



ПОСТОЯННЫЙ КОМИТЕТ  
СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА БЕЛАРУСИ И РОССИИ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ЕВФРОСИНИИ ПОЛОЦКОЙ



**XXIX научно-практическая конференция**  
**«КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ»**  
**15 - 17 мая 2024 года**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ ОЦЕНКИ  
ЗАЩИЩЕННОСТИ ОТ УТЕЧКИ ДИСКРЕТИЗОВАННЫХ  
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ РЕЧЕВЫХ  
СИГНАЛОВ**

**В. К. ЖЕЛЕЗНЯК<sup>1</sup>, К. Я. РАХАНОВ<sup>1</sup>, С.В. ЛАВРОВ<sup>1</sup>,  
А.Г. ФИЛИППОВИЧ<sup>2</sup>, М.М. БАРАНОВСКИЙ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь,  
г. Минск, Республика Беларусь

**г. Санкт-Петербург**

## ВВЕДЕНИЕ

Вероятность правильного решения о защищенности канала утечки информации реализуют селективным обнаружением и обработкой слабых финитных измерительных сигналов, выделяемых из маскирующих и искусственных помех объекта информатизации. Статистическая обработка измерительного сигнала оптимальным способом определяет правильное решение о степени защищенности речевых сигналов (РС) аналоговых и преобразованных в цифровую форму. Предложен измерительный сигнал для оценки защищенности преобразованного в цифровую форму РС, универсального для обработки в технических средах передачи информации и в каналах утечки информации.

# ВВЕДЕНИЕ

Снижение методической и инструментальной неопределенности (погрешности) при одновременной возможности повысить чувствительность в оценке защищенности каналов утечки информации возможно при принципиально новых разработках методов и средств технической защиты речевых сигналов при высококачественной передаче по широкополосным каналам передачи. Информатизационные технологии реализуются автоматизированными системами точной оценки функционирования.

**Цель работы:** принципы обнаружения слабых уровней измерительных сигналов шума квантования в каналах утечки информации при высоком уровне шумов и оценка защищенности аналоговых и дискретизованных высококачественных речевых сигналов при передаче по широкополосным каналам.

# ДИСКРЕТИЗАЦИЯ И КВАНТОВАНИЕ

Дискретизация и квантование при передаче сигналов при использовании амплитудно-импульсной модуляции является основным источником шумов квантования, так как при прохождении дискретизованного гармонического сигнала подвергается квантованию по уровням ступенчатой нелинейной функцией. Амплитудная характеристика гармонического сигнала нелинейная, в результате шум квантования по форме является деформированным.

Установлено, что дискретизация по времени и квантование по уровню высокоскоростных высококачественных речевых сигналов для преобразования в цифровую форму являются основными источниками утечки информации. Показано, что для определения степени защищенности информации при высококачественной высокоскоростной передаче в широкополосных каналах, необходимо использовать сложный измерительный (тестовый) композитный сигнал. Требования к измерительному сигналу определяются особенностями дискретно-квантованного представления речевых сигналов.

# КВАНТОВАТЕЛЬ

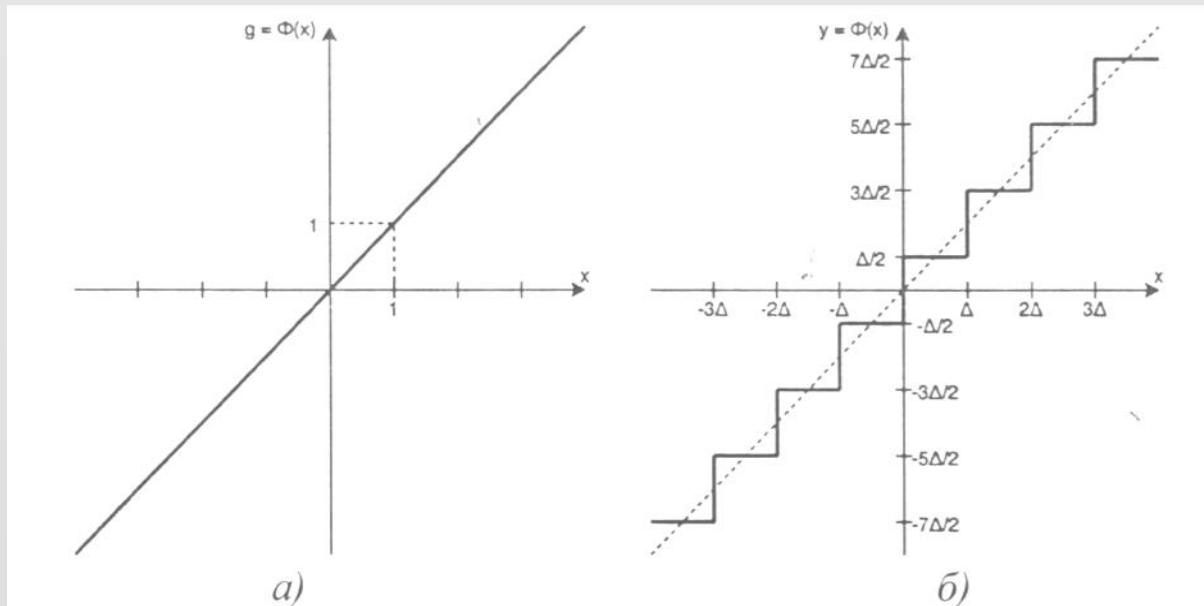


Рисунок 1 – Параметры квантования:

а) линейный элемент квантования; б) амплитудная характеристика квантования

Дискретные уровни принимают значения  $\pm 0.5\Delta \times (2n - 1)$  при изменении входного сигнала в пределах до  $\Delta \times (2n - 1) = U_{\max} - \Delta$ .

# ИСКАЖЕНИЕ КВАНТОВАНИЯ

Последовательность периодической последовательности импульсов треугольной формы имеет преимущество перед гармоническим сигналом в процессе выделения шума квантования:

$$s_{mpeyz} = \frac{8}{\pi^2} \left( \cos(x) + \frac{1}{9} \cos(3x) + \frac{1}{25} \sin(5x) - \frac{1}{49} \sin(7x) + \dots \right)$$

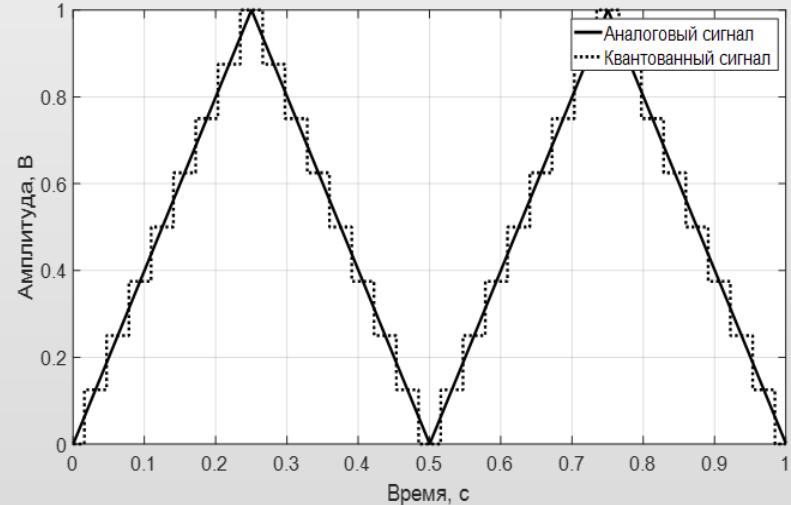
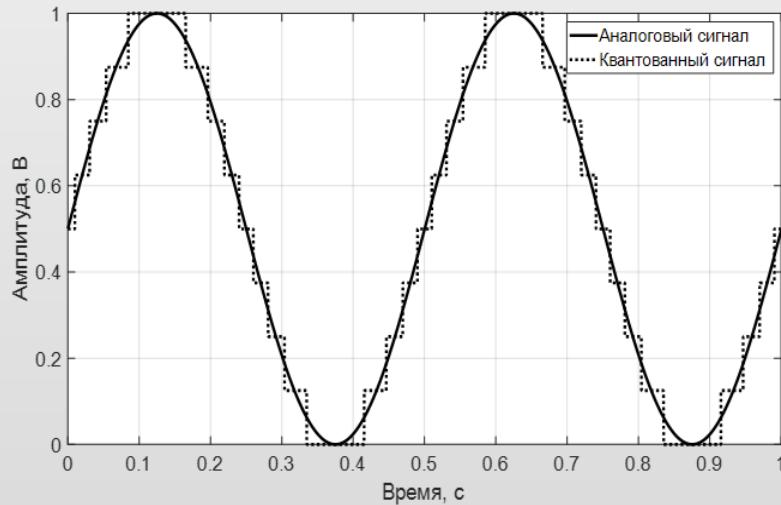


Рисунок 2 – Квантование периодических последовательностей: гармонической (а) и треугольной (б)

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СИГНАЛ

Перейдем к рассмотрению процесса выбора измерительного сигнала, используемого для оценки защищенности РС при дискретно-квантованном преобразовании. Необходимо отметить, что использование гармонического сигнала не позволяет достоверно оценить защищенность РС при дискретно-квантованном преобразовании в связи:

- высокой погрешностью оценки отношения уровня дискретизированного РС к уровню шума квантования из-за того, что и сигнал, и шум квантования являются случайными процессами;
- низкой точностью и достоверностью оценки защищенности, обусловленной искажением сигнала шума квантования из-за высокого (по сравнению с его уровнем) шума в точке наблюдения;
- отсутствием нормативного значения оценки защищенности дискретно-квантованного РС.

Для оценки защищенности РС при дискретно-квантованном преобразовании наиболее оптимальным является использование сигнала, которому присуща форма линейно-нарастающего и линейно-спадающего напряжения с высокоточной линейностью.

# СПЕКТР ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Возникающий при этом шум квантования имеет пилообразную форму, что повышает чувствительность его обнаружения [3].

На рисунке 3 представлена периодическая последовательность импульсов треугольной формы, а также разложение данного сигнала в ряд Фурье и спектр сигнала

$$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin k\omega t}{k^2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, T_n$$

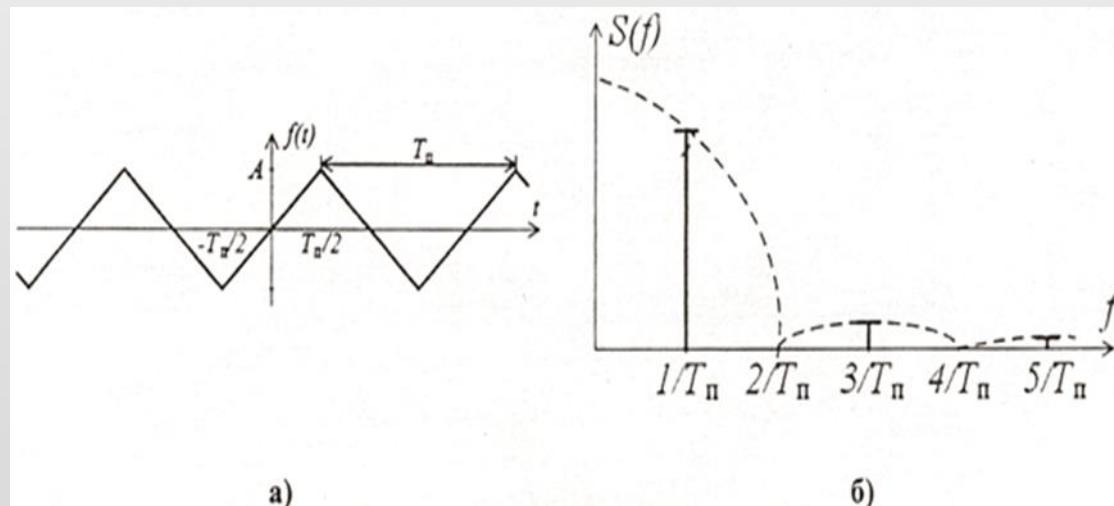


Рисунок 3 – Измерительный сигнал (а) и его спектр во временной области (б)

# СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА И СПЕКТРА ШУМА КВАНТОВАНИЯ

Сравнение амплитуд основной и высших гармоник спектра сигналов показывает, что в спектре периодической импульсной последовательности пилообразной формы присутствуют все гармоники и амплитуда их убывает обратно пропорционально номеру гармоники, а для периодической импульсной последовательности треугольной формы четные гармоники отсутствуют, а амплитуды нечетных гармоник убывают обратно пропорционально второй степени номеров гармоник, что позволяет производить оценку защищенности по первой (основной) гармонике.

# СПЕКТР ШУМА КВАНТОВАНИЯ

На рисунке 4 представлена периодическая последовательность импульсов пилообразной формы, а также разложение данного сигнала в ряд Фурье и спектр сигнала

$$f(t) = \frac{A}{2} - \frac{A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin k\omega t, \quad k = 1, 2, 3, \dots, T_n,$$

где  $A$  – амплитуда сигнала;  $k$  – номер гармоники.

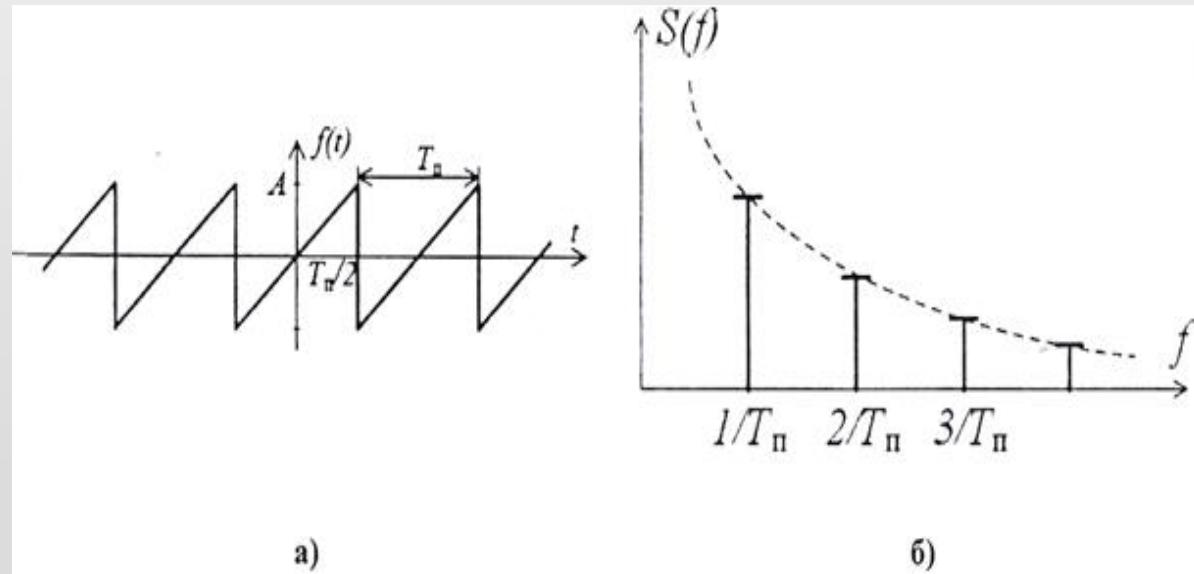


Рисунок 4 – Шум квантования (а) и его спектр во временной области (б)

# ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Использование сигнала периодической последовательности импульсов треугольной формы нарастающего и спадающего фронтов позволяет в два раза увеличить время обработки сигнала периодической последовательности импульсов пилообразной формы.

Обосновано наличие канала утечки информации по низко- и высокочастотным широкополосным каналам передачи при дискретно-квантованном преобразовании и передаче высококачественных высокоскоростных речевых сигналов с учетом сигнала шума квантования, уровень которого минимум на 50 дБ ниже уровня измерительного сигнала. Методика и нормативные параметры их оценки отсутствует.

# МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Дискретизацией непрерывного во времени сигнала называется процесс отсчетов в эквидистантных временных точках. Результатом дискретизации является дискретный во времени выходной сигнал.

Принцип формирования цифровых сигналов: разбиение непрерывного сигнала  $x(t)$  на дискретные отсчеты в моменты времени  $t=mT$  с помощью дельта-функций:

$$\delta'_T(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - mT)$$

Квантование и модуляция осуществляются импульсным модулятором, входной величиной которого является непрерывный сигнал, а выходной – модулированная последовательность импульсов.

Дискретные уровни принимают значения  $\pm 0,5\Delta \times (2n-1)$  при изменении входного сигнала в пределах до  $\Delta \times (2n-1) = U_{max} - \Delta$ . Ошибка квантования определяется в пределах  $\leq 0,5\Delta$  и ограничен ошибкой  $\sigma = 3\Delta\sqrt{2}$ .

# МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При частоте дискретизации  $F_d$  до 192 кГц на сигналы периодической последовательности треугольной формы с частотой  $P_{k=1\dots 20}$ , воздействуют дискреты, соответствующие средним частотам дискретизации  $F_d$  (таблица 1):

Таблица 1 – Средние частоты ПРР и субгармоники  $F_d$

Номер полосы	Средняя частота субгармоники, Гц	Номер субгармоники	Коэффициент приведения к $2^n$
1	240	800	0,16
2	480	400	0,32
3	640	300	0,42(6)
4	750	250	0,512
5	960	200	0,64
6	1000	192	0,8(3)
7	1280	150	0,85(3)
8	1500	128	1,0
9	1600	120	1,0(6)
10	1920	100	1,2

Номер полосы	Средняя частота субгармоники, Гц	Номер субгармоники	Коэффициент приведения к $2^n$
11	2000	96	1,3
12	2400	80	1,6
13	2560	75	1,70(6)
14	3000	64	2,0
15	3200	60	2,1(3)
16	3840	50	2,56
17	4000	48	2,6
18	4800	40	3,2
19	6000	32	4,0
20	8000	24	5,0(3)

# ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КВАНТОВАТЕЛЯ

Задачей является повышение достоверности оценки защищенности речевой информации при ее передаче за счет дополнительного преобразования полученного сигнала шума квантования.

Поставленная задача достигается тем, что используют периодическую последовательность импульсов треугольной формы, которую подают на вход АЦП, а на его выходе получают измерительный сигнал и шум квантования в виде периодической последовательности импульсов пилообразной формы.

Затем формируют квантователь, амплитудная характеристика которого является результатом суммирования амплитудной характеристики периодической последовательностей импульсов треугольной формы и периодической последовательности импульсов пилообразной формы.

На вход квантователя подают периодическую последовательность импульсов треугольной формы, причем амплитуда входного сигнала, равная  $L = 2^n$ , где  $L$  – амплитуда импульса треугольной формы,  $n$  – количество ступеней в кодовом слове, аналогичная амплитуде квантователя, на вход квантователя подают сигналы периодической последовательности импульсов треугольной формы и сигналы дискретов.

# ФОРМИРОВАНИЕ КВАНТОВАТЕЛЯ

Дискретизацию входного сигнала осуществляют в период времени взятия отсчетов в точках с равным мерным числом повторений  $t - mT$ , где  $m$  – порядковый номер взятия отсчетов от 1 до  $L$ ;  $T$  – время повторения дискретов, равное  $1/F_g$ (мкс), где  $F_g$  – частота повторения дискретов (Гц). На выходе квантователя получают периодическую последовательность импульсов пилообразной формы, из которых преобразованием Фурье получают основную гармонику и высшие четные и нечетные гармоники с последующим прореживанием, исключая высшие четные гармоники, получая обработанный сигнал шума квантования

Затем основную и высшие нечетные гармоники периодической последовательности импульсов треугольной формы селективно обрабатывают, накапливают кратно, в точке наблюдения измеряют прореженный сигнал шума квантования и шум, определяют их отношение. После этого оценивают защищенность РС сравнением нормированного ОСШ с полученным отношением сигнала шума квантования к шуму в точке наблюдения.

# ШУМ КВАНТОВАНИЯ И ПРОРЕЖИВАНИЕ

Шум квантования периодической импульсной треугольной формы представляет периодическую последовательность импульсов пилообразной формы:

$$q(s_{mpeye}) = \frac{2}{\pi} \left( \sin(x) - \frac{1}{2} \sin(2x) + \frac{1}{3} \sin(3x) - \frac{1}{4} \sin(4x) + \dots \right)$$

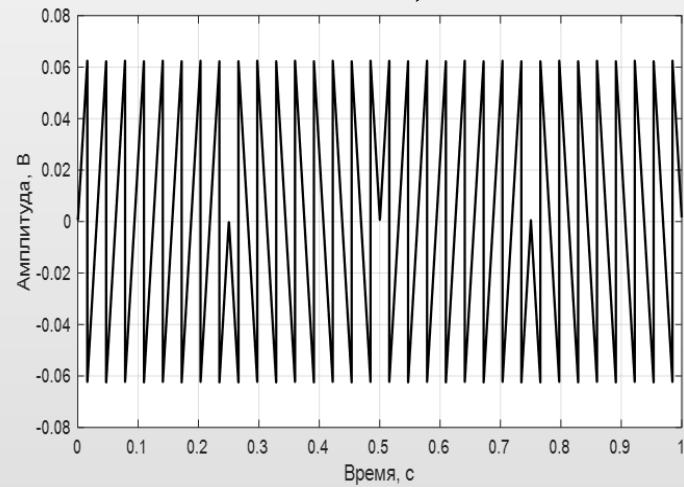
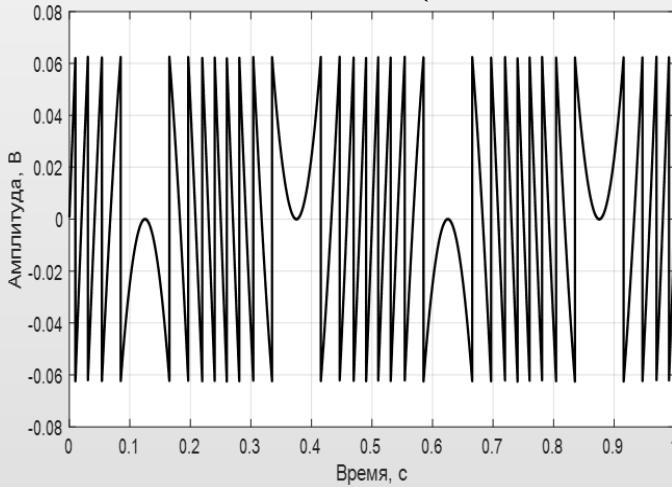


Рисунок 5 – Шум квантования последовательностей:  
гармонической (а) и треугольной (б)

Преобразование Фурье пилообразной формы сигнала периодической последовательности импульсов с прореживанием исключает четные гармоники и на выходе получаем основную и высшие нечетные гармоники. Их обрабатывают путем селекции и накапливания.

# ОБРАБОТАННЫЙ ШУМ КВАНТОВАНИЯ

Преобразуем автокорреляционной функцией (АКФ) периодическую импульсную последовательность прямоугольной формы в периодическую импульсную последовательность треугольной формы с мощностью  $A^2/2\tau$ , где  $A$  – амплитуда импульса импульсной последовательности и получаем следующую АКФ

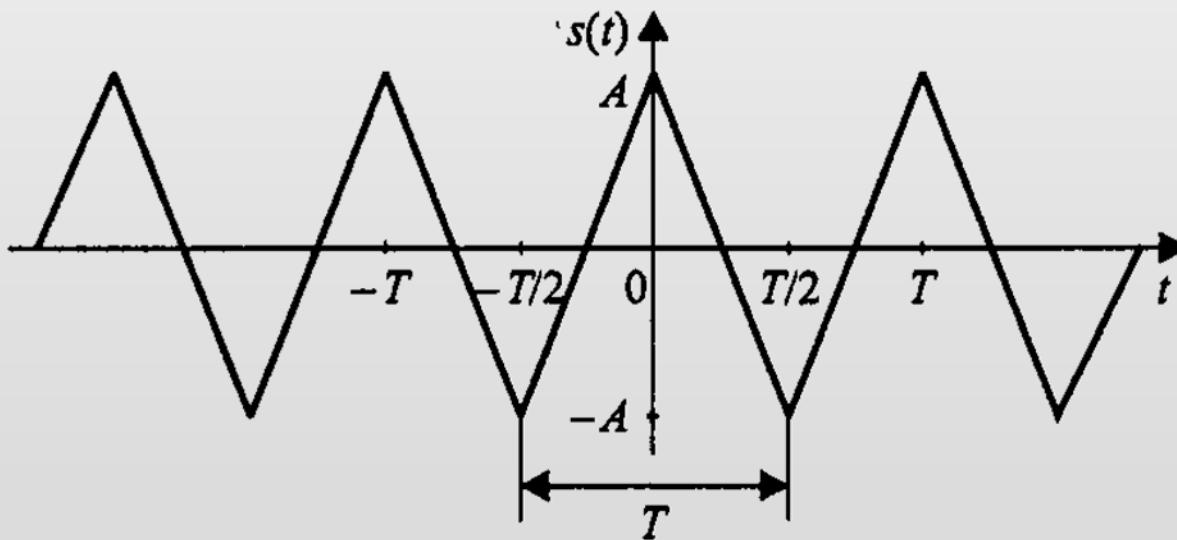


Рисунок 6 – Шум квантования

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СИГНАЛ ПО КАТЕЛЬНИКОВУ

Спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов описывается выражением:

$$F(f) = \frac{A}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left( \frac{\sin(k\pi/2)}{k\pi/2} \right) \delta(f - kf_0)$$

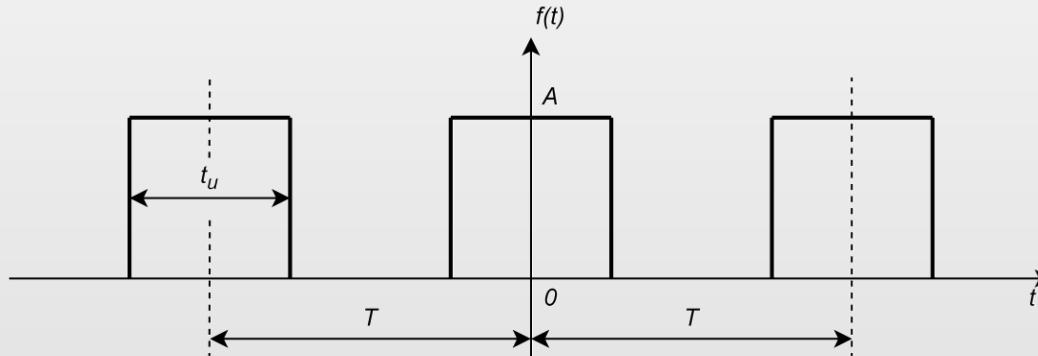


Рисунок 7 – Последовательность прямоугольных импульсов

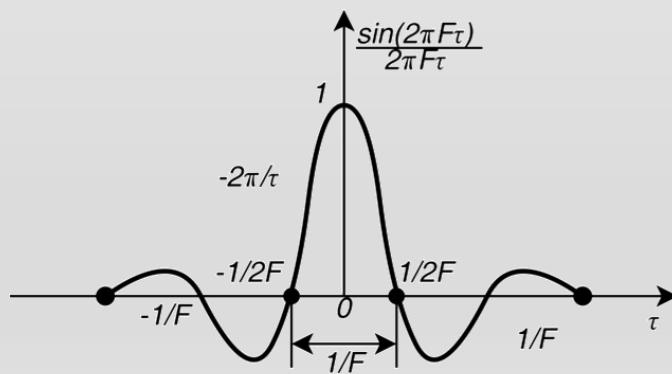


Рисунок 8 – Спектр периодической функции

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен измерительный сигнал периодической последовательности импульсов треугольной формы.
2. Обоснован критерий оценки защищенности речевого сигнала в аналоговой форме и при дискретно-квантованном преобразовании в КУИ.
3. Обоснованы оптимальные методы обработки слабых сигналов в шумах сигналов, шумов квантования в точке наблюдения в шумах высокого уровня.
4. Получен квантователь как сумма периодической последовательной импульсов треугольной формы и периодической последовательности пилообразной формы.
5. Показано, что количество уровней квантования пилообразного сигнала равно количеству дискретов.
6. Обработка периодической последовательности пилообразной формы путем преобразования Фурье с прореживанием позволило исключить высшие четные гармоники, в результате чего сигналы шума квантования преобразуются в периодические последовательности импульсов треугольной формы, что улучшает качество обработки.
7. Измерительные частоты полос равной разборчивости должны являться субгармониками частоты дискретизации.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обработка данных оценки защищенности каналов утечки речевой информации / В.К. Железняк, А.Г. Филиппович, К.Я. Раханов и др. // Современные средства связи: материалы XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 окт. 2023 г. / Белорус. гос. акад. связи. – Минск, 2023.
2. Синтез измерительного композитного сигнала для оценки защищенности речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании / В.К. Железняк, С.В. Лавров, А.Г. Филиппович и др. // Доклады БГУИР. – 2020. – № 18/6. – С. 81–87.
3. Формирование каналов утечки речевых сигналов при отсчетно-дискретном преобразовании / В.К. Железняк, С.В. Лавров, А.Г. Филиппович и др. // Комплексная защита информации: материалы XXVIII науч.-практ. конф., Гомель, 23–25 мая 2023 г. / НИИ ТЗИ. – Минск, 2023.
4. Формирование каналов утечки речевой информации при отсчетно-дискретном преобразовании / В.К. Железняк, С.В. Лавров, А.Г. Филиппович, М.М. Барановский // Современные средства связи: материалы XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–27 окт. 2023 г. / Белорус. гос. акад. связи. – Минск, 2023.

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**