

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)**

**А.М. ГОЛИКОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДУЛЯЦИЙ  
СОТОВОЙ СВЯЗИ FSK И MSK**

**Учебно-методическое пособие по лабораторной работе**

**Томск 2019**

**Голиков, А. М. Исследование цифровых модуляций сотовой связи FSK и MSK: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2019. — 24 с.**

В лабораторной работе производится исследование цифровых модуляций сотовой связи FSK и MSK на основе разработанной виртуальной лаборатории LabVIEW. Лабораторная работа предназначен для направления подготовки магистров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" по магистерским программам подготовки: "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Оптические системы связи и обработки информации", "Инфокоммуникационные системы беспроводного широкополосного доступа", "Защищенные системы связи", для направления подготовки магистров 11.04.01 "Радиотехника" по магистерской программе подготовки: "Радиотехнические системы и комплексы", "Радиоэлектронные устройства передачи информации", "Системы и устройства передачи, приема и обработки сигналов", "Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение" и специалитета 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиолокационные системы и комплексы", "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Радиоэлектронные системы космических комплексов", а также бакалавриата направления 11.03.01 "Радиотехника" (Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов), бакалавриата 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Системы мобильной связи, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Оптические системы и сети связи) и может быть полезна аспирантам.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>1 ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>2.Исследование многоуровневой частотной модуляции FSK ..</b>	<b>4</b>
<b>3.Исследование частотной модуляции с минимальным     фазовым сдвигом MSK .....</b>	<b>15</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>24</b>

## 1 Введение

При использовании программного обеспечения LabVIEW, были созданы две виртуальные измерительные лаборатории с различными видами модуляции сигнала FSK (Frequency Shift Keying) и MSK (Minimal Shift Keying) в каждой из которых можно применить предварительные фильтрации и получить другие подвиды GMSK или GFSK, если использовать фильтр Гаусса. Модуляция GMSK используется в сотовой связи стандарта GSM. Виртуальные лаборатории LabVIEW позволяют провести визуализацию сигнальных созвездий, глазковых диаграмм спектров сигналов, а также исследовать зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения сигнал/шум SNR для разных видов модуляции сигналов.

## 2 Исследование многоуровневой частотной модуляции FSK

Значениям «0» и «1» информационной последовательности соответствуют определённые частоты синусоидального сигнала при неизменной амплитуде. Частотная манипуляция весьма помехоустойчива, поскольку помехи телефонного канала искажают в основном амплитуду, а не частоту сигнала. Однако при частотной манипуляции неэкономно расходуется ресурс полосы частот телефонного канала. Поэтому этот вид модуляции применяется в низкоскоростных протоколах, позволяющих осуществлять связь по каналам с низким отношением сигнал/шум.

Существует также подвид этой модуляции GFSK. Принцип работы модулятора GFSK похож на FSK, за исключением того, что сначала полоса импульсов (-1, 1) проходит через фильтр Гаусса для сглаживания, что обеспечивает уменьшения ширины его спектра, а уже после попадает в FSK. Фильтрация Гаусса — один из самых распространенных способов уменьшения ширины спектра.

На рисунке ниже приведен график двоичной бинарной последовательности нулей и единиц и, соответствующий ему, график частотно-манипулированного сигнала. Низкому уровню бинарного двоичного сигнала соответствует частота 1 КГц, а высокому - частота 0,5 КГц несущего сигнала синусоидального типа.

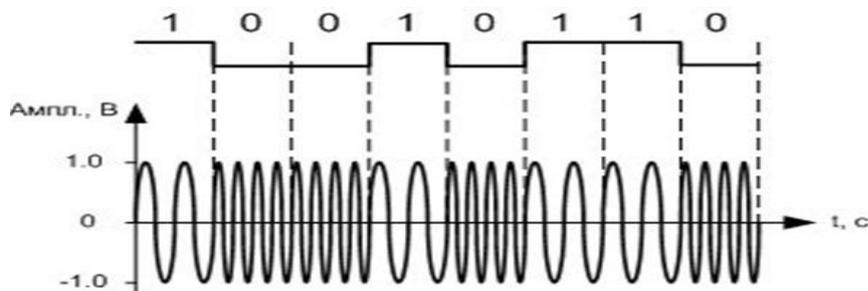


Рис. 1 – Частотная манипуляция

В программной комплексе можно осуществить многопозиционную частотную модуляцию (MFSK) задав в поле M-FSK нужный уровень от 2 до 64. В бинарной FSK модуляции, т.е. при  $M=2$ , два двоичных числа представляются сигналами двух различных частот, расположенных около несущей. Бинарная частотная модуляция менее восприимчива к ошибкам, чем амплитудная модуляция.

Более эффективной, но и более подверженной ошибкам, является схема многочастотной модуляции (Multiple FSK - MFSK), в которой используется более двух частот. В этом случае каждая сигнальная посылка представляет более одного бита. Переданный сигнал MFSK (для одного периода передачи сигнальной посылки) можно определить следующим образом:

$$s_i = A \cos(2\pi f_i t), \quad 1 \ll i \ll M$$

Здесь:

$$f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d,$$

где  $f_c$  - несущая частота;

$f_d$  - разностная частота;

$M$  - число различных сигнальных посылок  $= 2^L$ ;

$L$  - количество битов на одну сигнальную посылку.

На рис. 2.2 представлен пример схемы MFSK с  $M=4$ . Входной поток битов кодируется по два бита, после чего передается одна из четырех возможных двухбитовых комбинаций.

Для уменьшения занимаемой полосы частот в модуляторах сигналов с фазовой модуляцией применяют сглаживающие фильтры. Применение сглаживающих фильтров приводит к увеличению эффективности использования полосы, но в то же время из-за сглаживания уменьшается расстояние между соседними сигналами, что приводит к снижению помехоустойчивости.

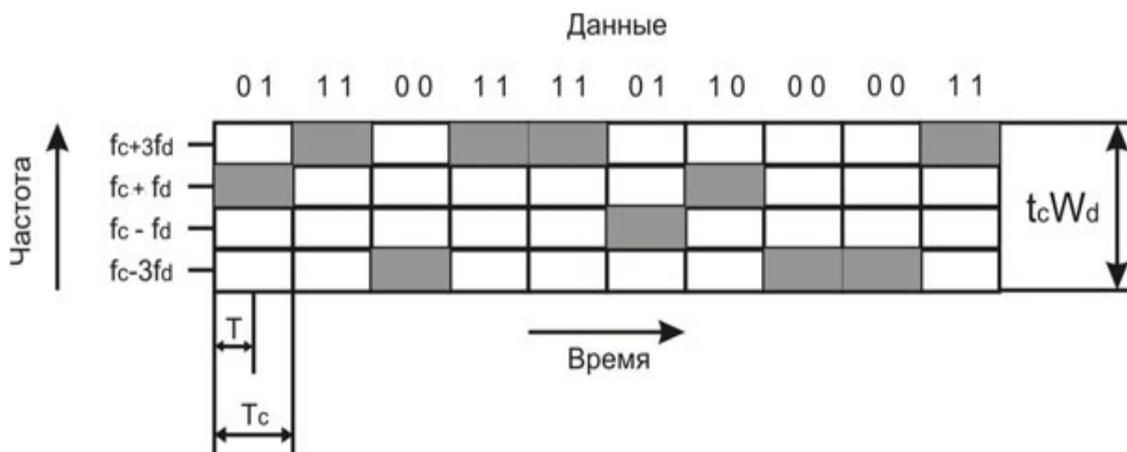


Рис. 2 - Использование частоты схемой MFSK, для  $M = 4$

Построение графиков глазковой диаграммы и ее вид дает много информации о джиттере сигнала, так же, как и о многих других его параметрах. На-

пример, множество отдельных фронтов и спадов говорит о вероятном присутствии джиттера, зависящего от данных.

Глазковая диаграмма не просто предоставляет множество информации, она удобна простотой применения и тем, что может применяться для измерений в любой цепи с реальными данными.



Рис. 3 - Параметры глазковой диаграммы

По индикаторной диаграмме можно выполнить ряд важных измерений:

- чем больше открыт глазок, тем легче различать логические 1 и 0;
- ширина открытия глазковой диаграммы (время между пересечениями линий логической 1 с логическим 0 и логического 0, с логической 1) показывает временной интервал, в течение которого сигнал может быть замерен без ошибки из-за межсимвольного влияния;
- псевдослучайной последовательности битов и отображения сигналов на запоминающем осциллографе получается структура, которая называется индикаторной (глазковой) диаграммой (eye diagram). Типичная индикаторная диаграмма приведена на рис. 3.
- высота открытия глазка измеряет запас помехоустойчивости на выходе приемника;
- ширина линий глазка к точкам пересечения в углах глазка является мерой флуктуации в системе передачи. Флуктуации вызываются разбросом времени включения и выключения лазера; искажением импульса оптическим волокном и шумом. Флуктуации выражаются в пикосекундах, градусах или в процентах интервала бита;
- толщина линий импульса наверху и внизу глазка пропорциональна шуму и искажениям в системе передачи; время перехода сигнала в схеме глазка с верхнего уровня (логического 0) в нижний (логическая 1) и наоборот указывает

времена подъема и спада системы передачи. Они обычно измеряются между отметками 10 и 90%;

- времена подъема и спада важны для оценки чувствительности системы к синхронизации замеров (sample timing). Чем больше времена подъема и спада сигнала, тем более чувствительна система к ошибкам синхронизации;

- чтобы обеспечить Системе максимальную невосприимчивость к шуму, лучшим временем для замеров уровня сигнала является время, когда высота открытия индикаторной диаграммы максимальна.

Джиттер или фазовое дрожание цифрового сигнала данных — нежелательные фазовые и/или частотные случайные отклонения передаваемого сигнала. Возникают вследствие нестабильности задающего генератора, изменений параметров линии передачи во времени и различной скорости распространения частотных составляющих одного и того же сигнала.

В цифровых системах проявляется в виде случайных быстрых изменений местоположения фронтов цифрового сигнала во времени, что приводит к рас-синхронизации и, как следствие, искажению передаваемой информации. Например, если фронт имеет малую крутизну или «отстал» по времени, то цифровой сигнал как бы запаздывает, сдвигается относительно значащего момента времени — момента времени, в который происходит оценка сигнала.

Джиттер является одной из основных проблем при проектировании устройств цифровой электроники, в частности, цифровых интерфейсов. Недостаточно аккуратный расчет джиттера может привести к его накоплению при прохождении цифрового сигнала по тракту и, в конечном счёте, к неработоспособности устройства.

Причины возникновения джиттера:

- 1) фазовые шумы петли ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты) устройства, синхронизируемого внешним сигналом. Джиттер, вызываемый ФАПЧ, проявляется при прослушивании материала с записывающего устройства, синхронизируемого от воспроизводящего устройства.

- 2) АЦП. В современных цифровых системах звукозаписи и воспроизведения основным источником джиттера является АЦП. Нынешние полностью цифровые студийные синхронизаторы достаточно совершенны и часто вносят джиттер меньший, чем АЦП.

## Описание прибора с FSK манипуляцией

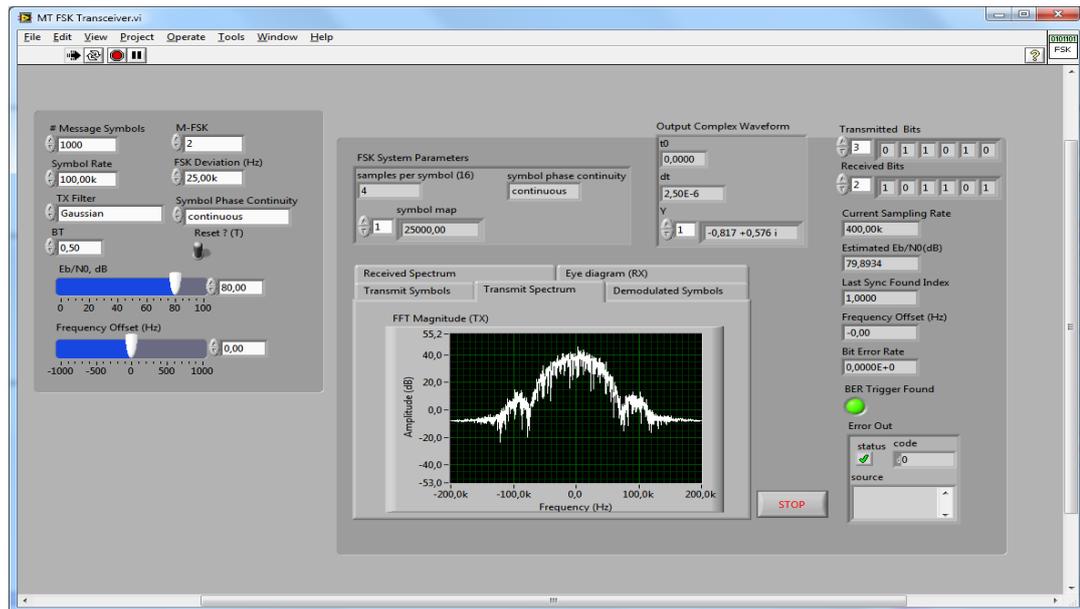


Рис. 4 - Интерфейс прибора для FSK модуляции

Сравним спектры и помехоустойчивость сигналов с разными видами модуляции при использовании фильтров и без фильтра.

1) Без фильтра (при соотношении сигнал\шум = 80 дБ):

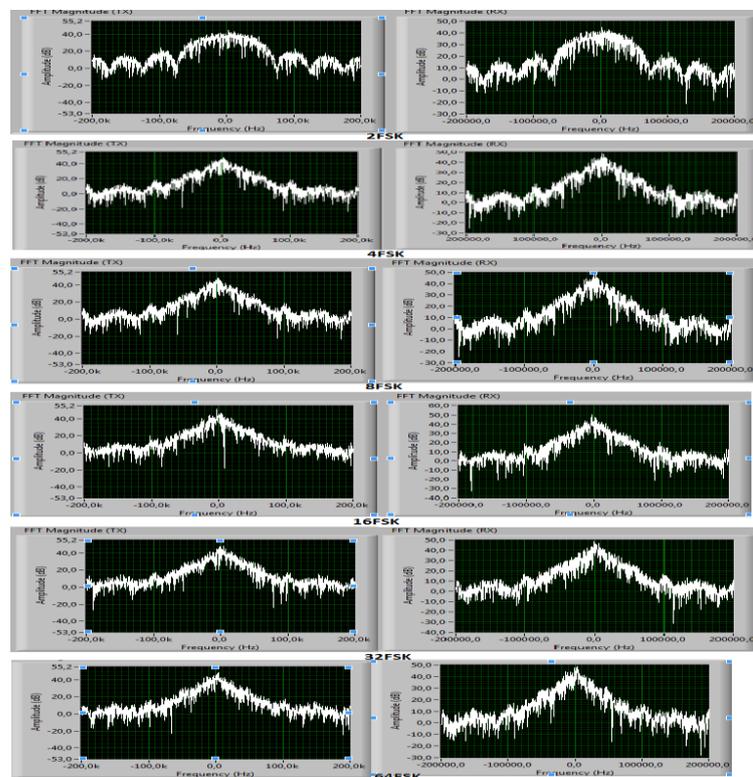


Рис. 5 - Спектры переданного(слева) и принимаемого(справа) сигнала для разных видов модуляции

Как видно из рисунка 5, спектр почти не изменился, но в нем присутствует высокий уровень боковых лепестков, что может повлиять на соседние каналы, также придется выделить более широкий канал в линии передачи, что не всегда является позволительным и выгодным.

Без использования фильтра в сигнал не вносятся дополнительные искажения следовательно джиттер и помехи минимальны. Это видно из глазковой диаграммы (рисунок 6).

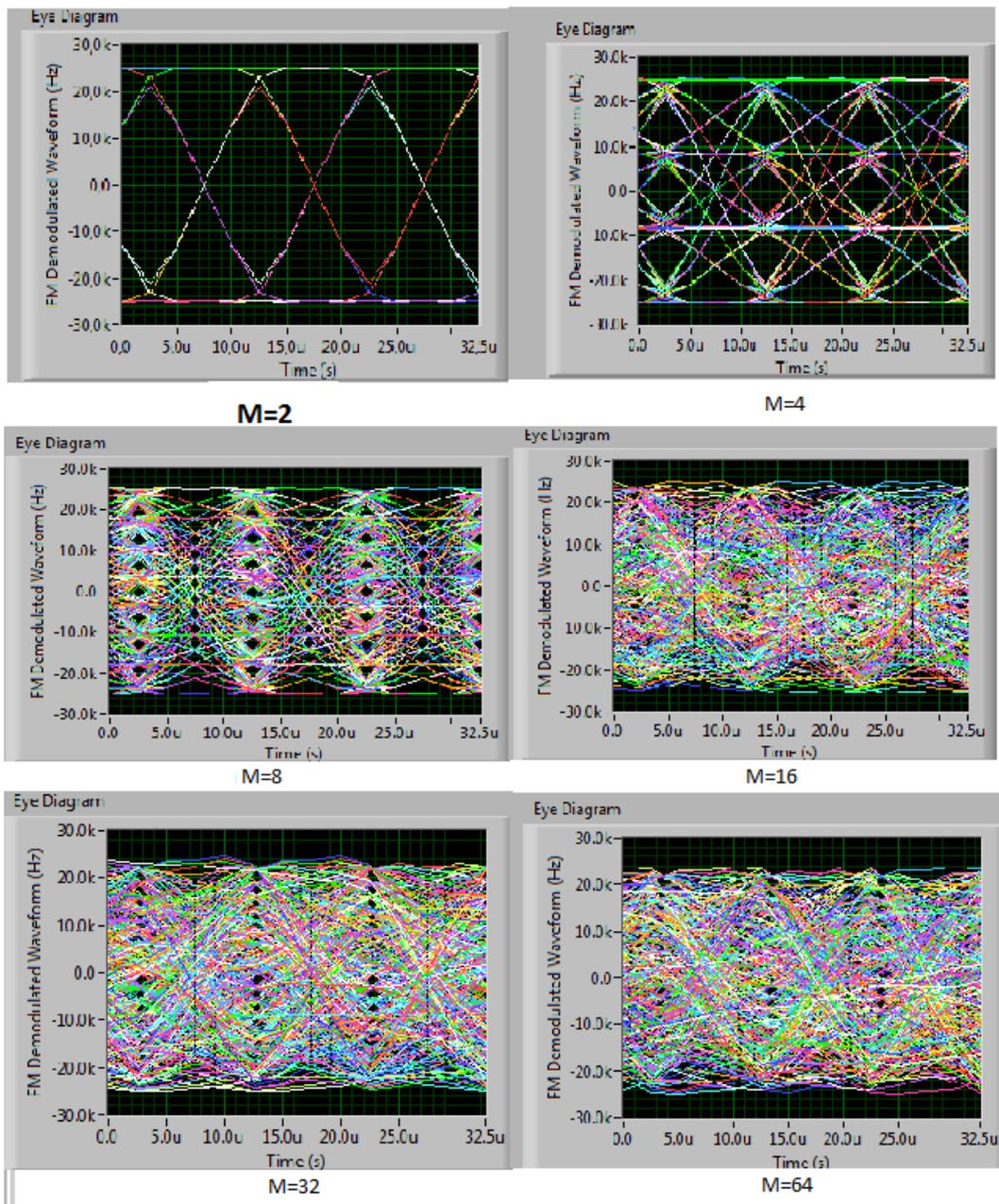


Рис. 6 - Глазковые диаграммы сигналов с разными уровнями FSK модуляции

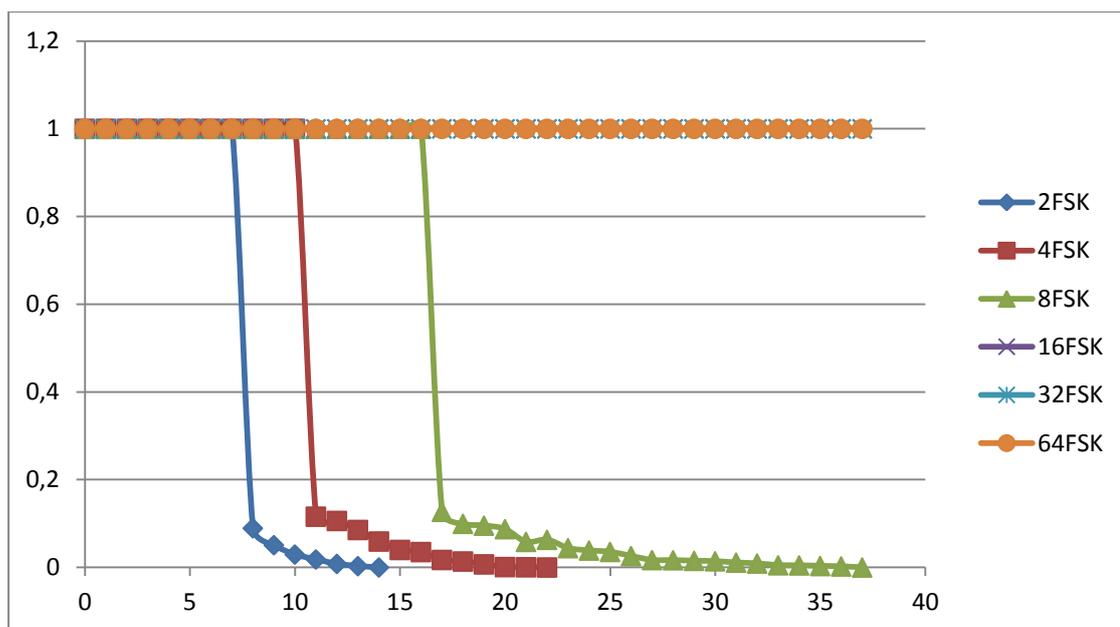


Рис. 8 - График зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для разных видов модуляций: 2,4,8,16,32,64 FSK фильтра

### Использование фильтра Гаусса

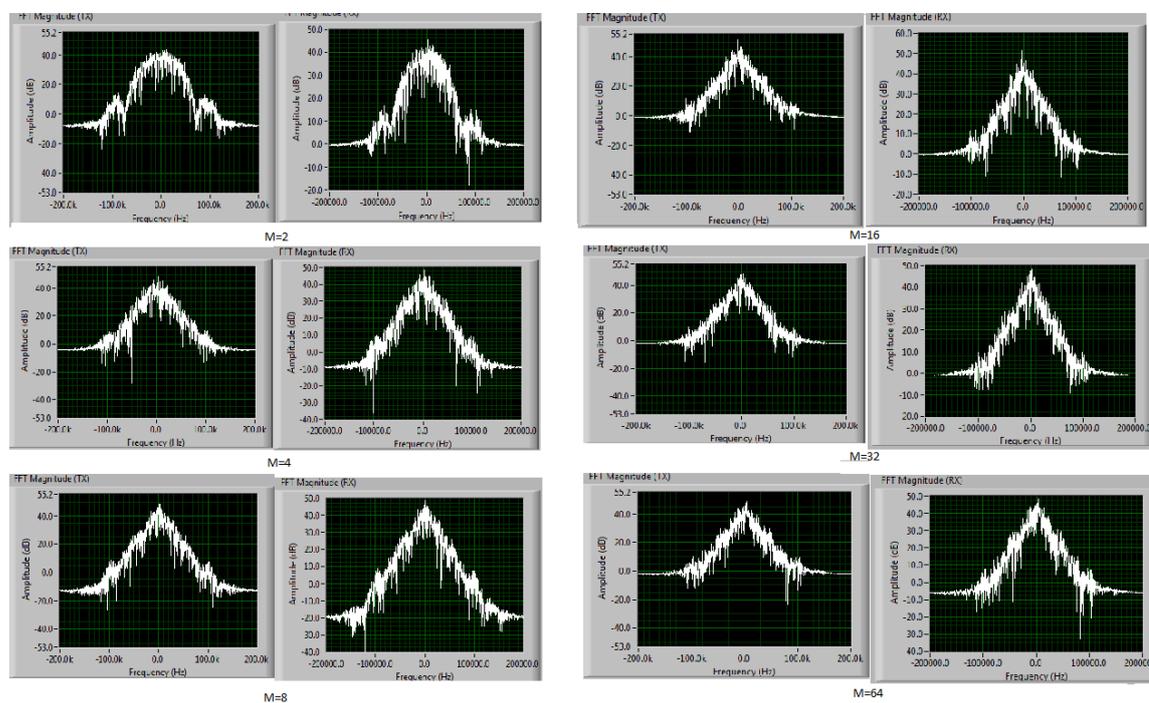


Рис. 9 - Спектры переданного(слева) и принимаемого(справа) сигнала при использовании разных видов модуляций

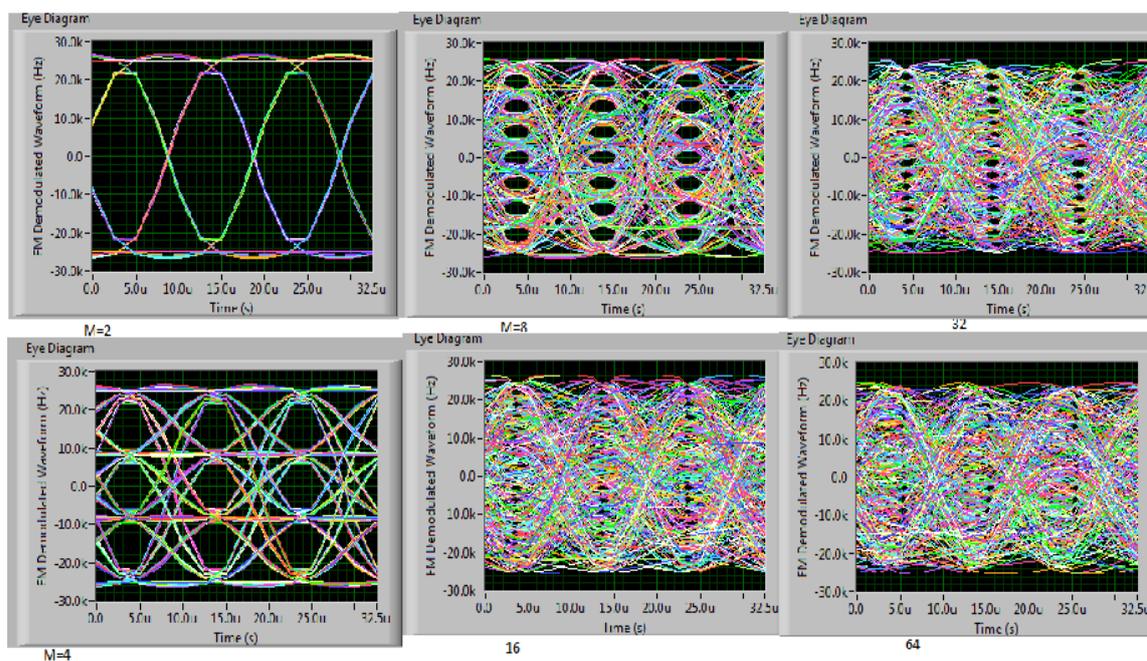


Рис. 10 – Глазковые диаграммы для разных уровней модуляции 2,4,8,16,32,64 FSK

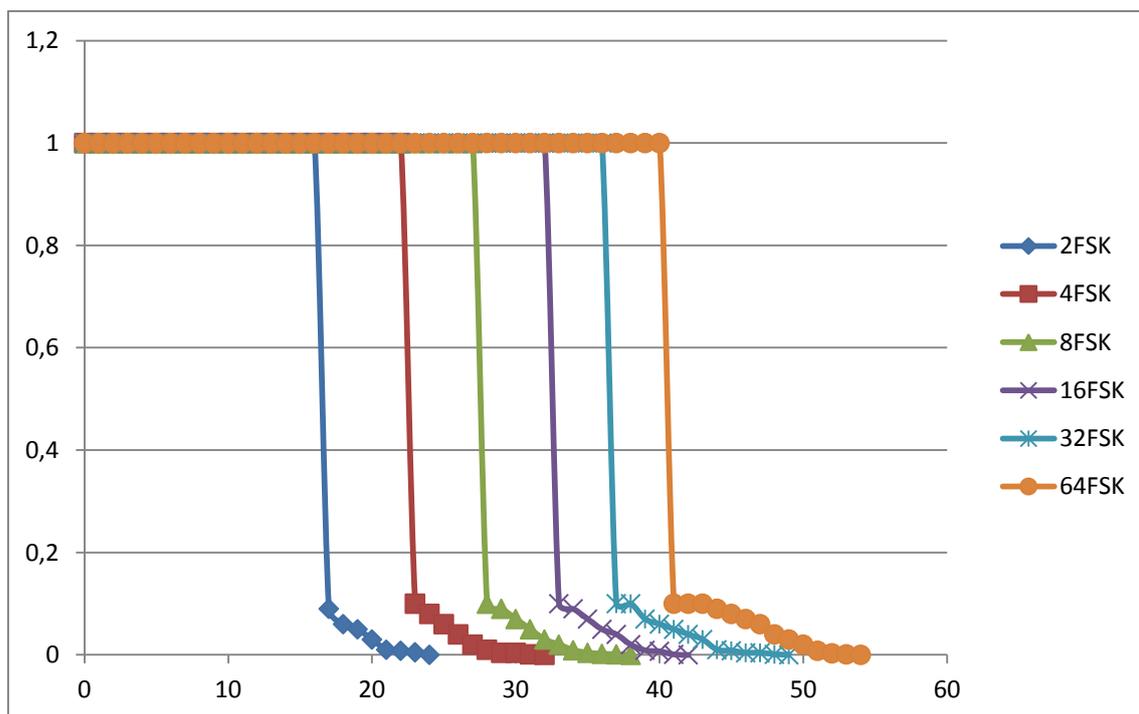


Рис. 11 - График зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для разных видов модуляций MFSK с использованием фильтра Гаусса

## Использование фильтра приподнятый косинус (Raised Cosine)

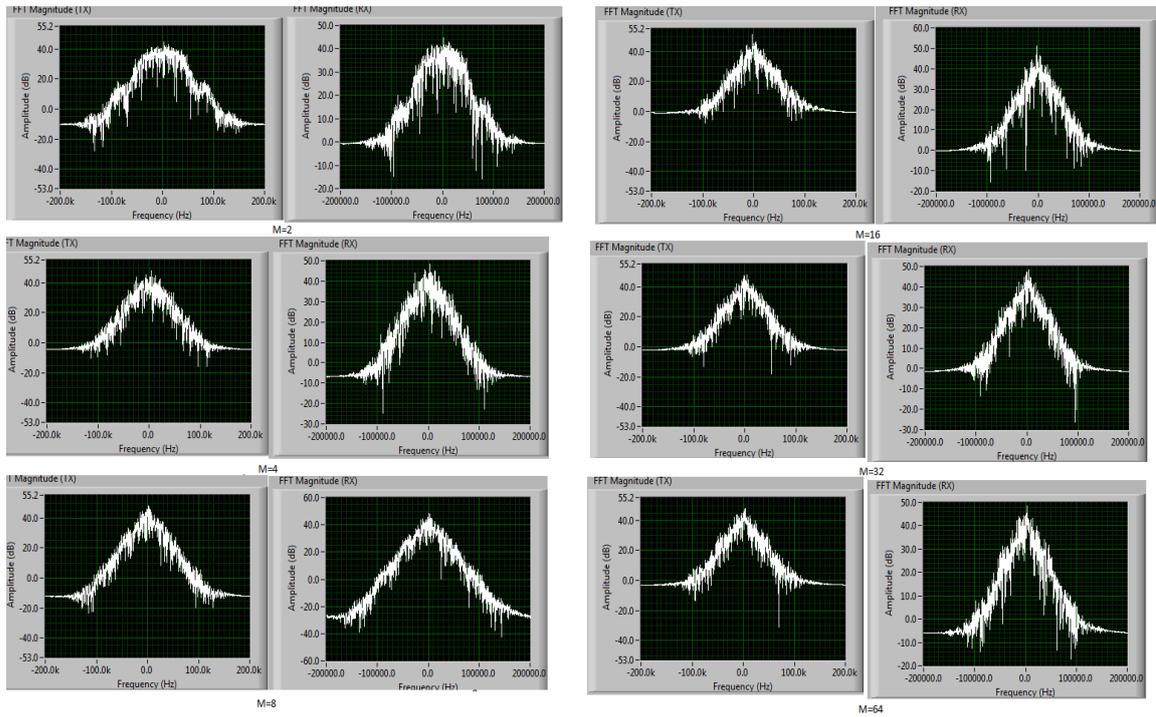


Рис. 12 – Спектры переданных и принятых сигналов при использовании фильтра Raised Cosine

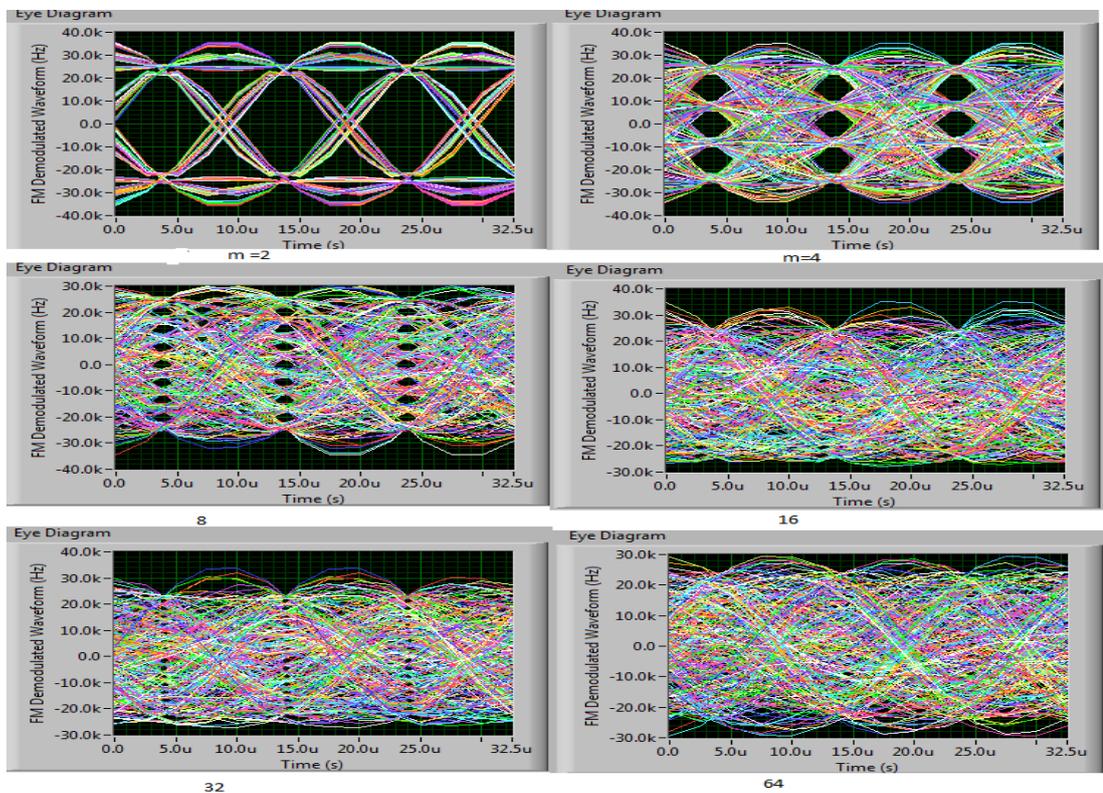


Рис. 13 – Глазковые диаграммы для модуляций 2,4,8,16,32,64 FSK

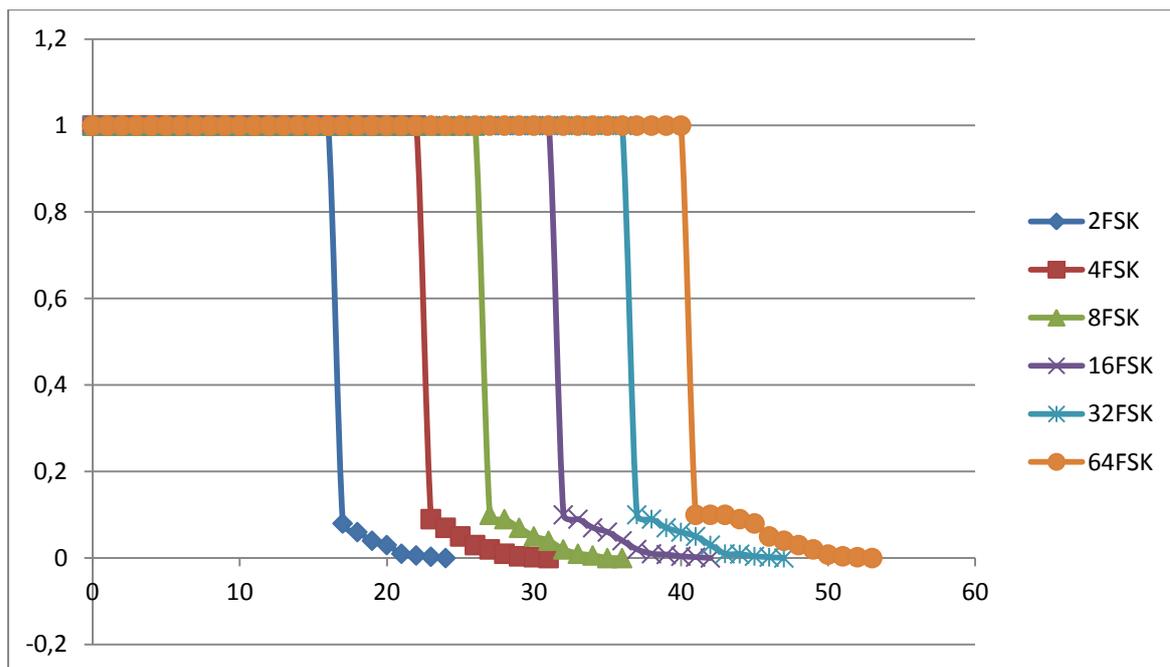


Рисунок 2.14 - График зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для разных видов модуляций MFSK с использованием фильтра Raised Cosine

### Использование фильтра Root Raised Cosine

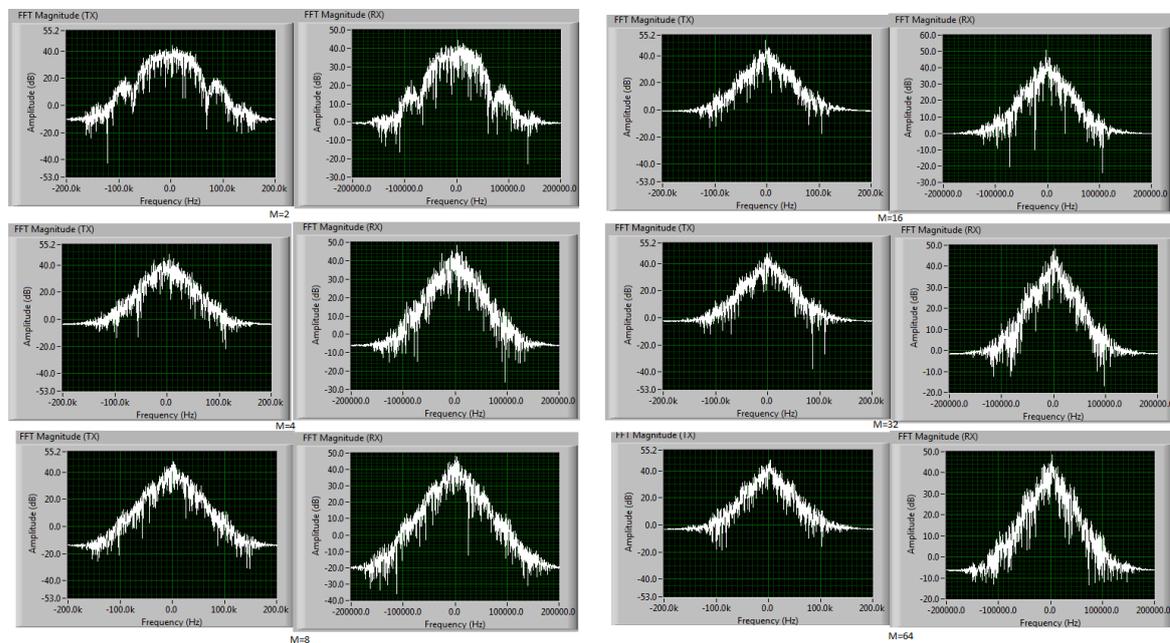


Рис. 15 – Спектры переданных и принятых сигналов при использовании фильтра Root Raised Cosine

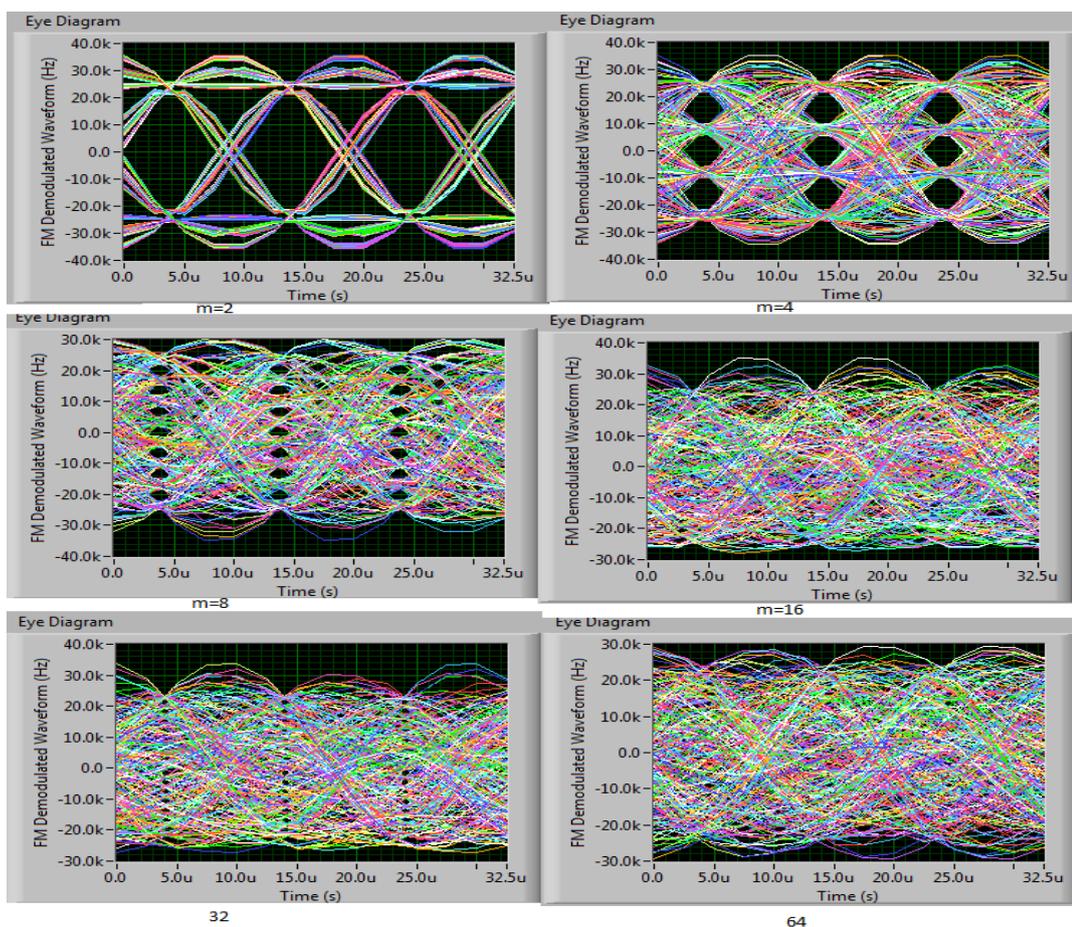


Рис. 16 – Глазковые диаграммы для модуляций 2,4,8,16,32,64 FSK

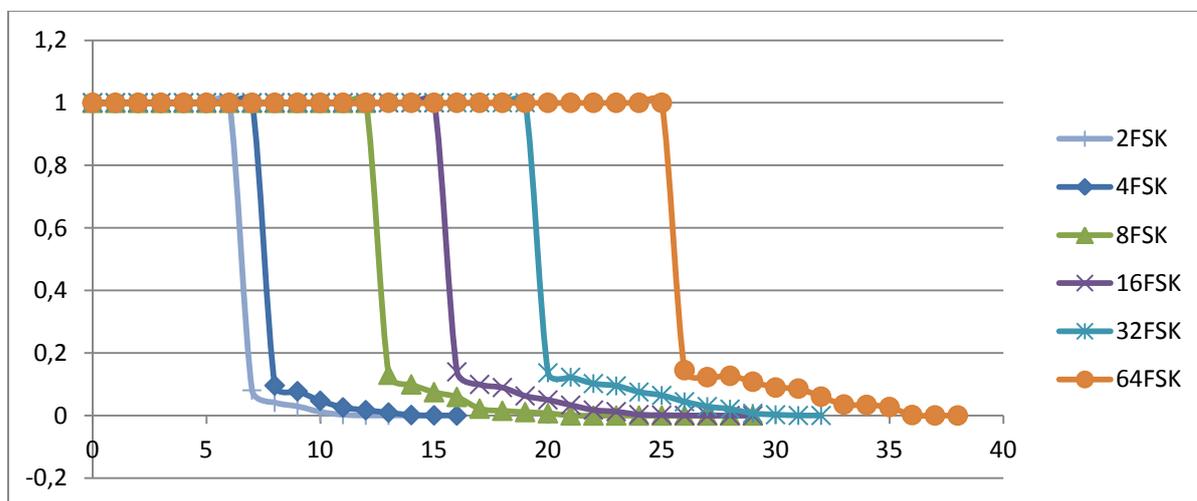


Рис.17 - График зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для разных видов модуляций FSK с использованием фильтра Root Raised Cosine

Продемонстрируем осциллограммы переданного и принятого восстановленного сигналов.



На рисунках 20 – 23 представлены передаваемые и полученные сигнальные созвездия, фазовые диаграммы и спектры сигналов и глазковые диаграммы при использовании разных фильтров.

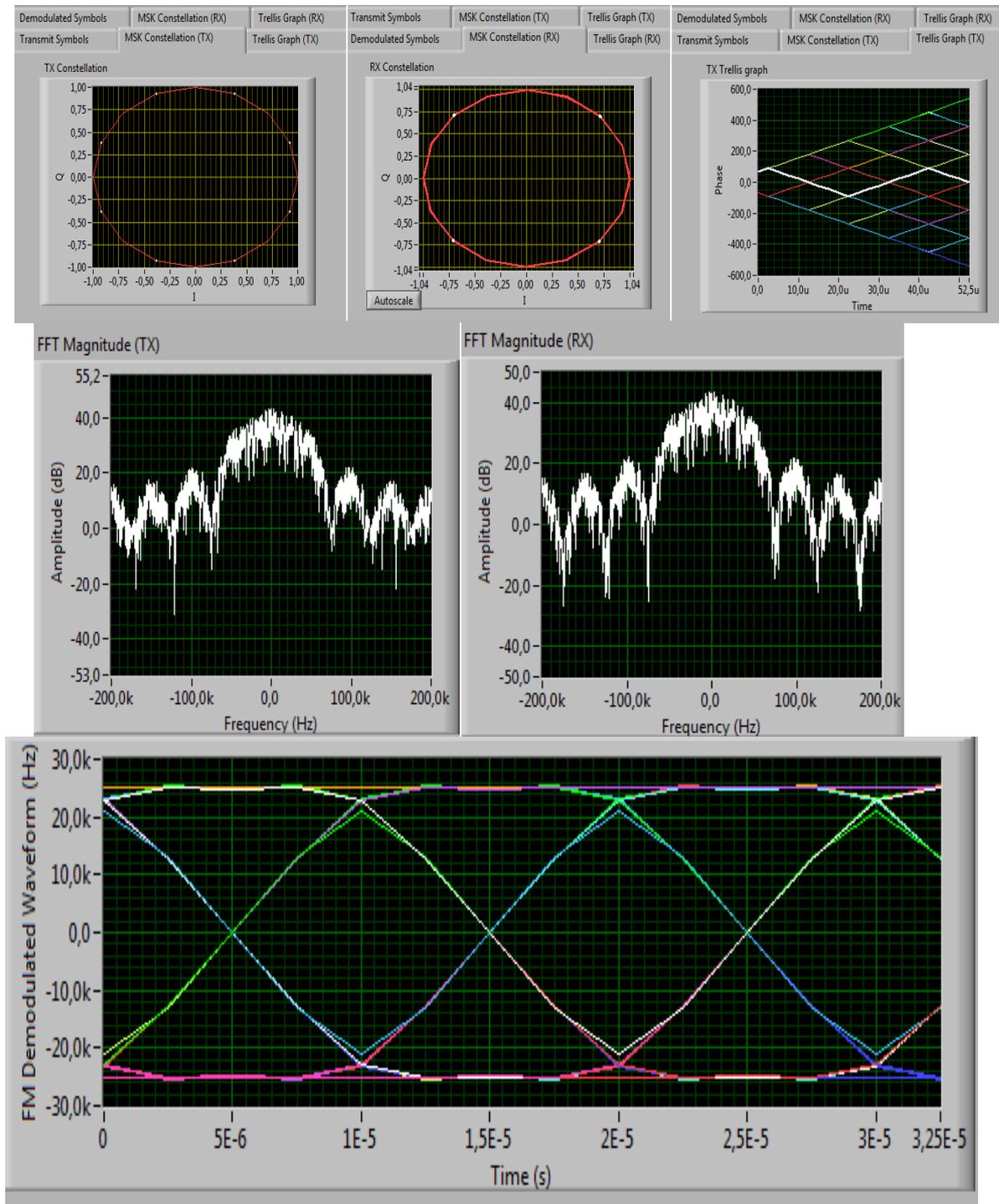


Рис. 20 - Передаваемые и полученные сигнальные созвездия, фазовые диаграммы и спектры сигналов без использования фильтра

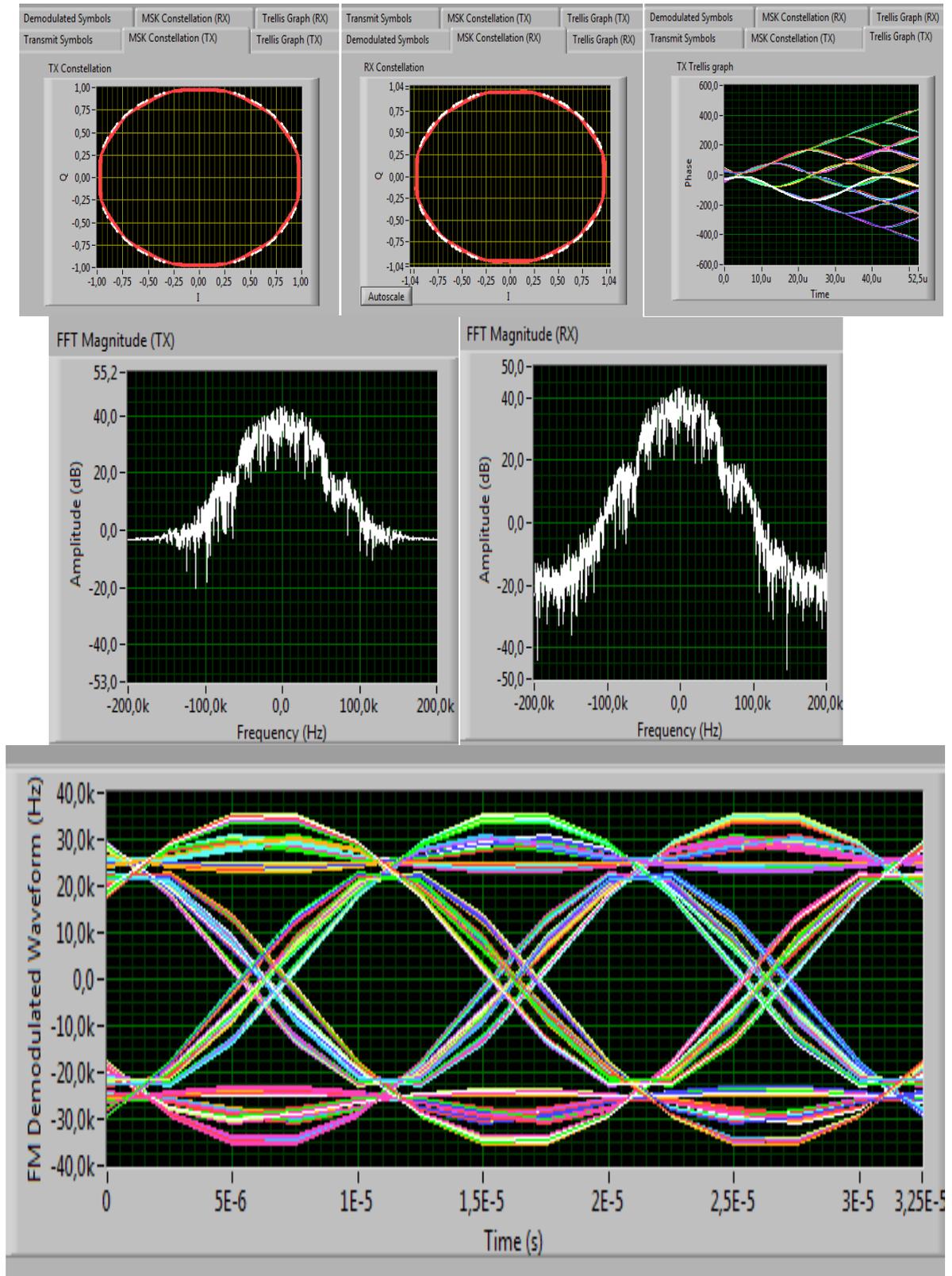


Рис. 21 - Передаваемые и полученные сигнальные созвездия, фазовые диаграммы и спектры сигналов с использованием фильтра Raised Cos

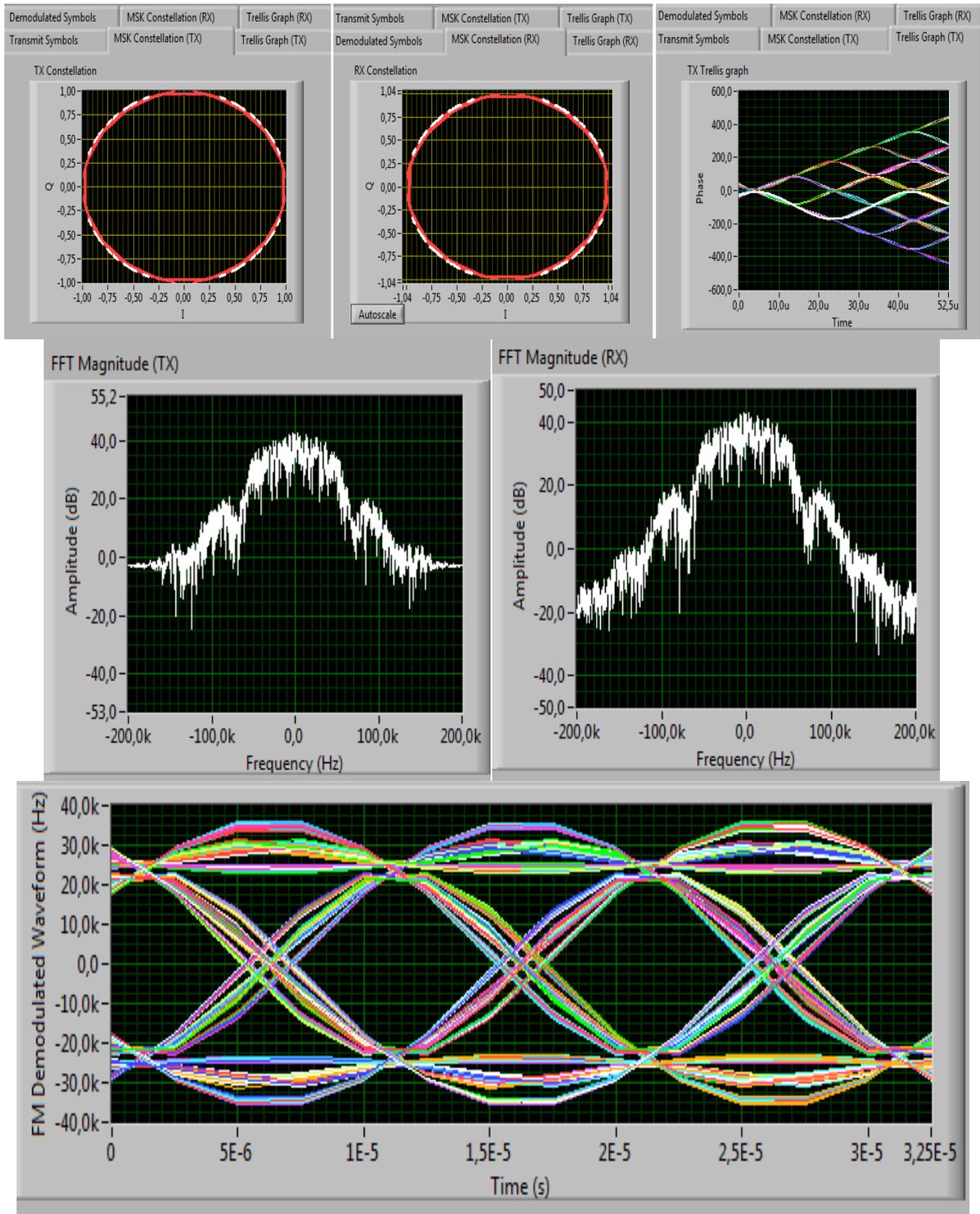


Рис. 22 - Передаваемые и полученные сигнальные созвездия, фазовые диаграммы и спектры сигналов с использованием фильтра Root Raised Cos

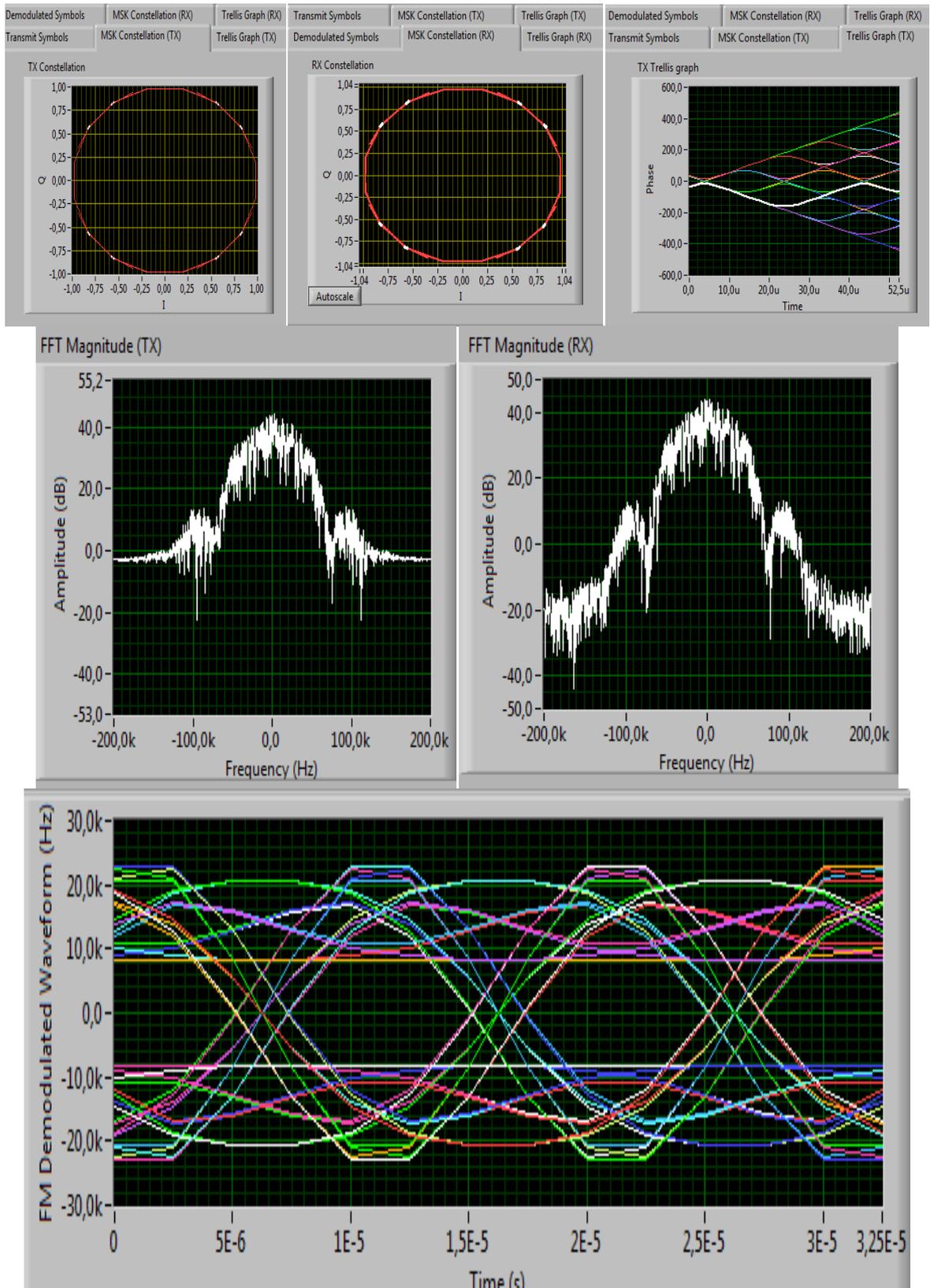


Рис. 23 - Передаваемые и полученные сигнальные созвездия, фазовые диаграммы и спектры сигналов с использованием фильтра Gauss

Установим уровень сигнал/шум в максимальное положение и применим фильтр Gauss. Меняя значение BT от 0,1 до 1, проследим изменения спектра сигнала, глазковой диаграммы, сигнального созвездия и фазовой диаграммы.

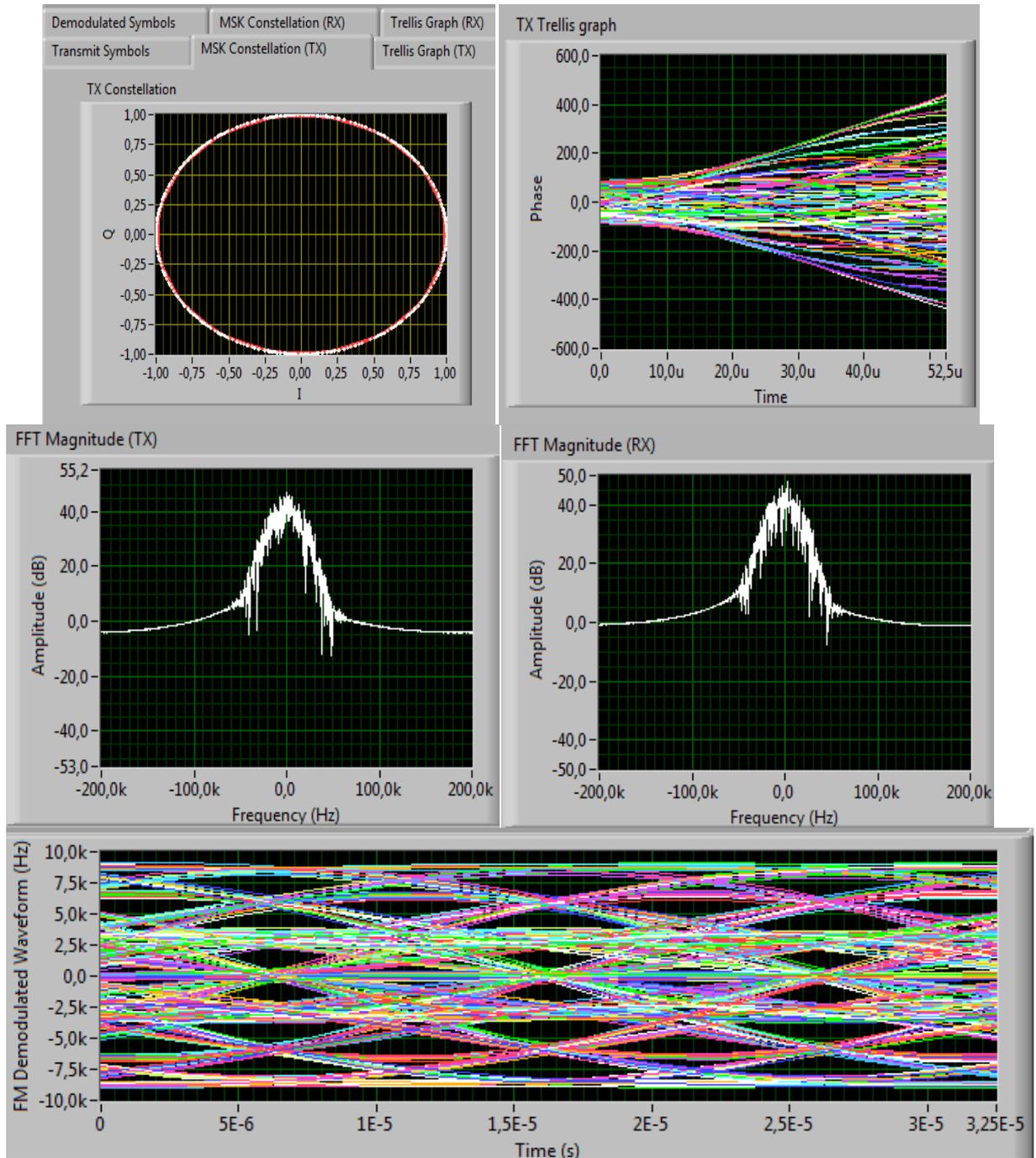


Рис. 24 - Спектр сигнала, глазковая диаграмма, сигнальное созвездие, фазовая диаграмма при BT=0,1

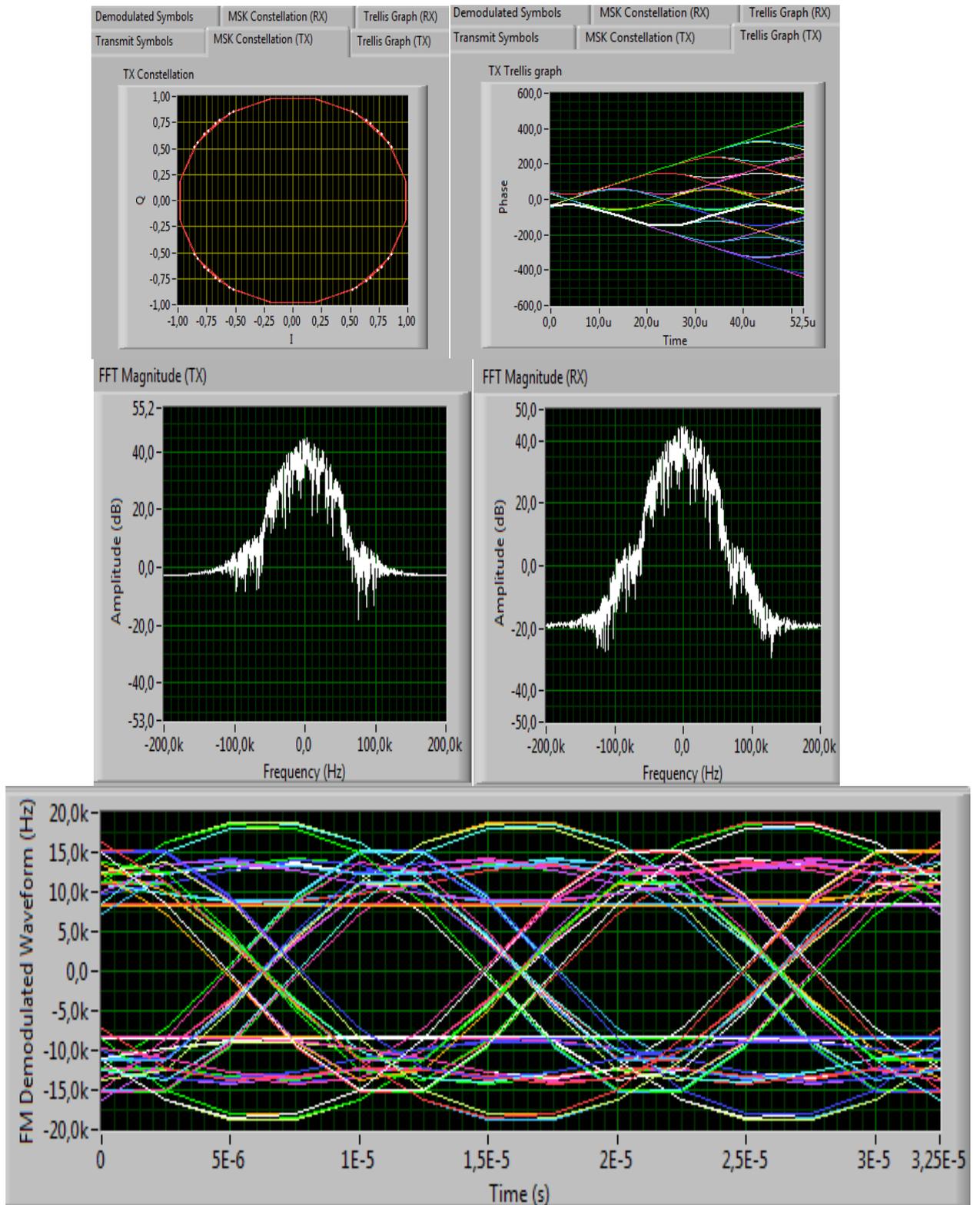


Рис. 25 - Спектр сигнала, глазковая диаграмма, сигнальное созвездие, фазовая диаграмма при  $BT=0,3$

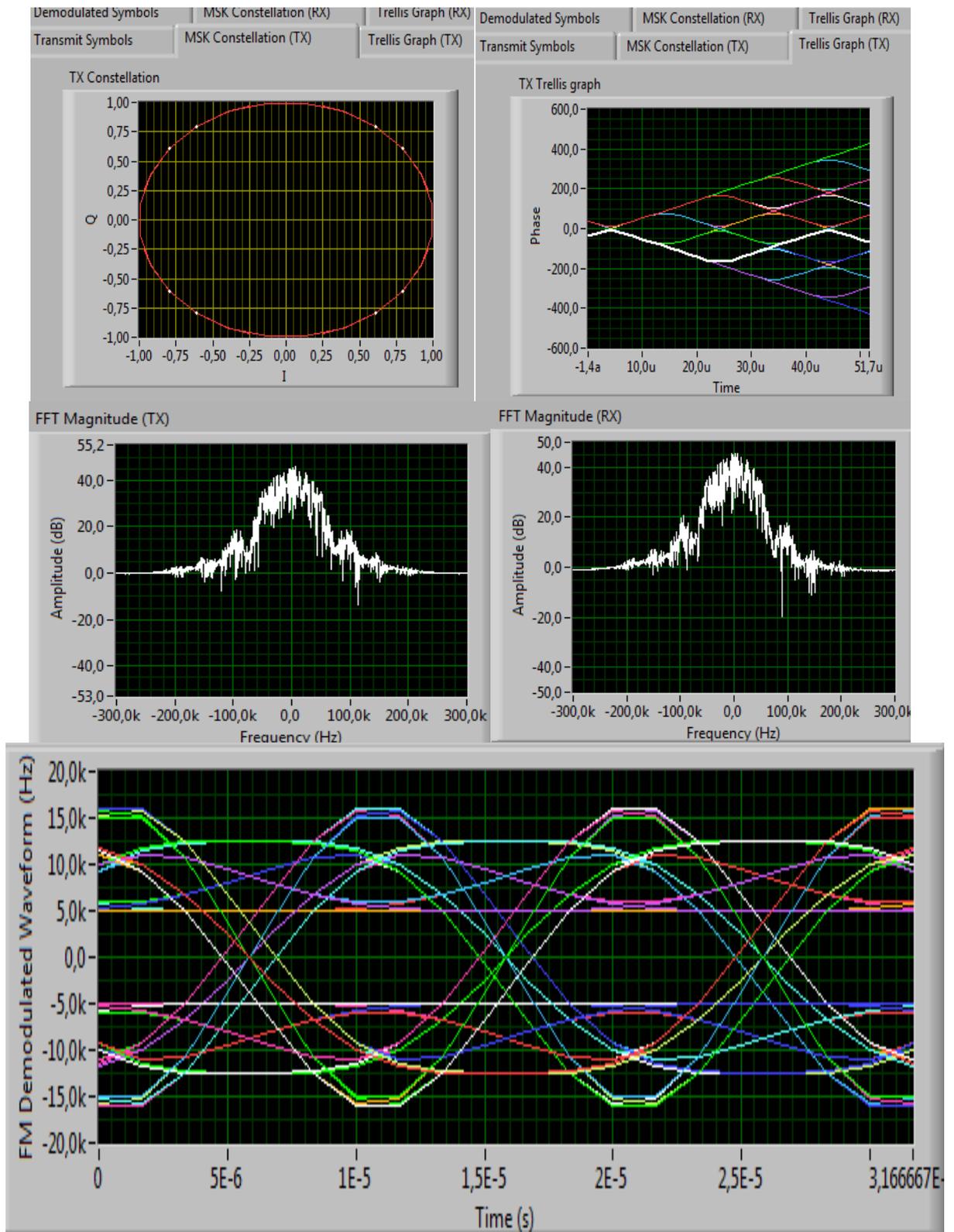


Рис. 26 - Спектр сигнала, глазковая диаграмма, сигнальное созвездие, фазовая диаграмма при  $BT=0,7$

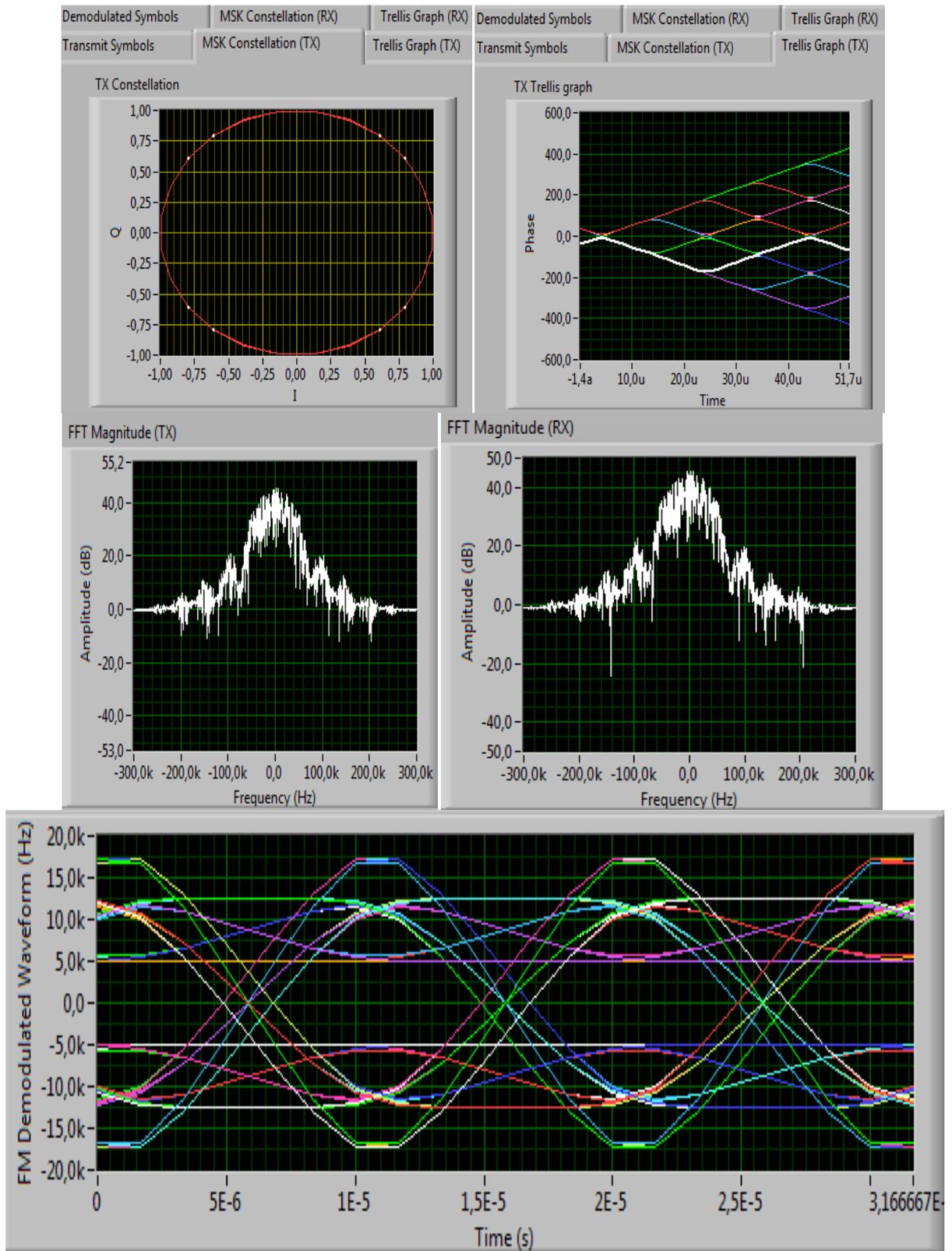


Рис. 27 - Спектр сигнала, глазковая диаграмма, сигнальное созвездие, фазовая диаграмма при  $BT=1$

Графики зависимости BER от SNR для MSK при использовании разных фильтров представлены на рис. 28.

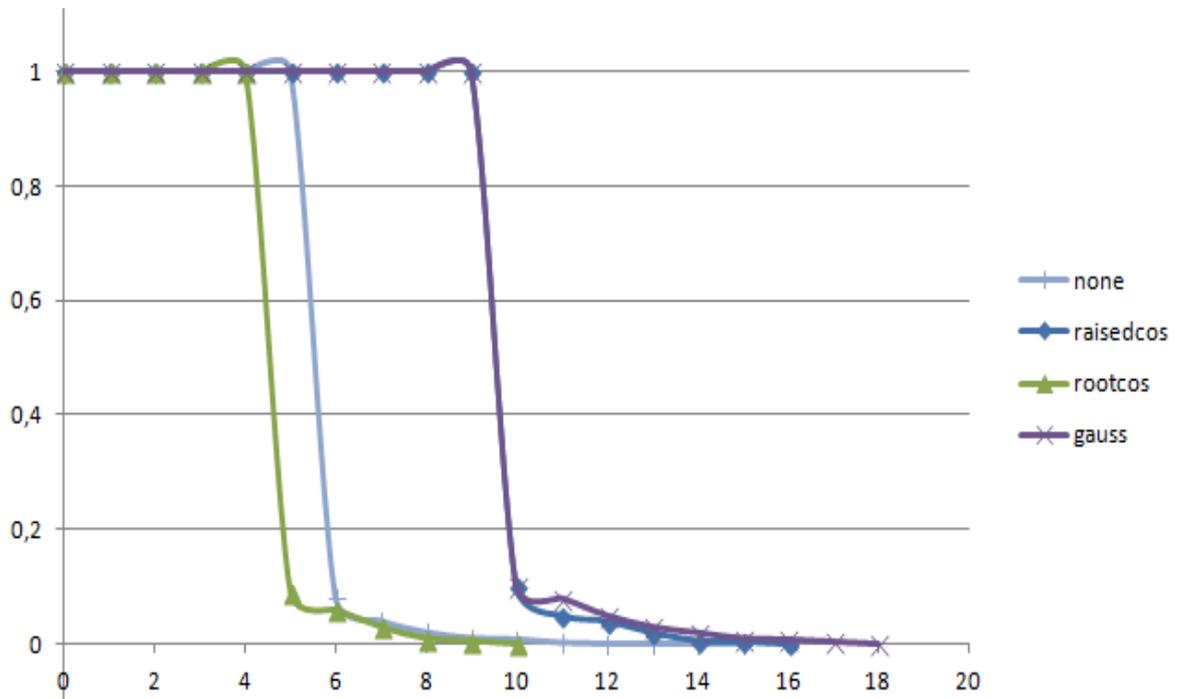


Рис. 28 – График зависимости BER от SNR для разных фильтров

В данной лабораторной работе был с использованием разработанной виртуальной лаборатории LabVIEW проводятся исследования многоуровневых методов модуляции FSK и MSK. Показано, что высокая помехоустойчивость достигается при использовании малых уровней модуляции, для высоких уровней модуляции обеспечивается высокая скорость передачи информации. Использование фильтра вида Root Raised Cos заметно уменьшает вероятность битовых ошибок по сравнению с остальными рассмотренными фильтрами. При увеличении ВТ уменьшается вероятность битовых ошибок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: Учебное пособие / А.М. Голиков. - СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 452с.