

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Архитектура и технологии сверхплотных и низкопотребляющих сетей

СПб ГУТ)))

Базовые принципы построения сверхплотных сетей

Прогноз распределения объема трафика в сетях 5G после 2025 г.

Сфера экономики	Распределение мобильного трафика данных по отраслям экономики, %	Объем мобильного трафика данных на одного абонента, Гб/мес.
Медиа и развлечения	25	15
Общественная безопасность	18	10,8
Промышленность	15	9
Медицина	15	9
Финансовый сектор	10	6
Общественный транспорт	7	4,2
Автотранспорт	6	3,6
ЖКХ	4	2,4

Базовые принципы построения сверхплотных сетей

Сценарии использования ИМТ на период до 2020 года и далее

Усовершенствованная подвижная широкополосная связь



Базовые принципы построения сверхплотных сетей

Сравнение параметров сетей 4-го и 5-го поколений

Наименование	сеть 4G	сеть 5G
Пиковая скорость (нисходящий поток)	1 Гбит/с	20 Гбит/с
Пользовательская скорость передачи данных	10 Мбит/с	100 Мбит/с
Спектральная эффективность	×1	×3
Пропускная способность по площади	10 Мбит/(с·км ²)	10 Мбит/(с·км ²)
Задержка	10 мс	1 мс
Плотность устройств	100 000/км ²	1 000 000/км ²
Энергетическая эффективность сети	×1	×100
Поддерживаемая скорость передвижения	350 км/ч	500 км/ч
Ширина полосы частот	≥ 20 МГц	≥ 1 ГГц

mMTC – Massive Machine Type Communications массовая межмашинная связь

- максимальная плотность подключенных к сети для сервисов mMTC – 1 000 000 устройств/км²;
- автономная работа устройств без подзарядки аккумулятора для сервисов mMTC – до 10 лет;
- поддержка мобильности при максимальной скорости передвижения объектов – до 500 км

Ключевые характеристики в сценариях использования сверхплотных сетей

Наименование	ММТС
Пиковая скорость передачи данных	низкий у.в.
Пользовательская скорость передачи данных	низкий у.в.
Спектральная эффективность	низкий у.в.
Поддерживаемая скорость передвижения	низкий у.в.
Задержка	низкий у.в.
Плотность устройств	высокий у.в.
Энергетическая эффективность	средний у.в.
Пропускная способность по географическому признаку	низкий у.в.

* у.в. – уровень важности;

Пиковая скорость передачи данных – максимальная достижимая скорость передачи данных для одного пользователя или устройства в идеальных условиях (Гбит/с).

Пользовательская скорость передачи данных – скорость передачи данных, достижимая во всей зоне покрытия для одного пользователя или устройства подвижной связи (Мбит/с или Гбит/с).

Спектральная эффективность – средняя скорость передачи данных на единицу ресурсов спектра и на соту (бит/с/Гц)

Поддерживаемая скорость передвижения – максимальная скорость, при которой может быть достигнуто заданное качество обслуживания и бесшовная передача данных между радиоузлами, которые могут относиться к разным уровням и технологиям радиодоступа (многоуровневые технологии/RAT) (км/ч).

Задержка – обусловленный радиосетью промежуток времени между моментом отправки пакета источником и моментом его приема получателем (мс).

Плотность подключения – общее количество подключенных и доступных устройств на единицу площади (кв. км).

Энергетическая эффективность сети

Существует два аспекта энергетической эффективности:

- со стороны сети под этим понятием подразумевается количество полученной от пользователей или переданной пользователям информации в битах на единицу энергопотребления в сети радиодоступа (RAN) (бит на джоуль);
- со стороны устройства под этим понятием подразумевается количество информации в битах на единицу энергопотребления в модуле связи (бит на джоуль).

Пропускная способность по географическому признаку – Суммарная пропускная способность в географическом районе (Мбит/с/м²)

Время автономной работы – это время, в течение которого устройство может работать за счет накопленной энергии. Данный параметр особенно критичен для устройств межмашинной связи, в которых должны применяться батареи с длительным сроком службы (например, более 10 лет) и регулярное обслуживание которых затруднено по техническим или экономическим причинам. Срок службы модуля питания по большей части зависит от частоты обновления, мощности передачи и типа первичного преобразователя.

Дальность беспроводной связи – зависит от частоты по которой передаются данные, типа антенны, окружающей среды и мощности. Так как системы LTE-M и NB-IoT работают в лицензированных диапазонах частот, они могут передавать данные на более высоком уровне мощности, что приводит к значительному увеличению дальности связи. Передача данных на большие расстояния часто необходима для того, чтобы достичь ближайшей вышки сотовой связи. Такая высокая мощность передачи данных обеспечивается за счет уменьшения срока службы модуля питания.

Самоорганизация – сверхплотные сети должны иметь возможность самоорганизации. Исходя из этого, вычислительные возможности, возможности обеспечения связи и управления должны быть достаточными для обеспечения автономного существования.

Гибкость – для случая сенсорных сетей алгоритмы должны обладать достаточной гибкостью с целью адаптации к различным сетевым приложениям и условиям функционирования сетевых узлов, изменяющихся в широких пределах (топология сети может многократно изменяться в процессе функционирования сетей вследствие введения новых узлов, отказов существующих, критических изменений внешней среды).

Масштабируемость – сети большого масштаба и высокой плотности с лимитированной полосой пропускания должны, предоставлять услуги с определенным уровнем качества обслуживания. В зависимости от решаемой задачи должно быть обеспечена возможность изменения количества сетевых узлов в широких пределах.

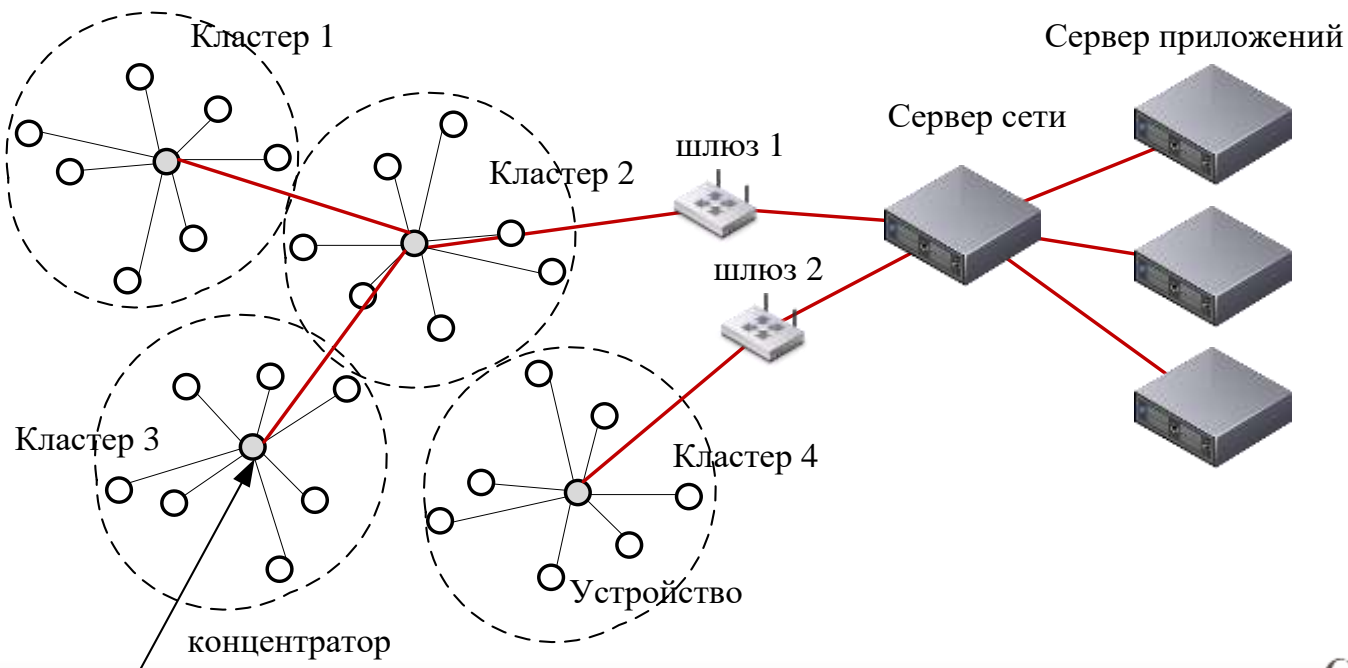
Базовые принципы построения сверхплотных сетей

Сценарии использования технологии ММТС

Отрасль экономики	Наиболее востребованные сценарии применения	Решаемые задачи
Промышленность	<ol style="list-style-type: none">1. Дистанционное управление роботами по каналам связи 5G/ IMT-2020, в том числе в новых отраслях.2. Самонастраиваемость производственных линий за счет обеспечения взаимодействия между машинами в реальном времени.3. Дистанционная оценка качества или диагностика	Индустрия 4.0 - переход на полностью автоматизированное цифровое производство
ЖКХ «Умный город»	<ol style="list-style-type: none">1. Умные счетчики энерго-, водо-, газопотребления.2. Умное освещение.3. Умная утилизация отходов.4. Умные парковки.5. Сбор данных в реальном времени от транспорта, инфраструктуры и других устройств	<ol style="list-style-type: none">1. Снижение потребления энергии, воды и других ресурсов.2. Внедрение автоматизации на уровне распределительных сетей.3. Управление чрезвычайными ситуациями в ЖКХ.4. Автоматизация управления городским трафиком автомобильного движения
Общественный транспорт	<ol style="list-style-type: none">1. Централизованный сбор данных в реальном времени от транспорта, инфраструктуры и других устройств	<ol style="list-style-type: none">1. Оптимизация использования общественного транспорта.2. Повышение уровня удовлетворенности пассажиров
Сельское хозяйство	<ol style="list-style-type: none">1. Съём информации в реальном времени с различных датчиков, размещенных в сельскохозяйственных угодьях и местах нахождения скота.2. Дистанционный контроль физического состояния животных	<ol style="list-style-type: none">1. Автоматизация процессов в растениеводстве и животноводстве. Снижение трудозатрат.2. Постоянный контроль состояния урожая и животных на всех этапах воспроизводства сельхозпродукции.3. . Повышение эффективности сельскохозяйственной логистики
Экология	<ol style="list-style-type: none">1. Дистанционный контроль очагов возгорания.2. Дистанционный контроль местности (качество воздуха, воды, почвенный контроль и др.)	<ol style="list-style-type: none">1. Минимизация ущерба от лесных возгораний.2. Повышение эффективности экологического контроля.3. Своевременное получение информации при различных стихийных бедствиях и техногенных авариях.4. Автоматизированное реагирование на нештатные ситуации
Здравоохранение и телемедицина	<ol style="list-style-type: none">1. Сбор, обработка и хранение данных о пациенте и обобщенных медицинских данных.2. Удаленный оперативный мониторинг состояния пациентов	<ol style="list-style-type: none">1. Повышение продолжительности и качества жизни человека.2. Переход полностью к электронной медицине.3. Внедрение общедоступных услуг телемедицины

Технология	Высокоуровневые требования	Возможные вопросы, связанные со спектром	Оптимальные частотные диапазоны
mMTC	Работа в загроможденной среде (cluttered environment)	Доминирование дифракции в низких и отражений в высоких частотных диапазонах	Все диапазоны
	Работа около быстро движущихся препятствий	Каналы с частотно избирательным замиранием (фейдингом)	Предпочтительные частоты ниже 4 ГГц
	Сети с ячеистой топологией (mesh networking)	Высокоскоростной распределенный беспроводной backhaul, работающий в или вне полосы (in-band или out-of-band)	Выше 24 ГГц

Пример сети с ячеистой топологией



Базовые принципы построения сверхплотных сетей

Пояснения к рисунку «Пример сети с ячеистой топологией»

устройство – элемент оборудования, который обладает обязательными возможностями связи и дополнительными возможностями измерения, срабатывания, а также ввода, хранения и обработки данных. Для случая, представленного на рисунке, устройство может выступать в качестве ретранслятора или маршрутизатора для других устройств, образующих сеть.

шлюз – сетевое устройство, через которое осуществляется присоединение сети с ячеистой топологией к сети связи общего пользования для передачи полученных данных. Шлюз выполняет необходимую трансляцию между протоколами, используемыми в сетях связи и в устройствах.

сервер сети – аппаратно-программный комплекс в сети, способный регулировать работу всех сетевых устройств.

сервер приложений – набор физического и программного обеспечения, способного обеспечить доступ клиентов при помощи специальных API и обеспечить не только вывод каких-либо данных, но и оптимизировать исполнение программного кода на любых устройствах.

Базовые принципы построения сверхплотных сетей

Пояснения к рисунку «Пример сети с ячеистой топологией»

В физическом мире существует несколько типов физических устройств (например, Wi-Fi, Zigbee устройство, устройство Bluetooth, ТВ, телефон, сервер данных), которые делятся на две категории:

- **Функционально ограниченное устройство:** Функционально ограниченное устройство не может подключаться к Интернету и не имеет никаких функциональных возможностей веб-сети. Устройство взаимодействует с агентом брокера веб-сети вещей.
- **Полнофункциональное устройство:** В полной мере соответствует функциональным возможностям веб-сети. Устройство может взаимодействовать не только с брокером веб-сети вещей WoT, но и со услугами веб-сети.

Проблемы в беспроводных сетях с большим количеством устройств:

- Большой объем передаваемой информации снижает надежность тех узлов, которые находятся в непосредственной близости к шлюзу, так как постоянная передача транзитных данных может привести к выходу из строя источника питания;
- большой объем трафика способен переполнить буферы приема.

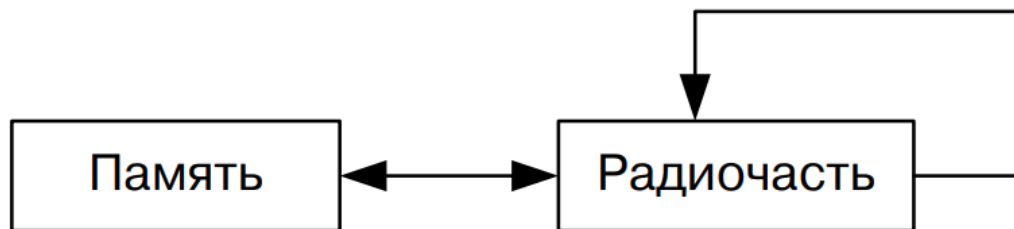
Решение вышеперечисленных проблем – кластеризация сети.

кластер – объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определёнными свойствами. Размер кластера может масштабироваться.

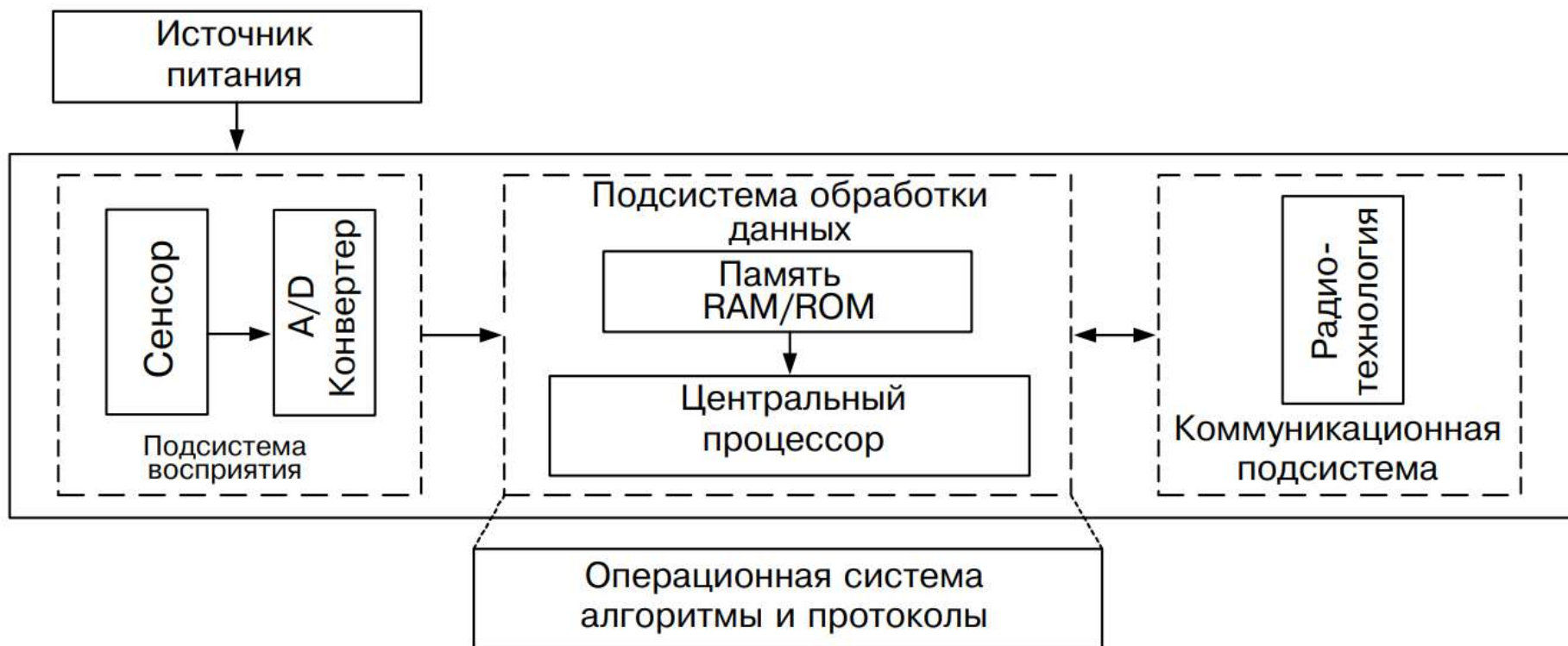
Устройства подразделяются на следующие категории :

- устройство переноса данных подключается к физической вещи и непрямым образом соединяет эту физическую вещь с сетями связи.
- устройство сбора данных представляет считывающее/записывающее устройство, имеющее возможность взаимодействия с физическими вещами, которое может осуществляться непрямым образом с помощью устройств переноса данных или напрямую с помощью носителей данных, подключенных к физическим вещам.
- сенсорное и исполнительное устройство обнаруживает и измеряет информацию, относящуюся к окружающей среде, и преобразовывает ее в цифровые электрические сигналы. Оно может также преобразовывать цифровые электрические сигналы, поступающие от информационных сетей, в действия.
- устройство общего назначения: устройство общего назначения обладает встроенными возможностями обработки и связи и может обмениваться данными с сетями связи с использованием проводных или беспроводных технологий.

Архитектура RFID

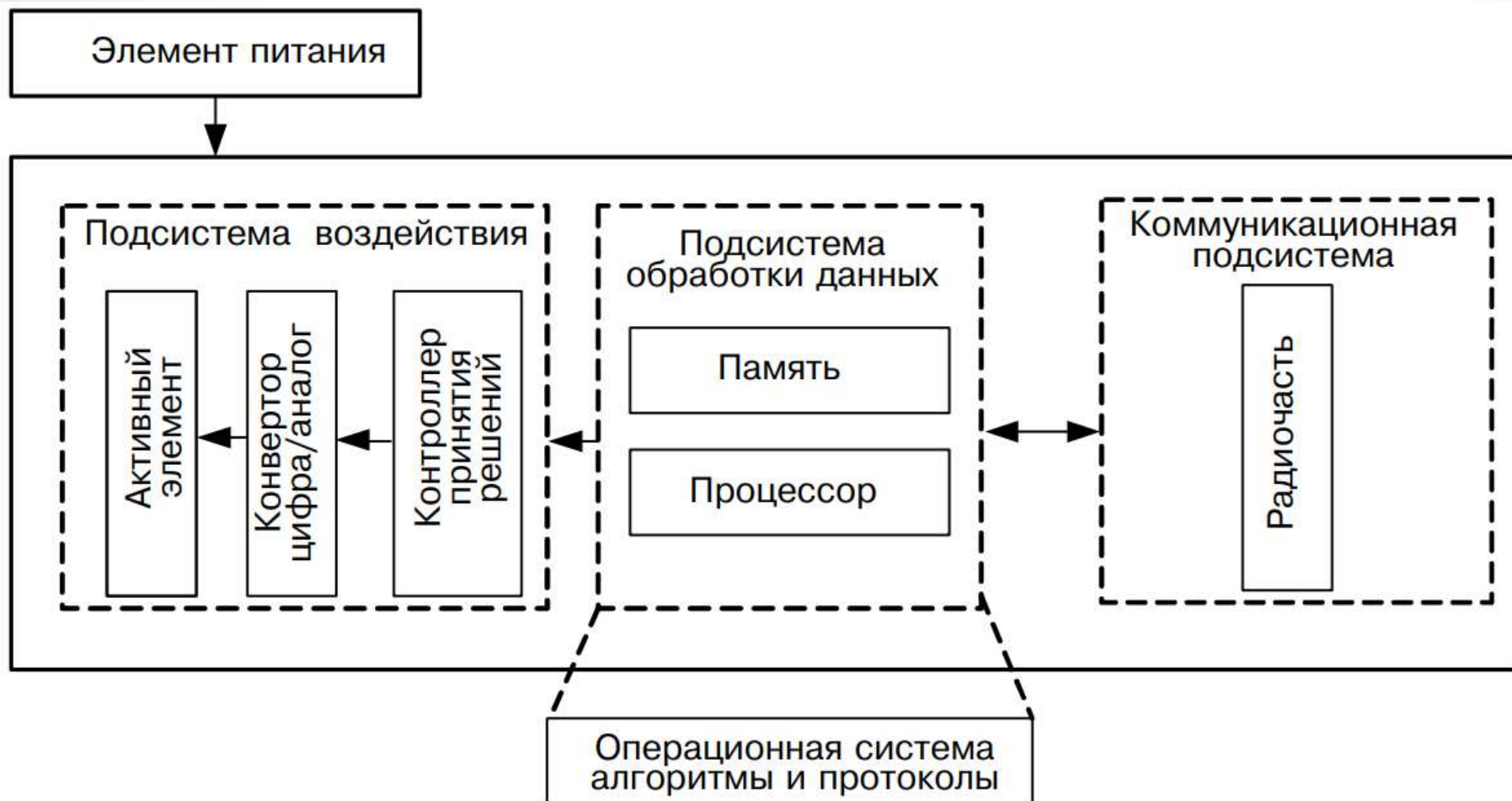


Архитектура сенсорного устройства

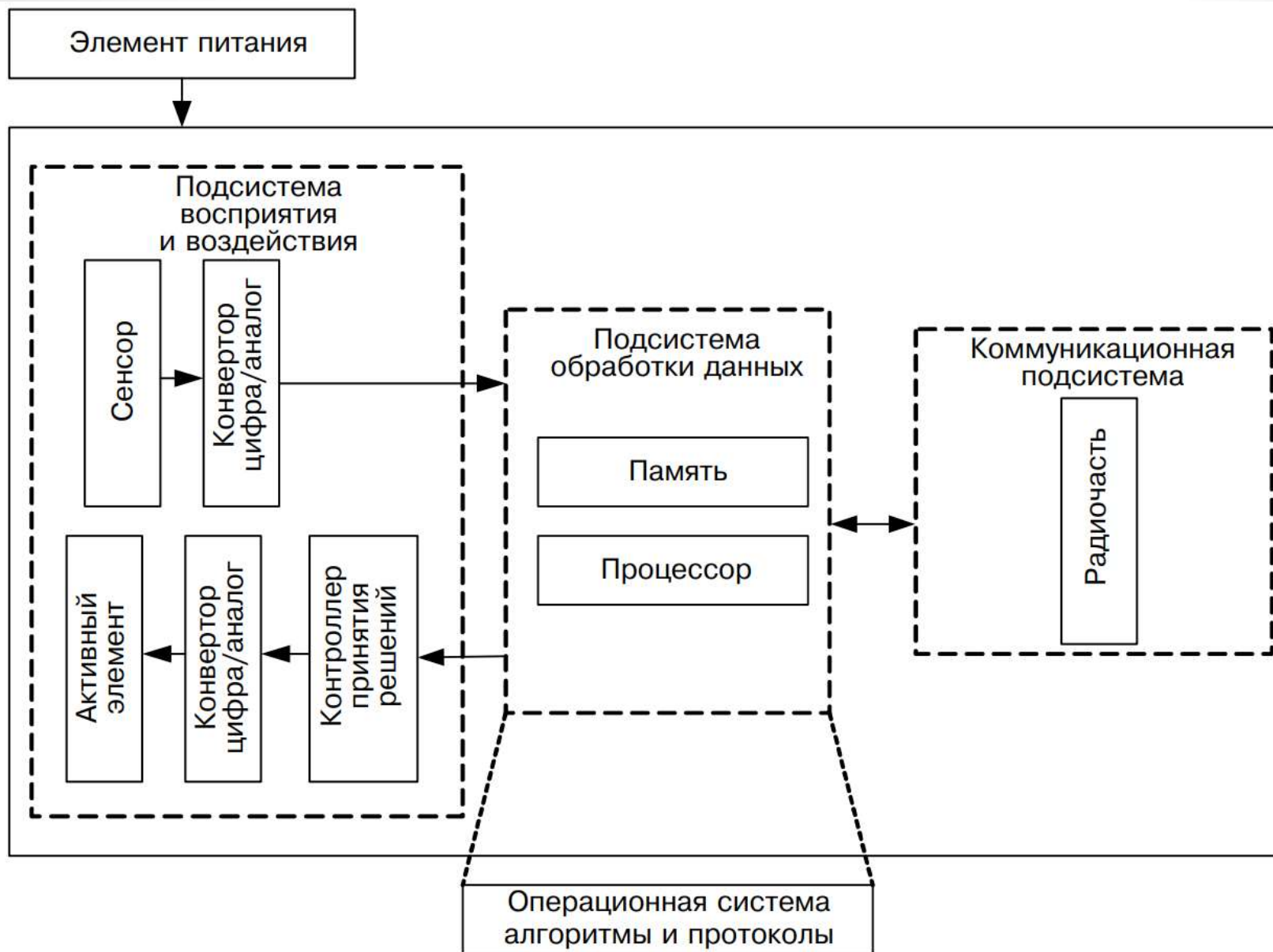


Базовые принципы построения сверхплотных сетей

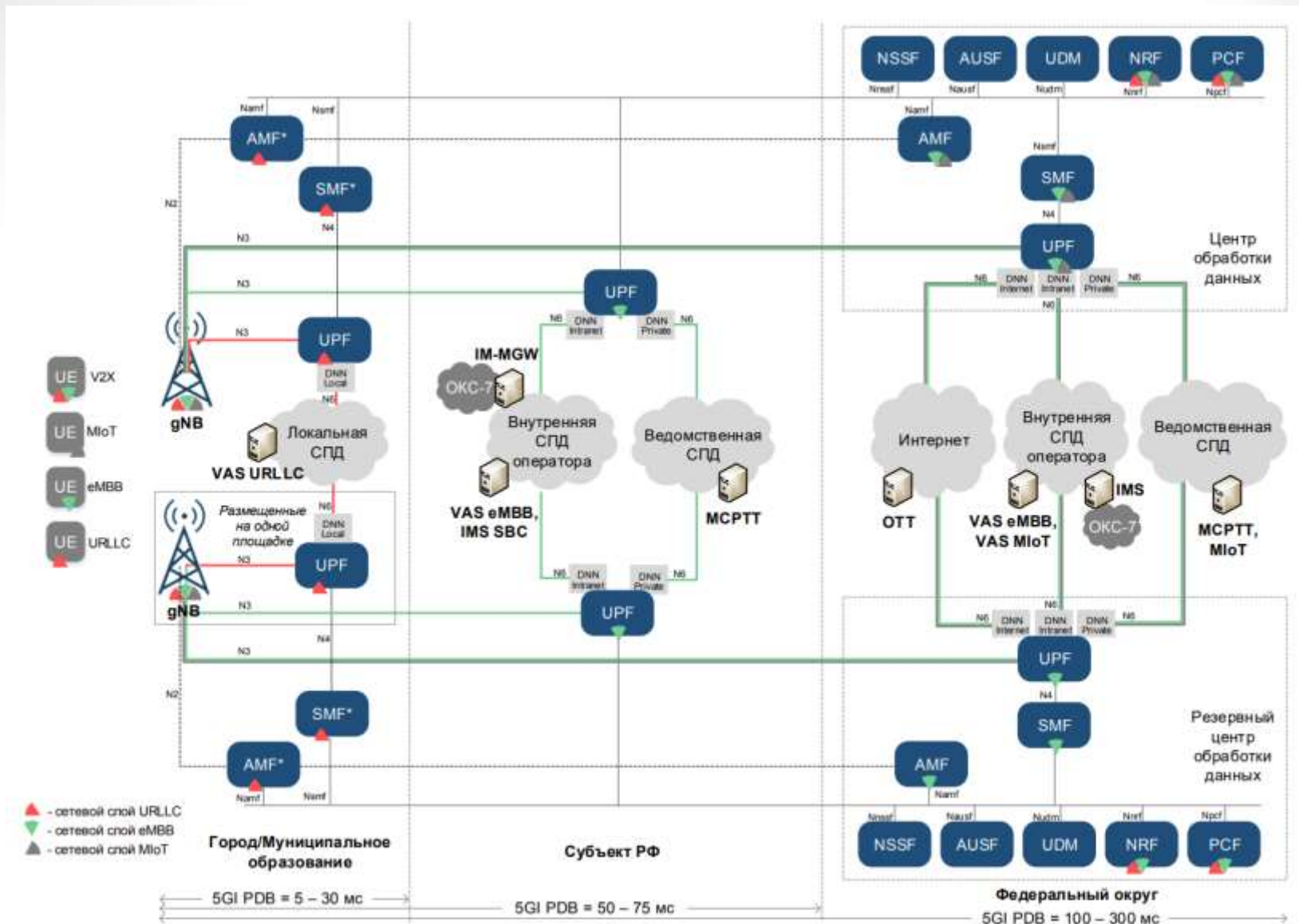
Архитектура исполнительного устройства



Архитектура комбинированного сенсорно-исполнительного устройства

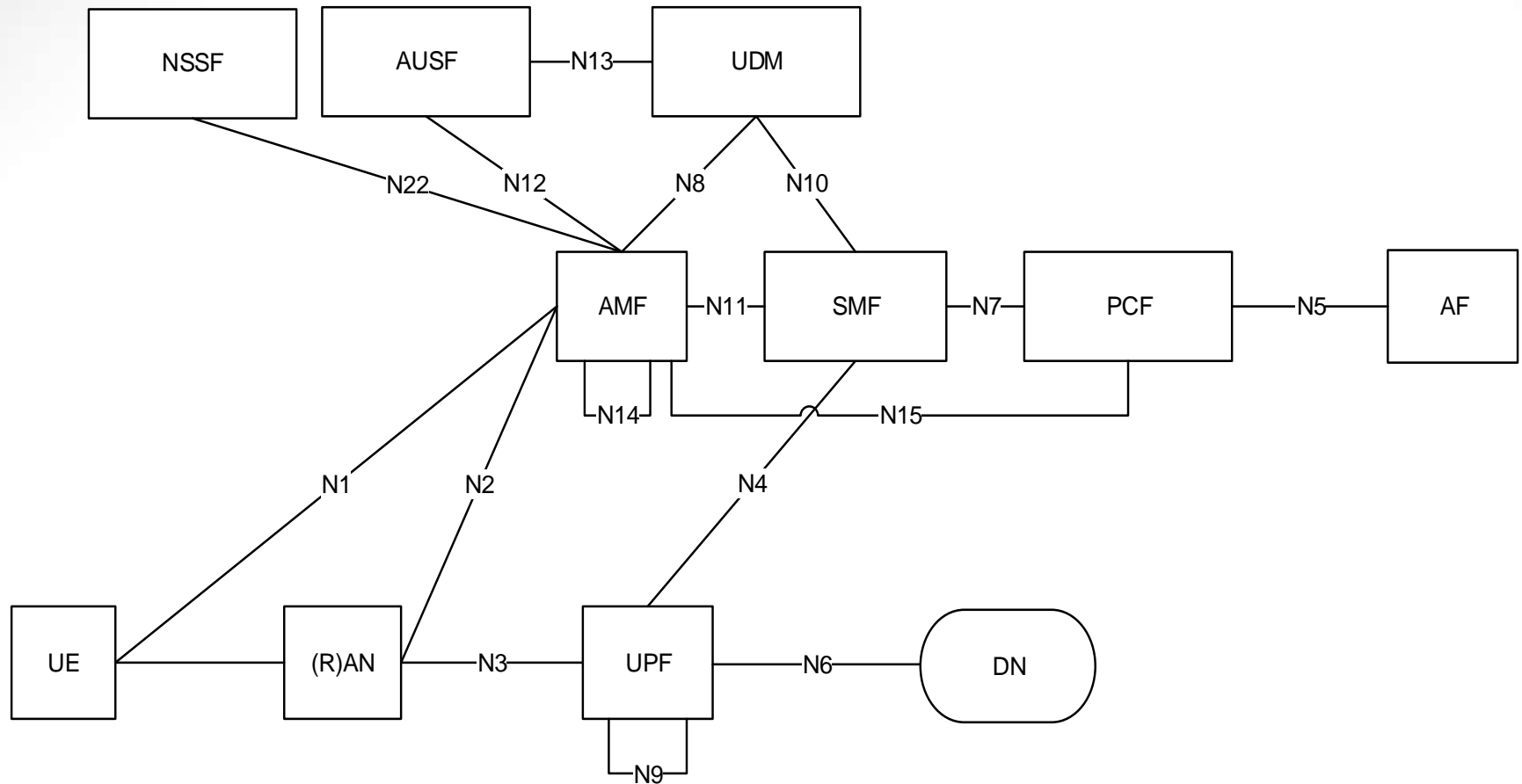


Архитектура сети с плотным расположением абонентов



Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Архитектура опорной сети 5G



На слайде представлены следующие функции

- сервера аутентификации AUSF (Authentication Server Function);
- унифицированной базы данных UDM (Unified Data Management);
- выбора сетевого слоя NSSF (Network Slice Selection Function);
- управления доступом и мобильностью AMF (Core Access and Mobility Management Function);
- управления сессиями SMF (Session Management Function);
- передачи данных абонентов UPF (User Plane Function);
- управления политиками PCF (Policy Control Function);
- системы хранения структурированных данных SDSF (Structured Data Storage network function);
- системы хранения не структурированных данных UDSF (Unstructured Data Storage network function);
- управления сетью согласно требованиям приложений AF (Application Function);
- обеспечения взаимодействия сети с внешними функциями NEF (Network Exposure Function);
- репозитория (хранилища) сетевых функций NRF (NF Repository Function).

Абонентский трафик централизован в ЦОД макрорегионального уровня в точке расположения сервисной платформы MIoT.

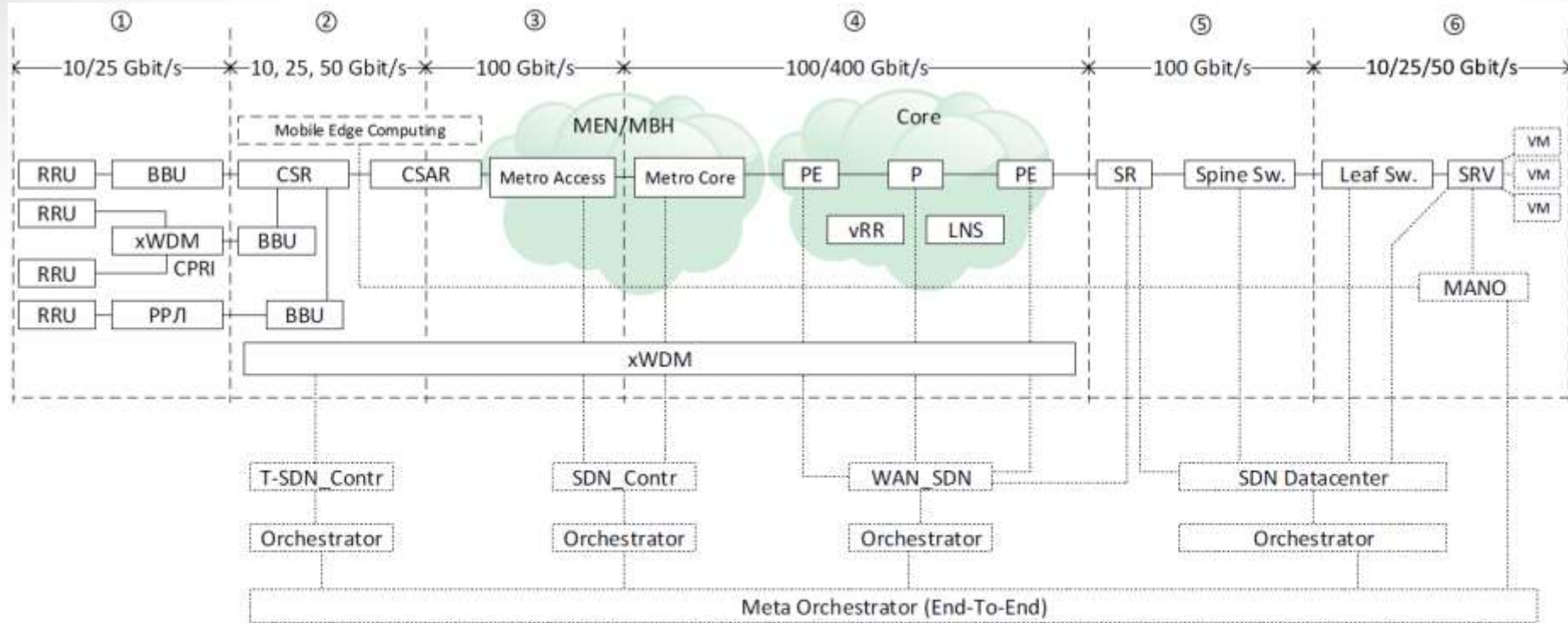
Диапазон допустимых задержек PDB между абонентским терминалом и интерфейсом N6 пакетного шлюза UPF составляет до 300 мс.

Пакетные шлюзы UPF с небольшой пропускной способностью и большой сессионной емкостью размещаются в ЦОД макрорегионального уровня.

Степень резервирования – невысокая

Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Архитектура транспортной сети 5-го поколения



CSR – Cell Site Router

CSAR – Cell Site Aggregation Router

SR- Service Router

Spine and Leaf – switches in Clos topology

SRV – Servers

———— Physical Connection

----- Logical Connection

Пояснения к рисунку «Архитектура транспортной сети 5-го поколения»

На слайде представлены следующие функции

- сервера аутентификации AUSF (Authentication Server Function);
- унифицированной базы данных UDM (Unified Data Management);
- выбора сетевого слоя NSSF (Network Slice Selection Function);
- управления доступом и мобильностью AMF (Core Access and Mobility Management Function);
- управления сессиями SMF (Session Management Function);
- передачи данных абонентов UPF (User Plane Function);
- управления политиками PCF (Policy Control Function);
- системы хранения структурированных данных SDSF (Structured Data Storage network function);
- системы хранения не структурированных данных UDSF (Unstructured Data Storage network function);
- управления сетью согласно требованиям приложений AF (Application Function);
- обеспечения взаимодействия сети с внешними функциями NEF (Network Exposure Function);
- репозитория (хранилища) сетевых функций NRF (NF Repository Function).

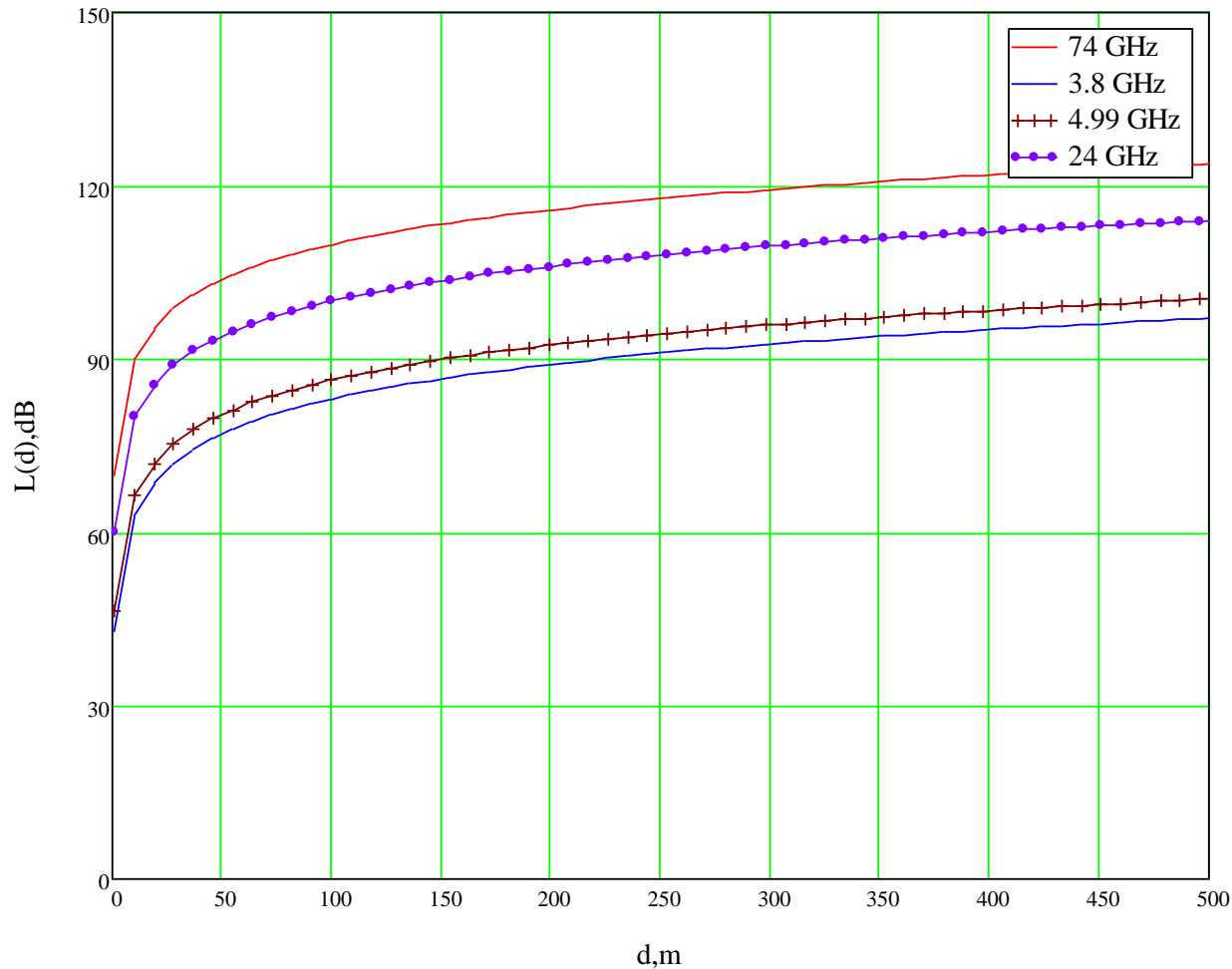
Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Пояснения к рисунку «Архитектура транспортной сети 5-го поколения»

CSR	Cell Site router. Оборудование, находящееся ближе всего к базовым станциям мобильной сети. Маршрутизатор обеспечивает базовый L3-функционал, а также синхронный Ethernet ITU-G.8262, а также IEEE 1588 Precision Time Protocol.
CSAR	Cell Site Aggregation Router. Высокосмасштабируемый маршрутизатор, агрегирующий на себе множество CSR.
Metro Access	Metro Access Router. Маршрутизатор городского уровня (MEN). Как правило является устройством в сети IP/MPLS, предоставляющий сервисы MPLS VPN.
Metro Core	Metro Core Router. Агрегирующий маршрутизатор в городской сети MEN. Стыкуется с множеством AR устройств.
PE	Provider Edge Router. Маршрутизатор IP/MPLS, обеспечивающий MPLS VPN на магистральном уровне. Является точкой терминирования создаваемых сервисов.
P	Маршрутизатор уровня магистральной транспортной сети IP/MPLS, являющийся транзитным.
SR	Site router. Является терминирующим маршрутизатором. Как правило располагается на уровне ЦОД
Spine Switch	Высокопроизводительный коммутатор, применяемый в качестве агрегатора Leaf-коммутаторов в ЦОД.
Leaf Switch	Коммутатор, агрегирующий на себе подключения конечных вычислительных устройств, например, серверное оборудование или систем хранения данных.
xWDM	Оборудование региональной и/или магистральной транспортной сети. Является каналобразующим оборудованием и применяет спектральное уплотнение каналов, позволяющее в физическом волокне обеспечивать передачу нескольких длин волн.
SRV	Серверное оборудование. Основной вычислительных компонент ЦОД, позволяющий решать различные прикладные задачи.

Архитектура сети с плотным расположением абонентов

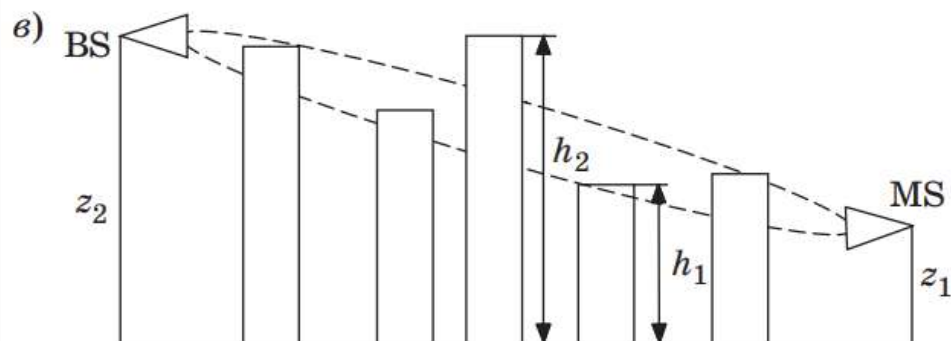
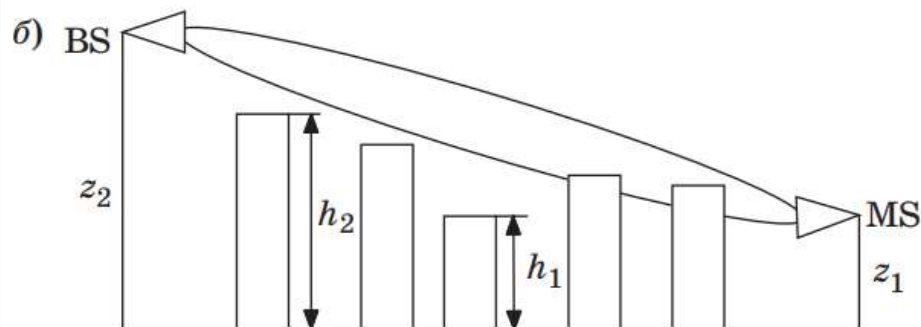
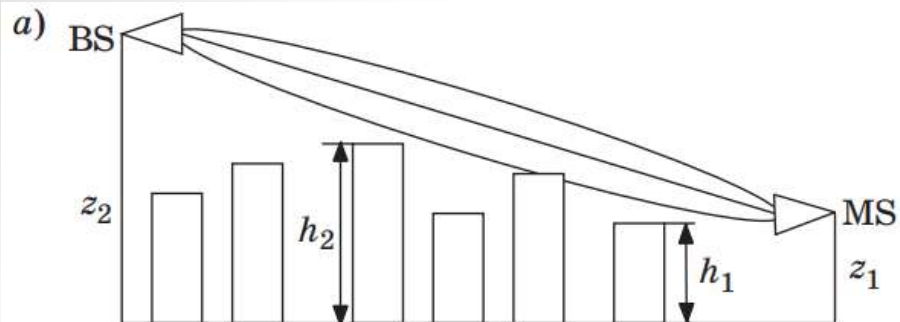
Расчет ослабления радиосигнала в свободном пространстве (рек. МСЭ-R P.525-2)



$$L_{bf} = 32,4 + 20 \lg f + 20 \lg d$$

Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Модель распространения в городских условиях



Сценарий 1 (рисунок а)

$$L_1(r) = -32,4 - 20 \log f - 20 \log r - L_{\text{fading}} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}})$$

$$L_{\text{fading}} = 10 \log \left[\gamma_0 r \frac{F(z_1, z_2)}{h_2 - h_1} \right] =$$

$$= 10 \log \left[\gamma_0 r \frac{F(z_1, z_2)}{\Delta h} \right],$$

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{\Delta h}{n+1}, & h_1 > z_1, z_2 > h_2 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^{n+1}}{(n+1)(\Delta h)^{n+1}}, & h_1 < z_1, z_2 > h_2 > z_1 \end{cases}$$

$F(z_1, z_2)$ - наложение профиля зданий,

f - частота, МГц

r - расстояние между антеннами BS и MS с высотой z_1 и z_2 соответственно, км

Антенна BS над крышами, антенна MS под крышами с видимостью:
85–100 % (а), 50 % (б) и 10–20 % (в) между ними

Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Модель распространения в городских условиях

Сценарий 2 (рисунок б)

$$L_2(r) = -32,4 - 30 \log f - 30 \log r - L_{\text{fading}} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}})$$

$$L_{\text{fading}} = 10 \log \frac{\gamma_0 l_v F(z_1, z_2)}{|\Gamma| \left[\frac{\lambda r}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]^{1/2}}$$

Сценарий 3 (рисунок в)

$$L_3(r) = -41,3 - 30 \log f - 30 \log r - L_{\text{fading}} + (G_{\text{BS}} + G_{\text{MS}})$$

$$L_{\text{fading}} = 10 \log \frac{\gamma_0 l_v^3 F^4(z_1, z_2)}{\lambda |\Gamma|^2 \left[\frac{\lambda r}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]}$$

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{(\Delta h)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2\Delta h} \\ h_1 > z_2, h_2 > h_1 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2(\Delta h)}, \\ h_1 < z_2, h_2 > h_1 > z_1 \end{cases}$$

l_v — когерентный масштаб шероховатости стены при диффузном отражении или рассеянии;
 $|\Gamma|$ — абсолютная величина коэффициента отражения, обычно получаемая из классических формул, зависящих от диэлектрических характеристик стен зданий

Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Модель пропускной способности канала

Общее значение спектра для закрытой абонентской группы (indoor)

$$C_{SSA_CSG_indoor_i} = B_{tN} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j + \sum_{l=1}^L I_l} \right)$$

где $B_{tN} = B_t / N$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей N , обслуживаемых FAP;
 S_{F_i} — мощность сигнала FAP в месте, где находится MS-пользователь F_i , обслуживаемый FAP с $F_i \in (1:N)$;

kTB_{tN} — тепловой шум, где k — коэффициент Больцмана, T — температура, К;
 I_j — величина помех от соседних FAPs с номерами $j \in (1:J)$,

где J — общее количество FAPs;
 I_l — величина помех MBSs с номерами $l \in (1:L)$, где L — общее количество MBSs.

Общее значение спектра для закрытой абонентской группы (outdoor)

$$C_{SSA_CSG_outdoor_i} = B_{tP} \log_2 \left(1 + \frac{S_{M_i}}{kTB_{tP} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right)$$

$B_{tP} = B_t / P$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей P , обслуживаемых MBS;
 S_{M_i} — мощность сигнала MBS в месте, где находится MS-пользователь M_i , обслуживаемый FAP с $M_i \in (1:P)$

Общее значение спектра для открытой абонентской группы (outdoor)

$$C_{SSA_OSG_outdoor_iF} = B_{tN} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right)$$

где $B_{tN} = B_t / N$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей N , обслуживаемых FAP;

S_{F_i} — мощность сигнала FAP в месте, где находится MS-пользователь F_i , обслуживаемый FAP с $F_i \in (1:N)$;

kTB_{tN} — тепловой шум,

где k — коэффициент Больцмана,

T — температура, К;

I_j — величина помех от соседних FAPs с номерами $j \in (1:J)$,

где J — общее количество FAPs;

I_l — величина помех MBSs с номерами $l \in (1:L)$,

где L — общее количество MBSs.

Значение выделенного спектра для закрытой абонентской группы (indoor)

$$C_{DSA_CSG_indoor_i} = B_{tNd} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tNd} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j} \right)$$

$B_{tP} = B_t \cdot FNR / N$ — соотношение сети FAP, определяющее часть от общего спектра B_t , распределенной для сети FAP.

FNR — соотношение сети FAP, определяющее часть от общего спектра B_t , распределенной для сети FAP

Архитектура сети с плотным расположением абонентов

Модель пропускной способности канала

Общее значение спектра для закрытой абонентской группы (indoor)

$$C_{SSA_CSG_indoor_i} = B_{tN} \log_2 \left(1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j + \sum_{l=1}^L I_l} \right)$$

где $B_{tN} = B_t / N$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей N , обслуживаемых FAP;
 S_{F_i} — мощность сигнала FAP в месте, где находится MS-пользователь F_i , обслуживаемый FAP с $F_i \in (1:N)$;
 kTB_{tN} — тепловой шум, где k — коэффициент Больцмана, T — температура, К;
 I_j — величина помех от соседних FAPs с номерами $j \in (1:J)$, где J — общее количество FAPs;
 I_l — величина помех MBSs с номерами $l \in (1:L)$, где L — общее количество MBSs.

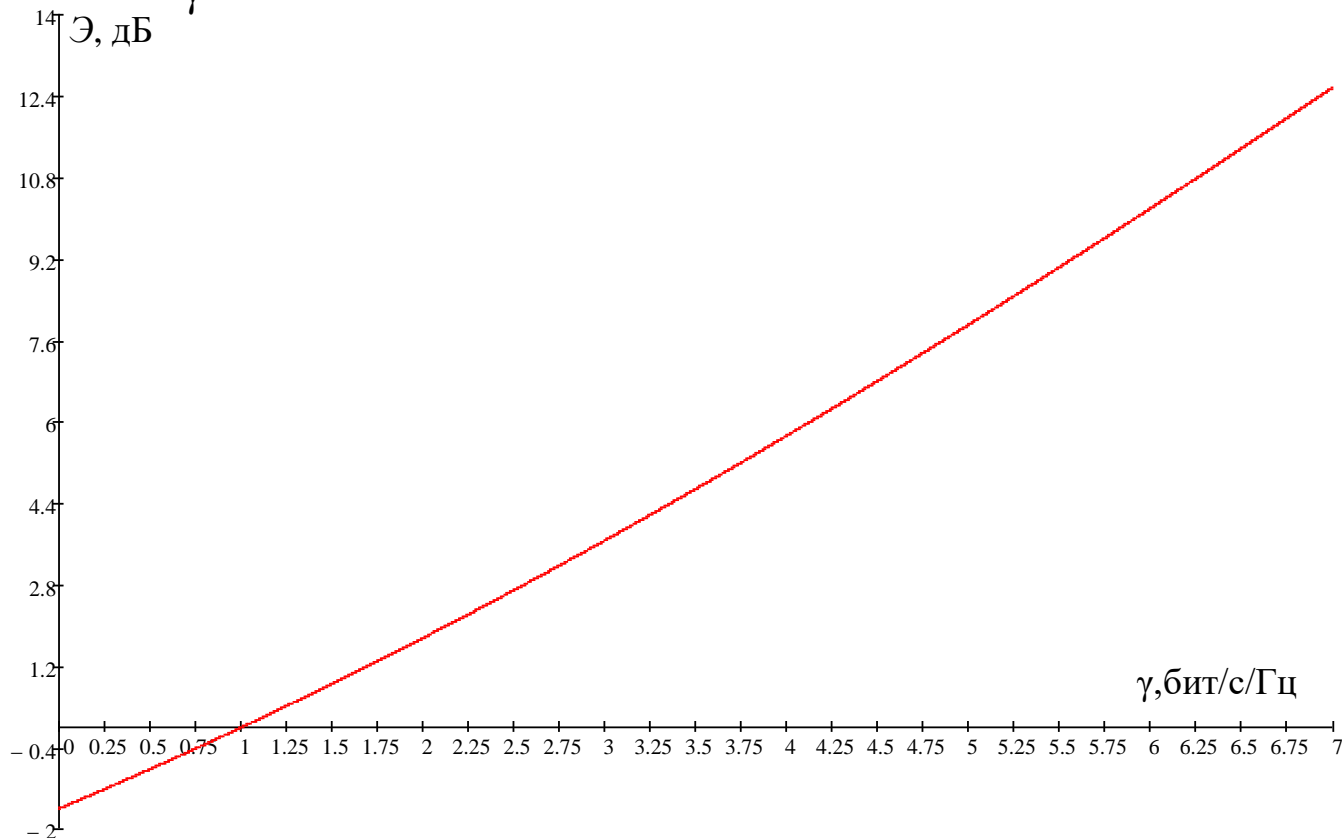
Общее значение спектра для закрытой абонентской группы (outdoor)

$$C_{SSA_CSG_outdoor_i} = B_{tP} \log_2 \left(1 + \frac{S_{M_i}}{kTB_{tP} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right)$$

$B_{tP} = B_t / P$ — полоса пропускания, приведенная к числу пользователей P , обслуживаемых MBS;
 S_{M_i} — мощность сигнала MBS в месте, где находится MS-пользователь M_i , обслуживаемый FAP с $M_i \in (1:P)$

$$\gamma = \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ui}} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P_c T}{P_{ui} T} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{P_c T}{N_0 W T} \right) = \log_2 (1 + \mathcal{E} \cdot \gamma)$$

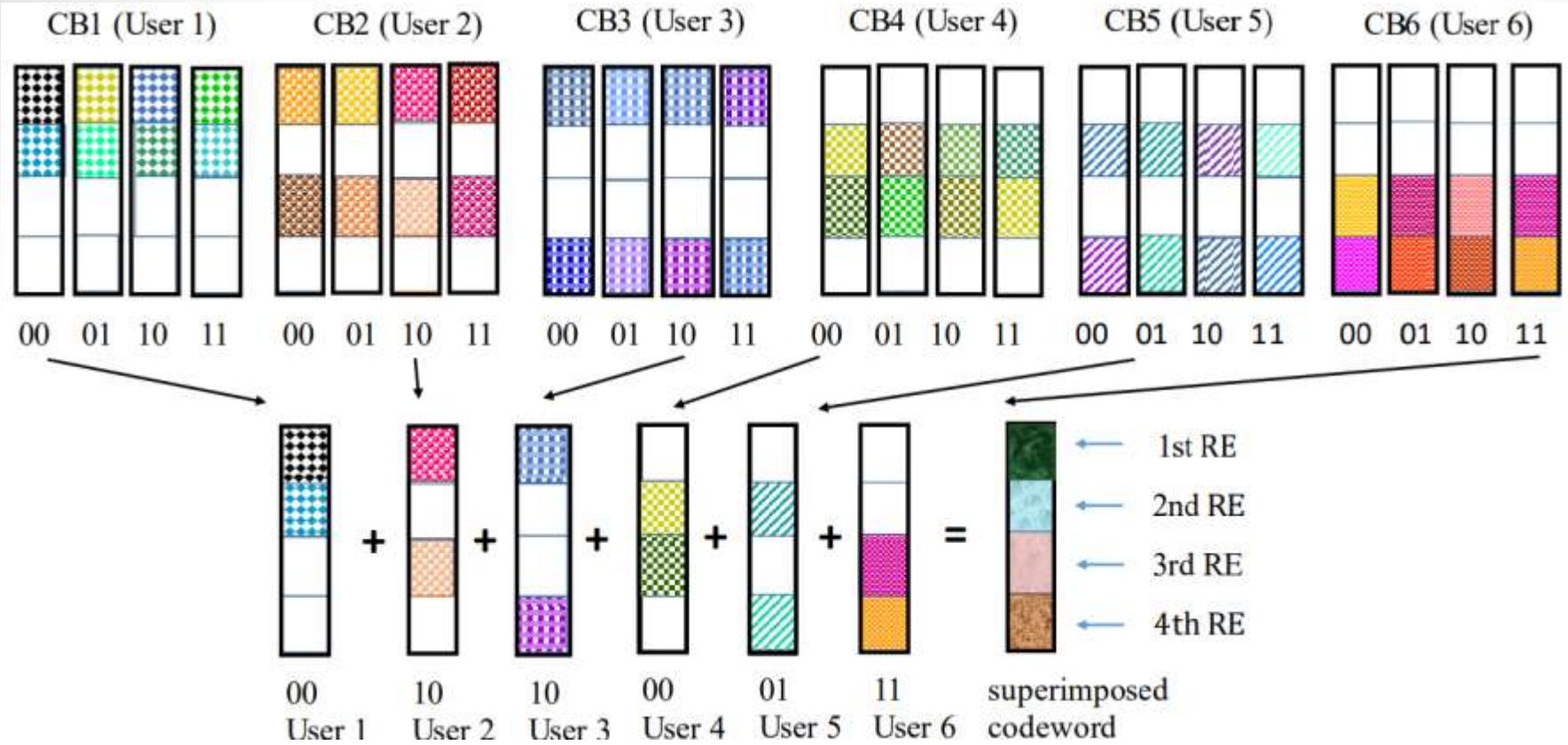
$$1 + \mathcal{E} \cdot \gamma = 2^\gamma \Rightarrow \mathcal{E} = \frac{2^\gamma - 1}{\gamma}$$



Зависимость энергетической эффективности от удельной скорости

Новые технологии в сверх-плотных сетях

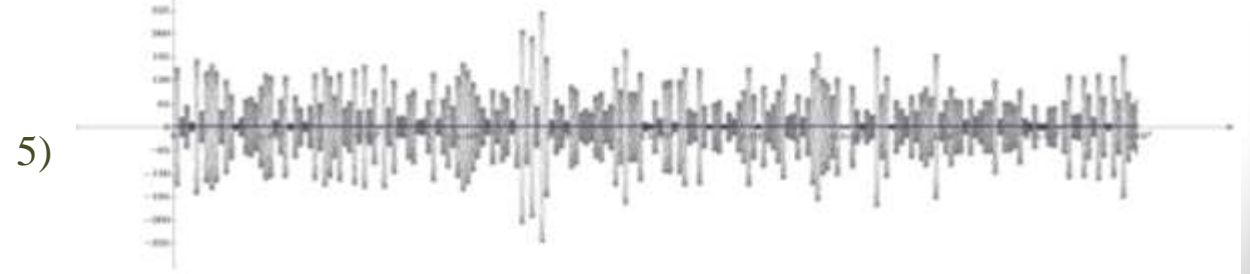
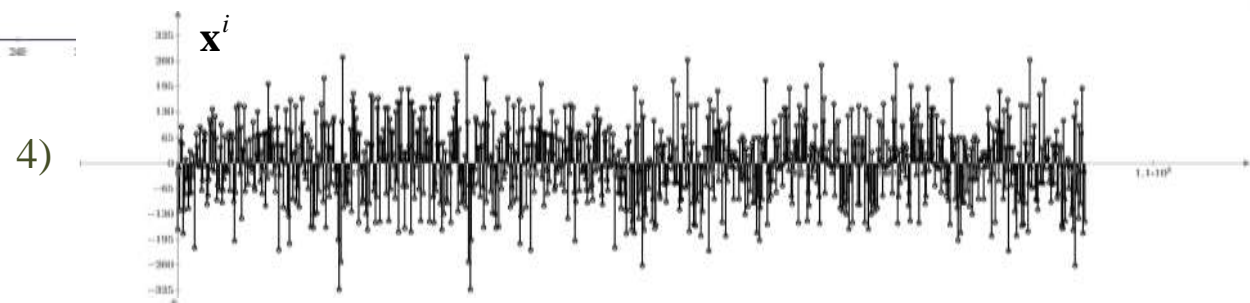
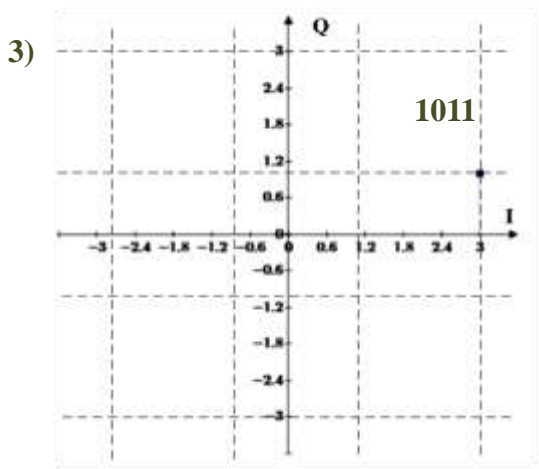
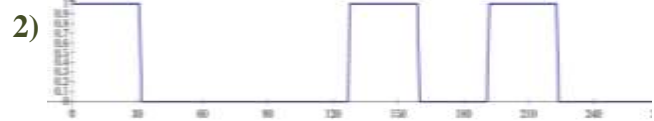
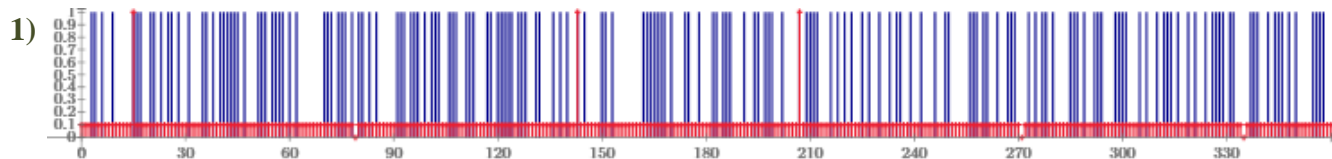
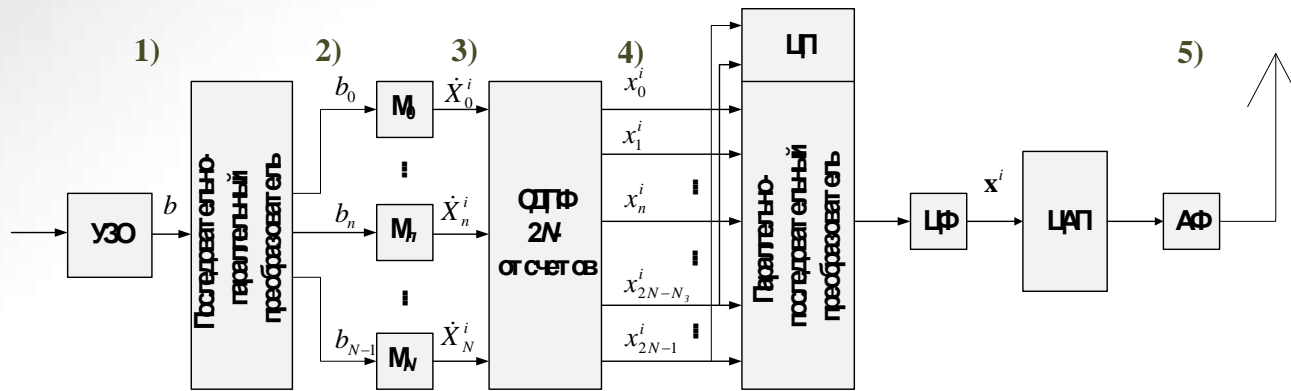
Множественный доступ с разреженным кодом (SCMA)



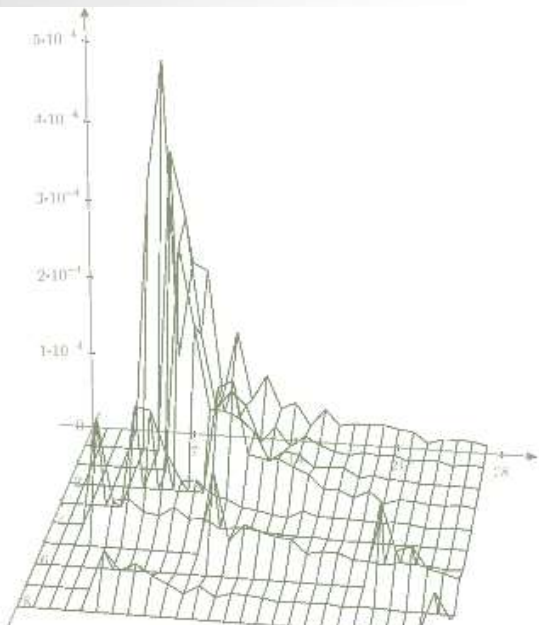
Множественный доступ с разреженным кодом (SCMA) – технология, посредством которой потоки двоичных данных кодируются напрямую в многомерные кодовые слова. Эффективность SCMA зависит от вида кодовых книг (CBN), которые построены на формирующих разреженных матрицах. Кодовые слова одной кодовой книги содержат нулевые элементы в одних и тех же позициях, но эти позиции различны для разных книг, что позволяет избежать коллизии при одновременной передаче данных несколькими абонентами

Новые технологии в сверхплотных сетях

Технология OFDM (передающая часть оборудования)



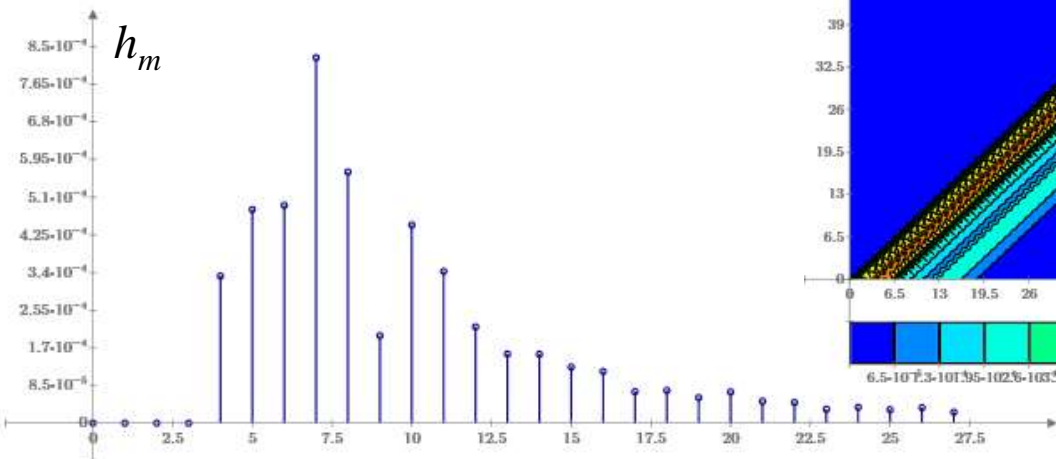
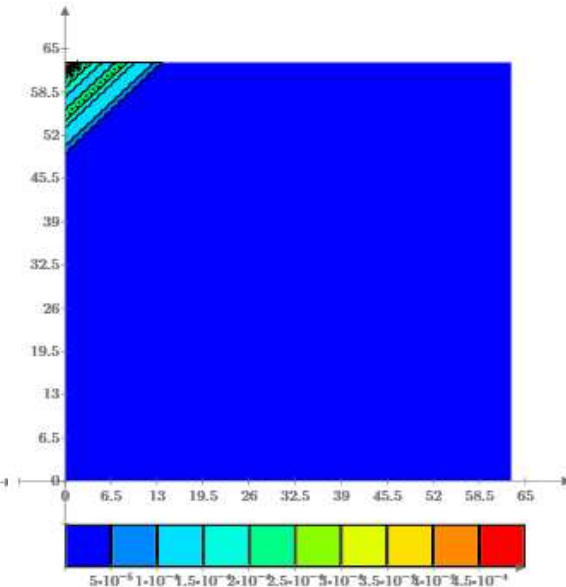
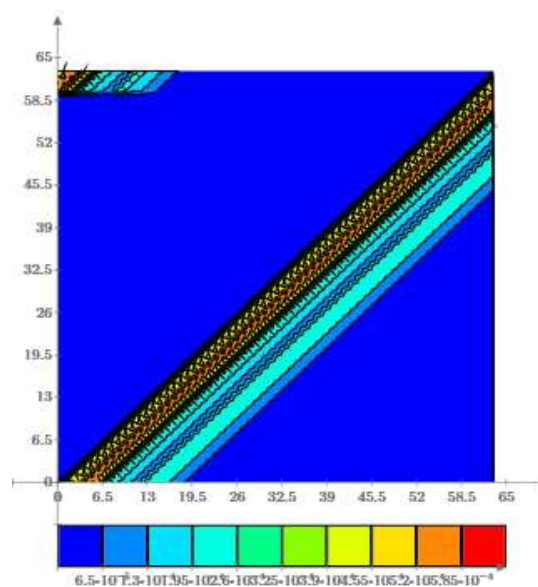
Технология OFDM (импульсная характеристика (ИХ) радиоканала)



$$\tilde{\mathbf{H}}_0 = \begin{bmatrix} h_0 & \dots & 0 & h_{N_3} & \dots & h_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & h_{M-1} & & h_{N_3} \\ h_{M-1} & & h_0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & & 0 & \ddots & \ddots & h_{M-1} \\ 0 & \ddots & & h_0 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_{M-1} & \dots & h_0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & h_{M-1} & \dots & h_{N_3+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & & h_{M-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

ИХ при многолучевом распространении



Результирующая ИХ (сумма ИХ рисунка выше)

Технология OFDM (формирование канала с циклической сверткой)

$$y^i = \sum_{m=0}^M h^m x^{i-m} + n^i = h^m * x^i + n^i \quad \mathbf{x}^i = [x_0^i, \dots, x_{N-1}^i]^T$$

$$\mathbf{y}_{N_0}^i = \mathbf{H}\mathbf{x}^i + \mathbf{n}_{N_0}^i$$

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{H}_0\mathbf{x}^i + \mathbf{H}_1\mathbf{x}^{i-1} + \mathbf{n}^i$$

$$\begin{bmatrix} y_0^i \\ \vdots \\ y_{N-1}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{M-1} & \dots & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_{M-1} & \dots & h_0 & \ddots & \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & h_{M-1} & \dots & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{-N_3}^i \\ \vdots \\ x_{N-1}^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0^i \\ \vdots \\ n_{N-1}^i \end{bmatrix} = \mathbf{H}_T \mathbf{x}_{-N_3:N-1}^i + \mathbf{n}^i$$

$$\mathbf{x}_{N_0} = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad \mathbf{y}_{N_0+M-1}^i = \mathbf{H}\mathbf{x}_{N_0}^i + \mathbf{n}_{N_0+M-1}^i \quad \mathbf{y}_N = \mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T \mathbf{y}_{N_0+M}$$

$$\mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(N_3-1)N} & \mathbf{I}_N & \mathbf{0}_{(M-1)N} \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N_3 \times (N-N_3)} & \mathbf{I}_{N_3} \\ \mathbf{I}_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}_N = \mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{M} \mathbf{x}^i + \mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{M} \mathbf{x}^{i-1} + \mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T \mathbf{n}_{N_0+M-1}^i = \mathbf{H}_{\Pi} \mathbf{x}^i + \mathbf{0}_{N \times N} \mathbf{x}^{i-1} + \mathbf{n}^i$$

Технология OFDM (формирование канала с циклической сверткой)

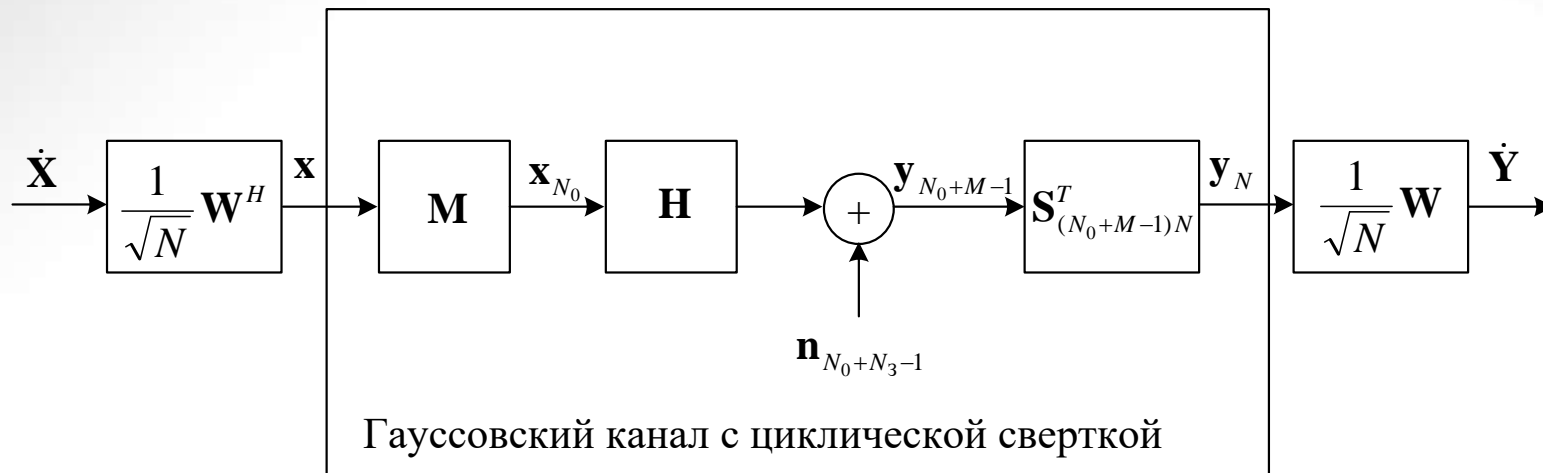
$$\mathbf{H}_{\text{Ц}} = \mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T \mathbf{H}_0 \mathbf{M} = \begin{bmatrix} h_0 & & h_M & \dots & h_1 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ h_M & & \ddots & & h_{M-1} \\ & \ddots & & \ddots & \vdots \\ & & h_M & \dots & h_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{0}_{N \times N} = \mathbf{S}_{(N_0+M-1)N}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{M} \mathbf{x}^{i-1}$$

$$\mathbf{H}_{\text{Ц}} = \frac{1}{N} \mathbf{W}^H \dot{\Lambda} \mathbf{W} \quad \dot{\Lambda} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{W} \mathbf{H}_{\text{Ц}} \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{W}^H = \text{diag}\{\dot{\lambda}_0 \dots \dot{\lambda}_{N-1}\}$$

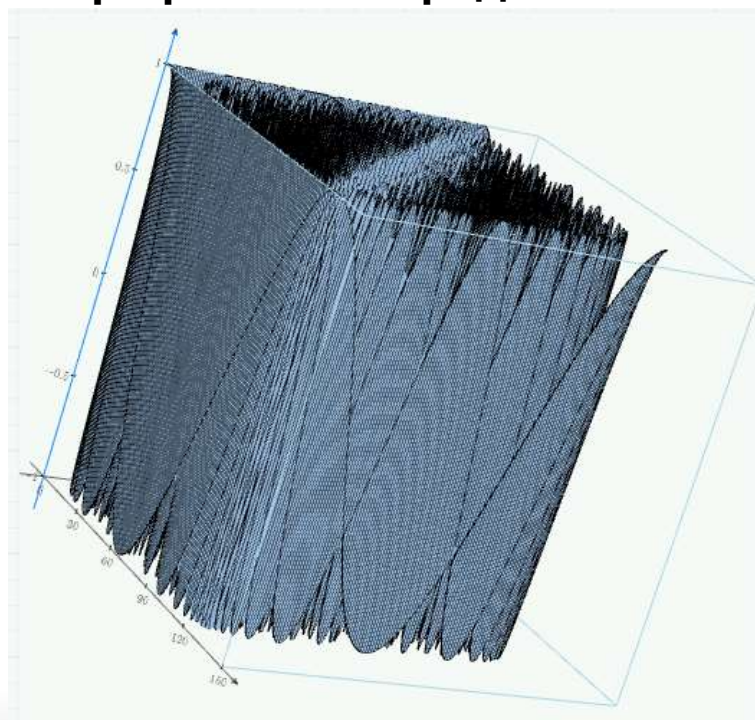
$$\mathbf{x} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{W}^H \dot{\mathbf{X}} \quad \mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{W}^H \dot{\mathbf{N}}$$

$$\dot{\mathbf{Y}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{W} \mathbf{y}_N = \dot{\Lambda} \dot{\mathbf{X}} + \dot{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dot{\lambda}_{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X}_0 \\ \vdots \\ \dot{X}_{N-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{N}_0 \\ \vdots \\ \dot{N}_{N-1} \end{bmatrix}$$

Технология OFDM (формирование канала с циклической сверткой)

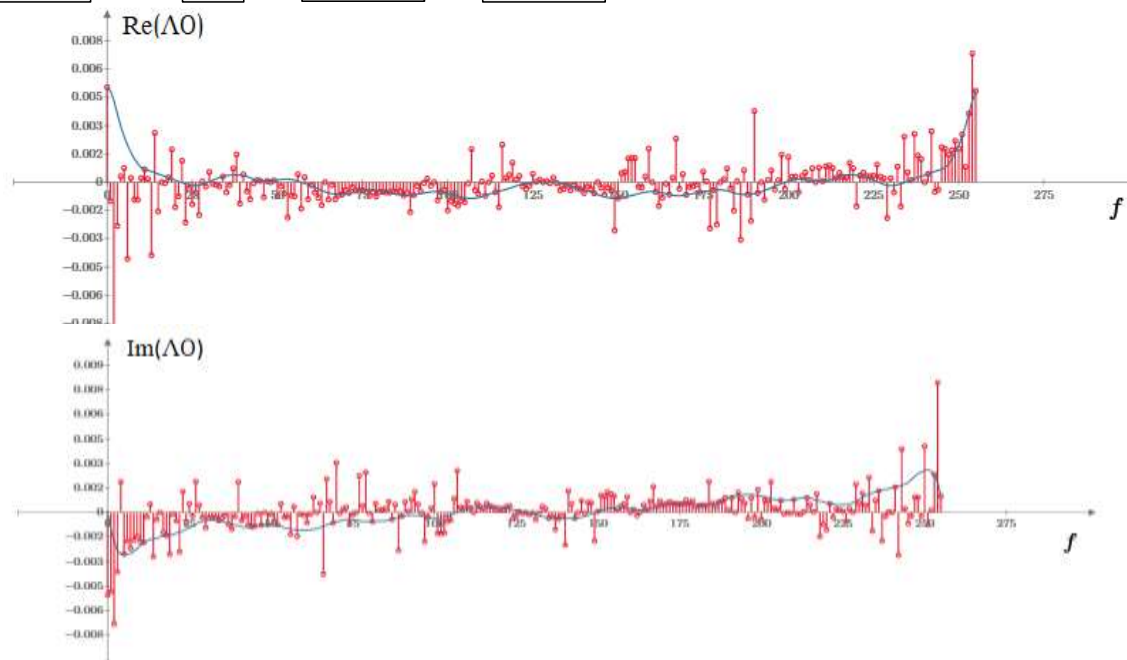
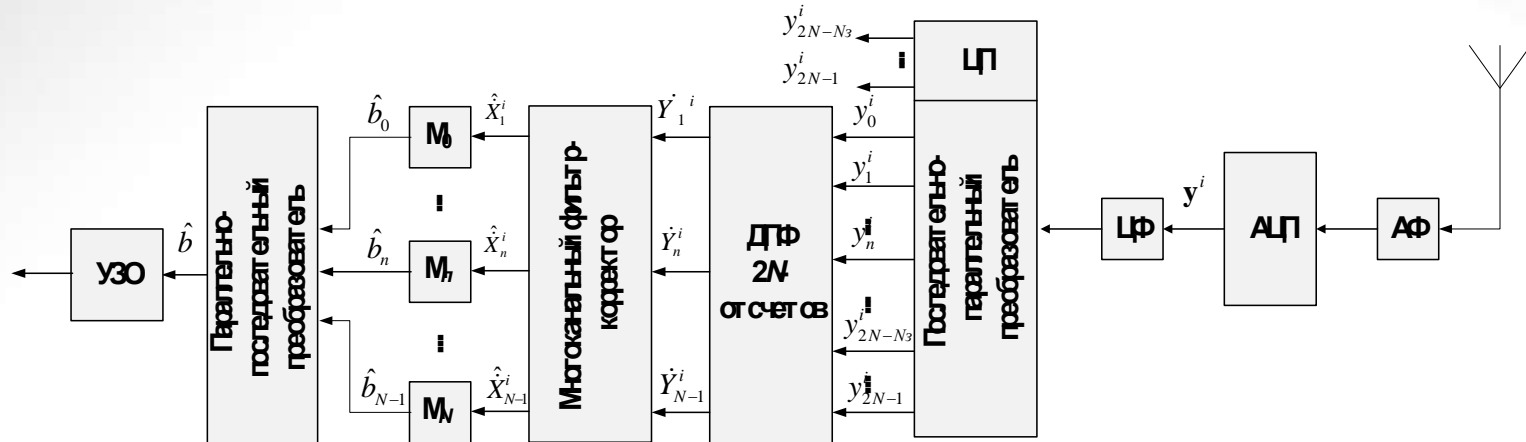


Графическое представление матрицы БПФ (Re(W))



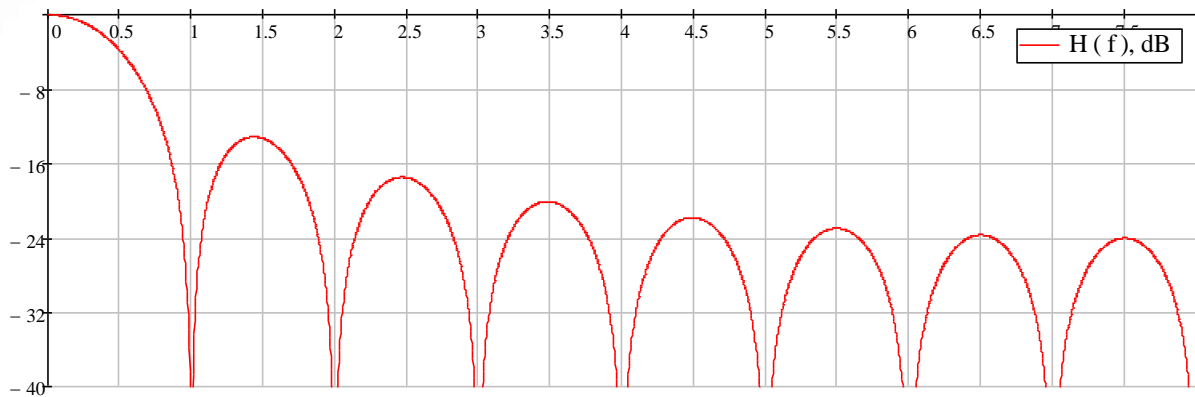
Новые технологии в сверхплотных сетях

Технология OFDM (передающая часть оборудования)

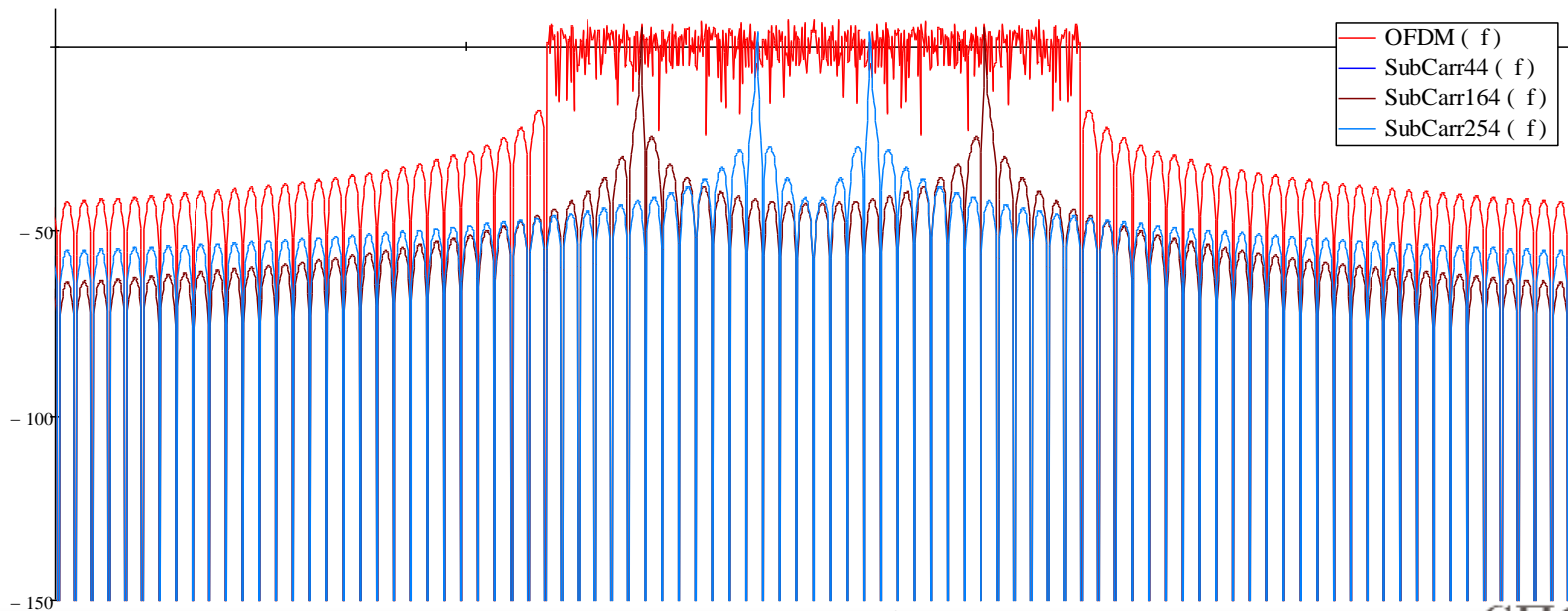


Синим цветом обозначен передаточная функция радиоканала (для синфазной составляющей- Re , для квадратурной составляющей сигнала- Im), красным цветом – оценка канала на приемной стороне

$$g(iT_s) = \begin{cases} g(0), & i = 0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases} \quad \sum_{n=-\infty}^{\infty} H\left(f + \frac{n}{T_s}\right) = g(0)T_s$$

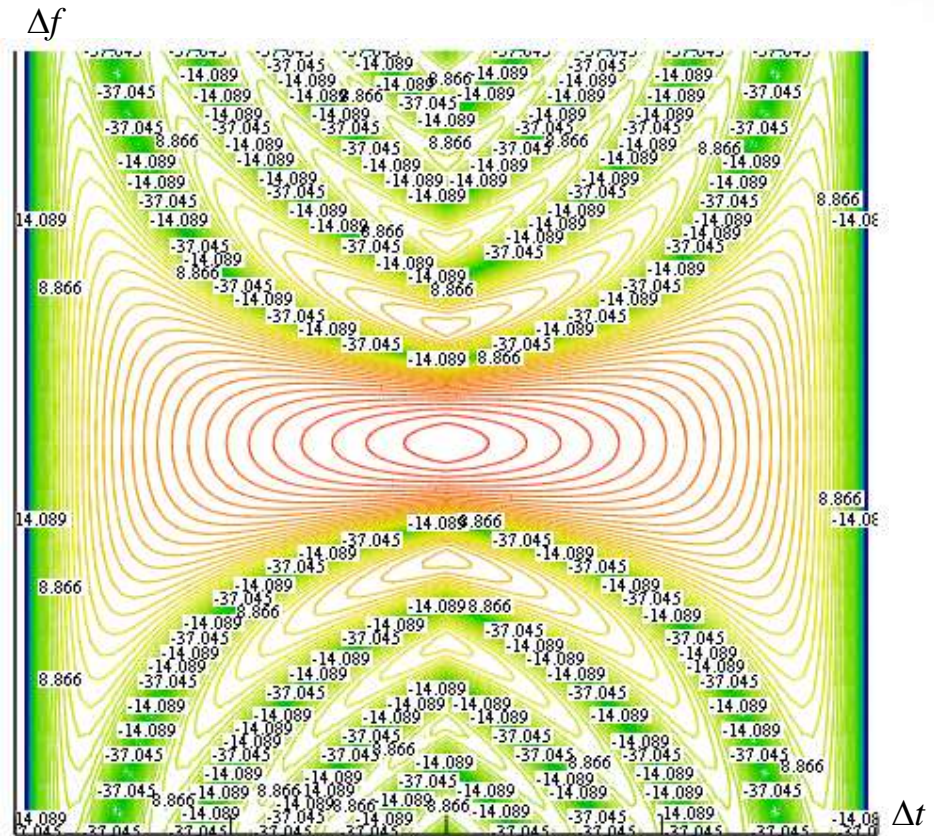
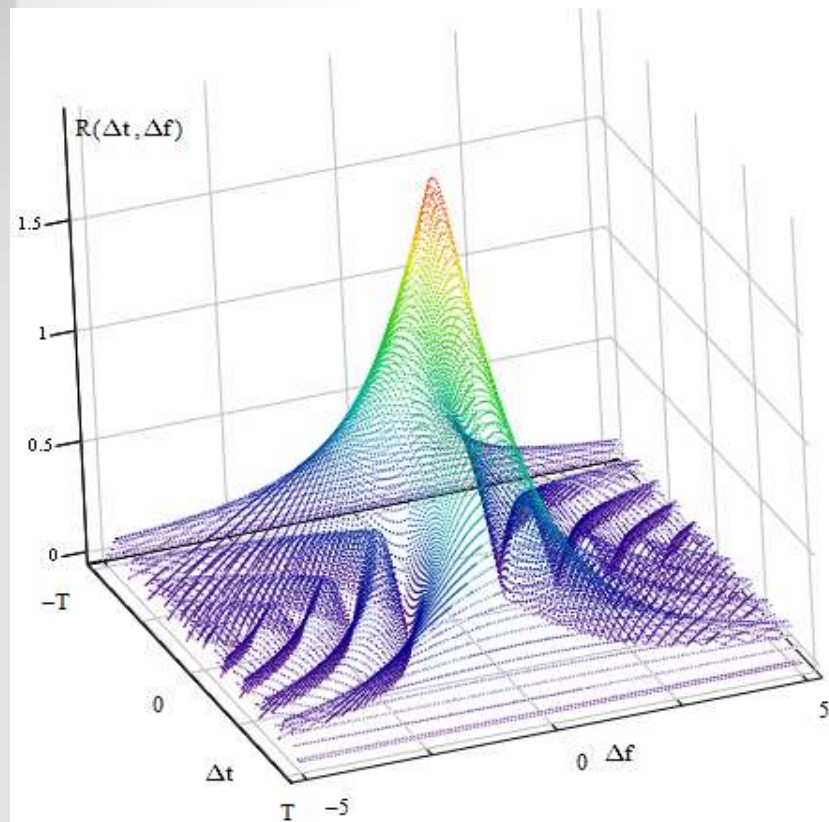


Спектр одиночного прямоугольного импульса

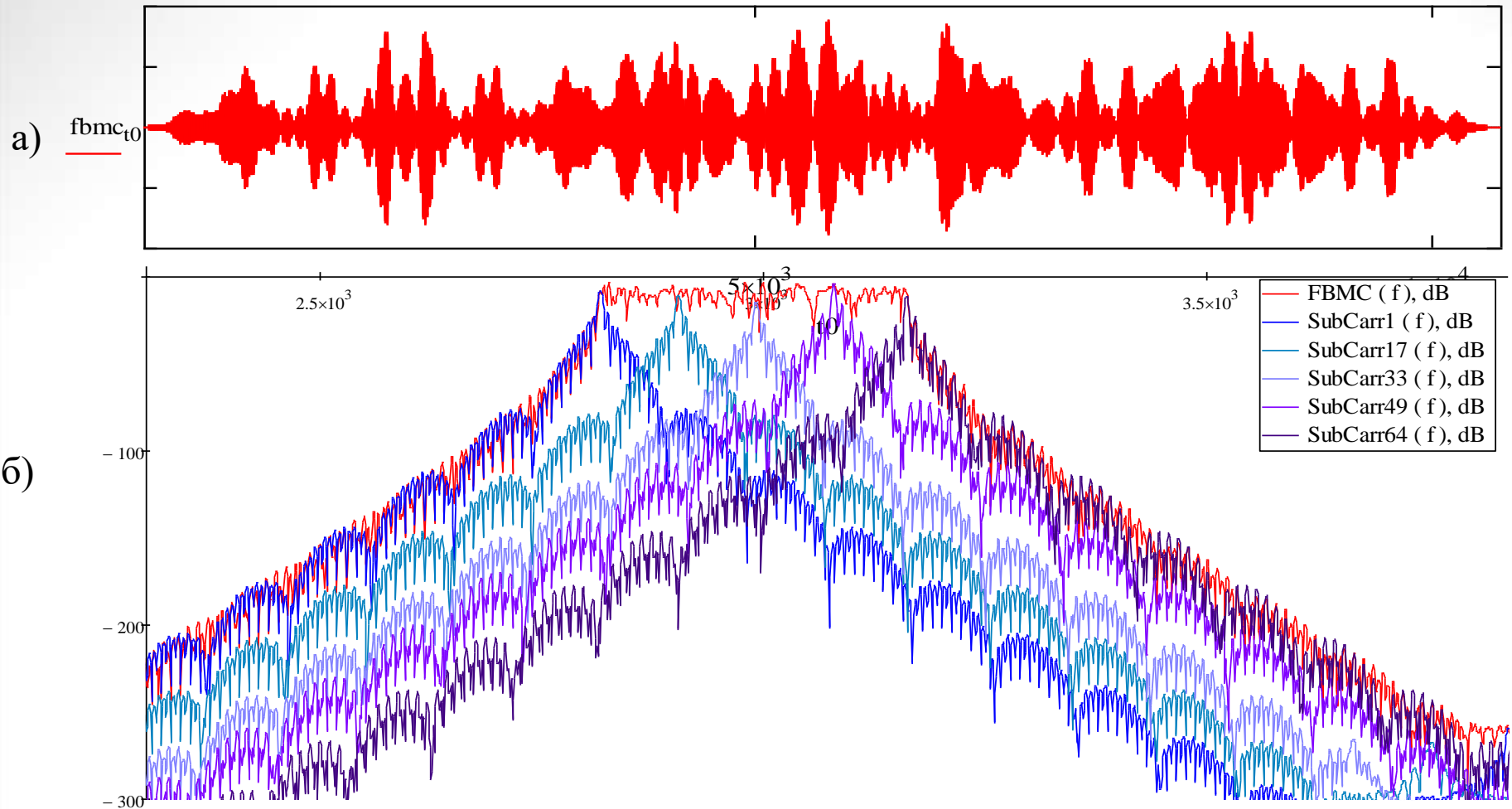


Амплитудный спектр сигнала OFDM и поднесущих

Технология OFDM (Ортогональность и частотно-временная локализация)

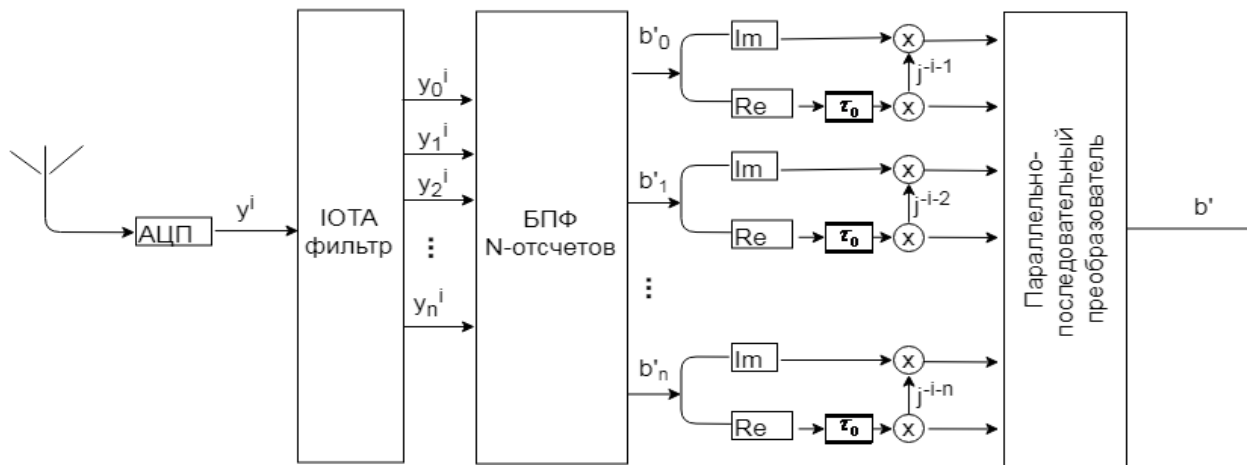
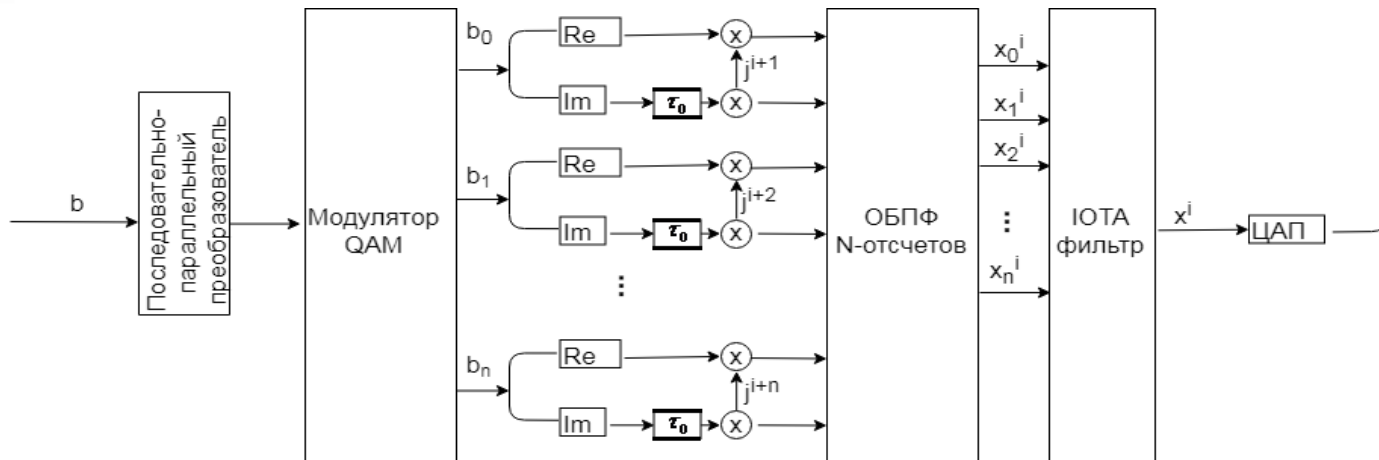


Рельеф тела неопределенности прямоугольного импульса его контурный график в логарифмическом масштабе



а) сигнал FBMC; б) амплитудный спектр сигнала FBMC и поднесущих

$$s(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} j^n \left(X_{c,n}^i \cdot g(t - i \cdot T_s) + jX_{s,n}^i \cdot g(t - i \cdot T_s + T_s / 2) \right) \cdot \exp(j2\pi \cdot n \cdot \Delta f \cdot t)$$



Структурная схема системы FBMC/OQAM

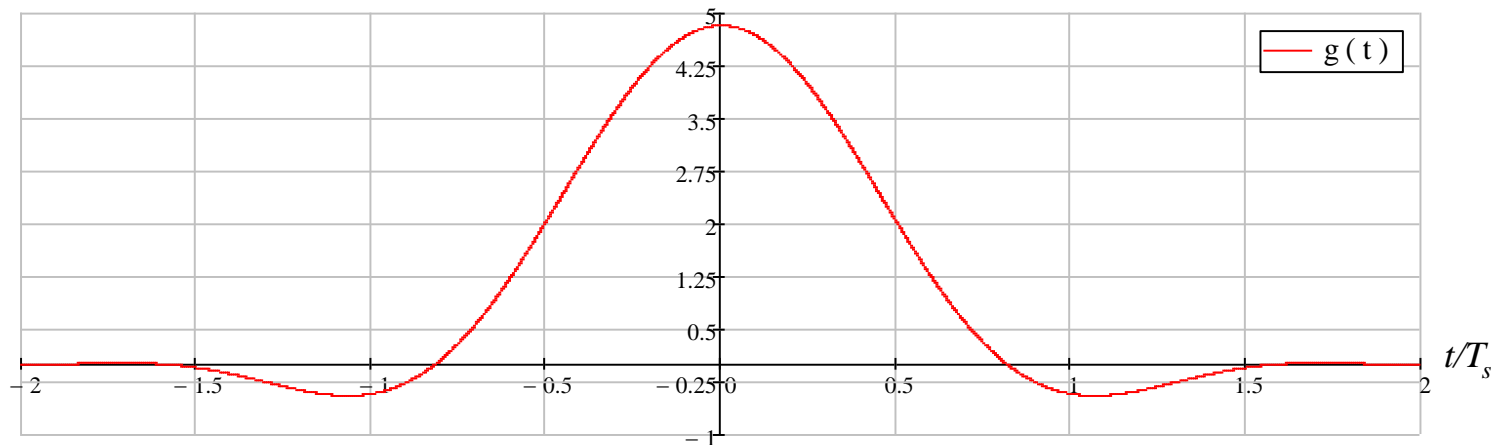
Новые технологии в сверхплотных сетях

Технология FBMC/OQAM (Фильтр-прототип PHYDYAS)

$$g(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k \cdot \cos\left(2\pi \frac{k \cdot t}{K \cdot T_s}\right)$$

Таблица 1. Весовые коэффициенты

K	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4
$K=3$	1	-0,91143783	0,41143783	-	-
$K=4$	1	-0,97195983	0,70710678	-0,23514695	-
$K=5$	1	-0,991814131	0,86541624	-0,50105361	0,12747868

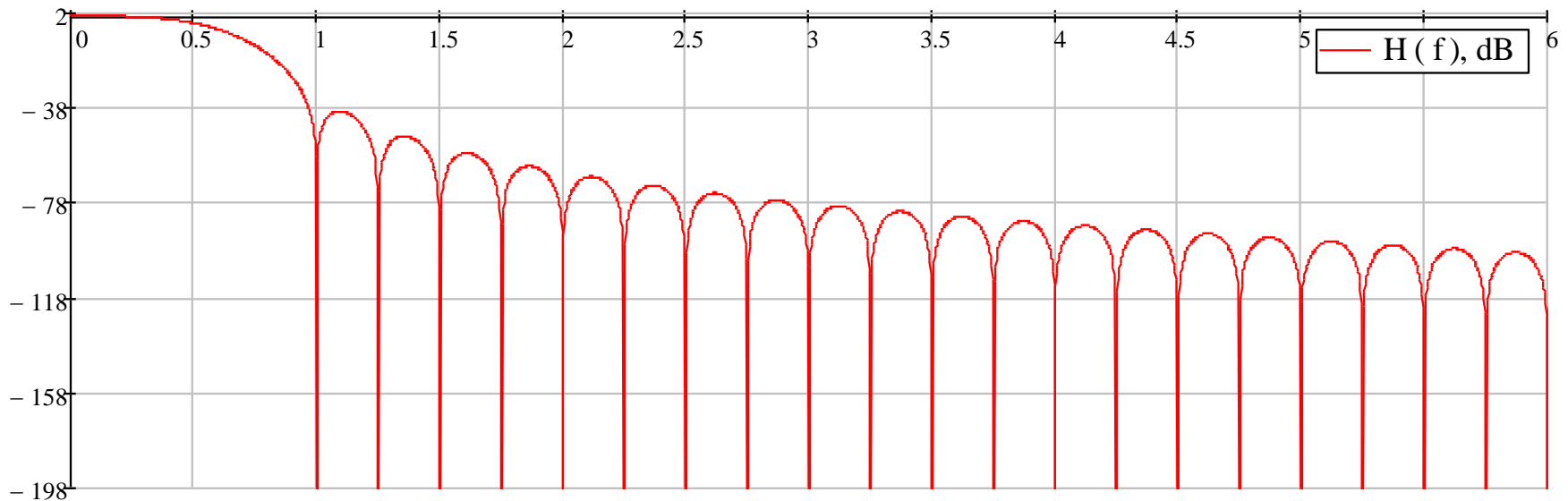


Импульсная характеристика PHYDYAS фильтра

Новые технологии в сверхплотных сетях

Технология FBMC/OQAM (Фильтр-прототип PHYDYAS)

$$H(f) = \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} H_k \cdot \frac{\sin\left(\pi \cdot \left(f - \frac{k}{N \cdot K}\right) N \cdot K\right)}{N \cdot K \cdot \sin\left(\pi \cdot \left(f - \frac{k}{N \cdot K}\right)\right)}$$

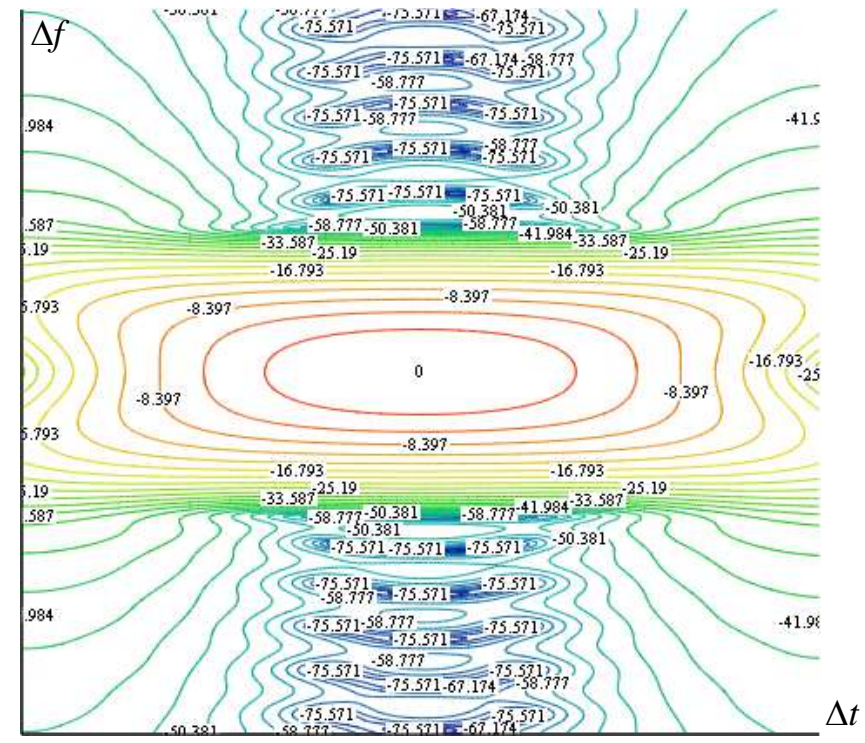
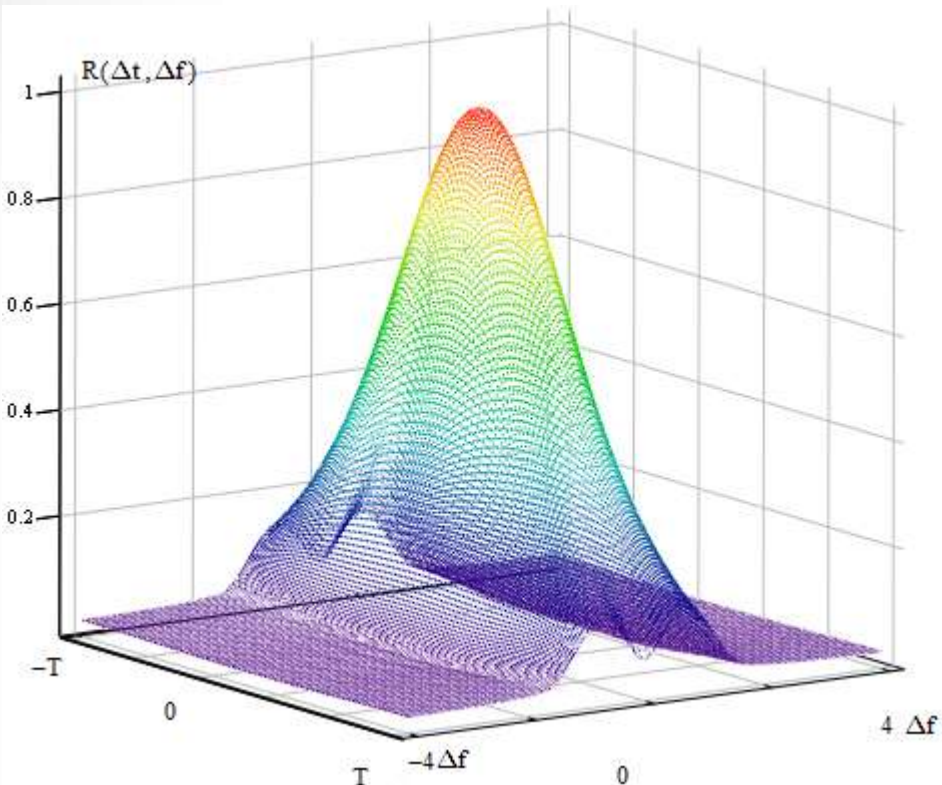


Нормированная спектральная функция, формируемая фильтром PHYDYAS

Новые технологии в сверхплотных сетях

Технология FBMC/OQAM (Фильтр-прототип PHYDYAS)

Ортогональность и частотно-временная локализация

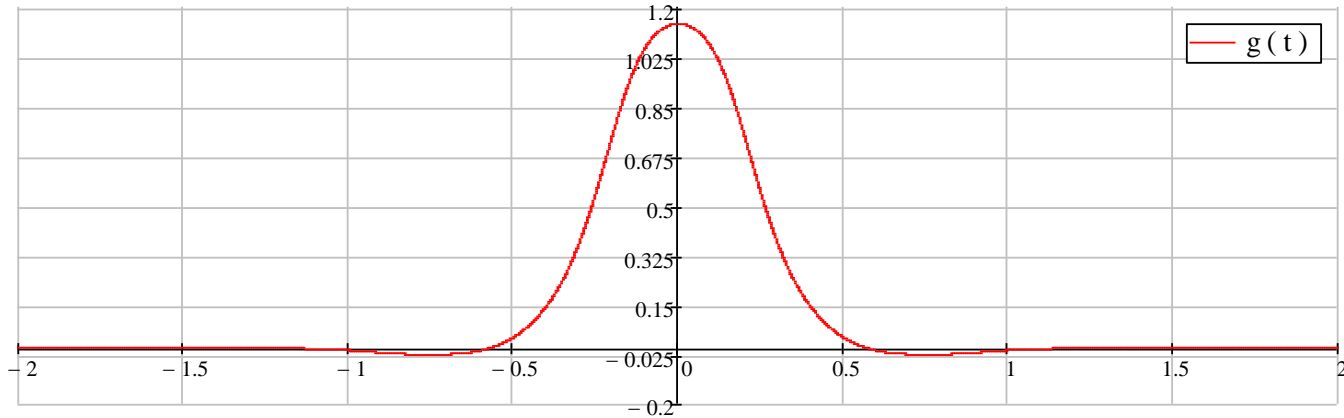


Тело неопределенности функции Phydyaas и его контурный график в логарифмическом масштабе

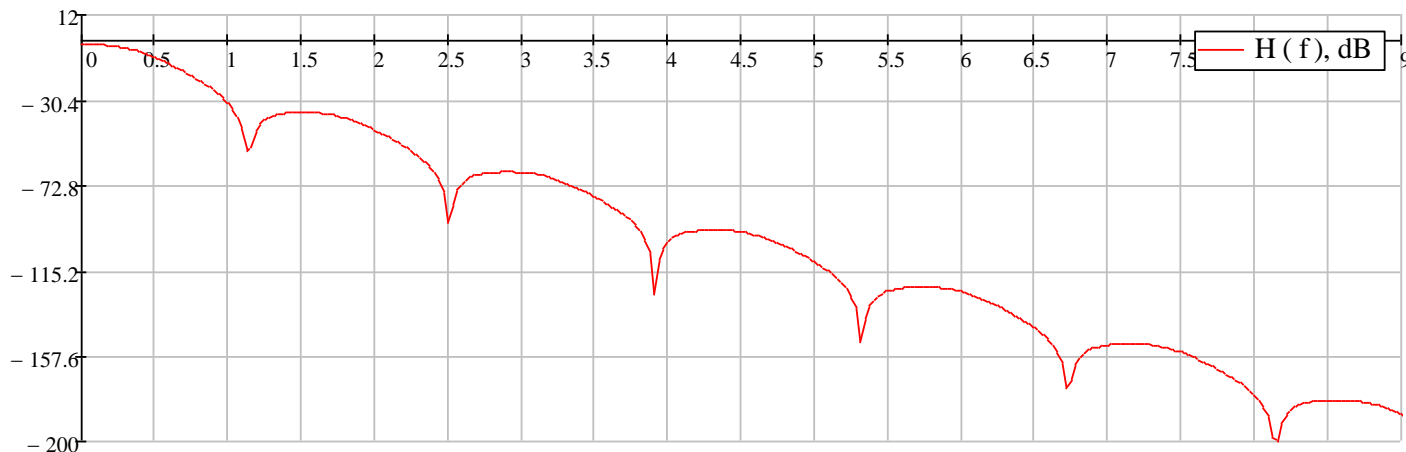
Новые технологии в сверхплотных сетях

Технология FBMC/OQAM (Фильтр-прототип ЮТА)

$$\mathfrak{S}(t) = \frac{1}{2^{5/4}} \left[\sum_{i=0}^{K_s} \overline{d_k} \left[G_{auss} \left(\frac{t}{\tau_0 \sqrt{2}} + j\sqrt{2} \right) + G_{auss} \left(\frac{t}{\tau_0 \sqrt{2}} - j\sqrt{2} \right) \right] \right] \cdot \sum_{i=0}^{K_s} \overline{d_l} \cos \left(\frac{2\sqrt{2}\pi j t}{\tau_0 \sqrt{2}} \right)$$



Импульсная характеристика ЮТА фильтра

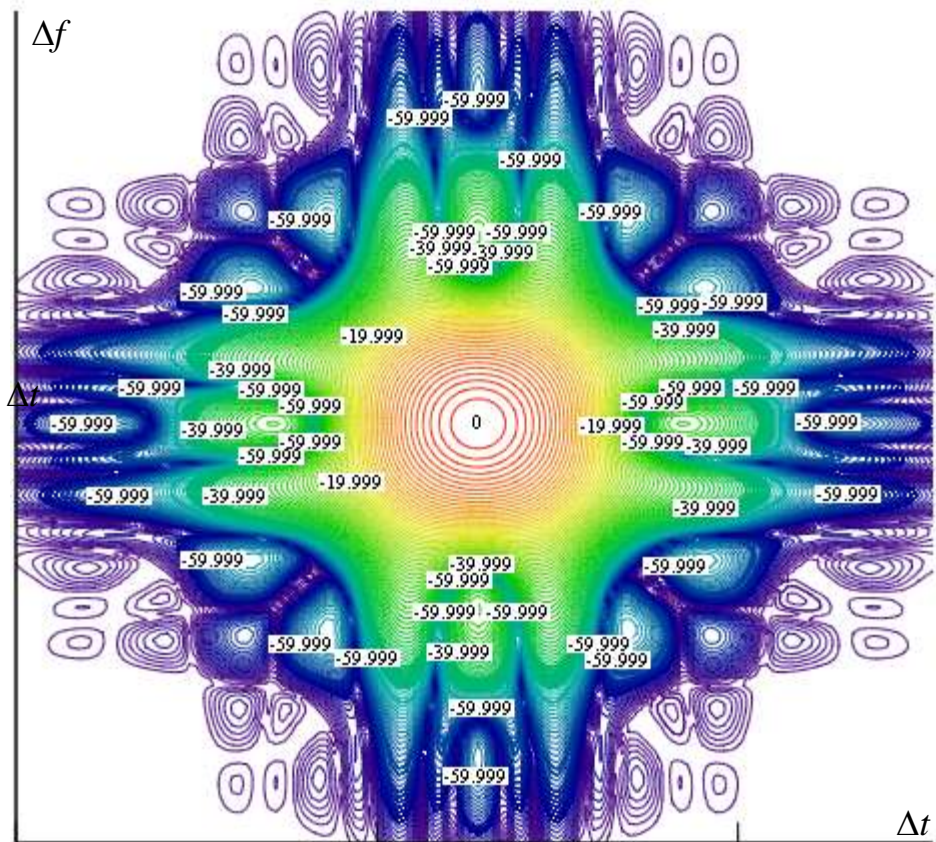
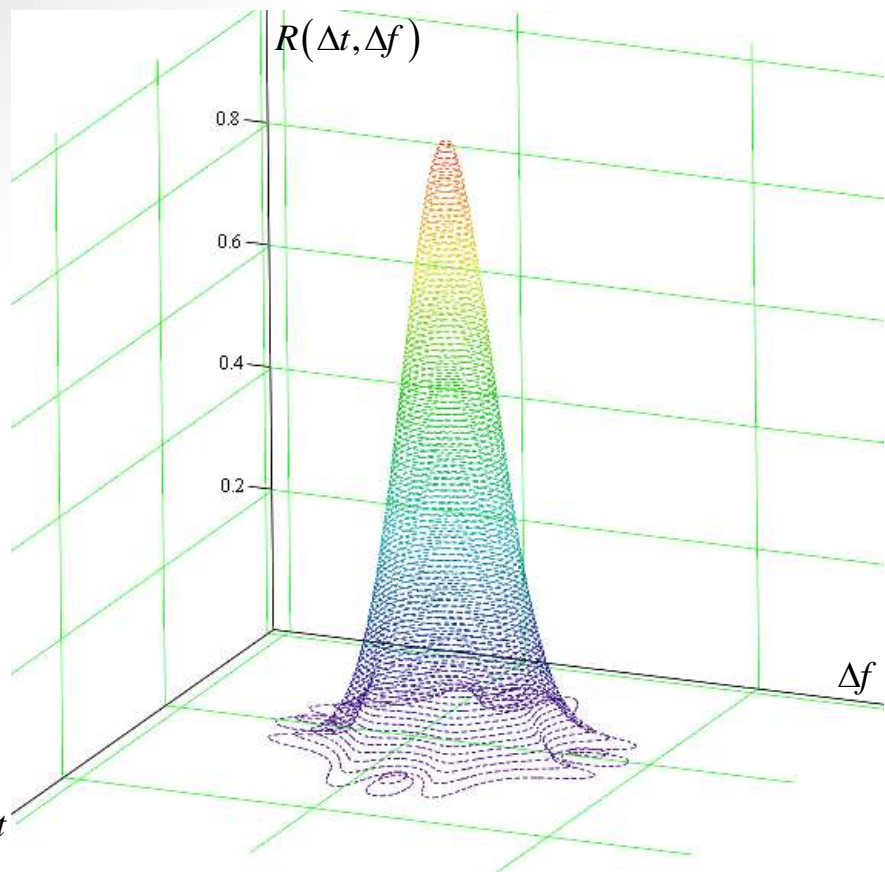


Нормированная спектральная функция, формируемая фильтром ЮТА

Новые технологии в сверхплотных сетях

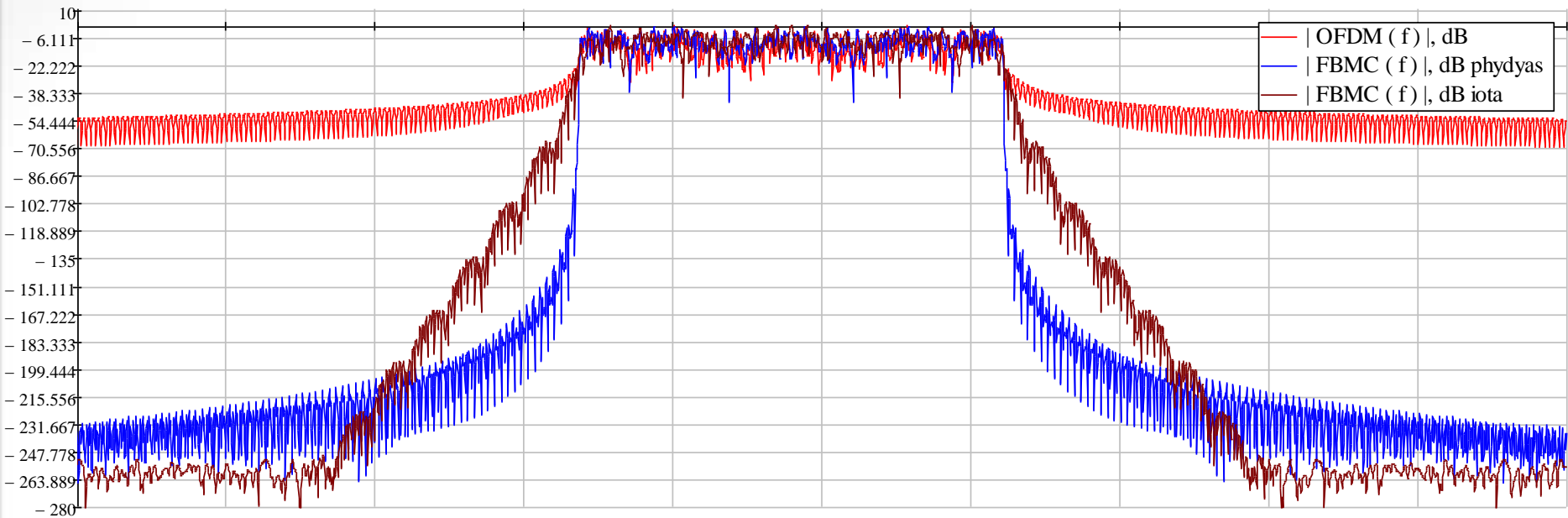
Технология FBMC/OQAM (Фильтр-прототип ЮТА)

Ортогональность и частотно-временная локализация



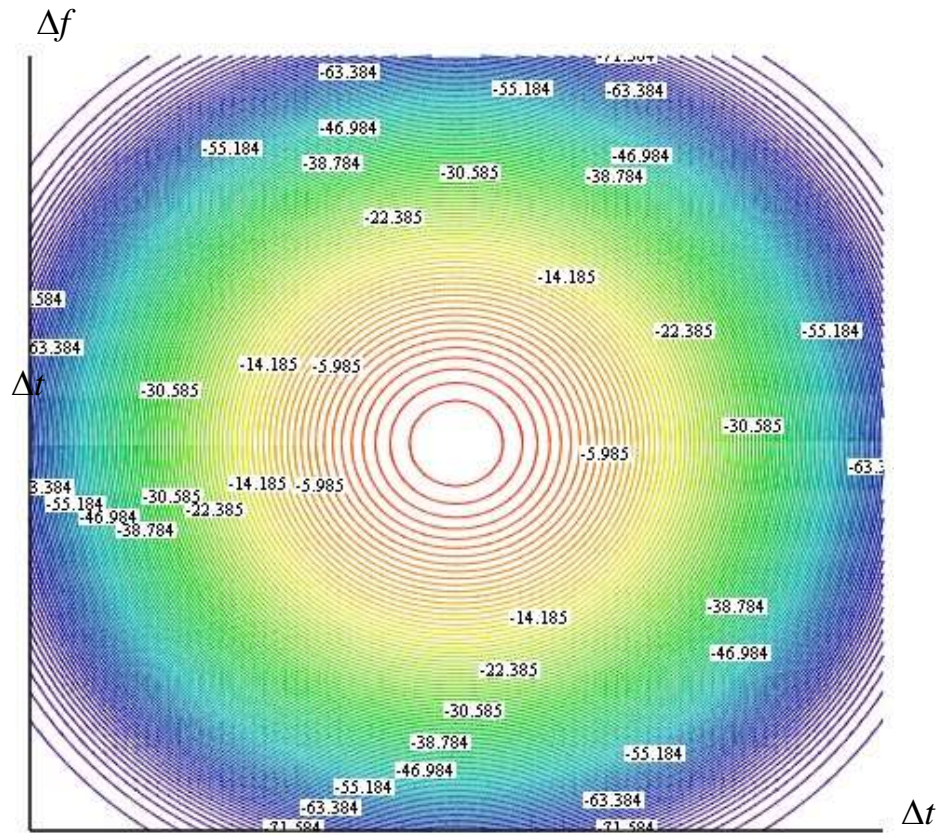
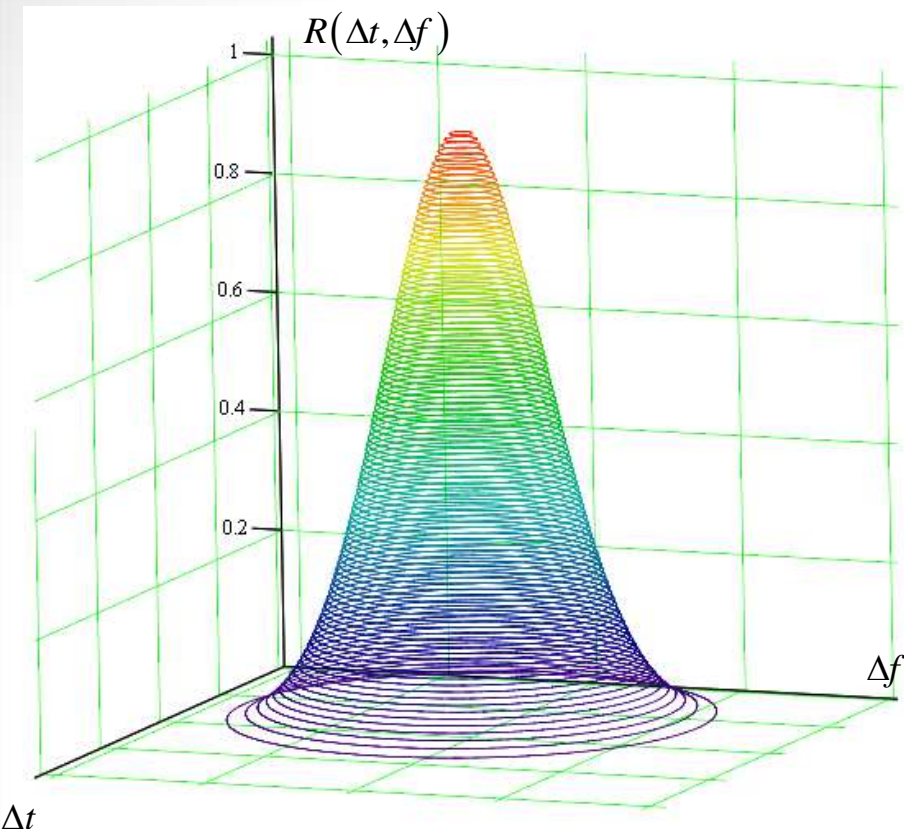
Рельеф тела неопределенности функции ЮТА его контурный график в логарифмическом масштабе

Сравнение оконных функций



Спектры сигналов OFDM и FBMC

Ортогональность и частотно-временная локализация



Рельеф тела неопределенности импульса на выходе фильтра Дольфа-Чебышева

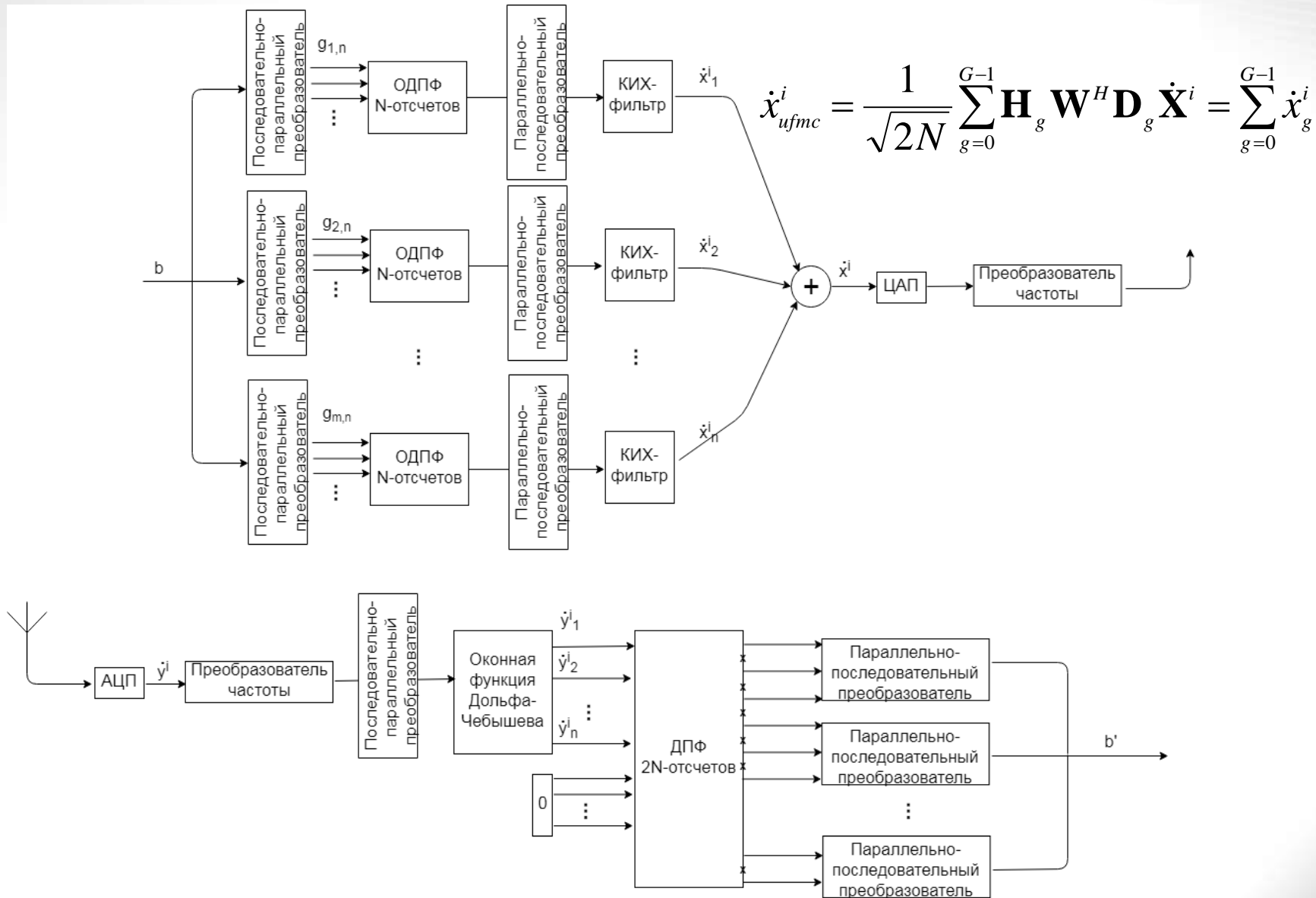
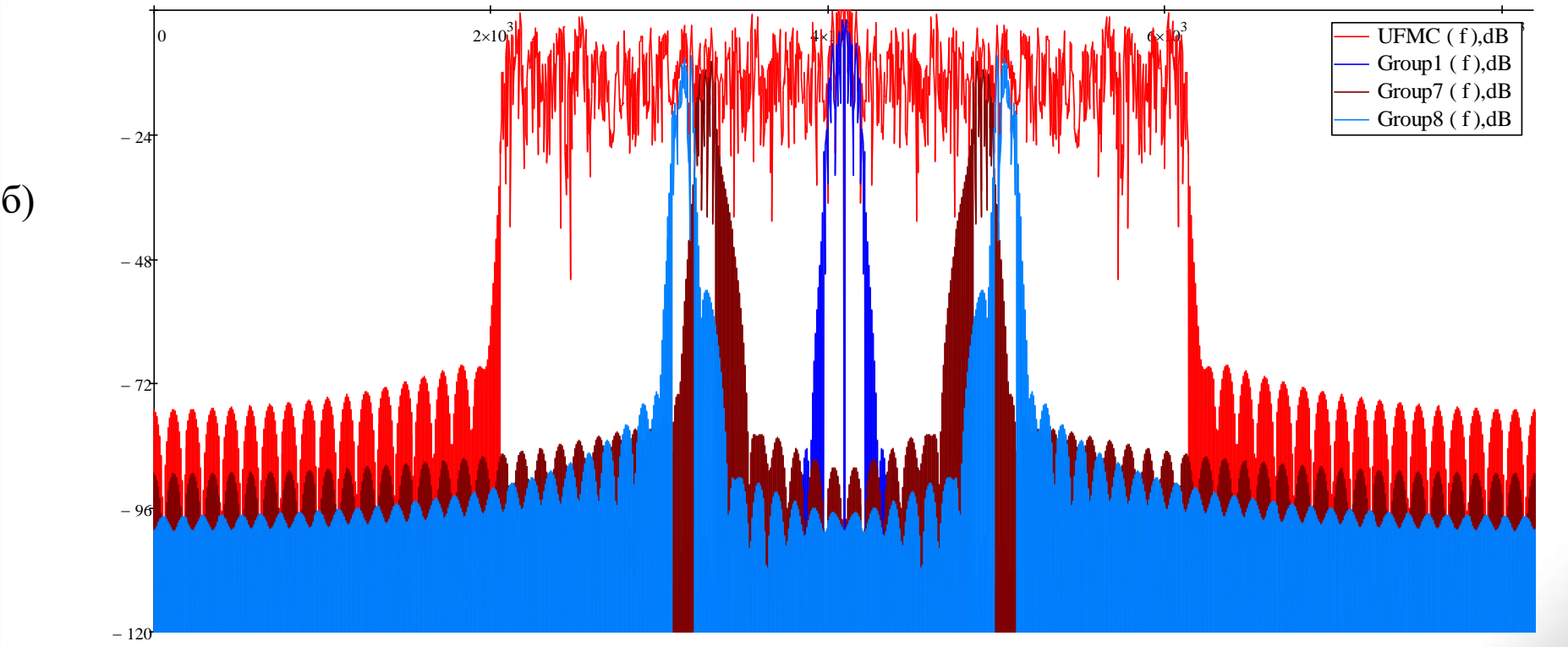
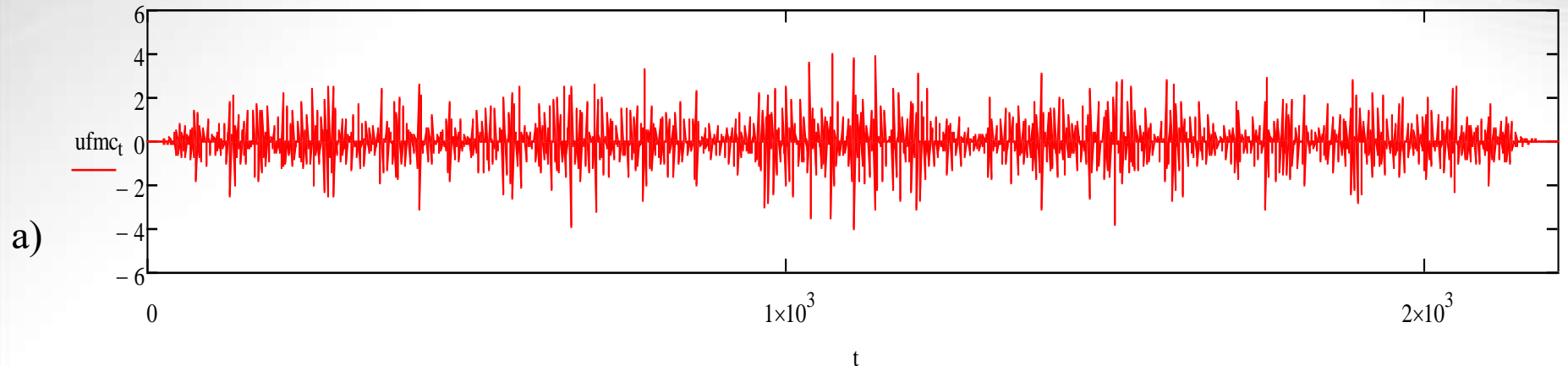


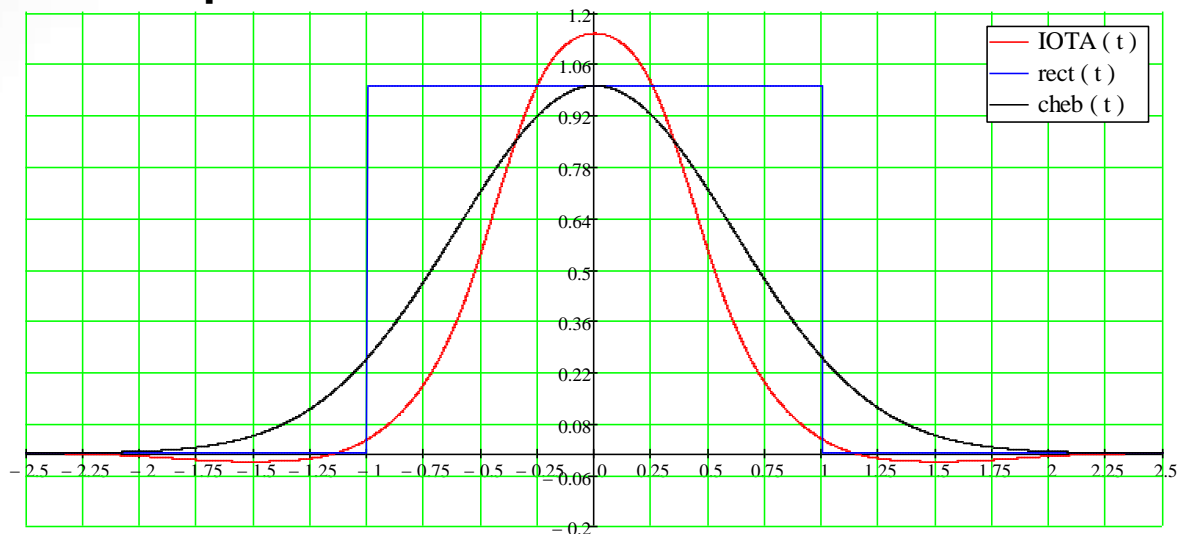
Рисунок 11 – Структурная схема системы UFMC



а) сигнал UFMC ; б) амплитудный спектр сигнала UFMC и подгрупп

Сравнительный анализ технологий

а)



б)

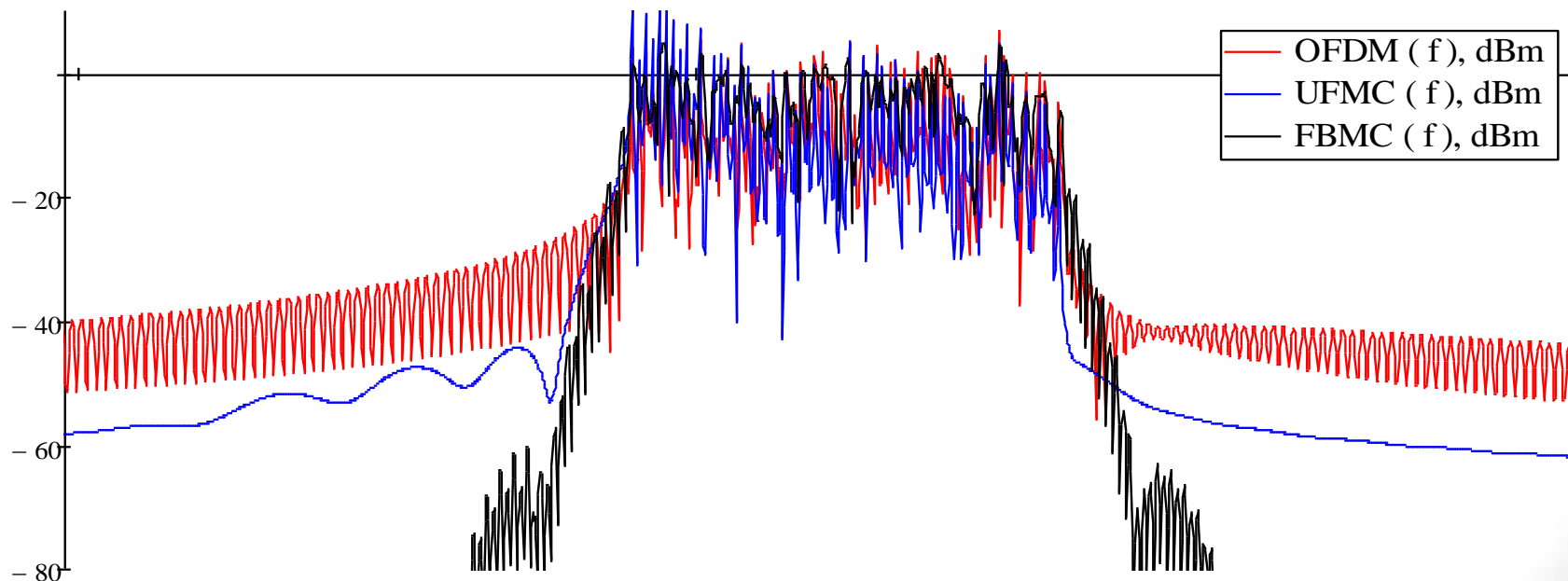
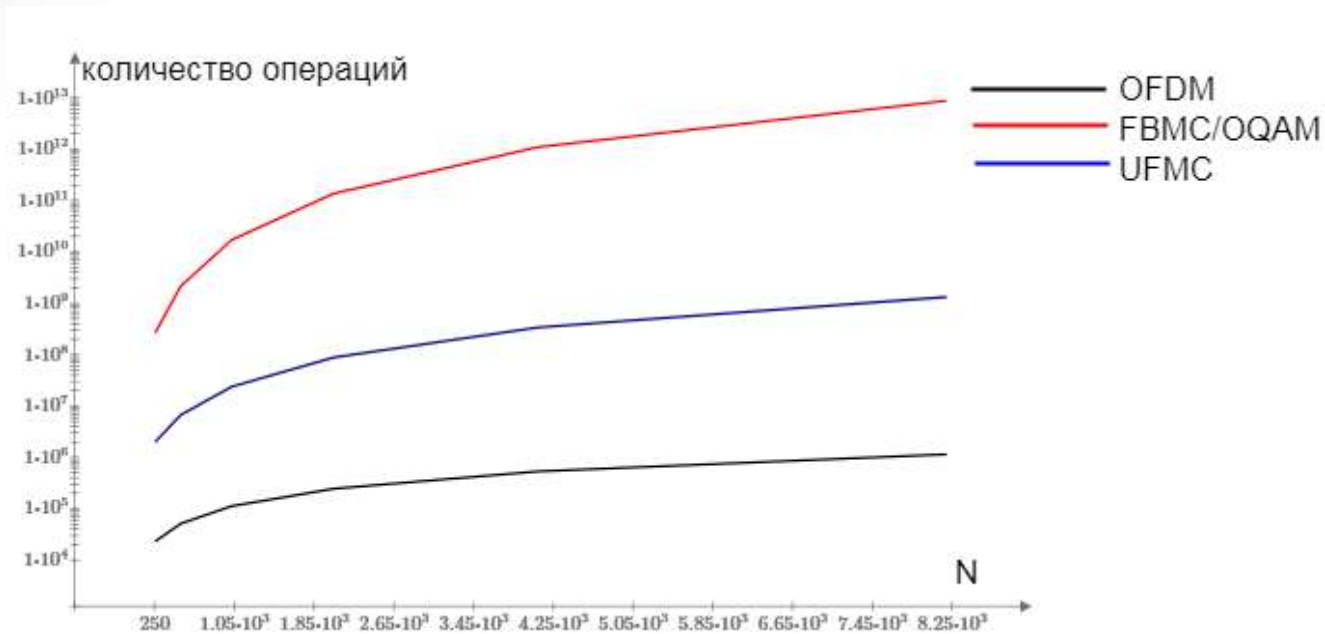


Рисунок 13 – а) оконные функции и б) спектры сигналов OFDM, UFMC, FBMC

Сравнительный анализ технологий



Зависимость количества арифметических операций, требуемых для формирования символов OFDM, FBMC/OQAM и UFMC, от количества подканалов N .

Параметры сигналов OFDM, UFMC, FBMC

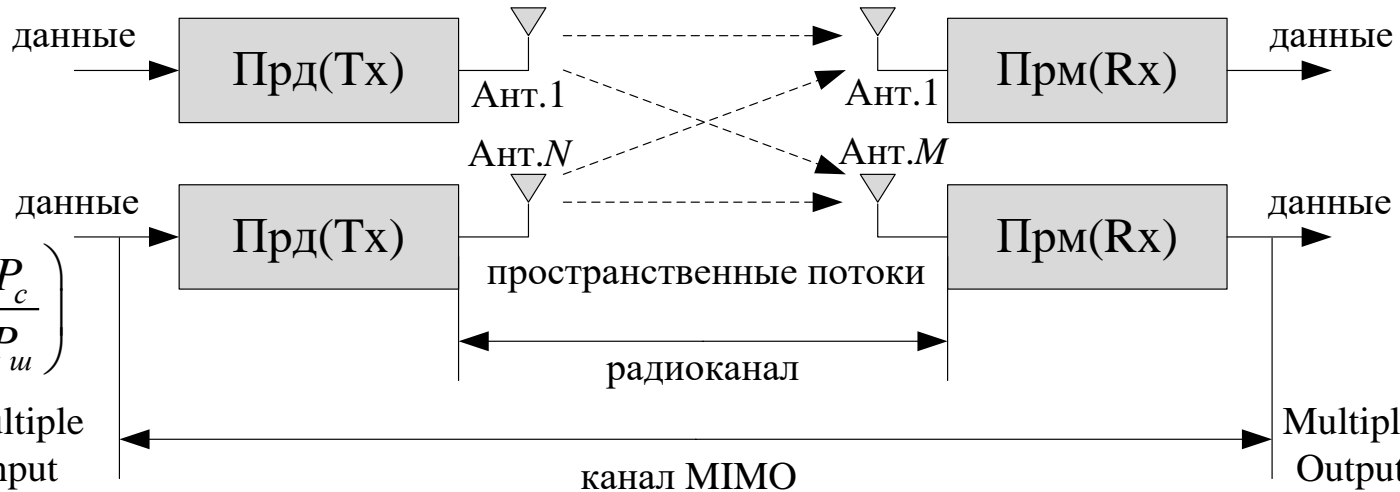
Вид модуляции	OFDM	UFMC	FBMC
Наличие циклического префикса	да	нет	нет
Пик-фактор	высокий	высокий	высокий
Уровень внеполосных излучений	высокий	низкий	низкий
Частотно-временная локализация	низкая	высокая	высокая
Требования к синхронизации	высокие	низкие	низкие

Радиолиния, частота f_0 , полоса частот Δf



$$C_{SISO} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right)$$

Радиолиния, частота f_0 , полоса частот Δf

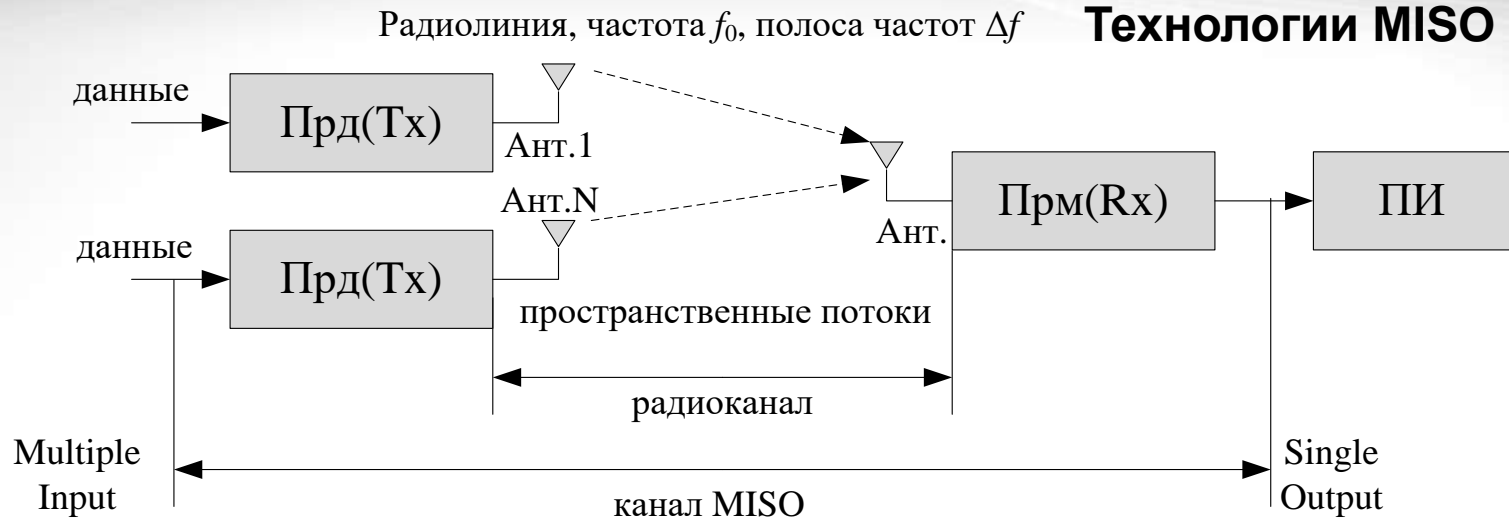


$$C_{MIMO} = k \cdot \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right)$$

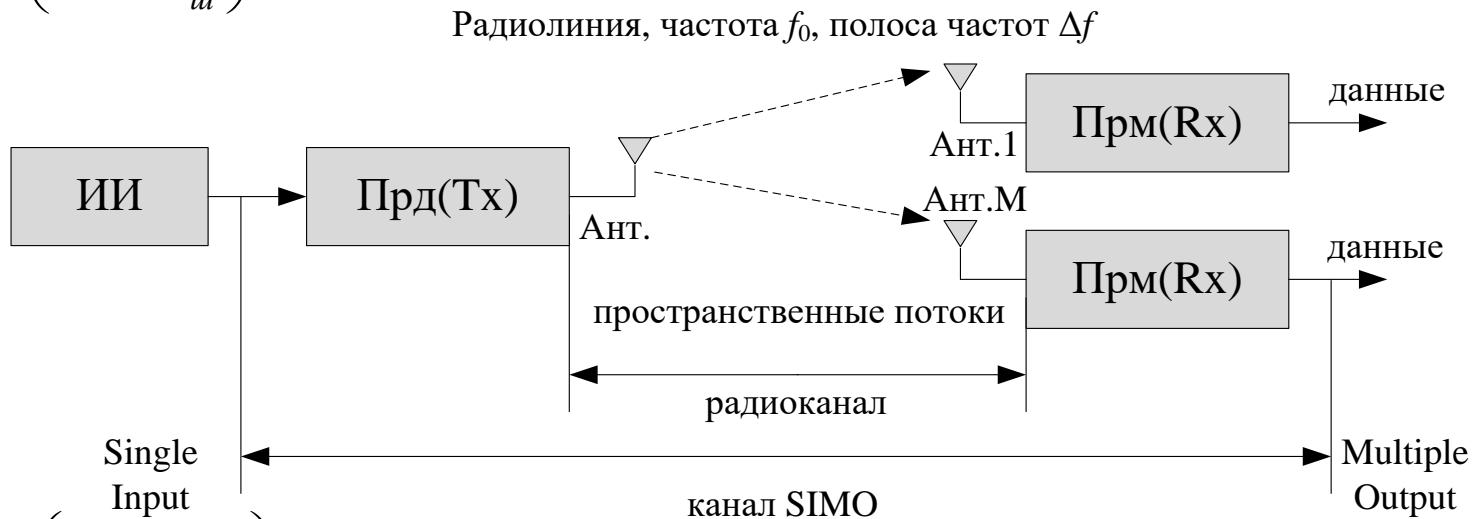
$$k \leq \min \{ N, M \}$$

N количество излучающих антенн,
 M количество принимающих антенн.

$M \times N$ количество пространственных потоков.



$$C_{MISO} = \Delta f \log_2 \left(1 + N \frac{P_c}{P_{ui}} \right) \quad k = \min \{ N, 1 \} = 1$$



$$C_{MISO} = \Delta f \log_2 \left(1 + M \frac{P_c}{P_{ui}} \right) \quad k = \min \{ 1, M \} = 1$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{w}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & h_{M,2} & \dots & h_{M,N} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_M \end{pmatrix}$$

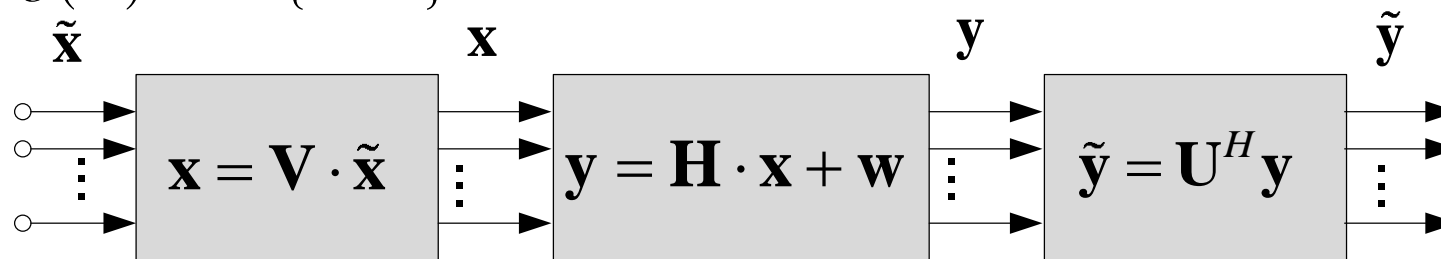
$\mathbf{H} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Sigma} \cdot \mathbf{V}^H$ передаточная матрица канала $h_{n,m}$ размерности $M \times N$

$\mathbf{\Sigma}$ $M \times N$ диагональная матрица собственных значений $\sigma_{m,n}$, таких, что $\sigma_m = \sqrt{\lambda_m}$

λ_m максимальное собственное значение матрицы вида $\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^H$

\mathbf{V} унитарная матрица размерности N ; \mathbf{U} унитарная матрица размерности M ;

$$k = \text{rang}(\mathbf{H}) \leq \min\{M, N\}$$



$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y} = \mathbf{U}^H (\mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{w}) = \mathbf{U}^H (\mathbf{U} \cdot \mathbf{\Sigma} \cdot \mathbf{V}^H \mathbf{V} \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{w}) = \mathbf{\Sigma} \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{U}^H \mathbf{w} = \mathbf{\Sigma} \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}}$$