

---

УДК 621.396

*Б. Г. ТЕРЯЕВ*, канд. техн. наук

**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ ЧАСТОТНО-ОГРАНИЧЕННОГО  
ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА**

---

Исследованию помехоустойчивости квазикогерентных ФМ демодуляторов с учетом работы их устройств синхронизации и при отсутствии межсимвольных искажений в линейных каналах посвящена работа [1]. Для такого исследования необходимо предварительно определить отношение сигнал-помеха на выходе устройств синхронизации — формирования опорного колебания (УФОК) и выделения тактовых импульсов (УВТИ). Указанное отношение зависит от отношения сигнал-помеха на выходе устройства и его функциональной схемы. Практически любое устройство синхронизации демодуляторов ФМ сигналов можно представить в виде последовательно соединенных звеньев — безынерцион-

ного нелинейного преобразователя (НП) и узкополосного линейного фильтрующего элемента (ФЭ) [1]. В НП сплошной энергетический спектр (ЭС) сигнала и аддитивного шума превращается в дискретно-сплошной. Образующиеся в этом случае дискретные линии на выходе НП — опорное колебание (ОК) или тактовая частота — фильтруются в ФЭ и далее используются для синхронизации. Сплошной ЭС на выходе НП образует помеху, которая частично проходит через ФЭ, и на выходе устройства синхронизации формируется конечное значение отношения сигнал-помеха. В зависимости от типа НП сплошной ЭС на его выходе образуется либо только спектральными составляющими аддитивной помехи, либо этими составляющими и дополнительно комбинационными, обусловленными сигналом и аддитивной помехой на входе НП.

При наличии частотно-ограниченного канала сигнал на его выходе нельзя записать в виде суммы неискаженного входного сигнала и аддитивной помехи, поскольку полезный сигнал дополнительно искажается межсимвольной помехой (МСП). В этом случае выходной сигнал канала можно записать в виде суммы искаженного МСП полезного сигнала и аддитивной помехи. Нетрудно при этом получить ЭС такого искаженного сигнала. Однако, чтобы определить ЭС сигналов на выходе НП, необходимо знать многомерные функции распределения искаженного МСП полезного сигнала [2]. Указанное затруднение можно обойти, представляя искаженный полезный сигнал на выходе канала в виде суммы неискаженного сигнала и межсимвольной помехи. Далее покажем, что в этом случае можно определить ЭС межсимвольной помехи и найти энергетический спектр сложной помехи, равной сумме МСП и аддитивного шума. Таким образом, сигнал на выходе частотно-ограниченного канала с аддитивным шумом представляется в виде суммы неискаженного сигнала и сложной помехи с известным ЭС. Это позволяет использовать методику определения ЭС на выходе НП, устройств синхронизации [1] при межсимвольных искажениях полезного сигнала в канале.

Итак, найдем ЭС межсимвольной помехи на выходе радиоканала.

*Энергетический спектр межсимвольной помехи на выходе линейного, частотно-ограниченного канала.* Предположим, что информационные сигналы передаются по частотно-ограниченному каналу с комплексным коэффициентом передачи  $k(j\omega) = A(\omega) e^{i\varphi\omega}$ , где  $A(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  — его частотная и фазовая характеристики. В дальнейшем будем рассматривать отношение сигнал-помеха на выходе устройств синхронизации. Поэтому без потери общности исследования полагаем, что указанный комплексный коэффициент передачи нормирован. Пусть на вход канала поступает неискаженный информационный сигнал  $S_{вх}(t)$ . Запишем сигнал на выходе канала

$$S_{вых}(t) = S_{вх}(t) + S_{МСП}(t), \quad (1)$$

где  $S_{МСП}(t)$  — сигнал межсимвольной помехи.

Входной сигнал  $S_{вх}(t)$  — произвольная случайная реализация на интервале  $0 - T$ . Запишем преобразование Фурье этого сигнала:

$$S_{вх}(j\omega, T) = \int_0^T S_{вх}(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

Спектральная интенсивность выходного сигнала

$$S_{вых}(j\omega, T) = S_{вх}(j\omega, T) K(j\omega). \quad (3)$$

Используя формулы (1), (3), получаем спектральную интенсивность межсимвольной помехи

$$S_{\text{МСП}}(j\omega, T) = S_{\text{ВЫХ}}(j\omega, T) - S_{\text{ВХ}}(j\omega, T), \quad (4)$$

позволяющую определять ЭС МСП.

Согласно определению ЭС данному, например, в работе [2], имеем

$$S_{\text{МСП}}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} m_1 \{S_{\text{МСП}}(j\omega, T) S_{\text{МСП}}(-j\omega, T)\}. \quad (5)$$

Подставляя выражение (4) в (5) и используя (3), получаем

$$S_{\text{МСП}}(\omega) = [1 - k(j\omega)][1 - k(-j\omega)] \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} m_1 \{S_{\text{ВХ}}(j\omega, T) \times \\ \times S_{\text{ВХ}}(-j\omega, T)\} = [1 - k(j\omega)][1 - k(-j\omega)] S_{\text{ВХ}}(\omega), \quad (6)$$

где  $S_{\text{ВХ}}(\omega)$  — энергетический спектр неискаженного информационного сигнала,

$$S_{\text{ВХ}}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} m_1 \{S_{\text{ВХ}}(j\omega, T) S_{\text{ВХ}}(-j\omega, T)\}. \quad (6a)$$

Таким образом, зная ЭС входного сигнала и комплексный коэффициент передачи канала  $k(j\omega)$ , находим энергетический спектр межсимвольной помехи на выходе канала.

Если ввести функции  $a(\omega) = a$ ,  $b(\omega) = b$  согласно

$$k(j\omega) = a(\omega) + jb(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega) + jA(\omega) \sin \varphi(\omega),$$

то выражение  $[1 - K(j\omega)][1 - K(-j\omega)]$  можно представить следующим образом:

$$[1 - k(j\omega)][1 - k(-j\omega)] = [1 - (a + jb)][1 - (a - jb)] = \\ = 1 + a^2 + b^2 - 2a = 1 + |k(j\omega)|^2 - 2\text{Re } k(j\omega).$$

Тогда

$$S_{\text{МСП}}(\omega) = S_{\text{ВХ}}(\omega) [1 + |k(j\omega)|^2 - 2\text{Re } k(j\omega)]. \quad (6б)$$

Покажем, что выражение  $1 + |k(j\omega)|^2 - 2\text{Re } k(j\omega)$  всегда положительно. В самом деле

$$1 + |k(j\omega)|^2 - 2\text{Re } k(j\omega) = 1 + a^2(\omega) + b^2(\omega) - 2a(\omega) = \\ = [a(\omega) - 1]^2 + b^2(\omega) \geq 0.$$

Если  $k(j\omega) \equiv 1 = a(\omega)$ ,  $b(\omega) \equiv 0$ , т. е. приемопередающий тракт имеет равномерную частотную характеристику и, следовательно является идеальным, то

$$S_{\text{МСП}}(\omega) = (1 + 1 - 2) S_{\text{ВХ}}(\omega) \equiv 0. \quad (6в)$$

Таким образом, энергетический спектр МСП отсутствует. Ранее энергетический спектр МСП определяли без учета статистической связи между сигналами  $S_{\text{ВХ}}(t)$ ,  $S_{\text{МСП}}(t)$ . Однако его нетрудно получить при учете этой связи.

Если случайный процесс состоит из суммы двух статистически связанных процессов  $S_{вх}(t)$ ,  $S_{МСП}(t)$ , то его энергетический спектр запишем в виде [2]

$$S_{вх}(\omega) + S_{МСП}(\omega) + S_{вх, МСП}(\omega) + S_{МСП, вх}(\omega), \quad (7)$$

где  $S_{МСП}(\omega)$  — энергетический спектр МСП, найденный ранее;  $S_{вх, МСП}(\omega)$ ,  $S_{МСП, вх}(\omega)$  — взаимные энергетические спектры процессов  $S_{вх}(t)$ ,  $S_{МСП}(t)$ .

Очевидно,

$$S_{вып}(\omega) = S_{вх}(\omega) |k(j\omega)|^2 = S_{вх}(\omega) + S_{МСП}(\omega) + S_{МСП, вх}(\omega) + S_{вх, МСП}(\omega)$$

или

$$S_{МСП}(\omega) + S_{МСП, вх}(\omega) + S_{вх, МСП}(\omega) = S_{вх}(\omega) \{|k(j\omega)|^2 - 1\}. \quad (8)$$

Таким образом, ЭС межсимвольной помехи с учетом статистической связи между процессами  $S_{вх}(t)$ ,  $S_{МСП}(t)$  определяется выражением (8), из которого следует, что при  $k(j\omega) \equiv 1$  энергетический спектр МСП исчезает.

Сумма взаимных ЭС процессов всегда отрицательна, за исключением вырожденного случая, когда межсимвольная помеха также отсутствует. Из формул (6б), (8) имеем

$$\begin{aligned} S_{вх, МСП}(\omega) + S_{МСП, вх}(\omega) &= S_{вх}(\omega) \{|k(j\omega)|^2 - 1\} - \\ &- S_{вх}(\omega) \{1 + |k(j\omega)|^2 - 2\operatorname{Re} k(j\omega)\} = S_{вх}(\omega) \times \\ &\times \{|k(j\omega)|^2 - 1 - 1 - |k(j\omega)|^2 + 2\operatorname{Re} k(j\omega)\} = -2S_{вх}(\omega) \times \\ &\times \{1 - \operatorname{Re} k(j\omega)\} = -2S_{вх}(\omega) [1 - a(\omega)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Случай  $k(j\omega) = 1$  практически всегда отвечает условию  $a(\omega) = 1$ , т. е. когда межсимвольные искажения отсутствуют.

Разумеется, лучше воспользоваться точным выражением (8). Однако при математических преобразованиях конечный аналитический результат иногда можно получать с помощью менее точного выражения (6). Различие между спектрами, полученными по формулам (6), (8) небольшое. Кроме того, поскольку взаимные ЭС всегда отрицательны, а спектр (6), найденный без учета статистической связи между  $S_{вх}(t)$ ,  $S_{МСП}(t)$ , всегда положителен, то при использовании (6) получим завышенные значения мощности помехи на выходе ФЭ и, следовательно, заниженное иско-  
мое отношение сигнал-помеха на выходе устройств синхронизации (нижняя граница).

Отметим различие между определениями межсимвольной помехи используемым в работах, посвященных влиянию МСП на помехоустойчивость систем связи данных [3], и определением сигнала МСП в данной статье. Автор работы [3] межсимвольной помехой считает значение отклика (импульсной реакции) канала на элементарный радиосигнал в моменты стробирования соответствующие эквидистантным точкам. Если импульсная реакция канала удовлетворяет условию отсечности Найквиста, то МСП в определении [3] при идеальной работе УВТИ отсутствует. В случае смещения тактовых импульсов МСП определяется даже и при выполнении условия отсечности. Однако такое пред-

ставление межсимвольной помехи неудобно при исследовании работы устройств синхронизации. В самом деле, для оценки влияния узкополосных ЦФОК и УВТИ на помехоустойчивость демодулятора необходимо знать отношение сигнал-помеха на выходе ФЭ, т. е. следует предварительно найти энергетический спектр сигналов на выходе НП. Для этого вначале необходимо знать энергетический спектр МСП, которая определена равенствами (6) или (8) независимо от того, удовлетворяет или нет импульсная реакция канала условию отсечки.

ЭС МСП, как это следует из (6), (8), обычно определяется высокочастотными частями ЭС входного сигнала.

**Список литературы:** 1. *Теряев Б. Г.* Сравнительный анализ устройств формирования опорного колебания и тактовых импульсов и их влияние на помехоустойчивость сигналов однократной и двукратной фазовой манипуляции // Тр. VIII науч.-техн. конф., посвященной Дню радио.— М., 1982.— С. 142—144. 2. *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники.— М.: Сов. радио, 1966.— Кн. 1.— 221 с. 3. *Кисель В. А.* Синтез гармонических корректоров для высокоскоростных систем связи.— М.: Связь, 1979.— 180 с.

*Поступила в редколлегию 18.11.85.*