



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Военный учебный центр



ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В АСУ

Тема № 1. Автоматизация первичной обработки РЛИ

Занятие № 4 Квантование радиолокационной информации

**Руководитель занятия:
преподаватель кафедры АСУ ВКС
майор запаса Бейльман С.В.**

Учебные вопросы:

- 1. Дискретизация аналогового сигнала по времени.**
- 2. Квантование сигнала по уровню.**
- 3. Квантование сигнала по амплитуде без дискретизации по времени.**

Литература

1. В.Н. Ратушняк, С.В. Бейльман, И.В. Тяпкин. **Основы обработки и передачи информации в автоматизированных системах управления. Часть I Первичная обработка радиолокационной информации.** – Красноярск: СФУ ВУЦ, 2020 – С. 74 – 86.
2. **Виноградов А. П. Основы обработки радиолокационной информации. Ч.1. Первичная обработка радиолокационной информации.** (гриф МО РФ). – СПб: тип. ФВУ ПВО, 2002. – С. 47 – 51.

Вопрос №1

**Дискретизация аналогового
сигнала по времени.**

Квантование радиолокационных сигналов

Во многих случаях обработка РЛИ оказывается более эффективной при использовании не аналоговых, а цифровых устройств.

Цифровые устройства обладают рядом важных преимуществ. Основные из них – надежность в работе и стабильность характеристик, недостижимые в аналоговых устройствах, обусловлены, в частности, использованием исключительно цифровых сигналов.

Поэтому при обработке РЛИ целесообразен переход от аналогового видеосигнала к цифровому. С этой целью выполняются операции дискретизации аналогового сигнала по времени и квантования по уровню (по амплитуде). При рассмотрении данных операций не будем акцентировать внимание на принадлежность сигнала к числу полезных или мешающих.

Сигнал на выходе приемного устройства РЛС представляет собой непрерывный по времени и амплитуде случайный процесс $x(t)$, т.е. аддитивную смесь полезного сигнала и шума

$$x(t) = S_{\text{сигн}}(t) + N_{\text{шума}}(t).$$

Это обусловлено наличием внутренних шумов приемника и воздействием различного рода помех, флуктуаций среды распространения сигнала и эффективной отражающей поверхности цели.

Широкое применение в КСА РТВ цифровых вычислительных устройств потребовало преобразования аналогового сигнала в цифровую форму для его дальнейшей обработки. Это преобразование осуществляется путем выполнения операций дискретизации по времени и квантования по уровню, т. е. в два этапа.

Эти операции именуются квантованием, а реализующие их технические устройства – **квантизаторами** радиолокационных сигналов (рис.1).

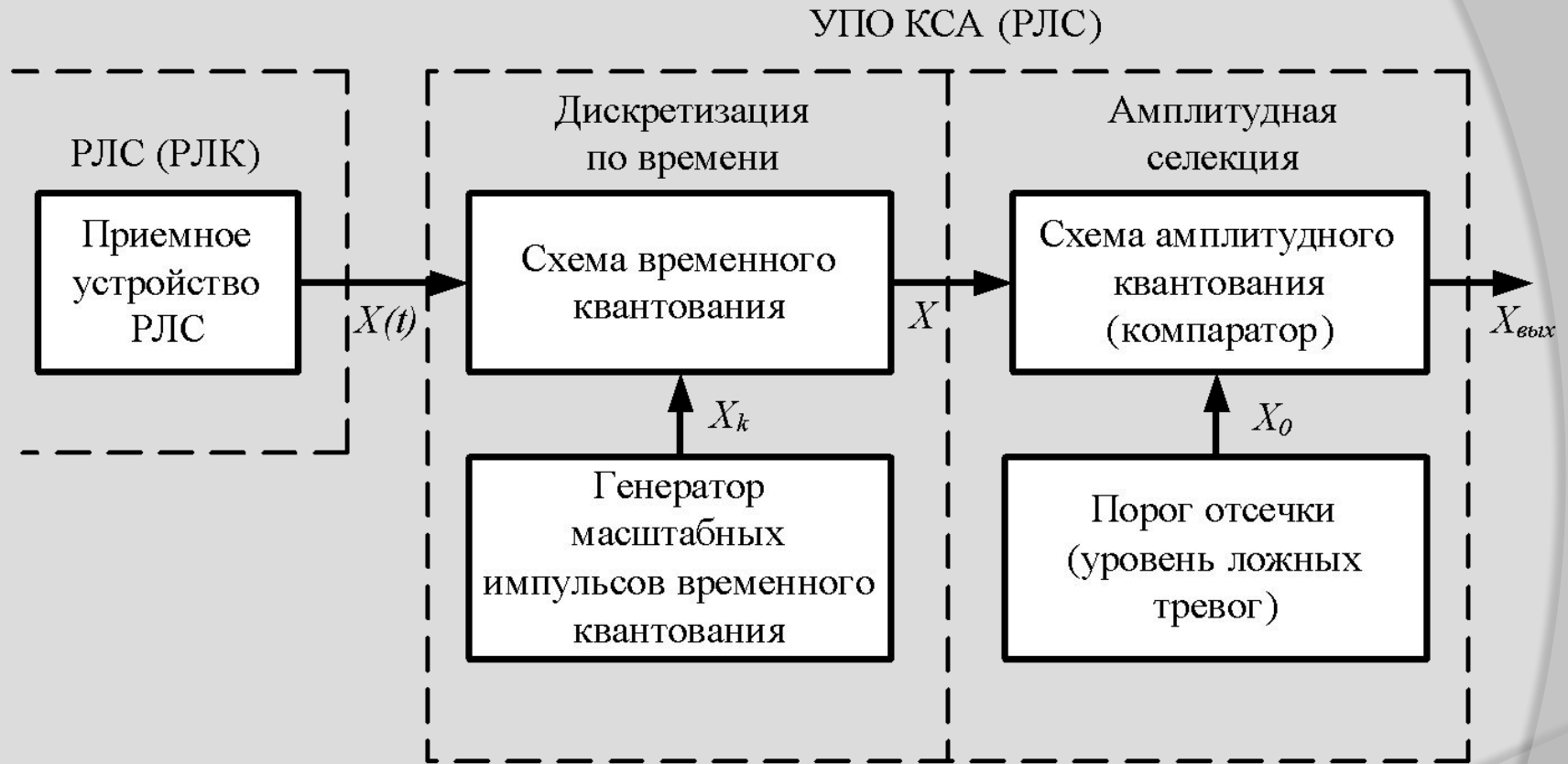


Рис. 1. Структурная схема квантизатора.

Дискретизация аналогового сигнала по времени

Пусть аналоговый сигнал, подлежащий первичной обработке, описывается непрерывной функцией времени $U(t)$, т. е. по оси времени сигнал задан несчетным множеством значений (рис. 2, б). Естественно, возникает вопрос, имеет ли смысл при обработке РЛИ использовать все множество значений $U(t)$. Теория и практика указывают на возможность и целесообразность дискретизации аналогового сигнала по времени.

Замена непрерывного в общем случае стохастического процесса $U(t)$ его значениями $U(t_j)$ в дискретные моменты времени t_j называется **дискретизацией аналогового сигнала по времени**.

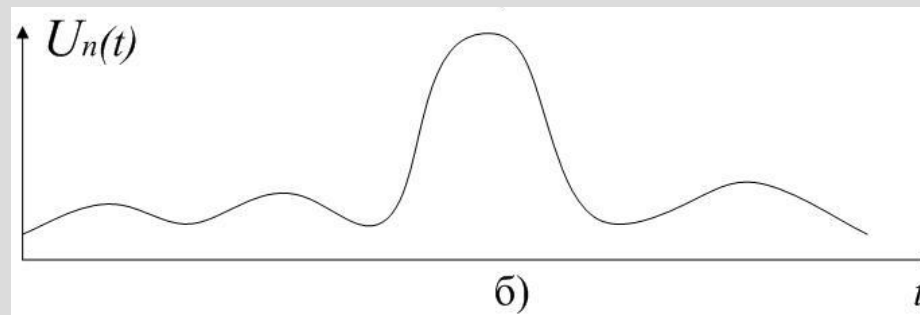


Рис.2. Амплитудное детектирование

Значения дискретизированного процесса $U(t_1), U(t_2), U(t_3), \dots$ называются отсчетами, а их совокупность $\{U(t_j)\}$ – **выборкой**.

Временной интервал между соседними отсчетами называется **интервалом** (или **шагом**) **дискретизации**. Если значение этого интервала в процессе дискретизации сигнала остается неизменным, то он называется **периодом дискретизации** (T_d) (рис.3).

Временное квантование сигнала приемника приводит к его разбиению на дискретные составляющие, причём каждому дискретному элементу сигнала соответствует один элементарный участок дальности размером

$$\Delta D = \frac{cT_d}{2} \quad (1)$$

где T_d – период дискретизации РЛ-сигнала.

Значение T_d выбирается в соответствии с выражением:

$$T_d = \frac{1}{2f_{\max}} \quad (2)$$

где f_{\max} – максимальная (граничная) частота в спектре входного сигнала.

Для простого или сложного сигнала, прошедшего оптимальную обработку, $T_d \approx \tau_{\text{и}}$, где $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

Общее число элементарных участков дальности на одном азимуте определяется выражением:

$$N_d = \frac{D_{\text{max}}}{\Delta D}, \quad (3)$$

где – D_{max} максимальная дальность обнаружения.

Период дискретизации – это важнейший параметр цифровых устройств обработки, существенно влияющий на их характеристики.

Видно, что чем меньше период T_d , тем точнее приближение значения выходного сигнала цифрового устройства к выходному сигналу его аналогового прототипа в соответствующие моменты времени, следовательно, меньше алгоритмическая погрешность.



Рис. 3. Разбиение зоны обнаружения РЛС на элементарные участки по дальности

Вместе с тем при уменьшении T_d увеличивается количество выборок (отсчётов) входного сигнала, что приводит к увеличению числа арифметических операций при реализации алгоритма обработки.

При выполнении каждой операции результат из-за конечного числа разрядов округляется, поэтому чем больше арифметических операций содержит алгоритм обработки, тем больше вычислительная погрешность.

Оптимальное значение периода дискретизации $T_{\text{допт}}$, при котором суммарная погрешность минимальна, может отличаться от величины, определяемой выражением (2)

$$\Delta\beta = 2\pi \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{обз}}} \quad (4)$$

где $T_{\text{п}}$ – период повторения зондирующих импульсов;
 $T_{\text{обз}}$ – период обзора (вращения антенны).

Таким образом, в результате временного квантования зона обзора РЛС разбивается на элементарные ячейки с размерами

$$S = \Delta\beta \quad (5)$$

Общее число элементарных ячеек в зоне обзора РЛС

$$N = \frac{\hat{\Delta}}{\Delta\beta} \times \frac{\text{max.}}{\Delta}. \quad (6)$$

Устройство дискретизации в простейшем случае представляет собой стробируемый каскад – ключ (рис. 4).

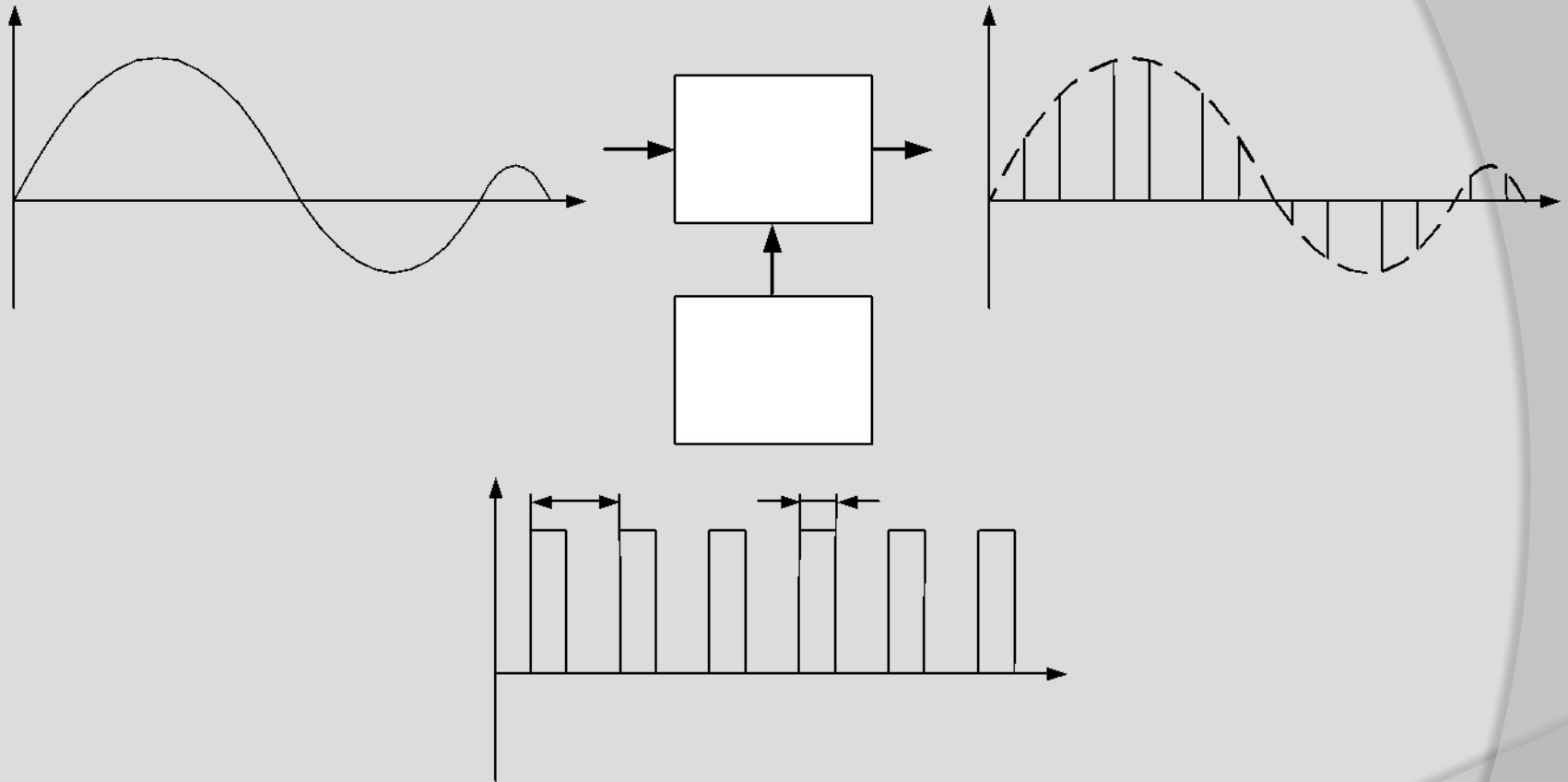


Рис. 4. Принцип дискретизации

Дискретизация по времени заключается в следующем: в дискретные интервалы времени t_k (в точках дискретизации) выбираются значения x случайного непрерывного процесса $x(t)$, которые в дальнейшем будем называть выборками.

Амплитуды дискретных значений сигнала (выборки) являются непрерывными и случайными величинами, которые теоретически могут принимать значения от 0 до ∞ .

Выборки как случайные величины описываются соответствующими законами распределения, которые зависят от свойств полезного сигнала и наложенных на него помех.

Конкретизируя изложенное, отметим, что наличие пакета отраженных от цели сигналов определило физические различия между параметрами (амплитуда, фаза, частота, длительность, поляризация) смеси полезного сигнала с шумом и сигнала, состоящего только из одного шума.

Последнее определило существенные статистические различия между выборками смеси полезного сигнала с шумом и выборками, содержащими только шум.

Выборка смеси полезного сигнала и узкополосной шумовой помехи подчиняется распределению, описываемому обобщенным законом Рэлея – Райса:

$$W(x/a) = x \exp\left\{-\frac{x^2 + a^2}{2}\right\} I_0(xa), \quad (7)$$

где $x = (S + N_{\text{ш}}) / \sigma_{\text{ш}}$ – нормированная по уровню шумов величина выборки (смесь сигнал/шум);

S – величина полезного сигнала в составе выборки;

$N_{\text{ш}}$ – величина шума в составе выборки;

$\sigma_{\text{ш}}$ – среднеквадратическое значение шума в составе выборки;

$a = S/\sigma_{\text{ш}}$ – нормированная по среднеквадратическому значению шума величина полезного сигнала (отношение сигнал/шум);

$I_0(xa)$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка;

$W(x/a)$ – условная плотность распределения вероятности амплитуды выборки при наличии в её составе полезного сигнала.

При отсутствии в составе выборки полезного сигнала, т. е. $S = 0$; $x = N_{ш}/\sigma_{ш}$, выражение (7) преобразуется в одномерный закон Релея, который описывает распределение вероятности амплитуды выборки, состоящей только из одного шума:

$$W(x / 0) = x \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} \right\} \quad (8)$$

где $W(x/0)$ – условная плотность распределения вероятности амплитуды выборки при отсутствии в ее составе полезного сигнала.

Соответственно между выборками, содержащими полезный сигнал, и выборками, состоящими только из шума, существуют статистические различия, что позволяет использовать для решения задачи автоматического обнаружения ВО теорию статистических решений.

При дискретизации по времени возможны потери полезной информации. Поэтому выбор значений интервала (периода) дискретизации t_k и длительности масштабных импульсов временного квантования τ_k имеет принципиальное значение.

В свою очередь для уменьшения пропусков полезных сигналов, сохранения разрешающей способности РЛС и обеспечения требуемой точности оценки дальности цели интервал (период) дискретизации t_k в соответствии с теоремой отсчетов В. А. Котельникова выбирают равным $t_k = \tau_{и}/2$, где $\tau_{и}$ – расчетная длительность отраженного от цели импульса.

В свою очередь, значения τ_k могут лежать в пределах величин от пренебрежимо малой по сравнению t_k (точечные выборки амплитуды огибающей через интервал t_k) до сопоставимой или равной t_k .

В целях минимизации пропусков полезных сигналов длительность импульсов квантования целесообразно выбирать равной значению t_k . В этом случае импульсы квантования следуют без пропусков и перекрытия.

Вопрос №2

**Квантование сигнала по
уровню.**

Квантование аналогового сигнала по уровню.

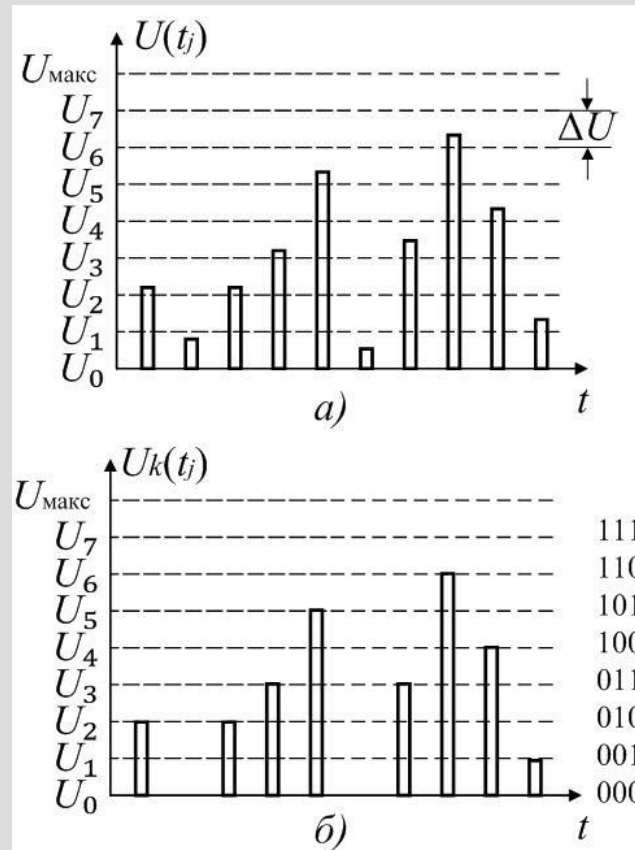


Рис. 5. Принцип квантования сигнала по уровню

В дальнейшем полученные выборки дискретных значений огибающей случайного процесса подаются на схему амплитудного квантования, где подвергаются квантованию по уровню (амплитуде).

Принцип квантования выборки отсчетов $U(t_j)$ по уровню иллюстрируют эпюры напряжений, приведенные на рис. 5.

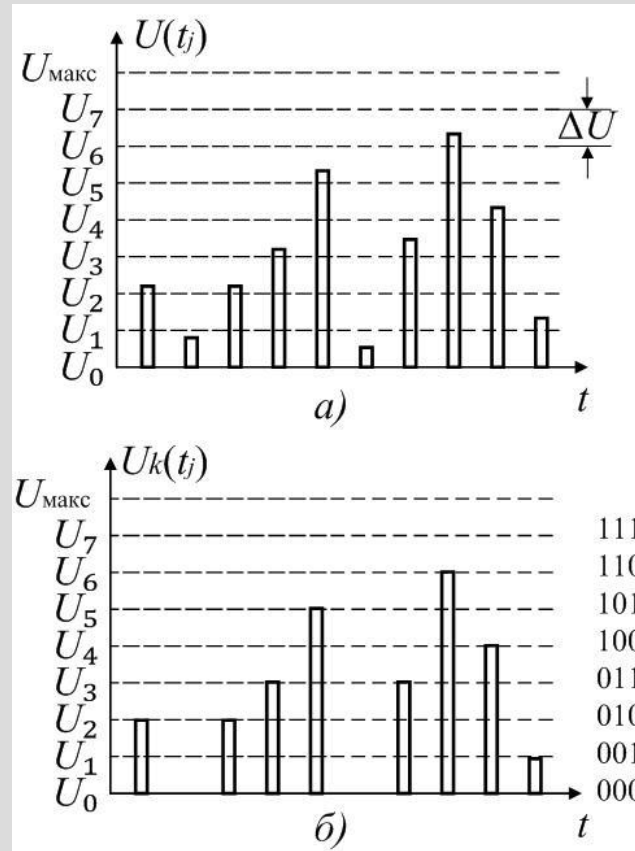


Рис. 5. Принцип
квантования сигнала
по уровню

Пусть амплитуда последовательности отсчетов $U(t_j)$ изменяется в некотором диапазоне $[0 \dots U_{\text{макс}}]$. Разобьем данный диапазон на N равных интервалов. В таком случае получим N уровней квантования (при $N = 8$ на рис. 5а имеем $U_0, U_1 \dots U_7$). Обычно число уровней квантования N задается степенью числа 2, т. е. $N = 2^n$, где n – одно из целых чисел натурального ряда, начиная с единицы.

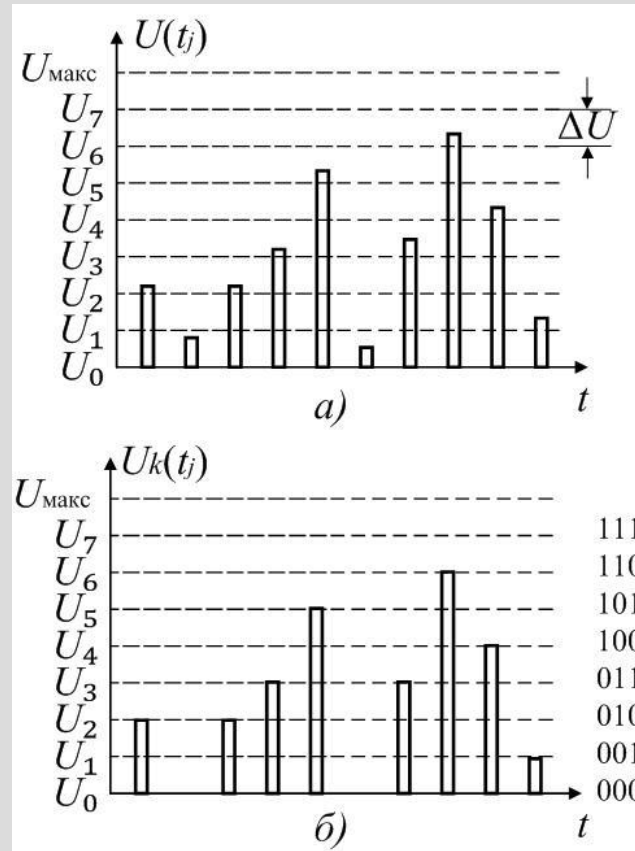


Рис. 5. Принцип
квантования сигнала
по уровню

В рассматриваемом примере величина n выбрана равной трем, при которой $N = 8$. Заметим, что максимально возможное значение амплитуды $U_{\text{макс}}$ не образует уровень квантования, так как он излишен.

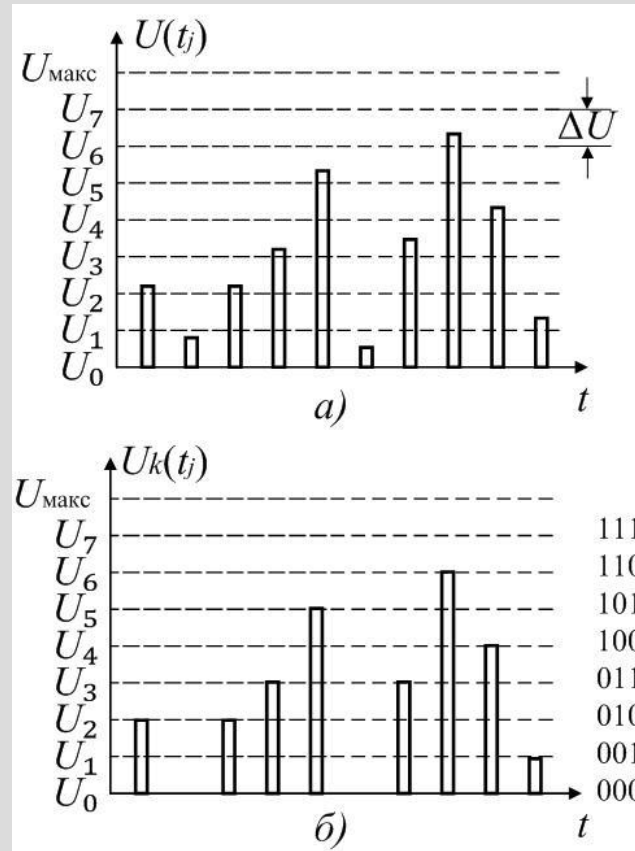


Рис. 5. Принцип
квантования сигнала
по уровню

В соответствии с полученной сеткой уровней $U_0, U_1 \dots U_7$ результатом квантования является новая последовательность отсчетов (рис. 5б), каждому из которых присвоено значение амплитуды U_k , равное ближайшему превышенному k -му уровню, т. е.

$$U_k(t_j) = \text{int} \left\{ \frac{U(t_j)}{\Delta U} \right\} \Delta U \quad (9)$$

где – $\text{int} \{*\}$ символ операции определения целочисленного значения аргумента (выражения в фигурных скобках);

ΔU – разность напряжений между соседними уровнями квантования, или дискрет по уровню.

Его величина (см. рис. 5а) определяется из соотношения

$$\Delta U = \frac{U_{\text{макс}}}{N} = \frac{U_{\text{макс}}}{2^n} \quad (10)$$

Заметим, что если $U(t)$ – случайный процесс, то квантование по уровню переводит несчетное множество случайных амплитуд $U(t_j)$ также в случайное, но конечное множество фиксированных уровней $U_k(t_j)$.

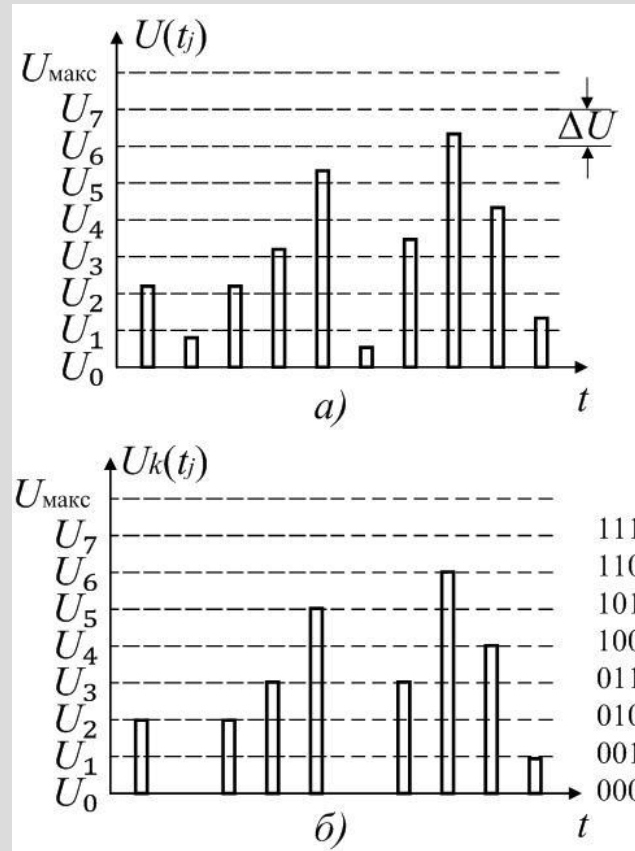


Рис. 5. Принцип
квантования сигнала
по уровню

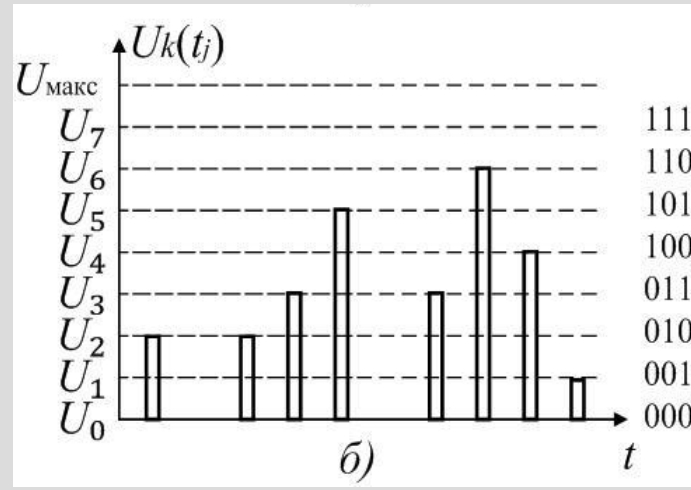
Приведем пример. Пусть максимально возможная амплитуда входного сигнала $U_{\text{макс}} = 4$ В. Положим, что $n = 3$. В таком случае число уровней квантования $N = 2^3 = 8$, т. е. сетка уровней определяется значениями $U_0, U_1 \dots U_7$. Определим в соответствии с формулой (10) величину дискрета по уровню:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{макс}}}{N} = \frac{U_{\text{макс}}}{2^n} = \frac{4}{8} = 0,5 [\text{В}]$$

Тогда, например, при амплитуде входного сигнала, равной 3,25В, значение квантованного по уровню отсчета

$$U_k(t_j) = \text{int} \left\{ \frac{U(t_j)}{\Delta U} \right\} \Delta U = \text{int} \left\{ \frac{3,25}{0,5} \right\} 0,5 = 6 \times 0,5 = 3 [\text{В}]$$

Результат квантования при небольшом числе уровней несложно оценить графическим методом. Так, согласно рис. 5, при $\Delta U = 0,5$ В амплитуда первого квантованного отсчета равна 1 В; второго – 0 В; последующих – 1 В; 1,5 В; 2,5 В; 0 В; 1,5 В; 3 В; 2 В; 0,5 В.



Пронумеруем уровни квантования U_0, U_1, \dots, U_{N-1} в двоичной системе счисления (см. рис. 5б):

уровню U_0 поставим в соответствие код 000;

уровню U_1 поставим в соответствие код 001;

.....

уровню U_{N-1} поставим в соответствие код $N-1(2)$.

Цифровая сетка уровней 000, 001, .., $N-1(2)$ переводит последовательность квантованных отсчетов $\{U_k(t_j)\}$ в совокупность двоичных кодовых комбинаций $\{X_j(2)\}$, представляющих цифровой сигнал.

Заметим, что параметр n , определяющий количество уровней квантования $N = 2^n$, приобретает физический смысл. Он характеризует минимальное число разрядов для представления любого значения цифрового сигнала при заданной сетке уровней квантования.

Теоретически КСА РТВ может иметь n порогов и $n+1$ уровней квантования, однако в ней используется схема только с одним порогом и двумя уровнями квантования.

В этой связи отметим, что, во-первых, энергетические потери при двоичном квантовании составляют 1–2 дБ, что вполне приемлемо для большинства случаев.

Например, при отношении сигнал/шум $a \geq 2$ двоичное квантование исчерпывает всю информацию об амплитуде сигнала. Во-вторых, многоуровневое квантование оказывается эффективнее двоичного лишь при обнаружении слабых сигналов.

Для квантования по уровню устанавливается порог (уровень отсечки) x_0 , с которым сравнивается величина выборки. В настоящее время в УПО КСА (СРЛ) РТВ в зависимости от отношения сигнал/шум $a = \frac{S}{\sigma}$ могут использоваться два способа двоичного квантования:

квантование по превышению при малом отношении сигнала к шуму и

квантование по пересечению при большом соотношении.

Квантование по превышению (рис.6) заключается в появлении на выходе схемы амплитудного квантования импульса стандартной амплитуды и длительности «1» при превышении выборкой порога отсечки (квантования) x_0 в течение длительности масштабного импульса временного квантования τ_k .

Если в пределах длительности импульса τ_k амплитуда выборки не превышает уровень порога отсечки, то на выходе схемы амплитудного квантования появляется «0» (пропуск цели).

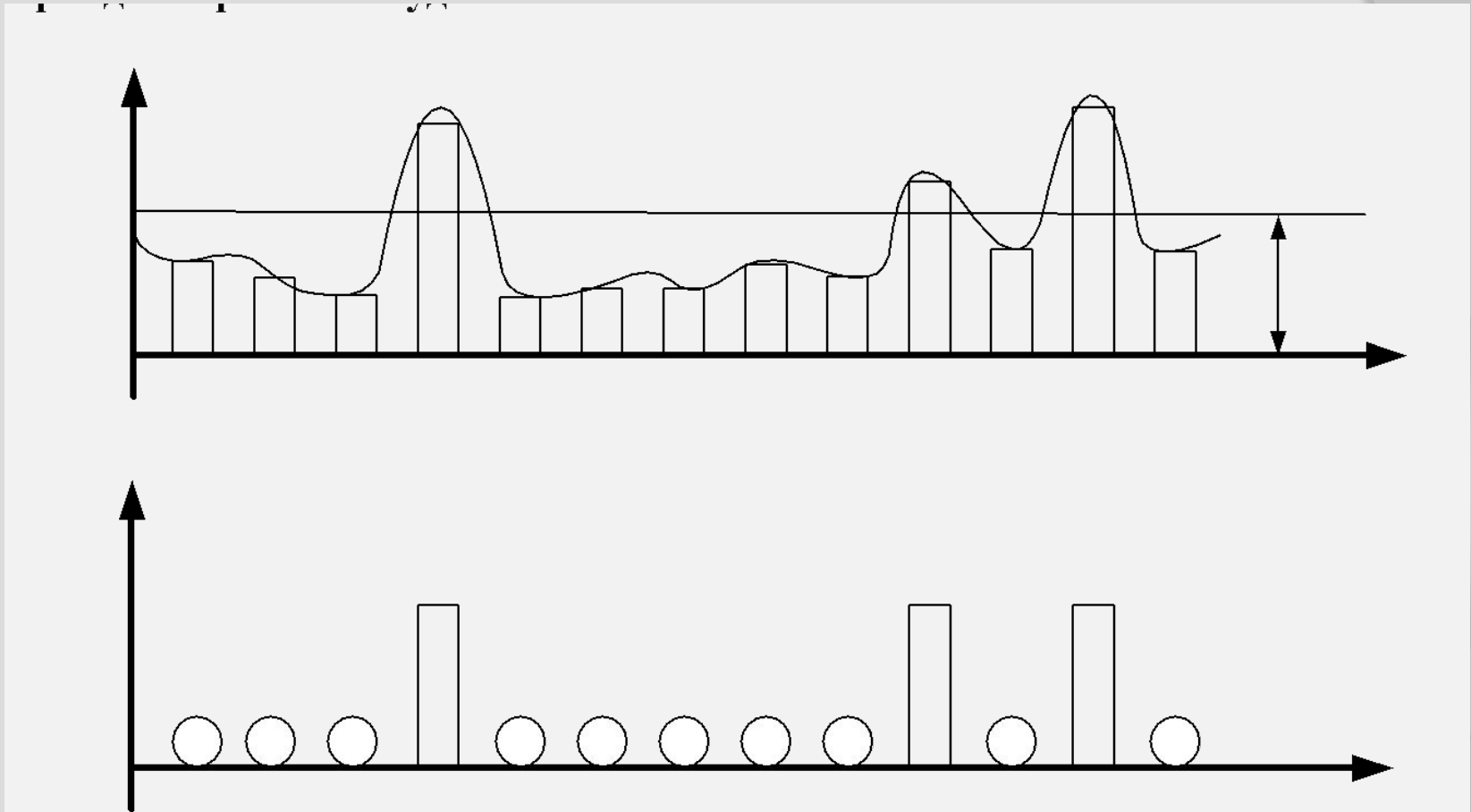


Рис. 6. Пояснение квантования по превышению.

Квантование по пересечению (рис.7) – импульс стандартной амплитуды и длительности «1» появляется на выходе схемы амплитудного квантования при пересечении выборкой снизу-вверх порога отсечки (квантования) x_0 в течение длительности масштабного импульса временного квантования τ_k . При отсутствии данного пересечения на выходе схемы амплитудного квантования появляется «0» (пропуск цели).

Важно отметить, что независимо от способа квантования появление «1» или «0» на позиции выборки является случайным событием в силу случайного значения выборки. Поэтому сигнал на выходе квантизатора представляет собой случайную последовательность единиц и нулей.

Задача выбора значения порога амплитудного квантования x_0 решается с учетом:

- 1) допустимой вероятности превышения порога выборкой, состоящей из одного шума, вероятности ложной тревоги $P_{лт}$;
- 2) параметров измерителя угловых координат ВО УПО КСА.

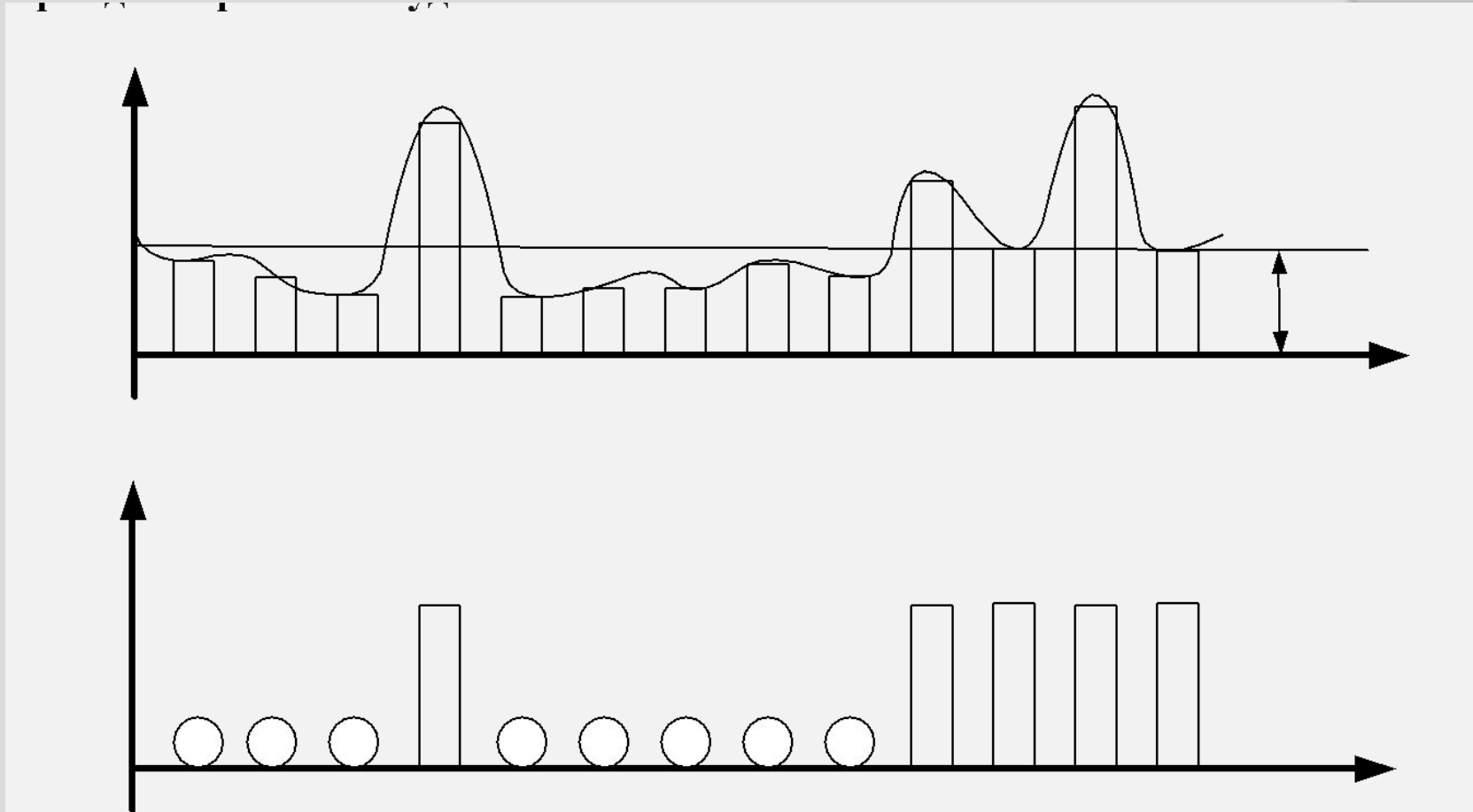


Рис. 7. Пояснение квантования по пересечению.

В результате дискретизации по времени и квантования по уровню вся зона обнаружения РЛС разбивается на элементарные участки по азимуту и дальности (рис. 8), каждый из которых «заполнен» двоично-квантованными сигналами (ДКС), условно обозначаемыми «1» и «0» в зависимости от превышения (пересечения) порога x_0 .

Так как дальность до цели D за время пребывания ее в диаграмме направленности антенны РЛС практически не изменяется в данном обзоре, то сигналы, отраженные от одной цели, будут находиться в одном кольце дальности ΔDk , занимая N позиций на азимутальной оси β , что позволяет производить обработку комбинаций нулей и единиц как пачки квантованных сигналов, принадлежащих одной цели.

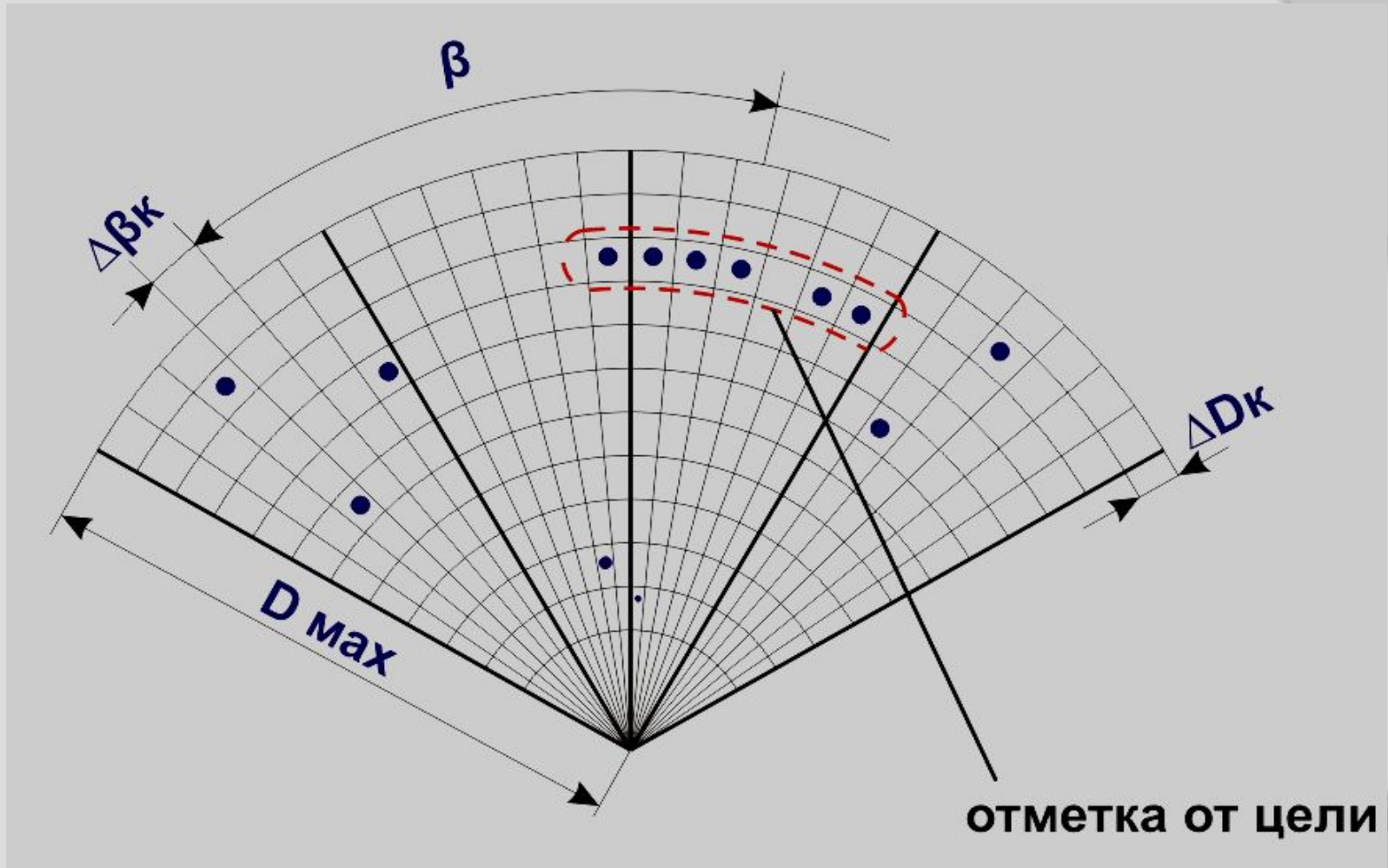


Рис. 8. Результат дискретизации по времени и квантования по уровню

Делаем выводы:

Поскольку квантованная информация полезных сигналов содержится в ДКС, автоматическая первичная обработка РЛИ сводится к анализу комбинаций ДКС, находящихся в одном кольце дальности на N позициях по азимутальной оси, и извлечению из них ряда характеристик в течение одного периода обзора РЛС.

Общей теоретической основой для математического описания процессов обнаружения и оценки параметров полезных сигналов является теория статистических решений, позволяющая синтезировать наиболее оптимальные алгоритмы ПОИ.

Показатели качества обнаружения цели и оценки её координат существенно зависят от статистических характеристик последовательности двоично-квантованных радиолокационных сигналов и помех.

Вопрос №3

Квантование сигнала по амплитуде без дискретизации по времени.

Квантование по амплитуде без дискретизации по времени

Преобразование выходного напряжения радиолокационного приемника в цифровую форму можно осуществить и не прибегая к дискретизации по времени.

Принцип такого преобразования иллюстрируется рис.9. Напряжение с выхода детектора поступает на пороговое устройство и схему, формирующую прямоугольные импульсы, совпадающие с участками входного напряжения, превышающими порог.

После этого производится кодирование запаздывания t_i каждого полученного импульса относительно зондирующего сигнала и длительности импульса τ_i .

Коды t_i и τ_i поступают в ЦВМ для дальнейшей обработки.

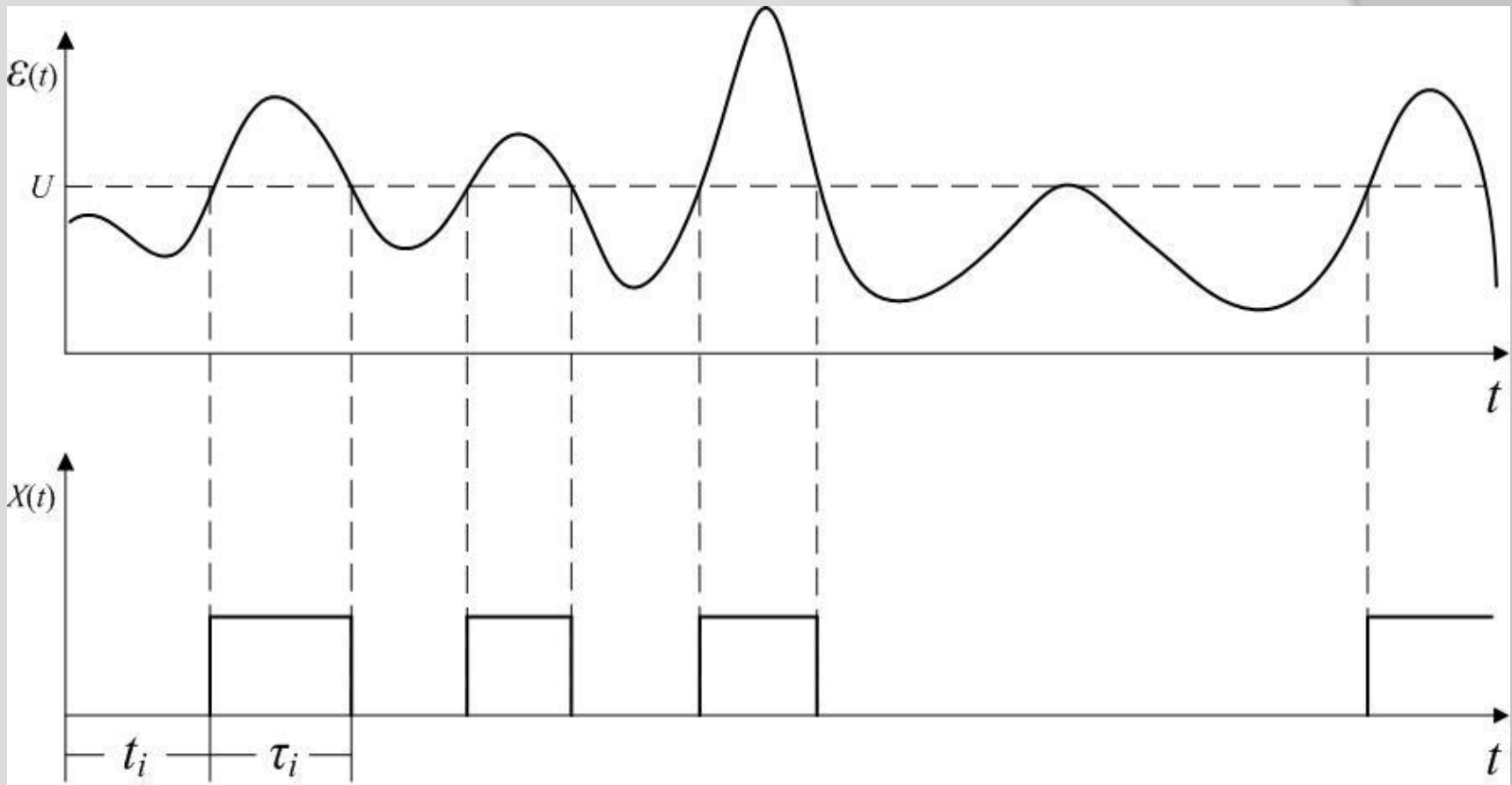


Рис. 9. Принцип преобразования сигналов в цифровую форму без дискретизации по времени

При анализе загрузки ЦВМ первичной обработки ложной информацией необходимо знать статистические характеристики помехи на выходе схемы квантования.

Если усилитель промежуточной частоты приемника имеет амплитудно-частотную характеристику, описываемую гауссовой кривой, то

$$\omega_I = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{\mathfrak{A}}} \quad (11)$$

где $\Delta\omega$ – энергетическая полоса пропускания усилителя промежуточной частоты.

В некоторых случаях после квантования по амплитуде производится селекция импульсов по длительности, т. е. для дальнейшей обработки пропускаются только импульсы, длительность которых превышает некоторую минимальную величину τ_0 . При этом среднее число выбросов помехи, прошедших селекцию по длительной, равно.

$$\Lambda(v_I \mathfrak{A}_0) = \Lambda(v_I) \int_{\tau_0}^{\infty} \omega(\tau) d\tau \quad (12)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Почему при обработке РЛИ целесообразен переход от аналогового видеосигнала к цифровому?
2. В чем заключается дискретизация аналогового сигнала по времени?
3. Поясните понятия «отсчет», «выборка», «шаг дискретизации».
4. Какой параметр определяет качество дискретизации аналогового сигнала по времени?
5. Какие параметры определяют период дискретизации видеосигнала, поступающего от РЛС в УПО АСУ?
6. В чем заключается квантование сигнала по уровню?
7. Поясните понятие «цифровой сигнал».
8. Сформулируйте правило преобразования аналогового напряжения в двоичный код и двоичного кода в аналоговое напряжение.
9. Поясните понятие «шум квантования».
10. Какие параметры характеризуют качество квантования сигнала?

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**