

## МЕТОДЫ МОДУЛЯЦИИ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

В известных публикациях показана возможность формирования шумовых сигналов, модулированных по амплитуде, частоте и фазе [1; 2], но не указаны методы приема и обработки таких сигналов с целью извлечения полезной информации. Частотная модуляция широкополосных шумовых сигналов [1] сталкивается с трудностями принципиального характера, так как для ее реализации необходимы генераторы шума с перестраиваемой в широких пределах центральной частотой спектра при сохранении неизменной ширины спектра сигнала.

В работе [3] приведен метод фазовой манипуляции шумовых сигналов и оценена помехоустойчивость автокорреляционного приема фазоманипулированных шумовых сигналов. Однако вопросы автокорреляционного приема шумовых сигналов, модулированных по амплитуде и фазе непрерывно, мало изучены.

Представляется целесообразным проанализировать возможные методы формирования амплитудно-модулированных и фазомодулированных шумовых сигналов и оценить помехоустойчивость метода автокорреляционного приема этих сигналов.

*Амплитудная модуляция (АМ).* При модуляции шумового сигнала по амплитуде в соответствии с модулирующей функцией изменяется средняя мощность сигнала. В этом случае соотношение для напряжения сигнала можно записать следующим образом:

$$u_c(t) = \sqrt{\bar{P}_{сн} [1 - m_c(t)]} \xi_c(t) \cos [\omega_0 t + \Phi(t)], \quad (1)$$

где  $\xi_c(t)$  — нормированная случайная амплитуда сигнала,  $\xi_c(t) = V(t)/\sqrt{\bar{P}_{сн}}$ ;  $V(t)$  — случайная амплитуда сигнала;  $\bar{P}_{сн}$  — средняя мощность несущего колебания;  $m_c(t)$  — модулирующая функция,  $m_c(t) = k_m u_m(t)$ ;  $k_m$  — коэффициент глубины модуляции;  $u_m(t)$  — передаваемое сообщение. Обозначим  $\sqrt{1 - m_c(t)} = \mu(t)$  и назовем  $\mu(t)$  модуляционным параметром, то получим соотношение (1)

$$u_c(t) = \mu(t) V(t) \cos [\omega_0 t + \Phi(t)]. \quad (2)$$

На рис. 1 представлены структурные схемы приемопередающих устройств, позволяющих реализовать амплитудную модуляцию

шумовой несущей с последующей ее демодуляцией в автокорреляционном приемнике (ПРМ). АМ можно осуществить двумя способами. Первый (рис. 1, а) заключается в том, что шумовая несущая на выходе генератора шума (ГШ) модулируется по амплитуде в модуляторе (М) информационным сигналом, затем происходит деление сигнала по мощности пополам с последующей задержкой одной составляющей сигнала на время  $\tau_1$  и сложение обеих составляющих шумового сигнала в сумматоре. С помощью второго способа шумовая несущая сначала делится по мощности пополам, затем одна составляющая модулируется по амплитуде, а вторая задерживается

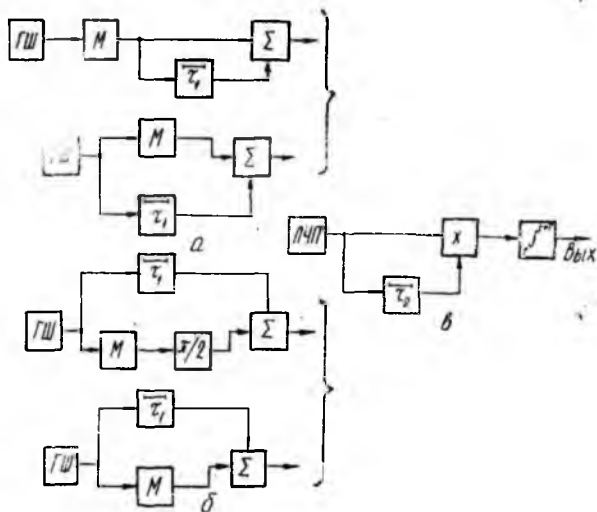


Рис. 1

на время  $\tau_1$ , после чего они складываются в сумматоре (рис. 1, а), нижний. Приемное устройство, демодулирующее сигнал, для обоих способов модуляции остается одним и тем же (рис. 1, б).

В линейной части приемника (ЛЧП) сигнал усиливается и преобразуется по частоте, суммируется с шумами ПРМ. Далее смесь сигнала и шума делится по мощности пополам, и две составляющие смеси сигнала и шума (задержанная и незадержанная) поступают на два входа перемножителя автокоррелятора. Шумовые компоненты на входах перемножителя некоррелированы.

Запишем коррелированные составляющие на двух входах перемножителя ПРМ для первого и второго способов модуляции при  $\tau_1, \tau_2 \geq (2 - 3) \tau_k$ :

$$\begin{aligned}
 & \mu(t - \tau_1) V(t - \tau_1) \cos [\omega_0(t - \tau_1) + \Phi(t - \tau_1)]; \\
 & \mu(t - \tau_2) V(t - \tau_2) \cos [\omega_0(t - \tau_2) + \Phi(t - \tau_2)]; \\
 & \quad V(t - \tau_1) \cos [\omega_0(t - \tau_1) + \Phi(t - \tau_1)]; \\
 & \mu(t - \tau_2) V(t - \tau_2) \cos [\omega_0(t - \tau_2) + \Phi(t - \tau_2)].
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Если выполняются условия  $\tau_1 = \tau_2$ , в результате статистического усреднения на выходе интегратора получаем составляющую сигнала, пропорциональную модуляционному параметру. Представим выражения для составляющих сигнала на выходе ПРМ для двух способов модуляции:

$$\bar{u}_{\text{с. вых}} = k(1/T) \int_t^{t+T} \mu^2(t) V^2(t - \tau) dt = k\mu^2(t) \bar{P}_{\text{св}}; \quad (4)$$

$$\bar{u}_{\text{с. вых}} = k(1/T) \int_t^{t+T} \mu(t) V^2(t - \tau) dt = k\mu(t) \bar{P}_{\text{св}}, \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий потери мощности сигнала при делении в приемопередатчике. Соотношения получены с учетом реально выполняющихся условий, согласно которым ширина спектра шумовой несущей гораздо больше полосы частот, занимаемой передаваемым сообщением, и величинами  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в аргументе модуляционного параметра  $\mu(t - \tau)$  можно пренебречь, поскольку они на несколько порядков меньше времени корреляции модулирующей функции, то есть  $\mu(t - \tau) \approx \mu(t)$ . Соотношения (4) и (5) отличаются модуляционным параметром: в первом случае он имеет квадратичный характер, во втором — линейный. Линейная модуляционная характеристика более удобна в практической реализации устройства демодулятора.

*Фазовая модуляция (ФМ).* Принцип ФМ (широкополосной шумовой несущей) состоит в том, чтобы обеспечить изменение фазовых соотношений для высокочастотного заполнения корреляционной функции шумового сигнала. В пределах четверти периода высокочастотного заполнения имеется линейный участок, в пределах которого фаза колебания меняется линейно. На данном участке фазу можно менять плавно (случай ФМ) либо скачками, крайние точки линейного участка при этом соответствуют фазовой манипуляции на  $\pm \pi$ . Структурные схемы радиолинии с ФМ приведены на рис. 1, б, в.

Коррелированные составляющие сигнала на двух входах перемножителя ПРМ для обеих схем формирования сигнала в передающем устройстве (рис. 1, г, д) представляют колебания вида

$$\begin{aligned} & V(t - \tau_1) \cos [\omega_0(t - \tau_1) + \varphi(t - \tau_1)]; \\ & V(t - \tau_2) \sin [\omega_0(t - \tau_2) + \varphi(t - \tau_2) + \psi(t - \tau_2)], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\varphi(t)$  — начальная фаза;  $\psi(t)$  — модулирующая функция,  $\psi(t) = k_{\text{Ф}} u_{\text{м}}(t)$ ;  $k_{\text{Ф}}$  — крутизна модуляционной характеристики фазового модулятора;  $u_{\text{м}}(t)$  — передаваемое сообщение. Процесс формирования относительного фазового сдвига между двумя коррелированными компонентами на  $\pi/2$ , необходимого для демодуляции сигнала, в схемах (рис. 1, б) отличается тем, что в первом случае поворот фазы осуществляется в передающем устройстве, во втором — в приемном в результате выбора электриче-

ской длины линии задержки ПРМ  $c\tau_2 = n\lambda + \lambda/4$ , где  $c$  — скорость распространения радиоволн;  $\lambda$  — длина волны;  $n$  — целое число. Задержка на  $\lambda/4$  приводит к сдвигу фазы на  $\pi/2$ .

Напряжение сигнала на выходе интегратора для двух схем формирования, когда  $\tau_1 = \tau_2$ , имеет вид

$$\bar{u}_{c. \text{вых}} = k(1/T) \int_t^{t+T} V^2(t - \tau) \sin[\psi(t)] dt = k\bar{P}_{\text{сн}} \sin[\psi(t)]. \quad (7)$$

Величиной  $\tau$ , как и в случае с АМ, пренебрегаем, а функция  $\sin[\psi(t)]$  является медленно меняющейся за время усреднения  $T$  и выносится за знак интеграла. При  $|\psi(t)| \ll 1$   $\sin[\psi(t)] \simeq \psi(t)$  и  $\bar{u}_{c. \text{вых}} = k\psi(t)P_{\text{сн}}$ . На выходе демодулятора автокорреляционного ПРМ получена низкочастотная составляющая сигнала, пропорциональная его средней мощности и модулирующей функции, имеющей линейный характер. Если модулирующая функция  $\psi(t) = 0$  или  $\pi$ , то  $\sin[\psi(t)]$  в соотношении (7) имеет знак «+» или «-», т. е. соответствует передаваемой бинарной последовательности (случай фазовой манипуляции на  $\pi$ ).

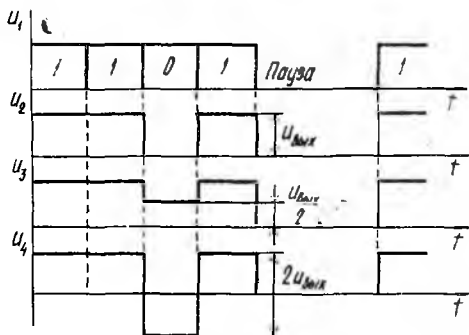


Рис. 2

Оценить помехоустойчивость автокорреляционного метода приема при различных способах модуляции шумовых сигналов АМ и ФМ удобно сравнением уровней демодулированных сигналов на выходе ПРМ при передаче бинарной последовательности нулей и единиц.

Так, временные диаграммы (рис. 2) показывают, что бинарная последовательность  $u_1$  передается с помощью АМ сигналов с пассивной паузой  $u_2$ , АМ сигналов с активной паузой  $u_3$  и фазоманипулированными сигналами  $u_4$ . Фазоманипулированные сигналы превышают по уровню демодулированные сигналы с АМ в два-четыре раза (рис. 2). Аналогичные преимущества свойственны сигналам с ФМ. Следовательно, автокорреляционный прием ФМ шумовых сигналов обладает более высокой помехоустойчивостью по сравнению с приемом АМ сигналов.

Предложенные методы позволяют сравнительно просто осуществлять АМ и ФМ шумовых сигналов и автокорреляционный прием и демодуляцию таких сигналов с целью извлечения информации. При этом полезный сигнал на выходе ПРМ для обоих видов модуляции линейно зависит от модулирующей функции. Автокорреляционный прием ФМ шумовых сигналов более помехоустойчив по сравнению с аналогичным приемом АМ сигналов.

Список литературы: 1. Харкевич А. А. Передача сигналов модулированным шумом // Электросвязь. 1957. № 11. С. 42—46. 2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., 1969. 752 с. 3. Семенов А. М., Сикарев А. А. Широкополосная радиосвязь, М., 1970. 280 с.

*Поступила в редколлегию 25.06.87*