

*Всероссийская конференция по волоконной оптике  
Пермь-2011*

**Применение специальных методов  
кодирования информации при передаче  
данных по волоконно-оптическим  
линиям связи**

**Скидин А.С.**

Институт вычислительных  
технологий СО РАН

**Федорук М.П.**

ИВТ СО РАН, Новосибирский  
государственный университет

**Шафаренко А.В.**

Университет Хартфордшира,  
г. Хатфилд, Великобритания



## 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
<b>165</b>	<b>101.7</b>	<b>370</b>	<b>275*</b>
300	10.2	256	42.7
4000	2.6	64	42.7
6100	6.0	149	42.7
10000	1.6	40	42.7

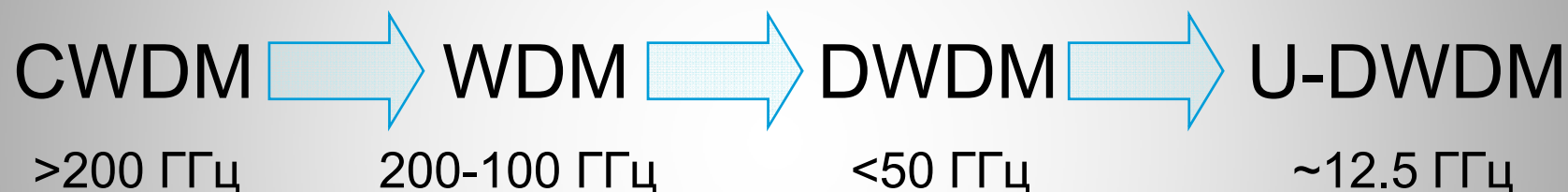


\* D.Qian et al. 101.7-Tb/s PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3x55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation // OFC/NFOEC 2011.



## Факторы, увеличивающие номинальную пропускную способность оптической линии связи

Увеличение количества частотных каналов



Уплотнение символов в одном частотном канале – технологии OTDM, OFDM.

Передача большего объёма информации в символьном интервале – использование форматов модуляции с большим числом состояний (M-PSK, 128-QAM)

## Увеличение пропускной способности оптических линий связи

Качество приёма определяется по частоте битовых ошибок в канале – BER.

Всякое уплотнение сигналов при сохранении качества приёмных устройств на прежнем уровне ведёт к увеличению ошибок приёма.

Для исправления ошибок в каналах применяются коды коррекции ошибок – FEC.

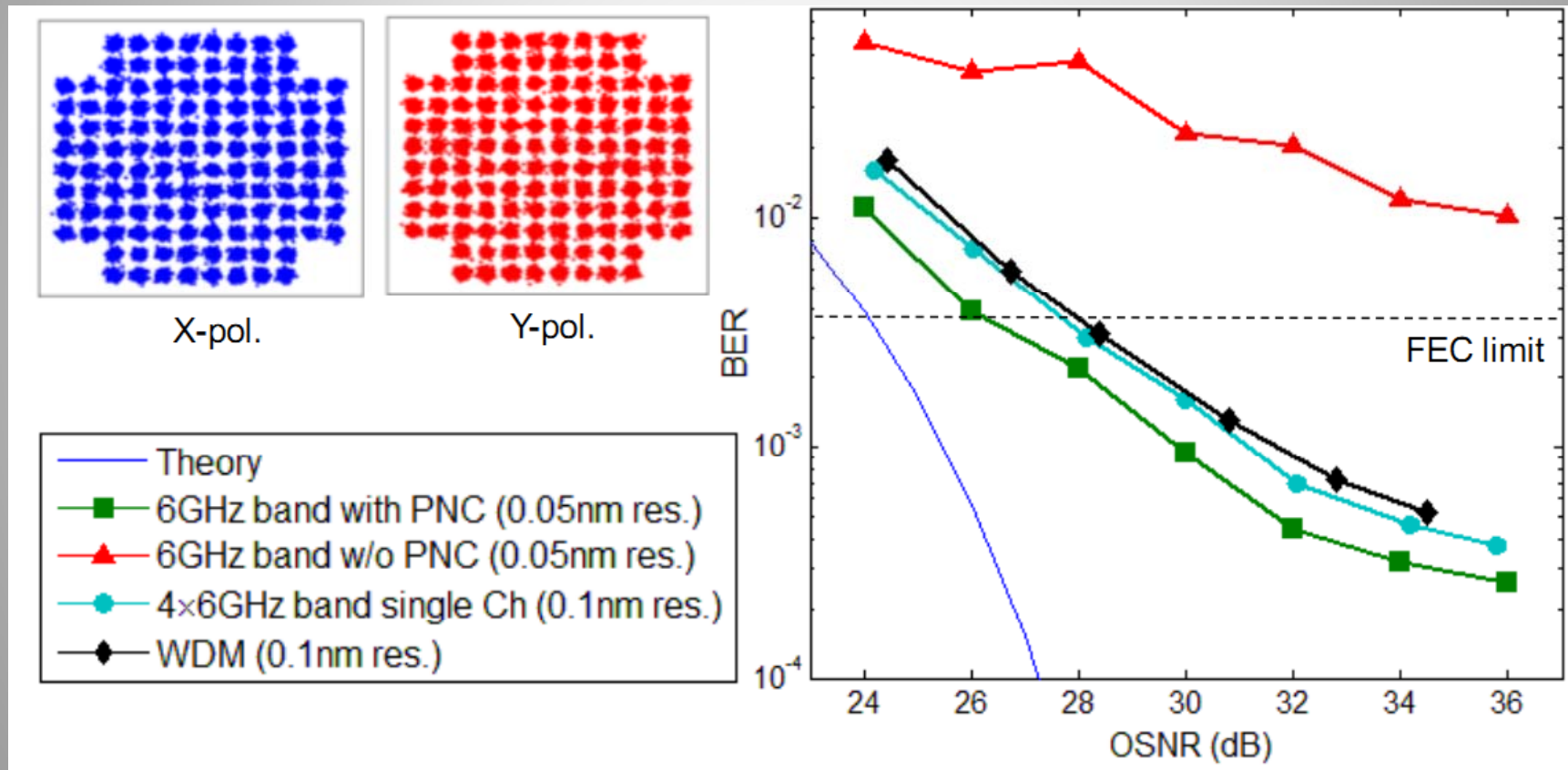
Условие эффективности данных кодов:

$$BER < BER_L$$

$$10^{-3} < BER_L < 5 \cdot 10^{-2}$$



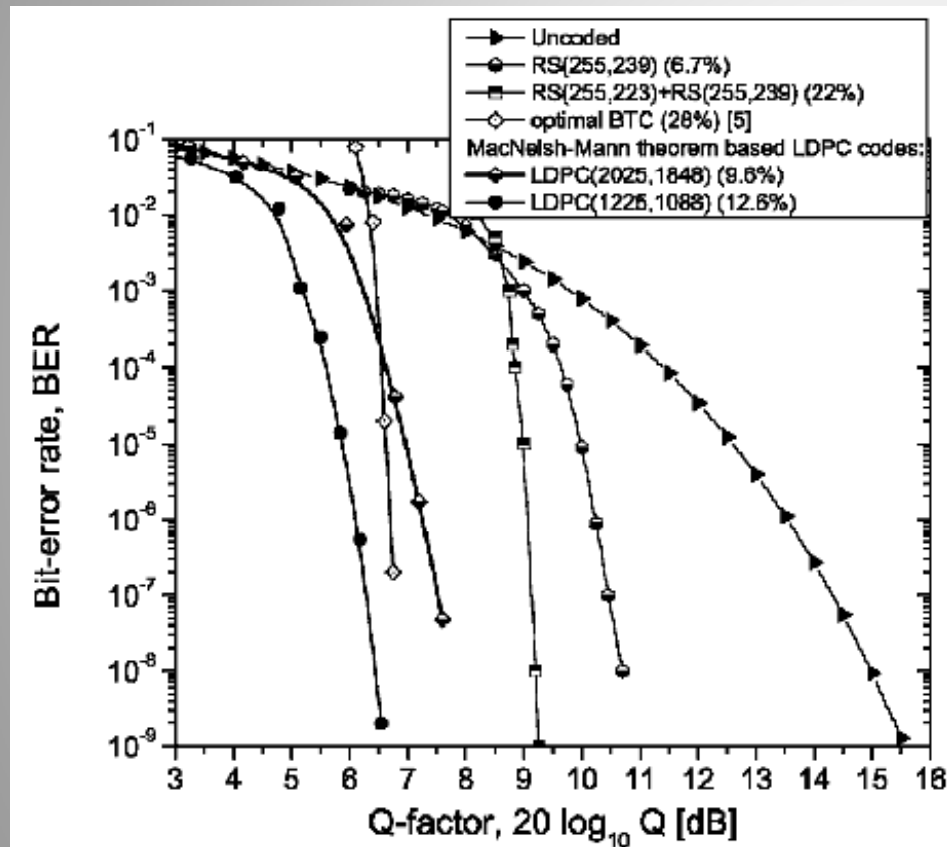
# Качество передачи информации при больших скоростях



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.



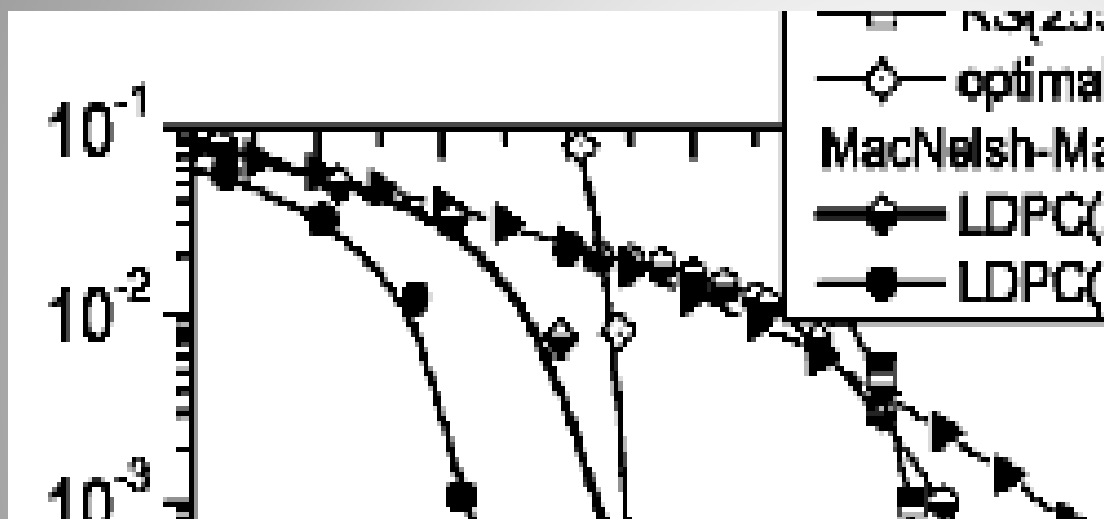
## Возможности кодов, корректирующих ошибки



Корректирующие коды являются кодами с избыточностью.

Если частота ошибок выше предельного значения для кода, то он становится неэффективным вне зависимости от того, какой он обладает избыточностью.

## Границы применимости кодов коррекции ошибок



Подавляющее большинство корректирующих кодов начинают неэффективно работать при частотах ошибок BER  $\sim 0.02$ .

Существуют методы кодирования (турбо-коды), предел частоты ошибок для которых равен 0.1, однако они медленно декодируются и потому не могут быть использованы в быстрых оптических линиях.



Каким образом обеспечить надёжную передачу данных при **большом** количестве ошибок в канале, когда корректирующие коды не эффективны?

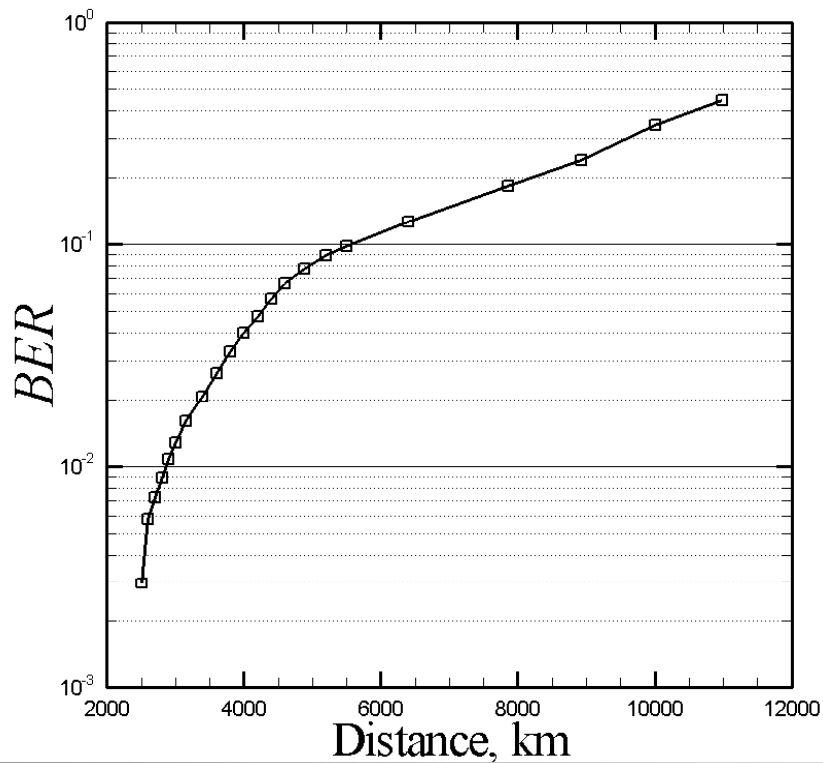


## Влияние нелинейных эффектов

Такую возможность даёт наличие специфики ошибок в оптических каналах, обусловленной нелинейным искажением сигнала.

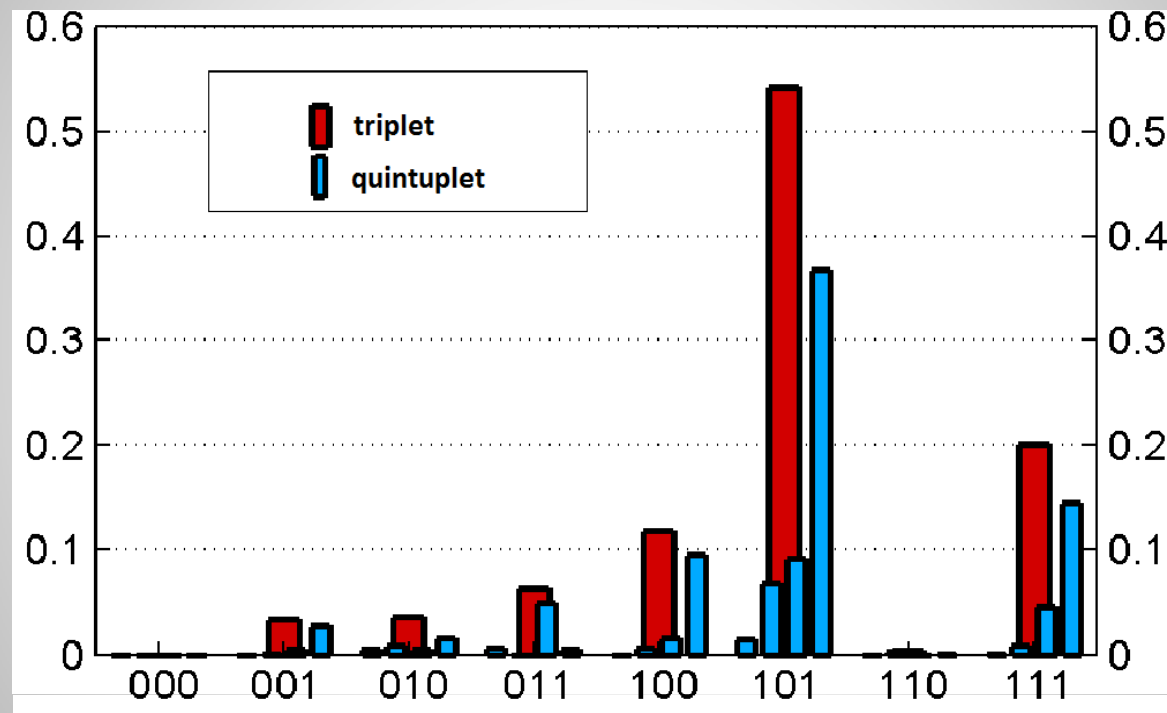
Искажения, вносимые в сигнал нелинейностями, зависят от вида передаваемого сигнала. Эта зависимость называется паттерн-эффектом.

# Результаты моделирования



Distance, km	2500	3400	4500	6400	10000
BER	0.00296	0.0205	0.05989	0.1266	0.343
00000	0	0	0	6	7574
00001	0	0	0	124	26104
10000	0	0	3	274	18237
11100	0	14	343	2497	43381
10011	672	6508	20029	34353	68275
11001	1675	9538	19967	37046	81117
11011	3637	18148	46061	84026	81422
11111	2358	8999	8933	1126	13868
Number of errors	12148	83968	273685	518541	1404948

# Результаты моделирования



Веса ошибок для различных триплетов и квинтулетов при передаче в формате ООК («опасный» паттерн - 101)



# Результаты моделирования

Triplet	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3	Ch. 4	Ch. 5
000	0	2	4	2	6
001	1216	1353	1471	1559	1604
010	7081	7154	7783	8299	8470
011	111	123	181	190	192
100	1064	1250	1286	1422	1464
101	7650	8029	8590	9298	9354
110	94	122	134	145	168
111	42	53	70	60	93

Статистика ошибок для канала связи 5x40 Гбит/с с форматом RZ-DPSK (заметно, что хуже всего передаются последовательности 010 и 101)



## Паттерн-эффект при использовании не двоичных 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 не двоичных 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

# Адаптивный блочный код

В ряде случаев удаление определённых последовательностей недостаточно и необходимо вводить в код более сложные ограничения, зависящие от типа ошибок в канале.

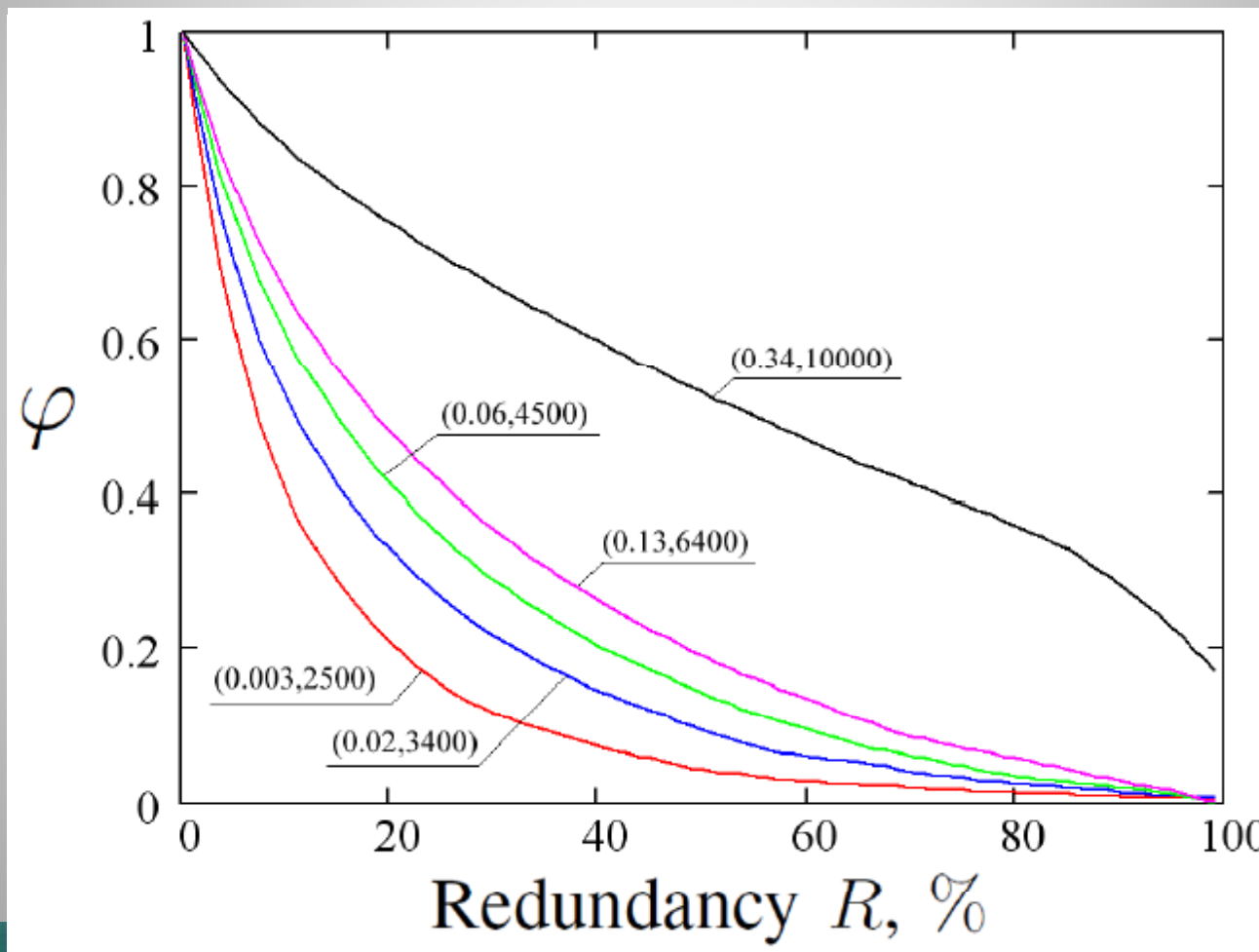
Пусть  $P_e(x)$  - вероятность передачи слова  $x$  без ошибок.

Таблица для адаптивного кода строится так:

$$P_e(x_0) \leq P_e(x_1) \leq \dots \leq P_e(x_{2^m-1})$$

Первые кодовые слова имеют большую вероятность быть переданными без ошибок.

# Результаты применения адаптивного кода

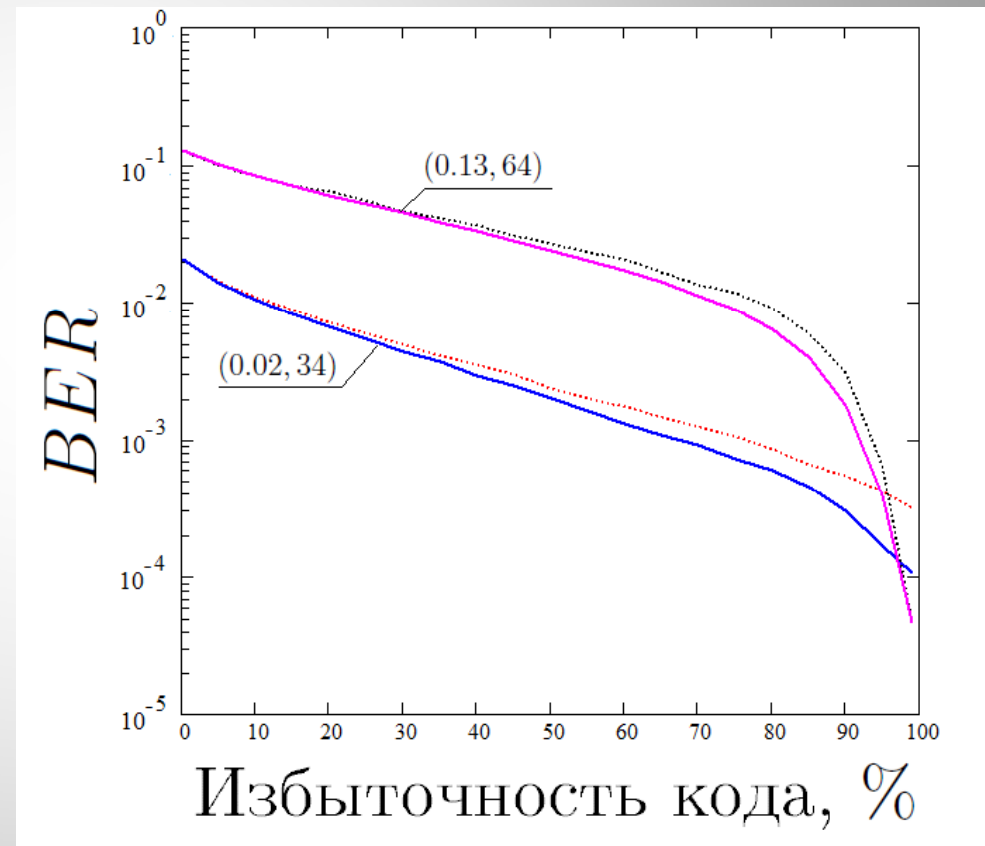




## Результаты применения адаптивного кода

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



## Области практического использования кодов

Малое число ошибок — $BER < BER_L$	
Корректирующий код	$R \nearrow BER' \rightarrow 0$
Адаптивный ограниченный код	$R \nearrow BER' \rightarrow \beta > 0$
Большое число ошибок — $BER > BER_L$	
Корректирующий код (К)	$R_K \nearrow BER' \approx BER > BER_L$
Адаптивный ограниченный код (А)	$R_A \nearrow BER' \rightarrow \beta > 0$
<b>А+К</b>	$(R_A + R_K) \nearrow BER' \rightarrow 0$



Целевое условие —  $BER' \rightarrow 0$



# Заключение

Коды, корректирующие ошибки, являются абсолютно надёжными при малом количестве ошибок и абсолютно ненадёжными при большом числе ошибок.

Используя наличие в канале ошибок, частота которых зависит от вида сигнала, передаваемому сообщению можно придать наиболее «надёжный» вид, применив модулирующие коды.

Конкатенация двух кодов способна обеспечить надёжную связь на частотах ошибок, при которых корректирующий код становится неэффективным.

В каналах с гауссовым шумом в качестве подобной методики может быть применена техника повторной передачи данных (ARQ).



**Спасибо за  
внимание!**

