

Распространение радиоволн.  
Разновидности АМ. Угловая  
модуляция.

# ДИАПАЗОНЫ РАДИОВОЛН

- **Весьма широкий участок радиоволн, отведенный для радиовещательных станций, условно подразделен на несколько диапазонов: длинноволновый (сокращенно ДВ), средневолновый (СВ), коротковолновый (КВ), ультракоротковолновый (УКВ). В нашей стране длинноволновый диапазон охватывает волны длиной от 735,3 до 2000 м, что соответствует частотам 408-150 кГц; средневолновый - радиоволны длиной от 186,9 до 571,4 м, что соответствует частотам 1605-525 кГц; коротковолновый - радиоволны длиной от 24,8 до 75,5 м, что соответствует частотам 12,1-3,95 МГц; ультракоротковолновый - радиоволны длиной от 4,11 до 4,56 м, что соответствует частотам 73-65,8 МГц**
- **Радиоволны УКВ диапазона называют также метровыми волнами; вообще же ультракороткими волнами называют все волны короче 10 м. В этом диапазоне ведутся телевизионные передачи, работают связные радиостанции, оборудованные на автомашинах пожарной охраны, такси, медицинского обслуживания населения на дому, безопасности уличного движения.**
- **Коротковолновые радиовещательные станции неравномерно распределены по КВ диапазону: больше всего их работает на волнах длиной около 25, 31, 41 и 50 м. Соответственно этому коротковолновый радиовещательный диапазон подразделяется на 25, 31, 41 и 50-метровый поддиапазоны.**
- **Согласно международному соглашению волна длиной 600 м (500 кГц) отведена для передачи сигналов бедствия кораблями в море - 808. На этой волне работают все морские аварийные радиопередатчики, на эту волну настроены приемники всех спасательных станций и маяков.**

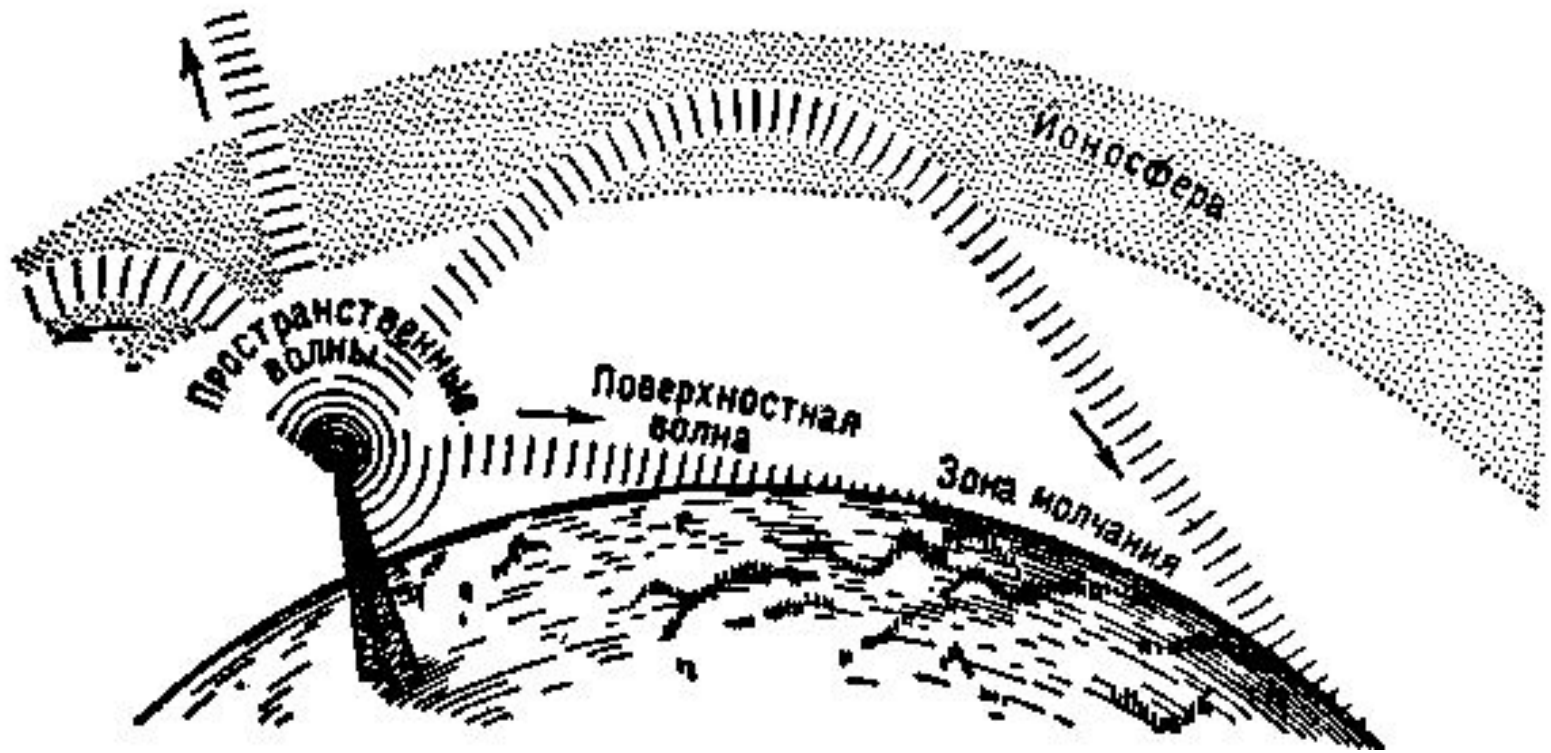
Таблица 1.1 Частотные границы диапазонов и их названия

N	Частота	Длина волны	Диапазон	Метрическое подразделение волн
4	3 кГц...30 кГц	100км...10 км	СДВ	Мириаметровые
5	30 кГц...300 кГц	10 км...1 км	ДВ	Километровые
6	300 кГц...3000 кГц	1 км...100 м	СВ	Гектометровые
7	3 МГц...30 МГц	100м...10 м	КВ	Декаметровые
8	30 МГц...300 МГц	10 м...1 м	УКВ	Метровые
9	300 МГц...3000 МГц	1 м...10 см	УКВ	Дециметровые
10	3 ГГц...30 ГГц	10 см...1 см	УКВ	Сантиметровые
11	30 ГГц...300 ГГц	1 см...1 мм	УКВ	Миллиметровые
12	300 ГГц...3000 ГГц	1 мм...0,1 мм	УКВ	Децимиллиметровые

# Особенности радиодиапазонов

- Радиоволны разных диапазонов обладают неодинаковыми свойствами, влияющими на дальность их распространения. Волны одной длины, преодолевают большие расстояния, волны, другой длины "теряются" за пределами горизонта. Бывает так, что радиосигнал превосходно слышен где-то по ту сторону Земли или в Космосе, но его невозможно обнаружить в нескольких десятках километров от радиостанции.
- Если бы мы настроили приемники на рядом расположенные радиостанции, работающие в диапазонах ультракоротких, коротких, средних и длинных волн, то, удаляясь от станций, смогли бы наблюдать такое явление: уже в нескольких десятках километров прекратился бы прием ультракоротковолновой и коротковолновой станций, через 800-1000 км перестали бы слышать передачи средневолновой станции, а через 1500-2000 км - и передачи длинноволновой станции. Но на большем расстоянии мы смогли бы услышать передачу коротковолновой станции.

# Распространение радиоволн



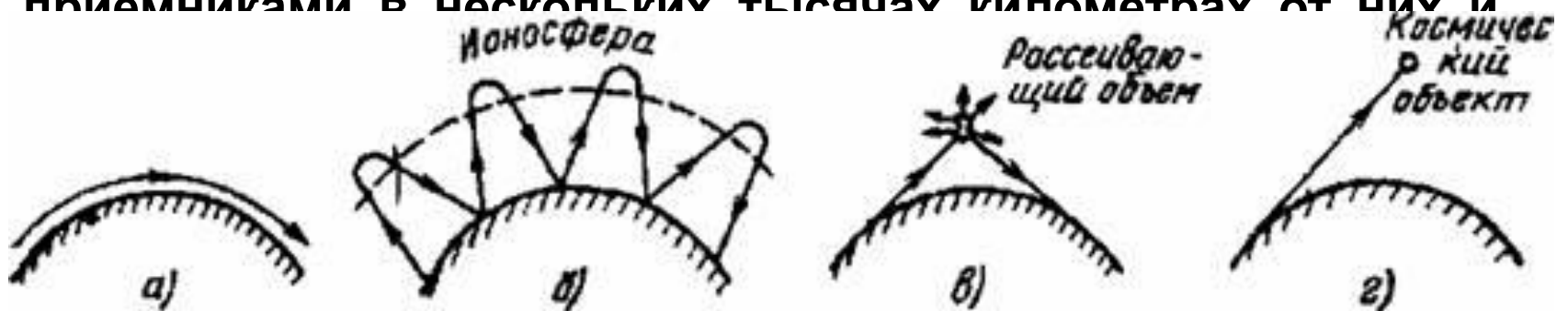
Земная атмосфера состоит из трех слоев. Первый слой, верхняя граница которого кончается в 10-12 км от поверхности Земли, называют тропосферой. Над ним, километров до 50 от поверхности Земли, второй слой - стратосфера. А выше, примерно до 400 км над Землей, простирается третий слой - ионосфера. Ионосфера играет решающую роль в распространении радиоволн, особенно коротких.

# Распространение радиоволн

- Антенны радиостанций излучают радиоволны как вдоль земной поверхности, так и вверх под различными углами к ней. Волны, идущие первым путем, называют земными или поверхностными, а вторым путем - пространственными. При приеме сигналов станций длинноволнового диапазона используется главным образом энергия поверхностных волн, которые хорошо огибают поверхность Земли. Но Земля, являясь проводником, поглощает энергию радиоволн. Поэтому по мере удаления от длинноволновой станции громкость приема ее передач постепенно падает и, наконец, прием совсем прекращается.
- Средние волны хуже огибают Землю и, кроме того, сильнее, чем длинные, поглощаются ею. Этим-то и объясняется меньшая "дальнобойность" средневолновых радиовещательных станций по сравнению с длинноволновыми.
- Так, например, сигналы радиостанции, работающей на волне длиной 300-400 м, могут быть приняты на расстоянии в два-три раза меньшем, чем сигнала станции такой же мощности, но работающей на волне длиной 1500-2000 м. Чтобы повысить дальность действия этих станций, приходится увеличивать их мощность.

# Распространение радиоволн

- В вечернее и ночное время передачи радиостанций длинноволнового и средневолнового диапазонов можно слышать на больших расстояниях, чем днем. Дело в том, что излучаемая вверх часть энергии радиоволн этих станций днем бесследно теряется в атмосфере. После же захода Солнца нижний слой ионосферы искривляет их путь так, что они возвращаются к Земле на таких расстояниях, на которых прием этих станций поверхностными волнами уже невозможен.
- Радиоволны коротковолнового диапазона сильно поглощаются Землей и плохо огибают ее поверхность. Поэтому уже в нескольких десятках километров от таких станций их поверхностные волны затухают. Но зато пространственные волны могут быть обнаружены приемниками в нескольких тысячах километров от них и



# Волны КВ диапазона

- Но короткие волны имеют и недостатки. Образуются зоны, где передачи коротковолновой станции не слышны. Их называют зонами молчания. Величина зоны молчания зависит от длины волны и состояния ионосферы, которое в свою очередь зависит от интенсивности солнечного излучения.
- Ультракороткие волны по своим свойствам наиболее близки к световым лучам. Они в основном распространяются прямолинейно и сильно поглощаются землей, растительным миром, различными сооружениями, предметами. Поэтому уверенный прием сигналов ультракоротковолновых станций поверхностной волной возможен главным образом тогда, когда между антеннами передатчика и приемника можно мысленно провести прямую линию, не встречающую по всей длине каких-либо препятствий в виде гор, возвышенностей, лесов. Ионосфера же для ультракоротких волн подобно стеклу для света - "прозрачна". Ультракороткие волны почти беспрепятственно проходят через нее. Поэтому-то этот диапазон волн используют для связи с искусственными спутниками Земли, космическими кораблями и между ними.
- Но наземная дальность действия даже мощной ультракоротковолновой станции не превышает, как правило, 100-200 км. Лишь путь наиболее длинных волн этого диапазона (8-9 м) несколько искривляется нижним слоем ионосферы, который как бы пригибает их к земле. Благодаря этому расстояние, на котором возможен прием ультракоротковолнового передатчика, может быть большим. Иногда, однако, передачи ультракоротковолновых станций слышны на расстояниях в сотни и тысячи километров от них.



# АМ с подавленной несущей

$$s(t) = s_M(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

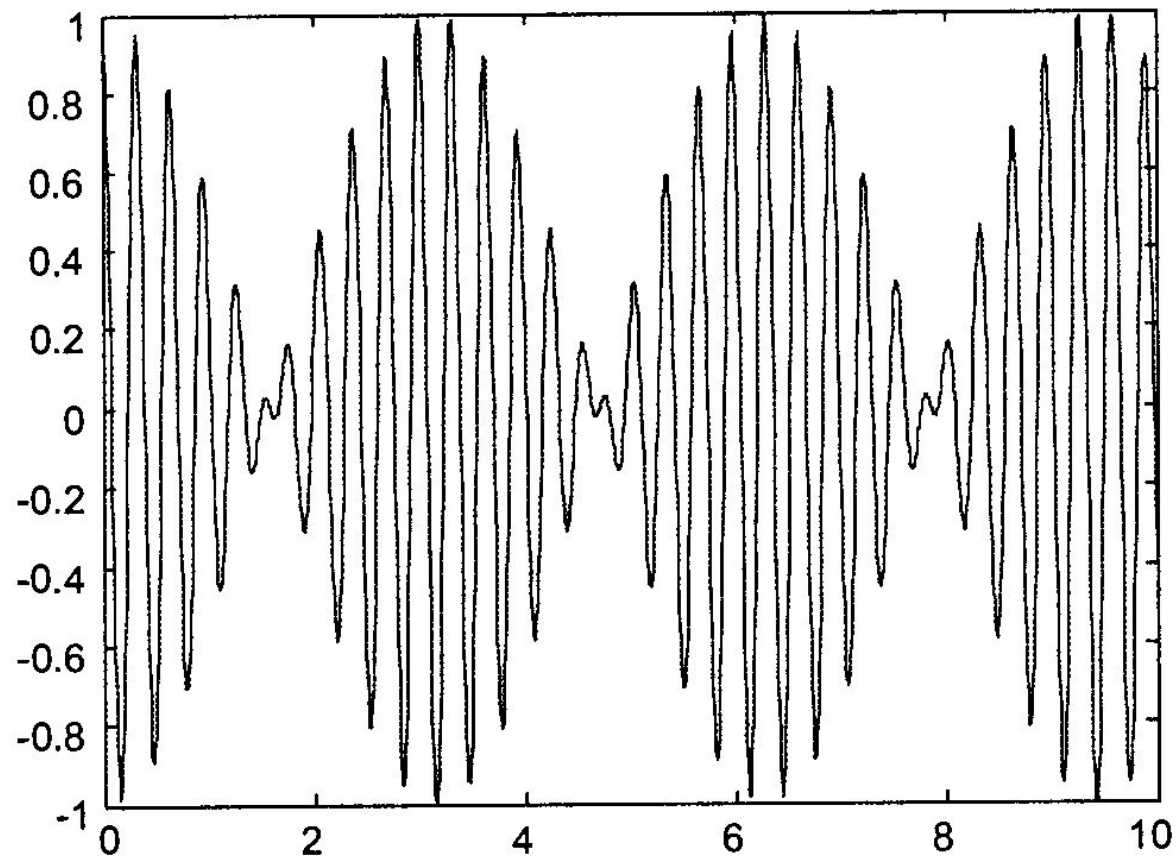
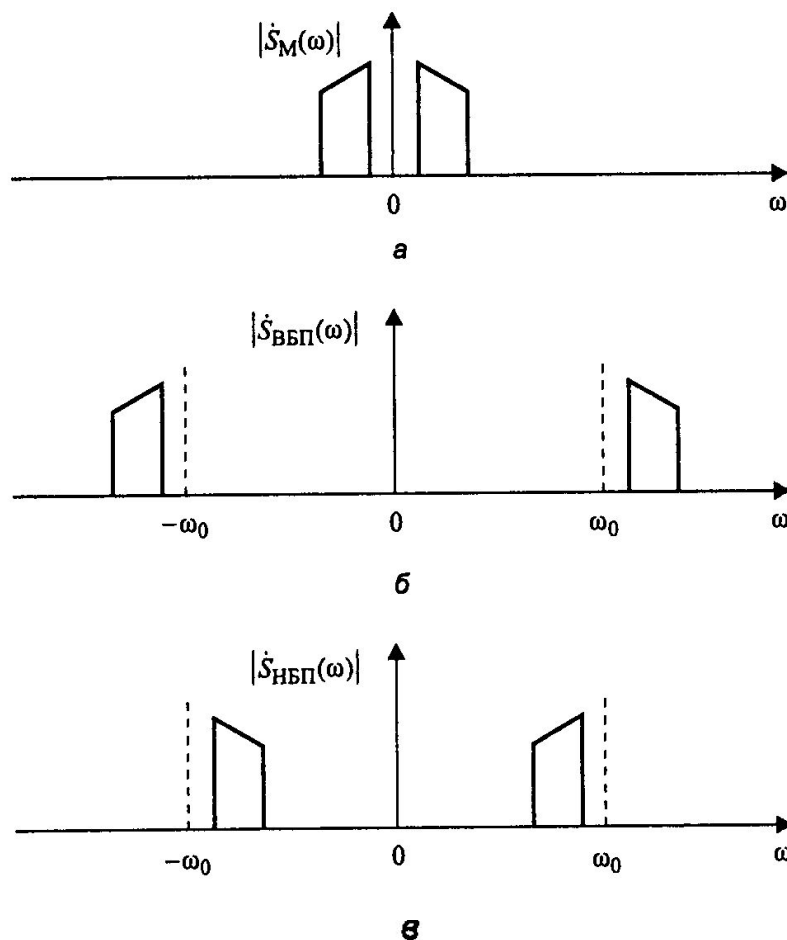


Рис. 8.12. Однотональная АМ с подавленной несущей

# Однополосная модуляция



**Рис. 8.13.** Однополосная модуляция: а — спектр модулирующего сигнала, б — спектр однополосного сигнала с верхней боковой полосой, в — то же с нижней боковой полосой

# Однополосная модуляция

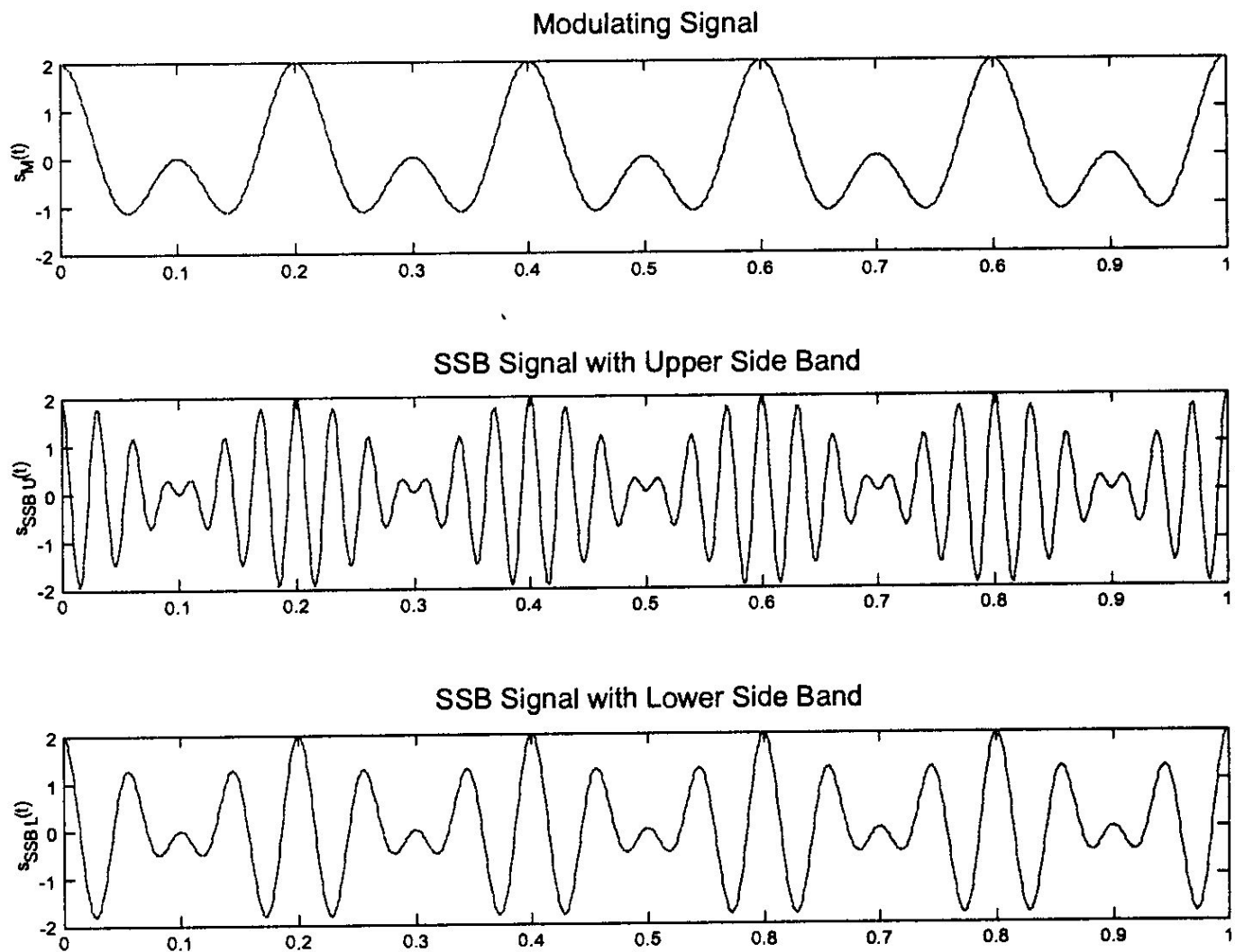


Рис. 8.14. Однополосная модуляция: сверху — модулирующий сигнал, в центре — сигнал с верхней боковой полосой, снизу — сигнал с нижней боковой полосой

# Угловая модуляция

## Фазовая модуляция

$$\varphi(t) = ks_M(t). \quad \text{- Начальная фаза}$$

$$s_{\text{ФМ}}(t) = A \cos(\omega_0 t + ks_M(t)).$$

$$\Psi(t) = \omega_0 t + ks_M(t). \quad \text{- фаза}$$

$$\omega(t) = \frac{d\Psi}{dt} = \omega_0 + k \frac{ds_M}{dt}. \quad \text{- Мгновенная частота}$$

Соответственно, полная фаза может быть найдена путем интегрирования мгновенной частоты:

$$\Psi(t) = \int \omega(t') dt'.$$

## Частотная модуляция

$$\omega(t) = \omega_0 + k s_M(t). \quad \text{- Мгновенная частота}$$

$$\Psi(t) = \omega_0 t + k \int s_M(t') dt' + \varphi_0. \quad \text{Полная фаза}$$

Здесь  $\varphi_0$  — произвольная постоянная интегрирования.

Наконец, сам ЧМ-сигнал имеет следующий вид:

$$s_{\text{ЧМ}}(t) = A \cos \left( \omega_0 t + k \int s_M(t') dt' + \varphi_0 \right).$$

Как видим, начальная фаза колебания при частотной модуляции претерпевает изменения, пропорциональные интегралу от модулирующего сигнала:

$$\varphi(t) = k \int s_M(t') dt' + \varphi_0.$$

Из сказанного можно сделать несколько выводов:

1. По форме колебания с угловой модуляцией нельзя определить, ФМ это или ЧМ. Для этого необходимо знать еще и модулирующий сигнал.
2. Если пропустить модулирующий сигнал через идеальное *дифференцирующее* устройство, а затем подать его на *частотный* модулятор, получится *фазовая* модуляция (верхняя ветвь на рис. 8.19).
3. Если пропустить модулирующий сигнал через идеальное *интегрирующее* устройство, а затем подать его на *фазовый* модулятор, получится *частотная* модуляция (нижняя ветвь на рис. 8.19).

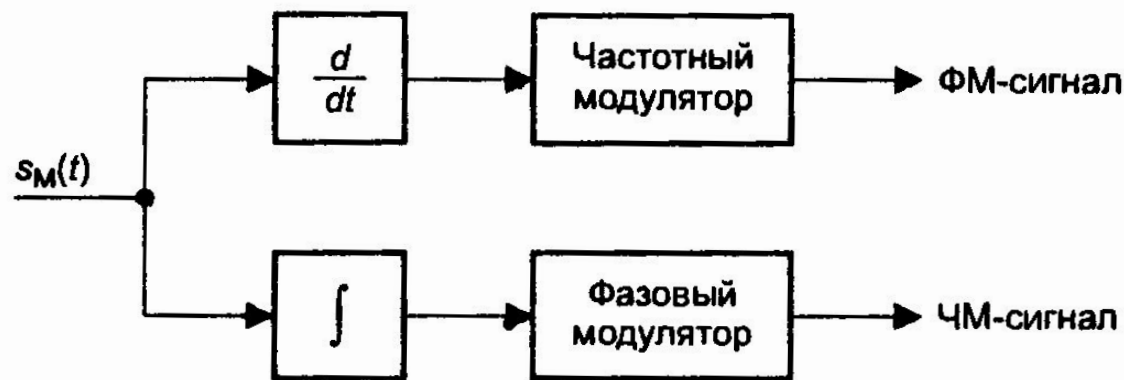


Рис. 8.19. Взаимосвязь фазовой и частотной модуляции

# Гармоническая угловая модуляция

Аналогично тому, как мы это делали для амплитудной модуляции, рассмотрим случай гармонического модулирующего сигнала. Начальная фаза колебания изменяется при этом по гармоническому закону:

$$\varphi(t) = \beta \sin(\Omega t).$$

Коэффициент  $\beta$  называется *индексом угловой модуляции* (modulation index). Он определяет интенсивность колебаний начальной фазы.

Полная фаза получится путем добавления линейного слагаемого  $\omega_0 t$ :

$$\Psi(t) = \omega_0 t + \beta \sin(\Omega t).$$

Наконец, сам сигнал с гармонической УМ:

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \beta \sin(\Omega t)).$$

Как уже говорилось, при изменении начальной фазы изменяется и мгновенная частота:

$$\omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \omega_0 + \beta\Omega \cos(\Omega t).$$

# Спектр сигнала с гармонической угловой модуляцией

В данном разделе мы сначала получим точное выражение для спектра радиосигнала с гармонической УМ, а затем рассмотрим его приближенный вариант, справедливый для малых индексов модуляции ( $\beta \ll 1$ ).

Для расчета спектрального представления сигнала с гармонической УМ мы прежде всего представим сигнал в виде вещественной части комплексной экспоненты:

$$\begin{aligned} s_{\text{УМ}}(t) &= \operatorname{Re} (A \exp(j\omega_0 t + j\varphi_0 + j\beta \sin(\Omega t + \Phi_0))) = \\ &= \operatorname{Re} (A \exp(j\omega_0 t + j\varphi_0) \exp(j\beta \sin(\Omega t + \Phi_0))). \end{aligned}$$



Теперь воспользуемся представлением выражения  $\exp(j\beta \sin x)$  в виде ряда Фурье:

$$\exp(j\beta \sin x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \exp(jkx). \quad (8.9)$$

Здесь  $J_k(\beta)$  — функция Бесселя 1-го рода порядка  $k$  от аргумента  $\beta$ .

Используя представление (8.9), можно записать

$$\begin{aligned} s_{yM}(t) &= \operatorname{Re} \left( A \exp(j\omega_0 t + j\varphi_0) \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \exp(jk(\Omega t + \Phi_0)) \right) = \\ &= A \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \cos((\omega_0 + k\Omega)t + \varphi_0 + k\Phi_0). \end{aligned}$$

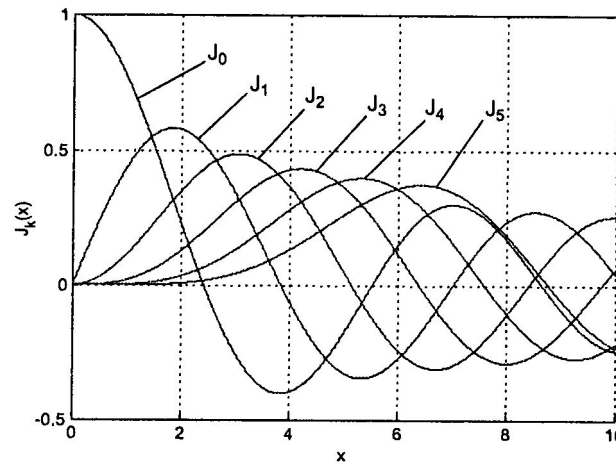
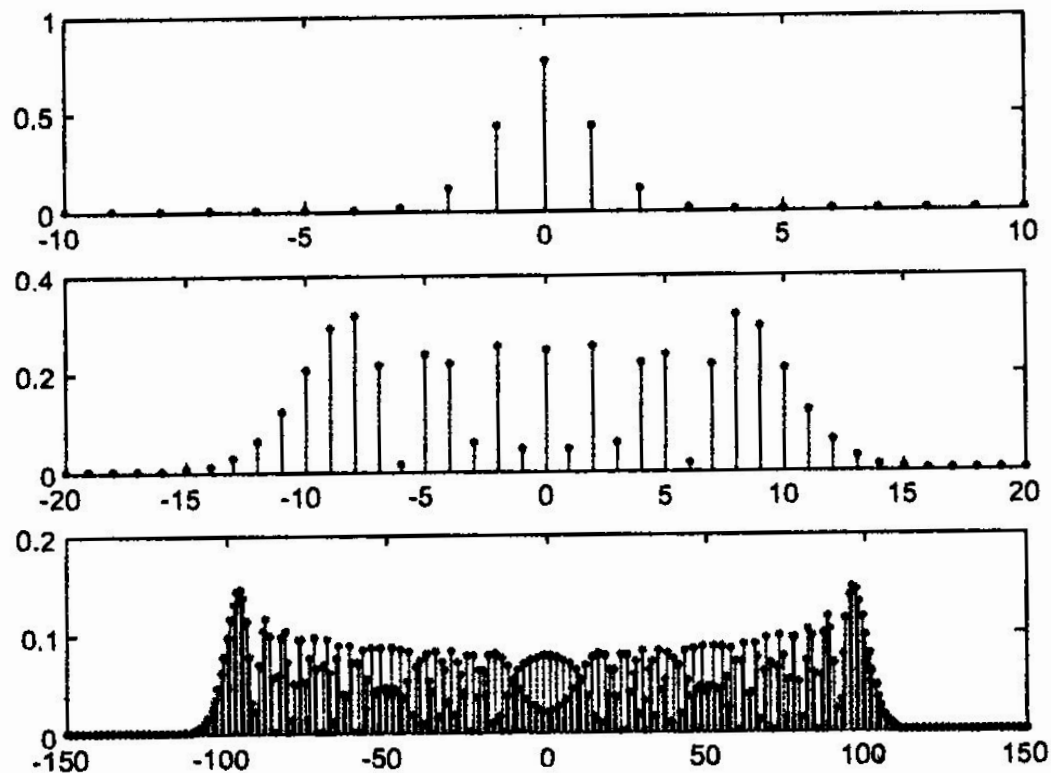


Рис. 8.21. Функции Бесселя

## Спектр сигнала с гармонической угловой модуляцией



**Рис. 8.22.** Амплитудный спектр сигнала с гармонической УМ при индексе модуляции, равном 1 (сверху), 10 (в центре) и 100 (снизу)

Теперь приближенно рассмотрим частный случай малого индекса модуляции ( $\beta \ll 1$ ). Начнем с того, что применим к сигналу с гармонической УМ тригонометрические преобразования, чтобы раскрыть косинус суммы:

$$s_{\text{УМ}}(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\beta \sin(\Omega t + \Phi_0)) - \\ - A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\beta \sin(\Omega t + \Phi_0)).$$

Поскольку мы считаем, что  $\beta \ll 1$ , можно приближенно принять, что

$$\cos(\beta \sin(\Omega t + \Phi_0)) \approx 1,$$

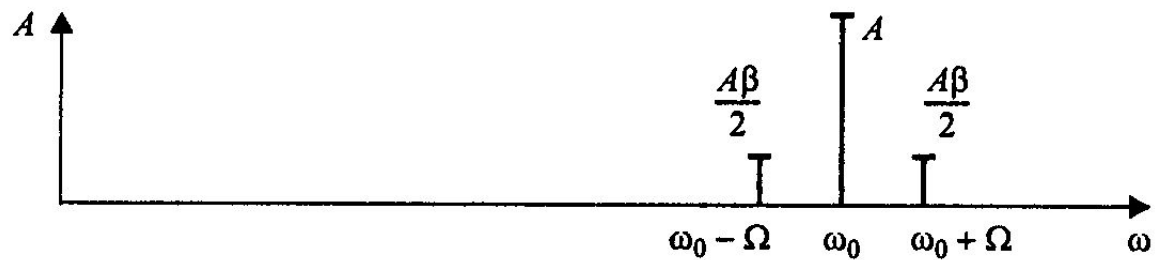
$$\sin(\beta \sin(\Omega t + \Phi_0)) \approx \beta \sin(\Omega t + \Phi_0).$$

С учетом этого

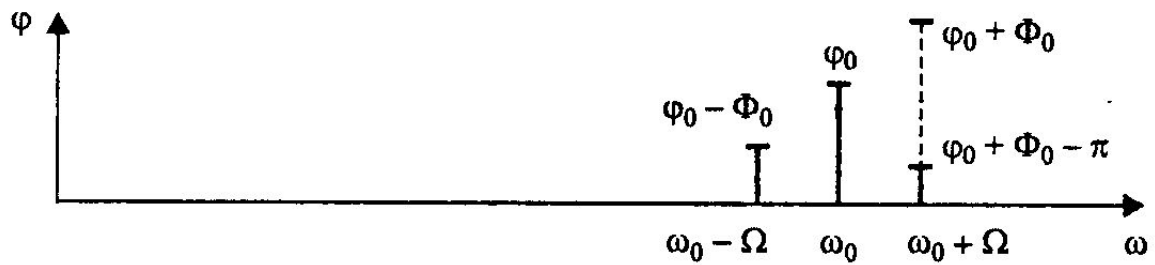
$$s_{\text{УМ}}(t) \approx A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \beta \sin(\Omega t + \Phi_0).$$

Остается представить последнее слагаемое в виде полуразности косинусов:

$$s_{\text{УМ}}(t) \approx A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{A\beta}{2} \cos((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \Phi_0) + \\ + \frac{A\beta}{2} \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \Phi_0).$$



а



б

Рис. 8.23. Амплитудный и фазовый спектры сигнала с гармонической УМ при  $\beta \ll 1$

# Демодуляция УМ

Еще одной альтернативой, пригодной для реализации в реальном масштабе времени, является *квадратурная обработка*. При этом входной сигнал умножается на два опорных колебания, сдвиг по фазе между которыми составляет  $90^\circ$ :

$$\begin{aligned}y_I(t) &= s_{\text{УМ}}(t) \cos \omega_0 t = A \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \cos \omega_0 t = \\ &= \frac{A}{2} \cos \varphi(t) + \frac{A}{2} \cos(2\omega_0 t + \varphi(t)),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}y_Q(t) &= s_{\text{УМ}}(t) \sin \omega_0 t = A \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \sin \omega_0 t = \\ &= -\frac{A}{2} \sin \varphi(t) + \frac{A}{2} \sin(2\omega_0 t + \varphi(t)).\end{aligned}$$

Каждый из результатов умножения содержит два слагаемых. Одно из них — низкочастотное (косинус или синус начальной фазы), другое — высокочастотное (УМ-сигнал с несущей частотой  $2\omega_0$ ). Низкочастотные составляющие выделяются с помощью ФНЧ:

$$y'_I(t) = A/2 \cos \varphi(t),$$

$$y'_Q(t) = -A/2 \sin \varphi(t).$$

Дальнейшие действия, так же как и раньше, зависят от вида угловой модуляции. Для демодуляции ФМ нам необходимо вычислить фазу полученной пары квадратурных составляющих:

$$\begin{aligned} x_{\text{ФМ}}(t) &= -\arg(y'_I(t) + jy'_Q(t)) = \\ &= -\arg\left(\frac{A}{2} \cos \varphi(t) - j\frac{A}{2} \sin \varphi(t)\right) = -\arg\left(\frac{A}{2} \exp(-j\varphi(t))\right) = \varphi(t). \end{aligned}$$

Для демодуляции ЧМ полученную фазовую функцию необходимо продифференцировать:

$$\begin{aligned} x_{\text{ЧМ}}(t) &= \frac{dx_{\text{ФМ}}}{dt} = -\frac{d}{dt} \arg(y'_I(t) + jy'_Q(t)) = \\ &= -\frac{d}{dt} \operatorname{arctg} \frac{y'_Q(t)}{y'_I(t)} = \frac{\frac{dy'_I}{dt} y'_Q(t) - \frac{dy'_Q}{dt} y'_I(t)}{y'^2_I(t) + y'^2_Q(t)}. \end{aligned}$$

## Квадратурная модуляция

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)).$$

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t) \cos \varphi(t) - A(t) \sin(\omega_0 t) \sin \varphi(t).$$

$$s(t) = a(t) \cos(\omega_0 t) + b(t) \sin(\omega_0 t).$$

Такое представление рассматриваемого сигнала называется *квадратурным* (quadrature), а данный способ модуляции — *квадратурной модуляцией* (КАМ, английский термин — quadrature amplitude modulation, QAM). Модулирующие сигналы при этом оказываются совершенно равноправными.

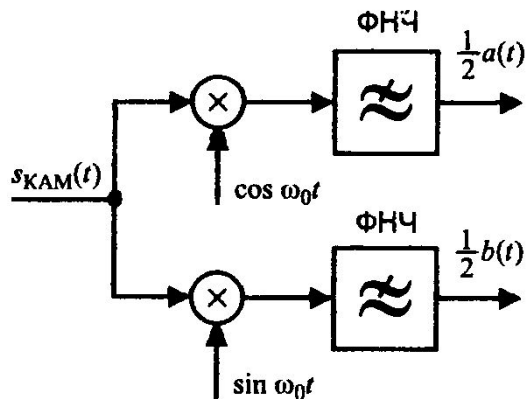
# Демодуляция сигнала с квадратурной модуляцией

$$y_I(t) = s_{\text{КАМ}}(t) \cos \omega_0 t = (a(t) \cos \omega_0 t + b(t) \sin \omega_0 t) \cos \omega_0 t =$$

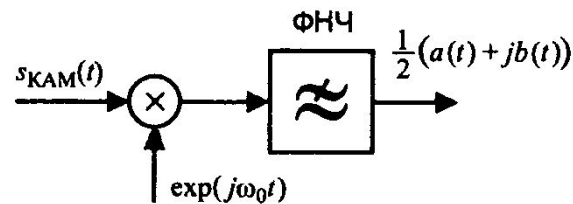
$$= \frac{1}{2} a(t) + \frac{1}{2} a(t) \cos 2\omega_0 t + \frac{1}{2} b(t) \sin 2\omega_0 t,$$

$$y_Q(t) = s_{\text{КАМ}}(t) \sin \omega_0 t = (a(t) \cos \omega_0 t + b(t) \sin \omega_0 t) \sin \omega_0 t =$$

$$= \frac{1}{2} b(t) + \frac{1}{2} a(t) \sin 2\omega_0 t - \frac{1}{2} b(t) \cos 2\omega_0 t.$$



а

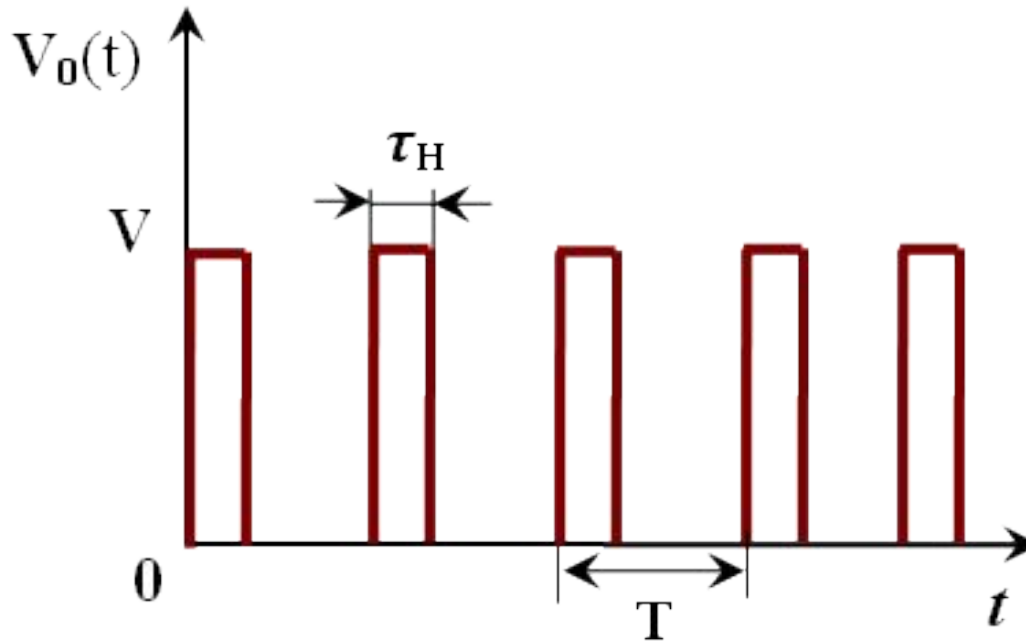


б

Рис. 8.28. Демодуляция КАМ-сигнала в вещественном (а) и комплексном (б) представлении

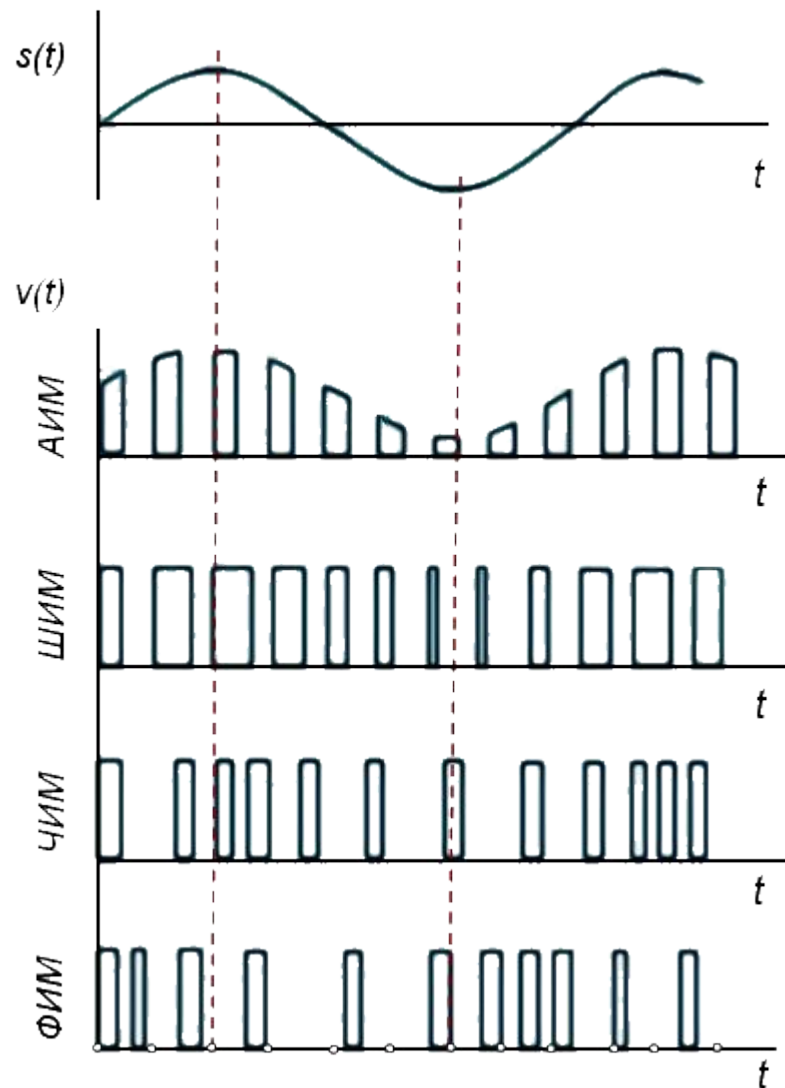


## Способы модуляции, используемые при передаче цифровой информации



Последовательность прямоугольных импульсов одного знака  $u_0(t)$  характеризуется параметрами (рис.1): амплитудой импульсов  $V$ ; длительностью (шириной) импульсов  $\tau_H$ ; частотой следования (или тактовой частотой)  $f_T=1/T$ , где  $T$  — период следования импульсов ( $\omega_T=2\pi f_T$ ); положением (фазой) импульсов относительно тактовых (отсчетных) точек. Отношение  $T/\tau_H$  называется **скважностью** импульса.

В зависимости от того, какой параметр модулируется первичным сигналом  $s(t)$ , различают: **амплитудно-импульсную** модуляцию (АИМ), когда по закону передаваемого сигнала изменяется амплитуда импульсов; **широтно-импульсную** модуляцию (ШИМ), когда по закону передаваемого сигнала изменяется ширина импульсов; **частотно-импульсную** модуляцию (ЧИМ) когда по закону передаваемого сигнала изменяется частота следования импульсов; **фазо-импульсную** модуляцию (ФИМ) когда по закону передаваемого сигнала изменяется фаза импульсов, т.е. временное положение относительно тактовых точек. Модуляцию ФИМ и ЧИМ объединяют во **время-импульсную** (ВИМ). Между ними существует связь, аналогичная связи между фазовой и частотной модуляцией синусоидального колебания.



В качестве примера на рис.3 показан спектр АИМ сигнала при модуляции импульсной последовательности сложным первичным сигналом  $s(t)$  с полосой частот от 0 до  $\Omega$ . Он содержит спектр исходного сигнала  $s(t)$ , все гармоники тактовой частоты  $\omega_T$  (т.е. частоты  $2\omega_T$ ,  $3\omega_T$ ,  $4\omega_T$  и т.д.) и боковые полосы частот около гармоник тактовой частоты.

