

1. Временные и спектральные характеристики аналоговых методов модуляции.

Амплитудная модуляция гармонической несущей

Амплитудная модуляция – процесс изменения мгновенной амплитуды несущего колебания по закону изменения непрерывного информационного сигнала.

Амплитудная модуляция гармоническим колебанием. В простейшем случае модулирующий сигнал является гармоническим колебанием с частотой $\Omega \ll \omega_0$ и начальной фазой Ψ . При этом выражение:

$$S_{AM}(s_c, t) = A_0 [1 + m_{AM} \cos(\Omega t + \Psi)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

представляет собой аналитическое выражение однотонового АМ сигнала, представленного на рисунке 1.

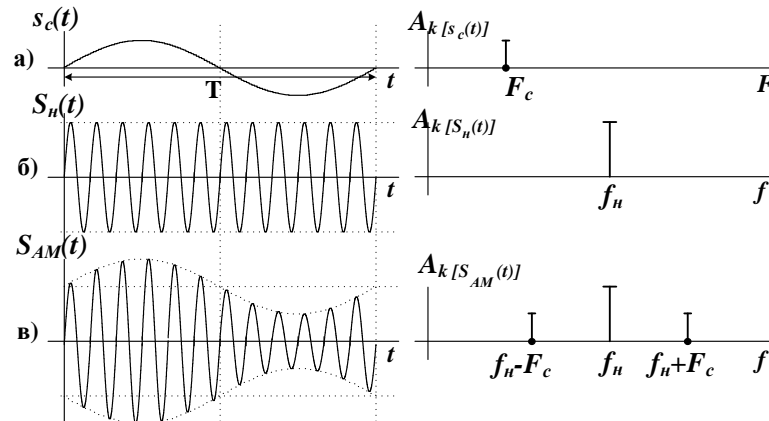


Рис. 1. Временные и спектральные диаграммы процесса формирования АМ гармонического колебания

Однотоновый АМ сигнал можно представить в виде суммы гармонических составляющих:

$$S_{AM}(s_c, t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0 m_{AM}}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \Psi] + \frac{A_0 m_{AM}}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \Psi] \quad (2)$$

Из (2) следует, что в однотоновом АМ сигнале имеется три гармонических спектральных составляющих с частотами: ω_0 – несущей; $\omega_0 + \Omega$ – верхней боковой; $\omega_0 - \Omega$ – нижней боковой.

Спектральная диаграмма однотонового АМ сигнала, построенная по (2), симметрична относительно несущей частоты ω_0 (рис. 1, в). Амплитуды боковых колебаний одинаковы и не превышают половины амплитуды несущего колебания A_0 .

Методы угловой модуляции

Принципы частотной и фазовой (угловой) модуляции

Фазовая модуляция – процесс изменения мгновенной фазы несущего колебания по закону изменения непрерывного информационного сигнала.

Если модуляция осуществляется гармоническим колебанием $s_c(t) = A_{0\Omega} \cos \Omega t$ (тональная модуляция), то:

$$S_{\Phi M}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + a A_{0\Omega} \cos \Omega t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + m_{\Phi M} \cos \Omega t),$$

где Ω – частота модулирующего колебания.

Между мгновенной фазой $\varphi(t)$ и мгновенной частотой $\omega(t)$ имеют место соотношения:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}; \quad \varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (3)$$

Из этих соотношений следует, что изменение фазы колебания по закону $\varphi(t)$ вызывает изменение мгновенной частоты по закону производной от $\varphi(t)$, а изменение мгновенной частоты по

закону $\omega(t)$ приводит к изменению фазы по закону интеграла от $\omega(t)$.

На рис. 2 показано, как изменяются мгновенная частота, фаза при тональной фазовой и частотной модуляциях и вид модулированных колебаний. Для случая ФМ:

а) информационный сигнал $s_c(t) = A_{0\Omega} \cos \Omega t$;

б) несущее колебание частоты $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ($\varphi_0 = 0$);

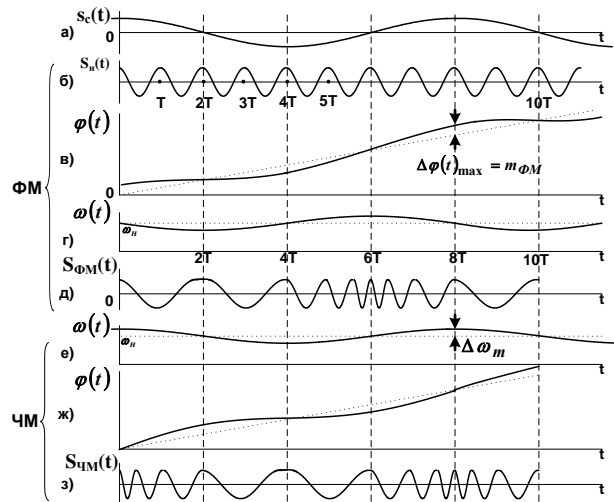


Рис. 2. Временные диаграммы процесса формирования ФМ и ЧМ сигналов

в) закон изменения мгновенной фазы несущего колебания $\varphi(t) = \omega_0 t + a s_c(t)$ при этом на линейное изменение фазы (пунктир на рисунке) накладывается переменное приращение $\Delta\varphi(t) = a s_c(t)$ повторяющее закон изменения $s_c(t)$;

г) закон изменения мгновенной частоты несущего колебания, после дифференцирования:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(\omega_0 t + a A_{0\Omega} \cos \Omega t) = \omega_0 - a A_{0\Omega} \sin \Omega t;$$

д) фазомодулированное колебание $S_{\Phi M}(t)$, которое построено на основании графика $\omega(t)$, в моменты времени $t = 2T$ и $t = 10T$ колебание $S_{\Phi M}(t)$ имеет минимальную, а в момент $t = 6T$ максимальную мгновенную частоту.

Частотная модуляция – процесс изменения мгновенной частоты несущего колебания по закону изменения непрерывного информационного сигнала.

Учитывая, что $\omega(t)$ связано с $\varphi(t)$ соотношением (3), аналитическое выражение для тональной модуляции формула принимает вид:

$$S_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + m_{\text{ЧМ}} \sin \Omega t). \quad (4)$$

Временные диаграммы для тональной частотной модуляции приведены на рис. 2:

е) закон изменения мгновенной частоты $\omega(t) = \omega_0 + a A_{0\Omega} \cos \Omega t$, повторяющий закон изменения $s_c(t)$;

ж) закон изменения мгновенной фазы, после интегрирования $\varphi(t) = \omega_0 t + m_{\text{ЧМ}} \sin \Omega t$;

з) колебание $S_{\text{ЧМ}}(t)$, построенное в соответствии с графиком $\omega(t)$; в моменты времени $t = 0$, $t = 8T$ мгновенная частота максимальна, в момент $t = 4T$ – минимальна.

Сравнение выражений (4) и (5) показывает, что при ФМ приращение фазы пропорционально модулирующему колебанию $s_c(t)$, при ЧМ интегралу от $s_c(t)$. Если сначала проинтегрировать $s_c(t)$, а затем этим колебанием модулировать несущую по фазе, то получится ЧМ сигнал. Такой способ формирования ЧМ сигнал применяется практически. Подобным же образом, если продифференцировать $s_c(t)$ и это колебание использовать для модуляции частоты, то получится ФМ сигнал.

Сигналы с угловой модуляцией, как и при АМ, могут быть представлены в виде суммы гармонических колебаний.

Спектр для однотоновой угловой модуляции является сложным.

$$S_{qM}(t) = A_0 J_0(m) \cos(\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{\infty} A_0 J_k(m) \cos(\omega_0 + k\Omega)t + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k A_0 J_k(m) \cos(\omega_0 - k\Omega)t \quad (5)$$

где $J_k(m)$ – функция Бесселя k -го порядка от аргумента m .

В (7) первый член – гармоническая составляющая с частотой несущей, средняя группа гармонических составляющих с частотами $(\omega_0 + k\Omega)$ является верхней боковой полосой частот, третья группа составляющих с частотами $(\omega_0 - k\Omega)$ представляет нижнюю боковую полосу частот. Число верхних и нижних боковых частот теоретически бесконечно. Боковые гармонические колебания расположены симметрично относительно ω_0 на расстоянии Ω . Амплитуды всех компонент спектра, в том числе и с частотой ω_0 , пропорциональны $J_k(m)$.

2. Временные и спектральные характеристики дискретных методов модуляции.

Амплитудной манипуляцией (АМн) называется процесс изменения амплитуды несущего (высокочастотного, манипулируемого) колебания в соответствии с законом изменения амплитуды дискретного информационного (первичного электрического, манипулирующего) сигнала.

Амплитудно-манипулированный сигнал имеет вид последовательности радиоимпульсов (отрезков гармонических колебаний) с прямоугольной огибающей (рис. 3, в), а их единичные элементы с длительностью τ_{II} единичных интервалов, соответствующих символам кодовой комбинации (1 и 0 или +1 и -1) преобразовываются в вид:

$$S_{AMn}(t) = \frac{1}{2} A_m \cdot [1 + x_c(t)] \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_0), \quad (6)$$

где: $x_c(t)$ – нормированная функция, повторяющая закон изменения $S_c(t)$ (рис. 3, а) и принимающая значения ± 1 .

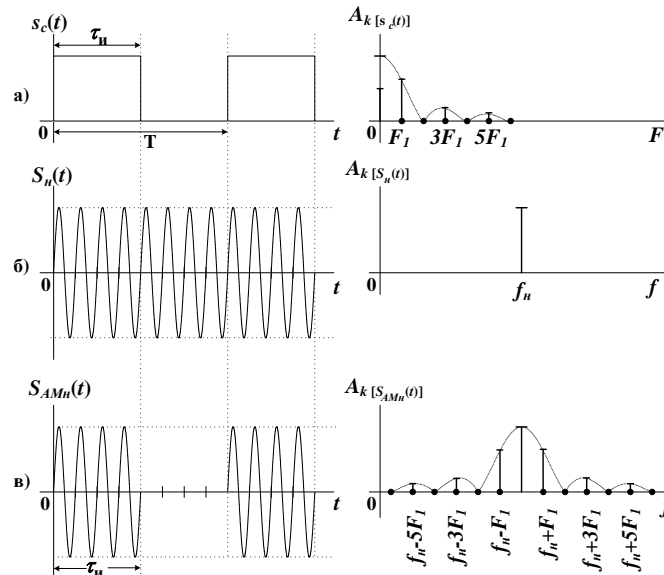


Рис. 3. Временные и спектральные характеристики формирования АМн сигнала

Спектральный состав периодической последовательности АМн сигналов определяется выражением:

$$S_{AMn}(t) = \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(k 2\pi F_1 t) \right] \cdot \cos(2\pi f_n t) = \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \cdot \cos(2\pi f_n t) + \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_u)}{k\pi F_1 \tau_u} \right| \times [\cos(f_n + kF_1)2\pi + \cos(f_n - kF_1)2\pi] \quad (7)$$

Спектр модулированного сигнала содержит в своем составе:

составляющую с амплитудой $\frac{A_m \cdot \tau_u}{T}$ на несущей частоте f_n ;

две симметричные боковые полосы с частотами составляющих $(f_n + kF_1)$; $(f_n - kF_1)$ и амплитудами $\frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \cdot \left| \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_u)}{k\pi F_1 \tau_u} \right|$.

Для периодических сигналов – спектр дискретный, а при случайном следовании кодовых символов (непериодических сигналов) – спектр становится сплошным.

Частотной манипуляцией (ЧМн) называется процесс изменения частоты несущего колебания в соответствии с законом изменения амплитуды дискретного информационного сигнала.

Общий вид ЧМн можно представить в виде суммы 2-х АМн сигналов с разными несущими частотами f_1 и f_2 : $S_{ЧМн}(t) = S_{АМн}^1(t) + S_{АМн}^2(t)$.

Это представление позволяет и спектр колебания $S_{ЧМн}(t)$ найти как результат наложения двух спектров колебаний АМн, который будет иметь вид:

$$S_{ЧМн}(t) = \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \cdot \cos(2\pi f_1 t) + A_m \cdot \left(1 - \frac{\tau_u}{T}\right) \cdot \cos(2\pi f_2 t) + \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_u)}{k\pi F_1 \tau_u} \times \\ \times [\cos(f_1 + kF_1)2\pi + \cos(f_1 - kF_1)2\pi - \cos(f_2 + kF_1)2\pi - \cos(f_2 - kF_1)2\pi]$$

Первое слагаемое определяет составляющую на частоте f_1 , второе слагаемое определяет составляющую на частоте f_2 , а перед знаком суммы, составляющие для частот f_1 и f_2 . Формирование сигнала ЧМн показано на рисунке 4.

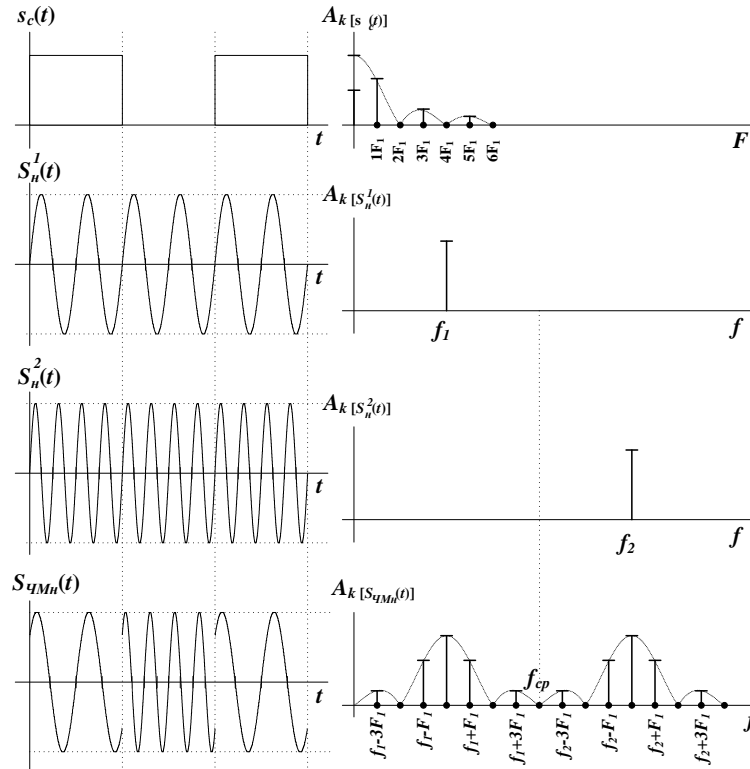


Рис. 4. Временные и спектральные характеристики формирования ЧМн сигнала с разрывом фазы

Фазовой манипуляцией (ФМн) называется процесс изменения фазы несущего колебания в соответствии с законом изменения амплитуды дискретного информационного сигнала.

Наиболее простой является бинарная ФМн, при которой изменение фазы несущего колебания происходит скачком в значащие моменты первичного сигнала (рис. 5, а) на 0 или 180° , при этом его амплитуда и частота остаются неизменными.

ФМн сигнал имеет вид последовательности радиоимпульсов (отрезков гармонических колебаний) с прямоугольной огибающей (рис. 5, в):

$$S_{ФМн} = A_m \cdot \cos[\omega_n t + (1 + x_c(t)) \cdot \Delta\varphi_m],$$

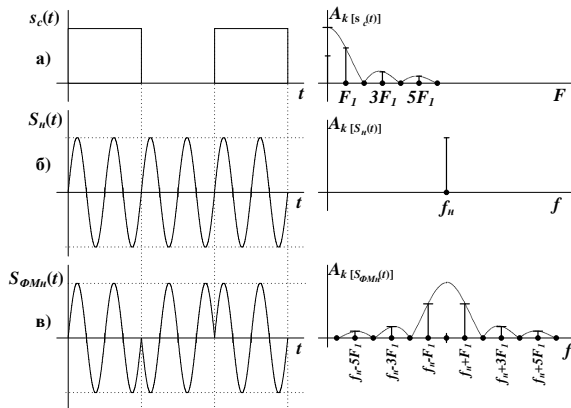


Рис. 5. Временные и спектральные характеристики формирования ФМн сигнала

где: $x_c(t)$ – нормированная функция, повторяющая закон изменения информационного сигнала (рис. 5, а),

$\Delta\varphi_m$ – девиация фазы (максимальное отклонение фазы от начальной).

Величина $\Delta\varphi_m$ может быть любой, однако, для лучшего различения этих двух сигналов на приеме необходимо, чтобы они максимально отличались друг от друга по фазе, т.е. на 180° , это возможно при $\Delta\varphi_m = \pi/2$.

Таким образом, одни из ФМн колебаний будут синфазны с колебаниями несущей, а другие

противоположны по фазе на 180° .

Такой сигнал можно представить в виде суммы двух АМн сигналов, с противофазными несущими 0° и 180° : $S_{\Phi M_n}(t) = S_{AM_n}^1(t) + S_{AM_n}^2(t)$.

Тогда очевидно и спектр колебания ФМн находится суммированием спектров колебаний $S_{AM_n}^1(t)$ и $S_{AM_n}^2(t)$:

$$S_{\Phi M_n}(t) = A_m \left(\frac{2\tau_u}{T} - 1 \right) \cdot \cos(2\pi f_n t) + 2A_m \frac{\tau_u}{T} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_u)}{(k\pi F_1 \tau_u)} \times [\cos(f_n + kF_1)2\pi + \cos(f_n - kF_1)2\pi] \quad (8)$$

Анализ спектров сигналов ФМн (рис. 6) при различных значениях $\Delta\varphi_m$ показывает, что при

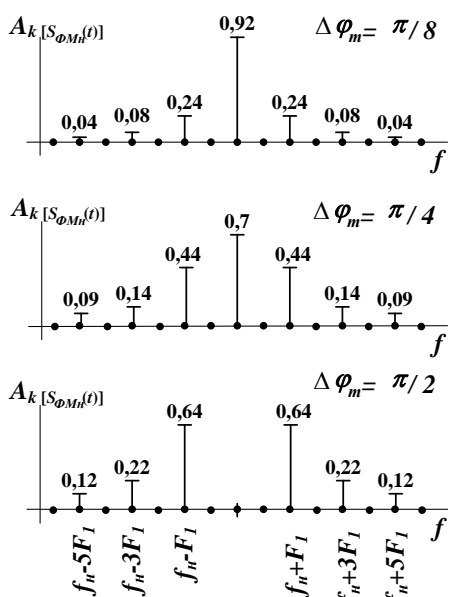


Рис. 6. Спектры сигналов фазовой манипуляции при различных значениях девиации фазы

изменении $\Delta\varphi_m$ от 0 до $\pi/2$ происходит перераспределение энергии сигнала между несущим колебанием и боковыми составляющими, а при $\Delta\varphi_m = \pi/2$ вся энергия сигнала содержится только в боковых полосах.

Из рисунка 6 видно, что спектр амплитуд ФМн сигнала содержит те же составляющие, что и спектр АМн сигнала, а для скважности $\left(\frac{T}{\tau_H} = 2 \right)$ составляющая на несущей частоте отсутствует. Амплитуды боковых составляющих ФМн сигнала в 2 раза больше, чем АМн сигнала.

При ФМн начальная фаза является информационным параметром, и в алгоритмах работы фазового демодулятора с целью получения сведений о начальной фазе должны формироваться и храниться образцы вариантов передаваемого сигнала, достаточно точно совпадающие с ним по частоте и начальной фазе, данная задача решена в технике связи. Но на приеме нет признаков по которым можно точно установить однозначное соответствие между переданными двоичными

символами и образцами сигнала на входе демодулятора, в результате возможно явление «обратной работы».

Неопределенность начальной фазы объясняется с одной стороны тем, что вследствие преобразований сигнала в канале связи к переданной фазе добавляется произвольный и неизвестный фазовый сдвиг, и с другой стороны, тем что фаза сигнала всегда приводится к интервалу 2π и сигналы, различающиеся по фазе на 2π , в приемнике не различимы.

Данное свойство неоднозначности решения характерно именно для ФМн. При АМн сигнал, прошедший канал связи, также отличается от переданного, однако если на выходе модулятора сигналу с большей амплитудой соответствовал некоторый двоичный символ, то и на входе демодулятора варианту сигнала с большей амплитудой будет соответствовать тот же самый символ –

неоднозначность не имеет места. При ЧМн так же, если одна из двух частот больше другой на выходе модулятора, то после всех преобразований в канале она останется больше и на входе демодулятора – перепутывание вариантов сигнала невозможно.