



Омский государственный технический университет

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КВ МОДЕМ С OFDM (разработка кафедры ССиИБ ОмГТУ)

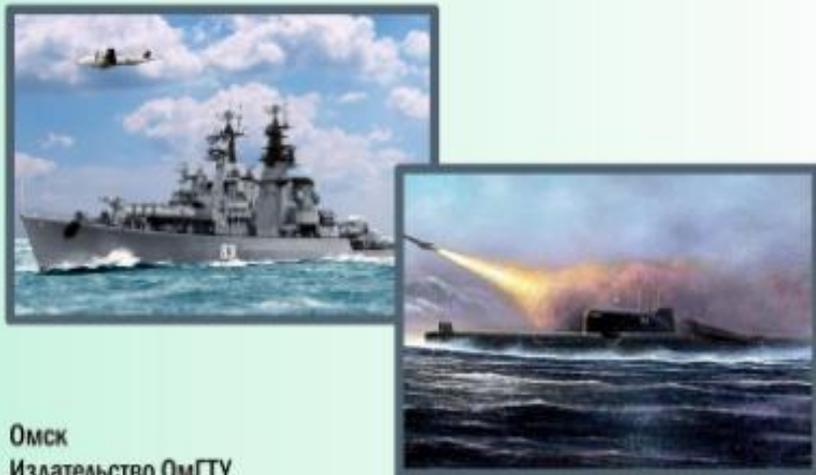
Д. т. н., профессор кафедры ССиИБ ОмГТУ Хазан В.Л.

1-я часть вышла из печати

В. Л. Хазан

СИСТЕМЫ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Часть 1



Омск
Издательство ОмГТУ
2021

2-я часть готовится к печати

В. Л. Хазан

СИСТЕМЫ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Часть 2



Омск
Издательство ОмГТУ
2022

**Одна из глав 2-й части
учебного пособия
посвящена каналам связи
с OFDM сигналами.**

OFDM модемы

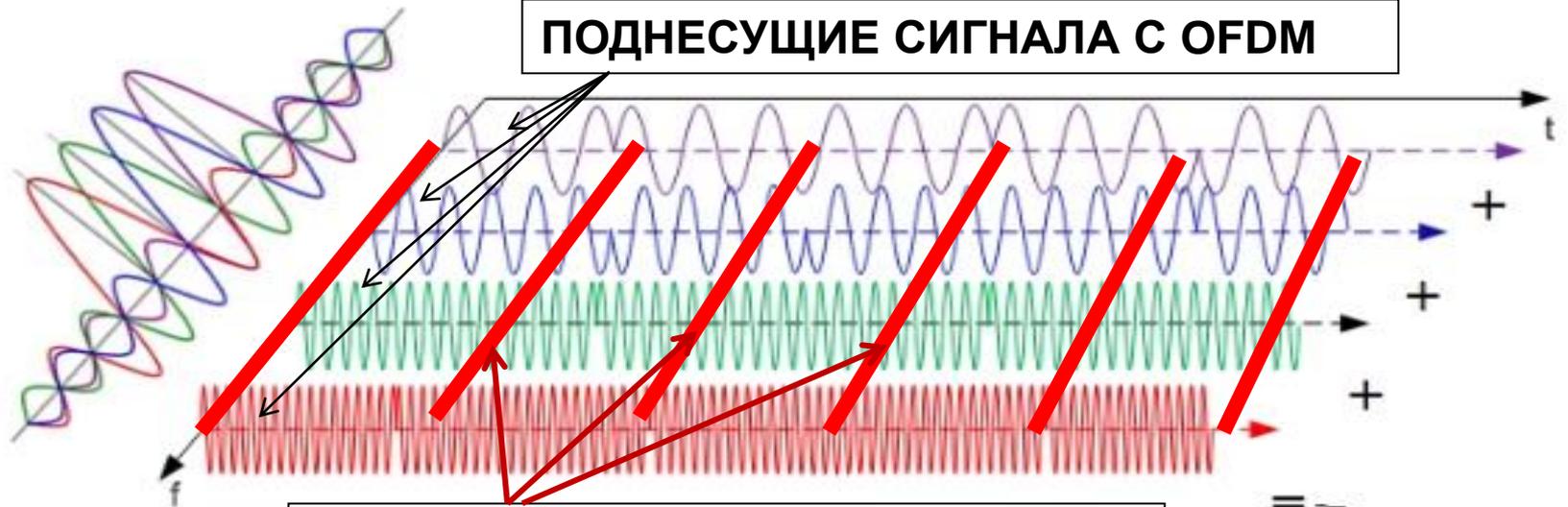
OFDM модемы (Orthogonal frequency-division multiplexing — ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием).

КВ OFDM модемы в основном используются в высокоскоростных радиолиниях для оперативной передачи сообщений большого объема, фото и видео изображений.

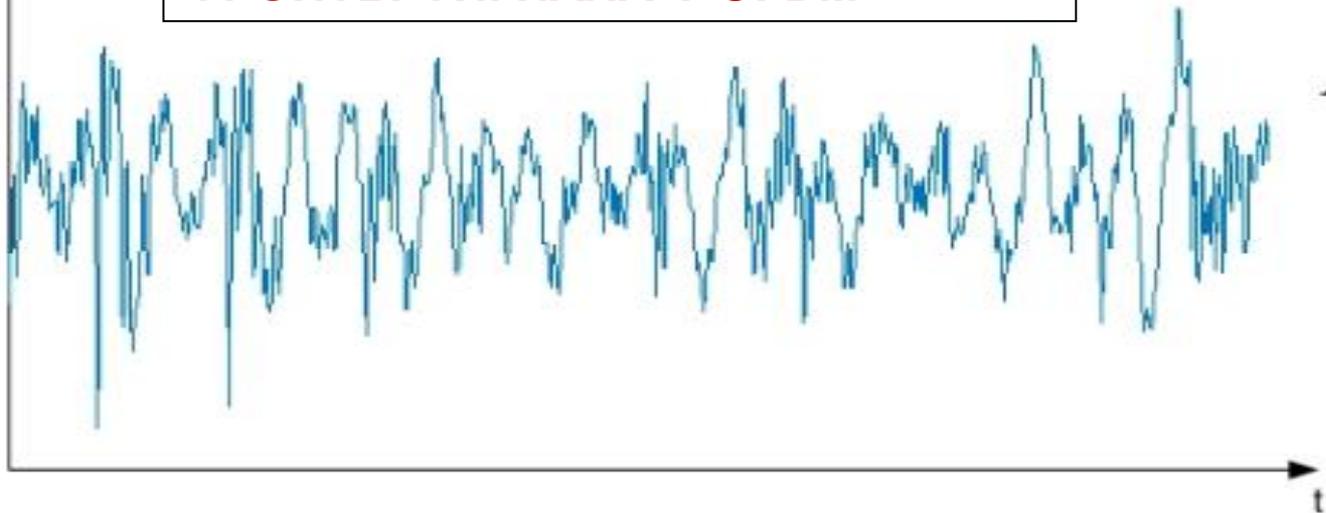
- **Высокая скорость передачи сообщения достигается, во-первых, за счет использования большого числа частотно-разнесенных поднесущих сигнала, каждая из которых доставляет в пункт назначения свою долю доверенного ей сообщения, и, во-вторых, за счет использования в поднесущих сигнала модуляции КАМ (квадратурой амплитудной модуляции), которая позволяет одним радиоимпульсом одновременно передавать большое количество бит сообщения.**

СТРУКТУРА OFDM СИГНАЛА

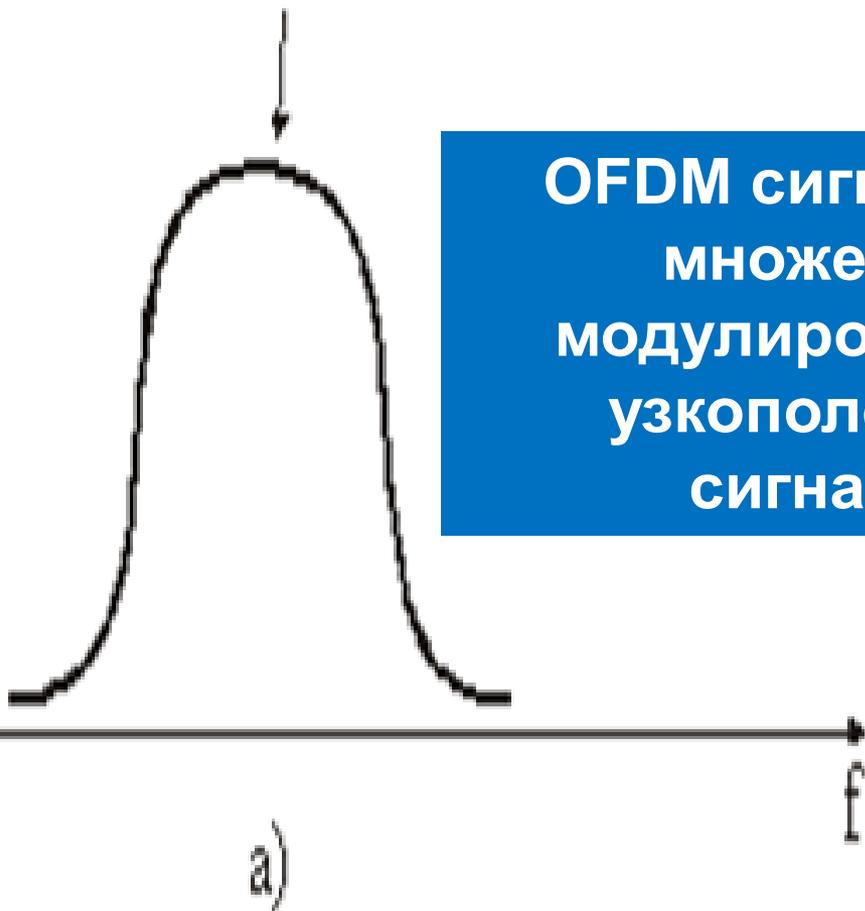
ПОДНЕСУЩИЕ СИГНАЛА С OFDM



ФРОНТЫ СИГНАЛА С OFDM

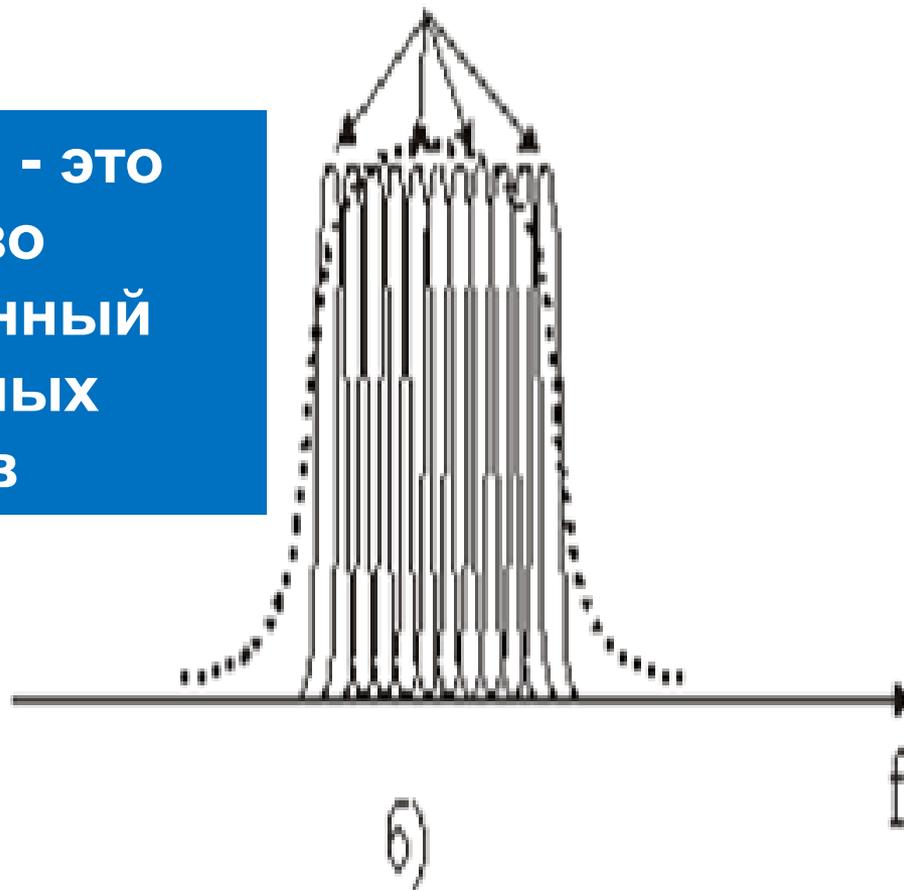


Одна несущая



а)

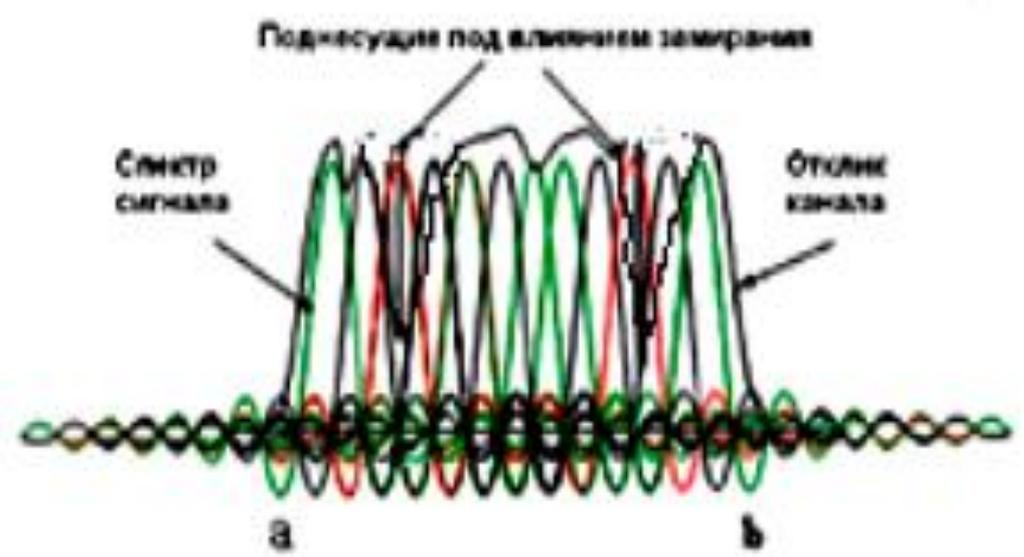
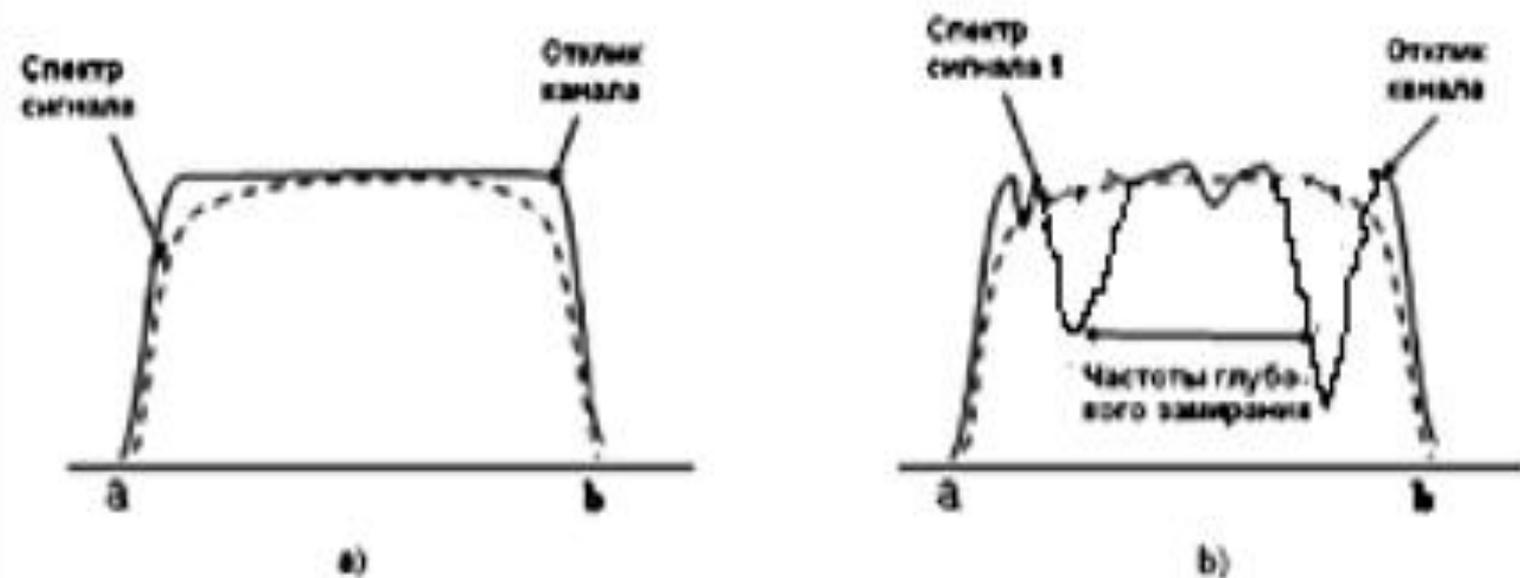
Множество поднесущих



б)

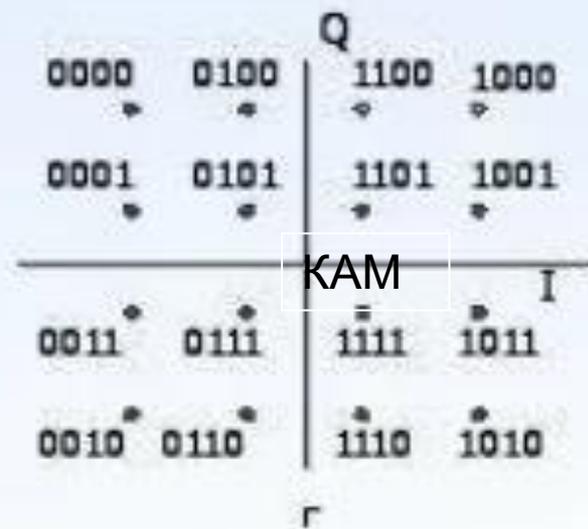
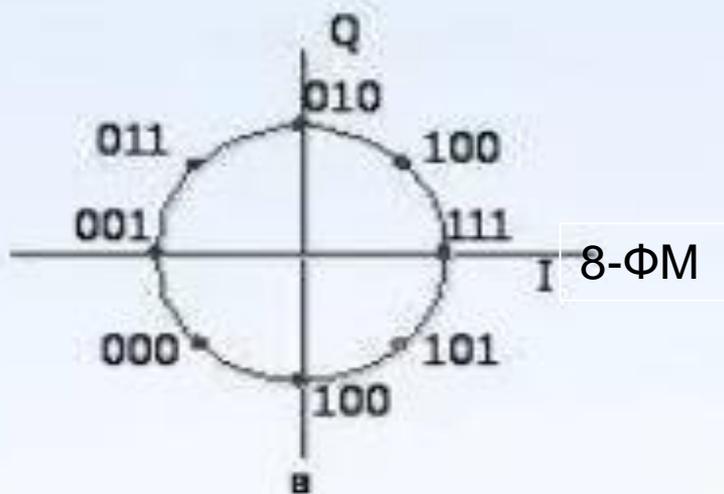
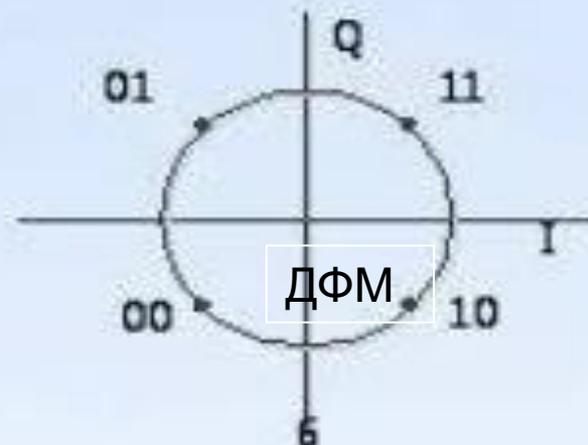
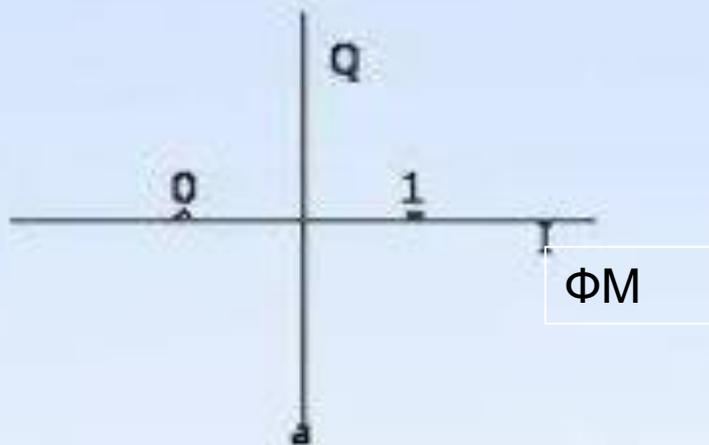
**OFDM сигнал - это
множество
модулированный
узкополосных
сигналов**

Спектры сигналов при передаче сообщения с высокой скоростью с помощью обычного модема (а) и с помощью OFDM модема (б)



. Влияние селективных замираний на спектр OFDM сигнала

СТРУКТУРА КАМ СИГНАЛА



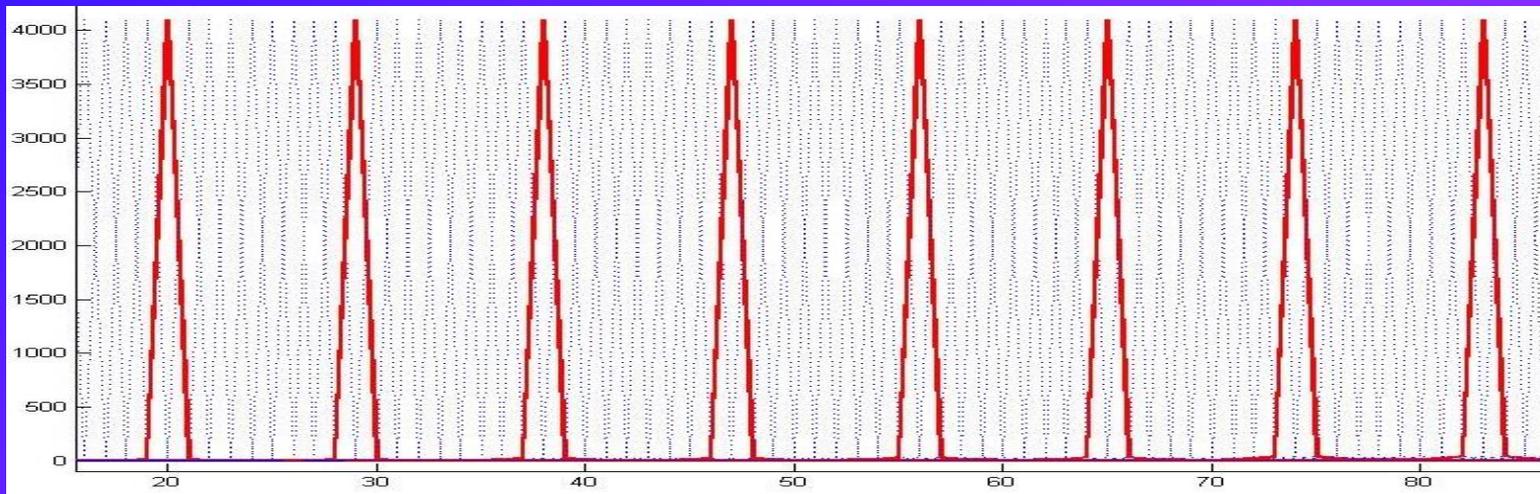
В ОмГТУ некоторое время тому назад был разработан OFDM модем, который может быть использован для передачи сообщений с высокой скоростью как в режиме ППРЧ, так и при связи с самолетами. Этот модем отличается от известных тем, что имеет вдоль оси частот малое расстояние между поднесущими и не требует преамбул перед началом передачи сообщения.

Свойства модема

- *Относительная фазовая манипуляция вдоль оси частот;*
- *Передача сообщений как с высокой скоростью (9600 бит/с), так и с низкой скоростью (4 бит/с) – скрытный режим;*
- *Отсутствие требования высокой стабильности частоты;*
- *Связь с реактивными самолётами;*
- *Связь в режиме ППРЧ;*
- *Повышенная скрытность сигнала;*
- *Адаптация к условиям связи.*

В полосе ОБП ТЛФ канала при расстоянии между поднесущими 4 Гц можно расположить 750 поднесущих. Один фронт сигнала в этом случае передает от 750 бит (3000 бит/с) до 3000 бит (12 бит/с). (ПЛ передает всего порядка 1000 бит. Т.е. одним фронтом с ПЛ можно передать всю ТЛГ)

... 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0
0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1...



Введение известных на приёмном конце пилот сигналов, поиск заданной последовательности в принимаемой посылке путём сдвига по частоте и по времени.

- *Исследования показали, что в декаметровом канале связи, который имеет хорошее качество, расстояние вдоль оси частот между поднесущими OFDM сигнала должно быть равным 4 Гц, в канале среднего качества, соответственно, 8 Гц, а в канале плохого качества 16-32 Гц.*

- **Необходимо отметить, что OFDM сигналы с близко расположенными друг к другу поднесущими имеют более шумоподобный характер и равномерный спектр с относительно низкой спектральной плотностью по сравнению с большими разнесами поднесущих по частоте. Эти свойства OFDM радиосигнала повышают его скрытность.**

Разработанный в ОмГТУ OFDM модем в 2014 и в 2015 годах был испытан на реальной трассе Омск-Ногинск (Москва)



УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ OFDM МОДЕМА

На передающей стороне:

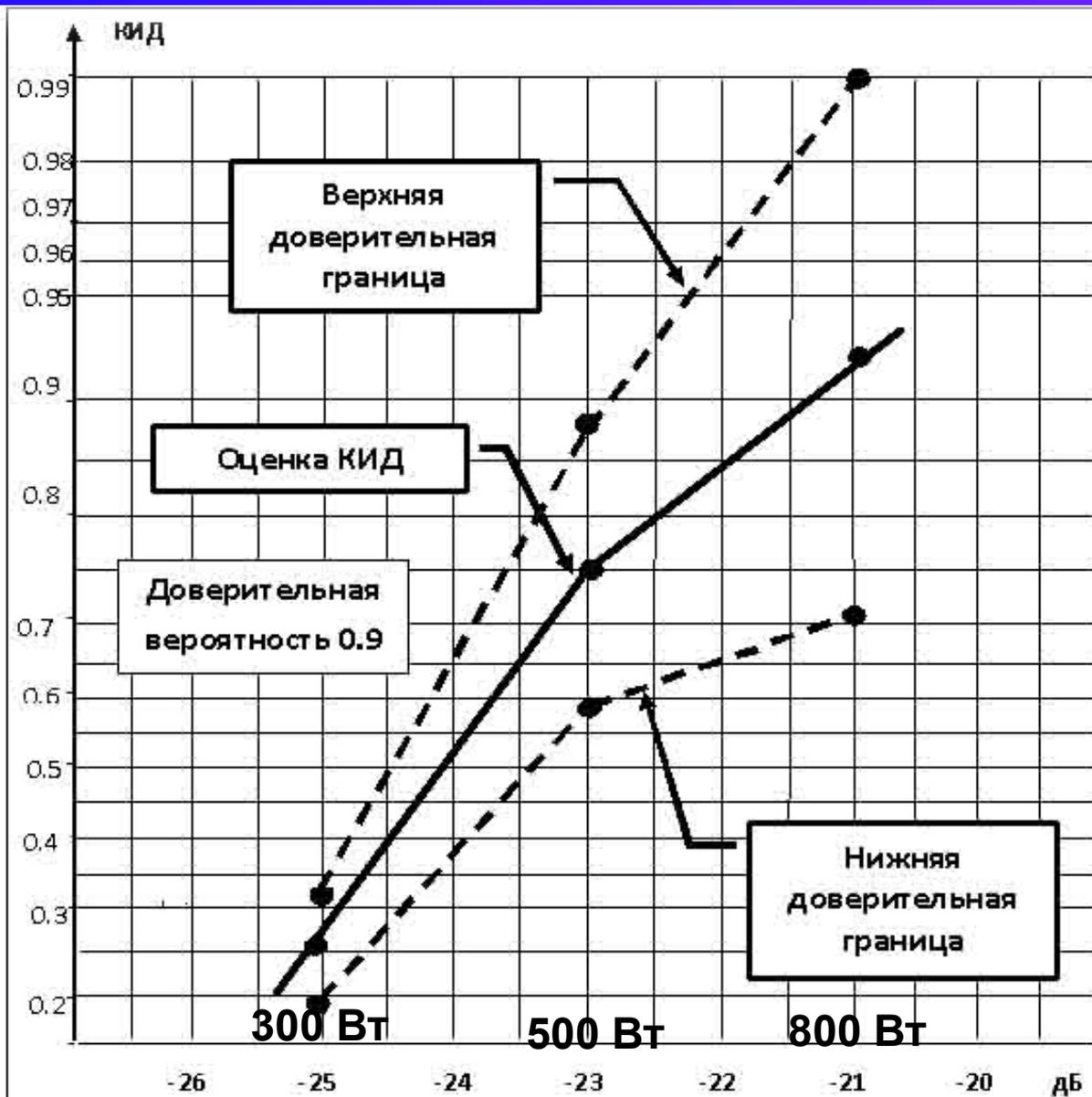
передатчик (трансивер BARRETT 2050) мощностью 125 Вт располагался, как показано на рисунке , в г. Омске. Антенна типа «ШТЫРЬ» длиной 1.5 м (BARRET 2019) располагалась на крыше 8-го корпуса ОмГТУ.

На приемной стороне:

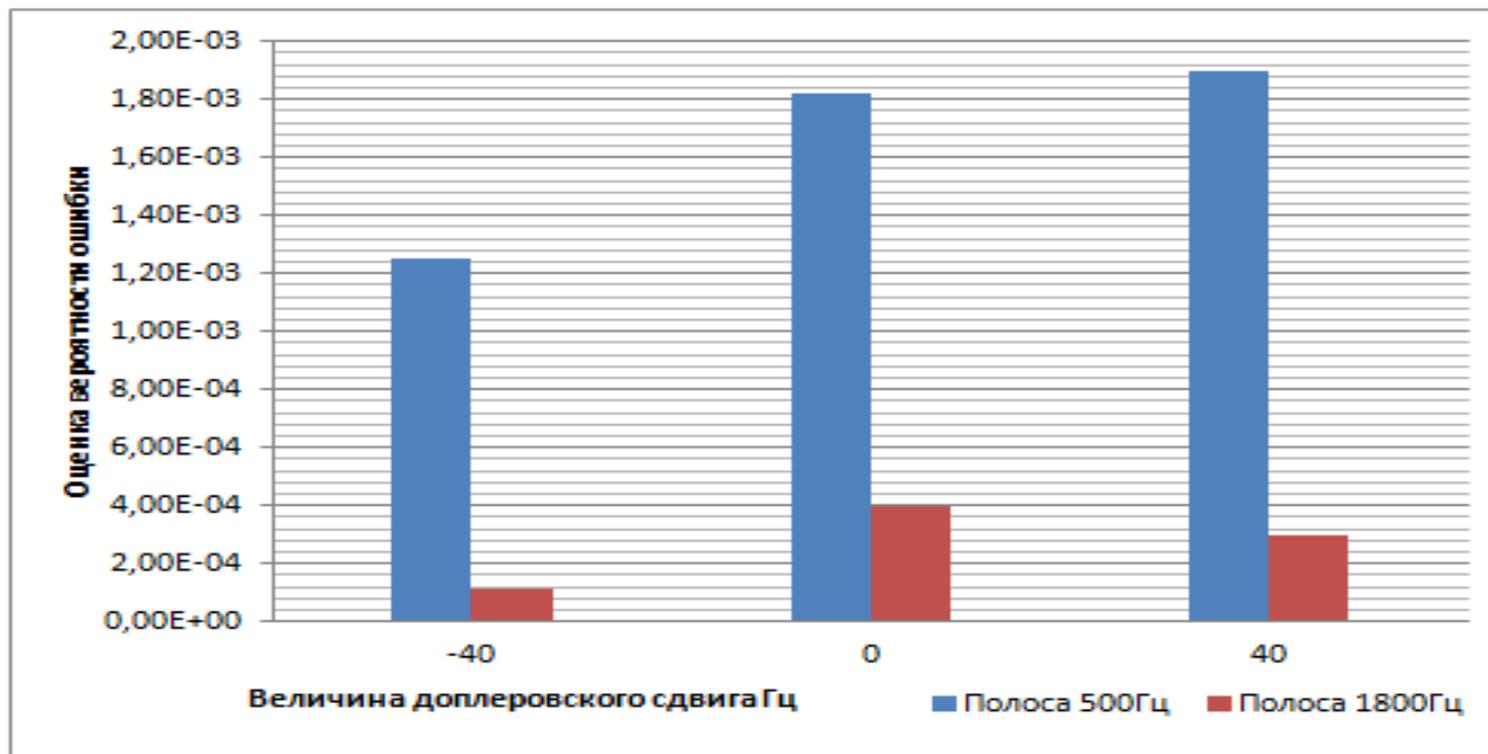
приемник (трансивер BARRETT 2050) и антенна Icom AN-710 находились на территории 6 НИУ НИЦ ЦНИИ ВВС МО РФ в г. Ногинске.

Модем был реализован в виде программы на ноутбуках LenovoG780, которые сопрягались с трансиверами через аудиокарты E-MU-0204.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ



ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕМА С OFDM ПРИ НАЛИЧИИ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА



1. Оценка средней вероятности ошибки при различных рабочих полосах частот в условиях доплеровского сдвига частоты, расстояния между поднесущими 4 Гц и модуляции OFDM-DPSK-8 (8 точек созвездия).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

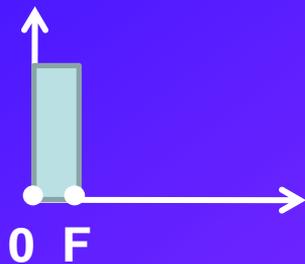
- *Для передачи сообщения в полосе двухполосного телефонного канала связи с информационной скоростью 9600 бит/с при работе с антенной полутораметровый «ШТЫРЬ» на односкачковой трассе с КИД равным 0.75 требуется передатчик мощностью порядка 500 Вт, а с КИД равным 0.9, соответственно, порядка 800 Вт.*

- **Так как передатчик на ПЛ имеет мощность порядка 10 кВт, а телескопическая антенна ПЛ типа «ШТЫРЬ» имеет длину 4,5 м, т. е. является на порядок более эффективной по сравнению с полтораметровой антенной, с которой проводились трассовые испытания, то можно утверждать, что разработанный в ОмГТУ OFDM модем может быть рекомендован для реализации в системах передачи сообщений со стороны ПЛ.**

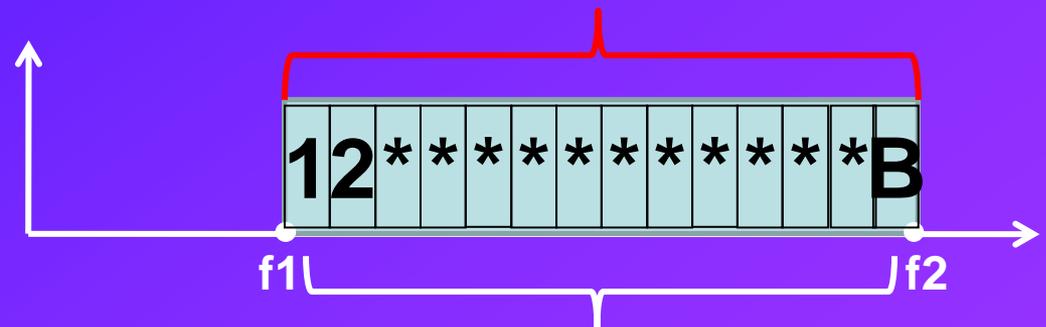
СКРЫТЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ OFDM МОДЕМА

Если по всем частотным подканалам OFDM модема передавать одну и ту же информацию низкой скоростью (4 бит/с), то база сигнала будет равна количеству подканалов и система связи с OFDM сигналами становится скрытной, способной работать под шумами на уровне – 20 дБ и менее того.

- Энергетическая скрытность системы радиосвязи обусловлена **базой сигнала B** , которая определяется отношением полосы частот Δf , занимаемой спектром этого сигнала на выходе передатчика, к полосе частот F , занимаемой спектром информационного сигнала на входе манипулятора: **$B = \Delta f / F$**
 $\Delta f = BF$



Спектр сигнала на входе манипулятора



Спектр сигнала на выходе передатчика

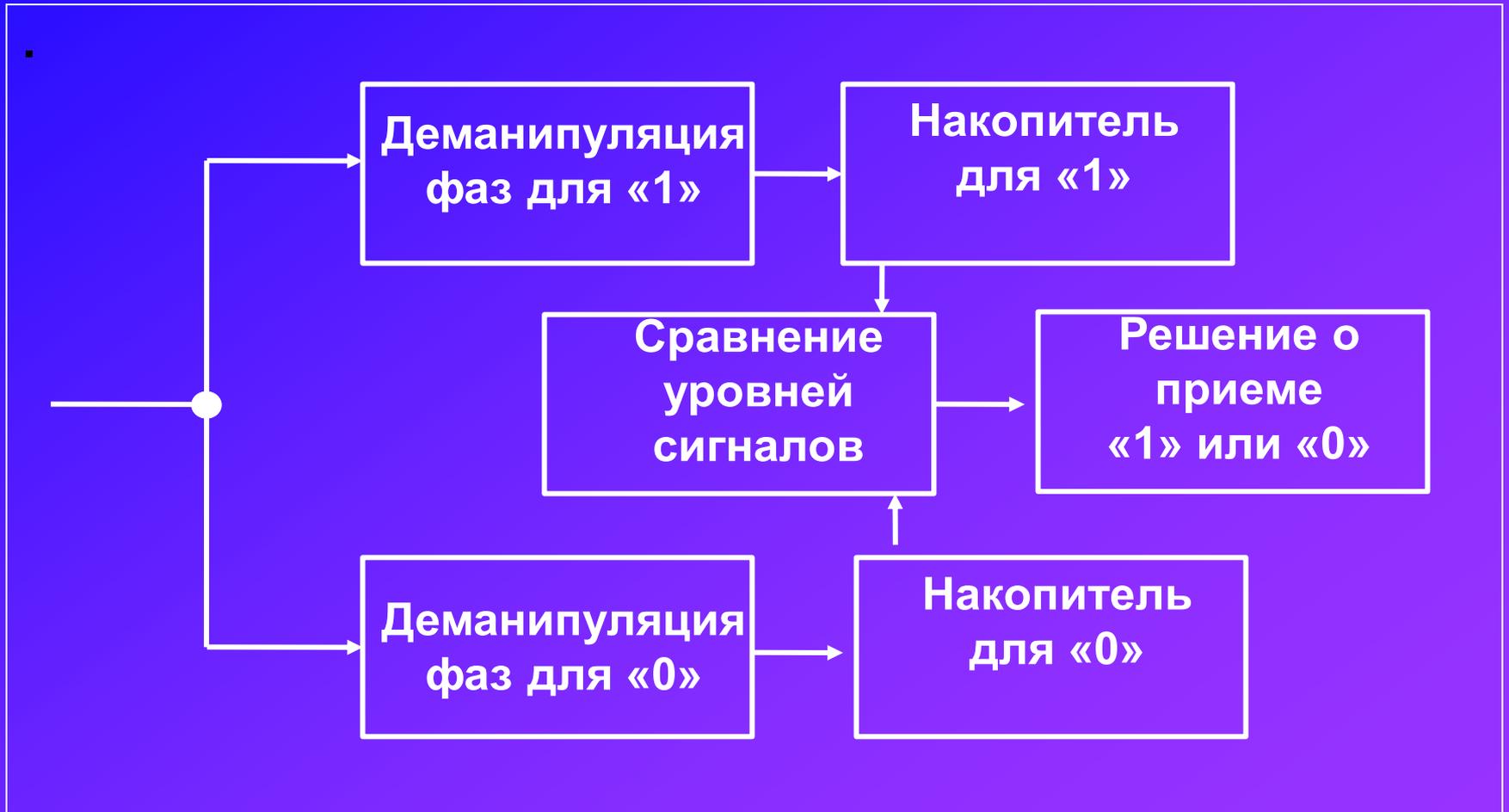
На передающей стороне радиолинии манипуляция по фазе поднесущих OFDM сигнала для одного значения элемента производится бинарной последовательностью по одному закону, а для другого значения элемента – манипуляция фазы производится бинарной последовательностью по другому закону. Эти бинарные последовательности должны быть взаимно ортогональными.

- Прием каждой поднесущей производится индивидуально с оценкой ее амплитуды и фазы на соответствующем каждому циклу сообщения интервале времени, с последующим определением разности фаз между всеми соседними поднесущими и суммированием полученных значений векторов в каждом из двух накопителей с коррекцией разности начальных фаз для каждой поднесущей в каждом фронте для каждого символа по закону, который возвращает всем инвертированным на передающей стороне радиолинии при формировании многочастотного сигнала поднесущим значение фазы, равное нулю как для одного, так и для другого значения элемента.**

- *На приемном конце производится деманипуляция поднесущих принимаемого сигнала параллельно как для «1», так и для «0».*
- *Откорректированные по фазе вектора поднесущих сигнала суммируются отдельно для «1» и «0».*

- При этом вектора сигналов, которые соответствуют передаваемому символу суммируются когерентно, а вектора помех суммируются случайно. Поэтому при достаточно большом числе суммируемых векторов сигнала отношение сигнал/помеха рано или поздно превышает необходимое для правильного приема символа значение.

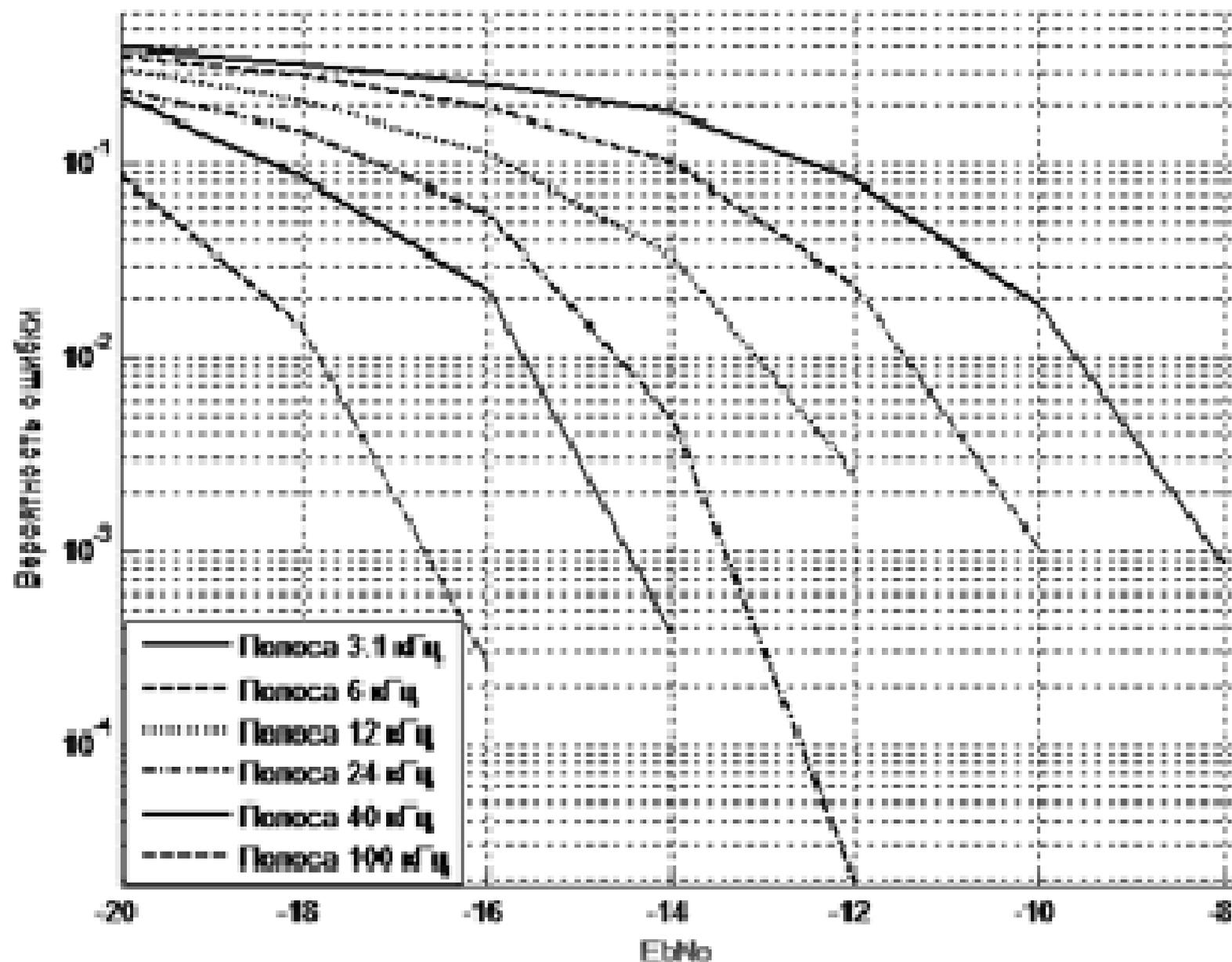
ДЕМОДУЛЯЦИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО OFDM СИГНАЛА



- **Данный метод приема сигнала является некогерентным методом, который хотя и проигрывает по помехоустойчивости классическому взаимно корреляционному (когерентному) методу приема сигнала, но не требует трудно реализуемой высокой точности взаимной синхронизации передающего и приемного устройств по времени.**

- ***Ниже приведены результаты вычислительного эксперимента по определению помехоустойчивости некогерентного метода приема широкополосных сигналов при одноцикловой передаче двухпозиционным сигналом со средней скоростью 8 Бод, в зависимости от полосы, занимаемой спектром сигнала.***

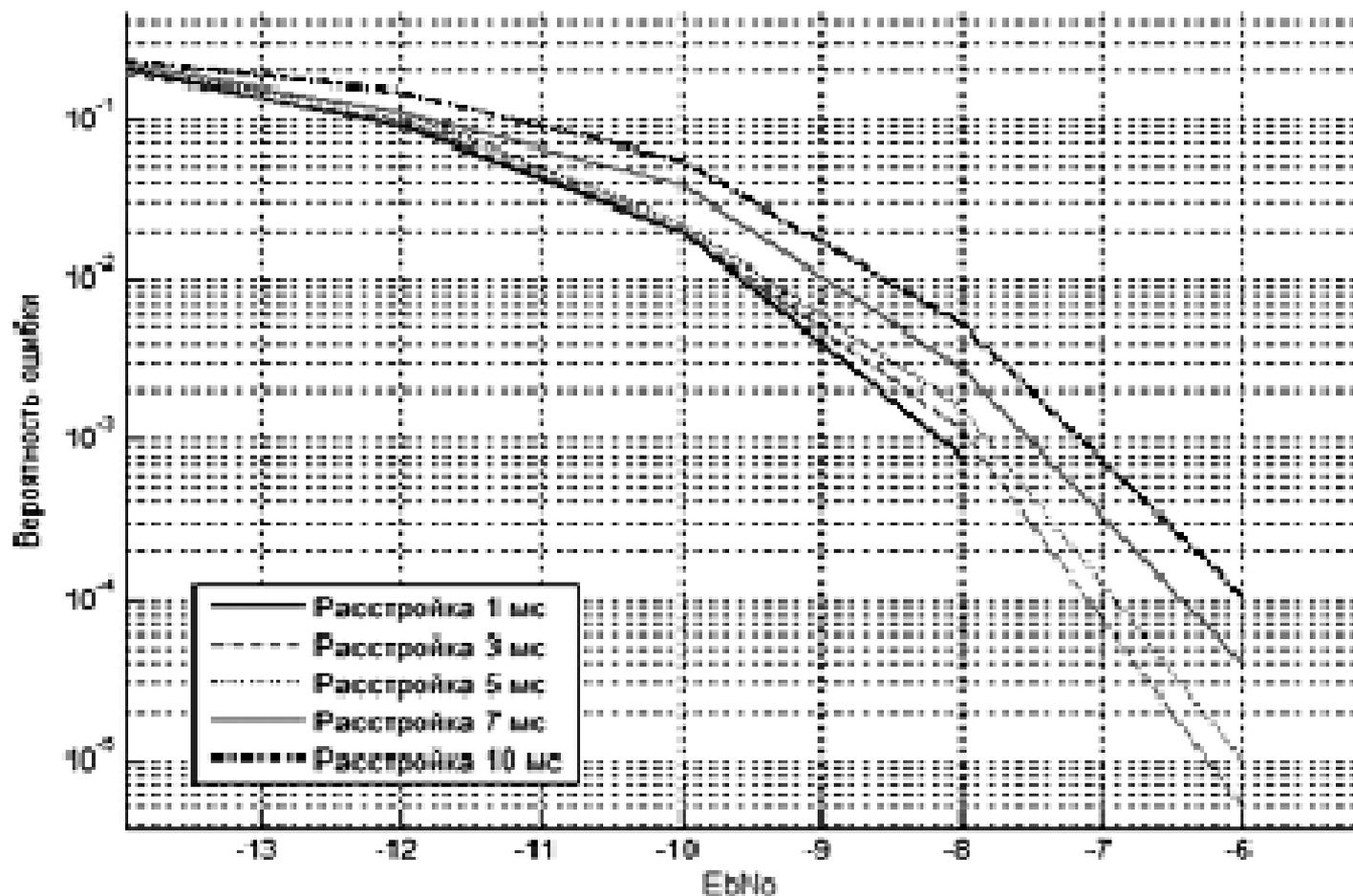
Кривые помехоустойчивости мультикодированного некоррелированного модема в АБШ канале 86кГц



- **Из рисунка следует, что при полосе спектра 3100 Гц (база сигнала 387) вероятность ошибки имеет значение 10^{-1} , когда отношение сигнал/шум равно менее, чем - 12 дБ. Увеличение базы сигнала до значения 12500 (полоса спектра сигнала 100 кГц) обеспечивает при некогерентном приеме сигнала вероятность ошибки 10^{-1} , когда отношение сигнал/шум равно порядка - 20 дБ**

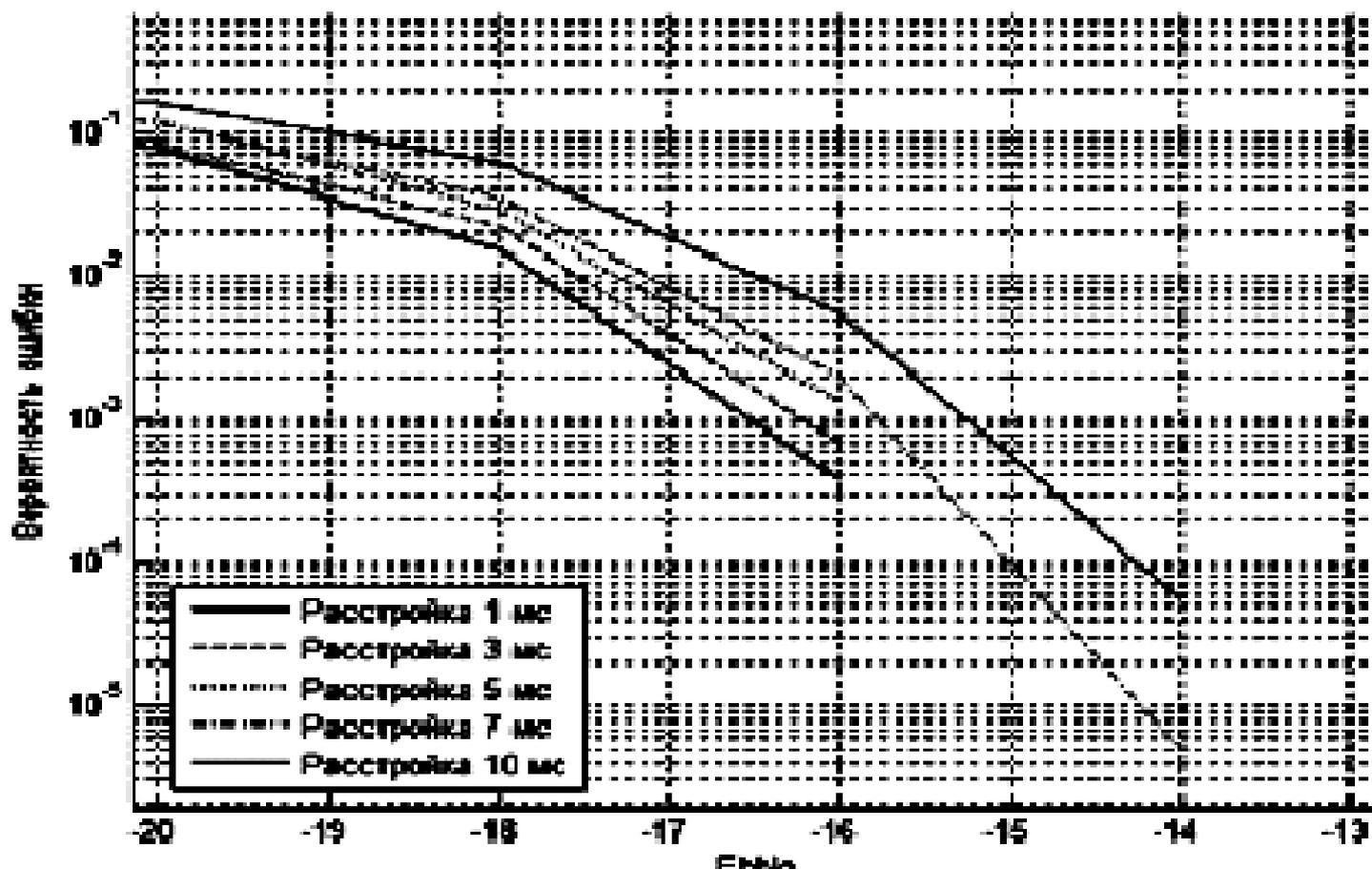
Кривые помехоустойчивости при некогерентном приеме сигналов с полосами пропускания 3100 Гц (база 387), в зависимости от от рассинхронизации по времени.

Кривые помехоустойчивости медленнодействующего некогерентного модема с полосой 3.1 кГц в АБПШ канале 85кбит/с

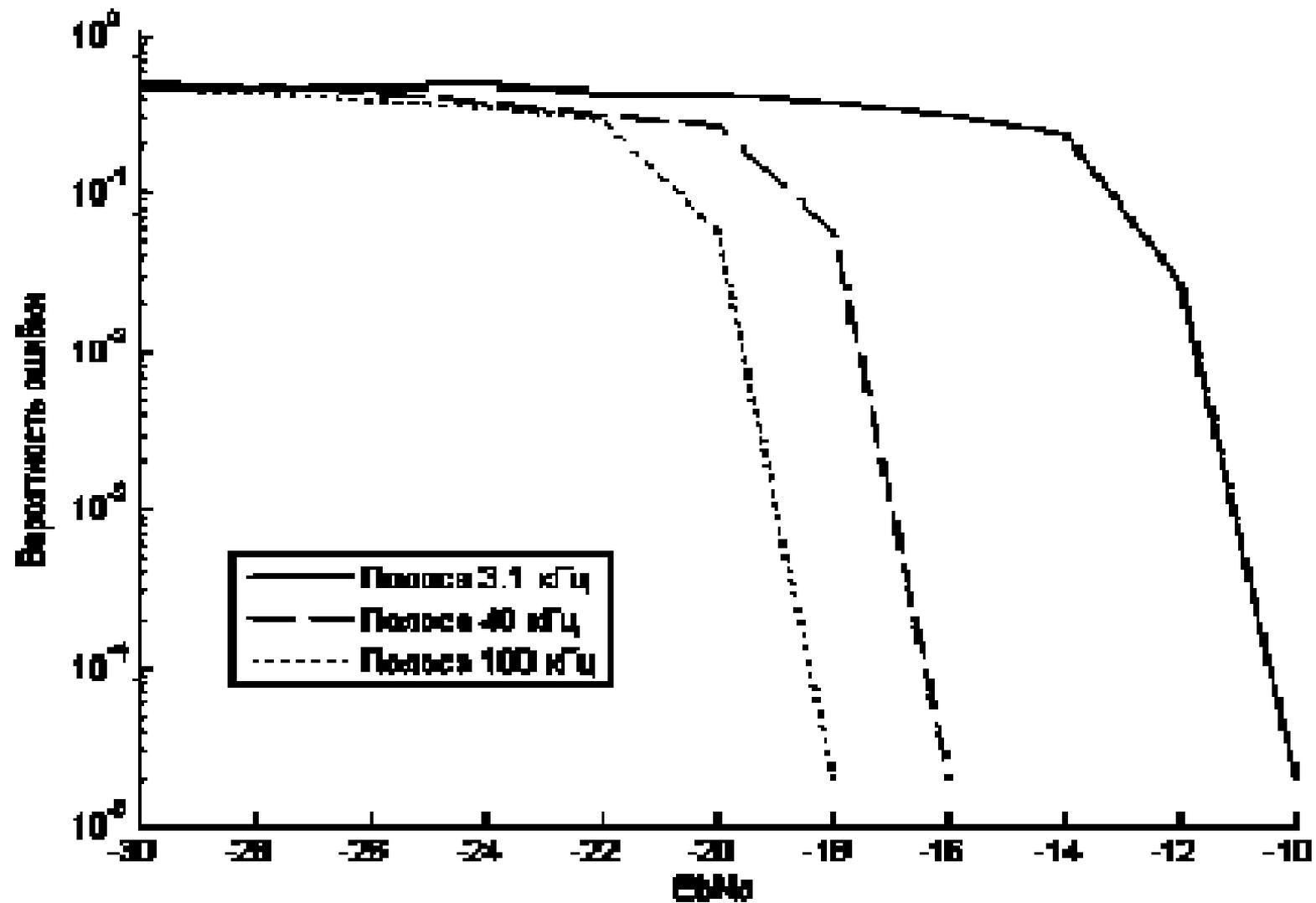


Кривые помехоустойчивости при некогерентном приеме сигналов с полосами пропускания 100000 Гц (база 12500), в зависимости от от рассинхронизации по времени.

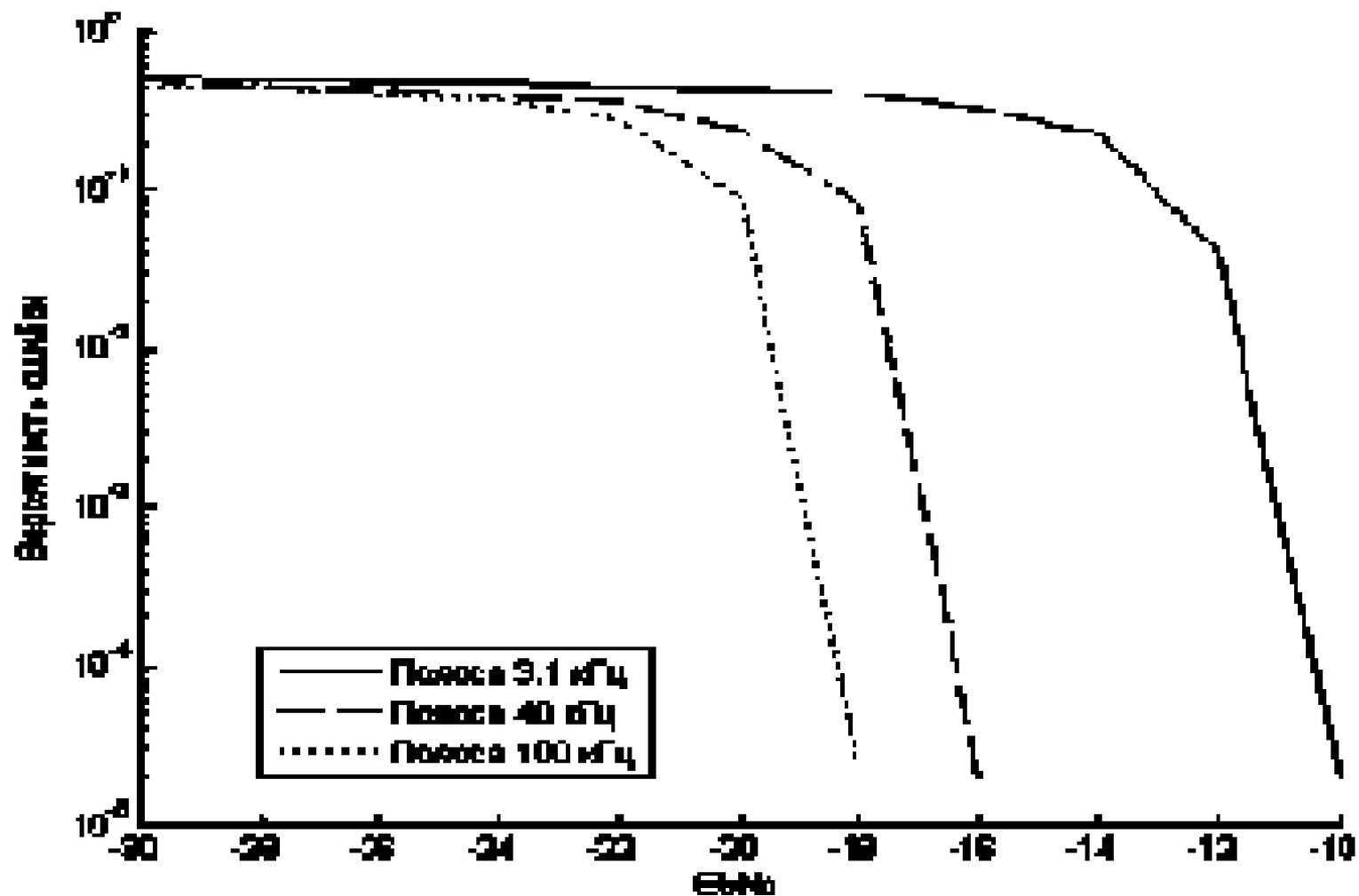
Кривые помехоустойчивости медленнодействующего некогерентного модема с полосой 100 кГц в АБПШ канала 56кбит/с



КВ канал радиосвязи с хорошим качеством при коде с избыточностью 100 %

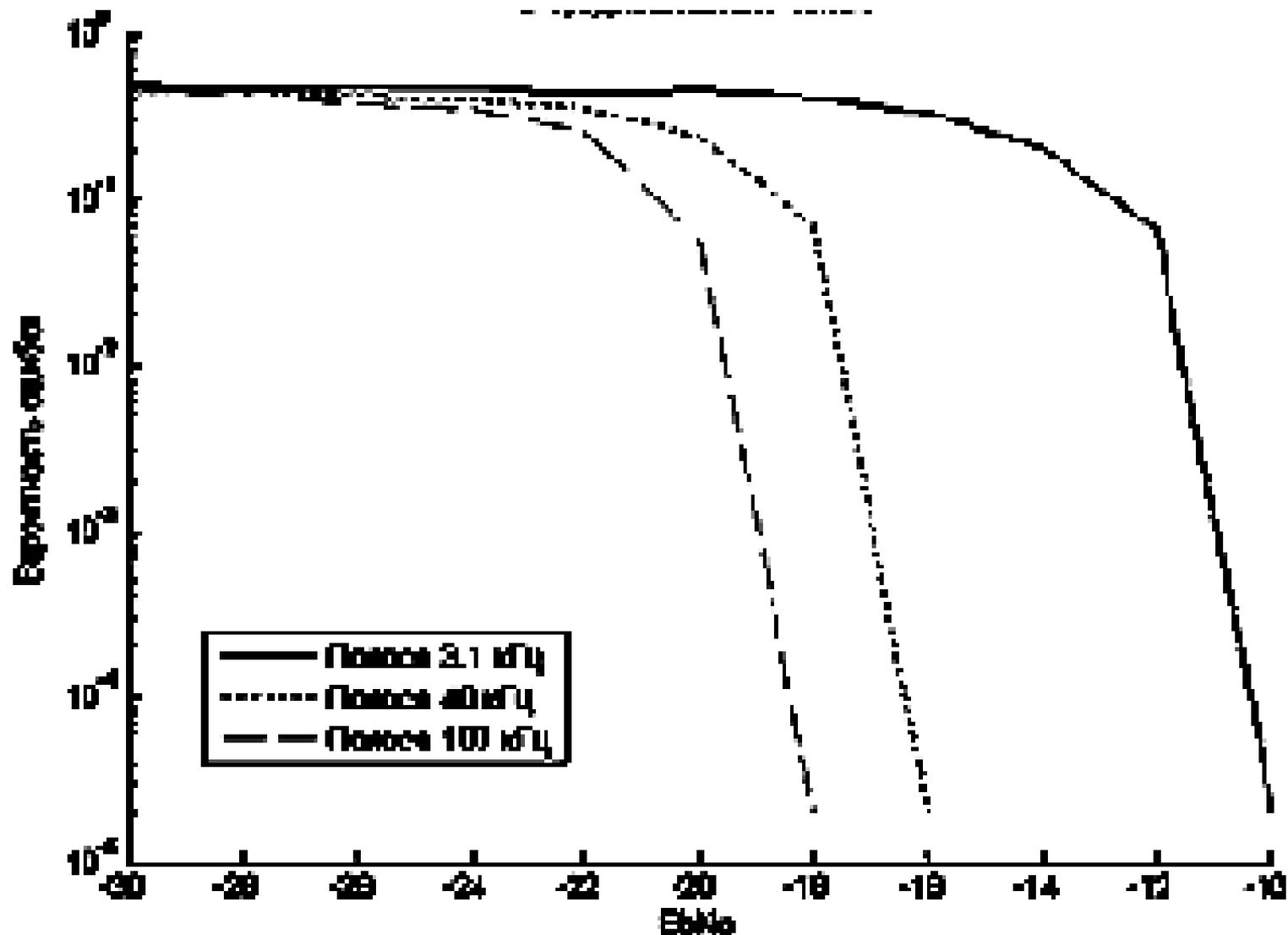


КВ канал радиосвязи со средним качеством при коде с избыточностью 100 %



КВ канал радиосвязи с плоским качеством

при коде с избыточностью 100 %



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2608178

**СПОСОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ СКРЫТНОЙ ПЕРЕДАЧИ
ДИСКРЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ ПО КАНАЛАМ
РАДИОСВЯЗИ**

Патентообладатели: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет" (RU), Хазан Виталий Львович (RU)*

Автор: *Хазан Виталий Львович (RU)*

Заявка № 2015122636

Приоритет изобретения 10 июня 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 17 января 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 10 июня 2035 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Извиев Г.П. Извиев

ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО В ОМГТУ OFDM МОДЕМА

- *Этот модем не требует преамбулы, что во много раз уменьшает время передачи сообщения ограниченного объема;*
- *OFDM сигналы с малым расстоянием между поднесущими имеют равномерно распределенный вдоль оси частот спектр, который трудно отличить от спектра обычного аддитивного шума, что повышает скрытность этих сигналов;*

ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО В ОмГТУ OFDM МОДЕМА

- *Время передачи с помощью OFDM модема коротких сообщений, составляет доли секунды, что затрудняет потенциальному противнику как задачу обнаружения сигнала и его идентификацию, так и задачу пеленгации источника излучения сигнала;*

ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО В ОмГТУ OFDM МОДЕМА

- *OFDM модем позволяет работать в режиме ППРЧ, передавая на каждой рабочей частоте очередной фронт OFDM сигнала.*
- *Разработанный OFDM модем обеспечивает связь с быстро летящими реактивными самолетами.*
- *OFDM модем может легко менять режим работы и передавать сообщение низкой скоростью скрытно под шумами.*

По результатам проведенных исследований аспирантом ОмГТУ, научным сотрудником ОНИИП Земляновым И.С. в 2016 г. была успешно защищена кандидатская диссертация.

Мы пытались полученные результаты исследований довести до сведения специалистов ОНИИП. Но по непонятным для нас причинам нас слушать на НТС предприятия отказались. В архиве случайно сохранилась копия служебной записки начальника отдела Романова Ю.В.

Выписка из служебной записки Романова Ю.В. от 15.03.2013 г. по вопросу проведения НТС касательно результатов НИР «СКОРОСТЬ-М»

- **«...результаты исследований. ... позволяют сделать однозначные выводы о существенном проигрыше предлагаемых ОмГТУ решений по сравнению с известными и реализованными в ОНИИП решениями при работе в условиях реального КВ канала на трассах с отражением сигнала от ионосферы».**
- ***(ГОЛОСЛОВНОЕ НИЧЕМ НЕ ДОКАЗАННОЕ ЗАЯВЛЕНИЕ).***

- «....**Мировой опыт показывает**, что использование подобных решений в модемах без эквалайзера в полосе 300...3400 Гц обеспечивает при работе в условиях реального КВ канала информационную скорость достоверной передачи данных не более 2400.. .4800 бит/с.....»
- ***(ЧТО ТАКОЕ «МИРОВОЙ ОПЫТ ПОКАЗЫВАЕТ»??? РАЗВЕ ЭТО ДОКАЗАТЕЛЬСТВО НЕВЕРНО ПРИНЯТОГО РЕШЕНИЯ?***
- ***И, КРОМЕ ТОГО, ЭКВАЛАЙЗЕР В ОПИСЫВЕМОМ КВМОДЕМЕ С OFDM ИМЕЕТСЯ)***

- «...**идея** об использовании в каждом подканале скорости манипуляции 4 Бод, которая приблизительно на порядок ниже типичных используемых в КВ OFDM модемах, **ошибочна**. В данной работе опять предлагается идти по тупиковому пути».

(ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАЛИ, ЧТО ОШИБОЧНО КАК РАЗ ИСПОЛЬЗОВАТЬ В ХОРОШЕМ КАНАЛЕ СВЯЗИ СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ВЫШЕ 4-х БОД).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ СЛУЖЕБНОЙ ЗАПИСКИ РОМАНОВА Ю.В.:

«... предлагается вопрос на НТС не рассматривать».

Вопрос о том, какой из методов OFDM (разработанный в ОНИИП или разработанный в ОмГТУ) является лучшим «ПО ГАМБУРГСКОМУ СЧЕТУ», к сожалению, до сих пор остается открытым.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

КОНТАКТЫ:

ТЛФ: 8-962-038-92-94,

E-mail: vlhazan@yandex.ru