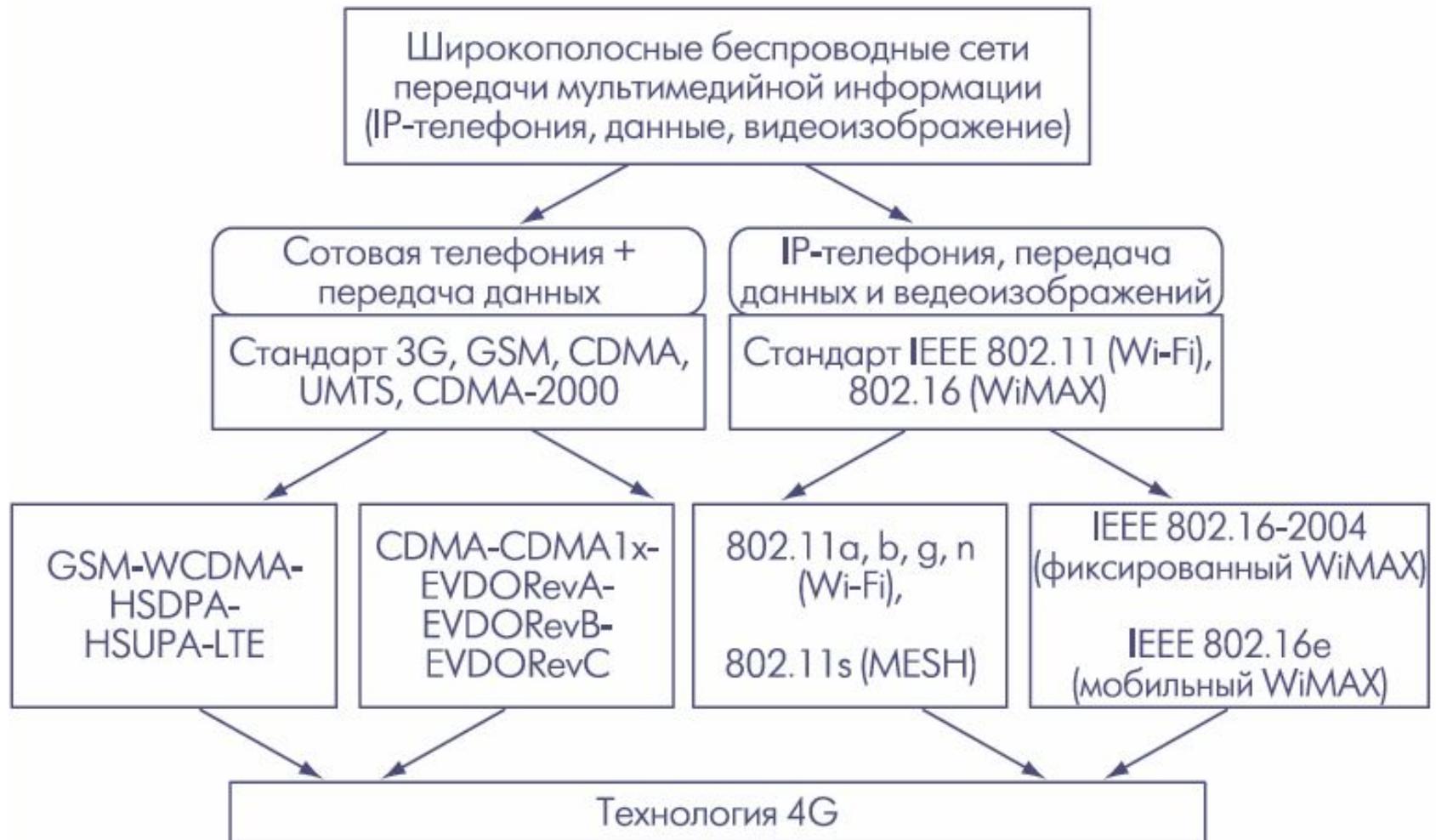


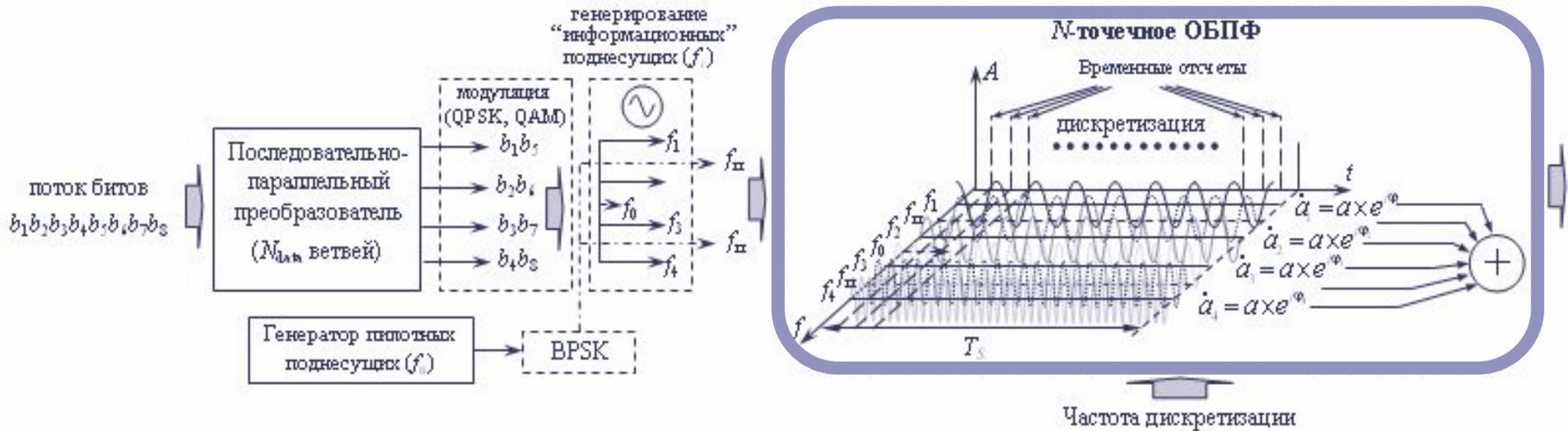
**СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
АЛГОРИТМОВ  
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО  
ОЦЕНИВАНИЯ СИГНАЛОВ  
ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ В  
РАДИОКАНАЛАХ С ЧАСТОТНО-  
ВРЕМЕННОМ РАССЕЯНИЕМ**

**Л.Н. КАЗАКОВ, Д.С. КУКУШКИН,  
А.В. ИСМАИЛОВ, К.А. МАРКОВ  
ЯРОСЛАВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. П.Г. ДЕМИДОВА, Г.  
ЯРОСЛАВЛЬ**

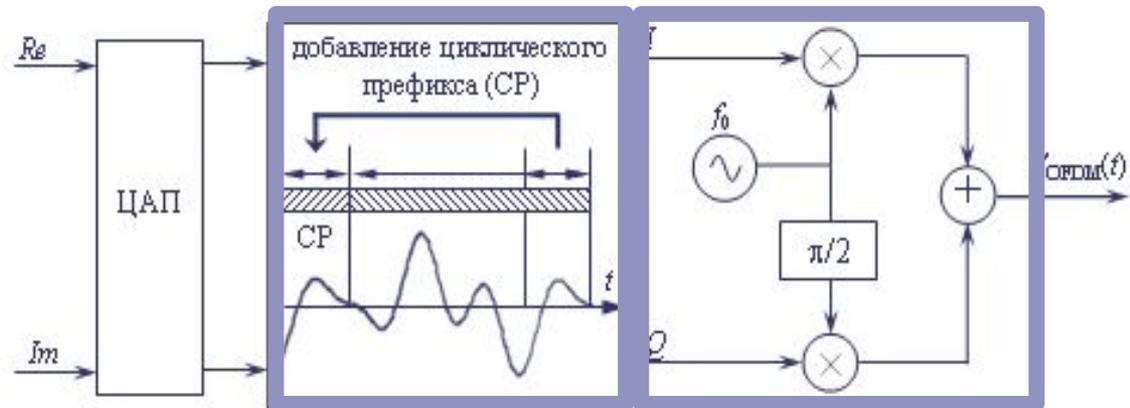
# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ



# ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ OFDM СИГНАЛА



$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \text{Re}(\dot{a}_k \times e^{j2\pi f_k t})$$

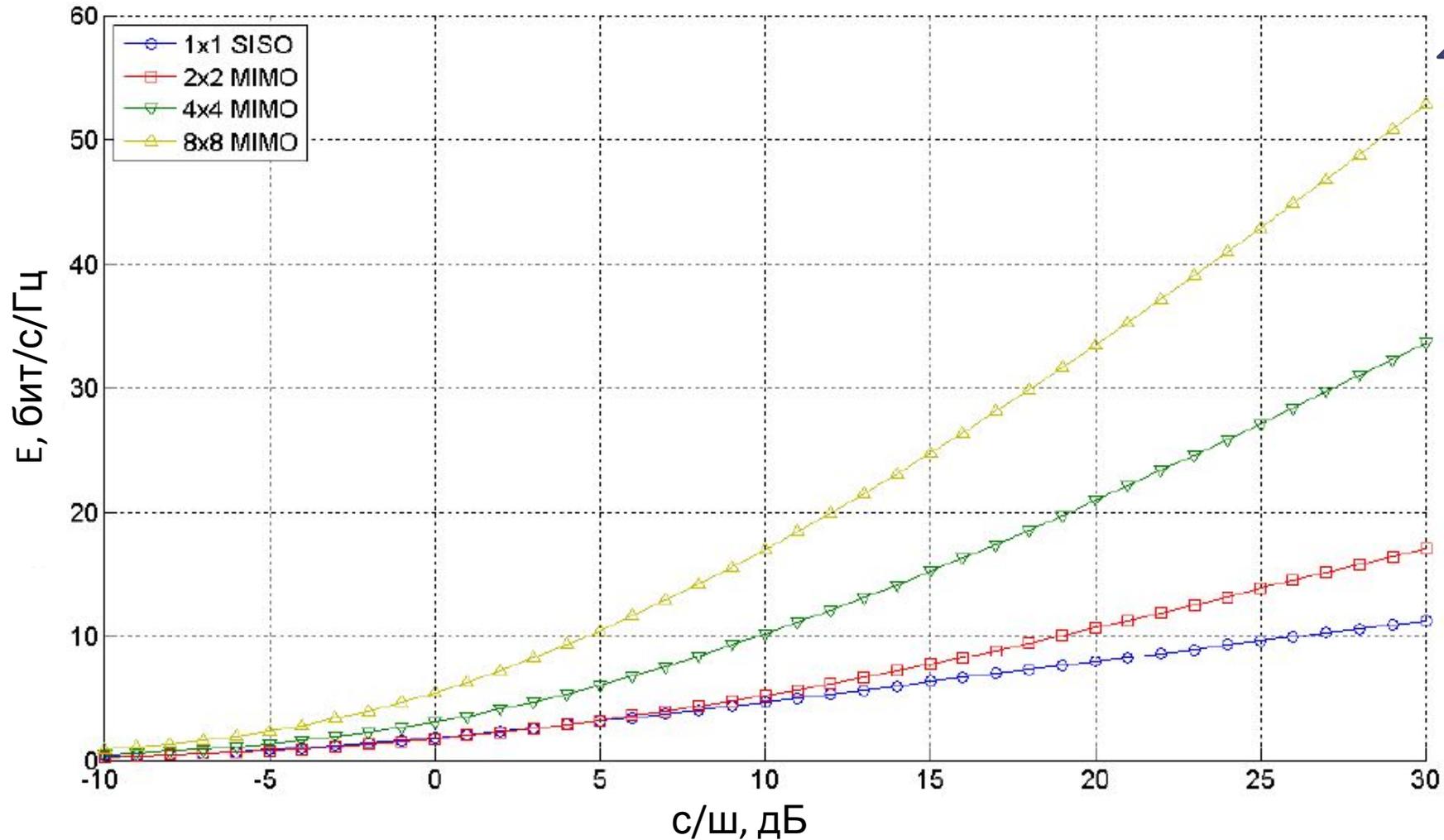


# ПРИНЦИП ПРОСТРАНСТВЕННОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ



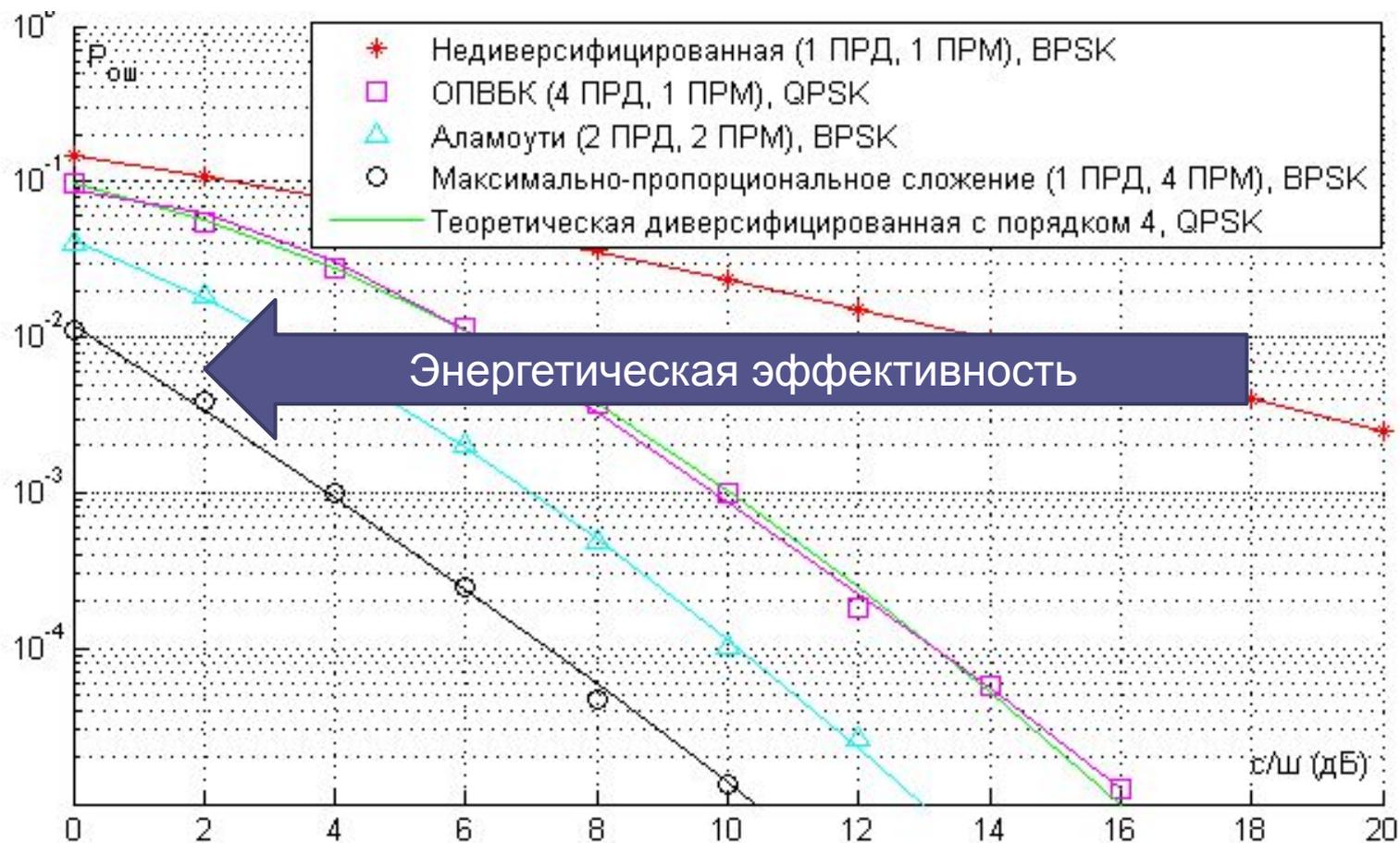
$$\begin{pmatrix} y_1(t) = \\ y_2(t) = \\ y_3(t) = \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix}$$

# СРАВНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИГНАЛОВ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

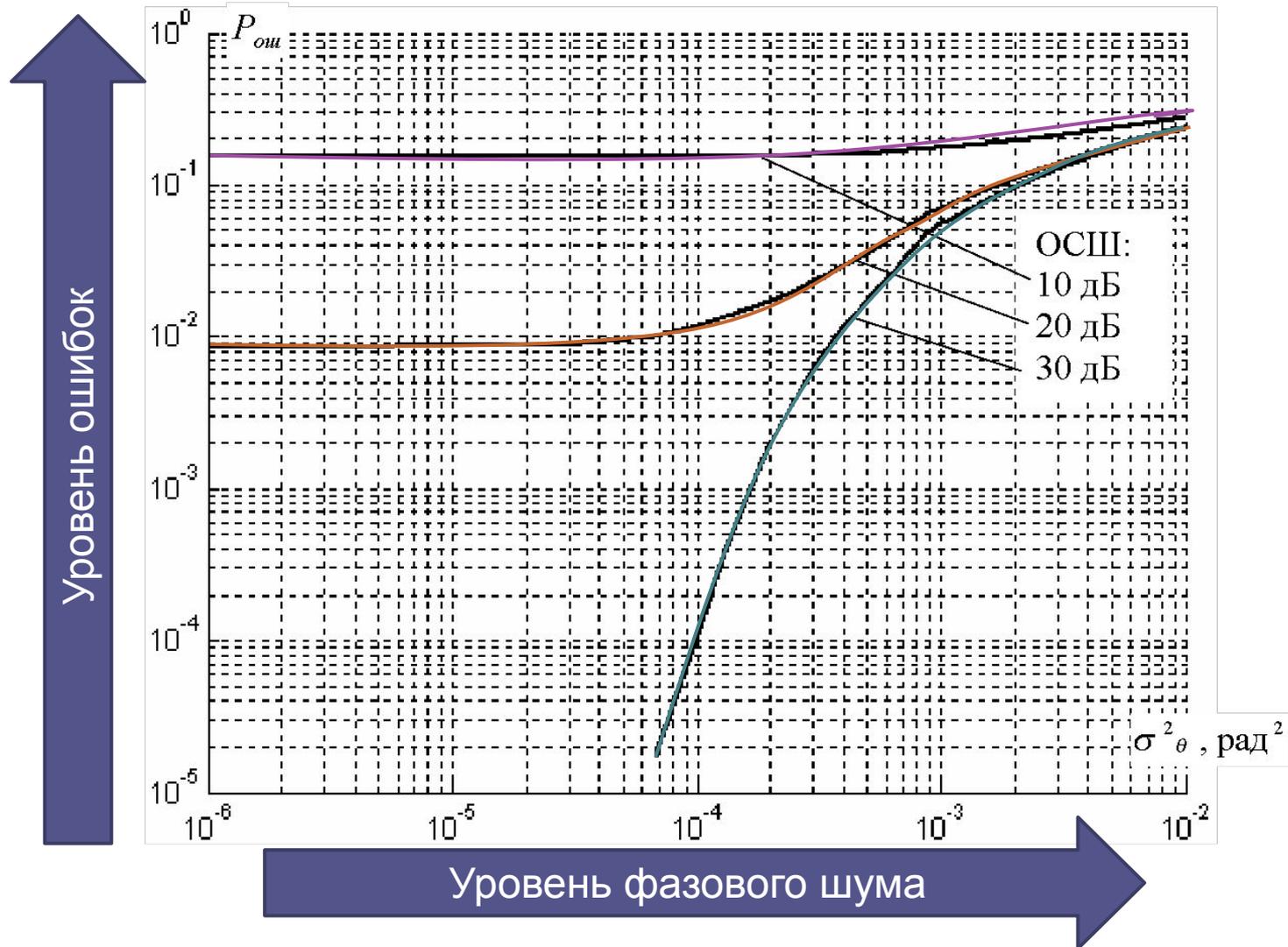


Спектральная эффективность

# СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ



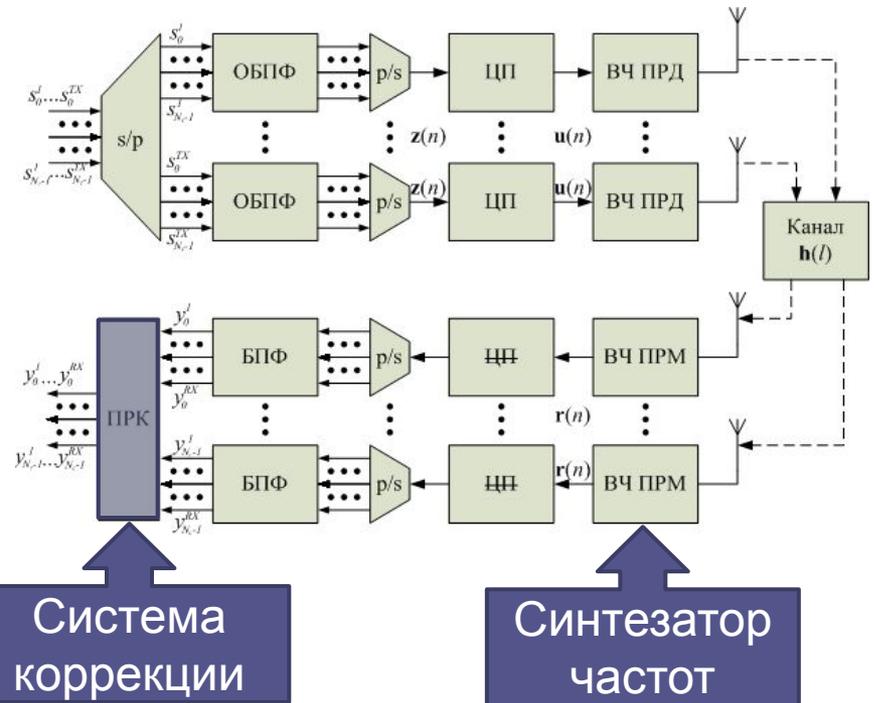
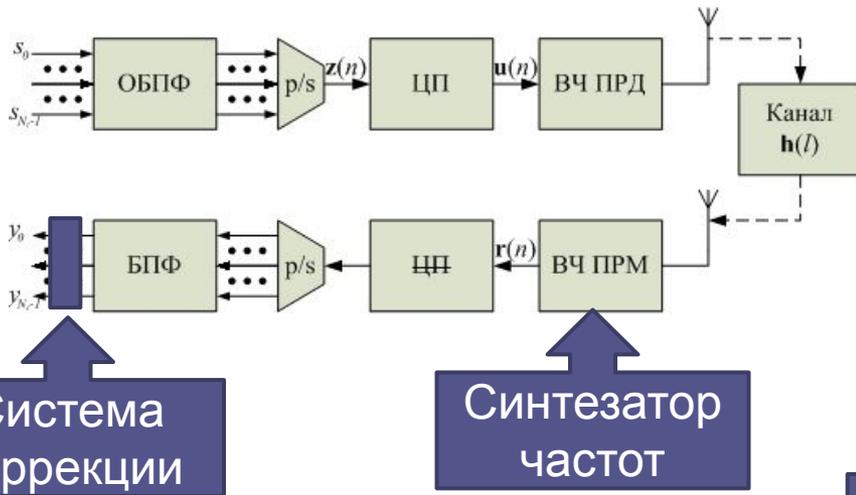
# ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СИГНАЛОВ OFDM К ФАЗОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ (QAM-64)



# СИСТЕМЫ СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ СИГНАЛЫ ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ OFDM

OFDM – ОРТОГОНАЛЬНОЕ ЧАСТОТНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ

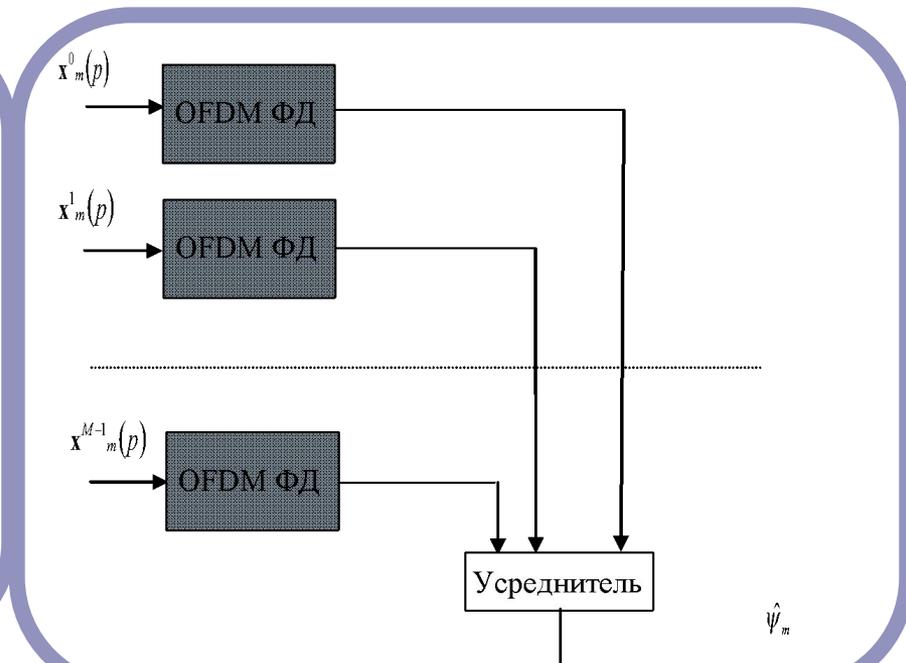
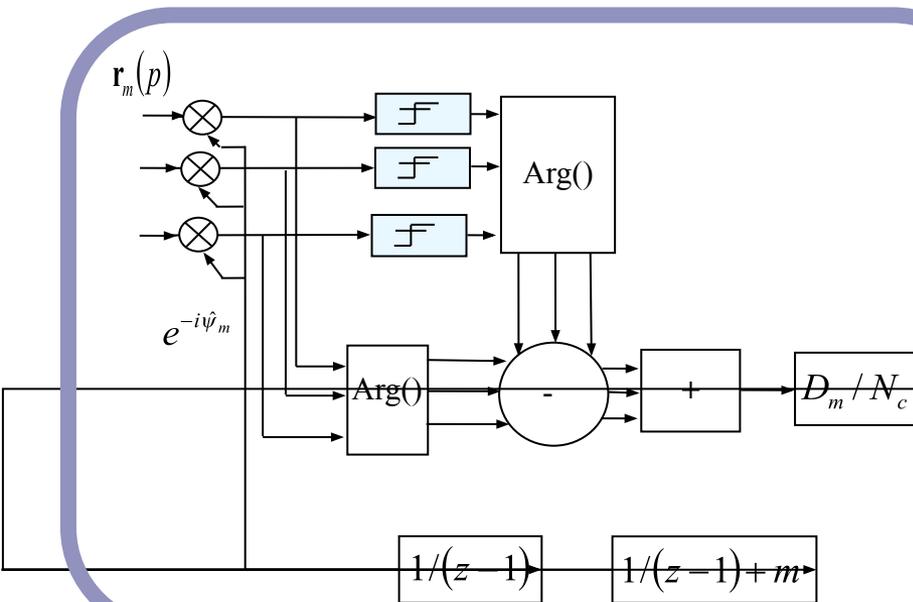
MIMO-OFDM – ОРТОГОНАЛЬНОЕ ЧАСТОТНОЕ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ



# АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ФАЗЫ МНОГОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ФАЗЫ OFDM  
СИГНАЛА

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ФАЗОВЫЙ  
ДИСКРИМИНАТОР СИГНАЛОВ  
MIMO-OFDM



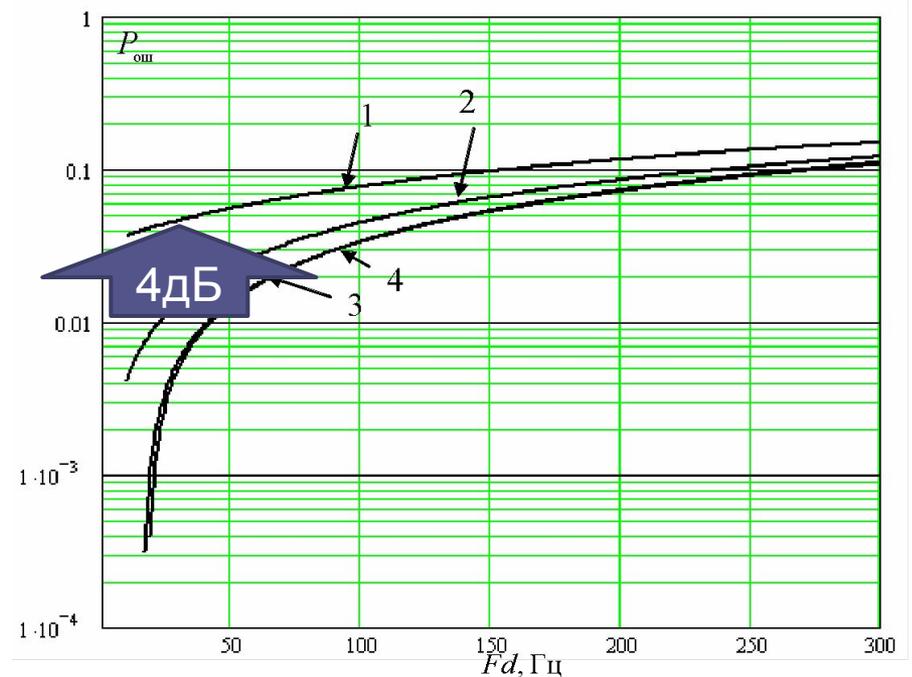
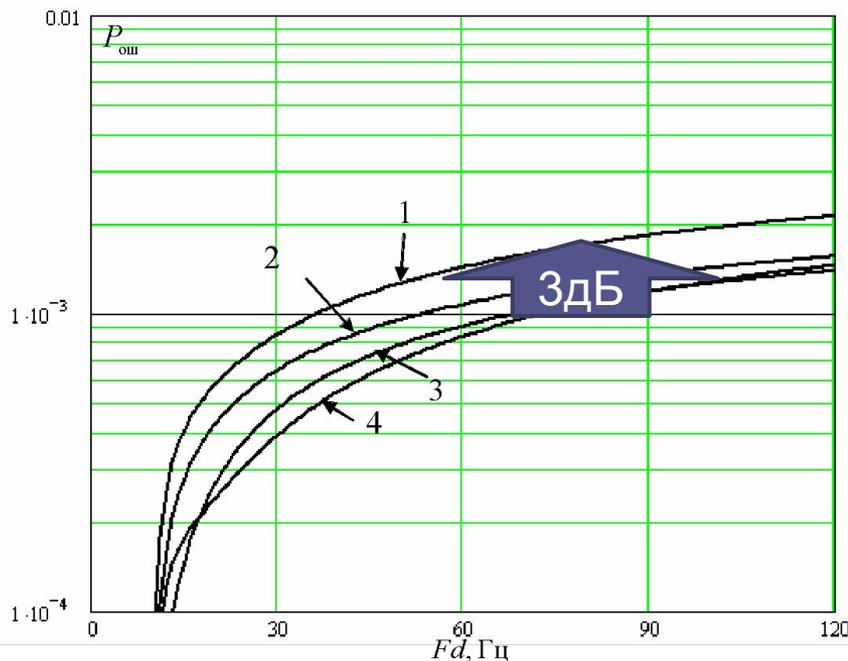
$$\mathbf{u}_m(p) = \mathbf{x}_m(p) \exp(i\psi_m) + \mathbf{n}_m^{oo}(p)$$

$$e^{i\psi_m} \equiv \frac{1}{N_c} \sum_{j=0}^{N_c-1} e^{i\theta_m(j)} \quad \mathbf{n}_m^{oo}(p) = \frac{1}{N_c} \sum_{v=0}^{N_c-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq v}}^{N_c-1} \left( \mathbf{h}_f(p)^{-1} \mathbf{h}_f(j) \exp(i\theta_m(v)) \exp\left(-i \frac{2\pi}{N_c} v(p-j)\right) \mathbf{x}_m(j) \right) + \mathbf{h}_f(p)^{-1} \boldsymbol{\eta}'_m(p)$$

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ АЛГОРИТМОВ

ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБКИ  
ПРИ ОСШ 35 ДБ,  
РАД<sup>2</sup>  $\sigma^2_{\varphi} = 4 \cdot 10^{-4}$

ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБКИ  
ПРИ ОСШ 30 ДБ,  
РАД<sup>2</sup>  $\sigma^2_{\varphi} = 2.5 \cdot 10^{-3}$



1 - без коррекции, 2 - с коррекцией на основе усреднения по пилотным каналам, 3 – с коррекцией на основе бесфильтровой ФАПЧ, 4 – с коррекцией на основе ФАПЧ с фильтром

# АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ СИГНАЛОВ OFDM НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

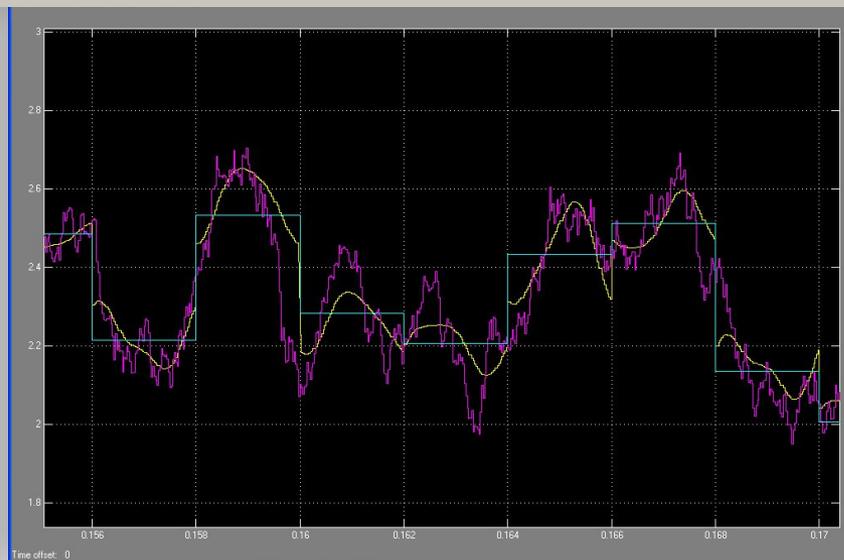
ПОМЕХИ

УРАВНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА И  
СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЕ ОТКЛОНЕНИЕ  
ОШИБКИ ОЦЕНИВАНИЯ

ОСЦИЛЛОГРАММА ОЦЕНКИ ФШ ПО  
2-М СПЕКТРАЛЬНЫМ  
СОСТАВЛЯЮЩИМ

$$\tilde{\mathbf{J}}_m = \mathbf{F}_{m-1} \tilde{\mathbf{J}}_{m-1} + \mathbf{K}_m (\mathbf{R}_m - \mathbf{A}_m \mathbf{F}_{m-1} \tilde{\mathbf{J}}_{m-1})$$

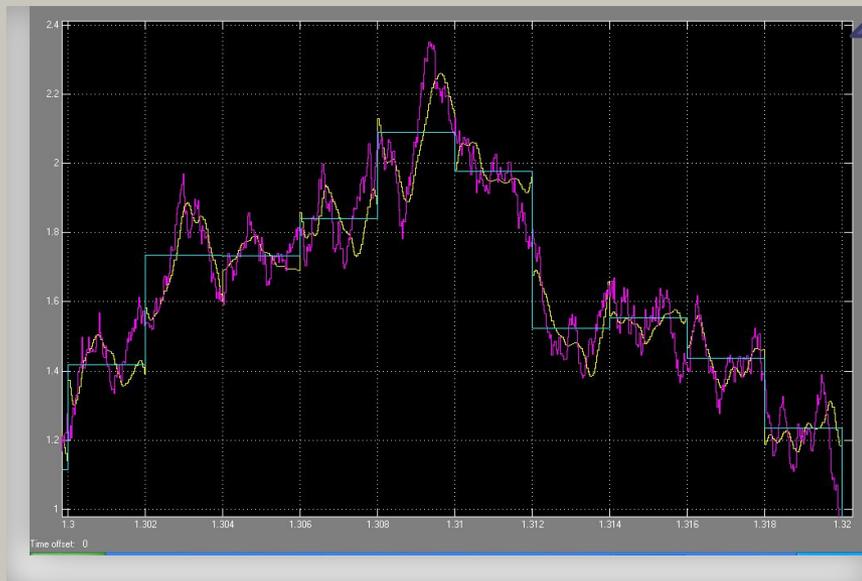
$$E\{\zeta'_{ICI}(i)^2\} = E\left\{\left|\sum_{\substack{v=-N/2 \\ |v|>u}}^{N/2-1} X_{m,q-v} H_{m,q-v} I_m(v)\right|^2\right\} = E\left\{\left|\sum_{\substack{v=-N/2 \\ |v|>u}}^{N/2-1} I_m(v)\right|^2\right\}$$



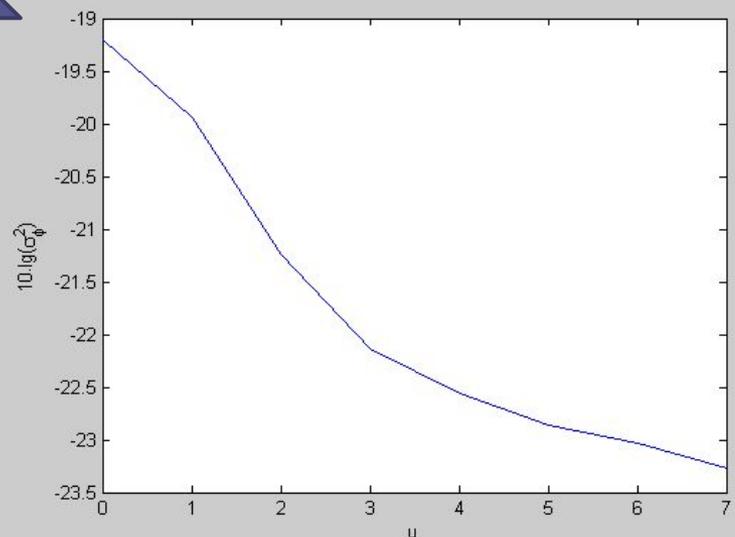
# АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ СИГНАЛОВ OFDM НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

ОСЦИЛЛОГРАММА ОЦЕНКИ ФЦП  
5-И СПЕКТРАЛЬНЫМ  
СОСТАВЛЯЮЩИМ

ДИСПЕРСИЯ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ  
ПРИ SNR=30ДБ

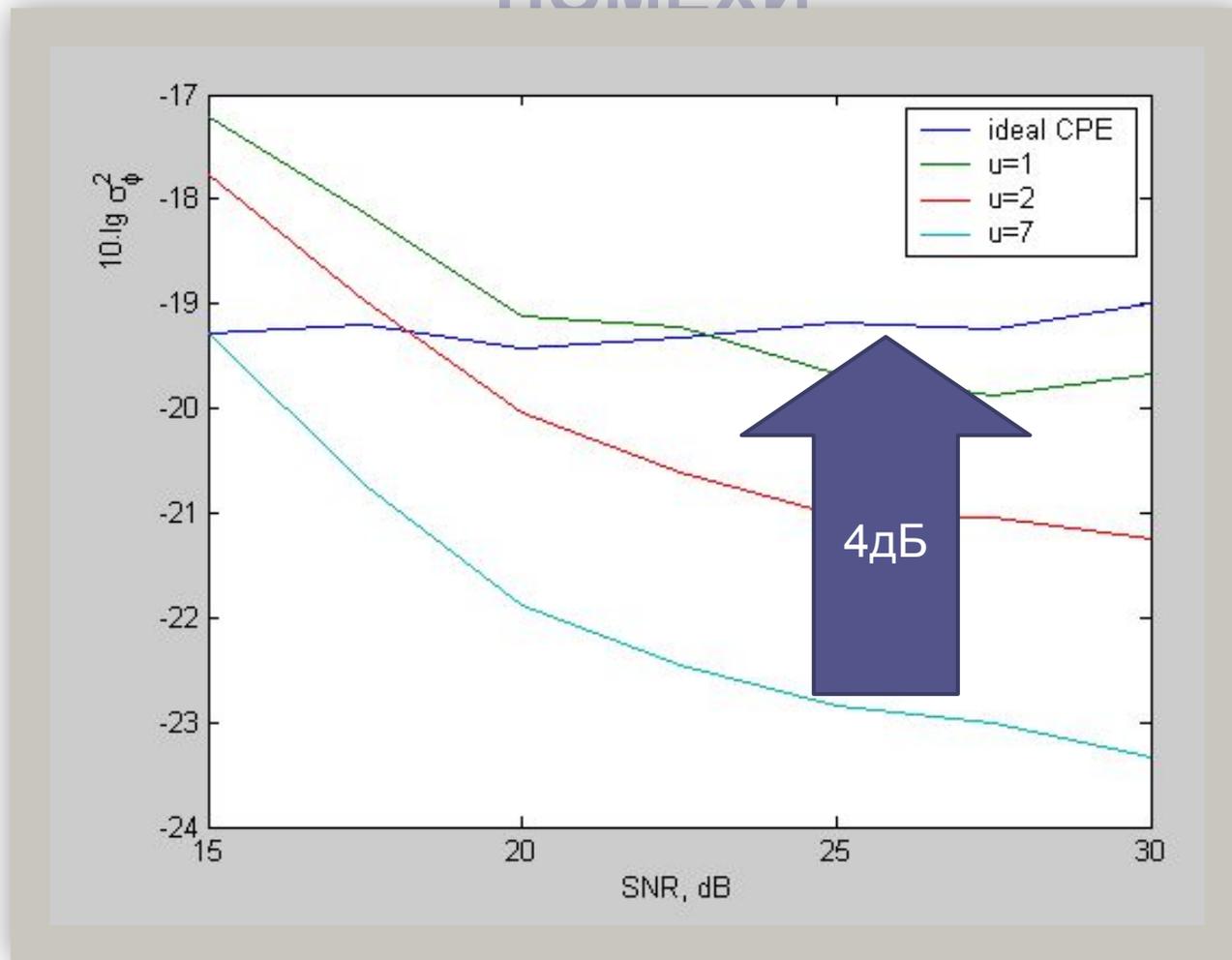


Ошибка оценки



Количество компонент

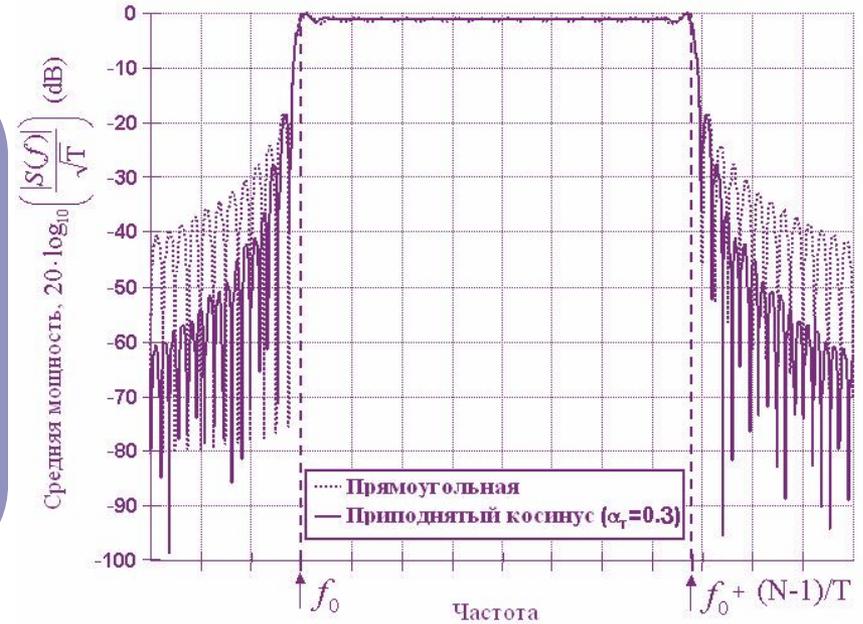
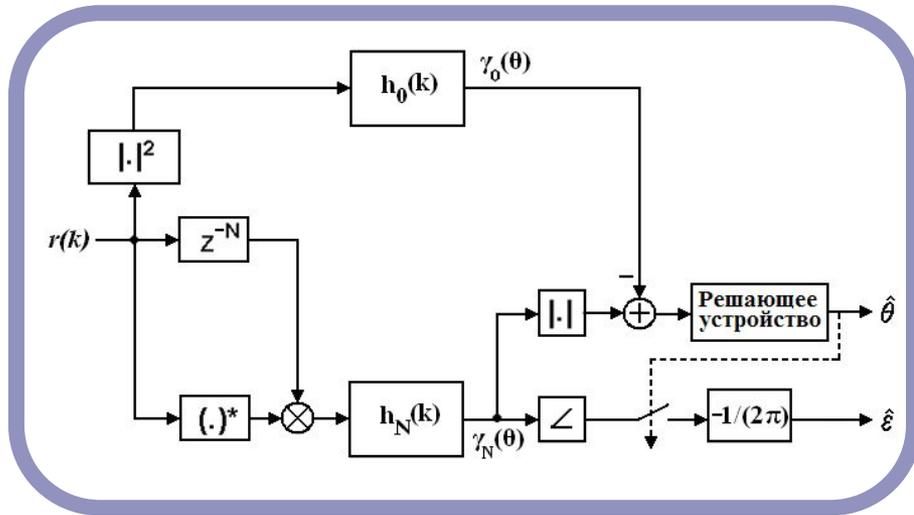
# АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ СИГНАЛОВ OFDM НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ПОМЕХИ



# АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОЙ ОЦЕНКИ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ И ЧАСТОТНОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ OFDM-СИГНАЛОВ СО СГЛАЖЕННОЙ ОГИБАЮЩЕЙ

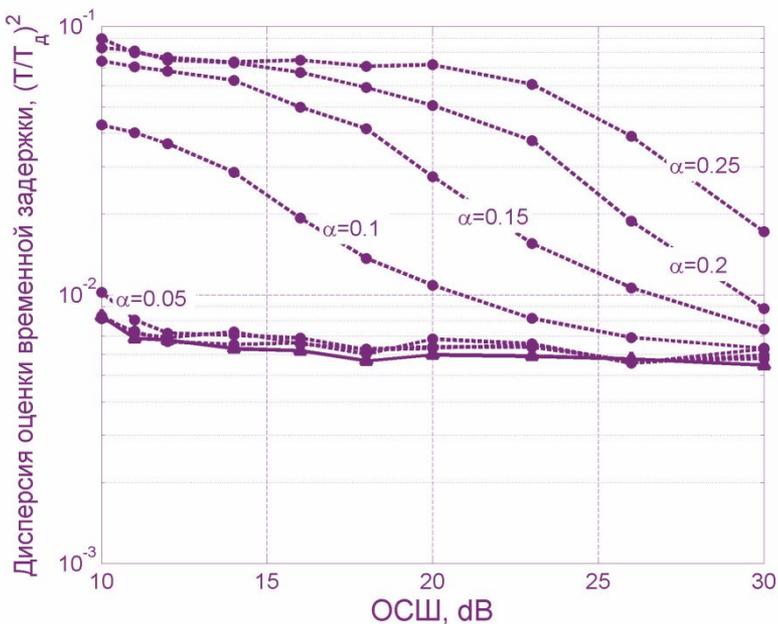
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ  
ОЦЕНКИ В УСЛОВИЯХ  
СГЛАЖЕННОЙ ОГИБАЮЩЕЙ

СПМ OFDM СИГНАЛОВ С  
ПРЯМОУГОЛЬНОЙ И СГЛАЖЕННОЙ  
ОГИБАЮЩИМИ

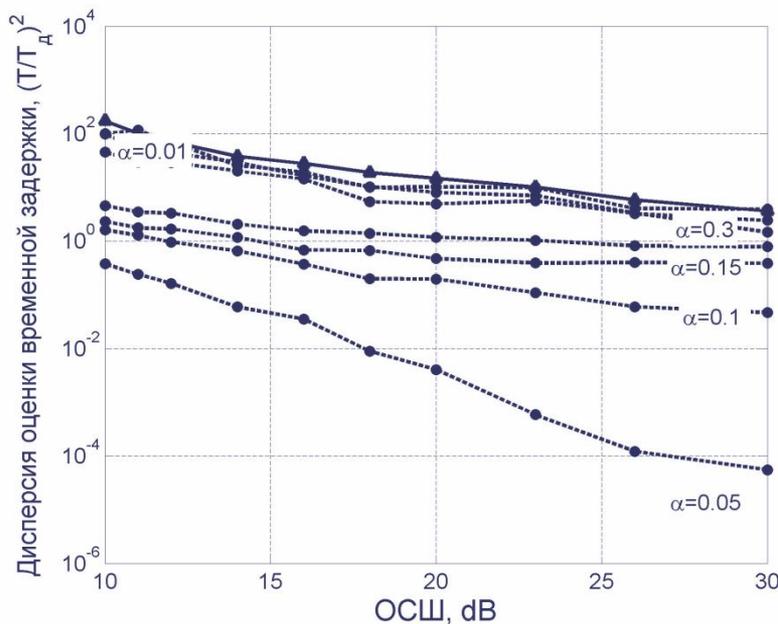


# Анализ эффективности предлагаемых алгоритмов на основе зависимостей дисперсий оценок от коэффициента

## ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ



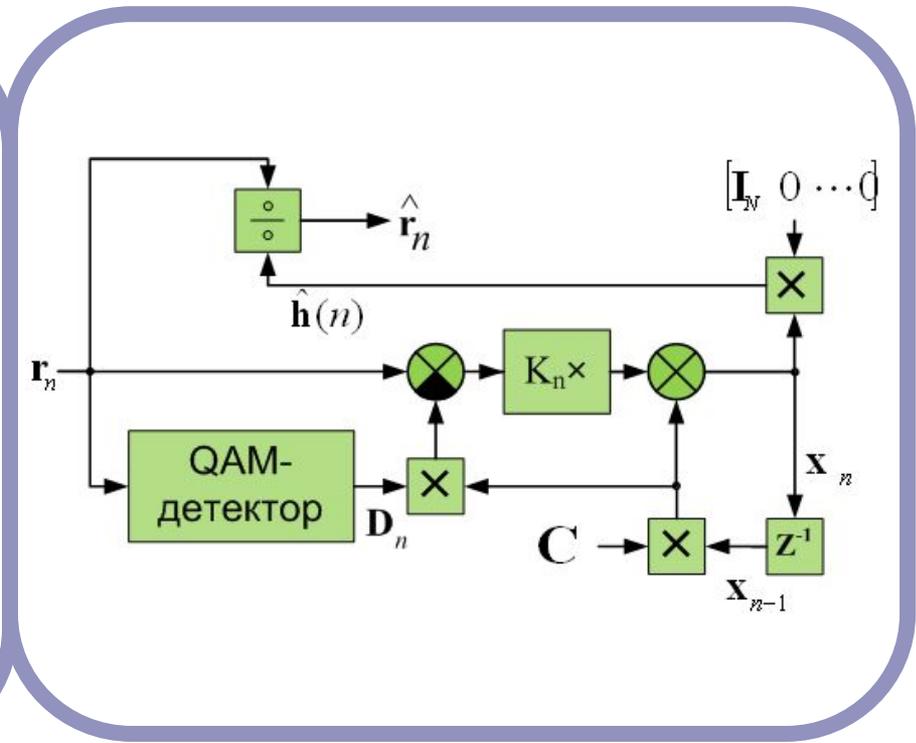
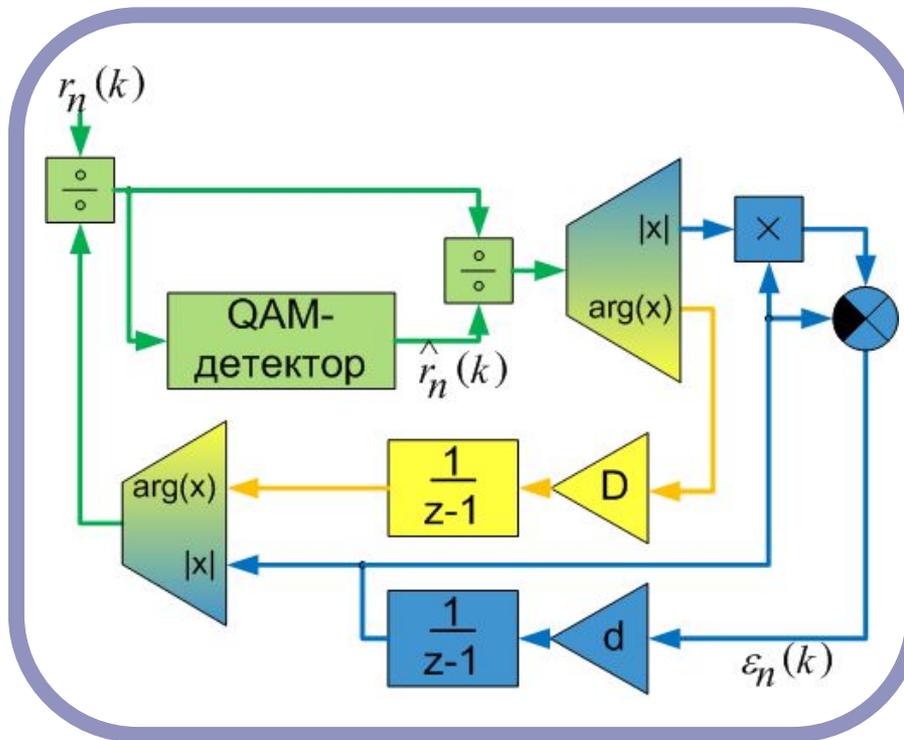
## ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ



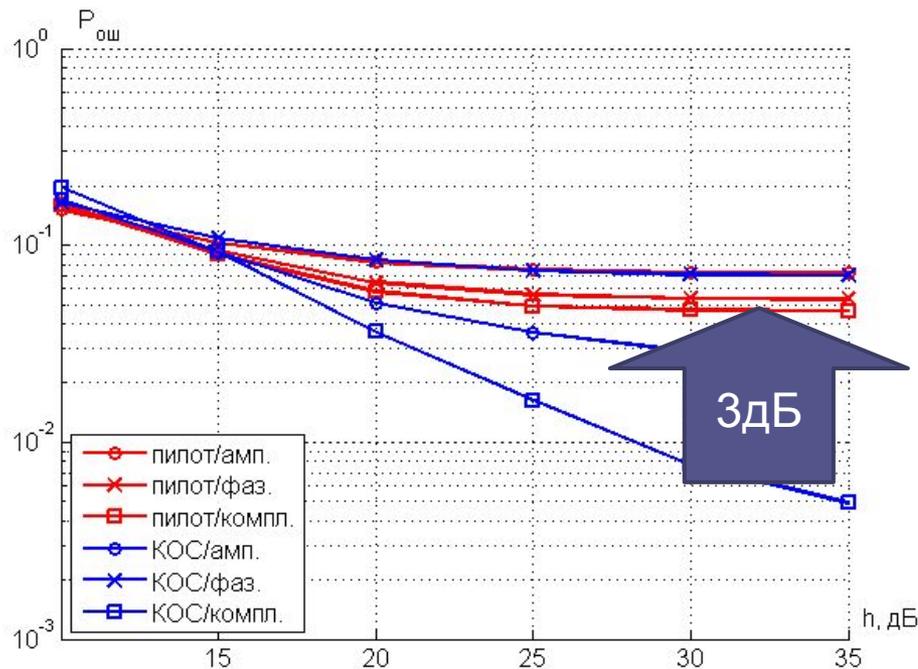
# АЛГОРИТМ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ И ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

КОМБИНИРОВАННАЯ НЕЗАВИСИМАЯ  
КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ  
НЕСУЩИХ

КОМПЛЕКСНАЯ КОРРЕКЦИЯ  
АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ

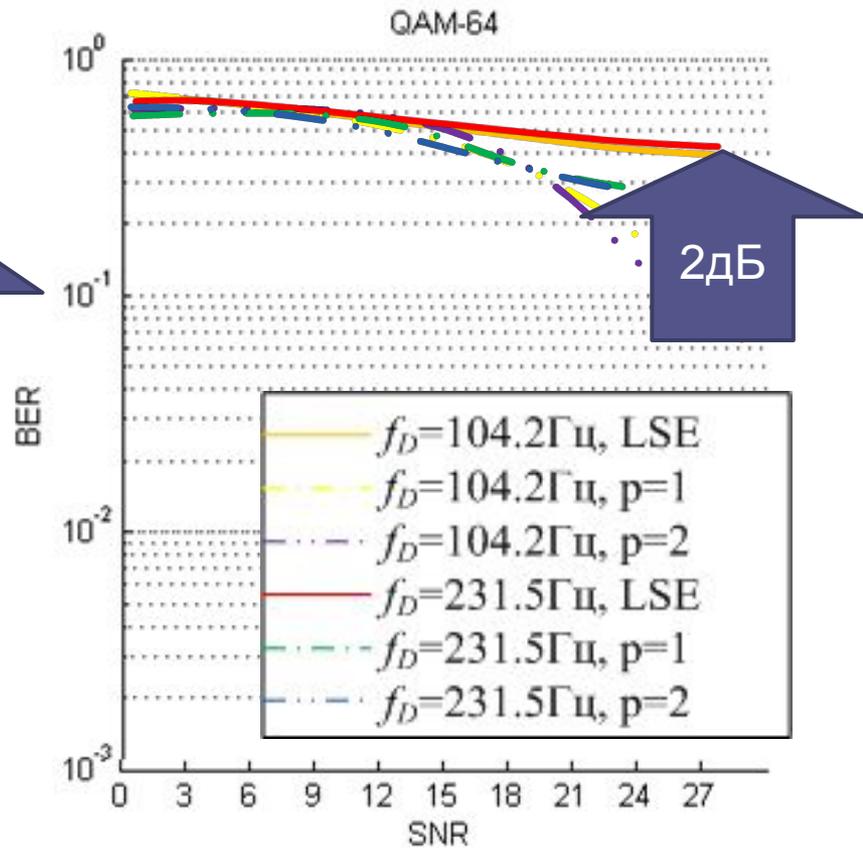
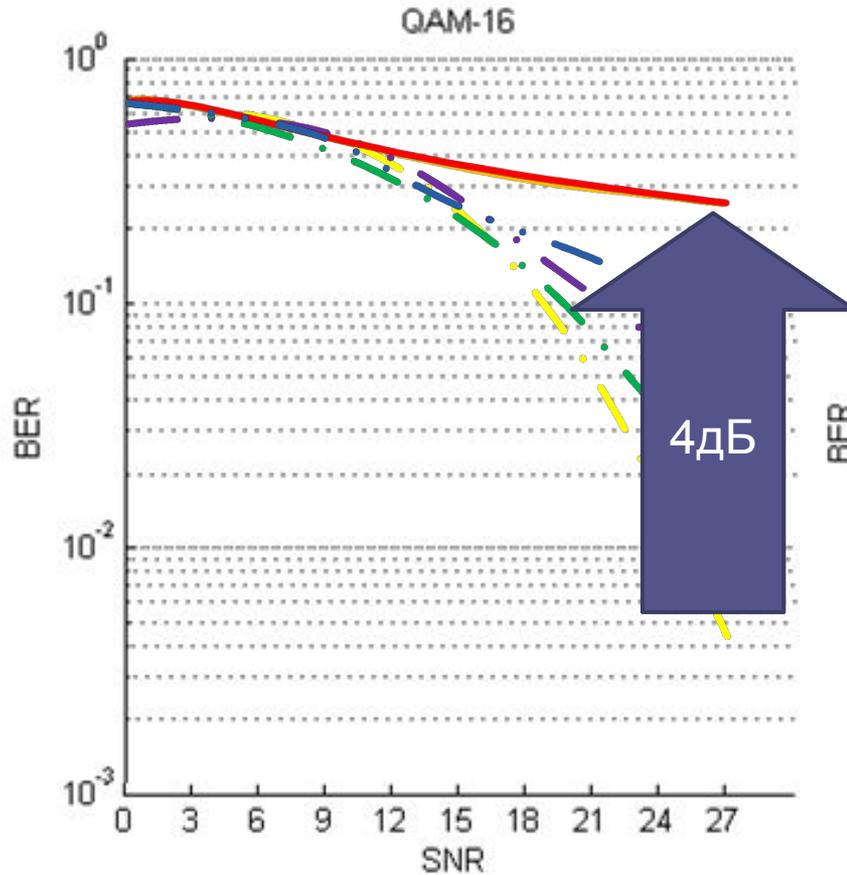


# ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ АЛГОРИТМОВ

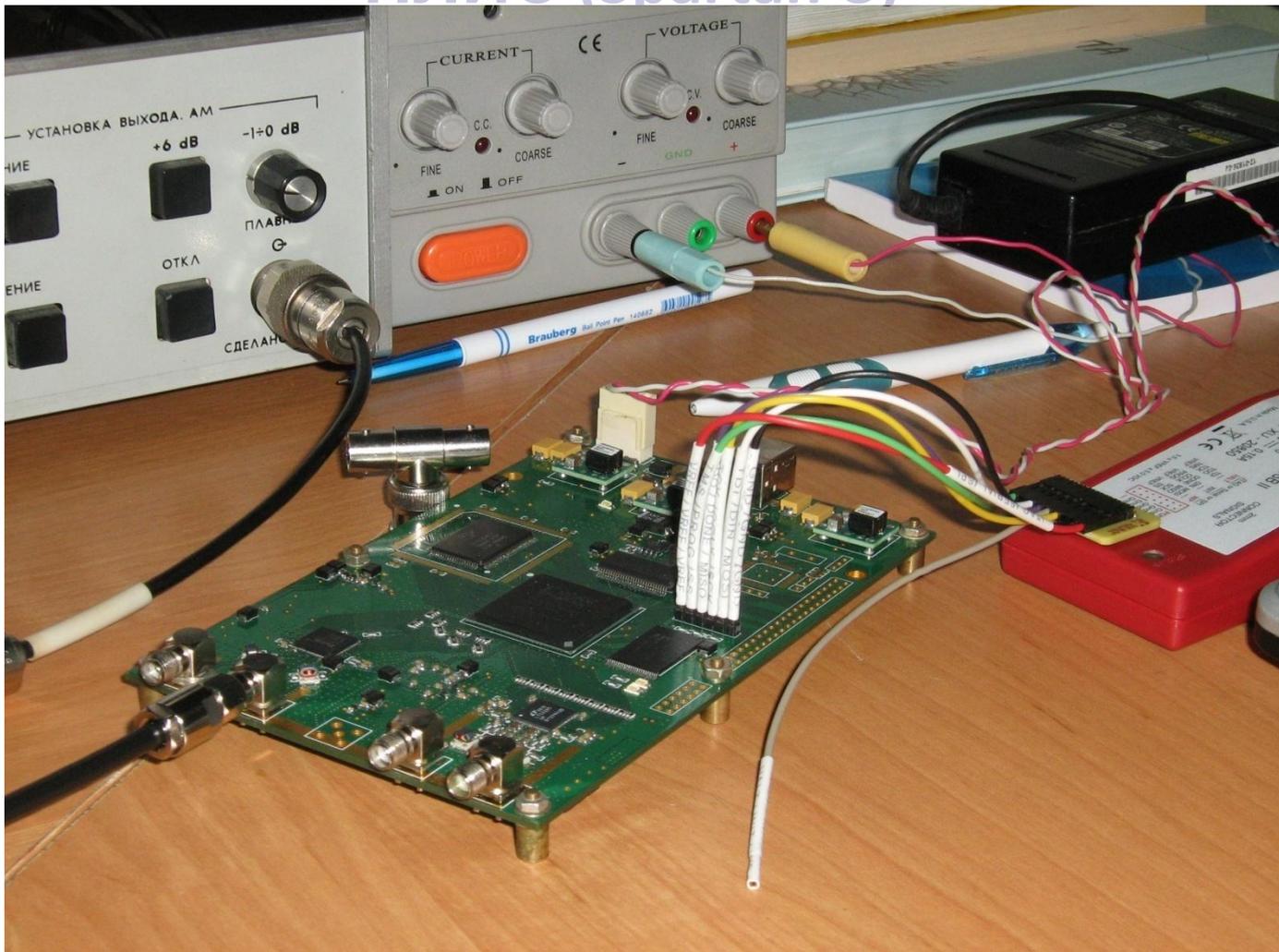


Зависимость вероятности появления ошибки в системе связи с OFDM в условиях доплеровского рассеяния для алгоритма комбинированной независимой коррекции амплитудных и фазовых искажений в сравнении с алгоритмами коррекции только амплитуды или фазы и коррекции на основе оценки параметров сигнала по пилотным несущим

# ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ АЛГОРИТМОВ

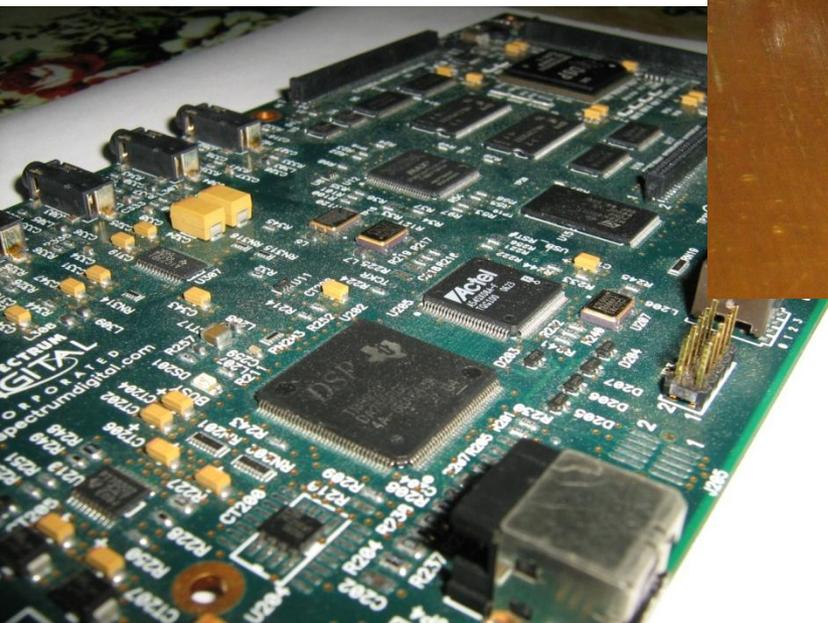


# РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ И КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛИС (Spartan-3)



# РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ И КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ DSP

TMS320C6416



TMS320DM6437

# ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ

- Казаков Л.Н., Кукушкин Д.С., Исмаилов А.В. Система коррекции фазы в каналах передачи с ортогональным частотным и пространственным разделением сигналов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания: Сборник материалов научно-технического семинара 1-4 июля 2007 г.- Одесса, 2007.- С.24-29.
- Кукушкин Д.С., Исмаилов А.В. Марковская модель системы коррекции фазы для модуляции с пространственным и ортогональным частотным разделением сигналов // Вестник ЯрГУ. (8 выпуск) Серия "Физика" (1 выпуск). С.75-79. Ярославль. 2008г.
- Казаков Л.Н., Кукушкин Д.С., Исмаилов А.В. Коррекция фазы OFDM-сигналов в условиях полиномиального фазового воздействия и доплеровского рассеяния // Труды конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение", Москва, 2008, с.75-78.
- Казаков Л.Н., Кукушкин Д.С., Исмаилов А.В. Коррекция фазы OFDM-сигналов в условиях полиномиального фазового воздействия и доплеровского рассеяния // Сборник трудов научно-технического семинара "Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания". Ярославль, 2008, с.62-64.
- Казаков Л.Н., Кукушкин Д.С., Исмаилов А.В. Коррекция фазы несущей OFDM-сигналов в условиях нестационарных замираний // Электросвязь, 2008, №6. С.19-23.
- Исмаилов А.В., Кукушкин Д.С., Казаков Л.Н. Компенсация фазовых флуктуаций в системе передачи MIMO-OFDM в условиях быстрых замираний//Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение: выпускXI-1 – М., 2009. С. 52-55.
- Казаков Л.Н., Исмаилов А.В., Кукушкин Д.С. Алгоритм комбинированной коррекции амплитуды и фазы OFDM-сигналов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания: Сборник материалов научно-технического семинара 24-26 июня 2009г. – Воронеж, 2009. С. 111-113.
- Исмаилов А.В., Кукушкин Д.С. Комбинированная коррекция несущей OFDM-сигналов в условиях быстрых частотно-селективных замираний // Вестник ЯрГУ им. П.Г.Демидова. №13. Серия «Физика. Радиотехника. Связь». 2009. №. С. 55-58
- Казаков Л.Н., Исмаилов А.В., Марков К.А. Восстановление несущей OFDM сигналов в условиях быстрых частотно-селективных замираний // Электросвязь. 2010. №3.
- Исмаилов А.В., Казаков Л.Н., Кукушкин Д.С. Алгоритм комбинированной коррекции амплитуды и фазы OFDM-сигналов // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение: выпускXII-1 – М., 2010. С. 310-313.
- Казаков Л.Н., Исмаилов А.В., Кукушкин Д.С. Алгоритм коррекции OFDM канала в условиях частотно-селективных замираний и фазовых флуктуаций // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания: Сборник материалов научно-технического семинара 2010г. – Н.Новгород, 2010.
- Исмаилов А.В., Кукушкин Д.С. Алгоритм комплексной оценки каналов с OFDM, основанный на многомерном фильтре Калмана с использованием авторегрессивной модели канала с частотно-временным рассеянием // Вестник ЯрГУ им. П. Г.Демидова. №14. Серия «Физика. Радиотехника. Связь». 2010.