xBL460c
Производительность 26,7
Тфлопс

Оптимизация линии с 33% длительностью и дополнительным сдвигом фазы OOK и DPSK

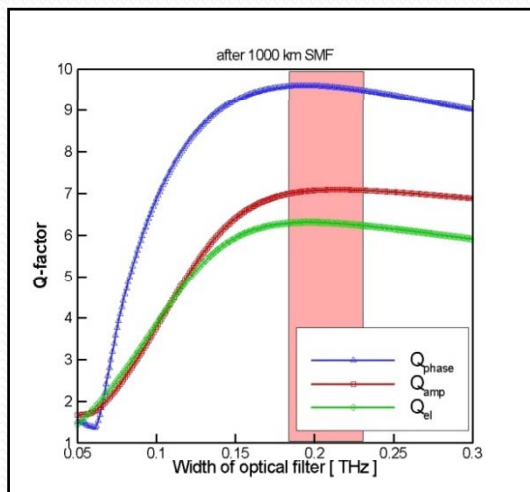


За счёт более равномерного распределения мощности в битовой последовательности, DPSK-формат увеличивает дальность передачи.

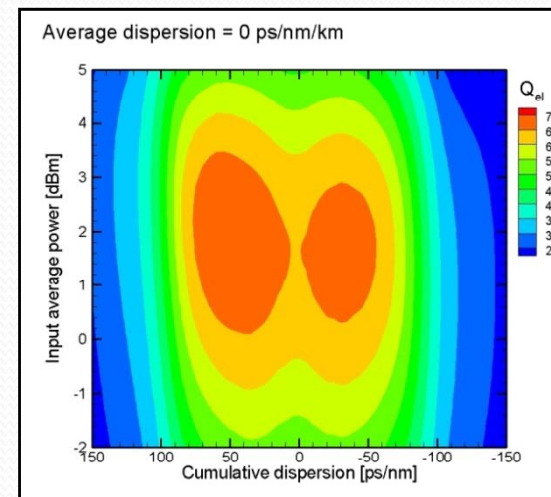
Оптимальные режимы для OOK и DPSK различаются.



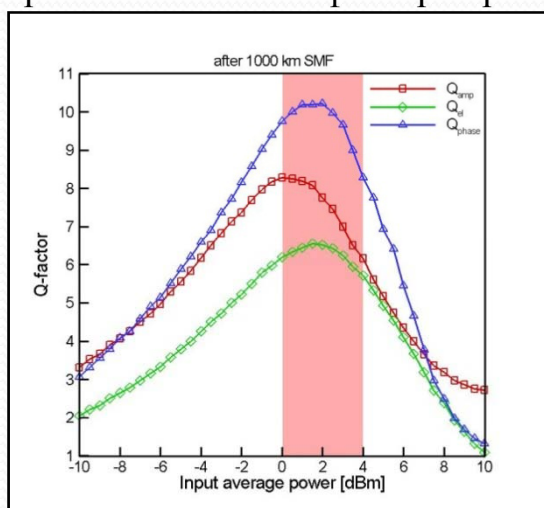
Моделирование передачи 40Гбит/с на расстояние 1000км на основе экспериментов компании Т8



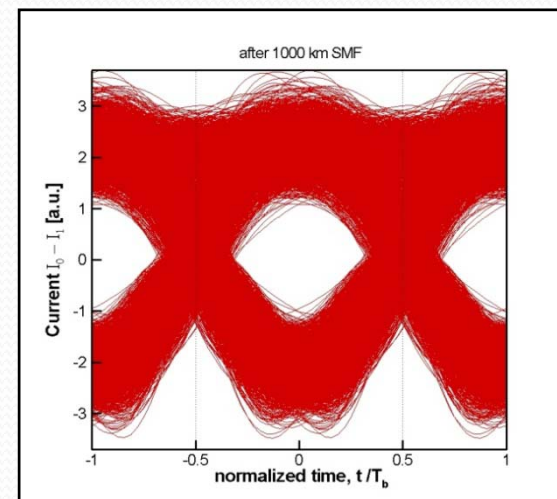
Зависимость значений различных моделей Q-фактора от ширины оптического фильтра приемника



Линии уровня Q-фактора



Зависимость значений различных моделей Q-фактора от средней мощности сигнала

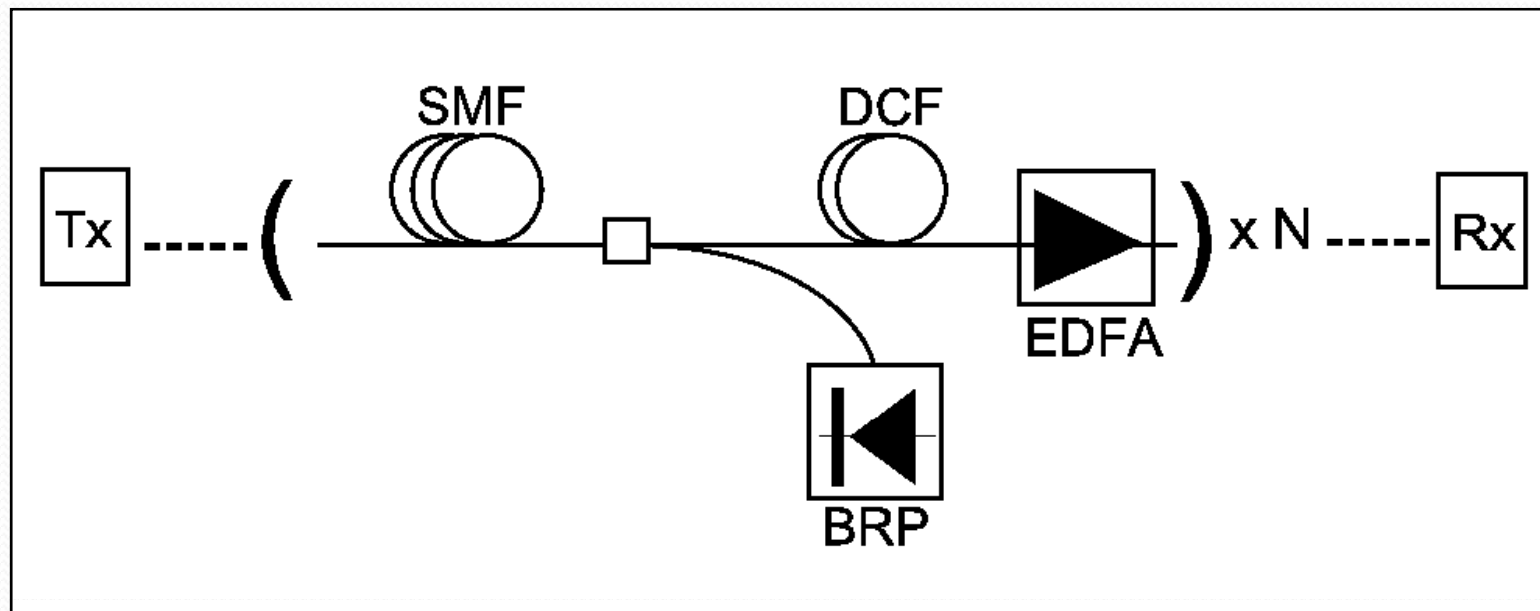


Индикаторная диаграмма электрического сигнала

Форматы модуляции

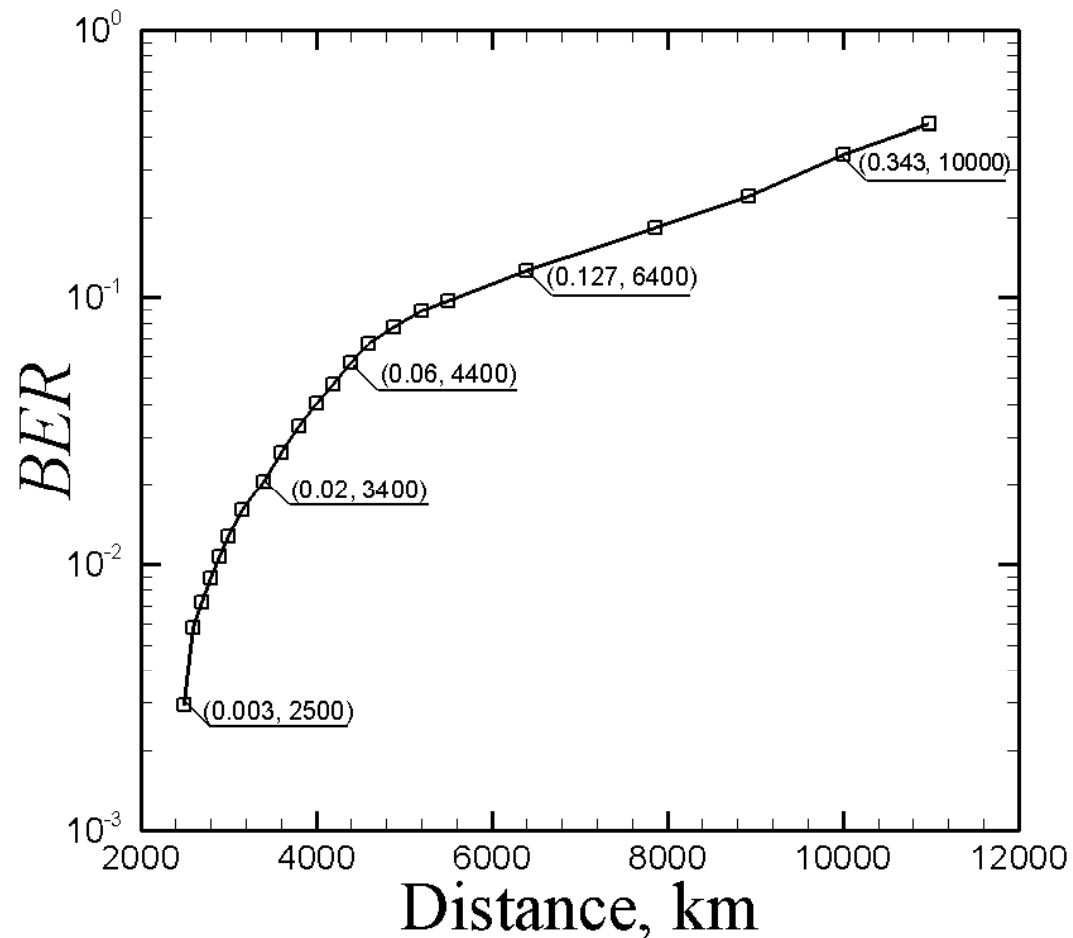
<p>OOK</p>		
<p>DPSK</p>		
<p>BPSK</p>		
<p>QPSK</p>		

Прямое моделирование статистики ошибок



- Число частотных каналов – 5
- Скорость передачи – 40 Гбит/с
- Форматы кодирования – OOK, RZ DPSK
- Статистика – 819200 x 5

Зависимость коэффициента ошибки от дистанции распространения

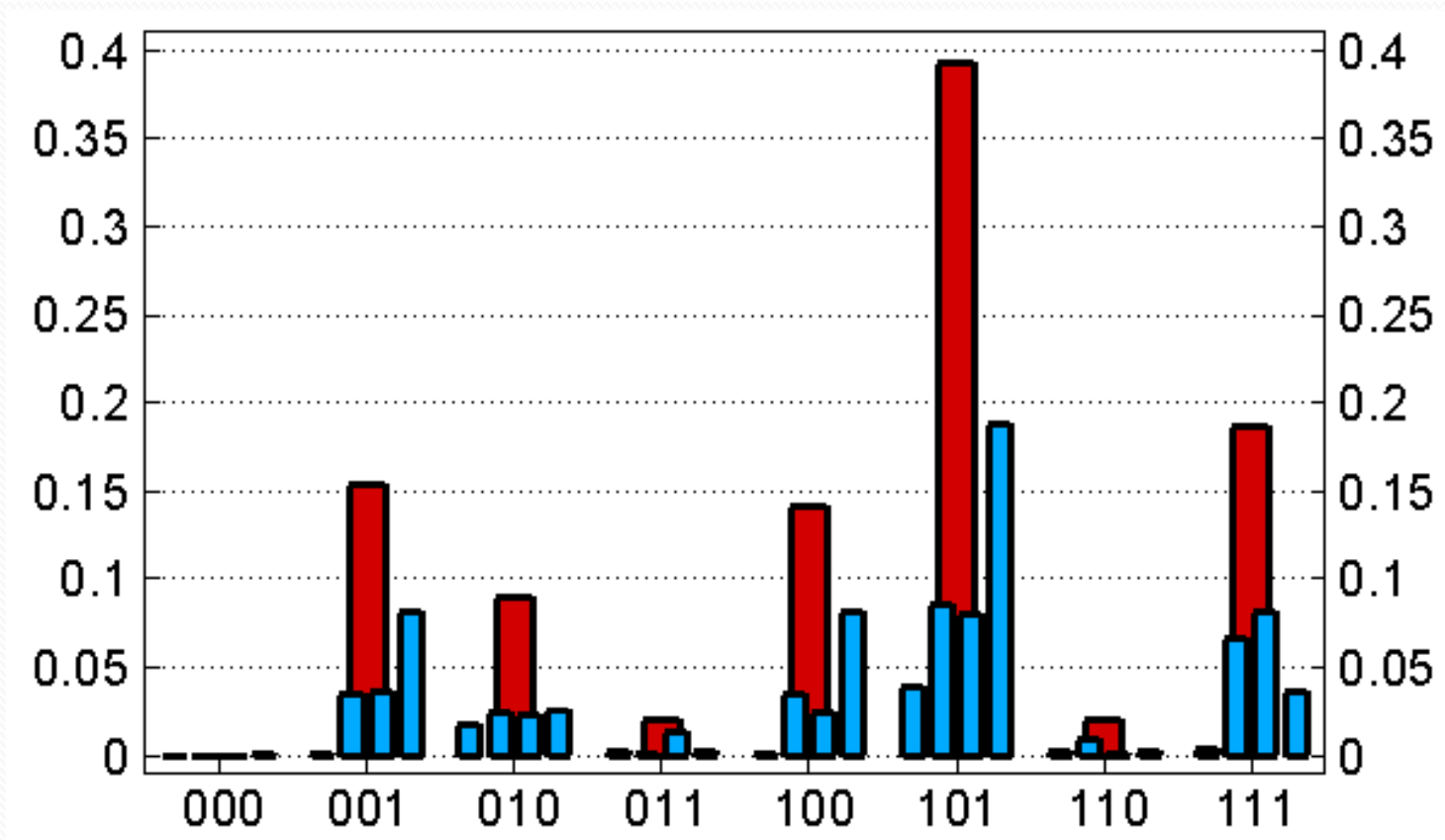


Статистика распределения ошибок для формата ООК

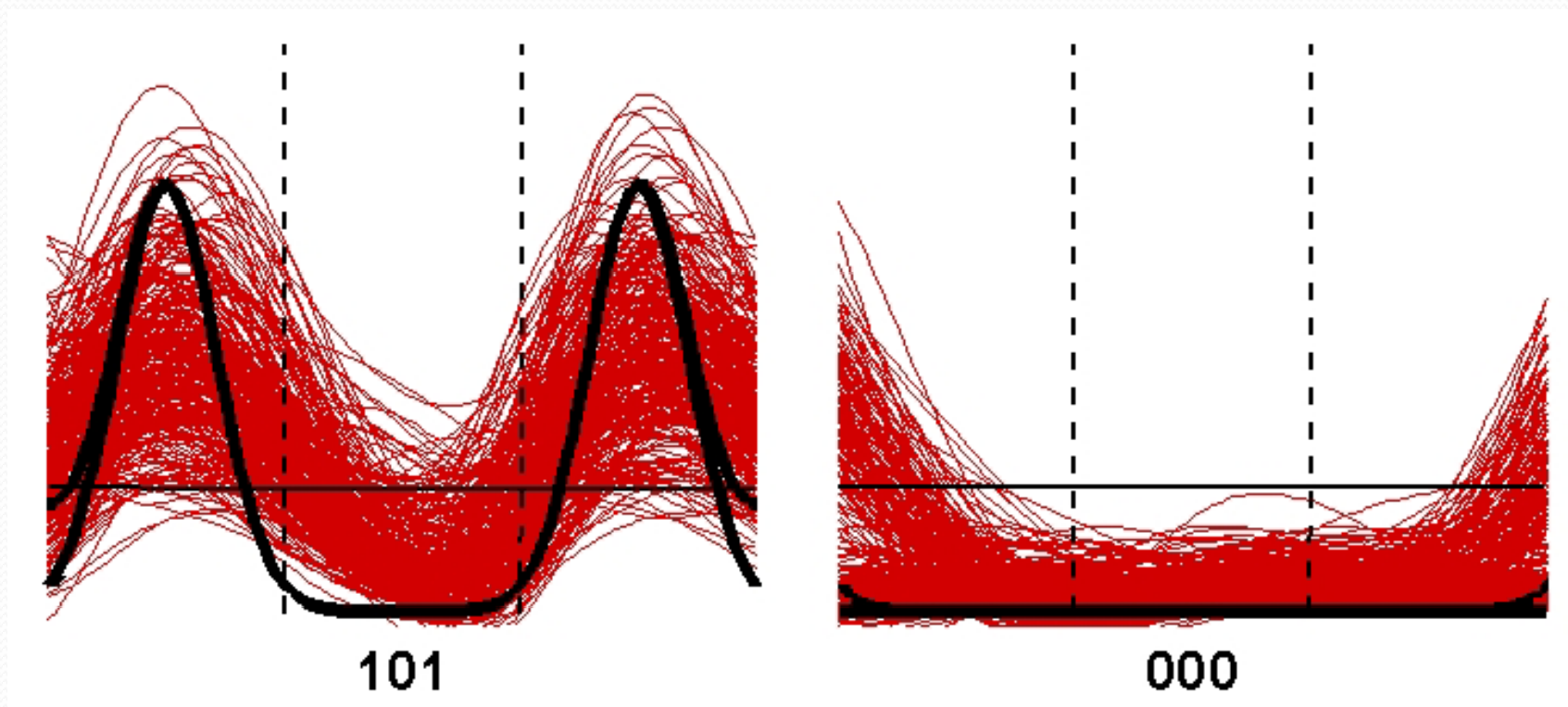
Таблица: Общее число ошибок для 8 триплетов

Расстояние, км	2500	3400	4500	6400	10000
BER	0.00296	0.0205	0.05989	0.1266	0.343
000	0	21	229	3545	90422
001	802	9874	37670	71809	203962
010	303	4791	22176	49857	215004
011	647	2609	4588	14746	179475
100	2006	14242	34729	86134	181786
101	5308	32707	96467	206316	215626
110	99	757	3702	13660	155480
111	2983	18967	45537	72474	152193

Распределение ошибок для 8 триплетов после 4500 км



Индикаторная диаграмма принятого сигнала для триплетов 101 и 000



Паттерн эффект

Отправлено		Принято
000	Q_0	010
001	Q_1	011
010	Q_2	000
011	Q_3	001
100	Q_4	110
101	Q_5	111
110	Q_6	100
111	Q_7	101

Адаптивный блочный код с ограничениями

Адаптивный ограниченный код – это код, предназначенный для удаления определенных битовых сочетаний из передаваемого потока данных.

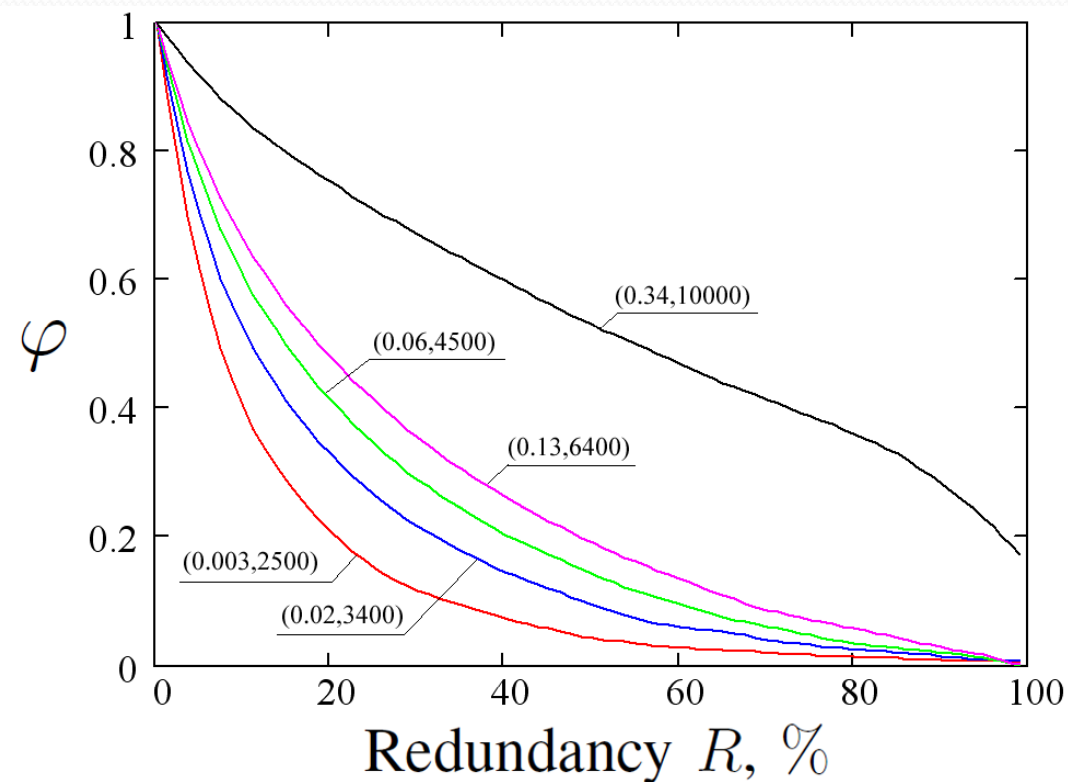
Схема построения: задаётся размер блока m . Каждой битовой последовательности длины m ставится в соответствие вероятность того, что данная последовательность будет передана без ошибок. Все последовательности упорядочиваются по убыванию вероятностей безошибочной передачи.

По заданному значению избыточности R строится код. При больших R ($R > 10\%$) в коде используются только самые надёжные кодовые слова.

Результаты применения адаптивного кода

Результаты показывают, что с помощью кодирования возможно многократное уменьшение частоты ошибок в канале.

Это особенно важно в случаях больших BER ($BER > 10^{-2}$). При таких значениях эффективность кодов, корректирующих ошибки, резко падает



Статистика распределения ошибок для формата QPSK

Статистика: 1 638 400 символов (50 расчётов по 2^{16})

$BER = 10^{-3}$

Расстояние: 1400 км

	Errors			Errors	
000&111&222&333	345	16,55%	020&131&202&313	290	13,91%
001&112&223&330	88	4,22%	021&132&203&310	117	5,61%
002&113&220&331	9	0,43%	022&133&200&311	16	0,77%
003&110&221&332	88	4,22%	023&130&201&312	69	3,31%
010&121&232&303	14	0,67%	030&101&212&323	12	0,58%
011&122&233&300	94	4,51%	031&102&213&320	70	3,36%
012&123&230&301	329	15,78%	032&103&210&321	331	15,88%
013&120&231&302	129	6,19%	033&100&211&322	84	4,03%

Паттерн-эффект при использовании недвоичных форматов модуляции сигнала

L, km

	2000		2300	
00000	22	2,18%	59	2,90%
00001	42	4,16%	119	5,85%
00002	33	3,27%	94	4,62%
00003	65	6,44%	130	6,39%
10000	40	3,96%	115	5,65%
10001	76	7,53%	181	8,90%
10002	12	1,19%	60	2,95%
10003	19	1,88%	44	2,16%
20000	55	5,45%	118	5,80%
20001	21	2,08%	85	4,18%
20002	60	5,95%	109	5,36%
20003	105	10,41%	181	8,90%
30000	63	6,24%	109	5,36%
30001	25	2,48%	62	3,05%
30002	104	10,31%	193	9,49%
30003	267	26,46%	375	18,44%
	1 009	100%	2 034	100%

При передаче сигнала с использованием недвоичных фазово-модулированных форматов (QPSK, M-PSK) паттерн-эффект также имеет место, хотя его структура становится другой. Для этого случая также возможно применить кодирование с ограничениями.

Исследование статистики ошибок в волоконных линиях с дифференциальным фазовым форматом модуляции и оптическим фазовым сопряжением

$$\left[\frac{[\text{SMF (85 км)} + \text{EDFA1} + \text{DCF (15 км)} + \text{EDFA2}] * M + \text{OPC} + [\text{DCF (15 км)} + \text{EDFA2} + \text{SMF (85 км)} + \text{EDFA1}] * M}{\text{}} \right] * K$$

Длина линии L=3200 км, M*K=16: K = 1, M=16; K = 2, M=8; K = 4, M=4; K = 8, M=2.

- Получены аналитические формулы для аппроксимации функций плотности распределения вероятностей нулевых и единичных битов в линейном канале связи с двоичным форматом фазовой модуляции оптического сигнала;
- Выполнено прямое численное моделирование распространения оптических импульсов в линии связи с оптическим фазовым сопряжением. Получено хорошее согласие аналитического приближения с результатами численного моделирования.

Исследование статистики ошибок в волоконных линиях с дифференциальным фазовым форматом модуляции и оптическим фазовым сопряжением

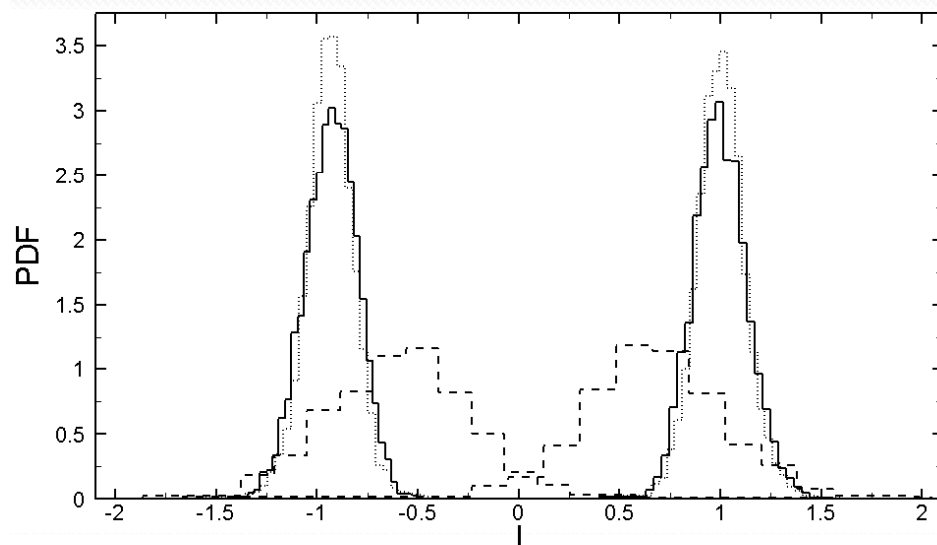


Рисунок 1.
PDF нулевых и единичных битов

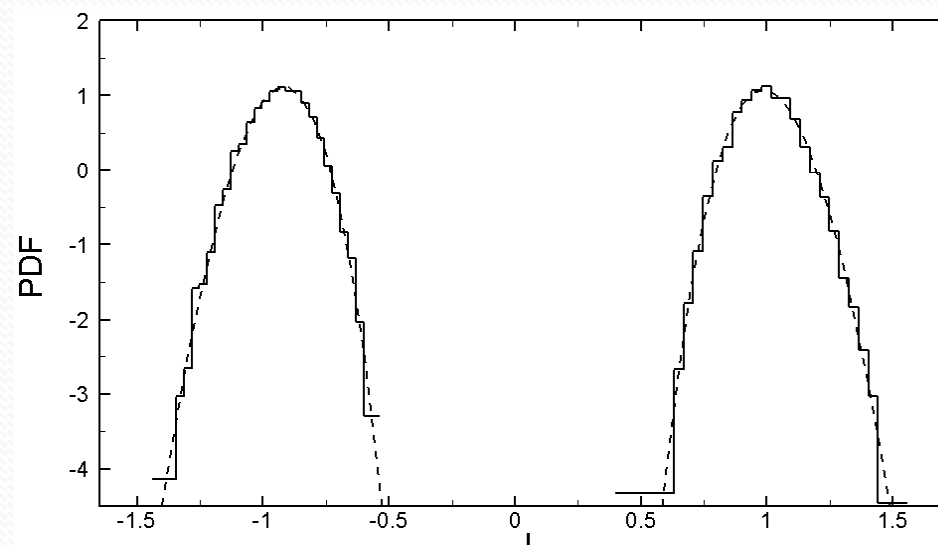
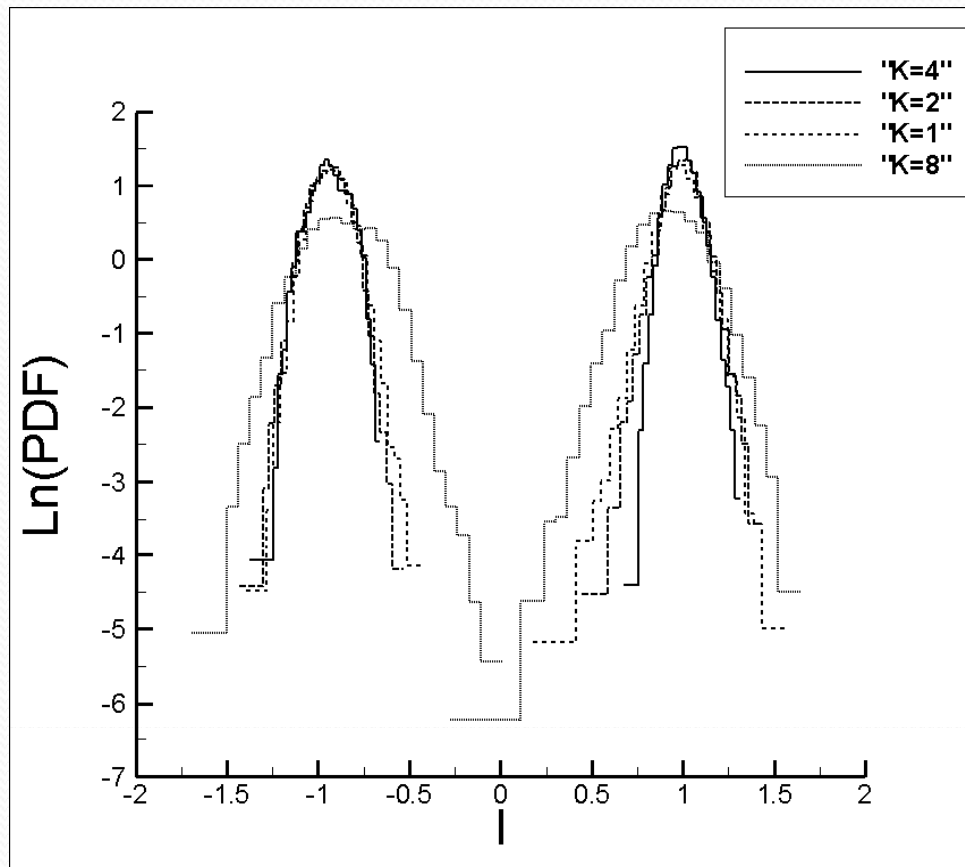


Рисунок 2.
PDF нулевых и единичных битов. Log масштаб

Исследование статистики ошибок в волоконных линиях с дифференциальным фазовым форматом модуляции и оптическим фазовым сопряжением



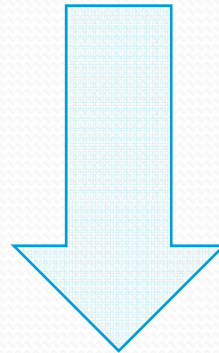
- Оптимальное количество устройств оптического фазового сопряжения эффективно подавляет нелинейность и позволяет передавать мощные оптические импульсы, увеличивая отношение сигнал/шум.

Рисунок 3.
PDF нулевых и единичных битов в зависимости от количества устройств ОПС



Проблемы

- Для высокоскоростных линий связи необходимо учитывать поляризационную модовую дисперсию;
- Необходимо улучшение статистики вычислений за счёт увеличения длины битовых последовательностей.



Необходима разработка эффективных параллельных численных алгоритмов, основанных на декомпозиции расчётной области по временной переменной.



ВКВО-2011

ИВТ

Спасибо за внимание!
