

**Дисциплина
«ОСНОВЫ ТЕОРИИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И
КОМПЛЕКСОВ»**

Часть 1. Теоретические основы

радиолокации
Лекция №3

**Зондирующий сигнал и его
характеристики**

Цель лекции:

- ❖ дать характеристику зондирующим сигналам РЛС, раскрыв содержание их классификации, формального описания и параметров, по которым сигналы сравниваются и выбираются.

Вопросы лекции:

- 1. Виды и математические модели зондирующих сигналов.**
- 2. Основные характеристики зондирующих сигналов.**
- 3. Сложные энергоёмкие сигналы.**

Литература:

Основная

с.37-43, 59-60;

Вопрос 1

**Виды и математические
модели зондирующих сигналов**

Под зондирующим радиолокационным сигналом (ЗС) понимают радиоволну, излученную передающей антенной РЛС в пространство. В активной радиолокации с пассивным ответом зондирующие сигналы обеспечивают появление отраженных от целей сигналов.

В качестве зондирующего сигнала (ЗС) в основном используются колебания СВЧ ($3 \cdot 10^{12} \div 150 \cdot 10^6$ Гц).

Обозначения США	<i>K</i>	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>P</i>	<i>VHF</i>
Δf_0 , ГГц	12-40	8-12	4-8	2-4	1-2	300-900	30-30
f_0 , ГГц	38	10	6	3,4	1,3	430	120
λ_0	8 мм	3 см	5 см	9 см	23 см	70 см	2,5 м

В общем случае ЗС может быть представлен в виде:

$$x(t) = X(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \phi(t) + \phi_0), \quad (1)$$

где $X(t)$, $\phi(t)$ - законы амплитудной и фазовой модуляции;
 f_0 - несущая частота;
 ϕ_0 - начальная фаза.

В комплексной форме зондирующий сигнал записывается таким образом:

$$x(t) = X(t) e^{j(2\pi f_0 t + \phi(t) + \phi_0)} = \dot{X}(t) e^{j2\pi f_0 t} \quad (2)$$

где $\dot{X}(t) = X(t) e^{j(\phi(t) + \phi_0)}$ комплексная амплитуда сигнала.

Физически существующий сигнал (1) является реальной частью комплексного сигнала (2), т.е.

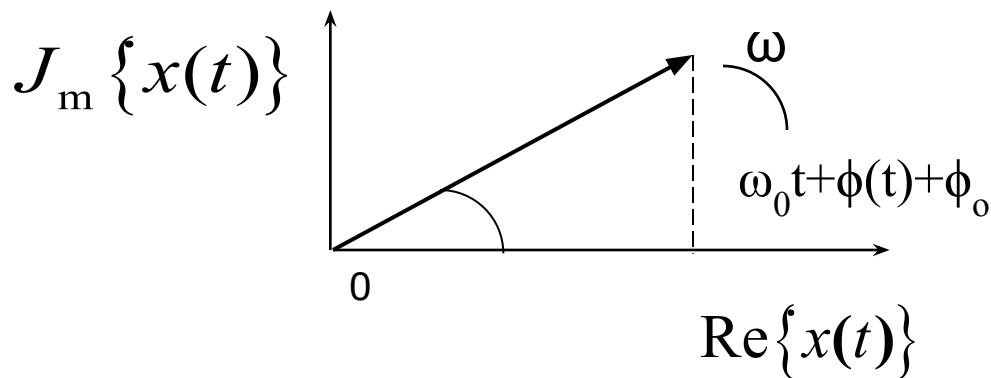
$$x(t) = \operatorname{Re}\{x(t)\}$$

Геометрической интерпретацией ЗС в форме (2) является вектор длиной $X(t)$, вращающийся против часовой стрелки с угловой скоростью

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega(t),$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$; $\Delta\omega(t)$ - закон частотной модуляции, определяемый выражением

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}.$$



Проекции этого вектора на оси координат являются действительной и мнимой частями сигнала в форме (2), т.е.

$$x(t) = \operatorname{Re} \{ x(t) \} + jJ_m \{ x(t) \}.$$

Данные составляющие ЗС называется также квадратурными.

Комплексная амплитуда также может быть выражена вектором с соответствующими квадратурными составляющими:

$$\dot{X}(t) = \operatorname{Re} \{ \dot{X}(t) \} + jJ_m \{ \dot{X}(t) \}.$$

Все радиолокационные ЗС можно разделить на импульсные и непрерывные. Импульсные ЗС могут быть одиночными или в виде последовательности (пачки) радиоимпульсов.

Импульсные ЗС также делятся на радиоимпульсы без внутриимпульсной модуляции и радиоимпульсы с внутриимпульсной модуляции (частотной или фазовой).

Простые радиоимпульсы представляют СВЧ колебания, промодулированные только по амплитуде. Наиболее широко используются прямоугольные и колокообразные (гауссовы) радиоимпульсы.

Математически они записываются таким образом:

$$x(t) = X(t) \cos(\omega_0 t + \phi_0),$$

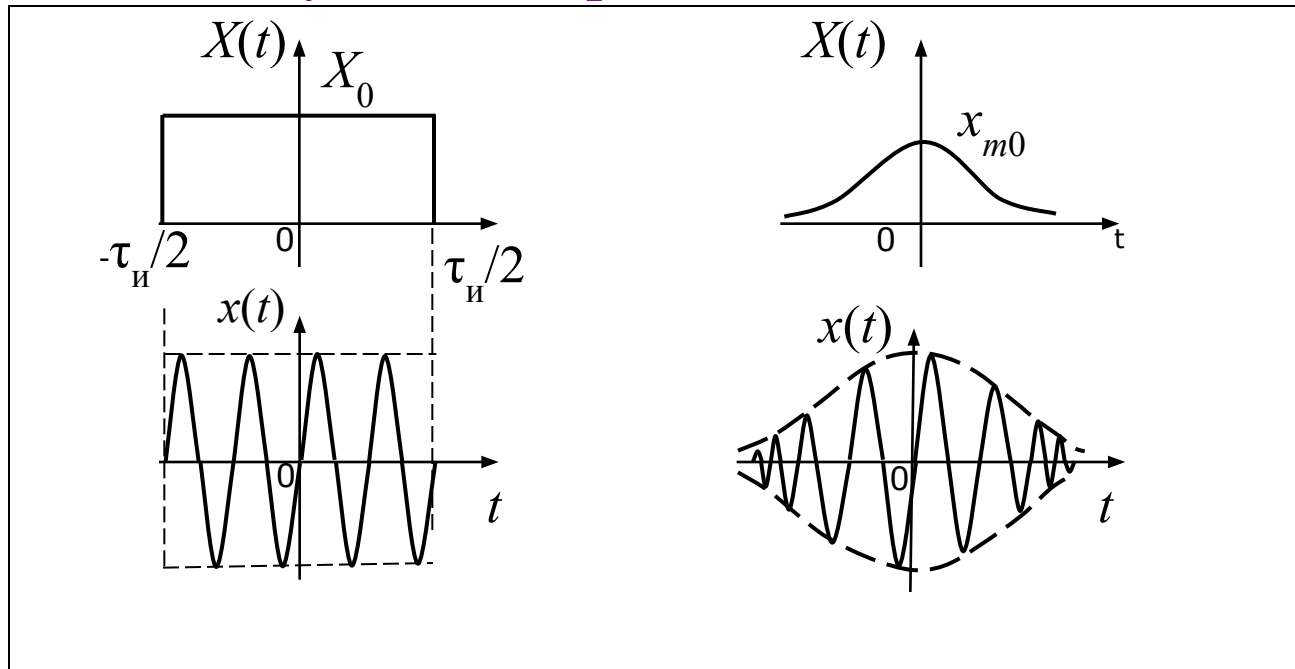
где

$X(t)$ — для прямоугольного

$$X(t) = \begin{cases} X_0, & |t| \leq \tau_u/2 \\ 0, & |t| \geq \tau_u/2 \end{cases}$$

и $X(t) = X_0 e^{-\pi \left(\frac{t}{\tau_u} \right)^2}$ — для гауссова радиоимпульсов.

Графически законы модуляции и сами радиоимпульсы выглядят следующим образом



В РЛС находят широкое применение ЗС в виде **пачки радиоимпульсов**:

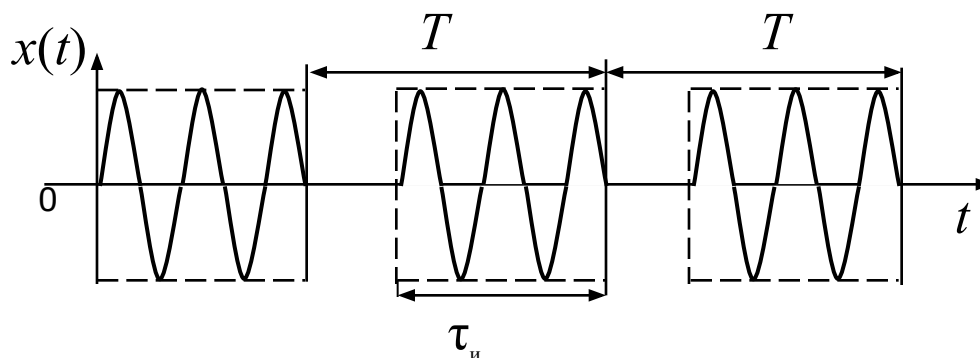
$$\kappa(t) = T \sum_{\kappa=1}^M X_{\kappa} \left[t - f(t - 1) \right] \cos \left\{ 2\pi f_0 + \varphi_{\kappa} [\cdot] + \varphi_{\kappa} \right\},$$

T - период повторения импульсов;

M - число импульсов в последовательности;

φ_{κ} - начальная фаза κ -го импульса.

Последовательность прямоугольных радиоимпульсов, имеющих период повторения T , имеет вид



Если начальная фаза радиоимпульсов φ_k в последовательности постоянная или изменяется по известному закону, то такая последовательность когерентная.

Непрерывные ЗС делятся на:

- 1) **монохроматические, т.е. сигналы без модуляции СВЧ колебаний**

$$x(t) = X_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

- 2) **сигналы с частотной модуляцией (манипуляцией);**
- 3) **сигналы с ФКМ.**

Выводы по первому вопросу

1. Таким образом, для решения задач РЛ применяются различные виды ЗС: импульсные, непрерывные, с внутриимпульсной модуляцией и без таковой, одиночные и пачечные.

2. Конкретный вид используемого сигнала определяется требованиями к качеству решения задач РЛ и, соответственно, требованиями к характеристикам РЛС.

Вопрос 2

**Основные характеристики
зондирующих сигналов**

Характеристики служат для описания и сравнения сигналов.

Различают энергетические, временные, частотные и время-частотные характеристики. Рассмотрим подробнее основные из них.

Важнейшими параметрами зондирующего импульсного сигнала является $P_{\text{и}}$ - импульсная мощность, $\tau_{\text{и}}$ - длительность импульса и f_0 - несущая частота колебаний, закон модуляции.

Импульсная мощность находится по формуле

$$P_{\text{и}} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^{\tau_{\text{и}}} P(t) dt$$

Здесь $P(t)$ - мгновенная активная мощность излучаемых колебаний, усредненная лишь за период высокой частоты f_0 .

$\mathcal{E}_{\text{и}} = P_{\text{и}} \cdot \tau_{\text{и}}$ характеризует энергию импульса. Чем больше эта величина, тем больше дальность действия РЛС. Создание зондирующего сигнала с большой энергией возможно двумя путями: увеличением импульсной мощности передатчика $P_{\text{и}}$ и увеличением длительности зондирующего сигнала. $\tau_{\text{и}}$

Последовательности радиоимпульсов и непрерывные сигналы характеризуют средней мощностью:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{и}} \cdot \tau_{\text{и}}}{T} = \frac{P_{\text{и}}}{Q}$$

где $Q = T / \tau_{\text{и}}$ - скважность; - для последовательности импульсов

$$P_{\text{ср}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad - \text{ для непрерывного во времени сигнала.}$$

Несущая частота f_0 может быть различной в зависимости от рабочего диапазона волн РЛС. Вся радиолокационная техника основана на использовании радиоволн УКВ диапазона, имеющих длину меньше 10 метров.

Важной частотной характеристикой сигналов является их спектр. Зондирующий сигнал и его спектр связаны между собой парой преобразований Фурье: прямым, в соответствии с которым осуществляется переход от временного представления к частотному

$$q(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (3)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} q(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (4)$$

Аналогичная связь существует между законом модуляции и его спектром

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) t^{-j\pi 2 ft} dt,$$

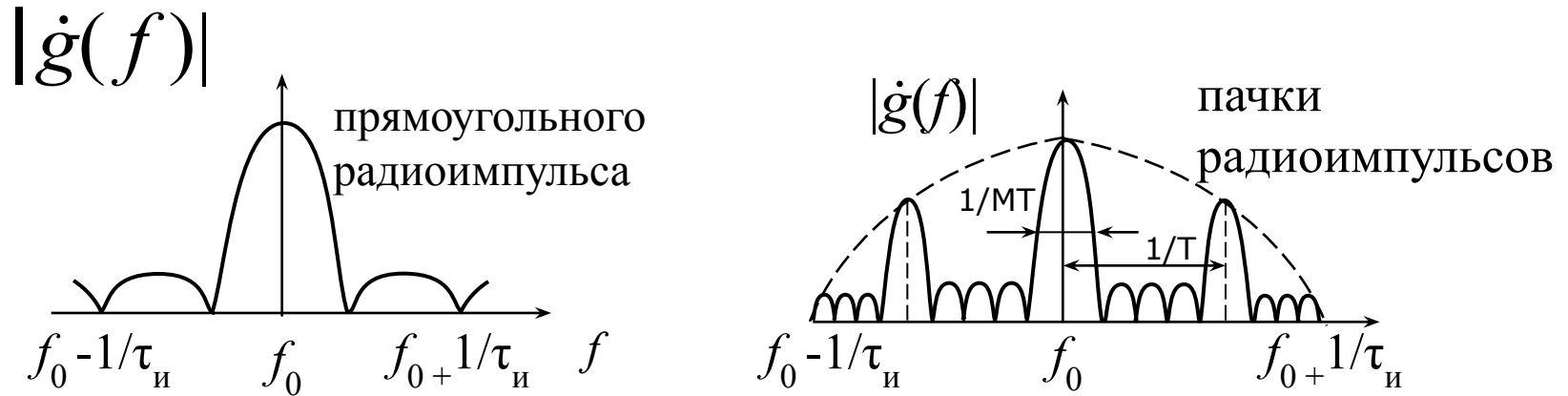
$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df.$$

Спектр сигнала представляют в виде АЧС и ФЧС:

$$g(f) = |g(f)| e^{j \arg g(f)},$$

где $|g(f)|$ - АЧС сигнала;
 $\arg g(f)$ - ФЧС сигнала.

АЧС типовых простых сигналов выглядят следующим образом



Область частот, в пределах которой сосредоточена основная часть всей энергии сигнала, называется шириной спектра $\Delta f_{\text{с}}$. Обычно ширина спектра определяется полосой частот, где сосредоточено $\sim 90\%$ энергии сигнала. Например, ширина спектра прямоугольного радиоимпульса и их пачки равна $\Delta f_{\text{с}} = 1/\tau_{\text{и}}$.

Автокорреляционная функция (АКФ).

АКФ характеризует взаимосвязь между двумя значениями зондирующего сигнала, разнесенными по времени на интервал τ . Она определяется выражением

$$r_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^*(t - \tau)dt$$

АКФ закона модуляции ЗС может быть определена

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)X^*(t - \tau)dt$$

Энергетический спектр.

Энергетический спектр зондирующего сигнала можно определить как распределение вдоль оси частот его энергии.

Энергетический спектр ограниченного во времени зондирующего сигнала выражается через его АКФ τ

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r_x(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau,$$

$$r_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f \tau} df.$$

Энергетический спектр и корреляционная функция связаны друг с другом прямым и обратным преобразованиями Фурье, имеющими вид:

Из взаимосвязи энергетического спектра с АКФ сигнала следует важный вывод, что чем шире энергетический спектр, тем уже пик АКФ, т.е. тем меньше время корреляции зондирующего сигнала.

Известные схемы оптимальной (согласованной) обработки радиолокационных сигналов базируются на операции вычисления корреляционного интеграла (модульного значения):

$$Z(t_3, F_д) = \frac{1}{2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}(t) \dot{U}^*(t - t_3) e^{i2\pi F_д t} dt \right|,$$

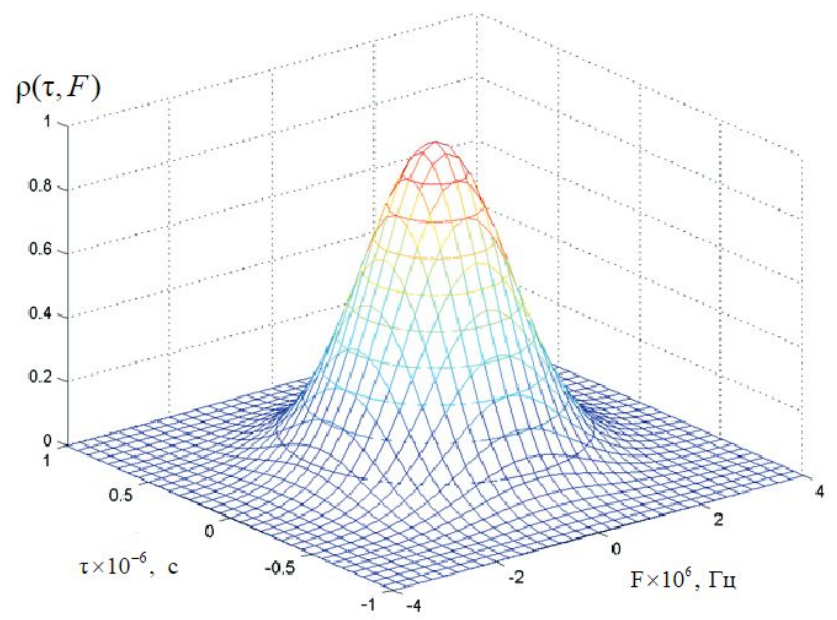
$\dot{U}(t)$ - комплексная амплитуда зондирующего сигнала;
 $\dot{x}(t) = \dot{U}^*(t - t_3) e^{i2\pi F_д t}$ - комплексная амплитуда ожидаемого сигнала с учетом запаздывания t_3 и доплеровской добавки частоты $F_д$

Сигнальный интеграл и его модульное значение представляют собой функции разностей ожидаемого t_3 и истинного t_0 времени запаздывания, ожидаемой $F_д$ и истинной F_0 доплеровских частот

Функция $\rho(\tau, F)$ называется *двумерной автокорреляционной функцией* сигнала. Она зависит от своих разностных аргументов τ, F и не зависит от значений t_0 и F_0 . Кроме того, функция зависит от вида комплексной огибающей когерентного сигнала $U(t)$

$$\rho(\tau, F) = \frac{\psi(\tau, F)}{\psi(0, 0)} = \frac{1}{2\mathcal{E}} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}(s) \dot{U}^*(s - \tau) e^{j2\pi F s} ds \right|$$

Изображение двумерной автокорреляционной функции одиночного радиоимпульса



Выводы по второму вопросу

1. Таким образом, к основным характеристикам зондирующих сигналов относятся: закон модуляции, длительность, мощность и энергия, АКФ, время корреляции, энергетический спектр, ширина спектра, которые и определяют ТТХ РЛС.
2. Эти характеристики различны для конкретных видов ЗС и во многом будут определять структуру устройств обработки радиолокационных сигналов.

Вопрос 3

**Сложные энергоёмкие
сигналы**

В настоящее время в радиолокации широко используются два вида сложных сигналов: **линейно-частотно-модулированные** (ЛЧМ сигналы) и **фазо-кодо-манипулированные** (ФКМ сигналы).

Радиоимпульсы с внутриимпульсной частотной модуляцией (манипуляцией).

Передающее устройство формирует радиоимпульсы большой длительности, частота в пределах длительности импульса изменяется по определенному закону: линейному (ЛЧМ), параболическому и т.д. Для ЛЧМ радиоимпульсов закон частотной модуляции описывается выражением:

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_{\text{и}}} \cdot t; \quad \begin{matrix} t \geq 0 \\ t \leq \tau_{\text{и}} \end{matrix}$$

где Δf - девиация частоты.

Ему соответствует квадратичный закон изменения фазы

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + bt^2 + \varphi_0,$$

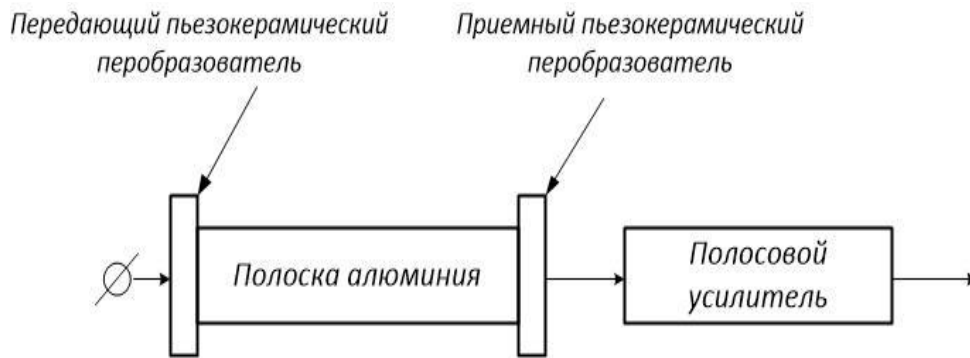
где b - параметр фазовой модуляции, равный

$$b = \frac{\pi \Delta f}{\tau_{\text{и}}}.$$

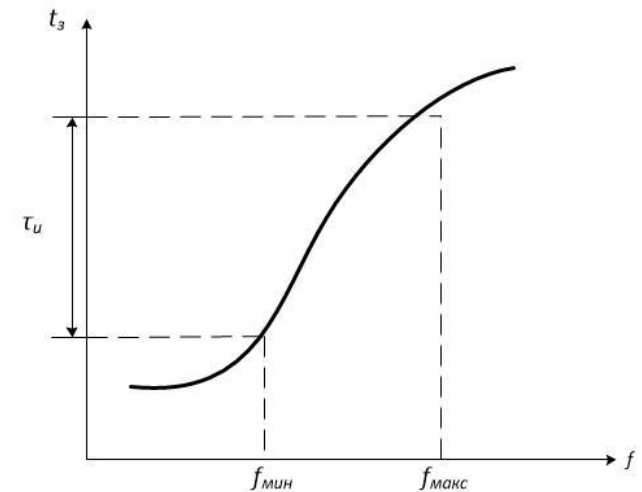
Комплексная амплитуда ЛЧМ радиоимпульса описывается выражением

$$X(t) = \begin{cases} X_0 \cdot e^{j(bt^2 + \varphi_0)} & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t < 0, \quad t > \tau_{\text{и}} \end{cases}$$

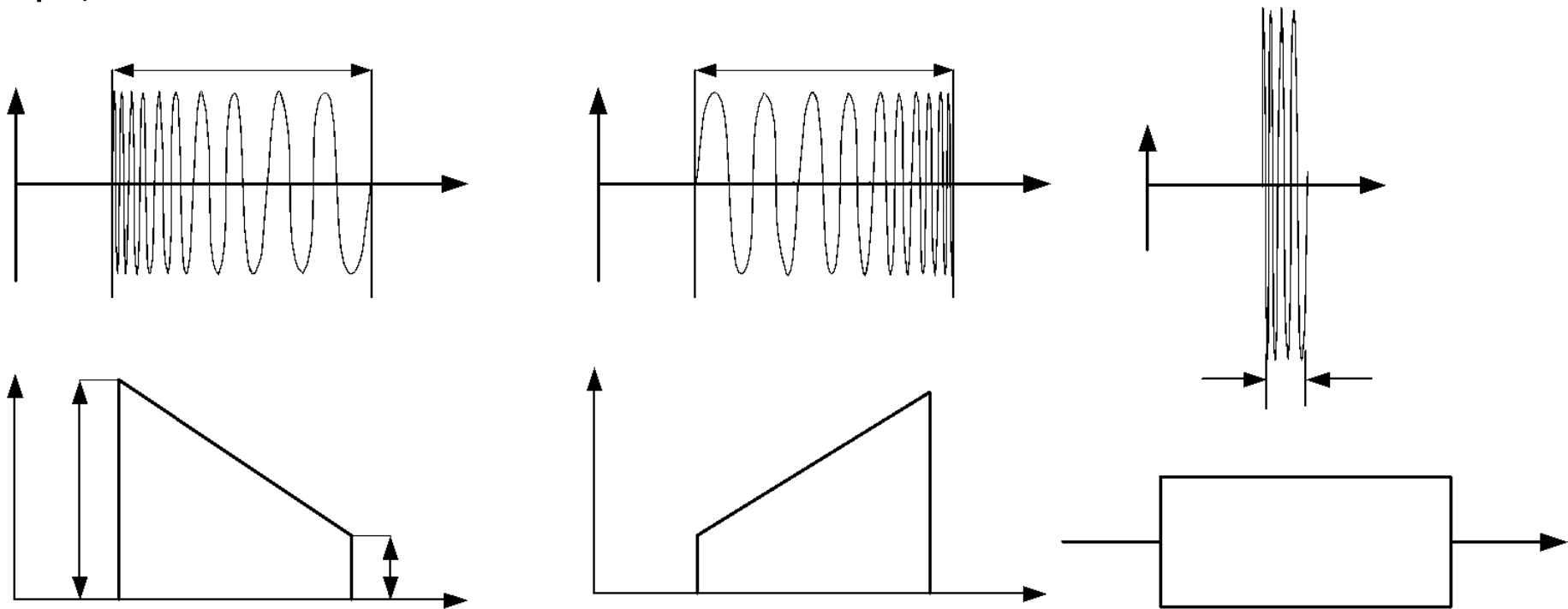
Отраженные от цели ЛЧМ-сигналы принимаются приемником РЛС и подаются на специальный сжимающий фильтр, импульсная характеристика которого, имеет зеркальную форму закона изменения девиации частоты.



Функциональная схема сжимающего фильтра



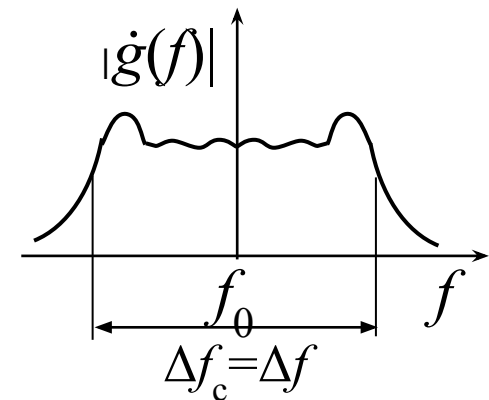
Зависимость t_z от частоты для дисперсионной ультразвуковой линии задержки



Принцип сжатия импульсов:

- a*- форма ЛЧМ радиоимпульсов на входе;
- б*- закон изменения частоты радиоимпульса от времени;
- в*- импульсная характеристика сжатия радиоимпульса в фильтре;
- г*- зависимость времени задержки фильтра от частоты;
- д* – сжатый радиоимпульс на выходе фильтра.

Спектр ЛЧМ сигнала имеет вид:



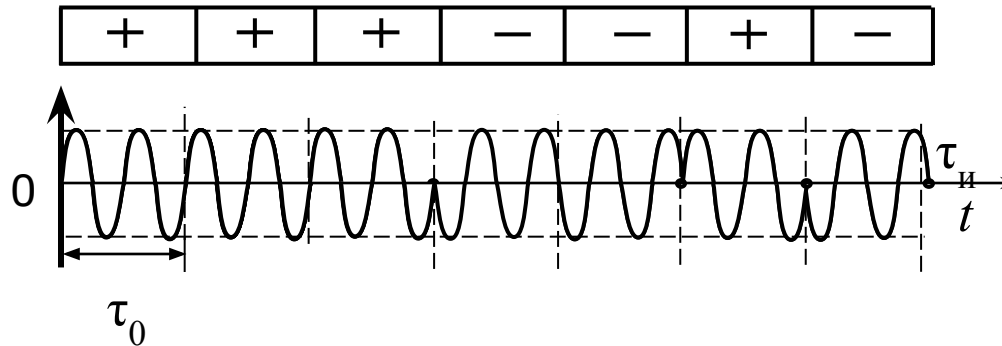
ФКМ радиоимпульсы.

ФКМ радиоимпульс состоит из ряда примыкающих друг к другу прямоугольных парциальных радиоимпульсов, имеющих одинаковую длительность (τ_0) и частоту, а начальные фазы φ изменяются по определенному закону.

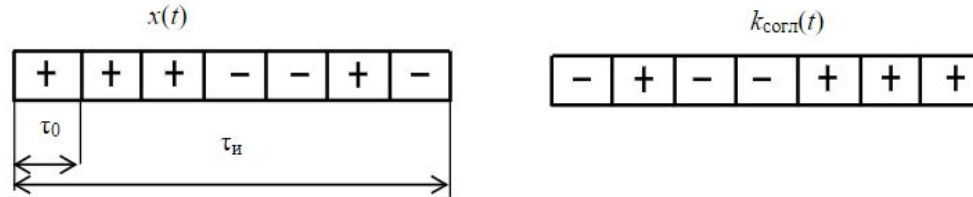
Аналитически ФКМ-радиоимпульс записывается в виде:
$$U(t) = \sum_{k=1}^n U_k(t) \cdot e^{j(2\pi ft + \varphi_k)},$$

где $U_k(t)$ – амплитуда k -го парциального радиоимпульса (как правило, одинаковая для всех парциалов); f – частота; φ_k – начальная фаза колебаний k -го парциального импульса.

Наибольшее распространение получили фазокодоманипулированные сигналы (ФКМ), которые составлены на основе двоичных кодов: Баркера, М – кодов и т.д. При этом начальные фазы парциальных импульсов выбираются равными 0 или π . Обозначим фазу $\varphi = 0$ знаком «+», а $\varphi = \pi$ знаком «-». Тогда ФКМ радиоимпульс для семиразрядного кода Баркера имеет следующий вид:

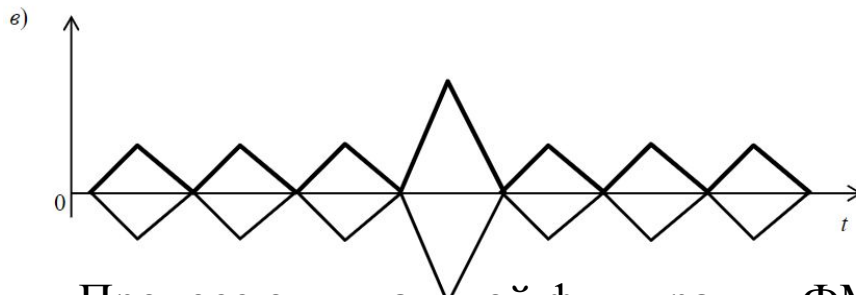
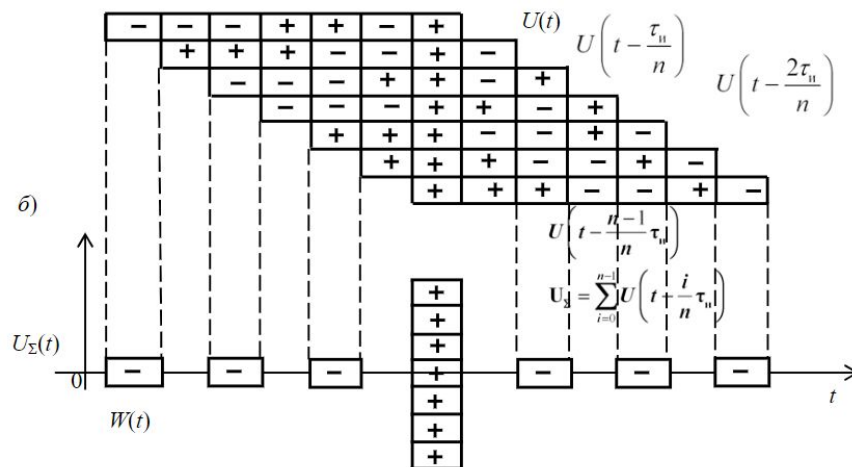
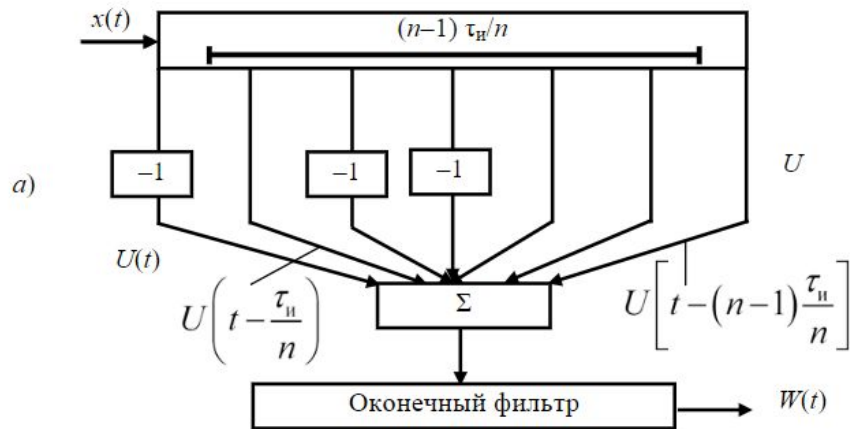


Графическое представление 7 разрядного кода Баркера и его импульсной характеристики:



Фильтр с такой импульсной характеристикой может быть построен на линии задержки с отводами и общим сумматором. Причем часть отводов подключается к сумматору через инверсные каскады. Выходное напряжение сумматора подается на окончательный фильтр, согласованный с парциальным радиоимпульсом длительностью $\tau_0 = \tau_n / n$.

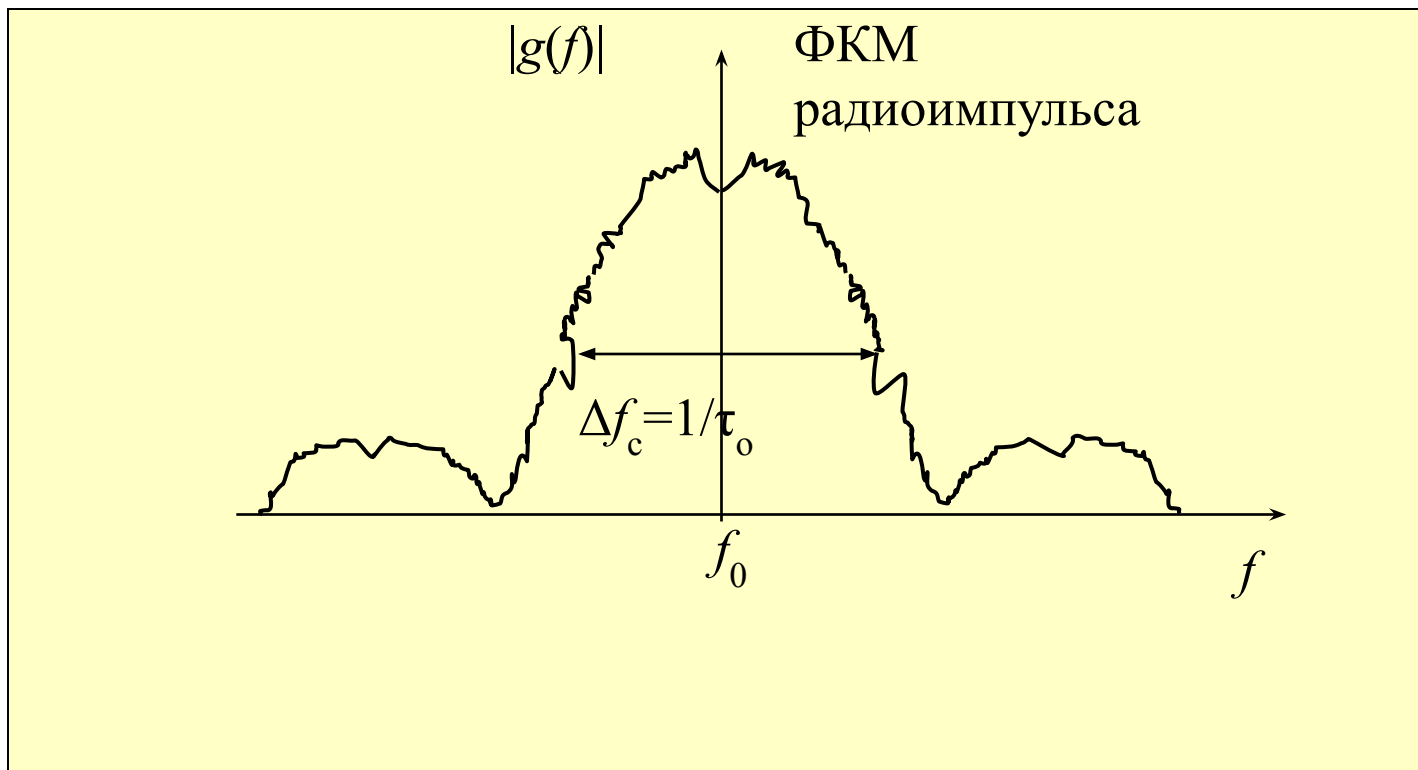
Таким образом, ФМ-сигналы сжимаются по времени на выходе СФ, что даёт возможность улучшить разрешающую способность РЛС по дальности и отношение сигнал/шум. Степень сжатия и выигрыш в отношении сигнал/шум определяются произведением $n = \tau_n / \tau_0$, называемым базой сигнала.



Процесс оптимальной фильтрации ФМ-сигнала:

а - согласованный фильтр ФМ-сигнала (кода Баркера для $n = 7$); б) результат когерентного суммирования; в - выходное напряжение фильтра

АЧС ФКМ сигнала выглядит следующим образом



Ширина спектра ФКМ-радиоимпульса обратно пропорциональна длительности парциального импульса, а $K_{сж}$ равен числу парциалов:

$$B_{\text{И}} = (1/\tau_0) \cdot K = \frac{1}{\tau_0} \cdot n \cdot \tau_0 = n$$

Выводы по третьему вопросу

Таким образом, основными широкополосными сигналами, применяемыми в РЛС, являются ЛЧМ и ФКМ радиоимпульсы.

1. Для решения задач РЛ применяются различные виды ЗС: импульсные, непрерывные, с внутриимпульсной модуляцией и без таковой, одиночные и пачечные.

Конкретный вид используемого сигнала определяется требованиями к качеству решения задач РЛ и, соответственно, требованиями к характеристикам РЛС.

2. К основным характеристикам зондирующих сигналов относятся: закон модуляции, длительность, мощность и энергия, АКФ, время корреляции, энергетический спектр, ширина спектра, которые и определяют ТТХ РЛС.

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

3. Основными широкополосными сигналами, применяемыми в РЛС являются ЛЧМ и ФКМ радиоимпульсы.

Задание на самостоятельную подготовку:

**Отработать материал лекции в соответствии с
рекомендованной литературой:**

Л 1/о, с.37-43, 59-60;

Л 2/д, с.20-54.

Спасибо за
внимание!