

УДК 621.391

**ДЕМОДУЛЯТОР СИГНАЛОВ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ
С АДАПТИВНЫМ ПОРОГОМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ**

д-р техн. наук, доц. С.В. ДВОРНИКОВ

(Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург);

В.В. БОРИСОВ

(НПФ «ТИРС», Санкт-Петербург);

А.Г. МОСКАЛЕЦ, Е.В. КАЗАКОВ

(Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург);

А.В. ЖЕЛЕЗНЯК

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»);

Д.С. РЯБЕНКО

(Полоцкий государственный университет)

Демонстрируются результаты аналитических исследований и данные компьютерного эксперимента по обоснованию выбора порога принятия решения при демодуляции сигналов с относительной фазовой манипуляцией. Для этих целей доказывается целесообразность учета апостериорных вероятностей о демодулированных символах. Представлены основные этапы алгоритма, реализующего разработанный научный подход.

Согласно [2], процесс демодуляции сигналов относительной фазовой манипуляции (ОФМ) сводится к однозначному отображению реализации S_k ($k = 0, 1$) в пространстве допустимых значений $V_k = \{V_0, V_1\}$. Причем $S_0 \in V_0$, а $S_1 \in V_1$. Тогда граница, разделяющая пространства V_1 и V_0 , определяется величиной различия векторов S_1 и S_0 :

$$\Delta l = d^{-1} \ln(p(0)/p(1)), \quad (1)$$

где d – разность векторов S_1 и S_0 ; $p(1)$ и $p(0)$ – априорные вероятности передачи сигналов S_1 и S_0 соответственно.

Следовательно, порог принятия решения по отнесению принятой реализации S_k к одной из областей V_1 и V_0 полностью определяется априорными вероятностями передачи сигналов по каналу связи.

Если демодулятор способен сохранять результаты обработки N элементов, то частность проявления сигналов S_1 и S_0 определяется как

$$\tilde{p}(1) = n_1/N \text{ и } \tilde{p}(0) = n_0/N, \quad (2)$$

где n_1 и n_0 – количество решений о приёме S_1 и S_0 .

При $N \rightarrow \infty$ результат (2) можно рассматривать как апостериорные вероятности появления сигналов S_1 и S_0 на выходе канала связи.

Следовательно, граница принятия решения между областями V_1 и V_2 зависит не только от $p(1)$ и $p(0)$, но и от $\tilde{p}(1)$ и $\tilde{p}(0)$.

В таком случае ошибку демодуляции можно рассматривать с позиций суммарных ошибок прямого $p_{ош}$ и обратного $\tilde{p}_{ош}$ каналов связи:

$$p_o = p_{ош} + \tilde{p}_{ош} = (p(1) + \tilde{p}(0))p(0/1) + (p(0) + \tilde{p}(1))p(1/0). \quad (3)$$

Поскольку априорное задание $p(1)$ и $p(0)$ не представляется возможным, то принимают гипотезу о выполнении равенства

$$p(1) = p(0) = 0,5. \quad (4)$$

Тогда границы для идеального приёмника «с памятью» между областями V_1 и V_2 будут определяться сдвигами [3]:

$$\Delta l = d^{-1} \ln[(1 + \tilde{p}(1))/(1 + 2\tilde{p}(0))].$$

Если демодулятор хранит в памяти N сигналов на своём входе и выходе, решающее устройство признаёт за переданный сигнал тот, который удовлетворяет условию:

$$\begin{cases} \mathbf{X} \equiv \mathbf{S}_0, & \text{если } \mathbf{X}/\mathbf{S}_0 \geq -\Delta l; \\ \mathbf{X} \equiv \mathbf{S}_1, & \text{если } \mathbf{X}/\mathbf{S}_1 < -\Delta l, \end{cases} \quad (5)$$

где $\Delta l = 0$, $\forall i \equiv 1, \bar{N}$; \mathbf{X} – принятый сигнальный вектор.

Далее, на основе (5) вычисляются $\tilde{p}(1)$ и $\tilde{p}(0)$, а для каждого из N хранящихся в памяти сигналов повторно выносятся решение на основе формулы (5), которое и выдается получателю. Решающая функция (5) корректируется для каждой новой серии по результатам $\tilde{p}(1)$ и $\tilde{p}(0)$, полученным на предыдущем этапе демодуляции.

В связи с этим основные этапы алгоритма демодуляции сигналов ОФМ с адаптивным порогом принятия решения будут следующими:

этап 1 – принимают сигнал ОФМ $S(t)$, фильтруют и выравнивают его амплитуду, получая восстановленный сигнал $S_c(t)$;

этап 2 – генерируют опорное колебание $S_0(t)$ с частотой $S_c(t)$;

этап 3 – вычисляют корреляционную функцию $Y(t) = S_c(t)S_0(t)$ между опорным колебанием $S_0(t)$ и восстановленным сигналом $S_c(t)$;

этап 4 – интегрируют $Y(t)$ на интервалах T , по окончании которых фиксируют ее значение Y_n . Здесь $n = 1, 2, \dots$ – текущее значение интервала, равное длительности информационного символа;

этап 5 – вычисляют модуль разницы $|{}^p Y_n|$ значений Y_n и Y_{n-1} соответственно на n -м и на $(n-1)$ -м временных интервалах T ;

этап 6 – сравнивают $|{}^p Y_n|$ с пороговым значением корреляционной функции $Y_{\text{пор}}$; при условии $|{}^p Y_n| > Y_{\text{пор}}$ присваивают принятому информационному элементу значение «1», в противном случае – «0».

Особенностью алгоритма является уточнение $Y_{\text{пор}}$ на длительности демодулированного символа, осуществляемое следующим образом.

Формируют L -элементную последовательность с равным числом «1» и «0» в ней. Затем демодулированный на n -м интервале T информационный символ записывают первым элементом в L -последовательность, сдвигая все ее элементы на один бит при сохранении общей длины. Соответственно, с поступлением очередного элемента последний элемент последовательности автоматически аннулируется. После этого корректируют $Y_{\text{пор}}$, для чего подсчитывают число «1» в измененной L -последовательности и рассчитывают отклонение $\Delta Y_{\text{пор}}^n$ от предварительно заданной величины $Y_{\text{пор}}$ по формуле:

$$\Delta Y_{\text{пор}}^n = (4Y_{\text{пор}})^{-1} \ln[(0,5L + k(1))/(1,5L - k(1))], \quad (6)$$

где $k(1)$ – число «1» в L -элементной последовательности.

И уже на основании результата вычисления (6) рассчитывают значение $Y_{\text{пор}}^{\text{кор}}$ путем алгебраического сложения по формуле:

$$Y_{\text{пор}}^{\text{кор}} = Y_{\text{пор}} + \Delta Y_{\text{пор}}^n. \quad (7)$$

Затем повторяют все этапы предложенного алгоритма, используя на этапе 6 вместо значения $Y_{\text{пор}}$ уточненную величину $Y_{\text{пор}}^{\text{кор}}$.

Для реализации алгоритма демодуляции сигналов ОФМ на основе адаптивного порога принятия решения о демодулируемом символе предлагается демодулятор, структурная схема которого представлена на рисунке 1. Основу демодулятора составляют коррелятор (блок 19), в котором осуществляется расчет $Y(t)$ между колебанием генератора опорного напряжения (блок 2) и отфильтрованным выровненным входным сигналом, поступающим через фильтр (блок 1) и устройство выравнивания амплитуд (блок 3) на умножитель напряжения (блок 4), где собственно и реализуются процедуры сравнения. Формирование $Y(t)$ осу-

ществляется в интеграторе (блок 5), который запускается генератором тактовых импульсов (блок 6). Затем сигнал $Y(t)$ поступает в устройство стробирования (блок 7), где формируется импульсный поток. Так как при демодуляции сигналов ОФМ фазовое значение очередного сигнала сравнивается с предыдущим, импульсный поток с устройства стробирования подается на один канал устройства вычитания (блок 9) непосредственно, а на другой – через линию задержки (блок 8). С блока вычитания сигнал подается на устройство вычисления модуля (блок 10), где вычисляется исходное напряжение для формирования порога принятия решения. Для адаптивного порога предлагается использование следующих блоков: регистров из L элементов, БВСПЗ, БВОКФ и СЧЕЭЯР. Благодаря данным устройствам и реализуется принцип адаптации порога принятия решения после демодуляции очередного символа.

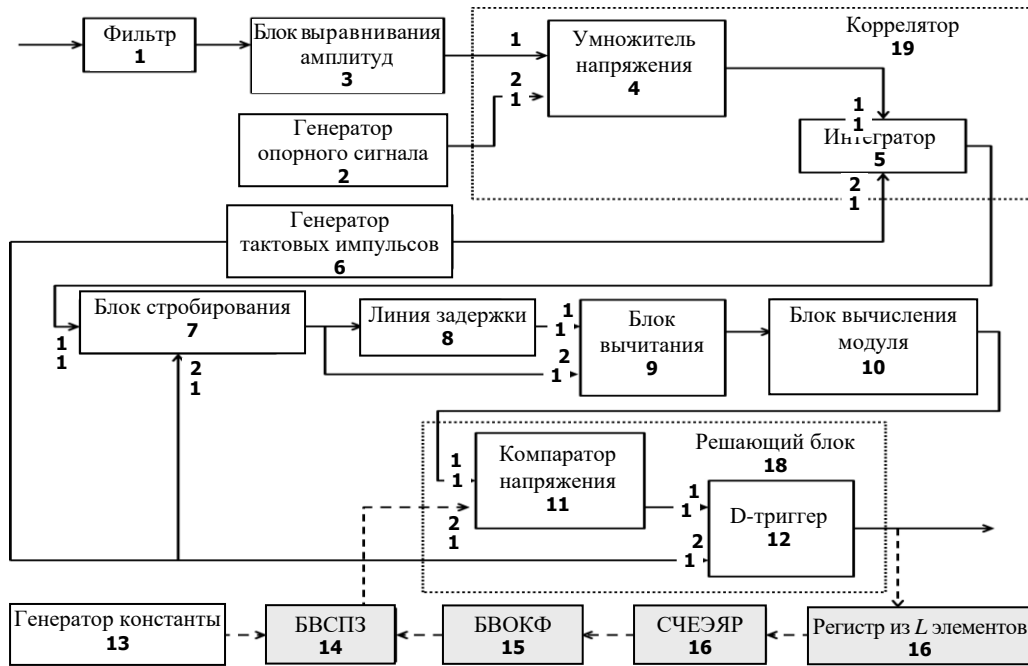


Рис. 1. Структурная схема демодулятора сигналов ОФМ:
 14 – блок вычисления скорректированного порогового значения (БВСПЗ);
 15 – блок вычисления отклонения корреляционной функции (БВОКФ);
 16 – счетчик числа единичных элементов в ячейках регистра (СЧЕЭЯР)

В качестве примера на рисунке 2 представлены эпюры, поясняющие принцип демодуляции сигнала ОФМ в условиях помех в канале связи, приводящих к ошибкам при адаптивно изменяющемся пороге $Y_{пор}^{кор}$ [5]. Так, на рисунке 2, а в функции $Y(t)$ пунктирной линией показаны ошибки, которые возникли в результате помех в канале связи. Ошибки вычисления функции $Y(t)$ приводят к ошибкам в Y_n и Y_{n-1} .

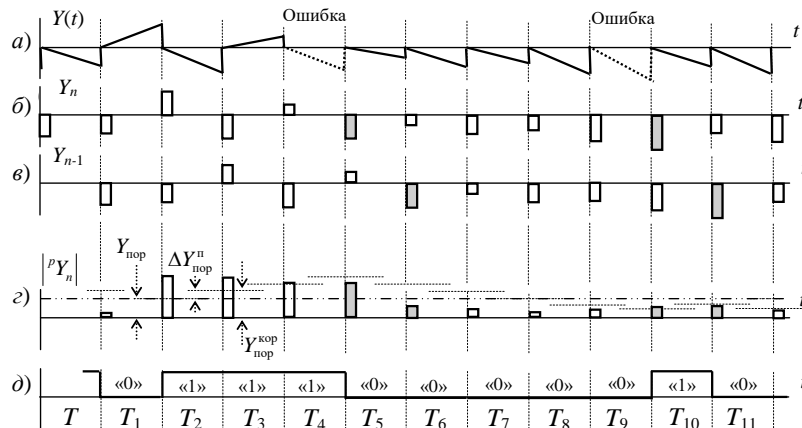


Рис. 2. Принцип демодуляции сигналов ОФМ с адаптацией порога принятия решения в условиях помех, вносимых каналом

Ошибочные символы в Y_n и Y_{n-1} на рисунках 2, б и 2, в отмечены серым цветом.

На рисунке 2, г изображены уровни $|^p Y_n|$, получаемые на каждом интервале демодулированного символа. Здесь же показаны значения $\Delta Y_{пор}^n$, рассчитанные относительно $Y_{пор}$ в соответствии с формулой (6).

Результаты моделирования при длине регистра $L = 200$ символов

Число ошибок	4	8	12	16	20	24
Число ошибок после порога $Y_{пор}$	4	8	12	16	20	24
Число ошибок после порога $Y_{пор}^{кор}$	2	4	5	6	10	16
Дисперсия ошибок после порога $Y_{пор}^{кор}$	± 1	± 1	± 1	± 2	± 2	± 2

Анализ результатов показывает следующее. Из-за канальных помех в демодулированной последовательности возникают 4 ошибочных символа на T_5, T_6, T_{10} и T_{11} (см. рис. 2, г и 2, д). Применение в качестве порога $Y_{пор}$ не исправляет ни одной из указанных ошибок. Однако использование уточненной величины $Y_{пор}^{кор}$ ведет к тому, что три из четырех ошибок будут исправлены (на рисунке 2, г $Y_{пор}^{кор}$ показана линией тонкого пунктира). Это подтверждает теоретические предположения. Анализ данных в таблице показывает, что наилучшие результаты обеспечиваются при 8 % ошибок в демодулированных символах. В этом случае применение адаптивного порога снижает число ошибок до 3 %, что в совокупности с использованием помехоустойчивого кодирования обеспечит уровень ошибок в канале порядка 10^{-7} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Возенкрафт, Дж. Теоретические основы техники связи / Дж. Возенкрафт, И. Джекобс. – М.: Мир, 1969.
2. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко [и др.]. – М.: Радио и связь, 1985.
3. Комарович, В.Ф. Адаптивное различение двух сигналов в условиях воздействия окрашенных помех на основе анализа статистики выходной последовательности приемника / В.Ф. Комарович, А.А. Устинов, А.И. Лобышев // Информация и космос. – 2007. – № 4. – С. 5 – 9.
4. Мелентьев, О.Г. Теоретические аспекты передачи данных по каналам с группирующимися ошибками / О.Г. Мелентьев; под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 232 с.
5. Способ демодуляции сигналов с относительной фазовой модуляцией на основе адаптивного порога: пат. Рос. Федерации № 2454014 от 20.06.2012 / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.А. Устинов и др.

Поступила 01.02.2013

DEMODULATOR OF SIGNALS WITH THE DIFFERENTIAL PHASE SHIFT KEYING WITH THE ADAPTIVE THRESHOLD

**S. DVORNIKOV, V. BORISOV, A. MOSKALEZ,
E. KAZAKOV, A. ZHELEZNYAK, D. RYABENKO**

The results of analytical research and data of the computer experiment on grounds of the choice of the threshold of decision-making at demodulation of signals with the differential phase shift keying are presented. For these purposes reasonability of the record of posterior probability about demodulated symbols is proved. The basic stages of the algorithm, which realizes the developed scientific approach, are shown.