

# МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ ИЗ СПЕКТРА ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

*В. В. Емельянов*

Харьков

Основное препятствие в использовании систем с КИМ-ФМ (кодowo-импульсной фазовой манипуляцией) связано с необходимостью формирования опорных колебаний, без которых фазовый детектор работать не может. Часто такие колебания формируют путем специального преобразования сигналов, несущих полезную информацию. Трудность преобразования сигналов, действующих на входе детектора, в опорные колебания состоит в том, что полезный сигнал на входе образуется последовательностью символов с различными фазами (манипулирован по фазе), а опорное колебание должно иметь неизменную фазу, совпадающую с фазой одного из символов.

В данной работе исследуется возможность выделения из спектра фазоманипулированного сигнала, получаемого методом, описанным в [1], составляющей несущей частоты с целью применения ее. Для этой цели предлагается использовать балансный фазовый детектор (рис. 1), на один вход которого поступают двухполярные импульсы

$$M(t) = u'_2(t) = \begin{cases} +1 & \text{при } (n-1)\tau_0 \leq t \leq n\tau_0; \\ -1 & \text{при } n\tau_0 \leq t \leq (n+1)\tau_0, \end{cases}$$

где  $\tau_0$  — длительность элементарной посылки;

$n$  — номер посылки,

а на другой — фазоманипулированный сигнал высокой частоты

$$u'_3(t) = U'_{m3} \cos(\omega_0 t + n\pi),$$

где  $n = 0, 1$  при манипуляции фазы на  $180^\circ$ .

Если  $n = 0$ , высокочастотный сигнал имеет начальную фазу  $0^\circ$ , т. е.

$$u_3'(t) = U_{m3}' \cos \omega_0 t.$$

При  $n = 1$  высокочастотный сигнал имеет начальную фазу  $180^\circ$ :

$$u_3'(t) = U_{m3}' \cos(\omega_0 t + \pi) = -U_{m3}' \cos \omega_0 t.$$

Рассмотрим физические процессы, происходящие в предлагаемой схеме. Схема балансного фазового детектора выполняется строго симметричной, обеспечивая выполнение соотношений

$$U_3 = \frac{U_3'}{2} \text{ и } U_2 = \frac{U_2'}{2}.$$

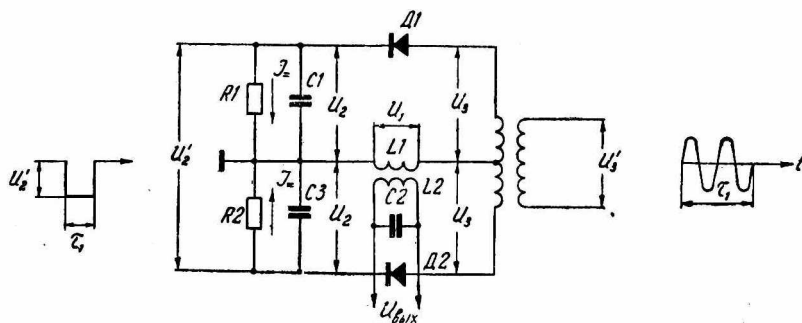


Рис. 1.

В результате детектирования высокочастотного сигнала на нагрузке детектора выделяется постоянное напряжение  $U_-$ .

В зависимости от соотношения амплитуды манипулирующих импульсов и напряжения смещения  $U_-$  балансный демодулятор может работать в следующих режимах:

1.  $|U_2| < |U_-|$ ;
2.  $|U_2| = |U_-|$ ;
3.  $|U_2| > |U_-|$ .

Рассмотрим работу схемы для каждого случая в отдельности, полагая при этом, что коэффициент передачи трансформаторов демодулятора равен единице.

**1. Режим при  $|U_2| < |U_-|$ .** При таком соотношении  $U_2$  и  $U_-$  могут быть два случая:

$$|U_2| + |U_{m3}| < |U_-|; \quad |U_2| + |U_{m3}| > |U_-|.$$

В первом случае детектирование высокочастотного сигнала отсутствует, поэтому рассмотрим только второй случай. Положим, что на входе демодулятора справа действует фазоманипулированный сигнал высокой частоты  $\omega_0$  длительностью  $\tau_1$  с начальной фазой, равной нулю:

$$u_3'(t) = U_{m3}' \cos \omega_0 t,$$

а слева — манипулирующий импульс отрицательной полярности (рис. 1):

$$U'_2 = -1 \text{ при } 0 \leq t \leq \tau_1.$$

Поскольку  $|U_2| + |U_{m3}| > |U_-|$ , оба диода Д1 и Д2 за время существования отрицательного импульса  $U'_2$  отпираются попеременно в зависимости от полярности высокочастотного сигнала. Во время отрицательного полупериода высокочастотного сигнала отпирается диод Д1. Мгновенное напряжение на диоде Д1, согласно [2],

$$u = U_{m3} \cos \omega_0 t - (U_- - U_2) = U_{m3} (\cos \omega_0 t + \cos \theta'),$$

где

$$\cos \theta' = \frac{U_2 - U_-}{U_{m3}} \text{ или } \cos \theta' = \cos \theta'' - \cos \theta;$$

$$\cos \theta'' = \frac{U_2}{U_{m3}}, \quad \cos \theta = \frac{U_-}{U_{m3}};$$

$\theta$  — угол отсечки в отсутствии импульса постоянного тока;  $\theta'$  — угол отсечки при наличии импульса постоянного тока.

В положительный полупериод высокочастотного сигнала отпирается диод Д2, а Д1 запирается. Мгновенное значение напряжения на аноде диода Д2

$$u = U_{m3} \cos \omega_0 t - (U_- + U_2) = U_{m3} (\cos \omega_0 t - \cos \theta'),$$

где

$$\cos \theta' = \frac{U_- + U_2}{U_{m3}}.$$

По истечении времени  $\tau_1$  на входе схемы слева скачком появляется манипулирующий импульс положительной полярности с амплитудой  $U'_2 = +1$  длительностью  $\tau_2 = \tau_1$ .

С этого же момента на вход демодулятора справа поступает импульс высокой частоты с начальной фазой  $180^\circ$  и с прежней амплитудой  $U'_{m3}$  (рис. 2):

$$u'_3(t) = U'_{m3} \cos(\omega_0 t + \pi).$$

Мгновенное напряжение на анодах диодов Д1 и Д2 соответственно

$$u = U_{m3} \cos(\omega_0 t + \pi) - (U_- + U_2) = U_{m3} [\cos(\omega_0 t + \pi) - \cos \theta'],$$

где

$$\text{для диода Д1 } \cos \theta' = \frac{U_- + U_2}{U_{m3}};$$

$$\text{для диода Д2 } \cos \theta' = \frac{U_- - U_2}{U_{m3}}.$$

В этом случае, как и в первом (рис. 1), диоды открываются попеременно и через индуктивность  $L1$  в одном и том же направлении протекает ток, амплитуда первой гармоники которого равна

$$J_{m1} = \frac{2SU_{m3}}{\pi} (\theta' - \sin \theta' \cos \theta')$$

Диаграммы токов и напряжений в цепях демодулятора для этого случая представлены на рис. 3.

2. Режим при  $|U_2| = |U_-|$ . Рассмотрим те особенности, которые вносит в работу схемы (рис. 1, 2) приведенное выше равенство.

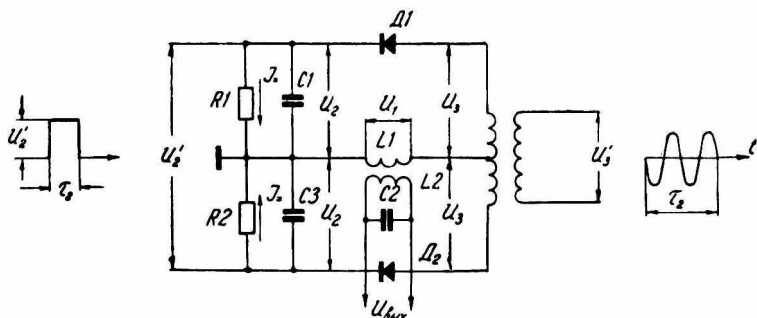


Рис. 2.

В течение времени  $\tau_1$  (рис. 1) угол отсечки тока диода  $D1$   $\theta' = 90^\circ$ . Мгновенное напряжение на аноде диода  $D1$

$$u = U_{m3} \cos \omega_0 t.$$

Амплитуда первой гармоники тока диода

$$J_{m1} = SU_{m3}$$

Для диода  $D2$  полярность манипулирующего импульса совпадает с полярностью напряжения  $U_-$ . Диод  $D2$  получает дополнительное отрицательное смещение, угол отсечки уменьшается, и ток через цепь  $L1$  в основном определяется диодом  $D1$ .

В течение времени  $\tau_2$  (рис. 2) угол отсечки тока диода  $D2$   $\theta' = 90^\circ$ . Мгновенное напряжение на аноде диода  $D2$

$$U = U_{m3} \cos (\omega_0 t + \pi).$$

Ток через индуктивность  $L1$  будет определяться в основном диодом  $D2$ . Амплитуда первой гармоники этого тока

$$J_{m1} = SU_{m3}.$$

Направление тока через индуктивность  $L1$  для случаев рис. 1, 2 совпадает.

3. Режим при  $|U_2| > |U_-|$ . Режим работы схемы определяется соотношением между  $U_2$ ,  $U_-$  и  $U_{m3}$ . Наиболее благоприятный режим будет при выполнении условия

$$|U_2| - |U_-| - |\Delta U| \geq |U_{m3}|,$$

где  $\Delta U$  — величина напряжения, определяющая границу квадратичного участка вольт-амперной характеристики диода. Для современных диодов  $\Delta U$  (0,7 ÷ 1) вольт.

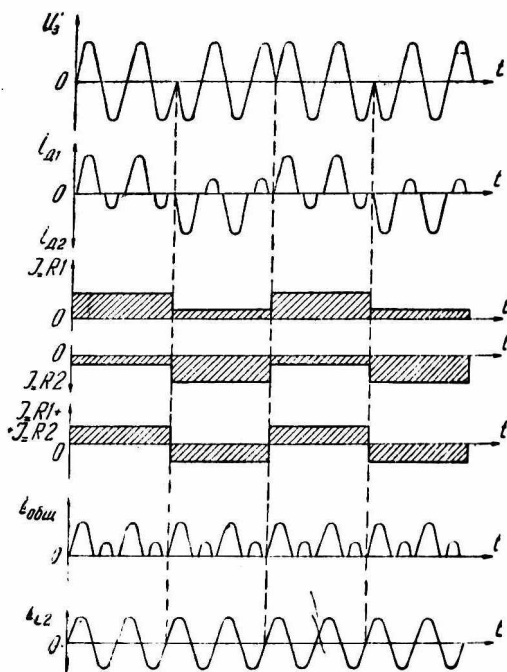


Рис. 3.

В этом случае рабочая точка находится на линейной части вольт-амперной характеристики диодов, детектирование отсутствует и балансная схема работает как коммутирующее устройство, попеременно открывая и закрывая диоды (рис. 4, 5). При действии отрицательного манипулирующего импульса (рис. 1, 4) диод Д2 заперт, а диод Д1 открыт и через индуктивность  $L1$  протекает импульс тока высокой частоты  $i_1$  с нулевой фазой (рис. 5).

В момент воздействия высокочастотной посылки с фазой, равной  $180^\circ$ , на вход демодулятора одновременно подается положительный манипулирующий импульс, что вызывает запира-

ние диода Д1 и отпирание диода Д2. В результате через индуктивность  $L1$  протекает импульс тока высокой частоты  $i_2$  с фазой,

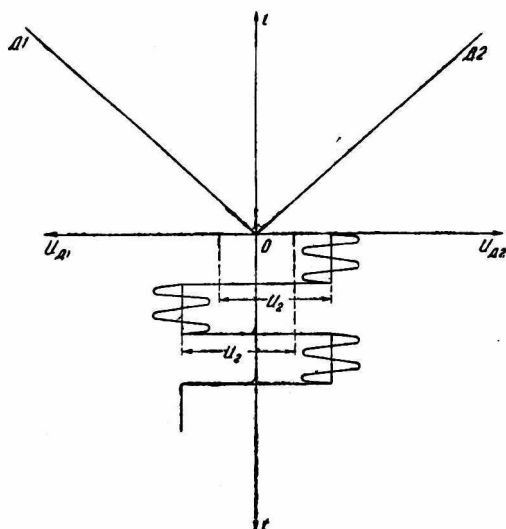


Рис. 4.

равной фазе предыдущей посылки. Суммарный ток ( $i_{общ}$ ) через индуктивность  $L1$ , а вместе с ним и напряжение на контуре  $L2C2$ , будет изменяться с частотой, равной несущей частоте входного сигнала, и будет с ним когерентным.

Таким образом, анализ физических процессов, происходящих в рассматриваемой схеме, показывает, что во всех трех режимах на контуре  $L2C2$  выделяется напряжение несущей частоты, которое может быть использовано в системах измерения и автоматического поддержания индекса фазовой манипуляции. При этом третий режим работы демодулятора является более предпочтительным, ибо в этом случае амплитуда выделенного колебания несущей частоты будет максимальной, а требования к схеме фильтрации от других

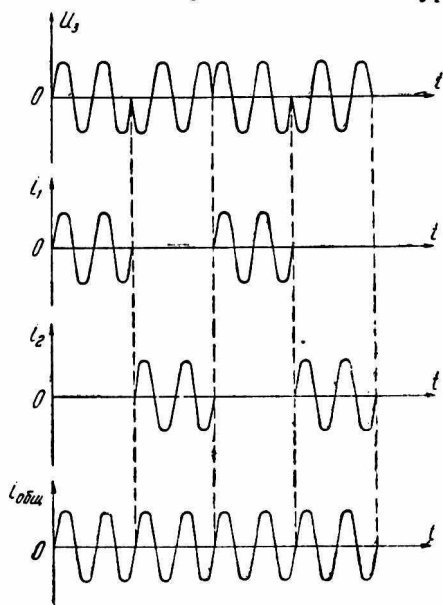


Рис. 5.

спектральных составляющих резко снижаются. Правильность полученных результатов подтверждается математическим анализом работы приведенной схемы.

Фазоманипулированный сигнал, согласно [3], можно записать в виде

$$u_3'(t) = U_{m3}' [\cos \Delta\varphi \sin \omega_0 t + M(t) \sin \Delta\varphi \cos \omega_0 t],$$

где  $U_{m3}$ ,  $\omega_0$  — амплитуда и частота несущего колебания;

$\Delta\varphi$  — угол манипуляции фазы;

$M(t)$  — манипулирующий сигнал.

Положим, что фазовый детектор является идеальным перемножителем напряжений с коэффициентом передачи, равным единице. Тогда на выходе фазового детектора имеем

$$u = u_3(t) M(t) = U_{m3}' \{M(t) \cos \Delta\varphi \sin \omega_0 t + [M(t)]^2 \sin \Delta\varphi \cos \omega_0 t\}. \quad (1)$$

Здесь  $[M(t)]^2 = 1$ , так как на фазовый манипулятор передающего устройства и на демодулятор подается манипулирующее напряжение, имеющее одинаковый знак в любой момент времени.

При манипуляции фазы на угол  $2\Delta\varphi = \pi$  выражение (1) упрощается:

$$u = u_{m3}' \cos \omega_0 t.$$

Таким образом, выходное напряжение демодулятора воспроизводит частоту и фазу несущего колебания.

Если на фазовый манипулятор и на демодулятор подается манипулирующее напряжение  $M(t)$  различного знака, то выходное напряжение демодулятора

$$u = -U_{m3}' \cos \omega_0 t.$$

Это означает, что фаза выделенного из спектра фазоманипулированного сигнала колебания несущей частоты будет совпадать с фазой послышки, соответствующей передаваемому знаку 0 или 1.

Предлагаемый метод был исследован экспериментально. Входной и выходной сигналы балансного демодулятора контролировались с помощью осциллографа С1-13 и анализатора спектров С4-8. Результаты эксперимента приведены на рис. 6. На рис. 6, а, б, в, г представлены фазоманипулированный сигнал высокой частоты, манипулирующие импульсы  $M(t)$ , спектр фазоманипулированного сигнала и спектр выделенного колебания несущей частоты на выходе демодулятора.

При отсутствии манипулирующих импульсов на выходе имеется сигнал, спектр которого представлен на рис. 6, д. Наличие в высокочастотном сигнале паразитной амплитудной манипуляции (рис. 6, е) приводит не только к изменению спектра фазоманипулированного сигнала (рис. 6, ж), но и к изменению спектра выделенного колебания несущей частоты на выходе демодулятора (рис. 6, з). Отличие манипулирующих импульсов  $M(t)$  на входе демодулятора от прямоугольной формы (рис. 6, и)

приводит к появлению в спектре выделенного колебания несущей частоты на выходе демодулятора дополнительных спектральных составляющих (рис. 6, к).

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Режим работы схемы при выполнении соотношения

$$|U_2| - |U_1| - |\Delta U| \gg |U_{m3}$$

оптимален (рис. 6, а, б, в, г).

2. Постоянную времени  $\tau = RC$  балансного демодулятора необходимо выбирать из условия отсутствия искажений манипулирующих импульсов  $M(t)$ .

3. Для устранения паразитной амплитудной манипуляции высокочастотного фазоманипулированного сигнала, вызывающей появление дополнительных составляющих в спектре выделенного колебания несущей частоты (рис. 6, з), следует обеспечить амплитудное ограничение фазоманипулированного сигнала.

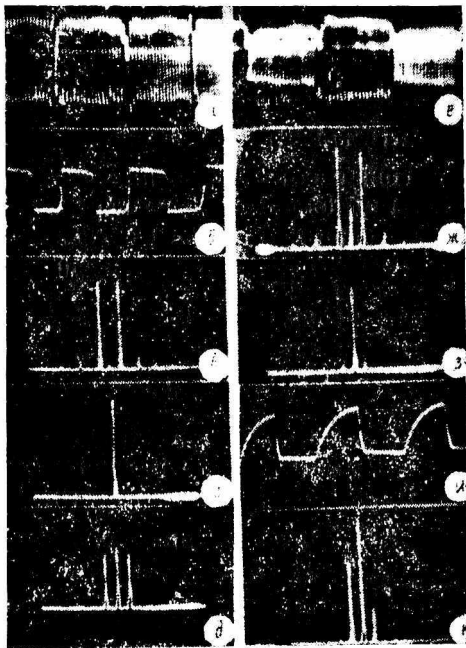


Рис. 6.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Емельянов, Ф. А. Гордеева. Система формирования КИМ-ФМ сигналов с фазой посылок 0 и  $\pi$ . Сб. «Радиотехника», вып. 19. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.

2. Приемные устройства радиолокационных сигналов. Под редакцией А. А. Письменецкого. Изд. АРТА им. Говорова, 1965.

3. Н. Т. Петрович. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. Изд-во «Советское радио», 1965.