



Омский государственный технический университет

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КВ МОДЕМ С OFDM (разработка кафедры ССиИБ ОмГТУ)

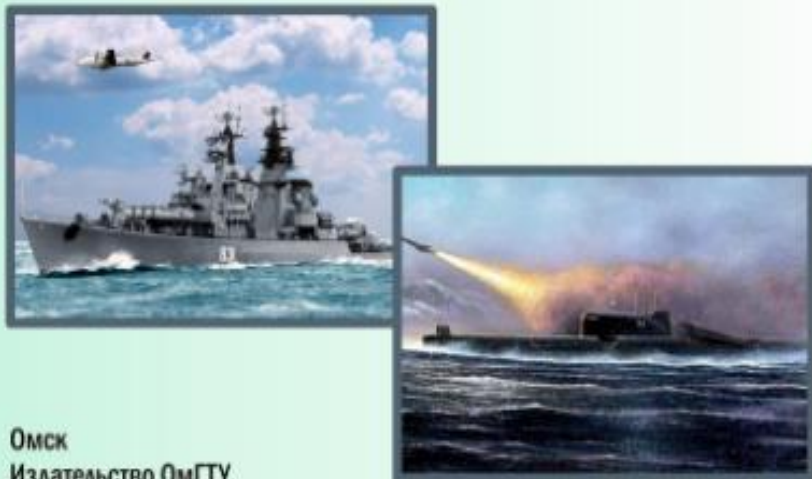
Д. т. н., профессор кафедры ССиИБ ОмГТУ Хазан В.Л.

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

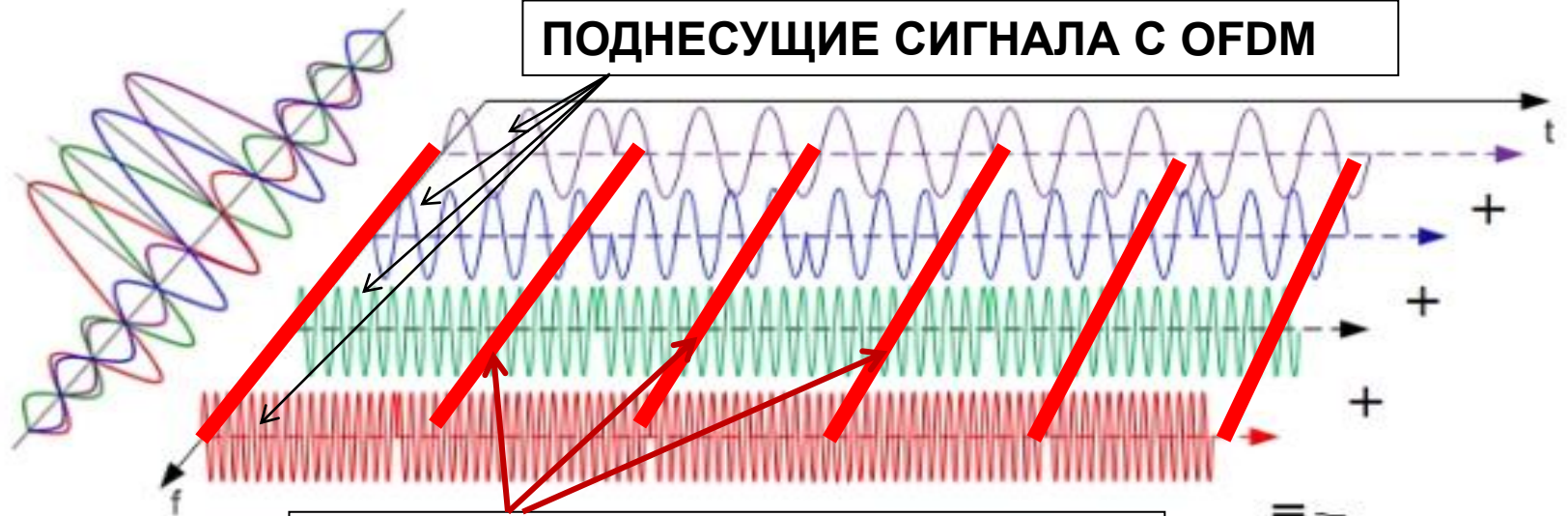
OFDM модемы (Orthogonal frequency-division multiplexing — ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием).

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

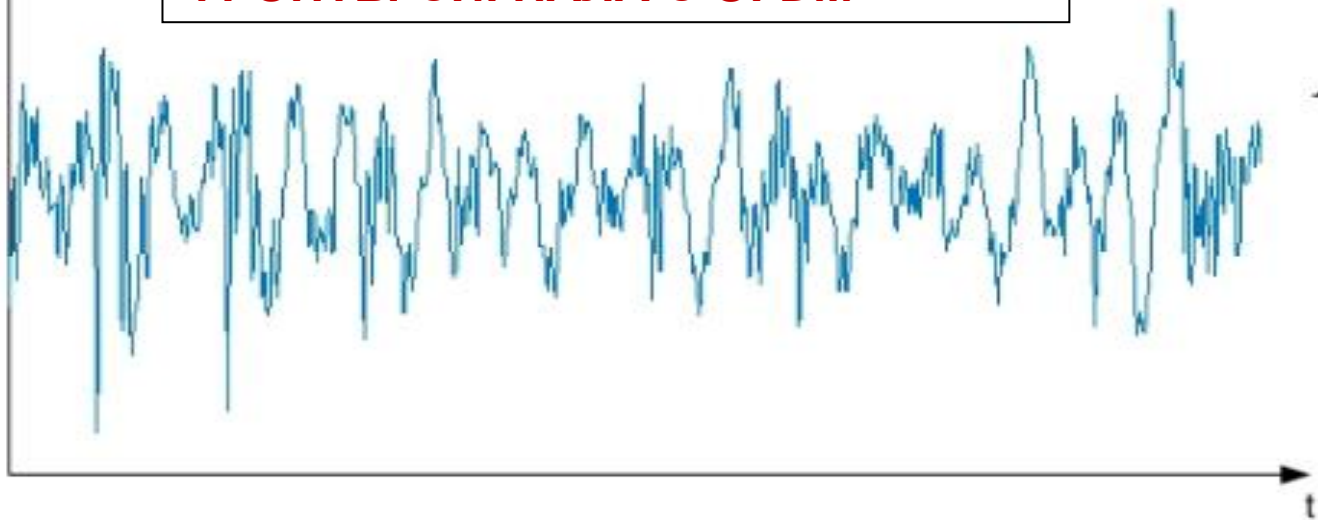
- **Высокая скорость передачи сообщения достигается, во-первых, за счет использования большого числа частотно-разнесенных поднесущих сигнала, каждая из которых доставляет в пункт назначения свою долю доверенного ей сообщения, и, во-вторых, за счет использования в поднесущих сигнала модуляции КАМ (квадратурой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

СТРУКТУРА OFDM СИГНАЛА

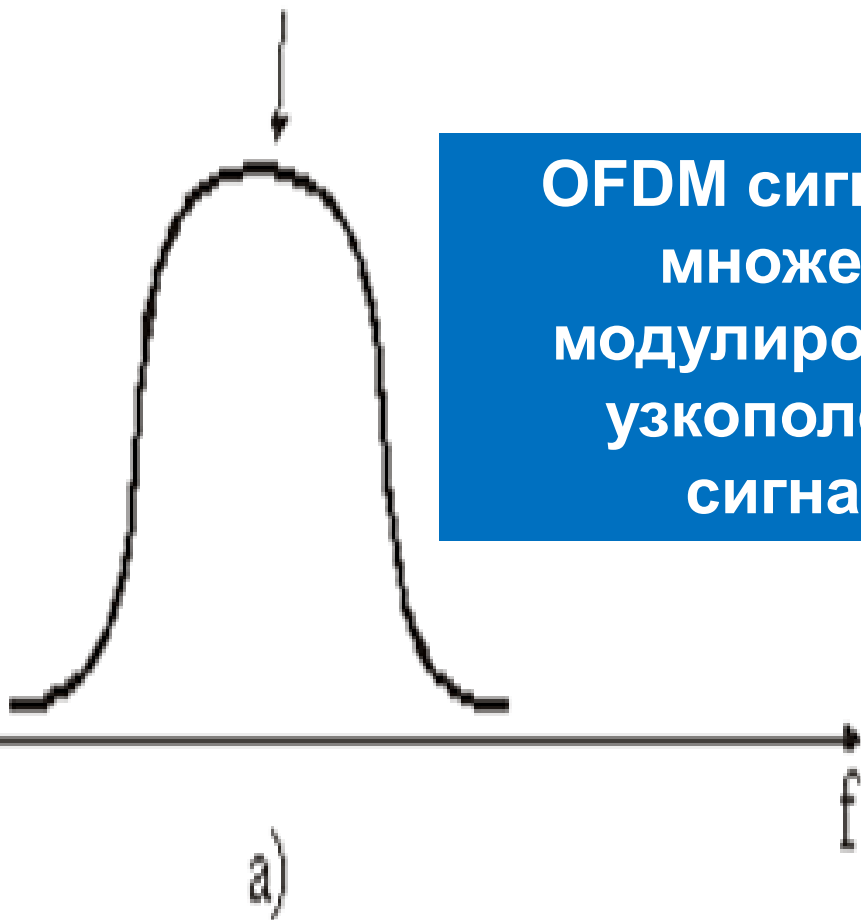
ПОДНЕСУЩИЕ СИГНАЛА С OFDM



ФРОНТЫ СИГНАЛА С OFDM

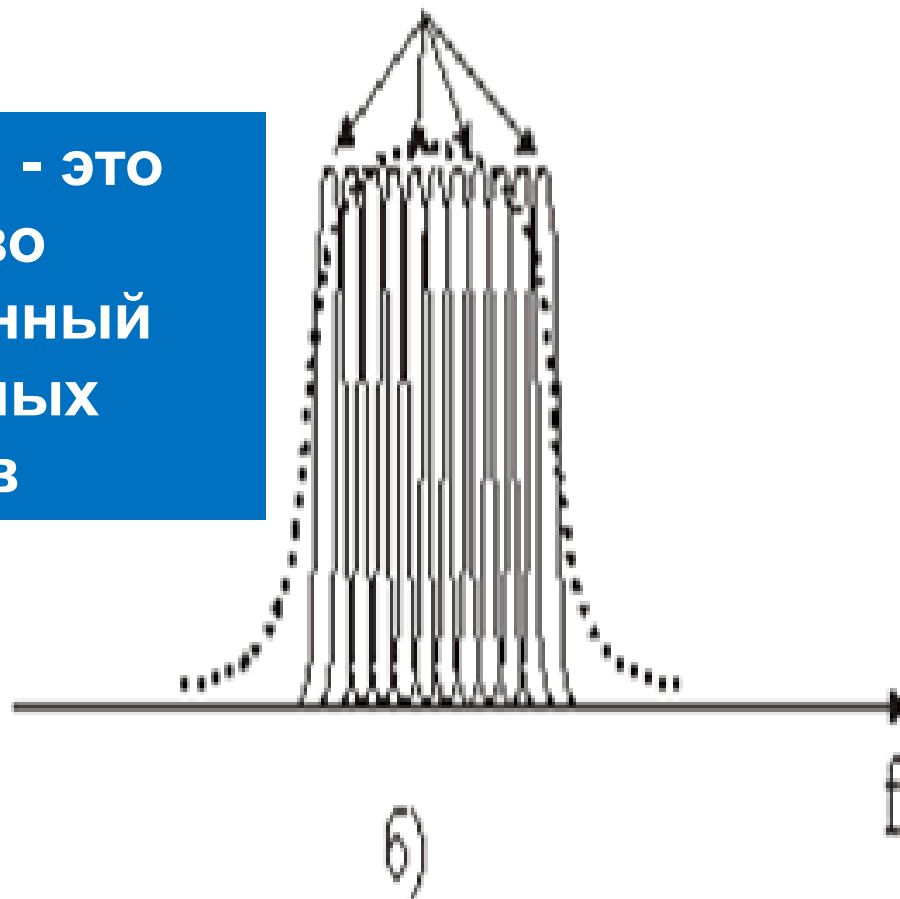


Одна несущая



а)

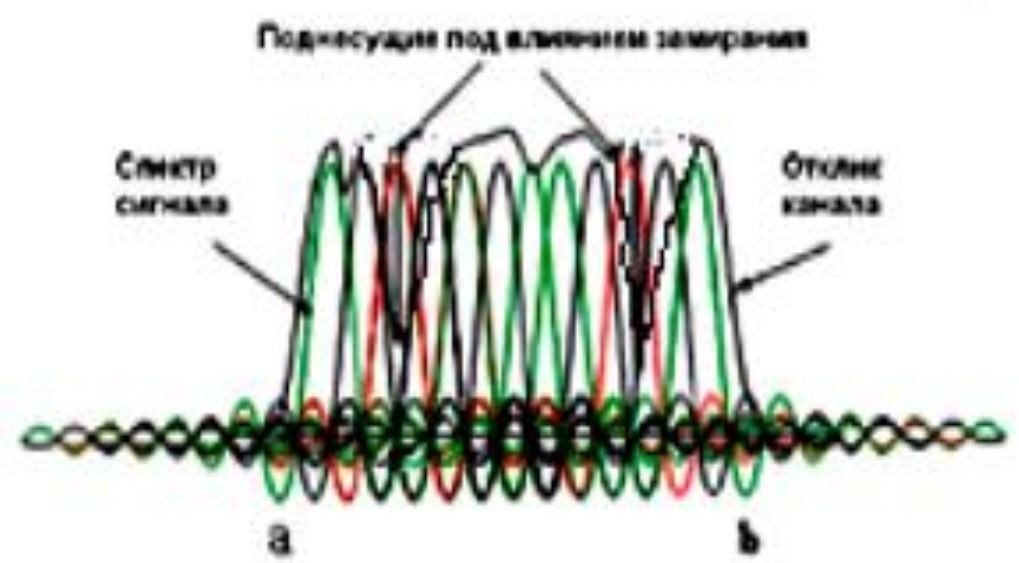
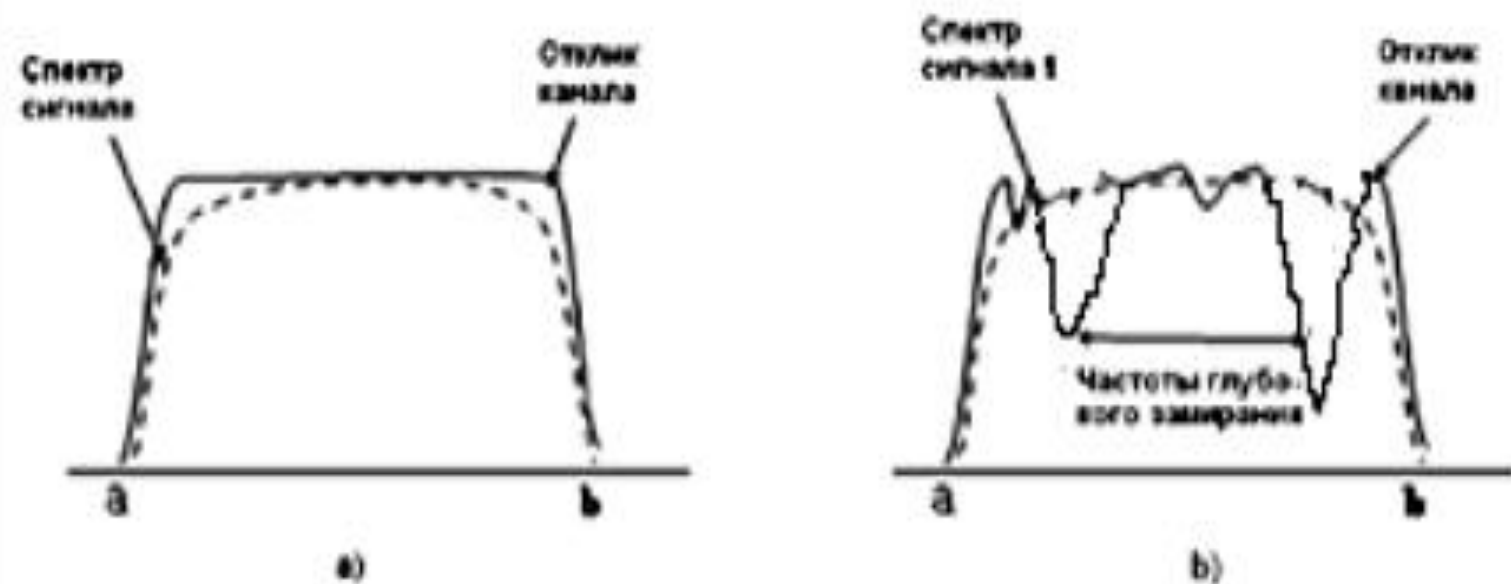
Множество поднесущих



б)

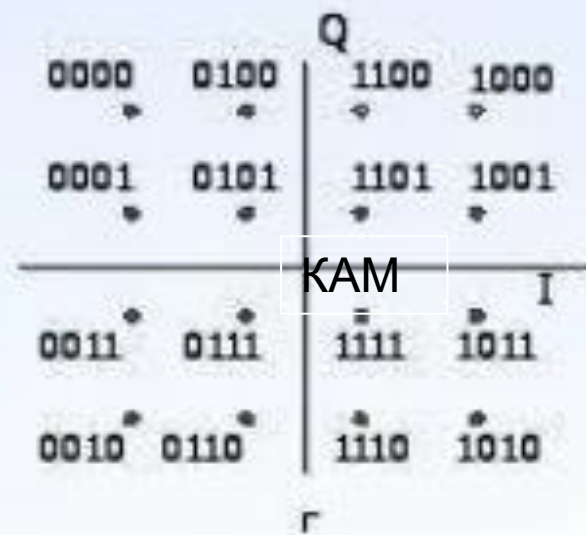
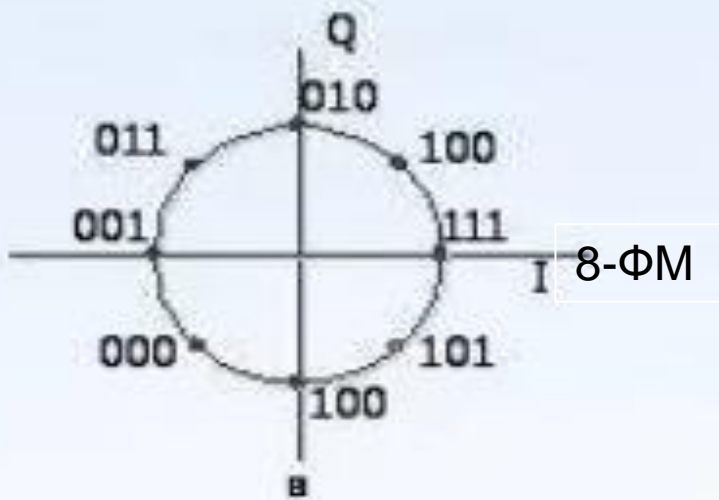
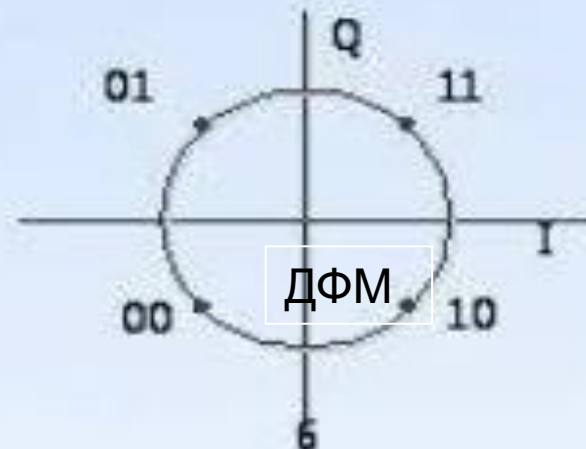
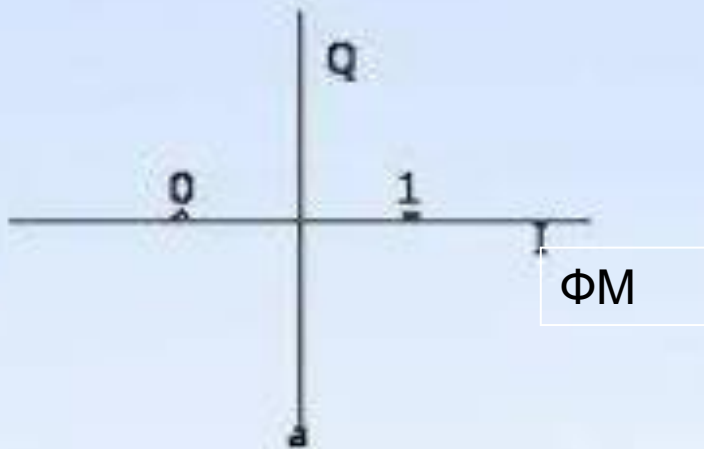
**OFDM сигнал - это
множество
модулированный
узкополосных
сигналов**

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



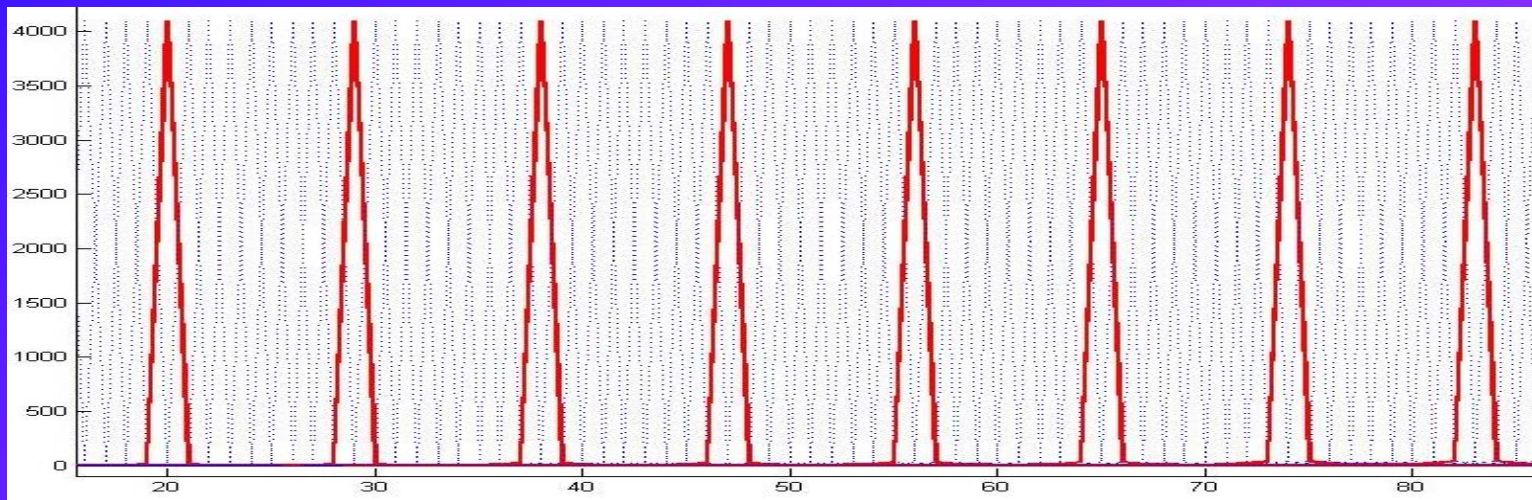
В ОмГТУ некоторое время тому назад был разработан OFDM модем, который может быть использован для передачи сообщений с высокой скоростью как в режиме ППРЧ, так и при связи с самолетами. Этот модем отличается от известных тем, что имеет вдоль оси частот малое расстояние между поднесущими и не требует преамбул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

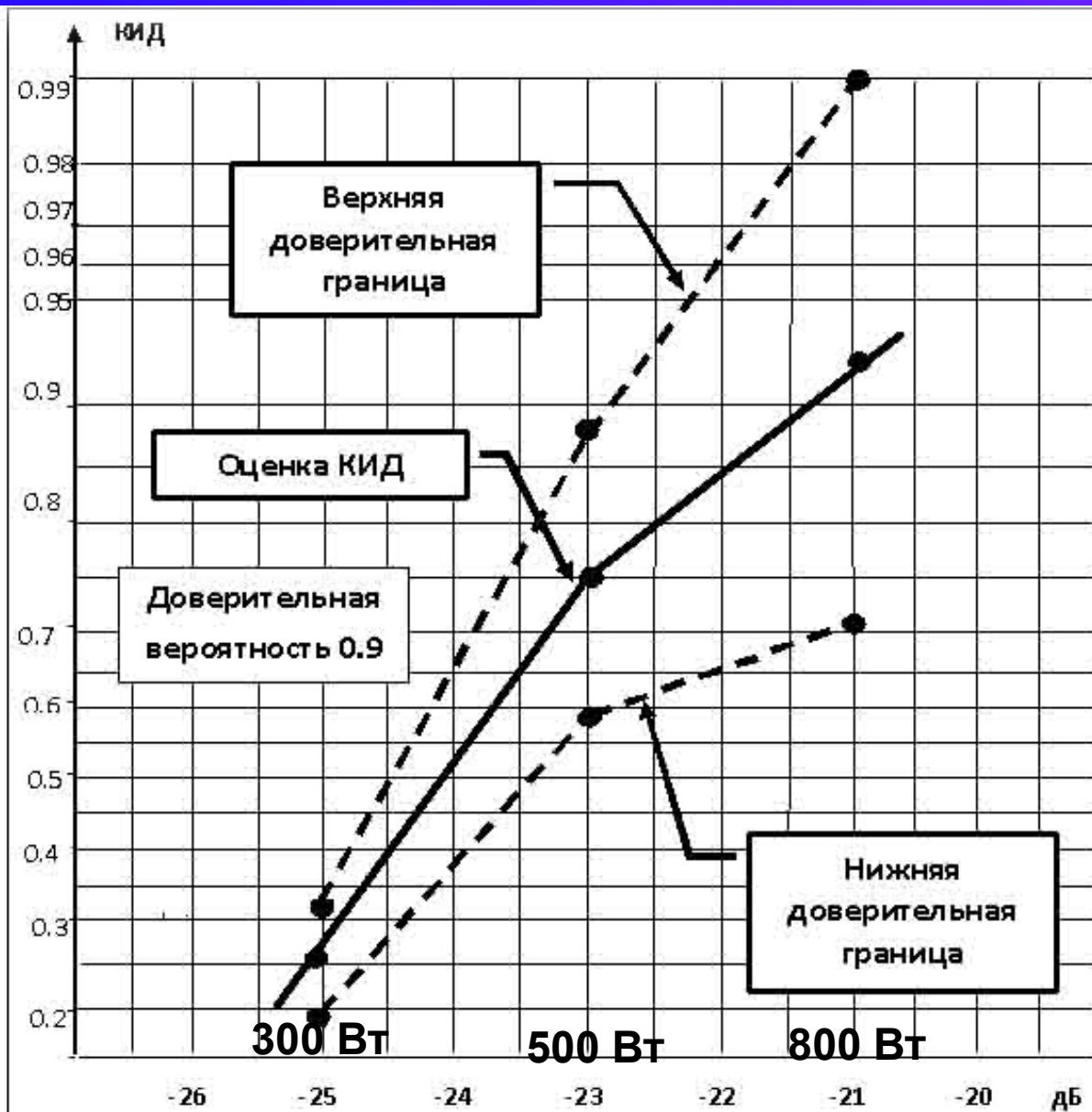
передатчик (трансивер BARRETT 2050) мощностью 125 Вт располагался, как показано на рисунке , в г. Омске. Антенна типа «ШТЫРЬ» длиной 1.5 м (BARRET 2019) располагалась на крыше 8-го корпуса ОмГТУ.

На приемной стороне:

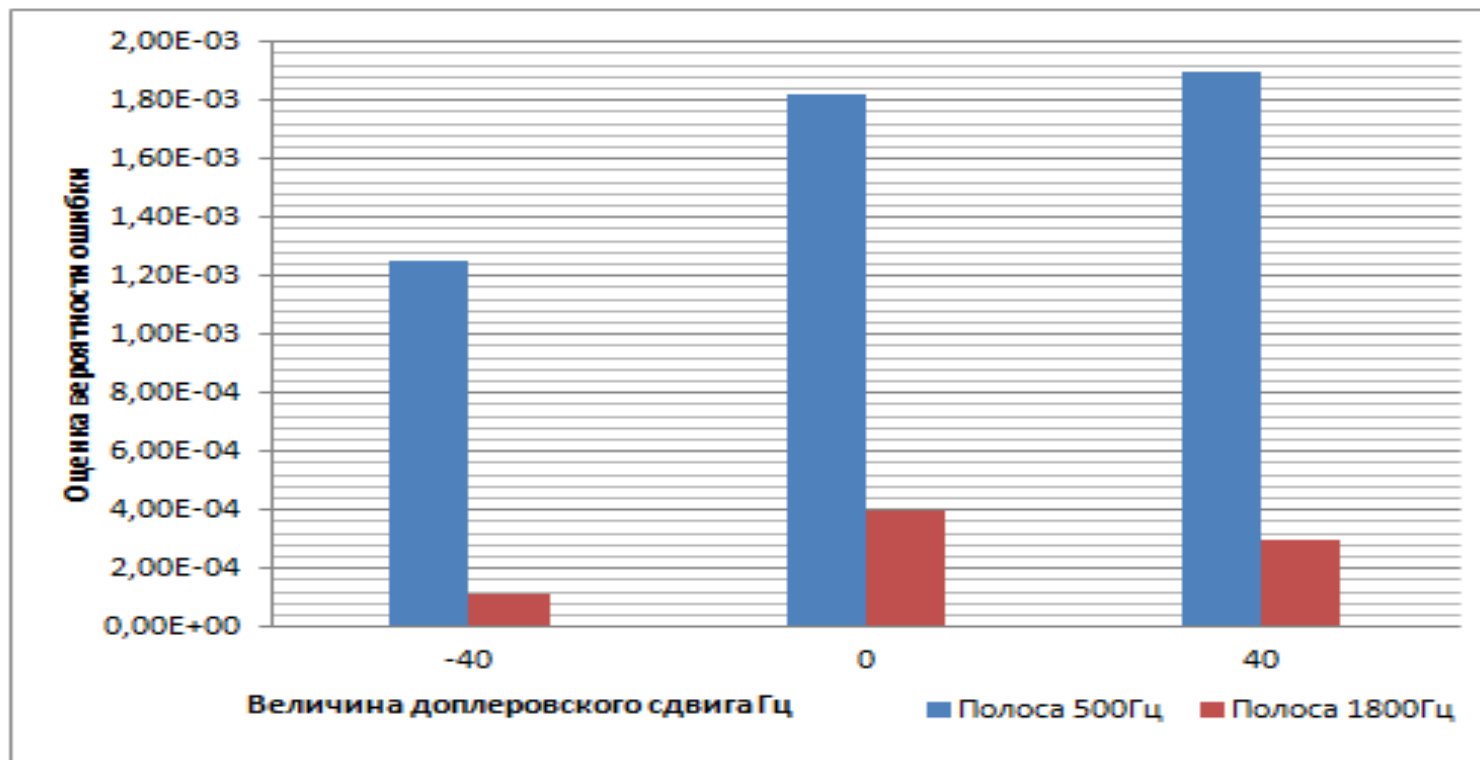
приемник (трансивер BARRETT 2050) и антенна Icom AN-710 находились на территории 6 НИУ НИЦ ЦНИИ ВВС МО РФ в г. Ногинске.

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

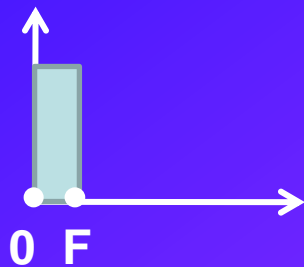
- *Для передачи сообщения в полосе двухполосного телефонного канала связи с информационной скоростью 9600 бит/с при работе с антенной полутораметровый «ШТЫРЬ» на односкачковой трассе с КИД равным 0.75 требуется передатчик мощностью порядка 500 Вт, а с КИД равным 0.9, соответственно, порядка 800 Вт.*

- **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.**

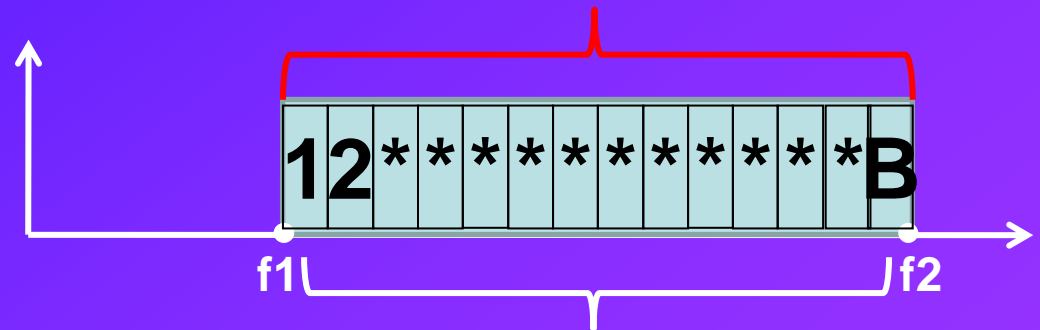
СКРЫТЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ OFDM МОДЕМА

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 скрытой, 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

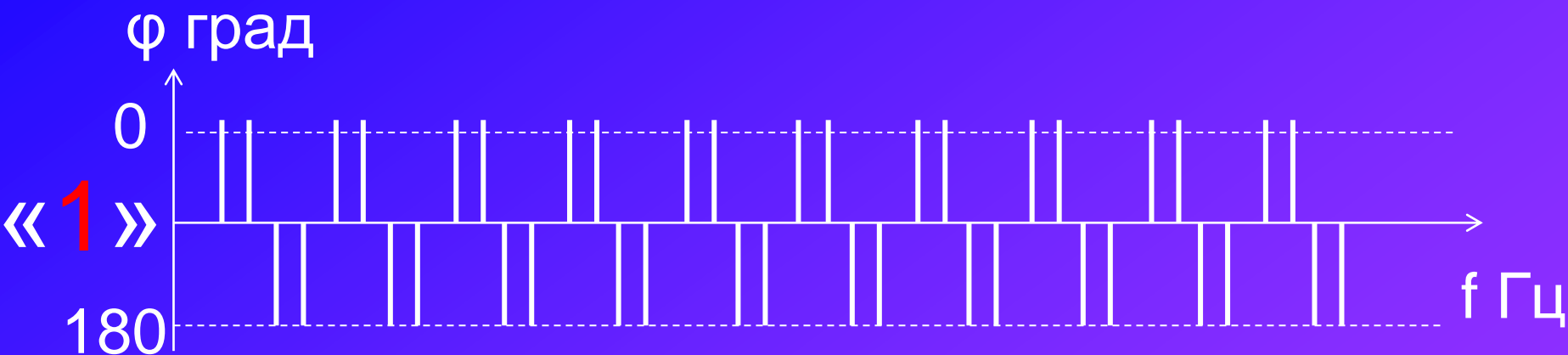


Спектр сигнала на выходе передатчика

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.**

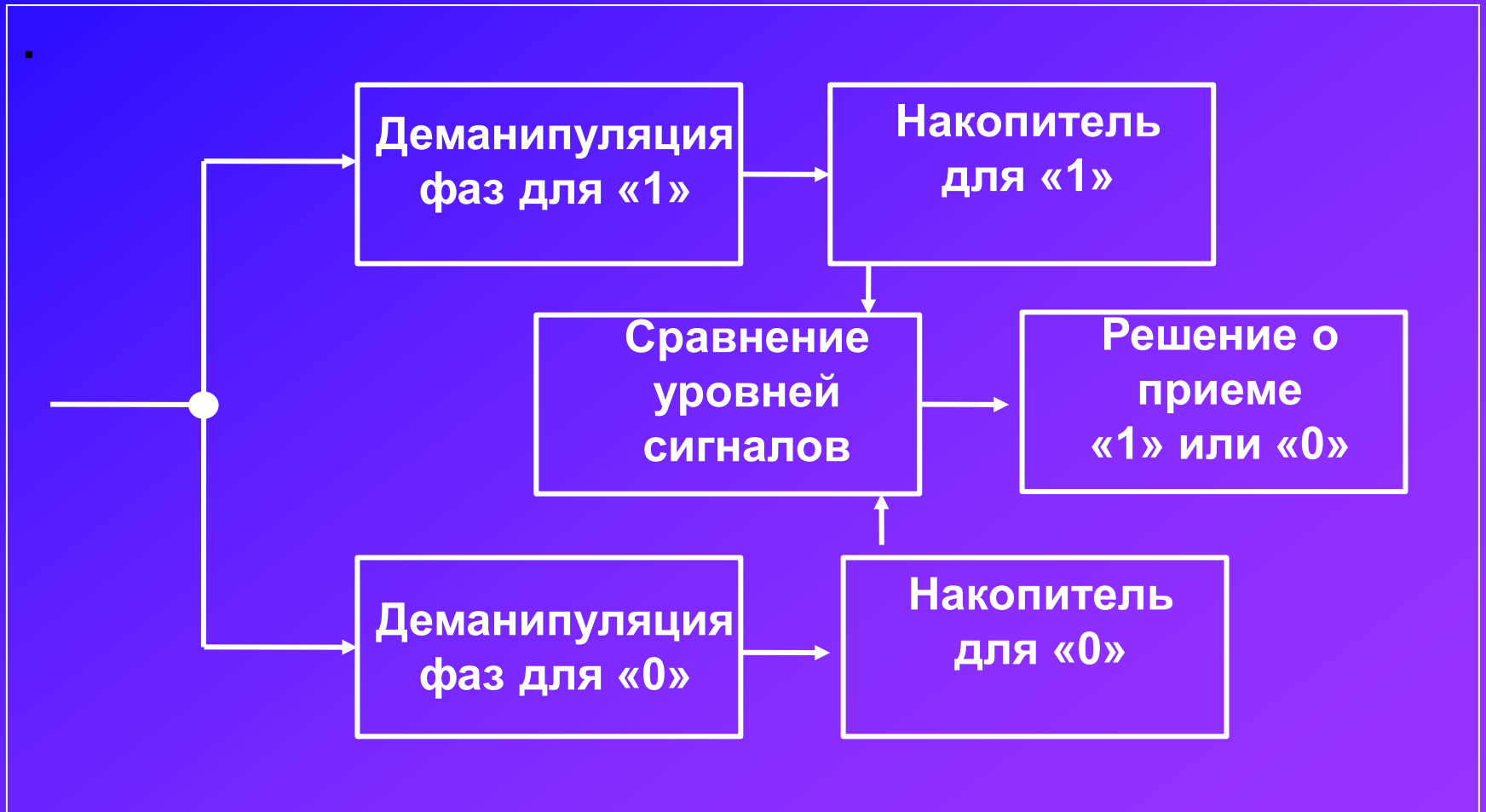
ПРИМЕР МАНИПУЛЯЦИИ ФАЗ ПОДНЕСУЩИХ СИГНАЛА С ОФДМ ВЗАИМНО ОТОГОНАЛЬНЫМИ БИНАРНЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ «1» И «0»



- *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.

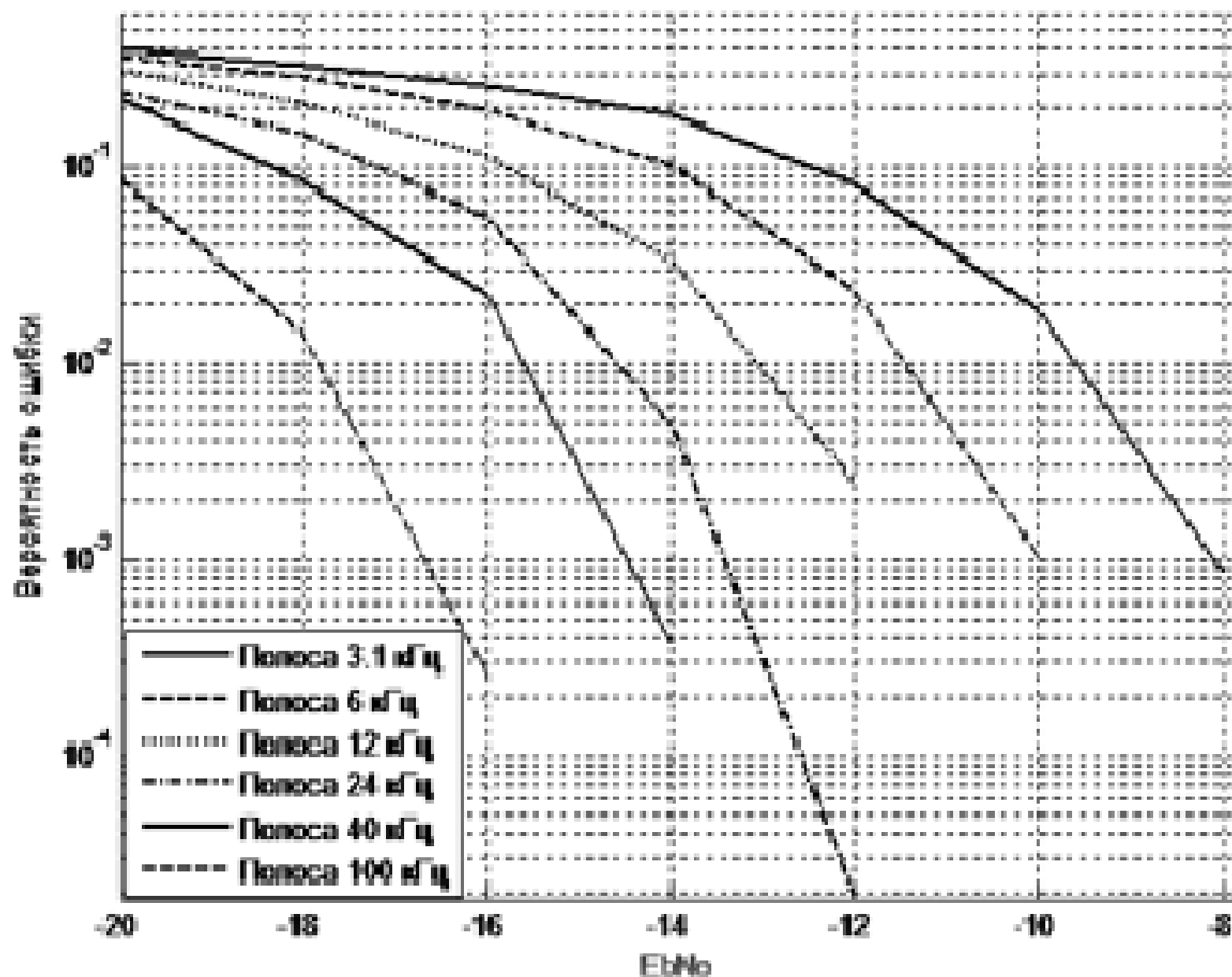
ДЕМОДУЛЯЦИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО OFDM СИГНАЛА



- **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.***

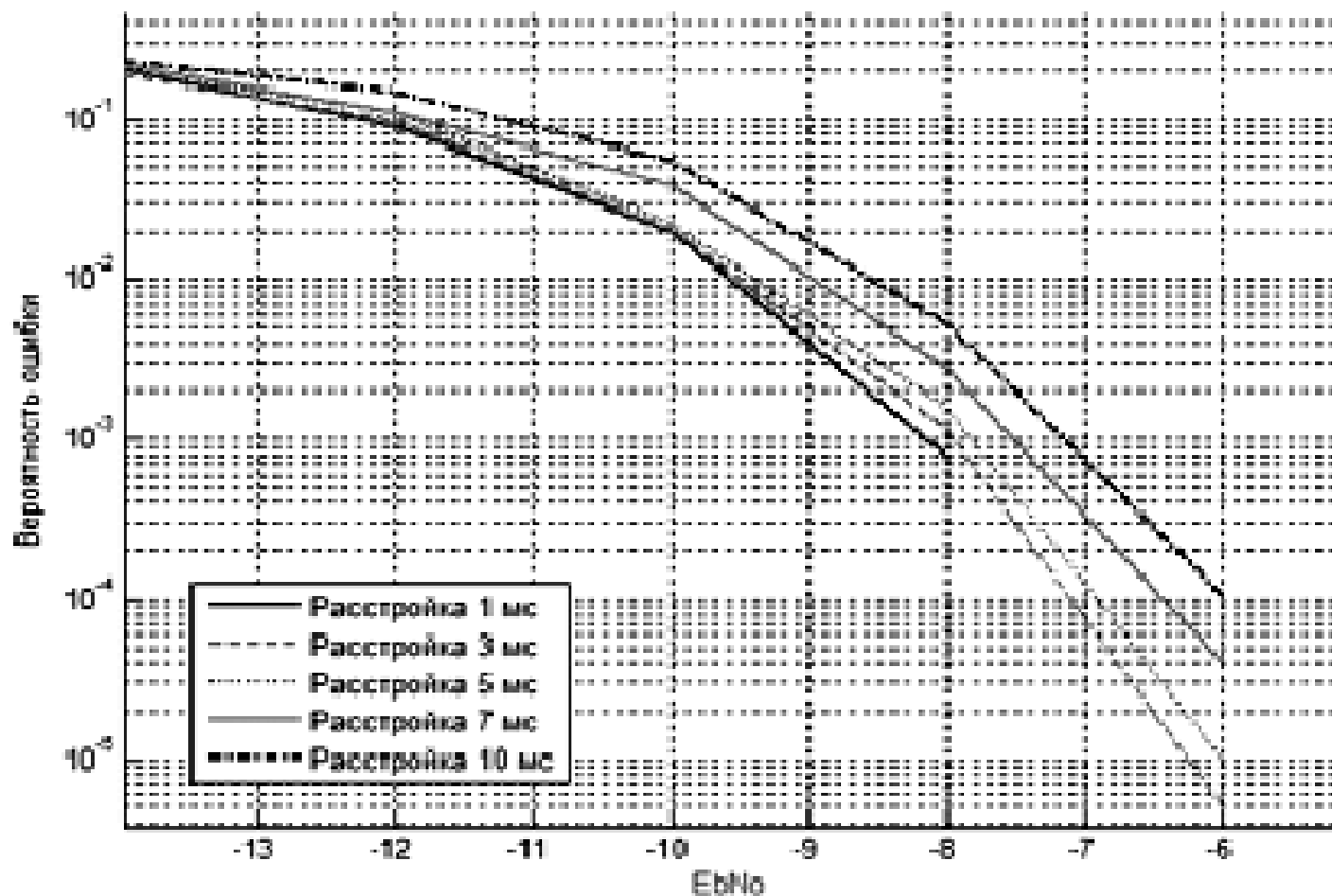
Кривые помехоустойчивости мультикодированного некоррелированного сигнала в АБШ канале 86кГц



- 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**

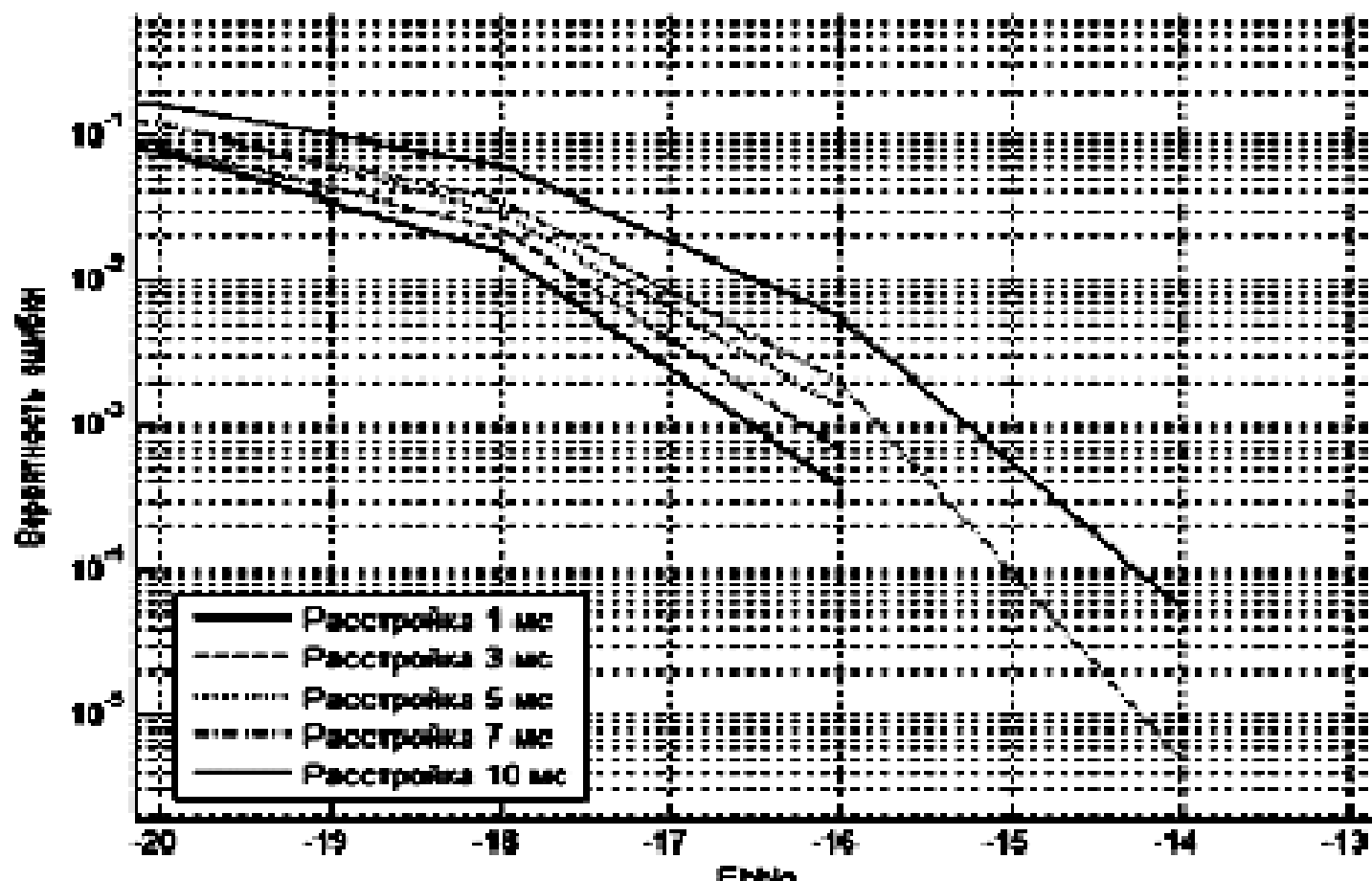
Кривые помехоустойчивости при некогерентном приеме сигналов с полосами пропускания 3100 Гц (база 387), в зависимости от от рассинхронизации по времени.

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

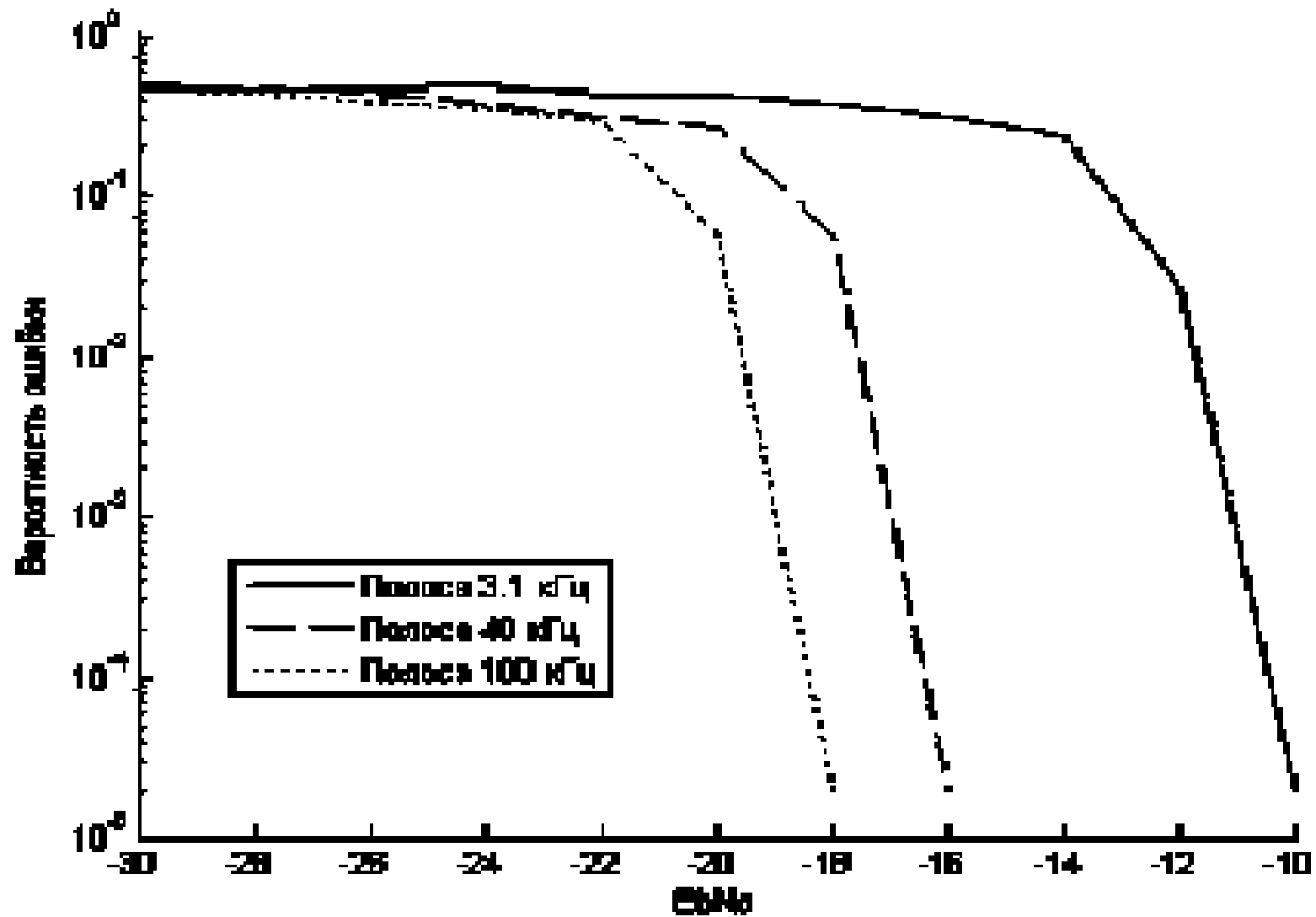


Кривые помехоустойчивости при некогерентном приеме сигналов с полосами пропускания 100000 Гц (база 12500), в зависимости от от рассинхронизации по времени.

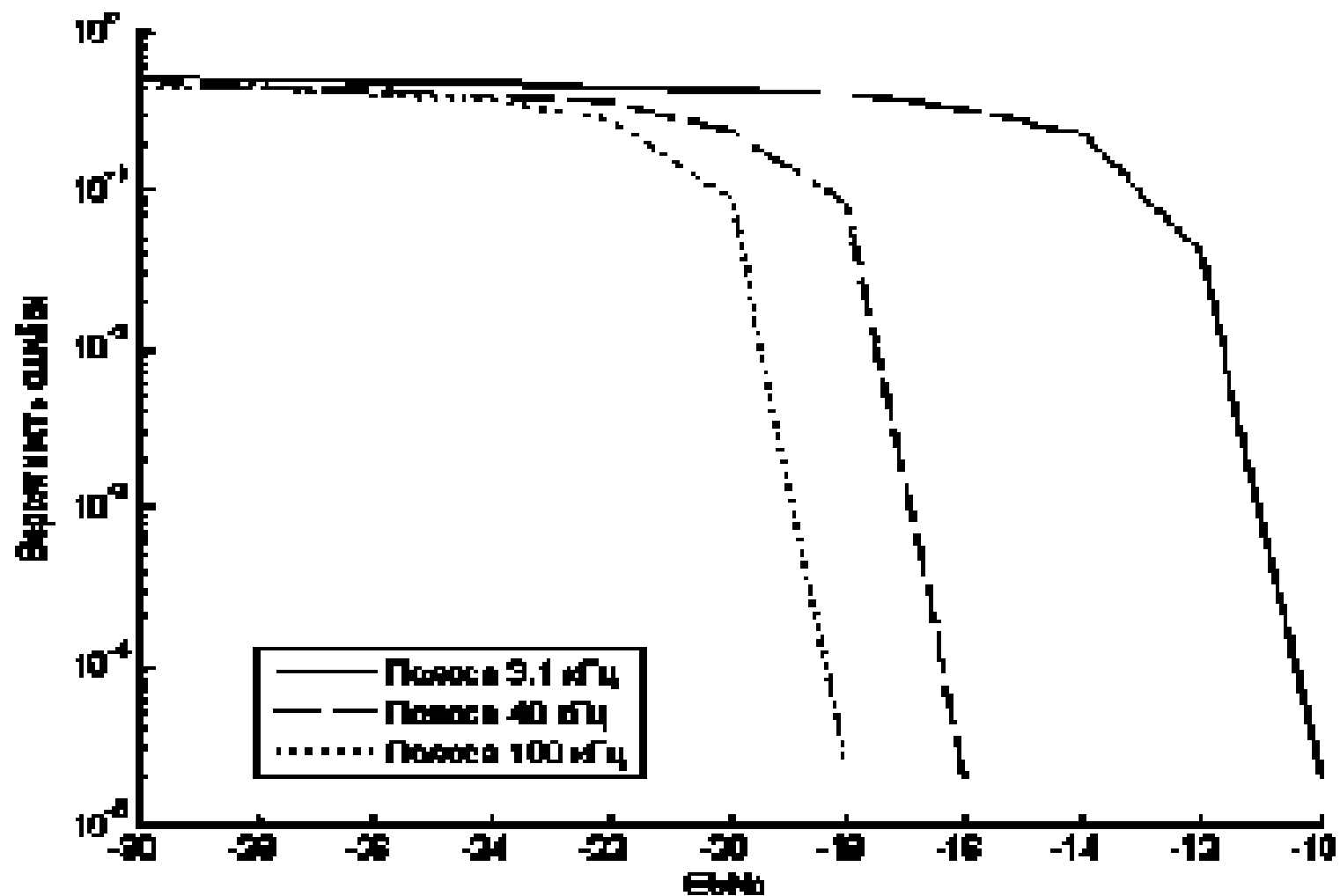
Кривые помехоустойчивости медленнодействующего некогерентного модема с полосой 100 кГц в АБПШ канала 56кбит/с



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

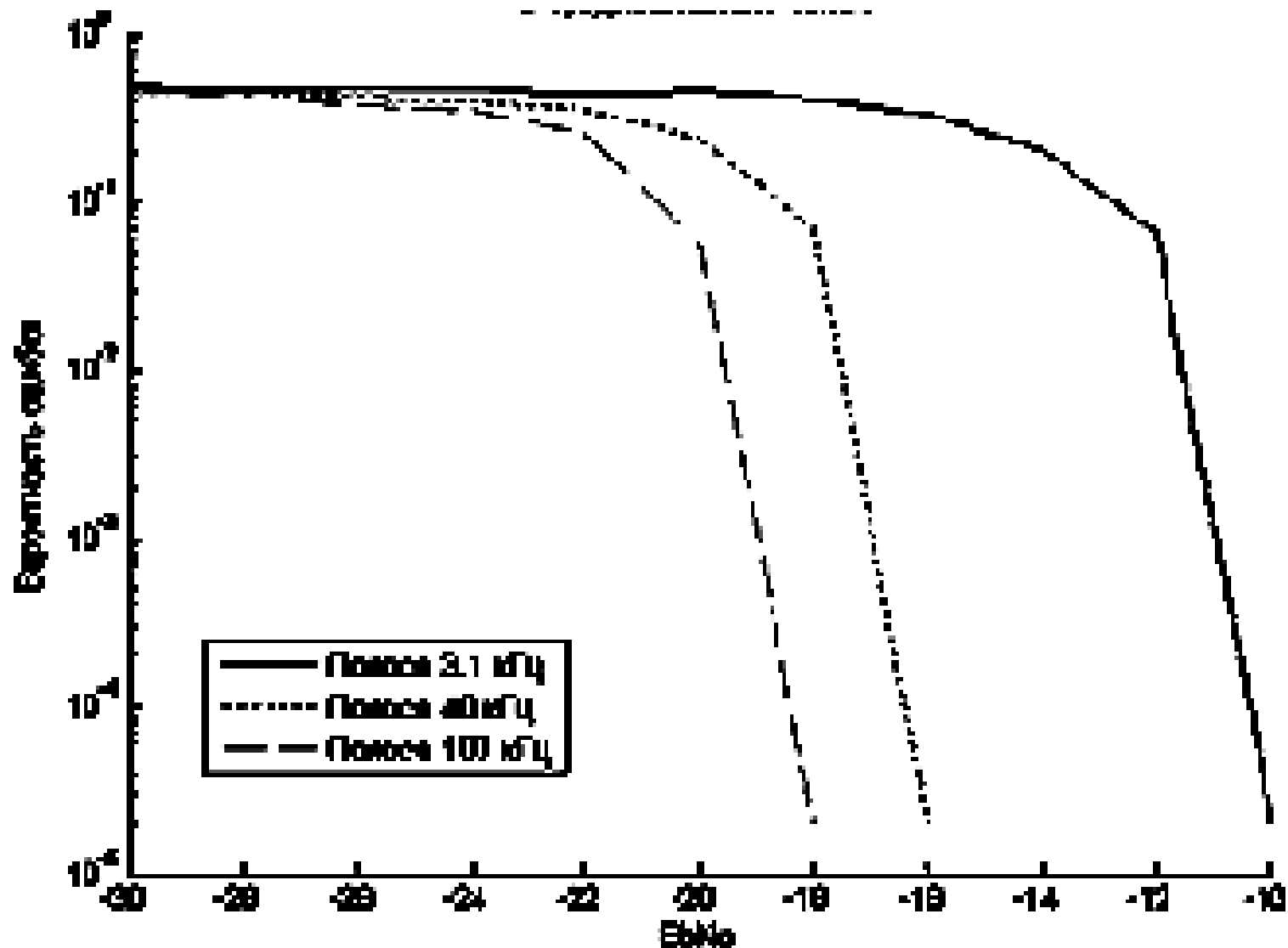


КВ канал радиосвязи со средним качеством при коде с избыточностью 100 %



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

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