

Тема №1. Теоретические основы построения систем вооружения ЗРВ

ЗАНЯТИЕ №3. Зондирующие сигналы, используемые в ЗРС

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Общая характеристика зондирующих сигналов;
2. Влияние вида зондирующих сигналов на возможности РЛС.

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Справочник офицера противовоздушной обороны.

Дополнительная:

2. Импульсная техника, Ю.А. Браммер, И.Н. Пащук.

1. Общая характеристика зондирующих сигналов

Зондирующие сигналы формируются передающим устройством РЛС и излучаются в пространство с помощью передающей антенны, т.е. как бы зондирует пространство. Отсюда, и их название. **Зондирующие сигналы** определяют *тактико-технические характеристики* (ТТХ) РЛС такие как: дальность действия, разрешающие способности по дальности, скорости и другие. Радиолокационный зондирующий сигнал чаще всего является детерминированным. Зондирующие сигналы можно характеризовать следующими **параметрами**: закон модуляции, длительность, мощность и энергия, автокорреляционная функция, время корреляция, энергетический спектр (амплитудно-частотный и фазочастотный спектры), ширина спектра. Все эти характеристики сигналов играют важную роль в определении ТТХ РЛС и в целом системы ЗУРО.

Эти характеристики различны для конкретных видов зондирующих сигналов, и во многом будут определять структуру устройств обработки радиолокационных сигналов.

Рассмотрим характеристики некоторых видов зондирующих сигналов.

Зондирующий сигнал, как объект излучения, в силу его волновой структуры может быть описан математически, т.е. может быть создана его математическая модель. Математическая модель сигнала позволяет описать не только его структуру, но и процессы распространения сигнала в пространстве, процесс отражения сигнала и дальнейшей его обработки в приемных трактах РЛС. Зондирующий сигнал может быть описан математически с временной точки зрения (т.е. может быть создана его временная модель) и со спектральной точки зрения (т.е. может быть описан частотный спектр сигнала).

С временной точки зрения зондирующий сигнал можно представить в виде произведения гармонической и негармонической составляющих

$$u(t) = U(t) \cos(2\pi f_0 t + \psi_0) \quad (1.1)$$

$U(t)$ – амплитудный сигнал модуляции сигнала.

f_0 – несущая частота.

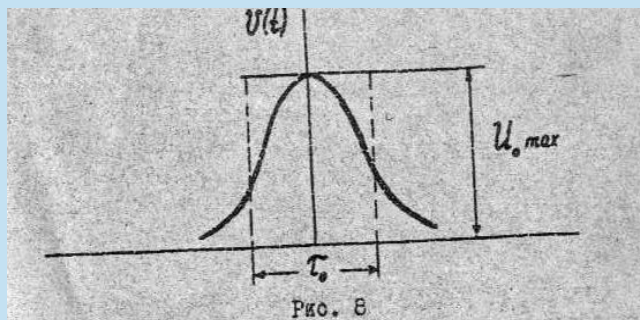
ψ_0 – начальная фаза несущего колебания.

Длительность сигнала связана со спектром сигнала следующим отношением

$$\tau_0 = \frac{\int_0^\infty |u(t)|^2 dt}{|u(t)|^2} = \int_0^\infty |U(t)|^2 dt \quad (1.2)$$

т.е длительность сигнала определяется как длительность прямоугольного радиоимпульса, имеющего одинаковую с рассматриваемым сигналом амплитуду и энергию.

Формулу (1.2) можно пояснить графически следующим образом



Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь

(1.3)

(1.4)

треугольника с основанием T_0 одинаковы

(1.5)

Из (1.5) видно, что для увеличения энергии сигнала следует увеличить либо среднюю мощность зондирующего сигнала либо его длительность

Важной характеристикой сигнала является **автокорреляционная функция** (АКФ). **АКФ** отражает взаимосвязь ДВУХ значений одного И ТОГО же сигнала, взятых в различные моменты времени.

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы (1.6)

Подставим значение $u(t)$ из формулы 1.1 и получим

$$R(t) = 2P_0 R_0(\tau) e^{j2\pi f_0 \tau} \quad (1.7)$$

$$R_0(\tau) = \frac{1}{\tau_0} \int_{-\infty}^{\infty} U(t) U^*(t - \tau) dt \quad (1.8)$$

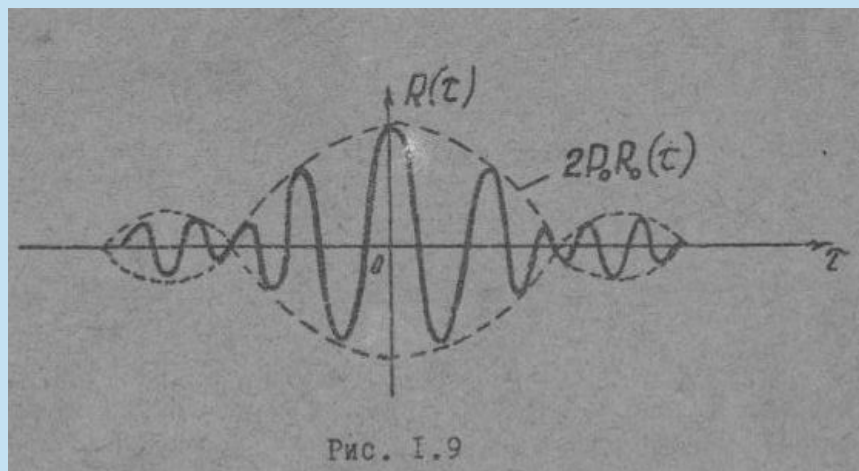
АКФ закона модуляции зондирующего сигнала, причем, максимальное значение, равное единице, она принимает при нулевом временном рассогласовании

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Таким образом значение АКФ зондирующего сигнала при нулевом временном рассогласовании определяется только мощностью сигнала.

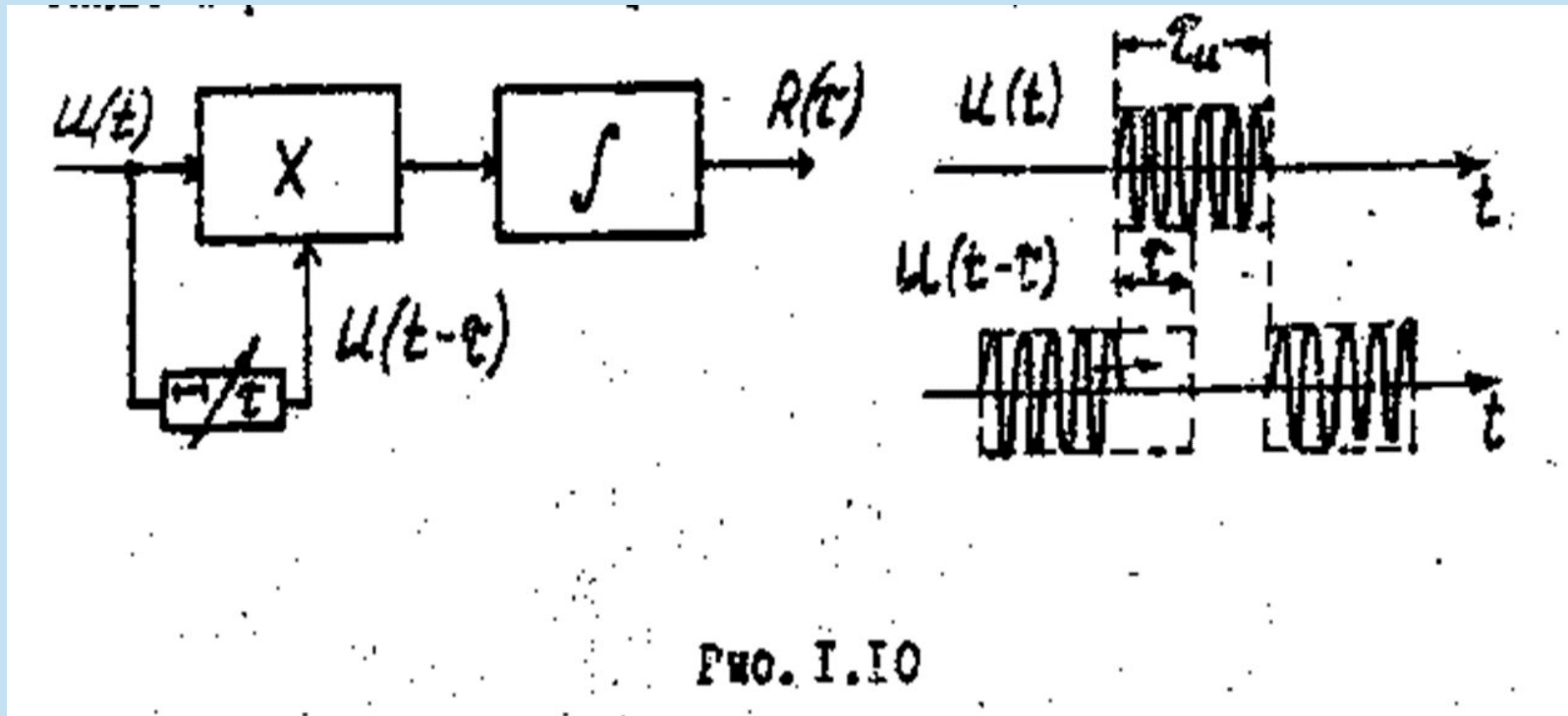
Графически АКФ произвольного зондирующего сигнала можно показать следующим образом:



Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Из выражений (1.6) и (1.8) видно, что для нахождения аппаратным путем необходимо иметь последовательно включенные перемножитель напряжений и интегратор



С помощью обратного преобразования Фурье находят АКФ по известному энергетическому спектру

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

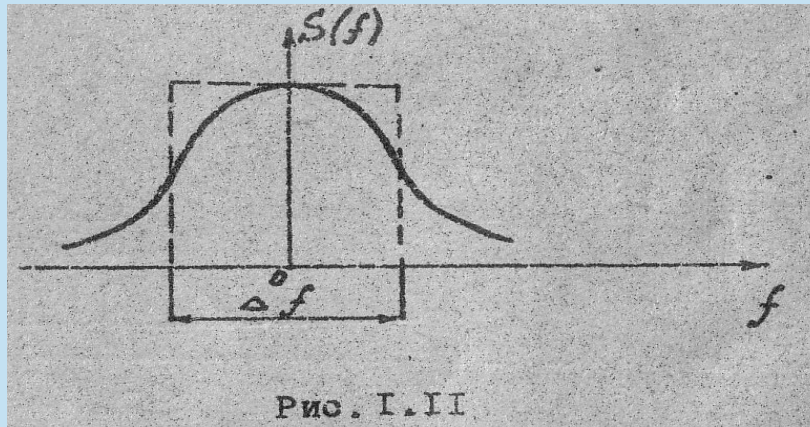
(1.10)

Энергетический спектр зондирующего сигнала характеризует усредненное распределение энергии сигнала в диапазоне частот, занимаемом сигналом. Вид энергетического спектра определяет форму АЧХ приемника РЛС. Ширина энергетического спектра сигнала характеризует полосу частот, в которой сосредоточена основная часть энергии сигнала. Аналитически ее можно выразить следующим образом

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

(1.11)

т.е. ширина энергетического спектра определяется как основание прямоугольника, площадь которого равновелика площади под кривой $S(f)$



Из выражений (1.9 , 1.10 1.11) следует важный вывод, что чем шире энергетический спектр сигнала, тем уже пик АКФ, т.е. меньше время корреляции зондирующего сигнала.

Существует следующая связь между шириной энергетического спектра зондирующего сигнала и его временем корреляции

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Таким образом, при любом законе модуляции ширина энергетического спектра обратно пропорциональна времени корреляции зондирующего сигнала.

Конкретные зондирующие сигналы получают путём *модуляции* (то есть изменения по определенному закону параметров исходного колебания. Различают два основных вида модуляции:

- *амплитудную* (когда изменяется амплитуда колебания);
- *угловую* (когда изменяется либо фаза либо частота f).

Но независимо от вида модуляции зондирующие сигналы делятся на:

- *импульсные;*
- *непрерывные.*

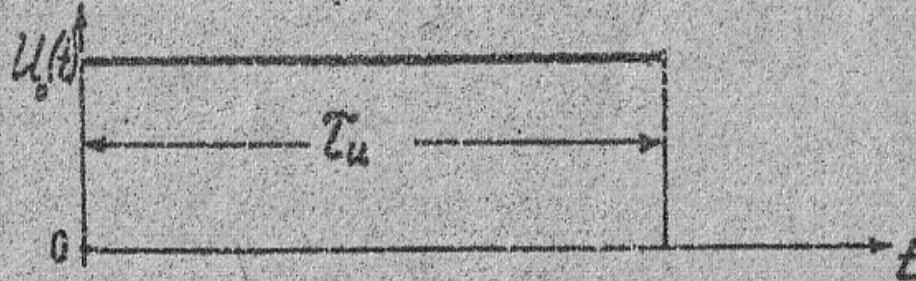
В свою очередь, импульсные сигналы могут подразделяться на:

- *одиочные;*
- *пачечные* (то есть последовательности импульсов).

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

$$u(t) = \begin{cases} U_0(t) \cos 2\pi f_0 t, & 0 < t \leq \tau_u \\ 0 & 0 > t, t > \tau_u \end{cases}, \quad (1.13)$$

f_0 — частота несущего колебания



Закон модуляции прямоугольного радиоимпульса

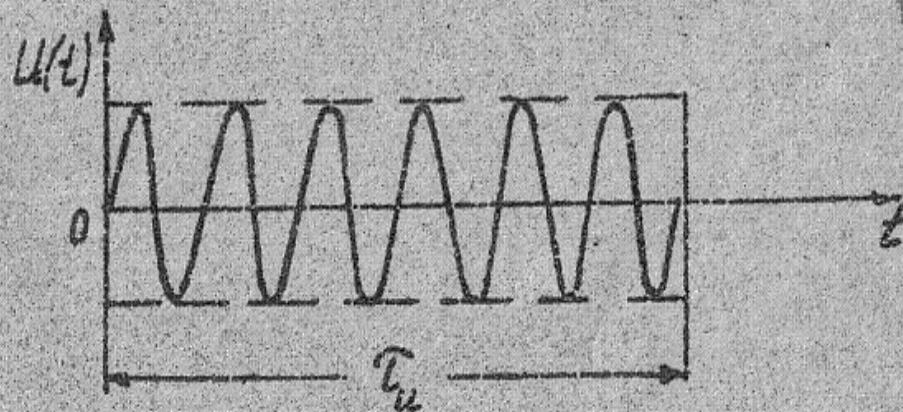


Рис. 1.12

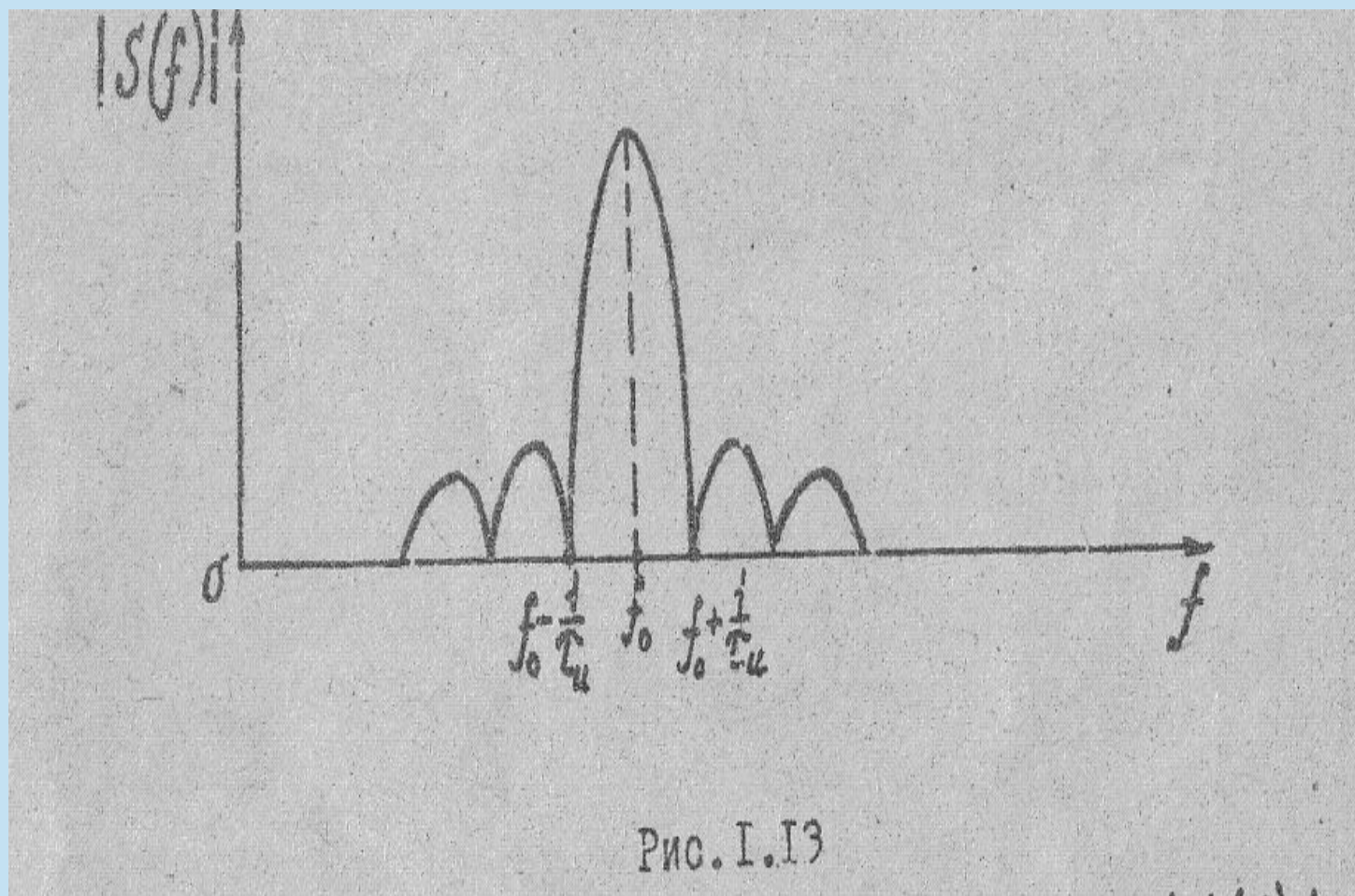
Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

(1.14)

$$S_{\Gamma K}(f) = \pi \delta(f - f_0)$$

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

(1.15)

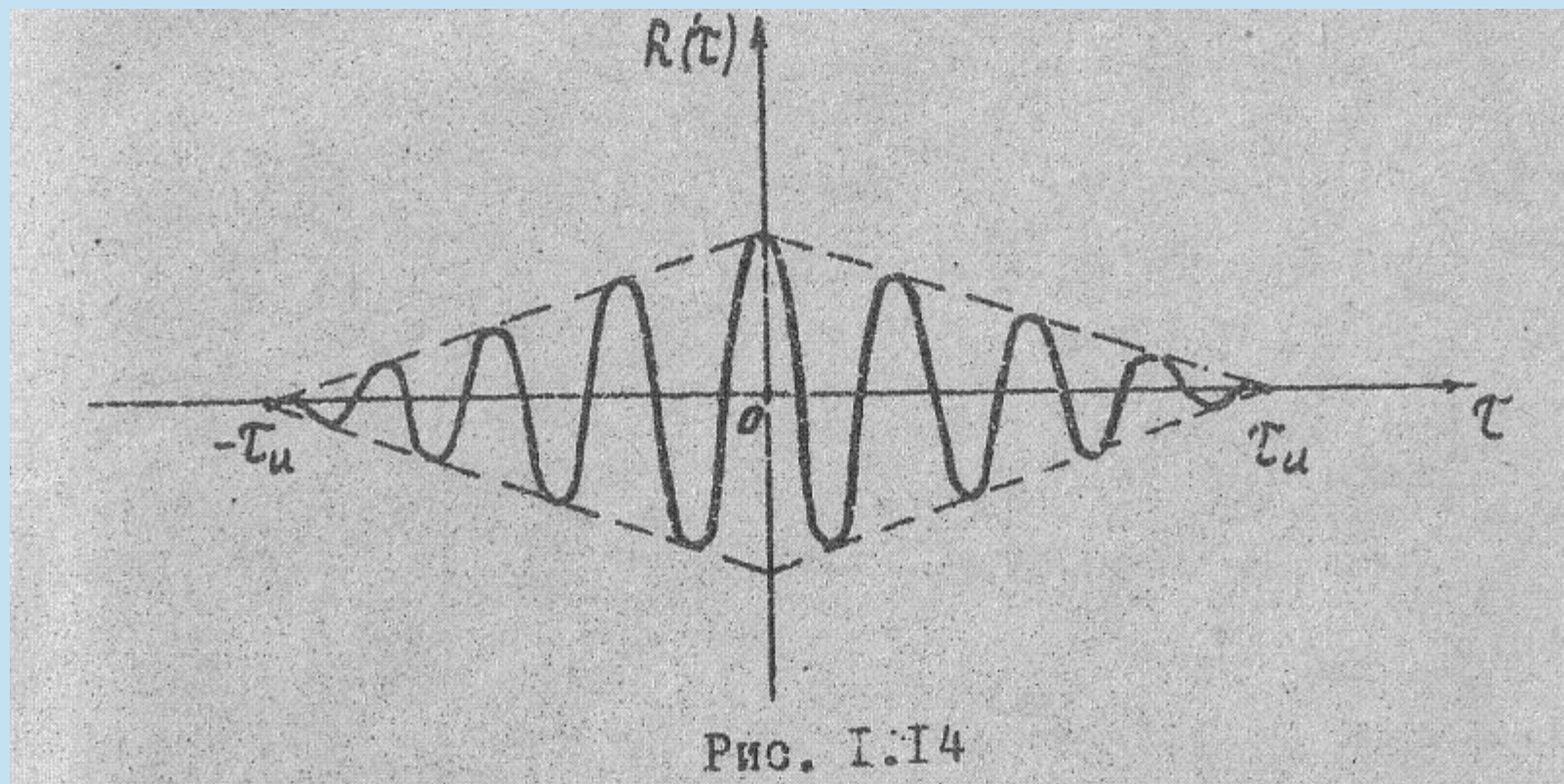


Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

(1.16)

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

(1.17)



Процесс получения графика АКФ поясним с помощью схемы рис. 1.10 и последовательности рисунков 1.13, поясняющих процесс задержки опорного сигнала в линии задержки, Штриховкой показаны области перекрытия незадержанного и задержанного импульсов.

Таким образом, можно сделать вывод: длительность зондирующего радиоимпульса без внутриимпульсной модуляции и ширина его спектра связаны обратно пропорциональной зависимостью. Увеличение длительности сигнала приводит к увеличению его энергии (а значит дальности действия РЛс), но при этом уменьшается ширина спектра (разрешающая способность по дальности) и наоборот.

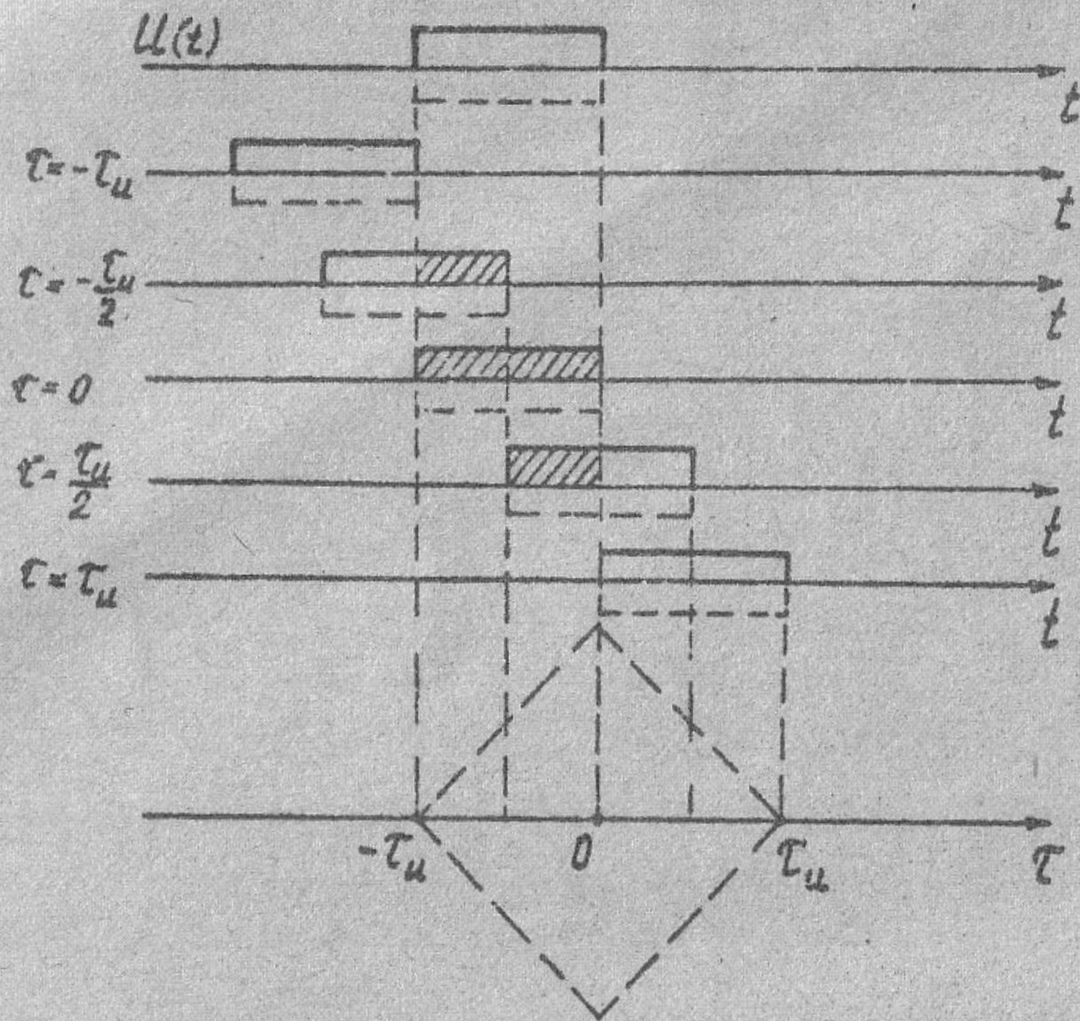
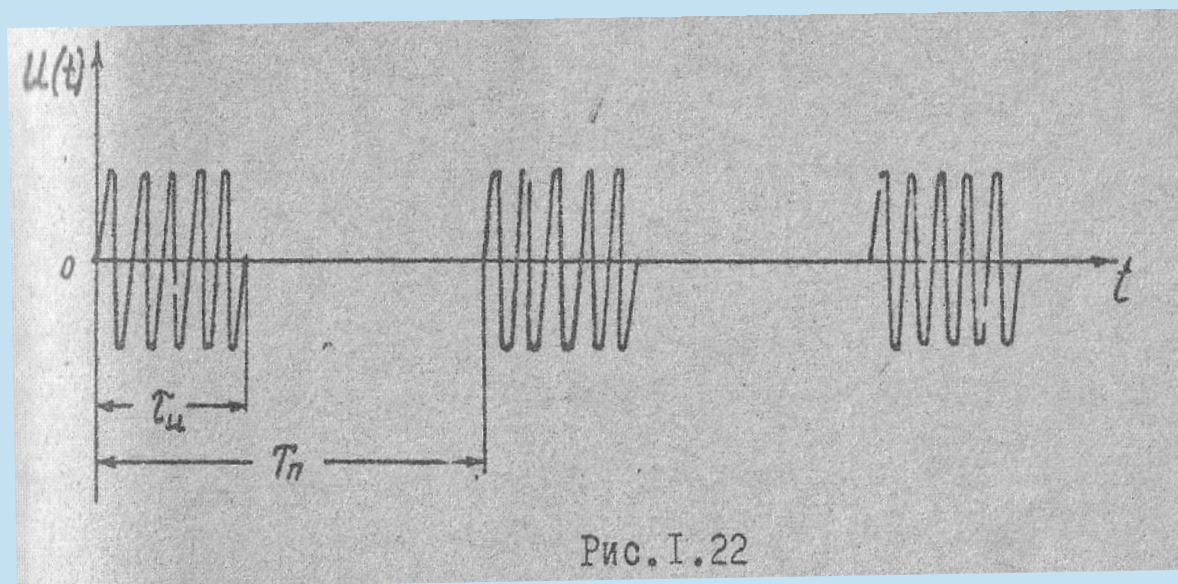


Рис. 1.15

Ограниченная последовательность радиоимпульсов

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

$$(1.18)$$



$$q = \frac{T_{\Pi}}{\tau_{И}}$$

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

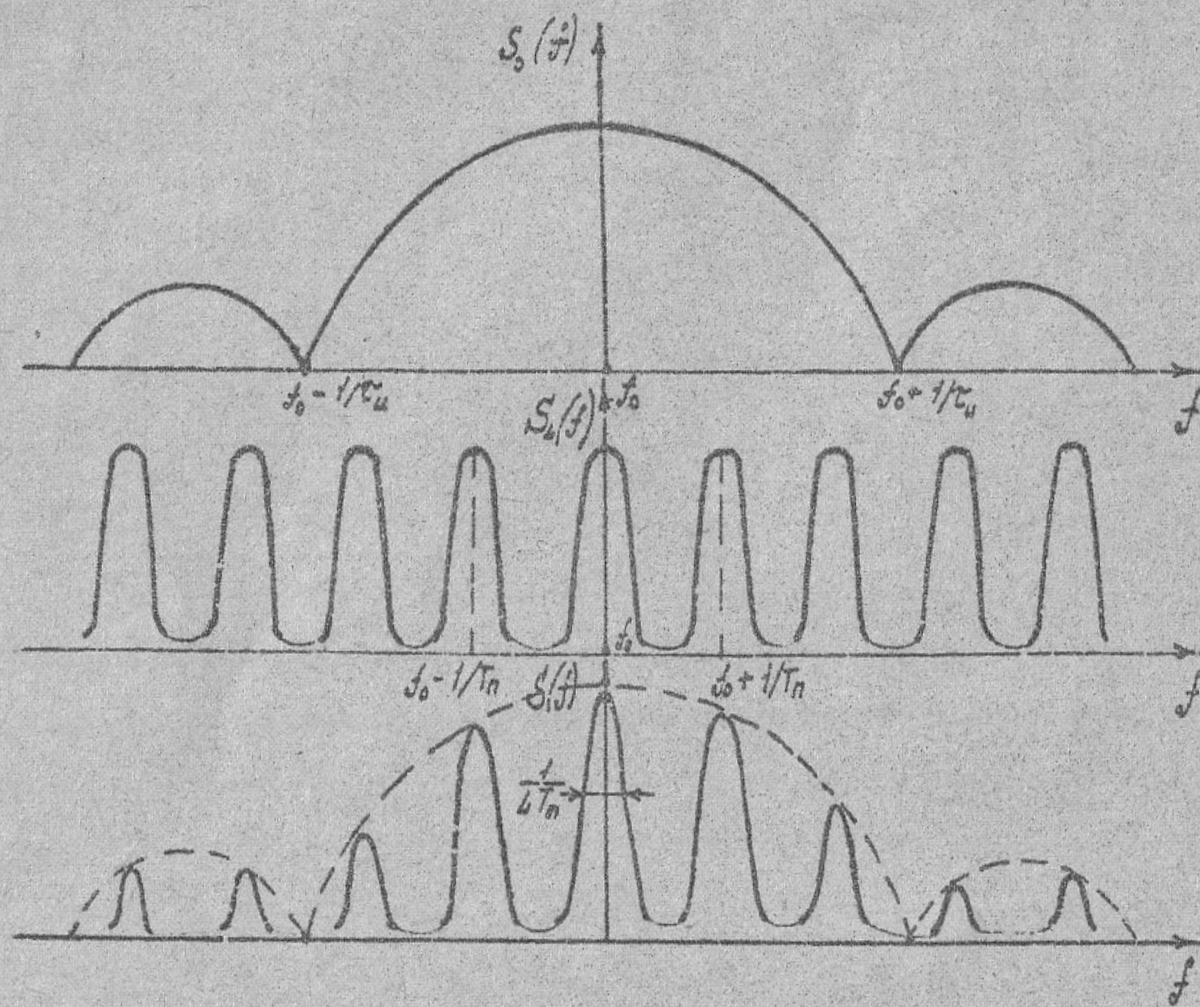


Рис. I.23

● Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь треугольника с основанием τ_0 одинаковы

при $L \gg 1$

Из рисунка следует, что площадь (энергия) под кривой и площадь
треугольника с основанием τ_0 одинаковы

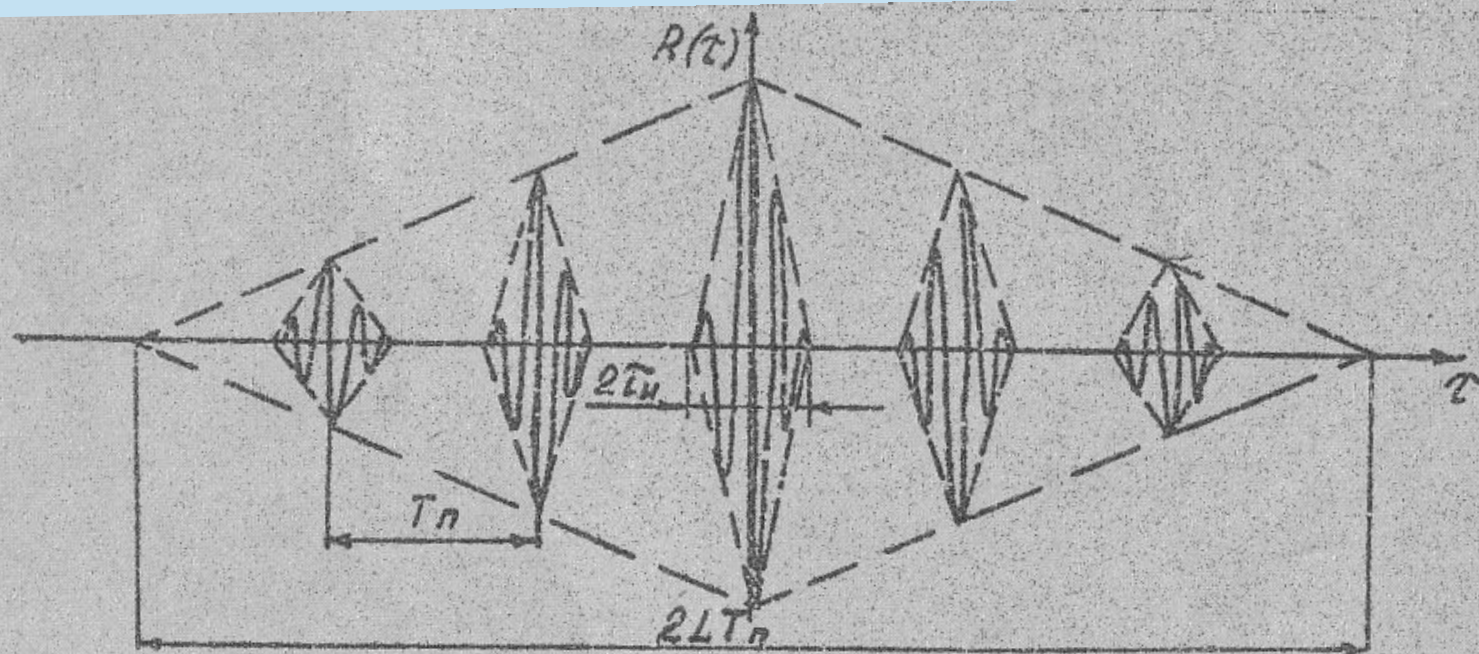
$$\tau_c = \tau_{\Pi} = M \cdot T_{\Pi}$$

$$\Delta f_{\tilde{A}} = \frac{1}{\tau_{\tilde{N}}} = \frac{1}{L \cdot T_{\tilde{I}}} \quad \Delta f_c = \frac{1}{\tau_{\text{И}}}$$

$$n = \Delta f_{\tilde{N}} \tau_{\tilde{N}} = \frac{L \cdot T_{\tilde{I}}}{\tau_{\tilde{E}}} = L \cdot q$$

$$\Delta r = c/2\Delta f_c. \text{ Для КППРИ } \Delta f_c = 1/\tau_{\text{И}}$$

$$\Delta V_r = \lambda/2\tau_c. \text{ Для КППРИ } \tau_c = \tau_{\text{пач.}}$$



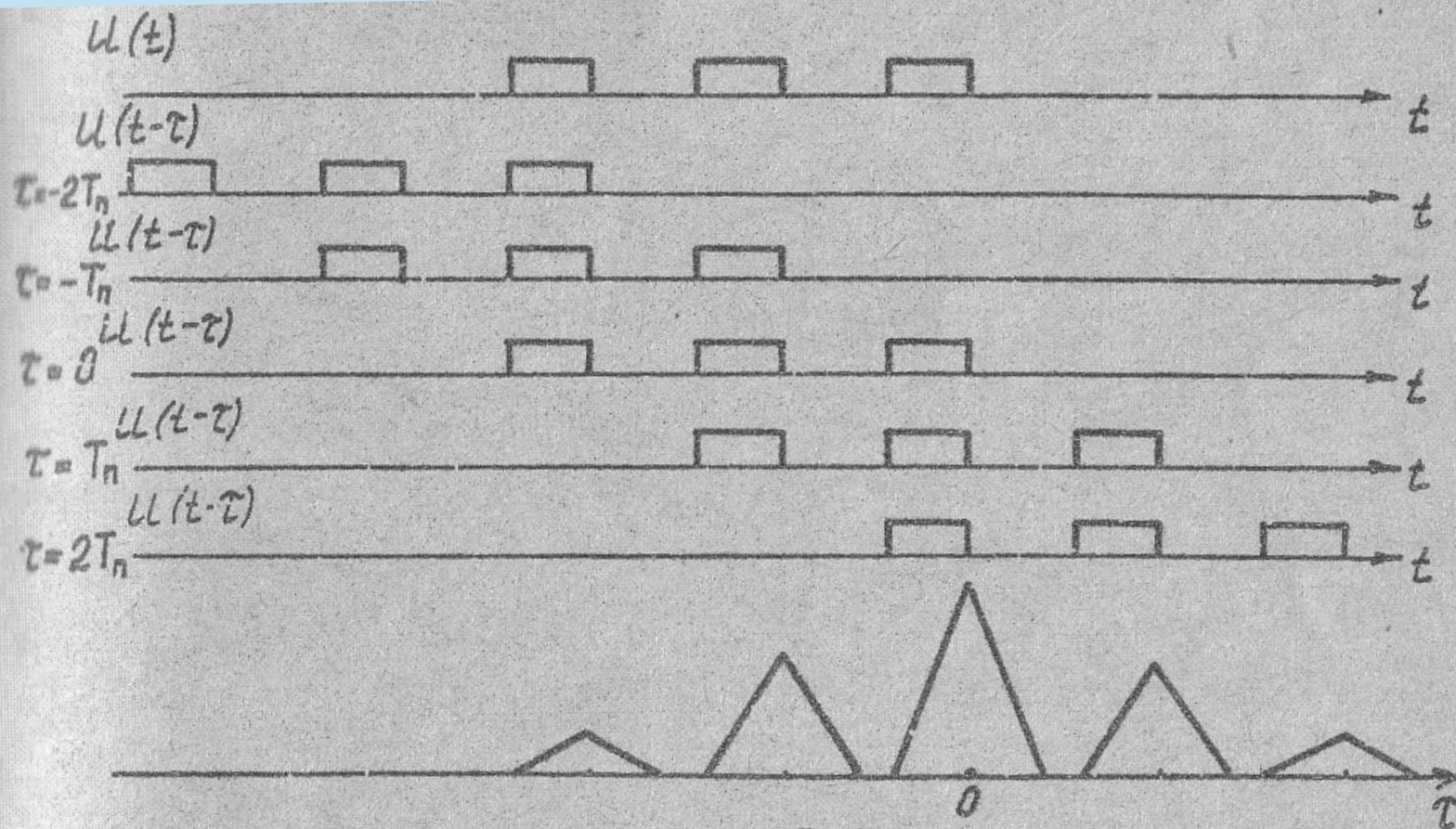


Рис. I.25

$$U(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0).$$

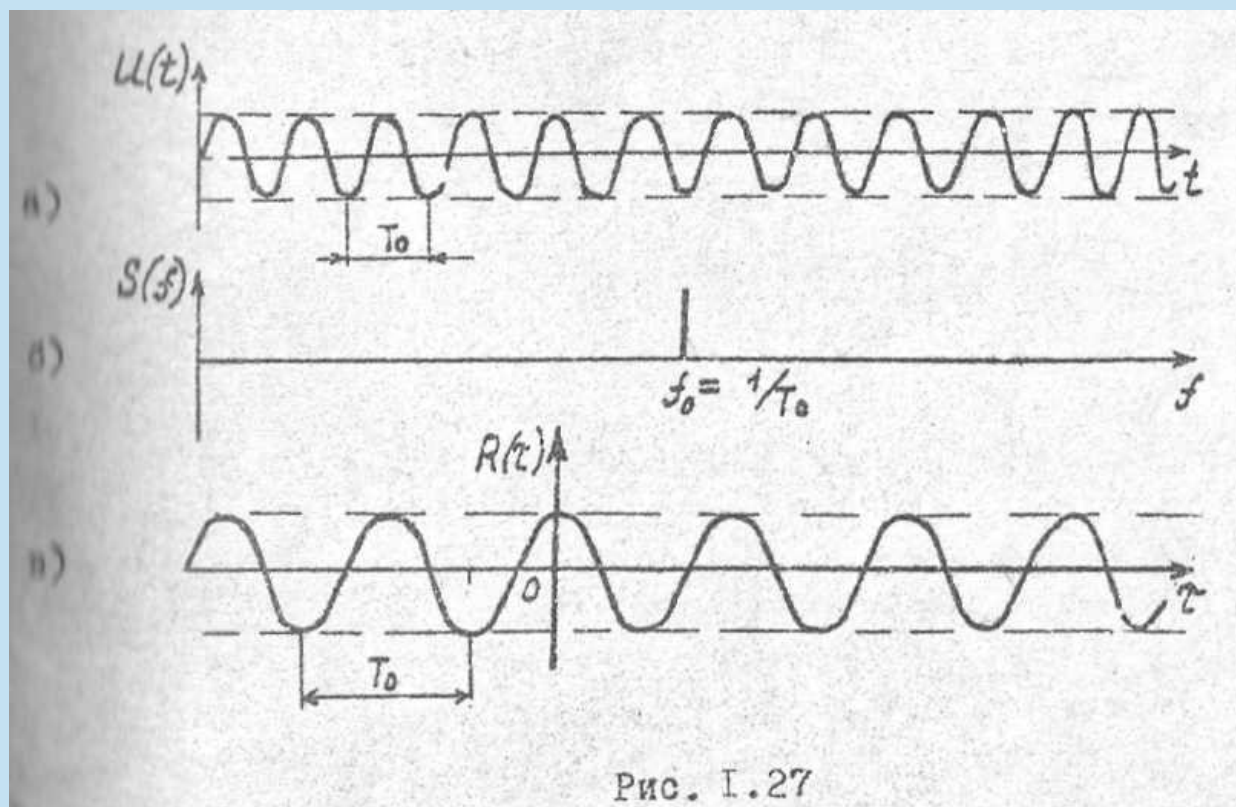


Рис. I.27

- **Задача №1**

- **Условия.** Рассмотрим РЛС импульсного типа с шириной диаграммы направленности основного луча $\Delta\Theta_\epsilon = \Delta\Theta_\beta = 1^\circ$. Зондирующий сигнал имеет вид когерентной пачки радиоимпульсов с параметрами: $\tau_c = \tau_{пач} = 5$ мс; $\tau_{и} = 1$ мкс; $F_{п} = 14$ кГц; $\lambda = 4$ см. В зоне действия РЛС на дальности $D_{ц} = 30$ км находится воздушная цель, летящая со скоростью
- $V_r = 800$ м/с.
- **Вопрос:** Чему равна разрешающая способность РЛС по азимуту (β), углу места (ϵ), дальности и скорости.

● **Решение:**

1). Все цели, находящиеся в пределах одного положения диаграммы направленности, имеют одно и то же значение угловой координаты (рис. 1.26).

Все цели, обнаруживаемые при перемещении ДН в следующее угловое положение,

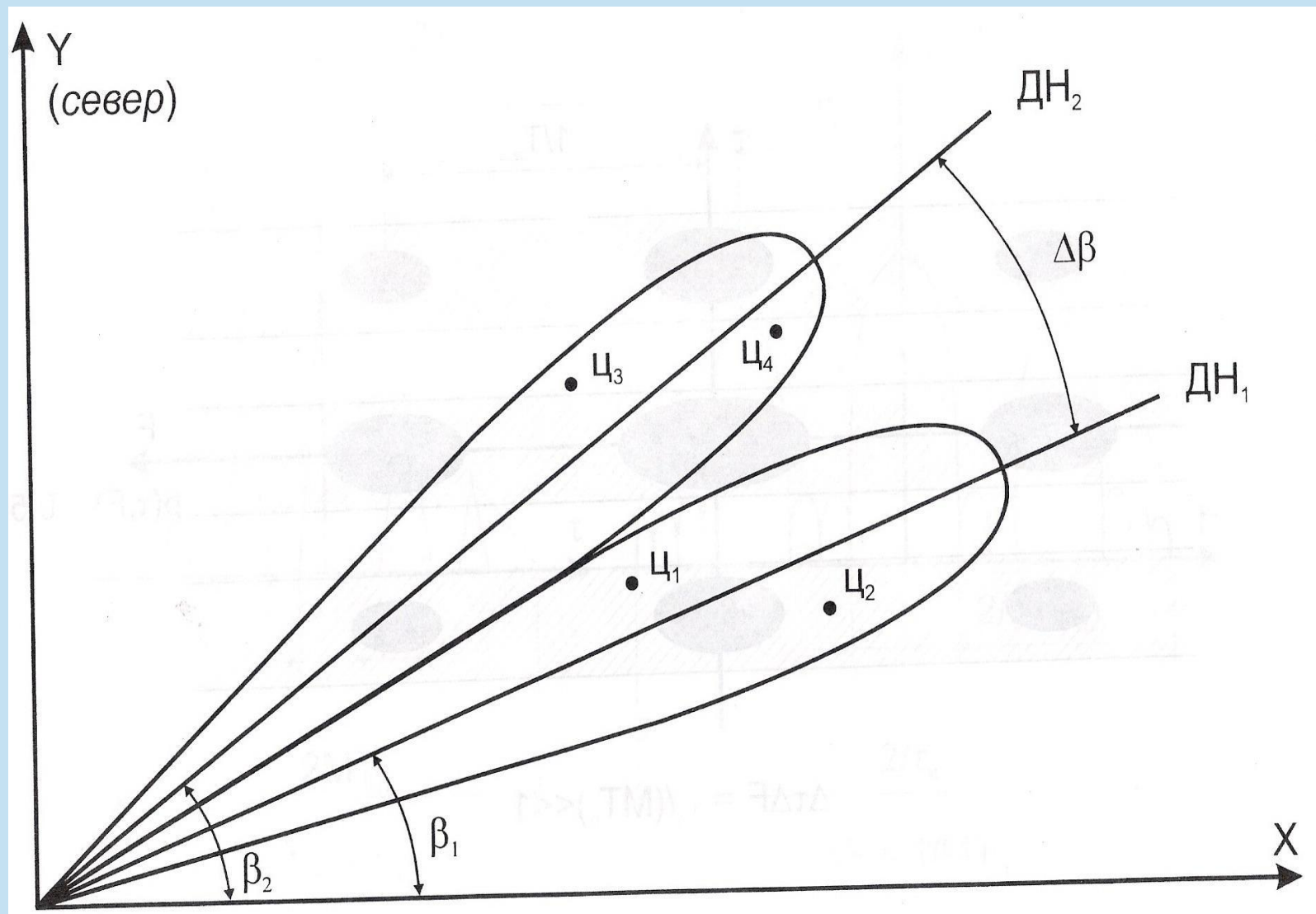
так же имеют одно и то же значение угловой координаты, но отличающееся от предыдущего на величину перемещения. Меньше ширины диаграммы это перемещение быть не может, следовательно, разрешающая способность РЛС по угловым координатам определяется шириной диаграммы направленности антенной

системы:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \Theta \varepsilon = 1^\circ; \Delta \beta = \Delta \Theta \beta = 1^\circ.$$

2). Как отмечалось ранее, разрешающая способность РЛС по дальности определяется выражением $\Delta r = c/2\Delta f_c$. Для КППРИ $\Delta f_c = 1/\tau_{\text{ти}}$, следовательно, $\Delta r = c \tau_{\text{ти}} / 2 = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} / 2 = 150 \text{ м}$.

3). Разрешающая способность РЛС по скорости определяется выражением $\Delta V_r = \lambda / 2\tau_c$. Для КППРИ $\tau_c = \tau_{\text{пач}}$. Следовательно, $\Delta V_r = 4 \cdot 10 / (2 \cdot 5 \cdot 10) = 4 \cdot 10 / 10 = 4 \text{ м/с}$.



Задача №2

Условия. Зондирующий сигнал импульсной РЛС имеет вид

КППРИ с параметрами: $\tau_c = 3\text{мс}$; $\tau_i = 1\text{мкс}$; $F_p = 20\text{кГц}$;
 $\lambda = 3\text{ см}$.

В зоне действия РЛС находятся две воздушные цели на дальностях

$D_{ц1} = 11\text{ км } 250\text{ м}$ и $D_{ц2} = 12\text{ км } 750\text{ м}$ соответственно.

Вопрос: Возможно ли раздельное сопровождение целей по дальности.

Решение:

Раздельное сопровождение целей возможно в случае, если расстояние между ними превышает значение разрешающей способности РЛС по дальности Δr . Численно Δr определяется по формуле: $\Delta r = c \cdot t_{\text{и}} / 2$.

В нашем случае $\Delta r = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} / 2 = 150$ м. Расстояние между целями по условиям задачи составляет $12750 - 11250 = 1500$ м. Так как оно превышает величину разрешающей способности, то можно сделать вывод, что РЛС будет сопровождать обе цели раздельно.

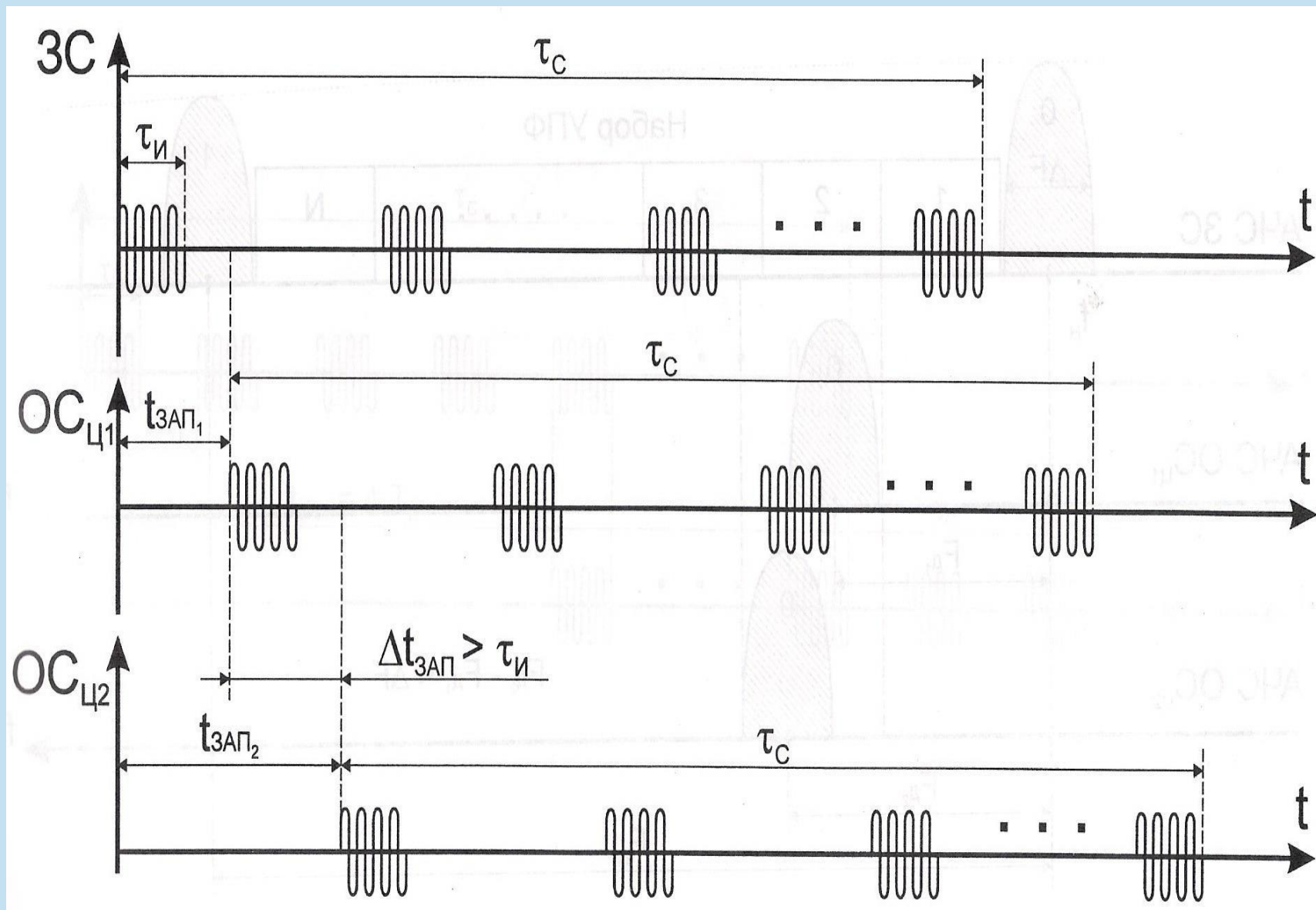
Ответ на этот вопрос может быть получен и по другому. Возможность раздельного сопровождения целей по дальности (то есть их разрешения) определяется длительностью импульса в пачке $t_{\text{и}}$. Иначе говоря, разница времен запаздывания отраженных сигналов $\Delta t_{\text{зап}}$ от обеих целей должна превышать величину $t_{\text{и}}$. В этом случае РЛС сможет воспринимать эти сигналы раздельно (рис. 1.27). Из условий задачи значение времени задержки ОС для каждой цели составляет:

$$t_{\text{зап1}} = 2D_{\text{ц1}}/c = 2 \cdot 11250 / 3 \cdot 10^8 = 75 \cdot 10^{-6} = 75 \text{ мкс};$$

$$t_{\text{зап2}} = 2D_{\text{ц2}}/c = 2 \cdot 12750 / 3 \cdot 10^8 = 85 \cdot 10^{-6} = 85 \text{ мкс}.$$

Разница $\Delta t_{\text{зап}} = t_{\text{зап2}} - t_{\text{зап1}} = 85 - 75 = 10$ мкс, что превышает длительность $t_{\text{и}}$.

Следовательно, цели по дальности разрешаются, то есть РЛС сможет сопровождать их раздельно.



Задача №3

Условия. В зоне действия импульсной РЛС,
зондирующий

сигнал которой имеет вид КППРИ с параметрами: $\tau_c = 2\text{ мс}$; $\tau_i = 1\text{ мкс}$; $F_p = 20\text{ кГц}$; $\lambda = 4\text{ см}$, находятся две воздушные цели, летящие со скоростями $V_{r1} = 600\text{ м/с}$ и $V_{r2} = 608\text{ м/с}$ соответственно.

Вопрос: Возможно ли раздельное сопровождение целей по скорости.

Решение:

Возможность раздельного сопровождения целей по скорости определяется разрешающей способностью РЛС по скорости. Как известно, ее численное значение определяется по формуле: $\Delta V_r = \lambda / 2\tau_c$. В нашем случае $\Delta V_r = 4 \cdot 10 / 2 \cdot 2 \cdot 10 = 1/10 = 10$ м/с.

Следовательно, если разница $\Delta V = |V_{r1} - V_{r2}| > \Delta V_r$ раздельное сопровождение целей по скорости возможно. Подставляя в это выражение значения скоростей полета целей из условий задачи, имеем: $\Delta V = |600 - 608| = 8$ м/с. Так как эта величина меньше 10 м/с, следует сделать вывод, что цели по скорости не разрешаются, то есть обеим целям будет определена одна и та же скорость.

Возможен и другой вариант решения данной задачи. Выше уже отмечалось, что скорость полета цели V_r определяется путем измерения значения доплеровского смещения f_d частоты отраженного сигнала. Осуществляется это с помощью системы (набора) узкополостных фильтров (УПФ), полоса пропускания каждого из которых выбирается равной ширине основного лепестка АЧС зондирующего сигнала. Фактически это означает, что сигналы, попадающие в разные узкополостные фильтры (фильтровые каналы), отражаются от целей, обладающих разным значением доплеровского смещения ΔV_d (то есть имеющих разные скорости).

Отсюда следует, что раздельное сопровождение по скорости возможно в случае, когда разность доплеровских частот ΔF_d сигналов, отраженных от обеих целей, превышает ширину ΔF основного лепестка АЧС зондирующего сигнала. Определяется ΔF по формуле: $\Delta F = 1 / \tau_c$, и в нашем случае составляет 500 Гц ($\Delta F = 1/2 \cdot 10^{-3} = 500$ Гц).

Таким образом, если ΔF_d будет превышать 0,5 кГц, цели будут сопровождаться по скорости раздельно. Значение доплеровского смещения частоты отраженного сигнала для каждой цели определяем по формуле: $F_d = 2 V_r / \lambda$

Итак:

$$F_{d1} = 2 \cdot 600 / 4 \cdot 10^{-2} = 30 \text{ кГц};$$

$$F_{d2} = 2 \cdot 608 / 4 \cdot 10^{-2} = 30,4 \text{ кГц};$$

$$\Delta F_d = (30,4 - 30) \text{ кГц} = 0,4 \text{ кГц}.$$

Так как эта величина меньше 0,5 кГц, необходимо сделать вывод, что раздельное сопровождение данных целей по скорости невозможно (рис.1.28).

