

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(МИНЦИФРЫ РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

(СПБГУТ)

Кафедра цифрового телевидения и метрологии  
Дисциплина «Звуковое вещание»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9DA  
ИССЛЕДОВАНИЕ 1-БИТНОЙ СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯЦИИ

Выполнил:

Балан К.А.

Проверила:

Свиньина О.А.

Санкт-Петербург

2025

## 1.1. Изучение принципов преобразования спектра ошибок квантования при 1-битной сигма-дельта модуляции

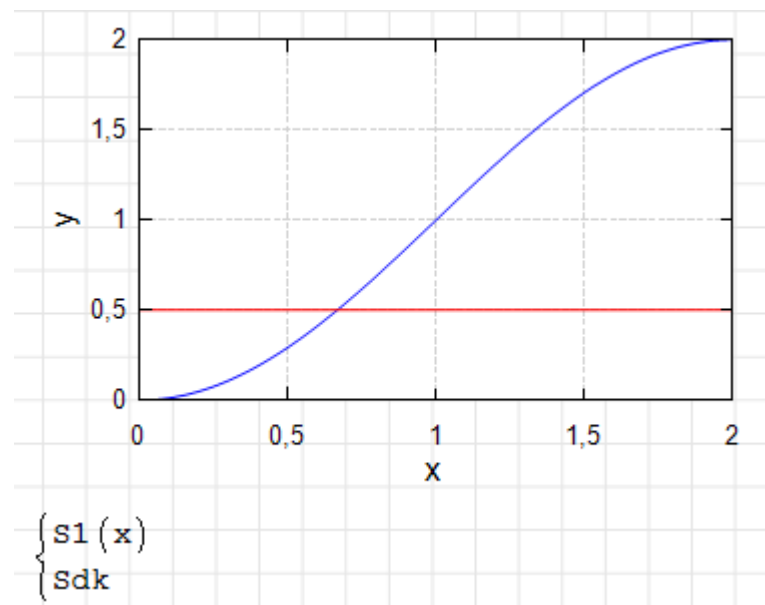


Рисунок 1 – Спектр шума квантования при сигма-дельта модуляции

## 1.2. Исследование спектра шума 1-битного сигма-дельта модулятора 1-5-го порядка

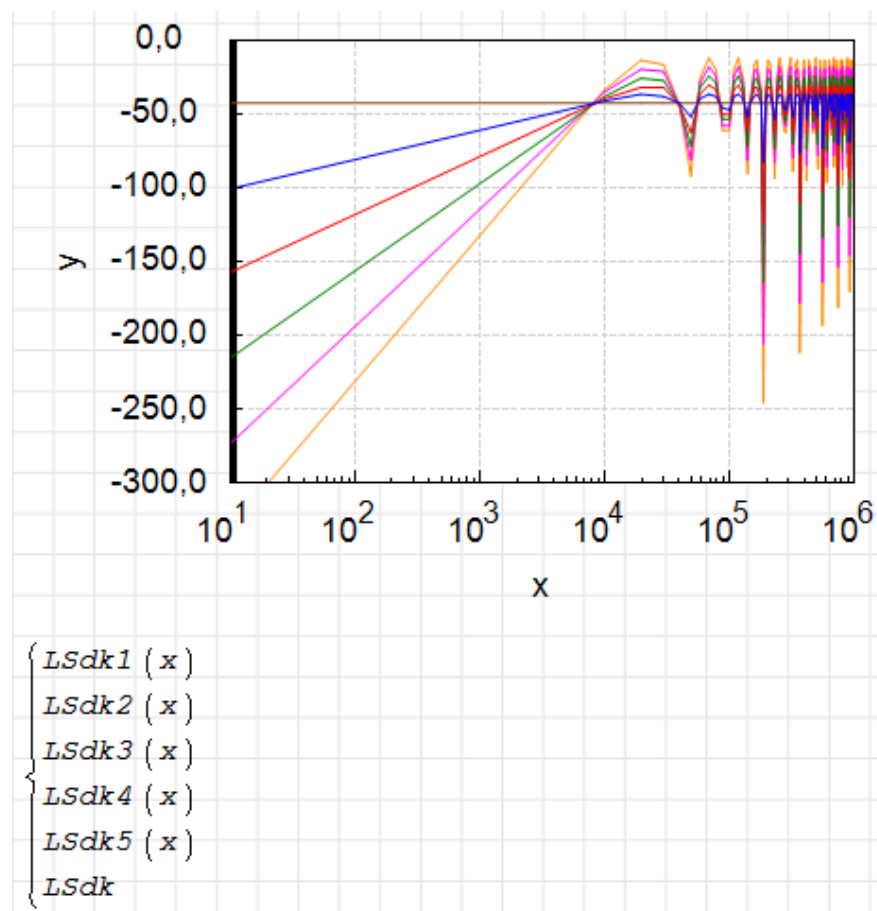


Рисунок 2 – Спектр шума квантования 1-битного сигма-дельта модулятора 1-5-го порядков,  $K_{os}=1$

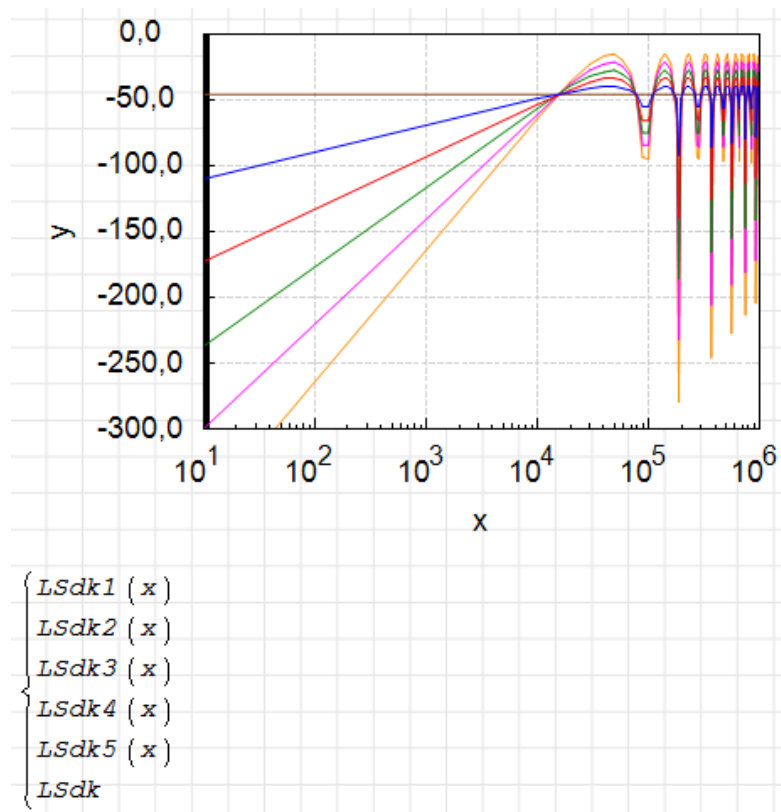


Рисунок 3 – Спектр шума квантования 1-битного сигма-дельта модулятора 1-5-го порядков,  $K_{os}=2$

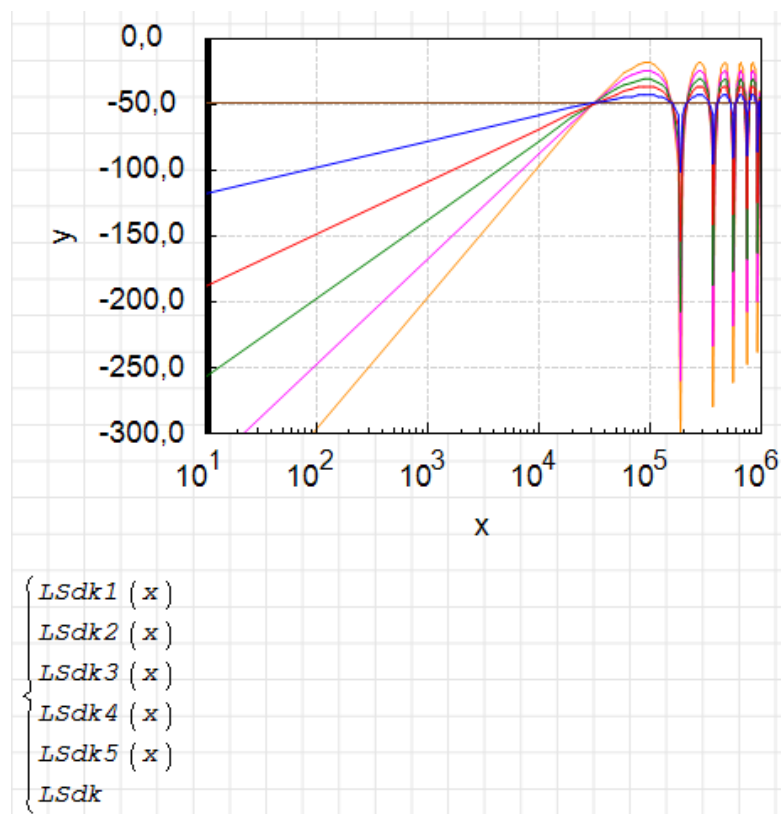


Рисунок 4 – Спектр шума квантования 1-битного сигма-дельта модулятора 1-5-го порядков,  $K_{os}=4$

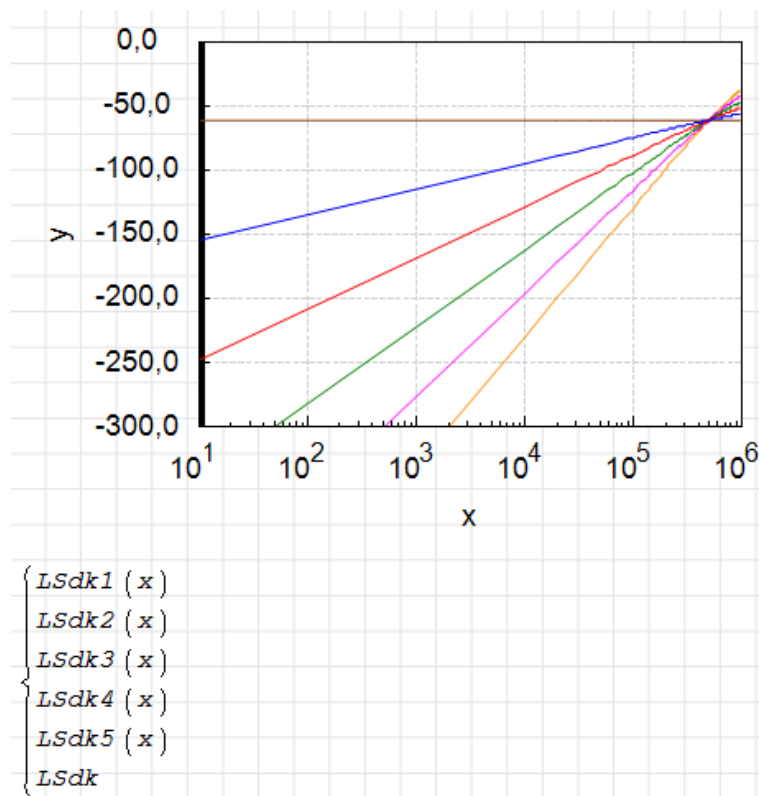


Рисунок 5 – Спектр шума квантования 1-битного сигма-дельта модулятора 1-5-го порядков,  $K_{os}=64$

Таблица 1

### Исследование спектра шума квантования

Функции	$K_{os}$			
	1	2	3	4
$LS_{dk}$ , дБ	-43,80	-46,81	-49,82	-61,86
$f_{nk}$ , Hz	24000	48000	96000	1536000
$f_{sk}$ , Hz	48000	96000	192000	3072000
Функции	дБ на октаву			
$LS_{dk1}(4000)-LS_{dk1}(2000)$	5,946	6,002	6,016	6,021
$LS_{dk2}(4000)-LS_{dk2}(2000)$	11,89	12,00	12,03	12,04
$LS_{dk3}(4000)-LS_{dk3}(2000)$	17,84	18,01	18,05	18,06
$LS_{dk4}(4000)-LS_{dk4}(2000)$	23,78	24,01	24,06	24,08
$LS_{dk5}(4000)-LS_{dk5}(2000)$	29,72	30,01	30,064	30,10

Вывод:

Повышение коэффициента дискретизации смещает спектр вправо, расширяя диапазон воспроизводимых частот и позволяя точнее передавать высокочастотные компоненты. Частота Найквиста (половина частоты дискретизации) определяет максимальную частоту сигнала для корректного воспроизведения без алиасинга. Сверхдискретизация (oversampling) снижает квантовационный шум, упрощает требования к аналоговым фильтрам и улучшает точность представления сигнала, особенно на низких частотах.

### 1.3. Исследование SNR 1-битного сигма-дельта модулятора 1-5-го порядков

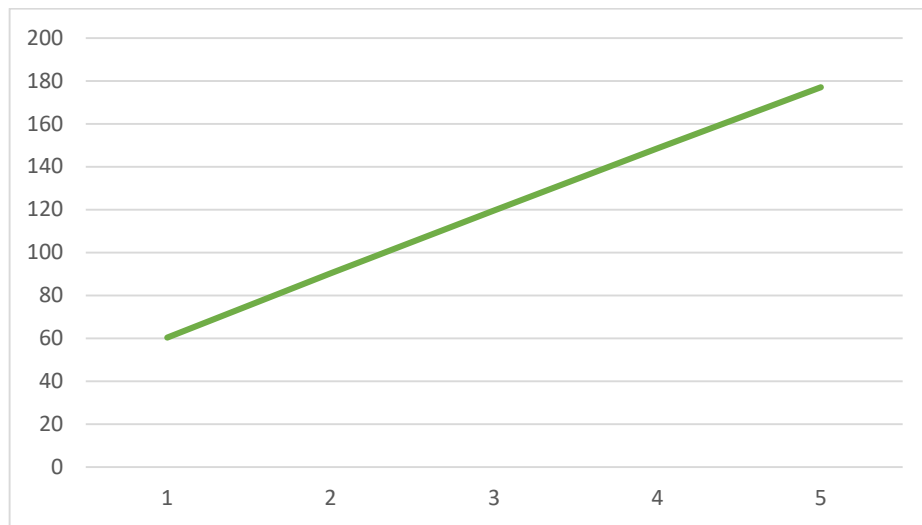


Рисунок 6 –  $K_{os}=1$

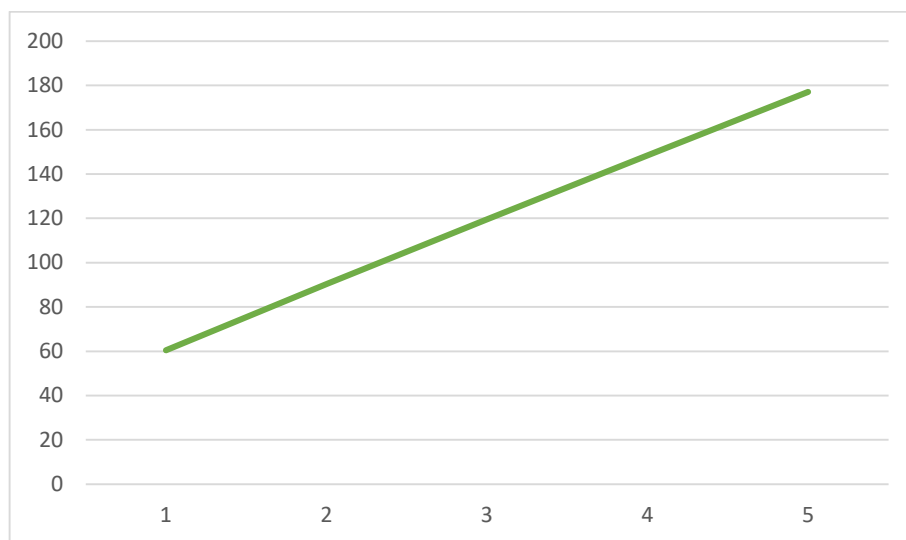


Рисунок 7 –  $K_{os}=2$

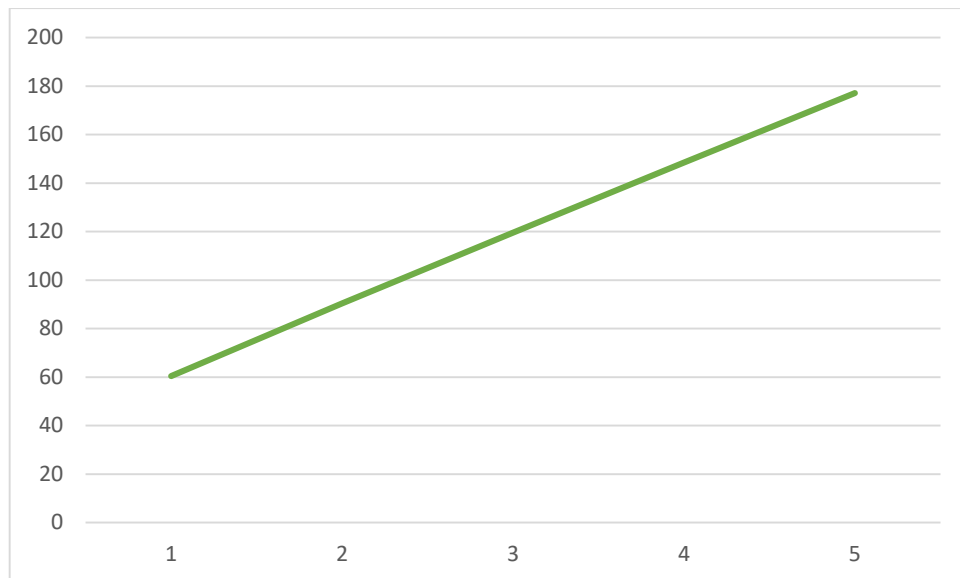


Рисунок 8 –  $K_{os}=4$

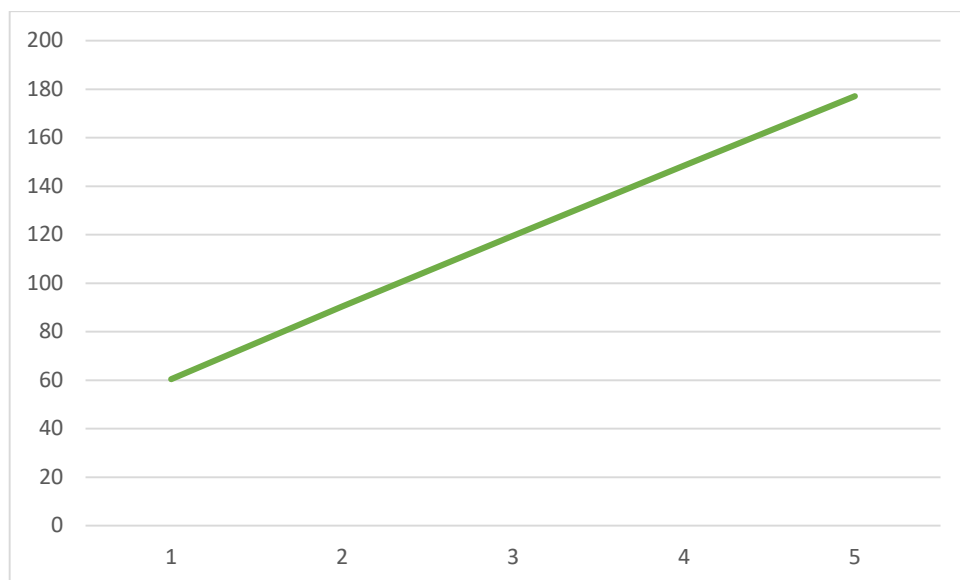


Рисунок 9 –  $K_{os}=64$

### Исследование отношения сигнал/шум

Таблица 2

Функции	$K_{os}$			
	1	2	4	64
SNR(m=1)	7,702	15,61	24,36	60,39
SNR(m=2)	3,620	16,00	30,39	90,37
SNR(m=3)	-1,011	15,69	35,67	119,6
SNR(m=4)	-5,907	15,03	40,59	148,5
SNR(m=5)	-10,96	14,16	45,29	177,1

Вывод:

Увеличение коэффициента дискретизации с модуляторами высокого порядка улучшает соотношение сигнал/шум (SNR) за счёт перераспределения шума в менее заметные частоты. Это снижает искажения, повышает точность восстановления сигнала и улучшает детализацию, что особенно важно для профессиональных аудиосистем.

**1.4. Исследование графиков SNR 1-битных сигма-дельта модуляторов 1-5-го порядков**

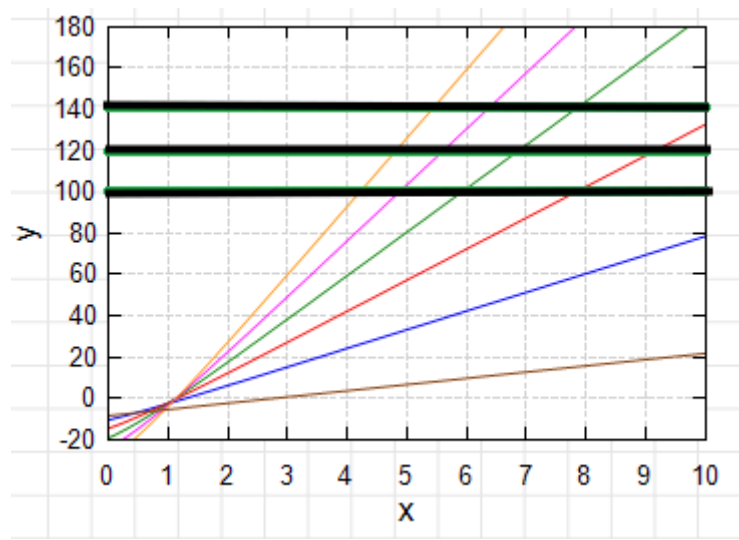


Рисунок 10 – SNR не менее 100, 120 и 140 дБ

Измерение крутизны графиков SNR

Таблица 3

Крутизна	дБ на октаву
$SNR_1()-SNR_1()$	9,013
$SNR_2()-SNR_2()$	15,01
$SNR_3()-SNR_3()$	21,00
$SNR_4()-SNR_4()$	27,00
$SNR_5()-SNR_5()$	32,99

## Варианты достижения заданного значения SNR

Таблица 4

	SNR = 100 дБ				SNR = 120 дБ				SNR = 140 дБ			
m	5	4	3	2	5	4	3	2	5	4	3	2
x	4,2	4,7	5,7	5,8	4,8	5,5	6,8	4,9	5,3	6,2	7,8	6,3
K <sub>os</sub>	18,38	25,99	51,98	55,7	27,85	45,25	111,43	29,85	39,4	73,52	222,86	78,79

### 1.5. Контрольные вопросы

1. Технология Dithering декоррелирует ошибки квантования, превращая их дискретный спектр в спектр белого шума. Это минимизирует слышимые искажения, особенно в аудиосистемах высокого качества, где важна точность передачи мелких деталей звука. Dithering особенно эффективен при работе с тихими сигналами, предотвращая потерю динамического диапазона.
2. Технология Oversampling увеличивает частоту дискретизации  $f_{sk}$  значительно выше минимально достаточной частоты  $f_s$ . Это снижает вероятность алиасинга, упрощает аналоговую фильтрацию и повышает точность цифрового представления сигнала. Кроме того, oversampling улучшает качество обработки низкочастотных сигналов и позволяет использовать менее сложные фильтры.
3. Технология Noise Shaping перераспределяет квантовый шум, направляя его в менее заметные частотные области с помощью отрицательной обратной связи и интеграторов. Это снижает уровень шума в слышимом диапазоне, улучшая качество аудиосигнала, особенно в профессиональных системах. Noise Shaping особенно полезен в комбинации с dithering для достижения высокого уровня точности.
4. Частота Найквиста – это половина частоты дискретизации. Она определяет максимальную частоту сигнала, которую можно корректно воспроизвести без искажений. Превышение этой частоты приводит к алиасингу, который может исказить звуковую картину.
5. Верхняя граница спектра шума квантования при АЦП равна частоте Найквиста, что делает антиалиасинговую фильтрацию важной для предотвращения искажений. Использование фильтров позволяет сохранить точность обработки и повысить качество звучания.
6. Мощность шума квантователя обратно пропорциональна числу уровней квантования. Большее число уровней уменьшает шаг квантования и, соответственно, снижает уровень шума, улучшая точность преобразования. Это особенно важно при работе с низкочастотными сигналами.



7. Белый шум имеет равномерное распределение энергии по всему частотному спектру. В отличие от него, розовый шум усиливает низкие частоты, создавая более естественное и теплое звучание, что часто используется в музыкальной и звуковой инженерии.
8. Спектральная плотность мощности белого шума остаётся постоянной на всех частотах, что делает его идеальным инструментом для калибровки аудиосистем, тестирования оборудования и анализа звукового тракта.
9. Частота дискретизации определяется количеством отсчётов сигнала за единицу времени. Более высокая частота улучшает точность передачи высокочастотных компонентов, но увеличивает объём данных и требования к вычислительным ресурсам.
10. Спектральная плотность мощности белого шума не изменяется с частотой дискретизации. Это позволяет использовать белый шум для тестирования систем с разными параметрами, сохраняя его свойства неизменными.
11. Коэффициенты передачи по мощности и напряжению используются для анализа изменений сигнала при прохождении через систему. Они помогают определить эффективность усиления, наличие затухания или другие искажения сигнала.
12. Порядок интегратора в сигма-дельта модуляторе влияет на степень подавления шума в низкочастотной области. Интеграторы более высокого порядка обеспечивают лучшее разрешение, но усложняют реализацию модулятора и могут вызывать нестабильность.
13. Спектр шума сигма-дельта модулятора напоминает белый шум с повышенной энергией на высоких частотах. Это позволяет достичь высокой точности на низких частотах, но требует применения фильтрации для удаления избыточного шума.
14. Характеристики шума сигма-дельта модулятора зависят от его порядка. Высокие порядки обеспечивают лучшее разрешение в низкочастотной области, но увеличивают сложность системы и уровень высокочастотного шума, что требует грамотного проектирования.
15. 1-битный сигма-дельта модулятор достигает высокого уровня SNR (до 120 дБ) за счёт увеличенной частоты дискретизации и обратной связи. Это упрощает архитектуру системы, делая её подходящей для широкого спектра приложений.
16. SNR сигма-дельта модулятора увеличивается с ростом частоты дискретизации и порядка интегратора. Однако это также может повысить уровень шума на высоких частотах, что требует точной настройки системы для

достижения оптимального баланса между качеством звука и сложностью реализации.