

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3
СПУТНИКОВОЕ И КАБЕЛЬНОЕ ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ
Панин Дмитрий РИБОУ-03-23
Вариант 10

2. Сигнальное созвездие

Построить сигнальную диаграмму (созвездие) для модуляции 16-КАМ в соответствии со своим вариантом (табл. 3.1), соблюдая правило: при переходе к соседней позиции должен изменяться только один бит (код Грея). Около каждой позиции написать соответствующий ей каналный символ.

Таблица 3.1 — Положение символа 0000

Вар.	Положение символа 0000
10	Левый нижний квадрант, левая верхняя точка

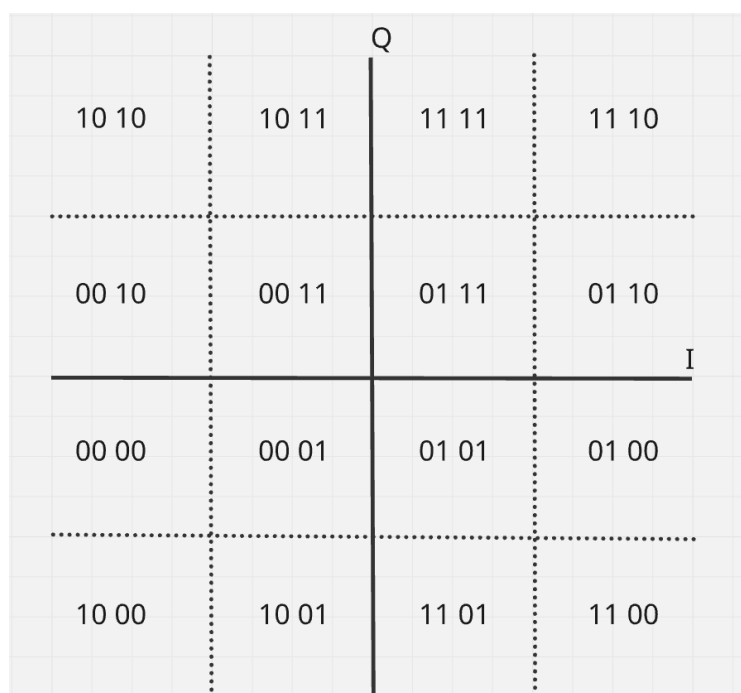


Рис 1. Сигнальное созвездие

Пояснить, почему код Грея снижает битовую вероятность ошибки при том же значении символьной вероятности ошибки.

Код Грея гарантирует, что любые соседние точки созвездия отличаются друг от друга всего на один бит. Из-за шума приемник чаще всего ошибается в пользу ближайшей соседней точки, поэтому такая символьная ошибка приводит к возникновению всего одной битовой ошибки, что снижает общий уровень BER

3. Расчёт битрейта в канале DVB-S

Таблица 3.2 — Параметры спутникового канала DVB-S

Вар.	ΔF , МГц	$R_{\text{вн}}$
10	36	7/8

Определим символьную скорость:

$$R_s = 30 \text{ Мсимв/с}$$

Рассчитаем битрейт на выходе внутреннего кодера:

$$R_{\text{изб}} = R_s * \log_2 M = R_s * m = 30 * 2 = 60 \text{ Мбит/с}$$

Рассчитаем битрейт на выходе внешнего кодера

$$R_{\text{внеш}} = R_{\text{изб}} * R_{\text{вн}} = 60 * \frac{7}{8} = 52.5 \text{ Мбит/с}$$

рассчитаем полезный битрейт:

$$R_{\text{пол}} = R_{\text{внеш}} * R_{\text{вш}} = 52.5 * \frac{188}{204} = 48.382 \text{ Мбит/с}$$

4. Расчёт битрейта в канале DVB-C

Таблица 3.3 — Полезный битрейт DVB-C, Мбит/с

Модуляция	2 МГц	4 МГц	6 МГц	8 МГц	10 МГц
16-КАМ	6,41	12,82	19,23	25,64	32,05
32-КАМ	8,01	16,03	24,04	32,05	40,07
64-КАМ	9,62	19,23	28,85	38,47	48,08
128-КАМ	11,22	22,44	33,66	44,88	56,10
256-КАМ	12,82	25,64	38,47	51,29	64,11

Таблица 3.4 — Варианты для расчёта DVB-C

Вар.	ΔF , МГц	Модуляция
10	10	128-КАМ

Полезный битрейт: $R_{\text{пол}} = 56.10$ Мбит/с

Рассчитаем число битов на символ:

$$m = \log_2 M = \log_2 128 = 7 \text{ бит/символ}$$

Рассчитаем полный битрейт:

$$R_{\text{полн}} = R_{\text{пол}} * \frac{204}{188} = 56.1 * \frac{204}{188} = 60.874 \text{ Мбит/с}$$

Рассчитаем символьную скорость:

$$R_s = \frac{R_{\text{полн}}}{m} = \frac{60.874}{7} = 8.696 \text{ Мсимв/с}$$

5. Структура блока данных DVB-S2

Таблица 3.5 — Варианты параметров кодирования

Вар.	Размер блока	R_{ldpc}
10	16200	7/9

Таблица 3.6 — Параметры кодов для $N_{ldpc} = 64\,800$ бит

R_{ldpc}	K_{bch}	$N_{bch} = K_{ldpc}$	t_{bch}	N_{ldpc}
1/4	16008	16200	12	64800
1/3	21408	21600	12	64800
2/5	25728	25920	12	64800
1/2	32208	32400	12	64800
3/5	38688	38880	12	64800
2/3	43040	43200	10	64800
3/4	48408	48600	12	64800
4/5	51648	51840	12	64800
5/6	53840	54000	10	64800
8/9	57472	57600	8	64800
9/10	58192	58320	8	64800

Таблица 3.7 — Параметры кодов для $N_{ldpc} = 16\,200$ бит (короткий кадр)

Обозначение	K_{bch}	$N_{bch} = K_{ldpc}$	t_{bch}	Фактическая $R_{ldpc} = K_{ldpc} / 16200$	N_{ldpc}
1/4	3072	3240	12	1/5	16200
1/3	5232	5400	12	1/3	16200
2/5	6312	6480	12	2/5	16200
1/2	7032	7200	12	4/9	16200
3/5	9552	9720	12	3/5	16200
2/3	10632	10800	12	2/3	16200
3/4	11712	11880	12	11/15	16200
4/5	12432	12600	12	7/9	16200
5/6	13152	13320	12	37/45	16200

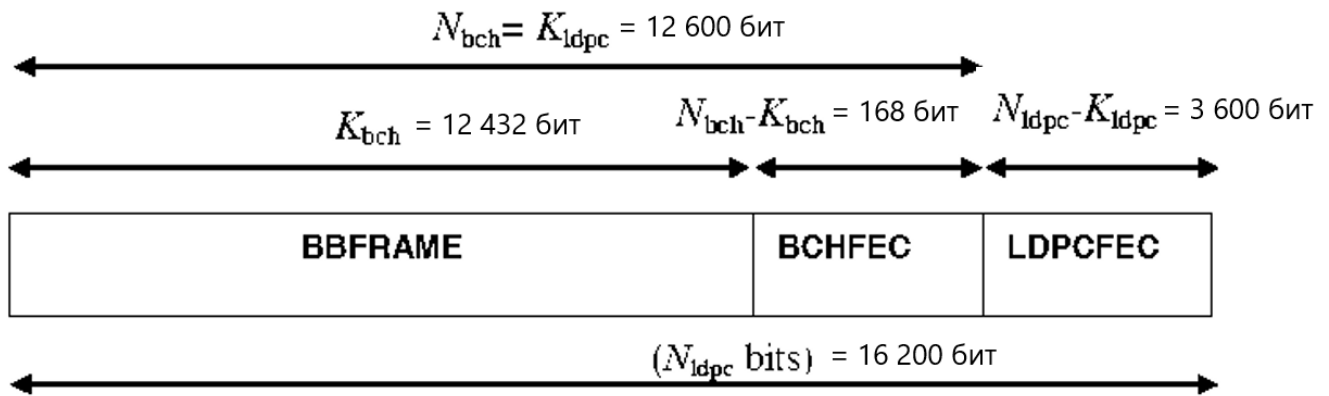


Рис 2. Структура блока данных FECFRAME в DVB-S2

Рассчитаем долю избыточности кодов

Избыточность, вносимая внешним кодом:

$$H_{bch} = \frac{N_{bch} - K_{bch}}{N_{ldpc}} * 100 = \frac{168}{16200} * 100 = 1,037\%$$

Избыточность, вносимая внутренним кодом:

$$H_{ldpc} = \frac{N_{ldpc} - K_{ldpc}}{16200} * 100 = \frac{3600}{16200} * 100 = 22.22\%$$

Общая избыточность кадра:

$$H_{общ} = H_{bch} + H_{ldpc} = 1.037 + 22.22 = 23.257\%$$

6. Измерение характеристик помехоустойчивости

Таблица 3.8 — Протокол измерений

№	Тип мод.	C/N, дБ	E_b/N_0 , дБ	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Ср.	ОВПО
				MER / BER	MER / BER	MER / BER	MER / BER	MER / BER	
1	QPSK	12	8.99	11.95 / <2.5e-5	12.01 / 2.5e-5	11.98 / 2.5e-5	12.05 / 2.5e-5	12.00 / <2.5e-5	среднее
2		10	6.99	10 / 6.2e-4	10.07 / 1.7e-4	9.95 / 8.25e-3	9.97 / 1.6e-3	10.00 / 2.66e-3	среднее
3		8	4.99	7.95 / 6.2e-3	8.06 / 5.77e-3	8.05 / 6.58e-3	8.01 / 5.58e-3	8.02 / 6.03e-3	среднее
4		6	2.99	6.06 / 2.35e-2	5.98 / 2.2e-2	5.97 / 2.31e-2	6.0 / 2.14e-2	6.00 / 2.25e-2	сильное
5		4	0.99	4.0 / 5.8e-2	3.95 / 5.7e-2	4.01 / 5.64e-2	3.98 / 5.78e-2	3.99 / 5.73e-2	сильное
6	16-KAM	16	9.98	17.99 / 1.47e-3	15.96 / 1.83e-3	15.98 / 1.7e-3	16.01 / 1.84e-3	16.49 / 1.71e-3	слабое
7		14	7.98	14.07 / 9.35e-3	14.05 / 9.72e-3	14.02 / 9.37e-3	13.99 / 9.84e-3	14.03 / 9.57e-3	среднее
8		12	4.98	12 / 2.76e-2	12 / 2.82e-2	12.05 / 2.77e-2	11.98 / 2.83e-2	12.01 / 2.80e-2	среднее
9		10	3.98	10 / 5.8e-2	10.02 / 5.96e-2	9.99 / 5.81e-2	9.96 / 5.83e-2	9.99 / 5.85e-2	сильное
10		8	1.98	8 / 9.89e-2	7.96 / 9.78e-2	7.98 / 9.7e-2	7.99 / 9.81e-2	7.98 / 9.79e-2	сильное
11	64-KAM	24	16.22	24.01 / 1.5e-4	23.98 / 1.25e-4	24.06 / 1.17e-4	24.06 / 1.1e-4	24.03 / 1.25e-4	слабое
12		21	13.22	21.05 / 4.02e-3	21.04 / 3.82e-3	21.05 / 4.13e-3	20.94 / 4.38e-3	21.02 / 4.09e-3	слабое
13		18	10.22	18.02 / 2.43e-2	17.96 / 2.47e-2	17.98 / 2.48e-2	17.99 / 2.44e-2	17.99 / 2.46e-2	среднее
14		15	7.22	14.94 / 6.42e-2	15.02 / 6.4e-2	14.97 / 6.47e-2	15.05 / 6.3e-2	15.0 / 6.4e-2	сильное
15		12	4.22	12.04 / 1.15e-1	11.99 / 1.15e-1	12.07 / 1.14e-1	12.02 / 1.14e-1	12.03 / 1.15e-1	сильное

7. Обработка и анализ результатов

7.1. Дать определения величин MER и BER, пояснив смысл используемых в этих определениях переменных. Указать, в каких единицах измеряется каждая величина и какое значение BER считается порогом квазибезошибочного приёма (QEF) в системах DVB.

BER (Bit Error Ratio) — это отношение числа неверно принятых бит к общему числу переданных бит, измеряемое в относительных единицах, где порогом квазибезошибочного приёма (QEF) в DVB считается $BER \leq 10^{-11}$ на выходе декодеров.

MER (Modulation Error Ratio) — это коэффициент ошибки модуляции, измеряемый в дБ и показывающий отношение средней мощности идеального целевого вектора сигнала к средней мощности вектора ошибки (разности реального и идеального символов).

7.2. Построить в одних осях графики зависимостей значения MER от отношения E_b/N_0 для трёх видов модуляции. Шкалы по обеим осям в дБ.

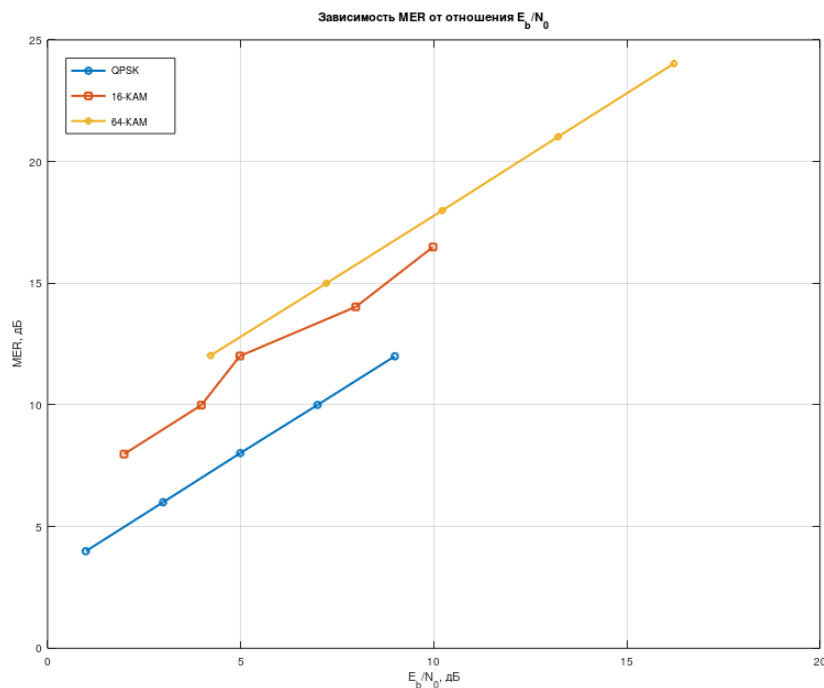


Рис 3. График

7.3. Построить в одних осях графики зависимостей значения BER от отношения E_b/N_0 для трёх видов модуляции. Шкала BER логарифмическая, то есть деления соответствуют значениям 0,1; 0,01; 0,001 и т. д.

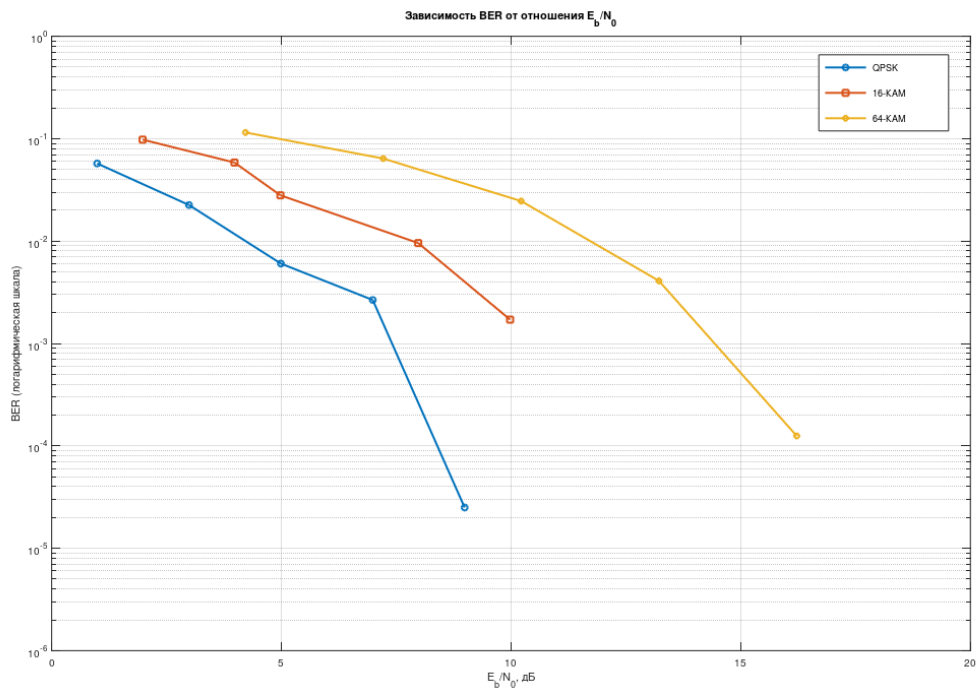


Рис 4. График

7.4. Исходя из значения C/N для своего варианта (табл. 3.9) и построенных графиков, выбрать тип модуляции, обеспечивающий максимальную скорость передаваемого потока при вероятности ошибки не более 0,01. При этом надо для каждого типа модуляции по C/N определять E_b/N_0 , после чего смотреть на соответствующем графике значение BER.

Таблица 3.9 — Заданное отношение C/N

Вар.	10
C/N , дБ	18

Оценим 64-КАМ

При $C/N = 18$ дБ значение E_b/N_0 составляет 10,22 дБ.

Среднее значение $BER = 0,0246$

Это больше, чем разрешенный порог 0,01. Значит, 64-КАМ использовать нельзя

Оцениваем 16-КАМ:

Эта модуляция более помехоустойчива. Из таблицы видно, что даже при худшем отношении $C/N = 16$ дБ $BER = 0,00171$

При $C/N = 18$ дБ уровень ошибок будет еще ближе к нулю.

Условие $BER \leq 0,01$ полностью выполняется.

Оцениваем QPSK:

Она также полностью выполняет условие по ошибкам, но проигрывает 16-КАМ по скорости передачи в 2 раза. 4 бита/символ против 2 у QPSK

Наилучшим выбором является модуляция 16-КАМ

8. Кривые помехоустойчивости

8.1. Перейти на вкладку «Кривые помехоустойчивости». Выбрать три вида модуляции, исследованные в п. 6, задать диапазон C/N от 0 до 26 дБ с шагом 2 дБ и построить кривые. Скопировать полученный график в отчёт и сопоставить его с графиками, построенными вручную по пп. 7.2 и 7.3. Пояснить расхождения, если они есть.

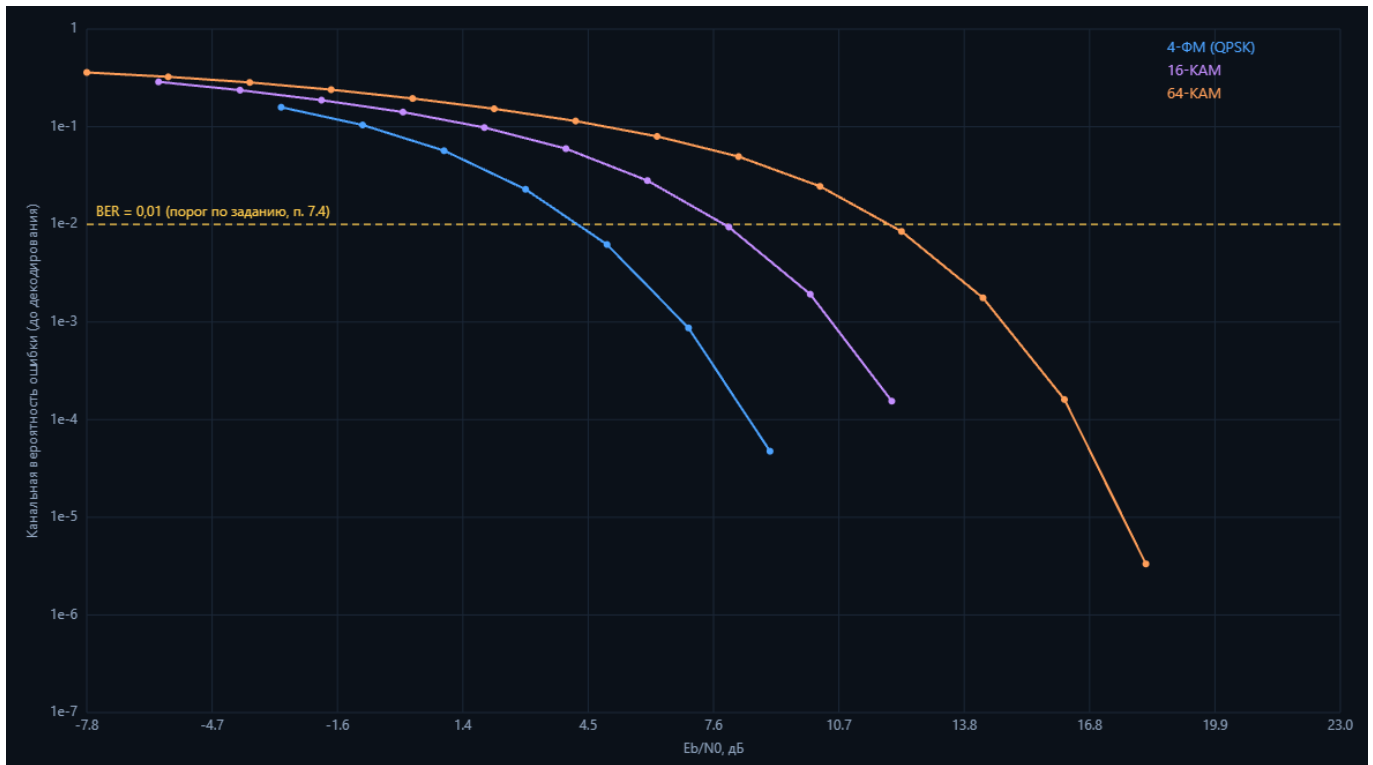


Рис 5. График

Графики имеют схожий характер, а небольшие расхождения между ними вызваны разным объемом выборки данных.

При ручных измерениях шаг точек был больше, из-за чего на графике из Octave видны изломы. В то же время программный график построен по точным аналитическим формулам с мелким шагом, поэтому его кривые идеально плавные.

8.2. Переключить ось абсцисс с E_b/N_0 на C/N и обратно. Объяснить, почему при переходе к шкале E_b/N_0 кривые сближаются, а при шкале C/N — расходятся.

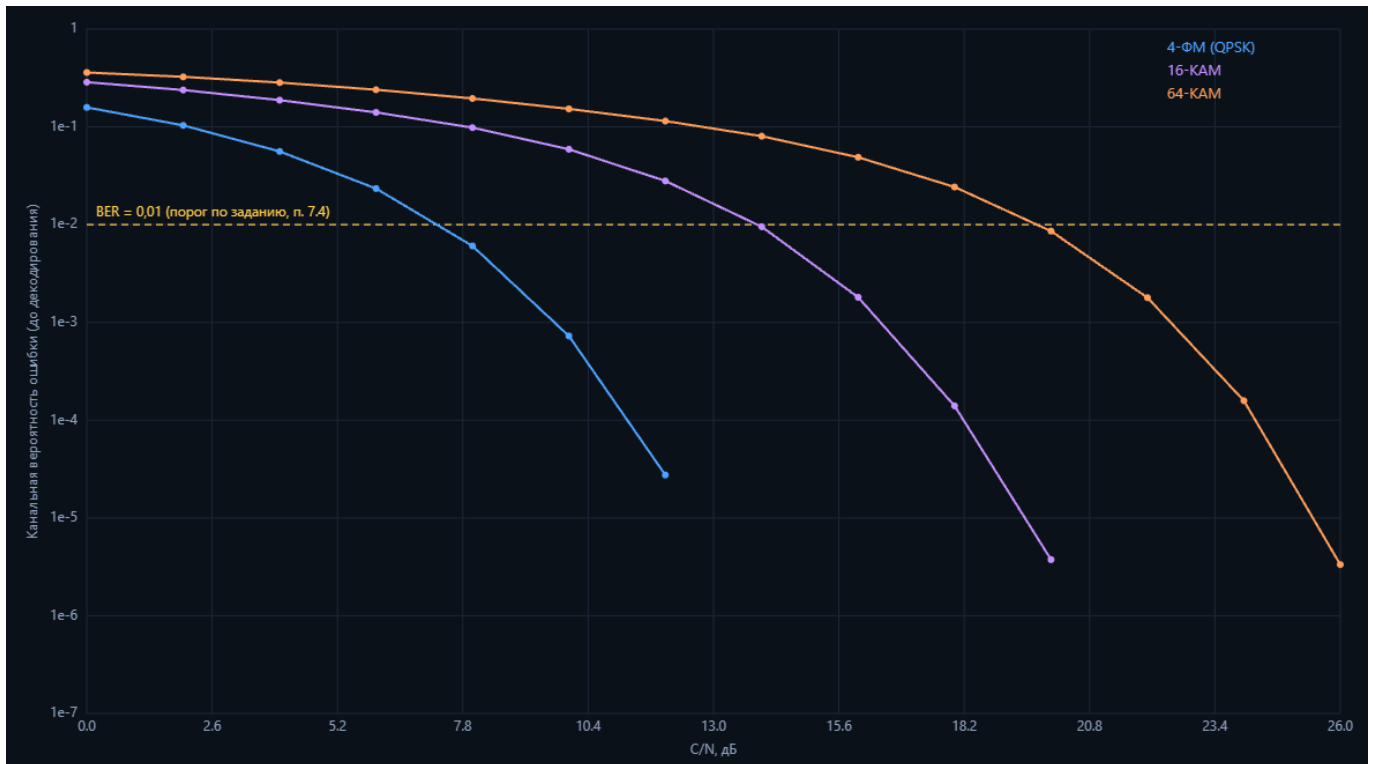


Рис 6. График

Шкала C/N учитывает общую мощность сигнала во всей полосе, поэтому многопозиционные модуляции (16/64-КАМ) требуют гораздо большей энергетики и их кривые расходятся далеко вправо.

Шкала E_b/N_0 нормирует энергию строго на один полезный бит, что очищает график от влияния разной битности символов и физически сближает кривые помехоустойчивости

8.3. Дополнительно построить кривые для созвездий 16APSK и 32APSK, применяемых в DVB-S2. Сопоставить их с кривыми для 16-QAM и 64-QAM и пояснить, почему в спутниковом канале предпочитают амплитудно-фазовые созвездия, а в кабельном — квадратурную амплитудную модуляцию.

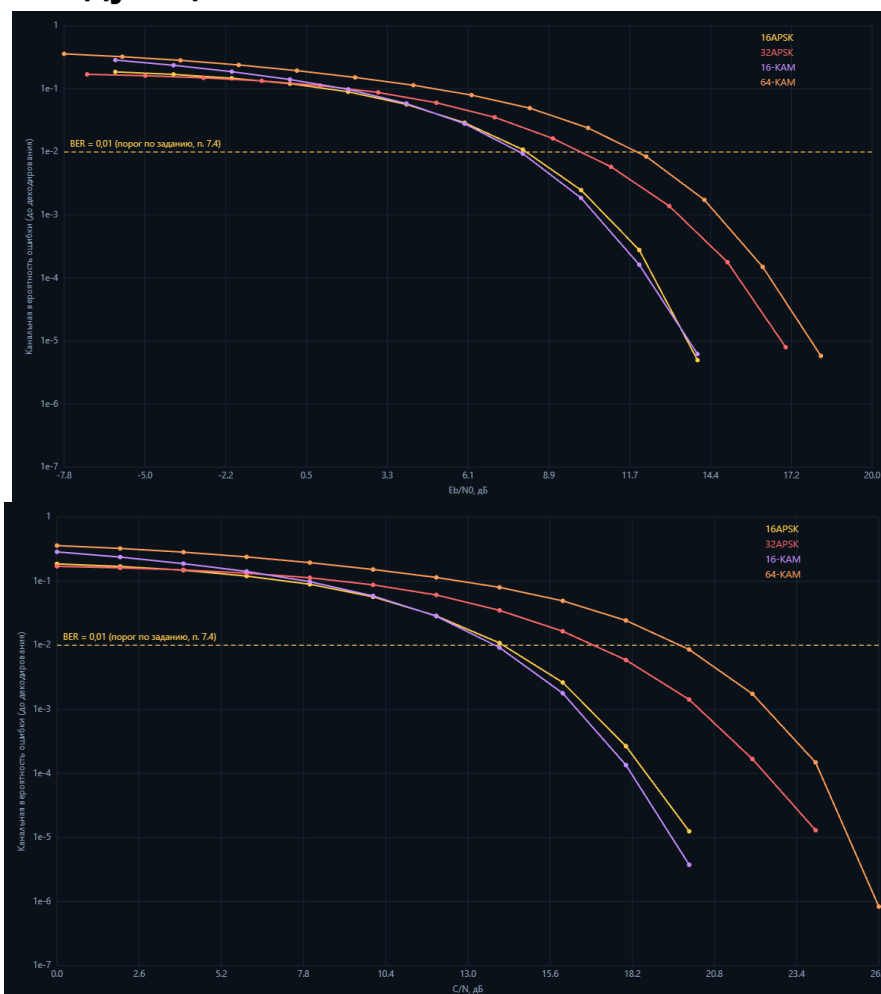


Рис 7. Графики

В спутниковых каналах используются мощные бортовые усилители (TWT), работающие в режиме насыщения, где из-за нелинейности амплитуда сигнала сильно искажается.

Созвездия APSK (амплитудно-фазовая модуляция) состоят из концентрических колец с малым числом уровней амплитуды, что снижает нелинейные искажения на спутнике, в то время как линейный кабельный тракт позволяет использовать более спектрально эффективную, но чувствительную к амплитуде QAM

9. Расчёт линии и развитие стандартов

9.1. Перейти на вкладку «Расчёт линии». Задать полосу ствола 36 МГц. Заполнить таблицу зависимости символьной скорости от коэффициента скругления и записать прирост скорости при переходе от $\alpha = 0,35$ к значениям 0,20 и 0,05. Пояснить, какой ценой достигается этот выигрыш.

α	R_s , Мсимв/с	Прирост к $\alpha = 0.35$	стандарт
0.35	26.667	0.0%	DVB-S2
0.20	30.000	12.5%	DVB-S2
0.05	34.286	28.6%	DVB-S2X

Этот выигрыш в скорости достигается ценой усложнения цифровой фильтрации и повышения требований к точности синхронизации в приемнике.

Уменьшение коэффициента скругления α делает спектр сигнала более «квадратным», что резко увеличивает межсимвольную интерференцию (МСИ) при малейших фазовых или частотных нестабильностях.

9.2. По таблице полезных скоростей выбрать комбинацию модуляции и скорости кода, обеспечивающую максимальный полезный битрейт при отношении C/N по своему варианту из табл. 3.9 с запасом не менее 1 дБ. Записать полученное значение полезной скорости.

Модуляция: 32APSK

Скорость кода: 9/10

значение полезной скорости: 153.95 Мбит/с

Заданное C/N: 18 дБ, выбранный режим требует 16.05, -> запас 1.95 дБ

9.3. Кратко (до одной страницы) описать, какие возможности добавил стандарт DVB-S2X (ETSI EN 302 307-2, 2014 г.) по сравнению с DVB-S2. Указать: расширенный набор созвездий (8APSK, 16APSK, 32APSK с разным распределением точек по кольцам, а также 64/128/256APSK), более мелкий шаг скоростей кода, коэффициенты скругления 0,15; 0,10 и 0,05, режимы VL-SNR для работы при отрицательных отношениях С/Ш, а также channel bonding и Super-Frame. Подкрепить вывод о выигрыше по пропускной способности числами, полученными в п. 9.1.

представляет собой расширение DVB-S2 и ориентирован на повышение спектральной эффективности спутниковых каналов связи.

Основные нововведения включают:

Расширенный набор созвездий:

К стандартным схемам добавлены форматы модуляции высокой позиционности: 64APSK, 128APSK и 256APSK. Для существующих созвездий (8APSK, 16APSK, 32APSK) внедрены новые профили с оптимизированным (разным) распределением точек по кольцам, что снизило чувствительность сигнала к нелинейным искажениям в спутниковых усилителях.

Более мелкий шаг скоростей кода:

Введено более 100 новых комбинаций модуляции и кодирования (MODCOD). За счет этого шаг изменения энергетического порога стал намного меньше, позволяя адаптивной кодовой модуляции (ACM) динамически подстраиваться под затухание в атмосфере (например, во время дождя) без резких скачков скорости.

Сниженные коэффициенты скругления фильтра:

Добавлены сверхмалые значения $\alpha = 0,15; 0,10$ и $0,05$. Переход от классического DVB-S2 с $\alpha = 0,35$ к значению $0,05$ в фиксированной полосе ствола 36 МГц дает чистый прирост символьной скорости на 28,6% (с 26,667 до 34,286 Мсимв/с), существенно увеличивая пропускную способность без расширения частотного диапазона.

Режимы сверхнизкого отношения сигнал/шум (VL-SNR):

Разработаны специальные режимы для работы при глубоких отрицательных отношениях С/Ш (вплоть до -10 дБ), что обеспечивает стабильную служебную связь и работу подвижных терминалов (на поездах, самолетах, судах) в условиях экстремальных помех.

Объединение каналов (Channel Bonding):

Появилась возможность аппаратного объединения до 3 спутниковых стволов (транспондеров) в один виртуальный логический канал, что позволяет передавать сверхтяжелые потоки данных (например, UHD TV/8K видео) равномерно.

Структура суперкадра (Super-Frame):

Внедрена новая продвинутая структура кадрирования, которая значительно снижает накладные расходы на передачу пилот-сигналов и заголовков при работе в условиях сверхвысоких скоростей и сильных шумов

Контрольные вопросы

Почему уменьшение коэффициента скругления повышает пропускную способность ствола, но усложняет приёмник?

Уменьшение коэффициента скругления сужает полосу частот, занимаемую сигналом, что позволяет увеличить символьную скорость и пропускную способность в неизменном канале.

Однако это приводит к медленному затуханию импульсов во времени, вызывая сильную межсимвольную интерференцию и требуя от приемника экстремальной точности синхронизации.

Почему в DVB-S2 применяется APSK, а не KAM, как в кабельном канале?

В спутниковом канале усилители мощности работают в режиме насыщения, из-за чего многоуровневые сигналы KAM с большим пик-фактором сильно искажаются.

Созвездия APSK размещают точки на концентрических окружностях с минимумом уровней амплитуды, что делает их устойчивыми к нелинейным искажениям спутникового тракта.

Что показывает MER и чем он отличается от EVM?

MER (Modulation Error Ratio) показывает отношение мощности идеального сигнала к мощности вектора ошибки, выступая аналогом соотношения сигнал/шум для цифрового созвездия. Он измеряется в децибелах (дБ), в то время как EVM (Error Vector Magnitude) выражает ту же величину отклонения, но в процентах (%) относительно амплитуды сигнала.

Почему при одинаковом C/N разные виды модуляции дают разные значения E_b/N_0 ?

При фиксированной мощности сигнала $\frac{C}{N}$ высокоуровневые модуляции (например, 64-KAM) переносят больше бит в одном символе, чем простые (QPSK).

Из-за этого общая энергия распределяется на большее количество данных, и на каждый отдельный бит приходится меньше энергии $\frac{B_0}{N_0}$.

Что означает «порог обрыва» (cliff effect) и как он проявляется на графике BER(E_b/N_0)?

Порог обрыва (cliff effect) означает резкую потерю цифрового телесигнала от идеального качества до полного исчезновения при незначительном ухудшении условий приема.

На графике BER это проявляется в виде практически вертикального падения кривой, где минимальное изменение $\frac{B_0}{N_0}$ вызывает мгновенный скачок ошибок от нуля до полной потери связи.

Какое место занимает DVB-C2 и почему он не получил широкого распространения в России?

DVB-C2 является вторым поколением стандарта кабельного цифрового телевидения, предлагающим повышенную на 30–60% пропускную способность за счет использования кодирования LDPC и технологии OFDM.

Он не получил широкого распространения в России, так как операторы уже массово развернули сети первого поколения DVB-C, а дальнейшее развитие вещания сместилось в сторону более перспективных технологий IPTV и OTT.

Почему канальная вероятность ошибки на пороге C/N составляет около 10^{-2} и что делает с этим потоком ошибок декодер LDPC?

Современные помехоустойчивые коды обладают колоссальной корректирующей способностью, поэтому система стабильно работает даже при сильном шуме в канале и исходной BER около 10^{-2} .

Декодер LDPC использует итерационный алгоритм «проверки четности» для обмена мягкими решениями, полностью подавляя этот плотный поток ошибок и снижая их уровень до минимума

Почему при переходе от шкалы C/N к шкале E_b/N_0 кривые для разных видов модуляции сближаются?

Шкала $\frac{C}{N}$ отражает общую мощность в канале, где высокоуровневые модуляции требуют значительно больше энергии из-за высокой плотности точек в созвездии.

Переход к шкале $\frac{B_0}{N_0}$ очищает графики от фактора емкости символа, так как энергия нормируется строго на один бит информации, что сближает кривые разных модуляций и показывает их чистую удельную эффективность