

УДК 621.396:021.369

Б. Г. ТЕРЯЕВ, канд. техн. наук

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ ДЕМОДУЛЯТОРОВ
СИГНАЛОВ ФМ-4 С УЧЕТОМ РАБОТЫ ИХ УСТРОЙСТВ
СИНХРОНИЗАЦИИ И МЕЖСИМВОЛЬНЫХ ПОМЕХ В КАНАЛЕ**

В работе [1] приведена методика исследования помехоустойчивости квазикогерентных демодуляторов сигналов ФМ-4 с учетом флюктуаций опорного колебания и тактовых импульсов на выходе устройств синхронизации — УФОК и УВТИ, а также межсимвольной помехи (МСП), вызванной частотно-ограниченным каналом передачи данных. Ранее приведены выражения для отношения сигнал-помеха на выходе УФОК и УВТИ некоторых типов, которые часто используются в высокоскоростных спутниковых и радиорелейных системах, использующих сигналы с фазовой манипуляцией [2]. По данным работ [1; 2] можно рассчитать безусловную вероятность сбоя символа на выходе демодуляторов с учетом работы их устройств синхронизации, а также МСП и аддитивного шума

в канале, т. е. определить реальную помехоустойчивость модема при наличии указанных причин ухудшения работы системы. Предположим, что в качестве УФОК работает схема с реманипуляцией (схема Стратоновича), а УВТИ — с перемножителем и линией задержки (ЛЗ). Рассмотрим четыре типа радиоканалов: с гауссовой и прямоугольной частотной характеристикой, с треугольной частотной характеристикой спектральной интенсивности импульсной характеристики канала, удовлетворяющей условию отсеченности Найквиста, и канал, обеспечивающий указанную частотную характеристику приподнятого косинуса, также удовлетворяющий условию отсеченности.

Считаем, что эквивалентная энергетическая полоса всех каналов одинакова и вследствие этого выражения отношения сигнал — помеха на выходе УФОК и УВТИ для всех каналов указанного типа также одинаковы [2].

Безусловная вероятность сбоя символа на выходе демодуляторов. Безусловная вероятность сбоя бинарного символа, определяющая помехоустойчивость демодулятора с учетом УФОК, УВТИ, МСП и аддитивного шума, записывается в виде [1]

$$P_{сб} = \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} d\tau \int_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}} d\theta \langle P_{сб} \rangle W(\theta) W(\tau),$$

где $\langle P_{сб} \rangle$ — условная вероятность сбоя символа [1]; $W(\theta), W(\tau)$ — одномерные плотности вероятности флюктуаций фазы опорного колебания (ОК) и тактовых импульсов (ТИ) на выходе УФОК и УВТИ

$$W(\theta) = \frac{2}{\pi} \frac{\exp(D_{оп} \cos 4\theta)}{I_0(D_{оп})}; \quad W(\tau) = \frac{\exp(D_{ти} \cos 2\pi\tau)}{I_0(D_{ти})}, \quad (1)$$

причем

$$-\pi/4 \leq \theta \leq +\pi/4; \quad -\frac{1}{2} \leq \tau \leq +\frac{1}{2};$$

$$\int_{-\pi/4}^{+\pi/4} W(\theta) d\theta \equiv 1; \quad \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} W(\tau) d\tau \equiv 1;$$

$$D_{оп} = 2 \frac{P_c(оп)}{P_n(оп)}; \quad D_{ти} = 2 \frac{P_c(ти)}{P_n(ти)};$$

$P_c(оп) / P_n(оп), P_c(ти) / P_n(ти)$ — отношение сигнал-помеха на выходе УФОК и УВТИ.

Выражения $P_c(оп) / P_n(оп), P_c(ти) / P_n(ти)$ определяются соотношениями (10), (13) работы [2].

Условная вероятность сбоя символа $\langle P_{сб} \rangle$ зависит от импульсной реакции канала $h(m, \tau)$, которая представляет собой нормиро-

ванную переходную функцию огибающей отклика канала на элементарный радиосигнал [1]. Для канала с гауссовой и прямоугольной частотной характеристикой функция $h(m, \tau)$ имеет вид

$$h_2(m, \tau) = \frac{1}{2} [\Phi(\sqrt{2\pi}m|\tau|) - \Phi(\sqrt{2\pi}m(|\tau| - 1))], \quad (2)$$

где $m = \Delta f T_0$; Δf — двухсторонняя частотная полоса пропускания канала; $\Phi(x)$ — интеграл вероятности, $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$;

$$h_n(m, \tau) = \frac{1}{\pi} [\text{si}(\pi m |\tau|) - \text{si}(\pi m (|\tau| - 1))]; \quad (3)$$

$\text{si}x$ — интегральный синус, $\text{si}x = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt$.

Для двух других типов каналов

$$h_n(m, \tau) = \left(\frac{\sin \pi \tau}{\pi \tau} \right)^2 \quad (4); \quad h_{\cos}(m, \tau) = \frac{\sin 2\pi \tau}{2\pi \tau} \frac{1}{1 - 4\tau^2}. \quad (5)$$

Функции (3), (4) удовлетворяют условию отсечетности Найквиста, причем функция (4) в точках $\tau = \pm 1$ проходит через нуль с нулевой производной $\frac{dh_n(m\tau)}{d\tau} = 0$, $\tau = \pm 1$ (6). Этим обеспечивается малый уровень МСП при сдвигах ТИ в отличие от функции (5), которая не удовлетворяет условию (6).

Функции (4), (5) соответствуют значению параметра $m = 2$, поскольку условие Найквиста в частотной области (условие Джибби—Смита) подразумевает жесткую связь между частотой среза и скоростью передачи информации [3]. Поэтому, если для функций (2), (3) имеется свобода изменения параметра m , то для функций (4), (5), удовлетворяющих условию Найквиста, такой возможности нет.

Используя выражения (1)—(5) и функции $W(\Theta)$, $W(\tau)$, рассчитали безусловные вероятности сбой символа, т. е. помехоустойчивость квазикогерентного демодулятора сигналов ФМ-4. Расчеты проводились на ЭВМ ЕС-1020 (рис. 1—4).

На рис. 1—3 изображены каналы с гауссовой, прямоугольной и треугольной частотными характеристиками, на рис. 4 — канал с частотной характеристикой типа приподнятый косинус. При выбранных устройствах синхронизации и сравнительно узкой полосе пропускания ФЭ ($n_{\text{оп}} = n_{\text{ти}} = 0,02$), а также при малом уровне МСП ($m = 1,5—2,0$) все демодуляторы обеспечивают достаточно высокую помехоустойчивость, близкую к потенциальной (рис. 1—4). Уменьшение полосы каналов с гауссовой и прямоугольной характеристиками, когда $m \ll 1$ вызывает резкое снижение

помехоустойчивости, связанное с возрастанием МСП и уменьшением отношения сигнал-помеха на выходе устройств синхронизации. Расширение полосы ФЭ УФОК и УВТИ, если $\rho_{оп} = \rho_{ти} = 0,1$, приводит к снижению помехоустойчивости, однако одновременное увеличение фазовых флюктуаций ОК и ТИ снижает помехоустойчивость модемов с каналами, удовлетворяющими условию Найквиста заметнее, чем с каналами, которые данному условию не удовлетворяют. Особенно это выражено для канала с треугольной частотной характеристикой. Такой результат можно объяснить

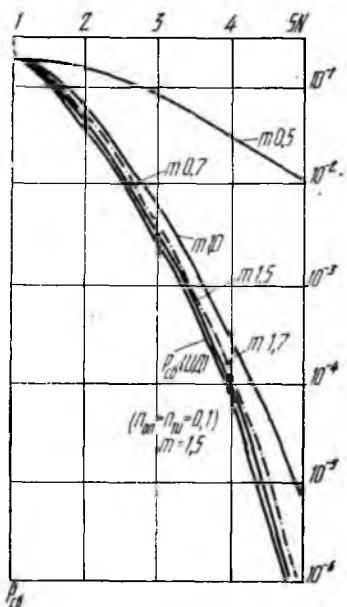


Рис. 1

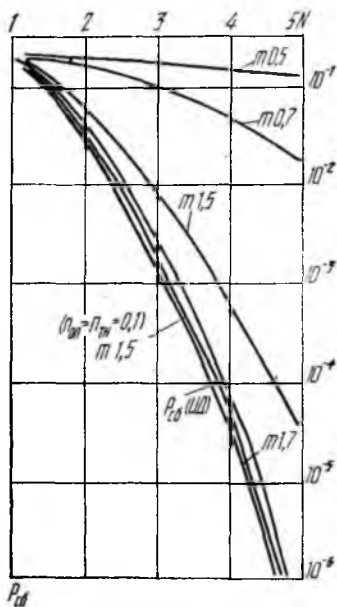


Рис. 2

следующим образом. Несмотря на то, что импульсная функция такого фильтра имеет лучшие свойства в отсчетных точках $\tau \pm 1$ (отсутствие МСП и выполнение условия 6), падение этой функции в окрестности главного максимума $\tau \sim 0$ оказывается больше, чем у функций (2), (3), не удовлетворяющих условию отсечности. В этом нетрудно убедиться, найдя значения функций (2), (3), (4) при $\tau \sim 0$. В результате в моменты стробирования уровень полезного сигнала на выходе фазовых детекторов демодулятора при $\tau \sim 0$ оказывается выше, если каналы не удовлетворяют условию отсечности, хотя уровень МСП от соседних импульсов при $\tau \sim 1$ на выходе таких каналов больше, чем в каналах, удовлетворяющих условию Найквиста. Интегральный эффект таких противоположных явлений приводит к более заметному при увеличении фазовых флюктуаций ОК и ТИ снижению помехоустойчивости модемов с ка-

налами, удовлетворяющими условию отсечности. В меньшей мере этот эффект заметен при фильтре типа приподнятый косинус (см. рис. 1 при $m = 1,7$ и рис. 4).

В канале с прямоугольной частотной характеристикой и сравнительно малым уровнем МСП ($m = 1,5-1,7$) заметен эффект улучшения помехоустойчивости в результате появления отрицательного отклика в точках $\tau = \pm 1$. Так, при передаче дибита 11, когда фаза вектора сигнала во втором тактовом интервале изменяется на 180° по сравнению с фазой сигнала в первом тактовом интервале, нали-

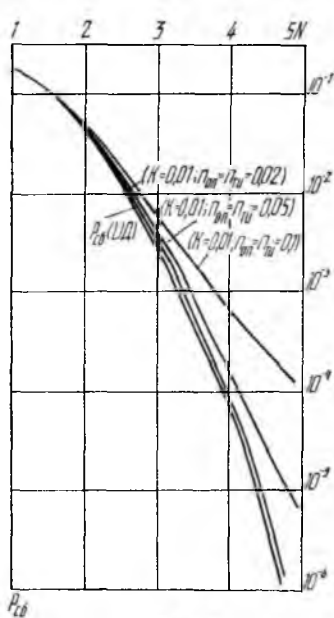


Рис. 3

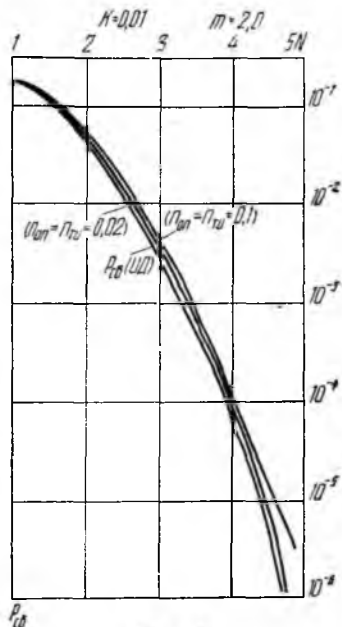


Рис. 4

чие отрицательного отклика от соседнего импульса приведет к увеличению уровня полезного сигнала на выходе фазовых детекторов демодулятора, что вызывает уменьшение вероятности ошибки (см. рис. 2).

Таким образом, одновременный учет работы устройств синхронизации и ограничения полосы канала показал, что применение фильтров, обеспечивающих условие отсечности не приводит к заметному улучшению качества работы демодуляторов, а расширение полосы ФЭ УФОК и УВТИ может вызвать обратный эффект — снижение реальной помехоустойчивости модема.

Полученные результаты представляют практический интерес и могут быть использованы при проектировании систем передачи дискретной информации, использующих сигналы с фазовой манипуляцией.

Список литературы: 1. Теряев Б. Г. Методика исследования помехоустойчивости квазикогерентных демодуляторов ФМ сигналов при учете работы их устройств синхронизации и межсимвольных искажений в линейных каналах // Радиотехника.— 1987.— Вып. 81.—С. 32—36. 2. Кисель В. А. Синтез гармонических корректоров для высокоскоростных систем связи.— М., Связь.— 1979.— 240 с.

Поступила в редколлегию 18.11. 85