

## **Лекция 3**

# **Элементы радиопередающих устройств систем радиосвязи**

---

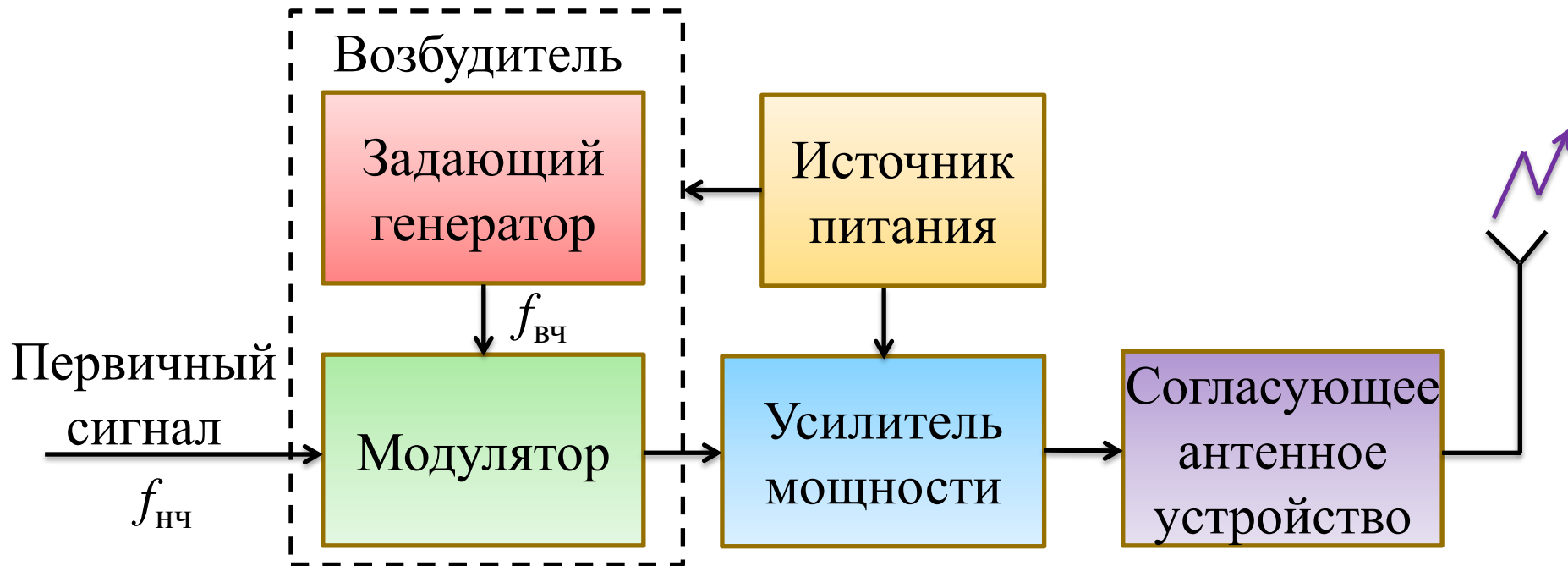
# Рассматриваемые вопросы

1 Синтезаторы частот

2 Модуляторы

3 Антенны систем радиосвязи

# 1 Синтезаторы частот



# Синтезаторы частот

**Синтезатор частот** – устройство для генерации электрических гармонических колебаний с помощью линейных повторений (умножением, суммированием, разностью) на основе одного или нескольких опорных генераторов.

Общие принципы построения синтезаторов:

- все синтезаторы основаны на использовании одного высокостабильного опорного колебания с некоторой частотой  $f_0$ , источником которого обычно является опорный кварцевый генератор;
- синтез множества частот осуществляется широким использованием делителей, умножителей и преобразователей частоты, обеспечивающих использование одного опорного колебания для формирования сетки частот.

## Синтезаторы частот

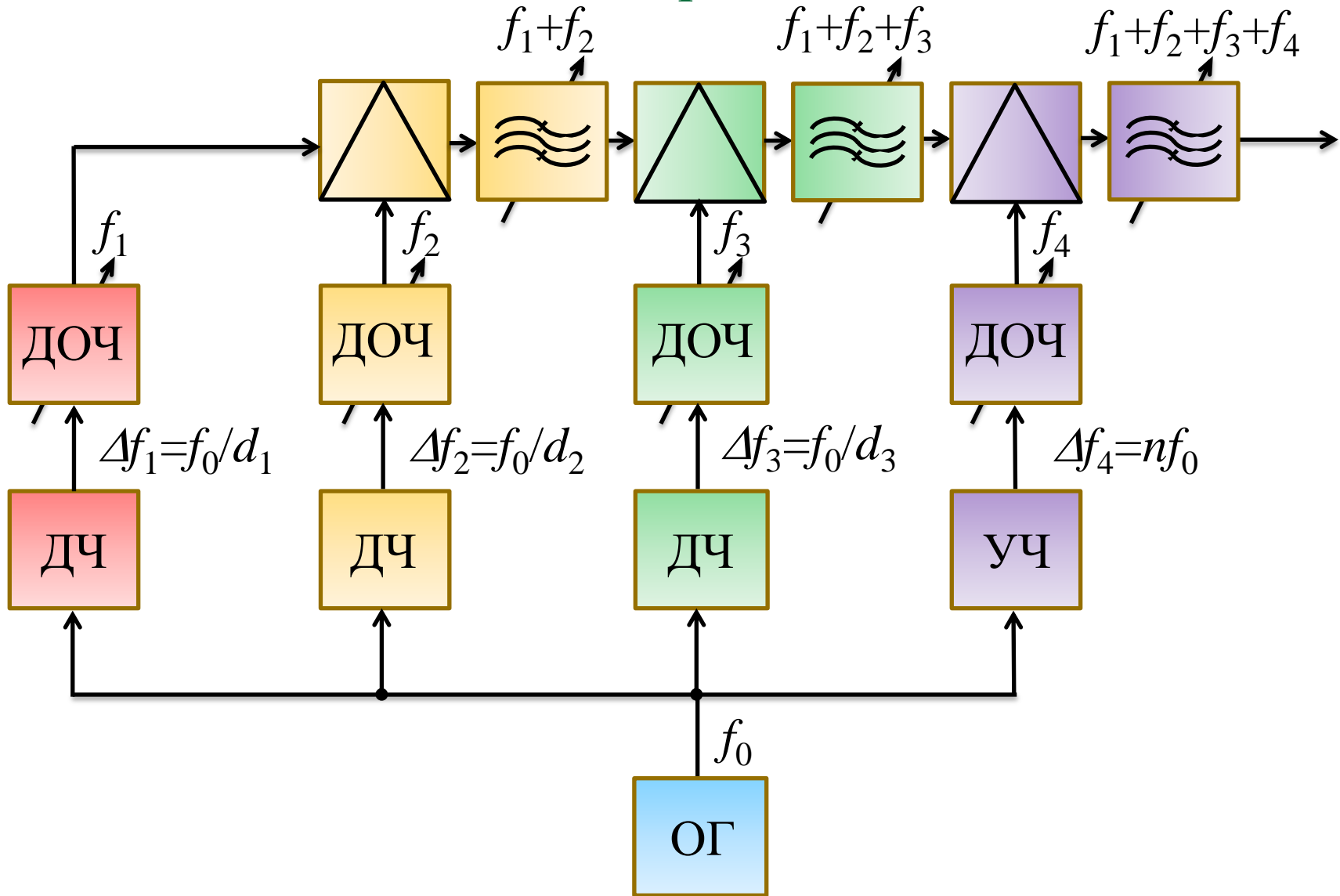
По методу формирования выходных колебаний синтезаторы подразделяются на две группы: выполненные по методу **прямого (пассивного) синтеза** и выполненные по методу **косвенного (активного) синтеза**.

В синтезаторах **прямого (пассивного) синтеза** выходные колебания формируются путём деления и умножения частоты опорного генератора с последующим сложением и вычитанием частот, полученных в результате деления и умножения.

Недостатком такого типа синтезаторов является наличие на его выходе большого количества комбинационных частот, что объясняется большим количеством смесителей.

Частота на выходе возбuditеля при декадной установке определяется положениями переключателей каждой декады.

# Синтезаторы частот



Синтезатор прямого (пассивного) синтеза

## Синтезаторы частот

При декадной установке частоты каждый датчик опорной частоты (ДОЧ) формирует десять опорных частот с фиксированным интервалом между соседними частотами. Общее количество датчиков определяется количеством разрядов в записи максимальной частоты синтезатора.

Например если  $f_{max} = 5 \text{ МГц}$ , то:

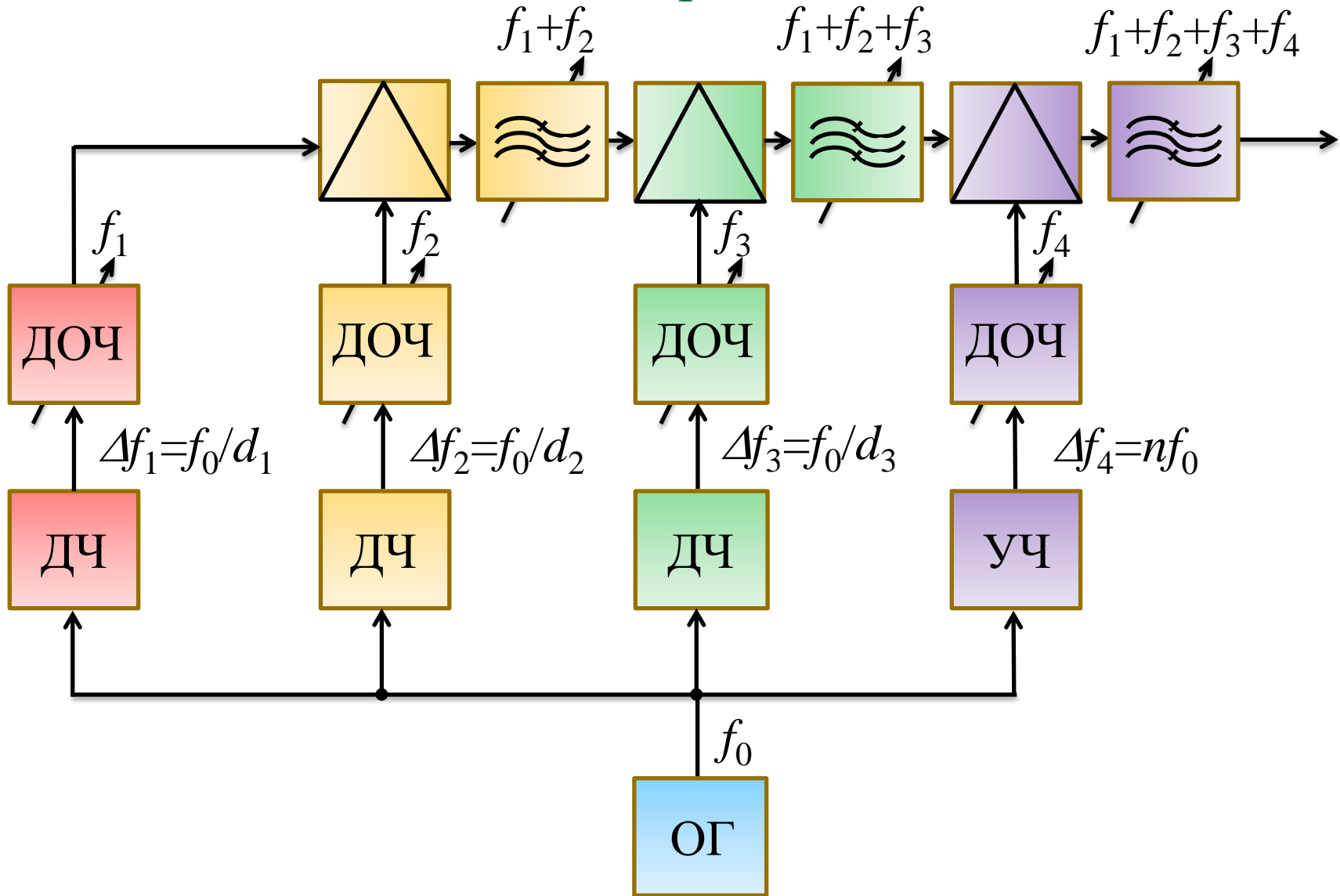
ДОЧ младшего разряда формирует десять частот с интервалом  $\Delta f_1 = 1 \text{ кГц}$ ;

ДОЧ следующего разряда формирует десять частот с интервалом  $\Delta f_2 = 10\Delta f_1 = 10 \text{ кГц}$ ;

ДОЧ следующего разряда формирует десять частот с интервалом  $\Delta f_3 = 10\Delta f_2 = 100 \text{ кГц}$ ;

ДОЧ старшего разряда формирует 5 частот с интервалом  $\Delta f_4 = 10\Delta f_3 = 1000 \text{ кГц} = 1 \text{ МГц}$ .

# Синтезаторы частот



Синтезатор прямого (пассивного) синтеза



## Синтезаторы частот

В синтезаторах **косвенного (активного) синтеза** выходные колебания формируются в диапазонном автогенераторе гармонических колебаний с параметрической стабилизацией частоты, нестабильность которого устраняется системой автоматической подстройки частоты (АПЧ) по эталонным частотам.

Суть автоматической подстройки частоты АПЧ состоит в том, что колебания автогенератора с помощью высокостабильных частот преобразуются к некоторой постоянной частоте  $f_{АПЧ}$ , которая сравнивается с эталонным значением частоты.

В случае несовпадения сравниваемых частот формируется управляющее напряжение, которое подается на управляемый реактивный элемент колебательного контура и изменяет величину его реактивности ( $L$  или  $C$ ).

# Синтезаторы частот

Частота АГ изменяется до тех пор, пока  $f_{АПЧ}$  не приблизится к эталонной частоте с достаточно малой остаточной расстройкой.

В зависимости от устройства сравнения все системы АПЧ можно разделить на три вида:

- **системы с частотной автоподстройкой частоты (ЧАП)**, в которой в качестве сравнивающего устройства используются частотные детекторы (ЧД);
- **системы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАП)**, использующие в качестве сравнивающего устройства фазовые детекторы (ФД);
- **системы с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты (ИФАП)**, в которых сравнивающим устройством являются импульсно-фазовые детекторы (ИФД).

## Синтезаторы частот

**Системы с ЧАП** характеризуются величиной начальной расстройки  $\Delta f_{НАЧ}$ , которая может быть уменьшена системой и определяет полосу схватывания системы:

$$\Delta f_{СХ} = 2\Delta f_{Н МАХ}.$$

Эффективность работы системы автоподстройки частоты оценивается коэффициентом АПЧ  $K_{АПЧ}$ :

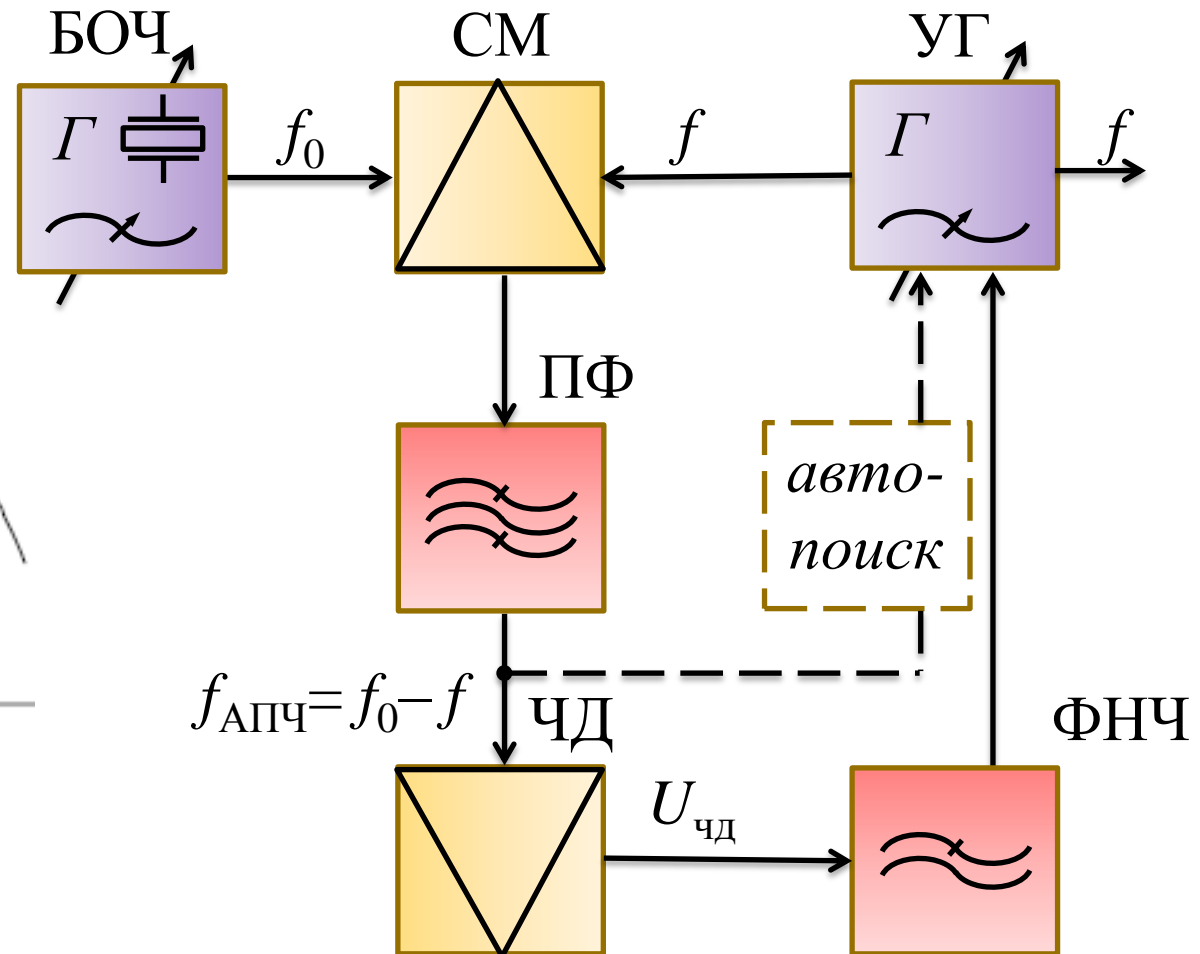
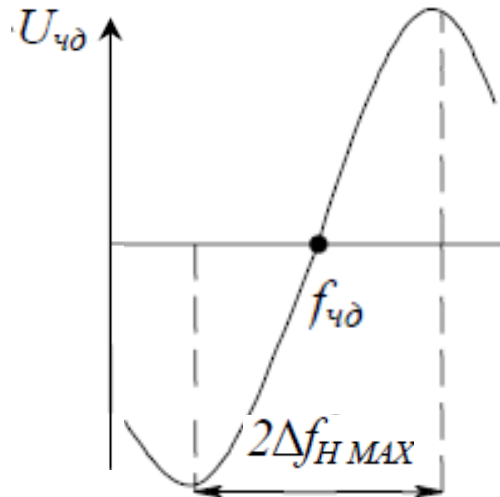
$$K_{АПЧ} = \frac{\Delta f_{НАЧ}}{\Delta f_0} = \frac{\Delta f_{СХ}}{2\Delta f_0}$$

она не компенсирует полностью начальную расстройку, а лишь уменьшает её до некоторой допустимой величины.

Для расширения полосы схватывания в схему вводится дополнительная система — система автопоиска, состоящие из генератора поиска и системы его управления.

# Синтезаторы частот

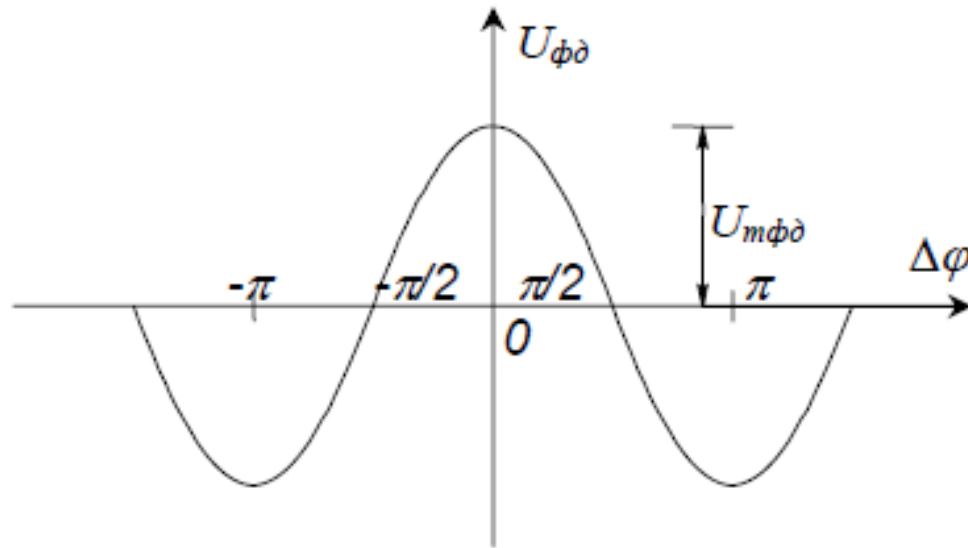
Блок опорных частот (БОЧ) строится по методу прямого синтеза.



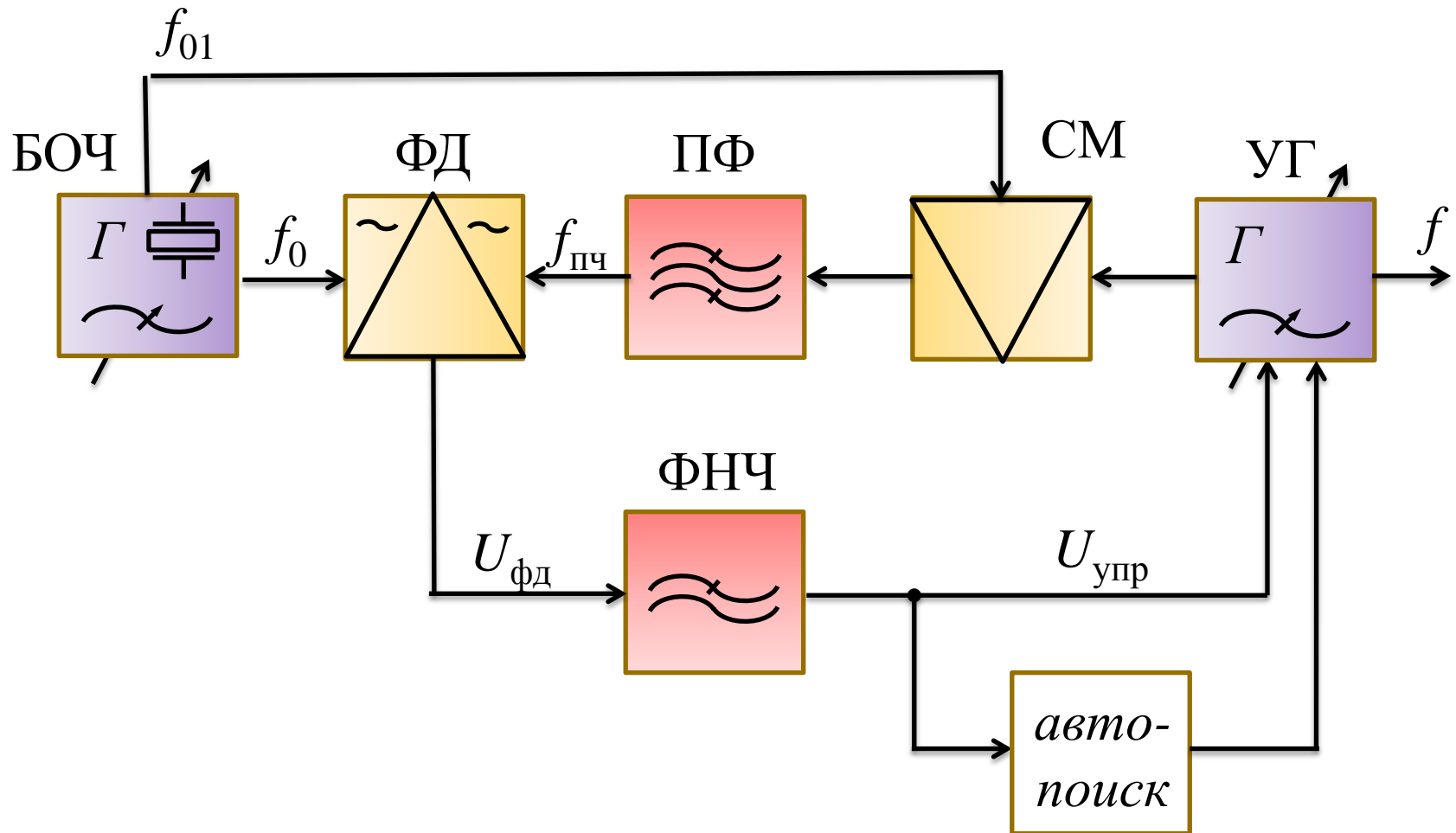
**Синтезатор с частотой автоподстройкой частоты**

# Синтезаторы частот

**Системы с ФАП** (в отличии от **систем с ЧАП**) характеризуются отсутствием остаточной расстройки частоты. В системе ФАП сравнивающим устройством является фазовый детектор, управляющее напряжение на выходе которого пропорционально разности фаз двух поданных на него колебаний, частоты которых в установившемся режиме равны между собой.



# Синтезаторы частот



Синтезатор с фазовой автоподстройкой частоты

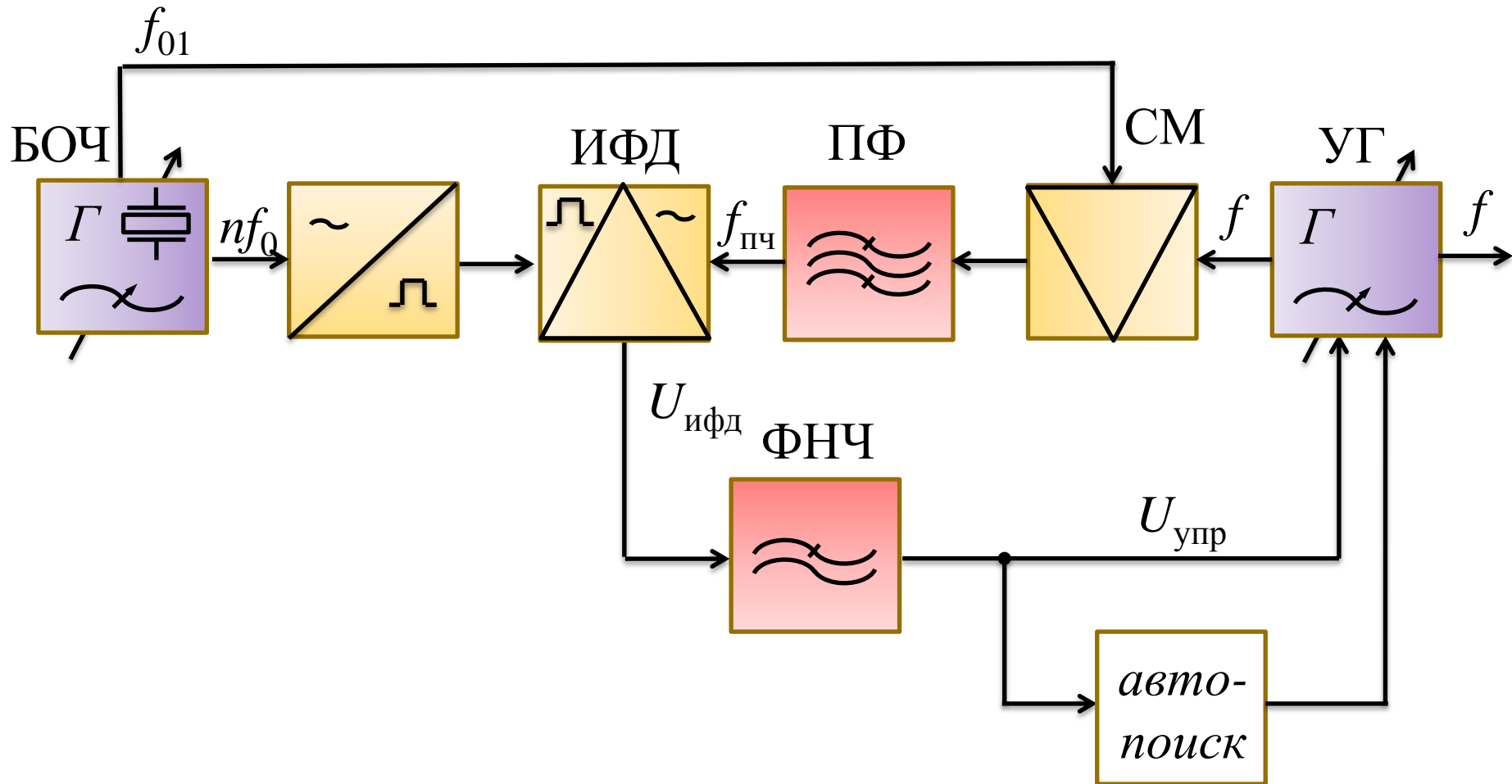
# Синтезаторы частот

**Синтезаторы с импульсно-фазовой автоподстройкой** мало отличаются от системы ФАП. Здесь в качестве сравнивающего устройства используется импульсно-фазовый детектор, на который колебания эталонной частоты  $f_0$  подаются в виде коротких прямоугольных импульсов, которые генерируются в формирующем устройстве.

Достоинством ИФД является возможность сравнения колебаний кратных частот  $f_{ПЧ} = nf_0$ , где  $n$  — целые числа.

**Система автопоиска** представляет собой автогенератор пилообразного напряжения, запускающийся при отсутствии управляющего напряжения на выходе ФНЧ. Как только частоты УГ попадают в полосу схватывания системы (ЧАП, ФАП, ИФАП) генератор поиска выключается, система входит в режим автоподстройки с динамическим равновесием  $f_{ПР} = f_0$ .

# Синтезаторы частот



Синтезатор с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты



## 2 Модуляторы

1 Непрерывные колебания радиочастоты  $a_0(t)$  (ВЧ-колебания  $f_{\text{ВЧ}}$ , радиочастота  $f_{\text{РЧ}}$ ) с постоянными параметрами не несут полезную информацию, они свидетельствуют только о факте своего существования.

2 Спектр сигнала, подлежащего передаче, расположен, как правило, в области низких частот  $s(t) \ll a_0(t)$ .

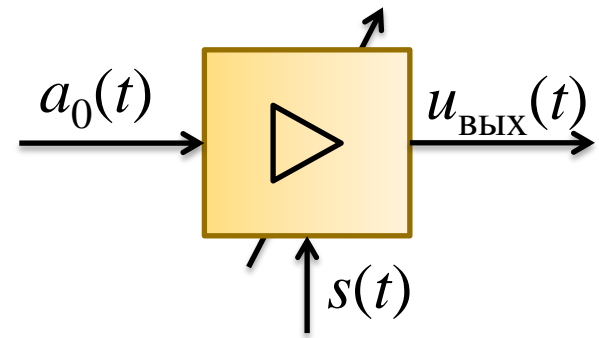
3 Для реализации радиосвязи необходимо перенести спектр сигнала в область радиочастоты  $a_0(t)$ , что достигается изменением одного или нескольких параметров ВЧ-колебаний в соответствии с полезной информацией. В зависимости от того, какой параметр ВЧ-колебаний изменяется при модуляции, различают: **амплитудную модуляцию (АМ)**, **угловую модуляцию (частотную модуляцию (ЧМ) и фазовую модуляцию (ФМ))**.

# Модуляторы

Формирование радиосигналов с амплитудной модуляцией осуществляется в передающем устройстве с помощью устройства называемым **амплитудным модулятором**.

**Амплитудный модулятор** — нелинейное устройство, поскольку в результате модуляции на его выходе спектр сигнала обогащается новыми составляющими (две боковые полосы частот).

Процесс амплитудной модуляции можно представить как процесс прохождения несущего колебания  $a_0(t)$  через усилитель, коэффициент усиления которого изменяется по закону модулирующего колебания  $s(t)$ .



# Модуляторы

При законе изменения модулирующего колебания:

$$s(t) = U_M \cos \Omega t,$$

и законе изменения несущего колебания:

$$a_0(t) = U_0 \cos \omega_0 t,$$

сигнал с выхода модулятора описывается выражением:

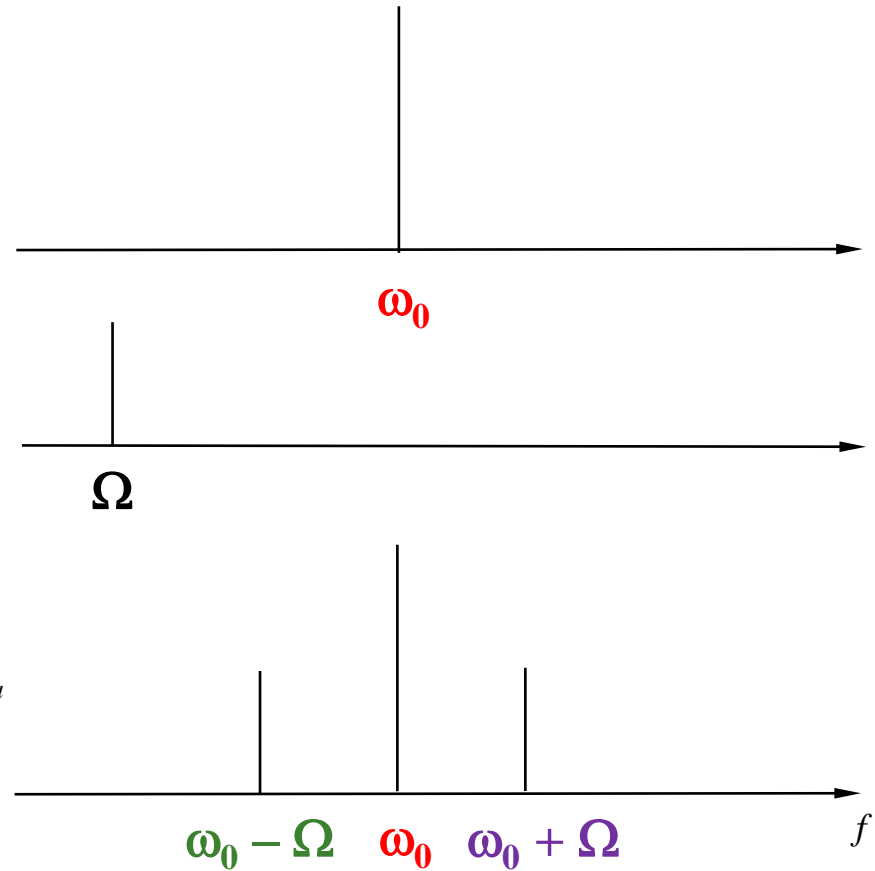
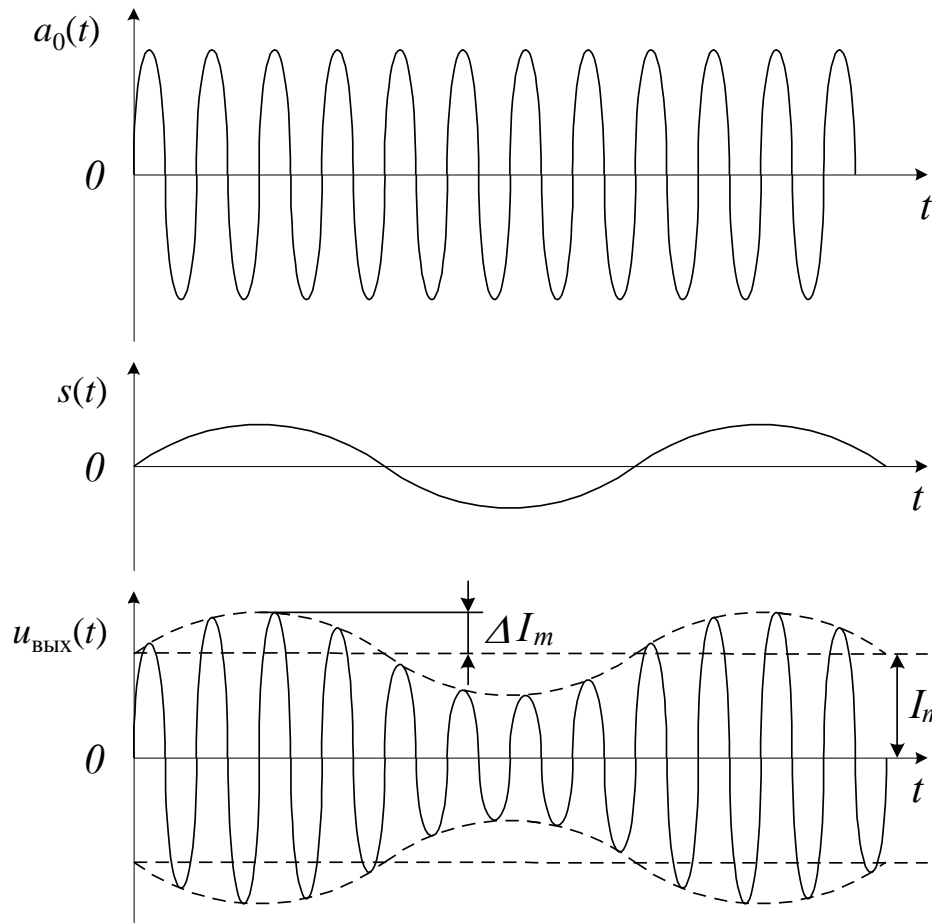
$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_0 (1 + U_M / U_0 \cos \Omega t) \cos \omega_0 t,$$

где  $U_M / U_0 = m \leq 1$  – коэффициент амплитудной модуляции.

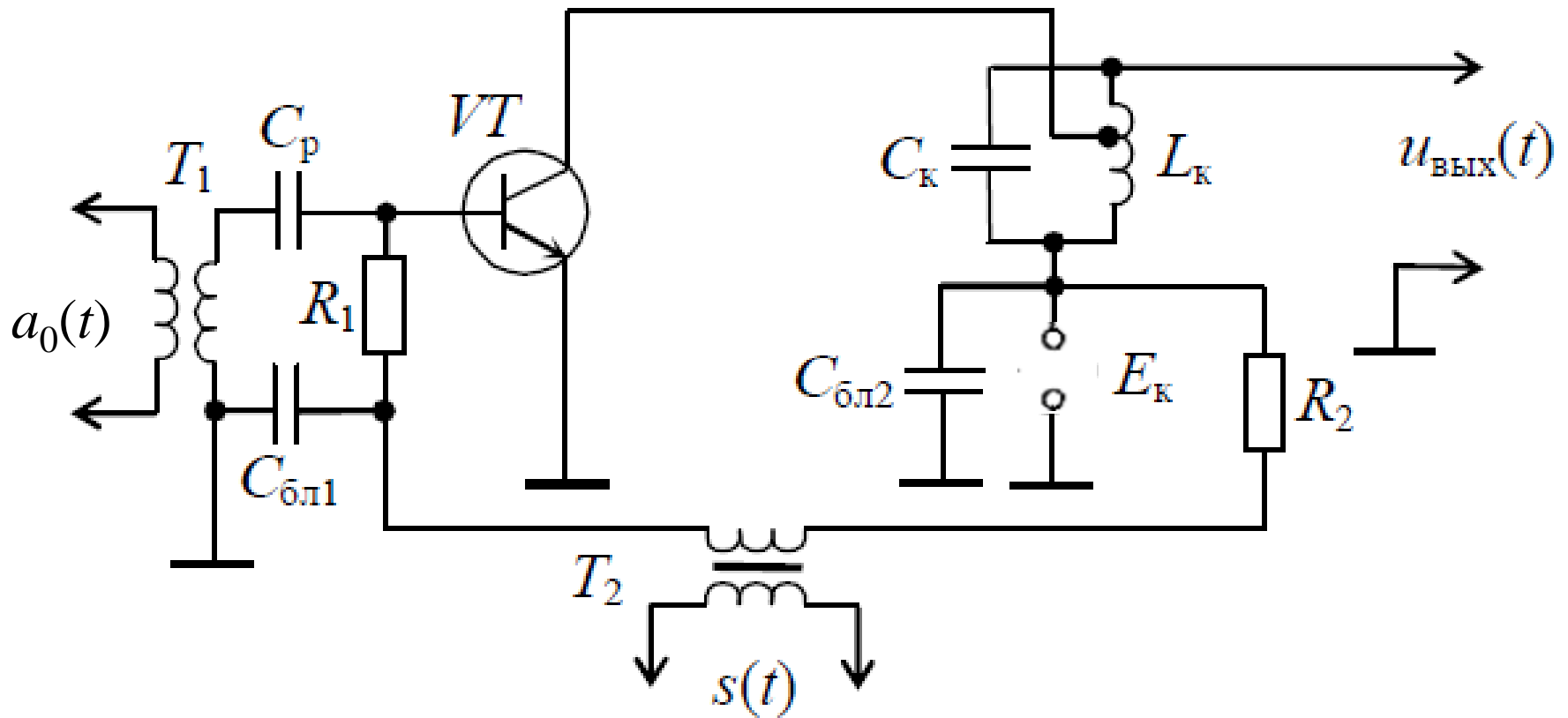
Окончательно,

$$\begin{aligned} u_{\text{ВЫХ}}(t) = & \text{спектр колебания состоит из} \\ = & U_0 \cos \omega_0 t + \text{составляющих: на несущей } \omega_0; \\ & 0,5mU_0 \cos(\omega_0 - \Omega)t + \text{на нижней боковой } \omega_0 - \Omega; \\ & + 0,5mU_0 \cos(\omega_0 + \Omega)t. \text{ на верхней боковой } \omega_0 + \Omega. \end{aligned}$$

# Модуляторы

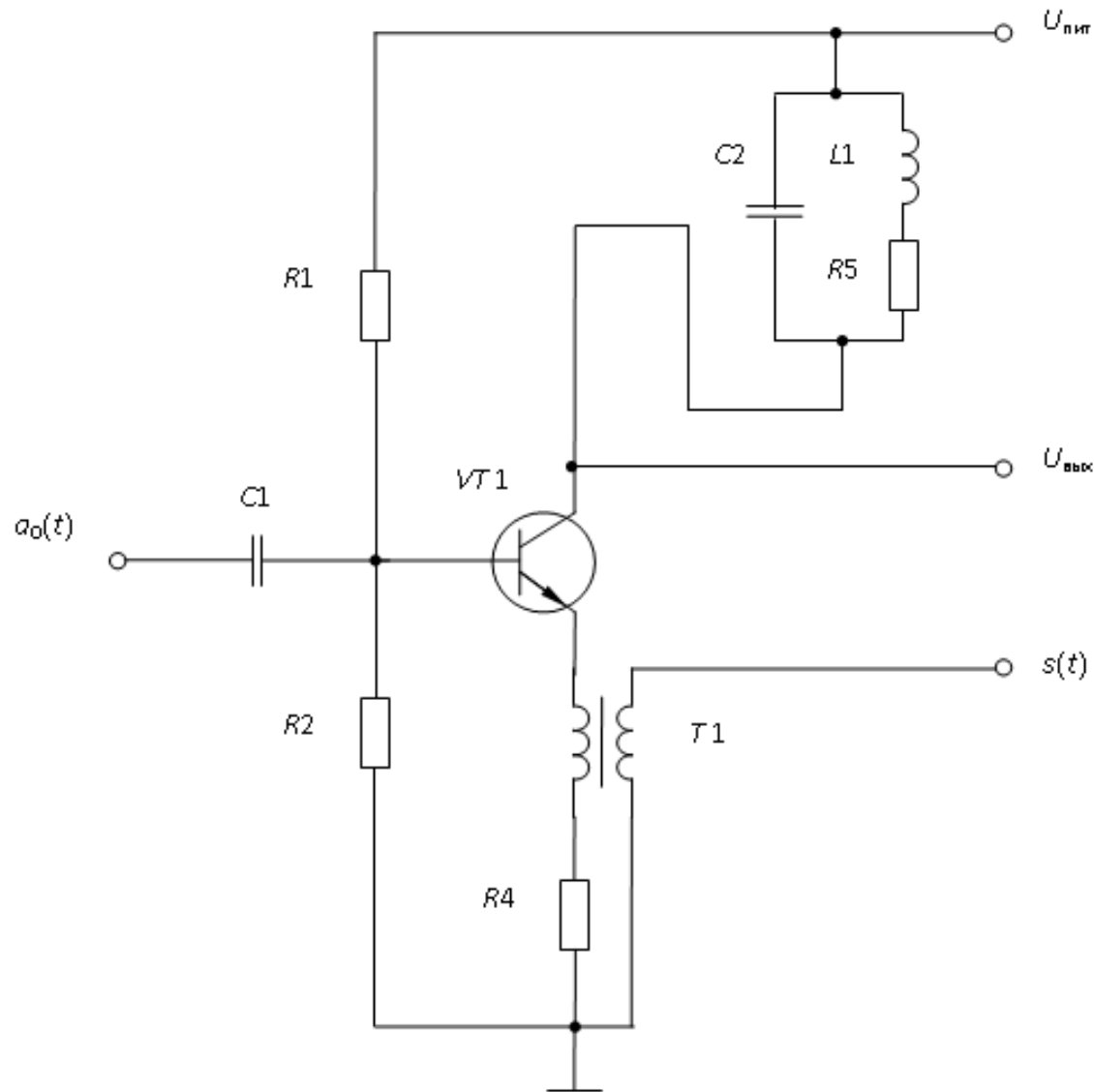


# Модуляторы



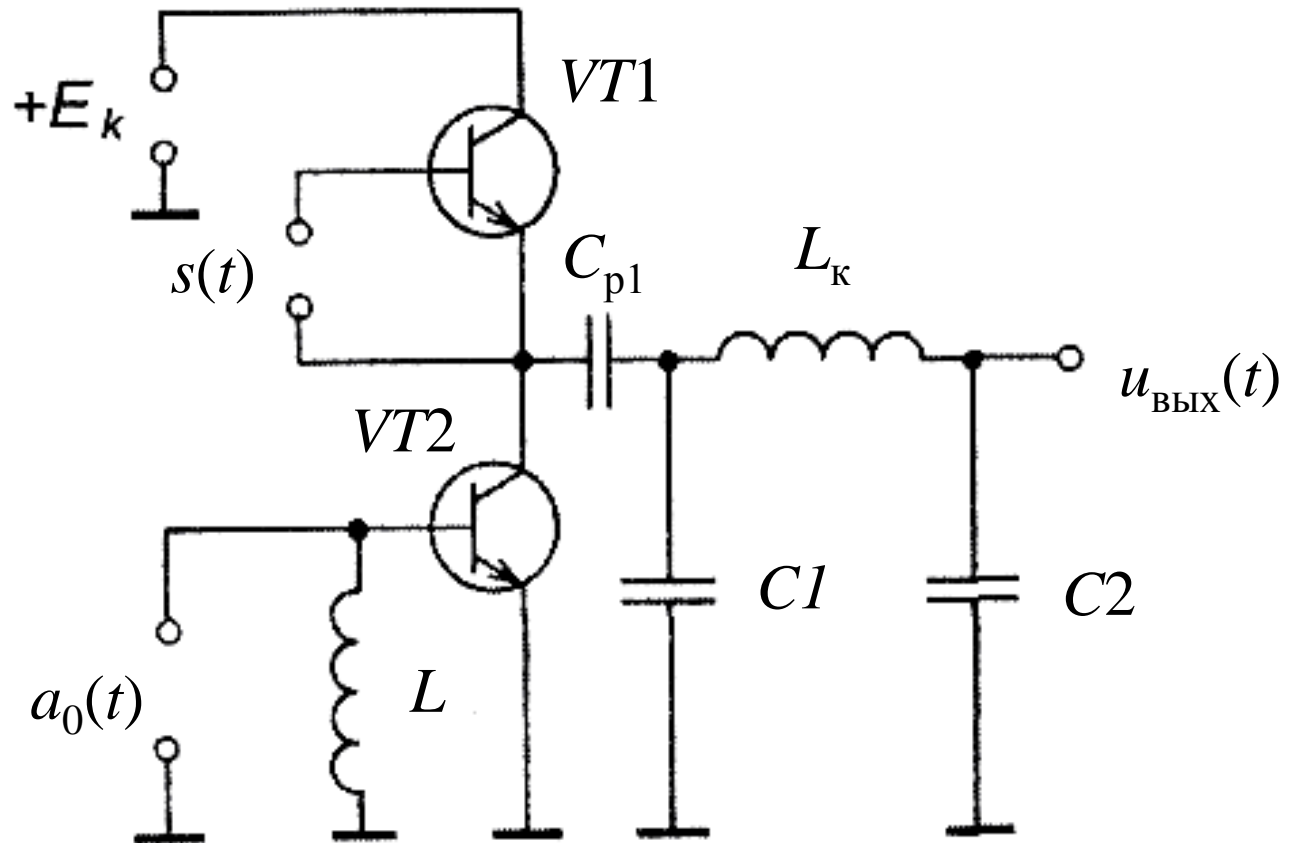
**Амплитудный модулятор** (модуляция смещением)

# Модуляторы



**Амплитудный модулятор** (эмиттерная модуляция)

# Модуляторы



**Амплитудный модулятор** (коллекторная модуляция)

# Модуляторы

В основе **угловой модуляции** положена связь между частотой и фазой колебаний, описываемая выражениями:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}, \quad \varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt,$$

где  $d\varphi/dt$  – скорость изменения фазы.

Взаимная зависимость фазы и угловой частоты такова, что всякое изменение фазы приводит к изменению частоты и наоборот.

По этой причине при **фазовой модуляции** всегда изменяется частота, а при **частотной модуляции** – фаза.

При **частотной модуляции** частота изменяется в соответствии с передаваемым сообщением.



# Модуляторы

Если передаваемое сообщение представляет собой гармонический сигнал  $u_m(t) = U_\Omega \cos \Omega t$ , мгновенная частота модулированного колебания изменяется по закону:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$$

Величина  $\Delta\omega$  называется **девиацией частоты модулированного колебания**.

Выражение ЧМ-сигнала записывается в виде

$$u(t) = U_{mH} \left[ \omega_0 t + \int_0^t \omega(t) dt \right]$$

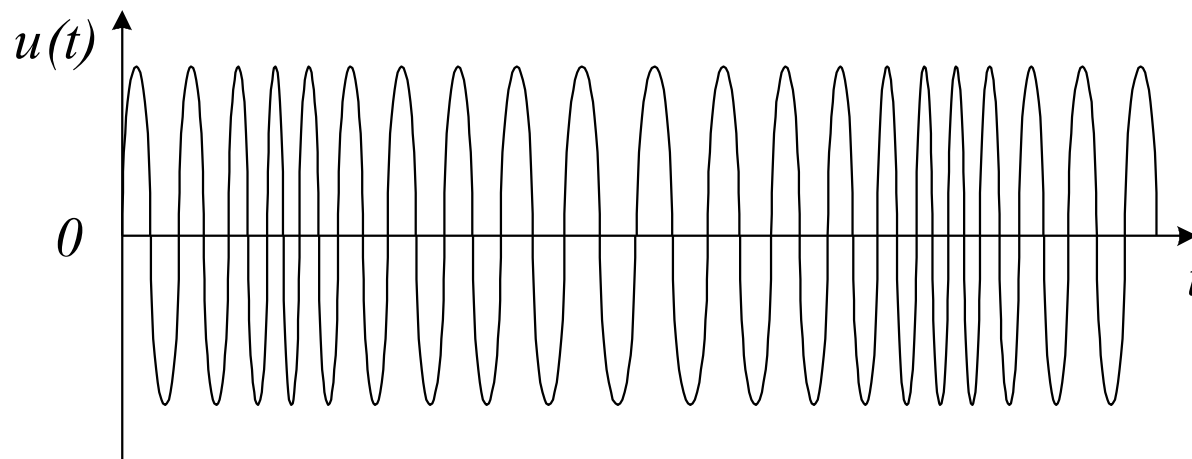
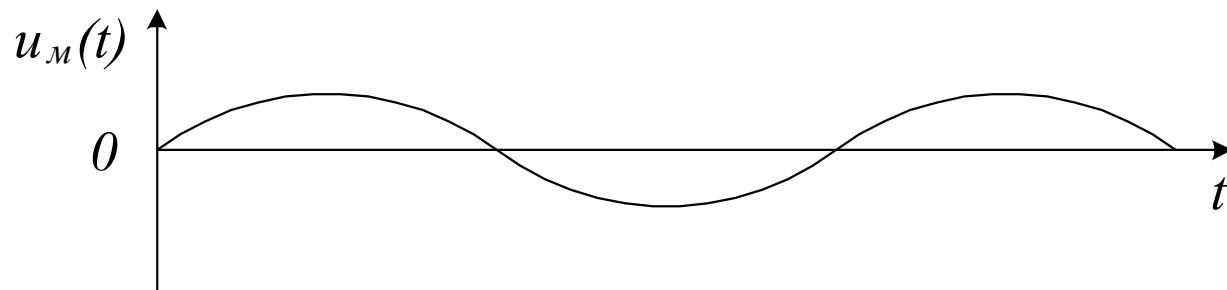
или

$$u(t) = U_{mH} \cos(\omega_0 t + m_\omega \sin \Omega t)$$

Отношение девиации частоты к частоте модулирующего напряжения называется **индексом модуляции** и обозначается

$$m_\omega = \Delta\omega / \Omega$$

# Модуляторы



## Модуляторы

Спектр частотно-модулированного колебания представляет сумму бесконечного количества гармонических колебаний с разностью частот между ними, равной  $\Omega$ :

$$u(t) = U_{mH} \left[ J_0(m_\omega) \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m_\omega) \cos(\omega_0 + n\Omega)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(m_\omega) \cos(\omega_0 - n\Omega)t \right],$$

где  $J_n(m_\omega)$  – функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка.

При  $m_\omega \ll 1$  (быстрая ЧМ) существенными оказываются только компонента на несущей частоте и две боковые:

$$u(t)/U_{mH} = \cos \omega_0 t + 0,5m_\omega \cos(\omega_0 + \Omega)t - 0,5m_\omega \cos(\omega_0 - \Omega)t$$

Ширина спектра в этом случае равна удвоенной частоте модуляции, как при АМ.

## Модуляторы

Наибольшее применение находят ЧМ-сигналы с большим индексом модуляции  $m_{\omega} \gg 1$  (медленная ЧМ). Ширина спектра в этом случае не зависит от частоты модуляции, а определяется удвоенной девиацией частоты и она намного шире, чем у АМ-колебаний – главный недостаток частотной модуляции. Несмотря на этот недостаток, частотная модуляция имеет преимущества перед амплитудной:

- при ЧМ лучше используются генераторные приборы по мощности, поскольку амплитуда колебания в процессе модуляции остается постоянной;

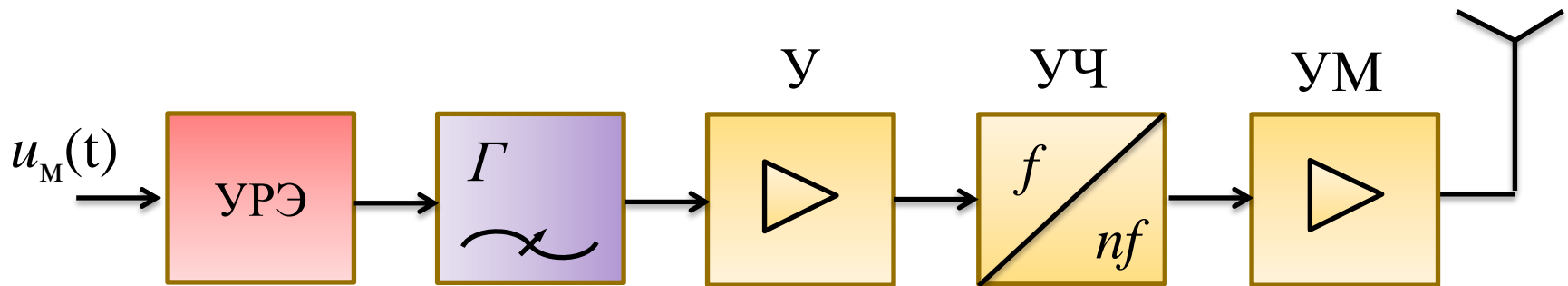
- линии радиосвязи при ЧМ обладают более высокой помехозащищенностью, так как атмосферные и промышленные помехи, изменяя амплитуду сигнала, не изменяют закон модуляции и поэтому могут быть устранены в приемнике путем ограничения сигнала.

# Модуляторы

Частотную модуляцию реализуют изменением частоты автогенератора, выполняющего роль задающего генератора, воздействуя на его колебательную систему модулирующим напряжением.

Различают два способа получения ЧМ: **прямой** и **косвенный**.

**Прямой способ** ЧМ осуществляется с помощью частотного модулятора: модулирующее напряжение в этом случае воздействует непосредственно на автогенератор.



Структурная схема передатчика с прямым способом ЧМ

# Модуляторы

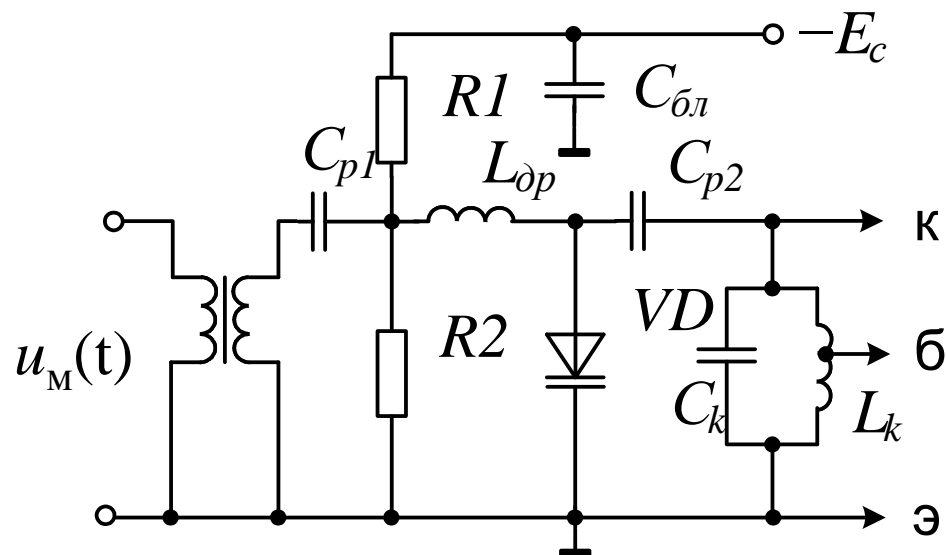
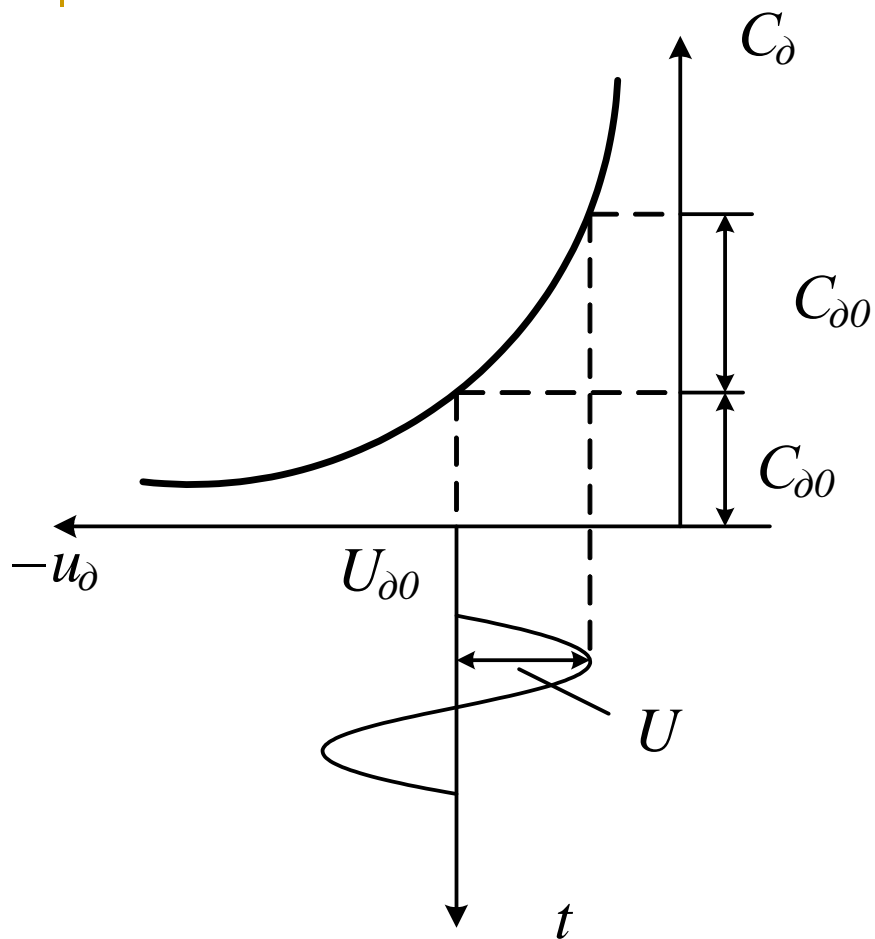
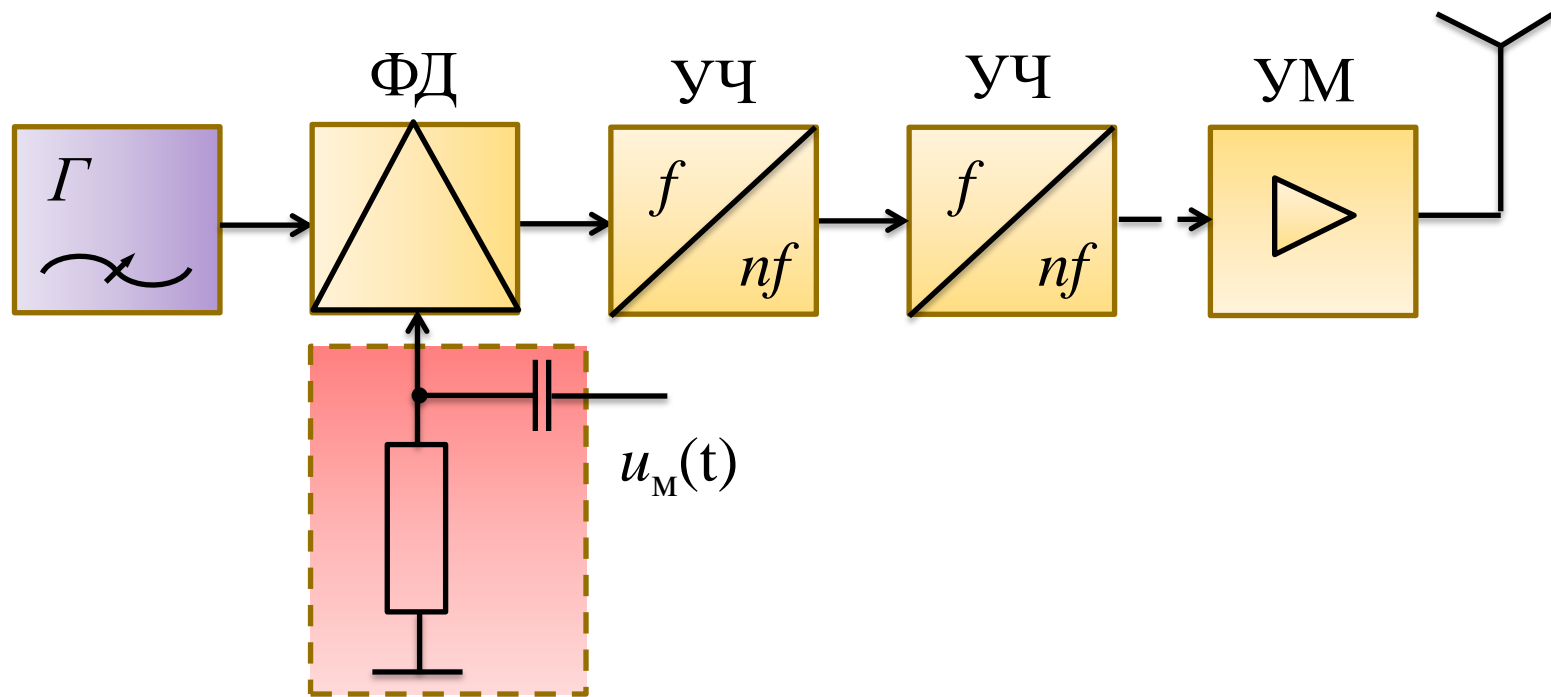


Схема подключения варикапа к колебательному контуру АГ

# Модуляторы

При **косвенном** способе ЧМ сначала осуществляется фазовая модуляция, а затем – ее преобразование в частотную.

В таком передатчике АГ не подвергается модуляции и поэтому может быть достигнута высокая стабильность частоты.



Структурная схема передатчика с **косвенным** способом ЧМ

# Модуляторы

При **фазовой модуляции** в соответствии с передаваемым сообщением изменяется начальная фаза колебания .

Если передаваемое сообщение представляет собой гармонический сигнал, то начальная фаза изменяется следующим образом:  $\varphi(t) = \Delta\varphi \cos \Omega t$   
где  $\Delta\varphi$  – максимальное отклонение фазы.

Фазомодулированный высокочастотный сигнал при этом описывается выражением  $u(t) = U_{mH} \cos \left[ \omega_0 t + m_\varphi \cos \Omega t \right]$

Из этих выражений следует, что изменение фазы при частотной модуляции пропорционально интегралу от изменения фазы при фазовой модуляции:

$$\frac{\Delta \omega}{\Omega} \sin \Omega t = \int_0^t \Delta \varphi \cos \Omega t dt$$



## Модуляторы

При **фазовой модуляции** в соответствии с передаваемым сообщением изменяется начальная фаза колебания .

Максимальное отклонение фазы  $\Delta\varphi$  при фазовой модуляции называется индексом фазовой модуляции (девиацией фазы)  $m_\varphi$ .

Спектр фазомодулированного колебания аналогичен спектру при частотной модуляции.

Различают два способа получения ФМ (по аналогии с ЧМ): **прямой** и **косвенный**, которые реализуются с помощью схем построения передатчиков, аналогичных рассмотренным для ЧМ.

В качестве фазового модулятора может быть использован балансно-кольцевой фазовый детектор (он же преобразователь частоты).

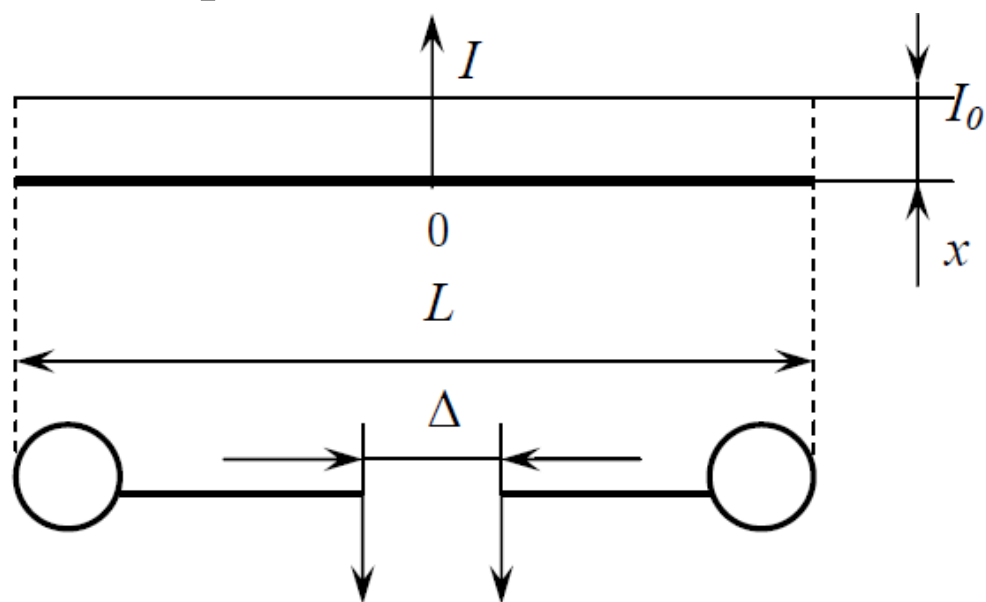
# Модуляторы

## В качестве выводов:

- каждый из видов модуляции обладает, как своими достоинствами так и недостатками и их выбор определяется назначением радиосистемы и условиями, в которых она функционирует;
- АМ-колебания целесообразно использовать, когда количество РЭС, работающих в ограниченном диапазоне частот, велико;
- ЧМ- и ФМ-колебания целесообразно использовать при высоких требованиях к помехозащищенности сигнала и при малом количестве РЭС, работающих в ограниченном диапазоне частот;
- одним из наиболее перспективных видов модуляции при непрерывной работе генератора является однополосная модуляция.

### 3 Антенны систем радиосвязи

Простейшим излучателем электромагнитного поля (ЭМП) может служить короткий отрезок электрического проводника, физическая длина которого  $L$  намного меньше длины излучаемой волны  $\lambda$ . В этом случае модуль линейной плотности электрического тока  $I$  будет распределён по длине излучателя равномерно.



к источнику переменного тока

Такой излучатель называется *диполем Герца*, представляющим два небольших металлических шара, соединённых отрезком проводника. В разрез проводника включается источник переменного тока.

## Антенны систем радиосвязи

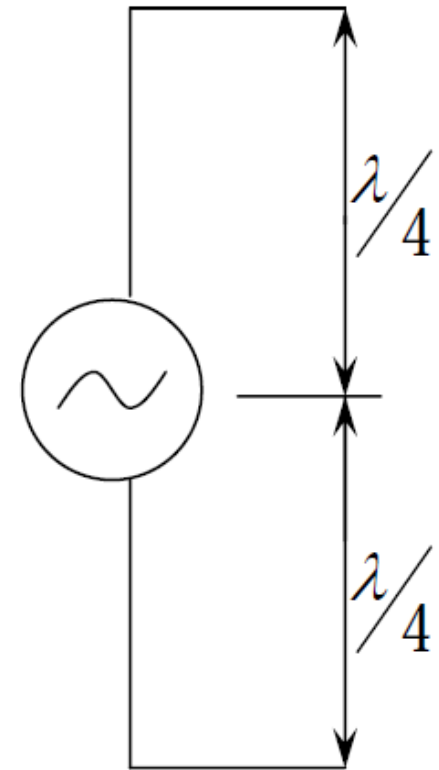
Наличие шаров на концах проводника существенно уменьшает необходимую длину диполя Герца.

Энергия электромагнитного поля, возникающая в проводнике, существенно зависит от его конфигурации и соотношения размеров проводника и длины волны электромагнитного поля.

*Устройства, предназначенные для излучения и приёма электромагнитных колебаний, называются антеннами.*

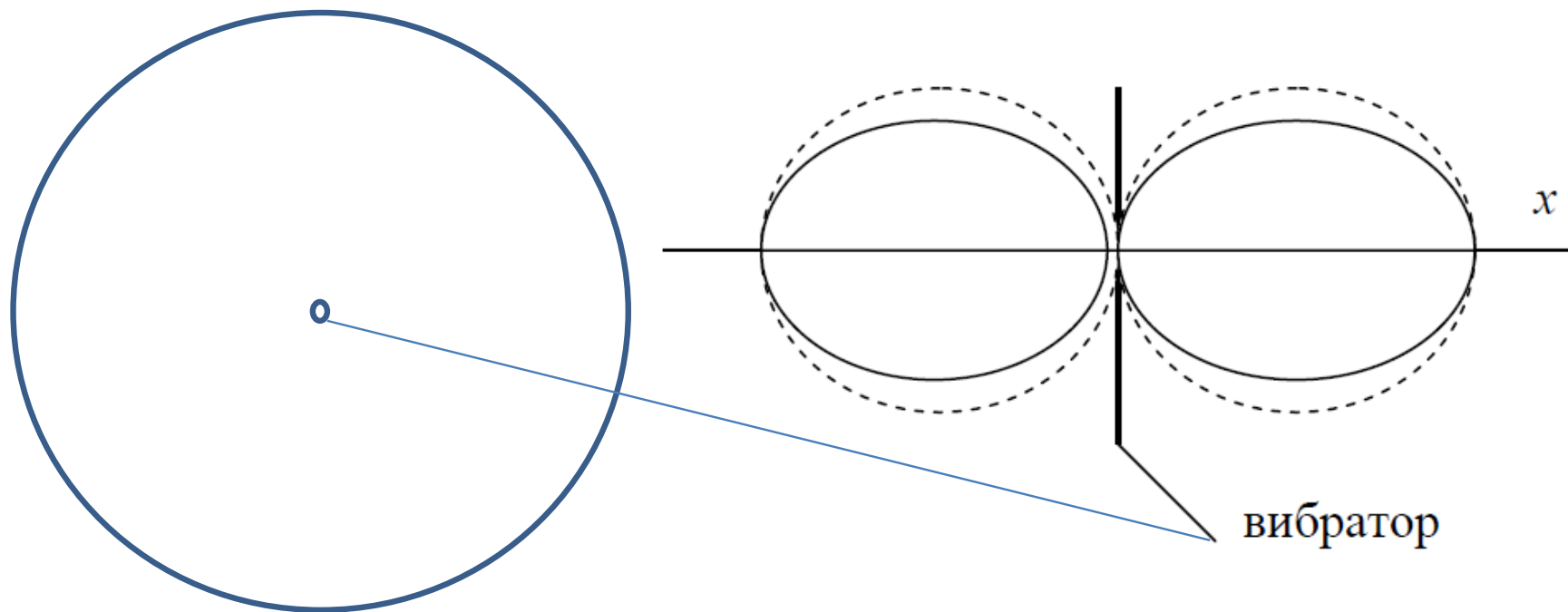
Простейшую излучающую антенну можно сделать из отрезка электрического проводника размером в половину длины излучаемой (принимаемой) волны, в середину которого включён генератор переменного тока.

Такую антенну называют *полуволновым вибратором*.



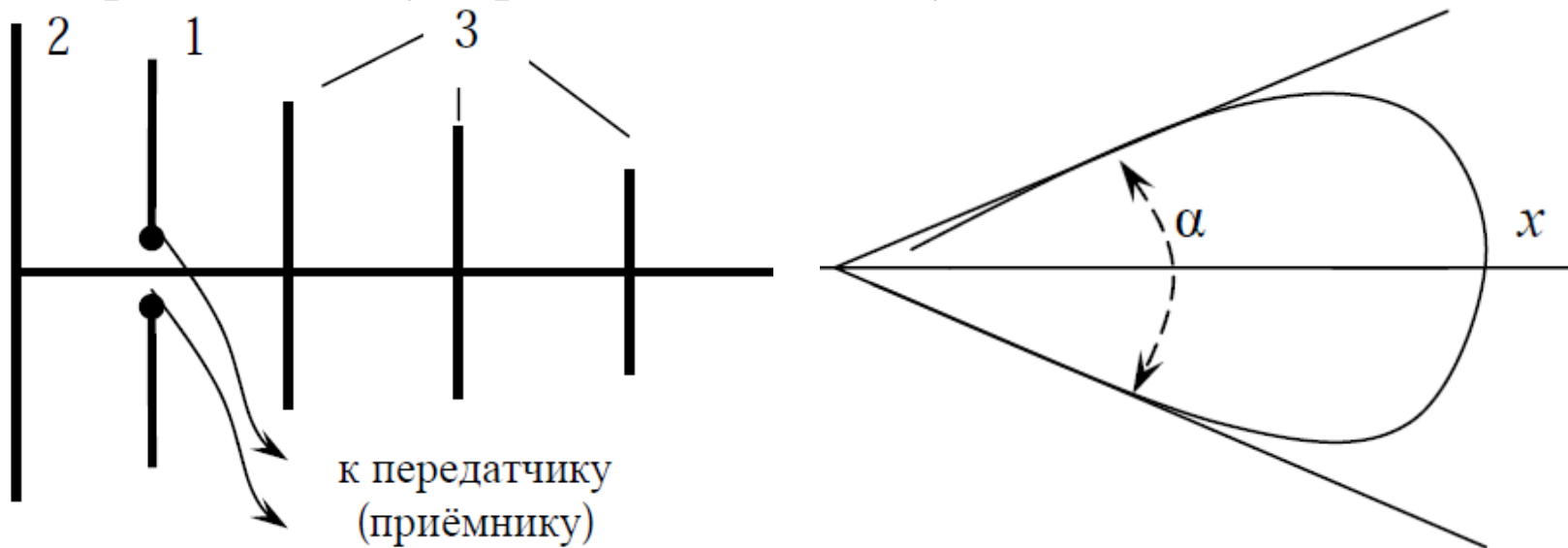
## Антенны систем радиосвязи

Наглядное представление о характере излучения антенны даёт диаграмма направленности (ДН), отражающая зависимость плотности потока мощности от направления в пространстве. В горизонтальной плоскости ДН имеет вид окружности, в вертикальной вид – вытянутых восьмёрок.



## Антенны систем радиосвязи

Диаграмму направленности полуволнового вибратора (1) можно улучшить, если в направлении, обратном излучению, установить рефлектор (2) на удалении от активного вибратора менее  $\lambda/4$  и в направлении излучения установить директоры (3), подбирая их длину и расстояние между ними.



Антенну такого типа называют «волновой канал». Она широко используется в системах связи метрового диапазона волн, как передающая, так и приёмная.

# Основные характеристики антенн

**Угол раскрыва** – диаграмма направленности антенны по уровню половинной мощности.

**Коэффициент направленного действия (КНД)** показывает, во сколько раз средняя мощность, излучаемая (принимаемая) направленной антенной, в заданном угле её диаграммы направленности больше средней мощности в том же угле ненаправленной антенны, работающей от того же источника.

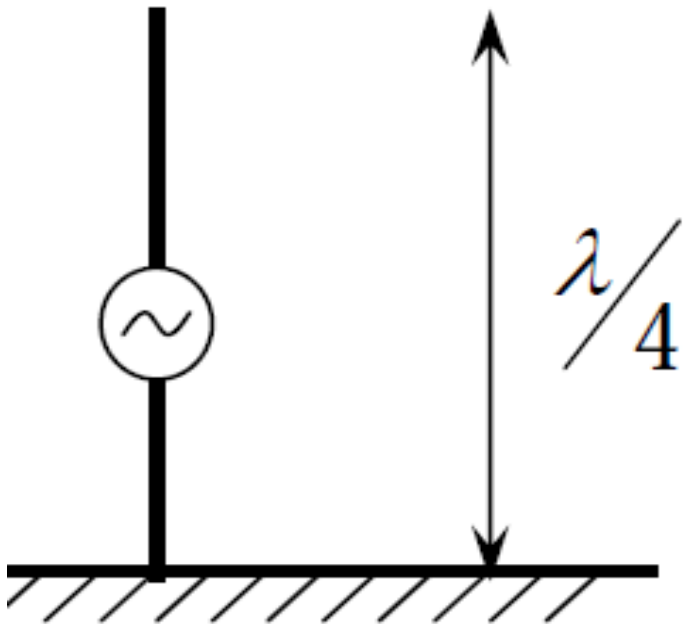
**Коэффициент усиления антенны** –  $G_a$  характеризует усилительные свойства антенны с учётом потерь при излучении. Он определяется как произведение  $KНД$  на коэффициент полезного действия антенны.

$$G_a = KНД \cdot \eta_A ,$$

Коэффициент усиления антенны выражается в логарифмических величинах децибелах (дБ).

## Антенны систем радиосвязи

В диапазоне километровых волн габариты даже одновибраторных антенн оказываются такими большими, что возникают существенные трудности их реализации. Задача несколько упрощается, если в качестве второго проводника вибратора использовать проводящую землю и получать четвертьволновый заземлённый вибратор.



Такого типа антенны называют штыревыми. Мощность, излучаемая таким вибратором, в два раза меньше, чем у полуволнового.

В практических реализациях длина штыревой антенны может быть меньше  $\lambda/4$ . При этом мощность излучения естественно уменьшается.



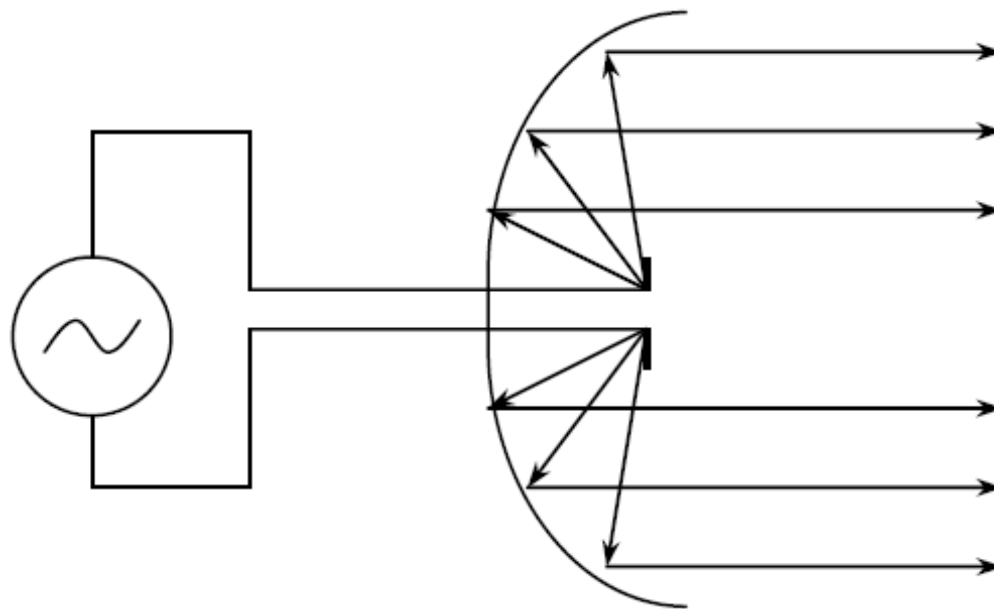
# Антенны систем радиосвязи

Для создания остронаправленного излучения в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн широко используют антенны с параболическим отражателем.

Излучатель такой антенны располагается в фокусе параболического зеркала.

В этом случае отражатель концентрирует отражённые лучи в узкий пучок.

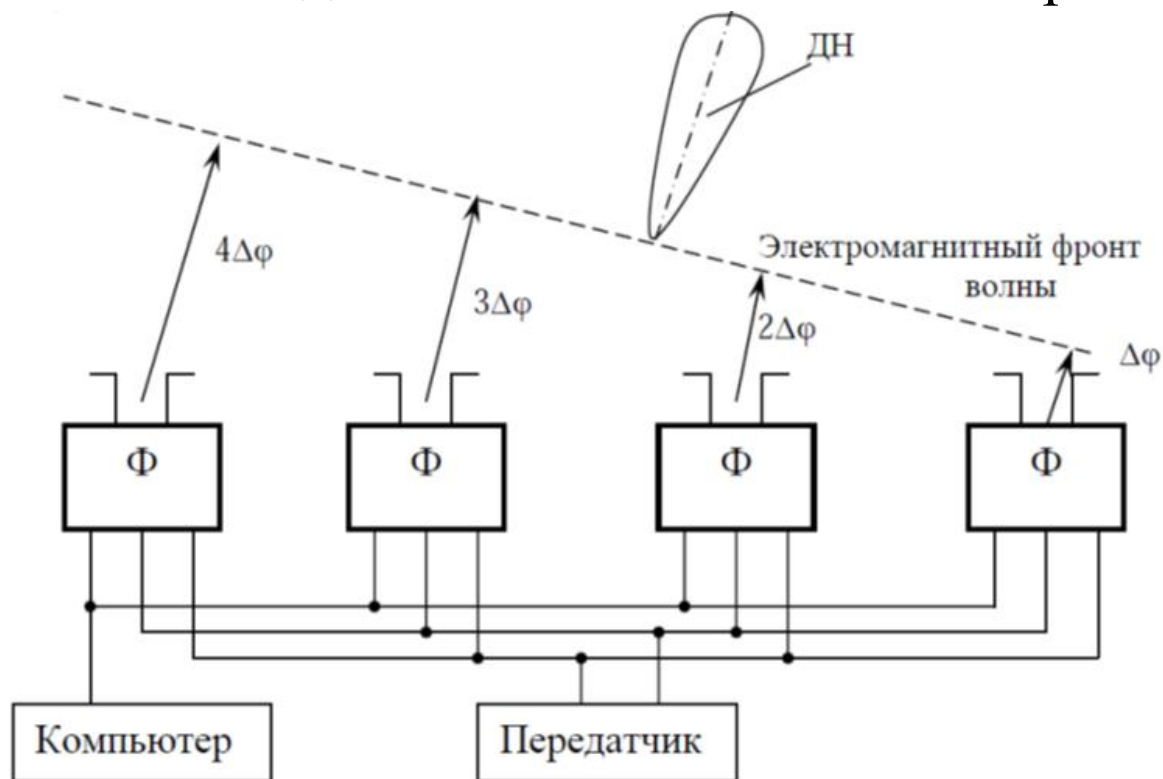
Чем меньше длина волны и больше диаметр зеркала, тем уже диаграмма направленности антенны и больше коэффициент усиления.



# Антенны систем радиосвязи

В последние годы, и в первую очередь в радиолокационных системах, широко применяются фазированные антенные решётки — ФАР.

Такие антенны представляют собой систему определённым образом расположенных в одной плоскости элементарных излучателей, питаемых через индивидуальные фазовращатели одним источником ВЧ колебаний или системой когерентных (сфазированных) источников.



# Литература

1. Першин, В. Т. Основы радиоэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. Т. Першин. - Мн. : Выш. Шк. 2006. - 436 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=234977](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=234977)
2. Красковский Л. Е., Мельникова Л. Я., Меремсон Ю. Л. Приемо-передающие устройства железнодорожной радиосвязи [Электронный ресурс]: Учебное пособие / А. Е. Красковский и др.; под ред. А. Е. Красковского. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 360 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=227703&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=227703&sr=1)
3. Акулиничев Ю. П. Теория и техника передачи информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, Л. С. Бернгардт. — Томск: Эль Контент, 2012. — 210 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=208952&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=208952&sr=1)
4. Мелихов С. В. Аналоговое и цифровое радиовещание [Электронный ресурс]: Учебное пособие./ С. В. Мелихов. - Электрон. текстовые дан. – 2-е изд., испр. – Томск: Томск, гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012.–233 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view&book\\_id=208686](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=208686) .
5. Томаси У. Электронные системы связи [Электронный ресурс] / У. Томаси. - Электрон. текстовые дан. – М.: Техносфера, 2007. – 1360 с. - Режим доступа: URL [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view&book\\_id=135422](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=135422).
6. Головин, О. В.. Устройства генерирования, формирования, приема и обработки сигналов : учеб. пособие по спец."Средства связи с подвижными объектами" и "Радиосвязь, радиовещание и телевидение" / О.В. Головин .— М. : Горячая линия - Телеком, 2014 .— 782 с. : ил. (5 экземпляров в библиотеке).