# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**С.Н. Ляшенко,**
*начальник Департамента информационных технологий, связи и защиты информации МВД России*

**А.Н. Глушков,**
*кандидат технических наук*

**Е.С. Герасименко**

## СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ И АНАЛИЗ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

## THE SYNTHESIS OF THE DEVICE FOR PROCESSING A FREQUENCY-SHIFT KEYED RADIO SIGNALS IN BACKGROUND NOISE AND ANALYSIS OF ITS CHARACTERISTICS

*Рассматриваются вопросы синтеза устройства обработки частотно-манипулированных радиосигналов с непрерывной фазой и минимальным частотным сдвигом, приводится анализ характеристик его работы.*

*The problems of the synthesis of the device for processing a frequency-shift keyed signals with continuous phase and the minimum frequency shift are considered, the analysis of the characteristics of his work is given.*

**Введение.** Проблема обработки сигналов и создания помехоустойчивой связи актуальна в системах радиосвязи, используемых органами внутренних дел. Устойчивость к различным видам искажений, повышение быстродействия и другие аспекты важны при обнаружении и детектировании радиосигналов.

Помехоустойчивость устройств приема и обработки сигналов важна при поиске новых видов манипуляции радиосигналов, новых способов их приема и обработки.

Вопрос обработки частотно-манипулированных сигналов достаточно актуален в настоящее время, так как для обеспечения высоких показателей качества работы систем радиосвязи органов внутренних дел необходимо оптимизировать существующие параметры этих устройств.

**Цель работы** — разработка устройства эффективной обработки сигналов с частотной манипуляцией, обеспечивающего улучшение спектральных и корреляционных характеристик.

**Основная часть.** При обработке частотно-модулированных сигналов кроме помехоустойчивости важно анализировать форму огибающей радиосигналов. Решение этой задачи повышает её трудоемкость и может привести к увеличению стоимости разработки устройств обработки.

Поэтапно задачу эффективной обработки сигнала можно представить следующим образом:

- разработка эффективных процедур синтеза частотно-манипулированных сигналов;
- разработка процедуры синтеза кодовых последовательностей и коэффициентов весовых фильтров сжатия частотно-манипулированных сигналов;
- оптимизация формы огибающей для апериодических частотно-манипулированных сигналов;
- оценка влияния искажений в канале передачи информации на характеристики частотно-манипулированных сигналов;
- разработка эффективной реализации цифровой обработки частотно-манипулированных сигналов.

Также нужно оптимизировать минимаксные кодовые последовательности для частотно-манипулированных сигналов методом покоординатного спуска по комбинированному критерию приближения. Процедура синтеза частотно-манипулированных сигналов с заданными корреляционными и спектральными свойствами, такими как концентрация в определенной полосе частот помехи, позволит эффективно решить проблему обработки частотно-манипулированных сигналов.

В [1] рассмотрено устройство демодуляции двоичных сигналов с частотной манипуляцией (CPFSK). При демодуляции цифровых сигналов вычитающее устройство (ВУ) в схеме такого устройства необходимо заменить на решающее устройство (РУ), как показано на рис. 1, которое сравнивает отклики амплитудных демодуляторов (АДМ1 и АДМ2) в моменты прихода тактовых синхроимпульсов (ТСИ). Решающее устройство производит сравнение $z1$ и $z2$ или разности z с нулем:

$$z = z2 - z1. \tag{1}$$

Демодулятор m-позиционных частотно-манипулированных сигналов на базе амплитудных демодуляторов АДМ может быть реализован в соответствии со структурной схемой на рис. 2, а. Каждый АДМk ($k = \overline{1,m}$) имеет собственную частоту квантования $f_{кв\,m}$, равную

$$f_{кв\,k} = 4 f_{0k}, \tag{2}$$

где $f_{0k}$ — частота k-й позиции частотно-манипулированного сигнала. Отклики амплитудных демодуляторов $z_k$, $k = \overline{1,m}$, по тактовым синхроимпульсам (ТСИ) поступают в решающее устройство (РУ), которое по максимуму откликов формирует коды (номера частот) принятых символов $V$.

Для бинарных частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой (CPFSK) при условии, что длительность символа $T = N \cdot T_0$, разность частот двоичных посылок $f_2 - f_1$ равна

$$f_2 - f_1 = 2\Delta f = \frac{f_0}{N}. \tag{3}$$

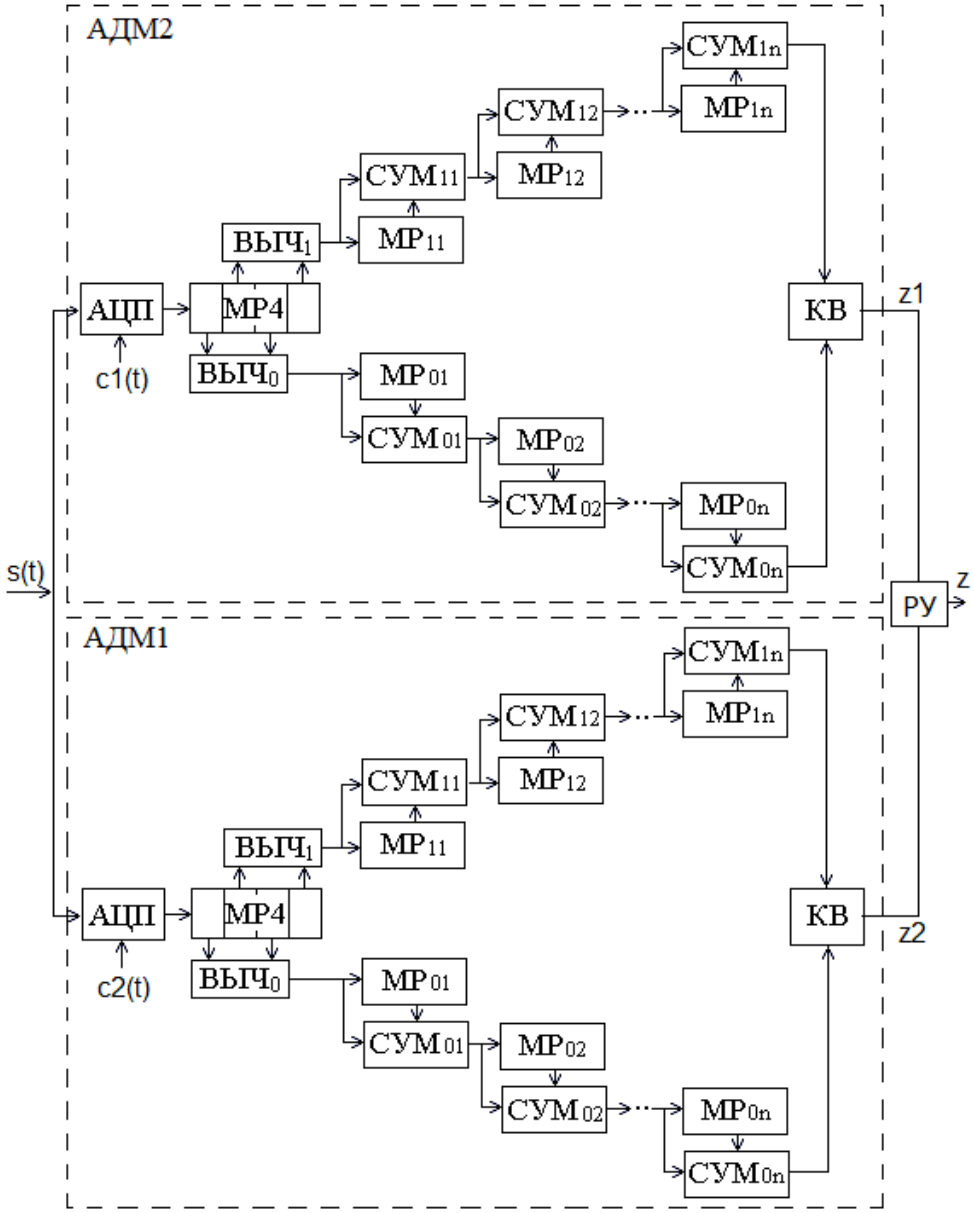


Рис. 1. Структурная схема устройства демодуляции цифровых сигналов

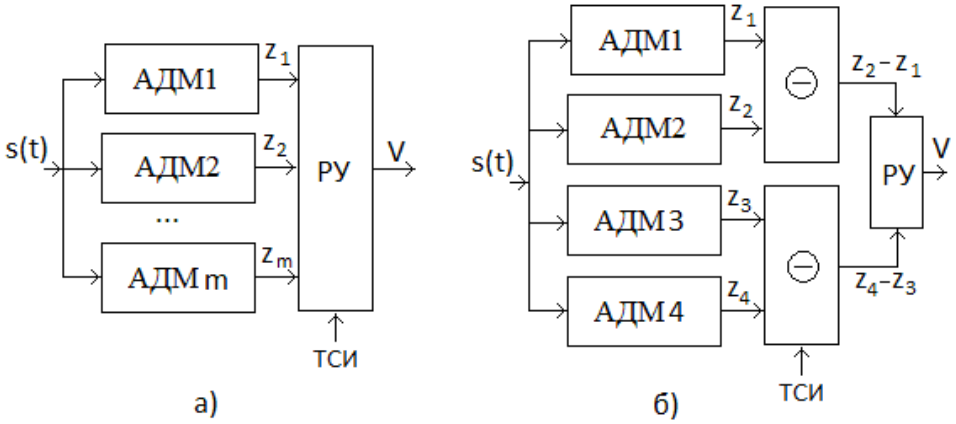


Рис. 2. Структурная схема демодулятора m-позиционных частотно-манипулированных сигналов на базе амплитудных демодуляторов

Частотная характеристика двоичного демодулятора, приведенная на рис. 1, по разностному отклику демодуляторов $z_2 - z_1$ с центральной частотой $f_0 = 10$ МГц и $N = 256$ ($\Delta f = 19{,}6$ кГц) показана на рис. 3, где *H(f)* — коэффициент передачи демодулятора. Решение о принятом символе принимается по знаку величины $z = z2 - z1$.

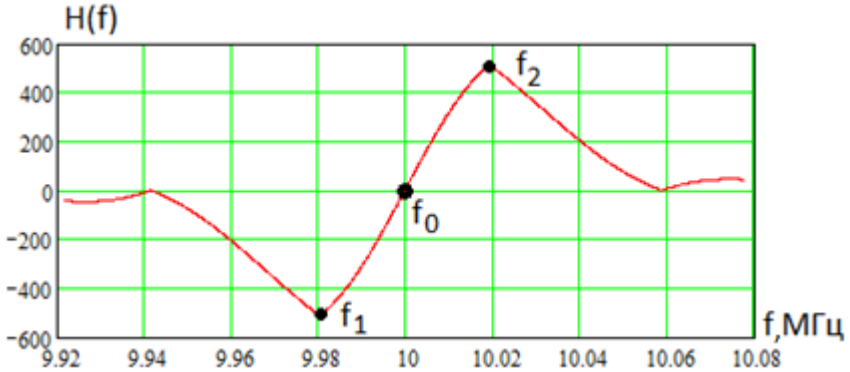


Рис. 3. Частотная характеристика двоичного демодулятора по разностному отклику демодуляторов $z_2 - z_1$ с центральной частотой $f_0 = 10$ МГц и $N = 256$ ($\Delta f = 19{,}6$ кГц)

Для четырехпозиционной частотной манипуляции (ЧМн) с непрерывной фазой m=4 структурная схема демодулятора показана на рис. 2, б. Частоты символов $f_1, f_2, f_3, f_4$ выбираются с постоянным шагом (3) симметрично относительно центральной частоты $f_0$. Отклики амплитудных демодуляторов вычитаются,

$$\begin{cases} z_{12} = z_2 - z_1, \\ z_{34} = z_4 - z_3, \end{cases} \tag{4}$$

и по знакам разностей в решающем устройстве принимаются решения о принятой частотной позиции. Для частот символов сигналов с CPFSK получим

$$f_2 - f_1 = f_3 - f_2 = f_4 - f_3 = \frac{f_0}{N}. \qquad (5)$$

На рис. 4 показаны частотные характеристики каналов $z_1$ (сплошная линия), $z_2$ (пунктир), $z_3$ (штрихпунктирная линия) и $z_4$ (точечная линия) для схемы рис. 2, б при $f_0$=10 МГц и $N = 256$.

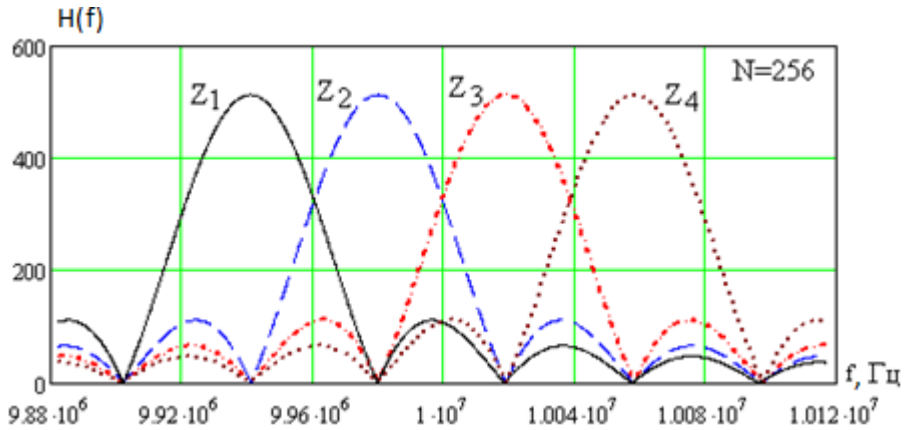


Рис. 4. Частотные характеристики каналов

Частотные характеристики $H_{12}(f)$ и $H_{34}(f)$ разностей $z_{12}$ и $z_{34}$ показаны на рис. 5 при тех же параметрах, что и на рис. 3. Видно, что при наличии одного из сигналов с частотами $f_1, f_2, f_3$ или $f_4$ реакция других каналов равна нулю.

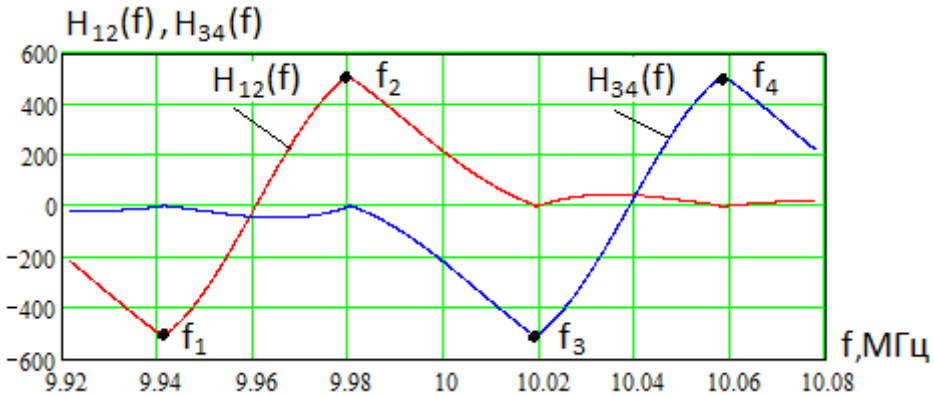


Рис. 5. Частотные характеристики $H_{12}(f)$ и $H_{34}(f)$ разностей $z_{12}$ и $z_{34}$

Как видно, частотные характеристики соседних каналов сильно перекрываются, но значения откликов на центральных частотах не равны нулю только для одного из каналов.

На рис. 6 представлены нормированные результаты имитационного моделирования демодулятора сигнала с бинарной CPFSK при $f_0 = 10$ МГц, $N = 256$, $T = N \cdot T_0 = 25{,}6$ мкс (V=39,1 кбод), $\Delta f = 19{,}5$ кГц (3). Его АЧХ показана на рис. 3. Пунктиром показан модулирующий сигнал, а точками — моменты принятия решения по импульсам тактовой синхронизации.

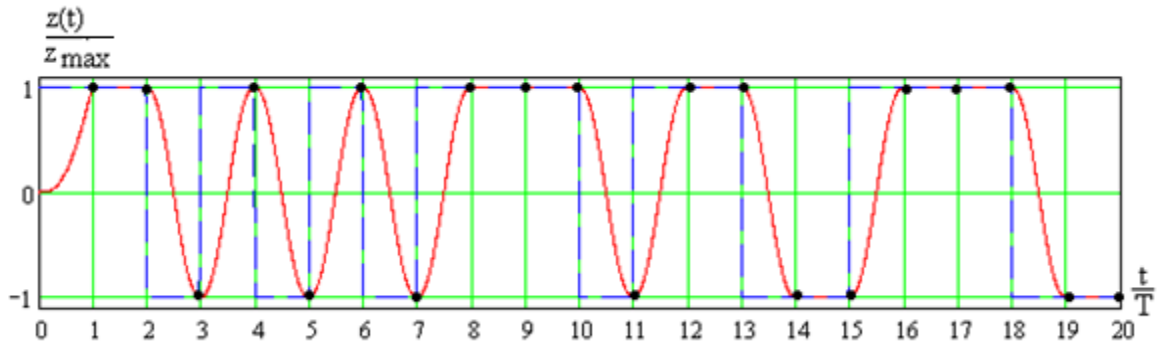


Рис. 6. Нормированные результаты имитационного моделирования демодулятора частотно-манипулированного сигнала

Как видно, рассмотренный демодулятор сигналов с CPFSK выделяет принимаемые информационные символы с максимальной эффективностью.

Однако такие быстрые алгоритмы демодуляции имеют неудовлетворительные частотные характеристики для сигналов с минимальным частотным сдвигом (MSK и GMSK) при величине $\Delta f$ равной

$$\Delta f = \frac{f_0}{4N}, \tag{6}$$

пример показан на рис. 7.

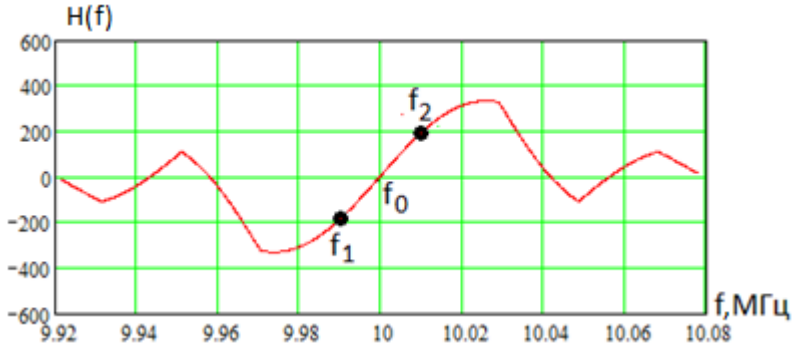


Рис. 7. Частотные характеристики для сигналов с минимальным частотным сдвигом (MSK и GMSK) при величине $\Delta f$, равной $\Delta f = \frac{f_0}{4N}$

Таким образом, условие (6) при $T = N \cdot T_0$ приводит к сильному перекрытию частотных характеристик амплитудных демодуляторов в схеме на рис. 1, что затрудняет разделение сигналов различных частотных посылок. Результаты имитационного моделирования демодулятора сигнала с бинарной MSK, аналогичные показанным на рис. 6, представлены на рис. 8. Как видно, при условии (6) резко (в 2,75 раза) падает амплитуда отклика демодулятора, что приведет к потере его помехоустойчивости.

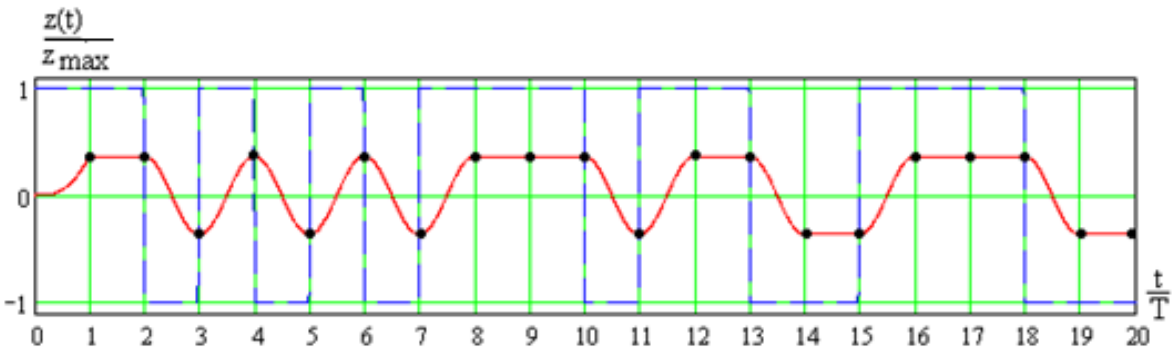


Рис. 8. Результаты имитационного моделирования демодулятора сигнала с бинарной MSK

Демодуляцию сигнала с MSK и GMSK можно реализовать и при

$$\Delta f = \frac{f_0}{2N} \tag{7}$$

(как для сигналов с CPFSK согласно (3)), если выбрать длительность информационного символа равной

$$T = \frac{N \cdot T_0}{2}, \tag{8}$$

то есть в два раза меньше продолжительности $N \cdot T_0$ обрабатываемой выборки отсчетов. При этом в амплитудных демодуляторах накапливаются отсчеты от двух информационных символов и если символы одинаковы, то отклик становится максимальным, а если противоположны, то они взаимно компенсируются и отклик равен нулю.

Результаты имитационного моделирования демодулятора сигнала с бинарной MSK при условии (8), аналогичные показанным на рис. 6 и рис. 8, представлены на рис. 9. Как видно, при обработке противоположных информационных символов амплитуда отклика в два раза меньше, чем для одинаковых символов. Решения можно принимать со смещением во времени на величину $T$ согласно (8), связь моментов тактирования показана на рис. 9 отрезками прямых линий.

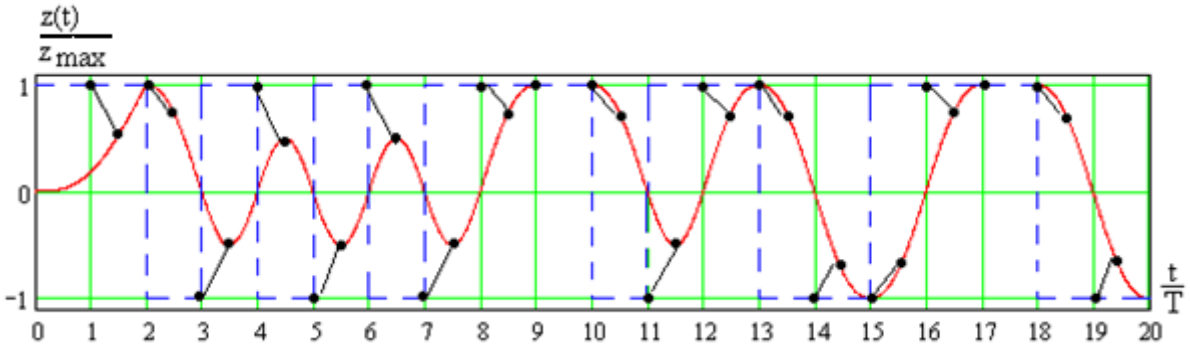


Рис. 9. Связь моментов тактирования

В целом необходимо констатировать, что рассматриваемое устройство частотной демодуляции не оптимально для сигналов с MSK и GMSK.

Результаты имитационного моделирования демодулятора четырехкратной частотной манипуляции (FSK), структурная схема которого показана на рис. 2,б, для модулирующей

последовательности $S_n$ ($n$ — номер символа) на рис. 10 представлены на рис. 11 при длительности модулирующего сигнала, равной $2NT_0$ (в два раза больше минимального значения) без шумов при $f_0 = 10$ МГц, $N = 256$ и $\Delta f = \frac{f_0}{2N} = 19{,}53$ кГц.

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sn | 1 | -3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | -1 | 3 | -3 | -3 | 3 | -3 | 3 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

Рис. 10. Модулирующая последовательность $S_n$

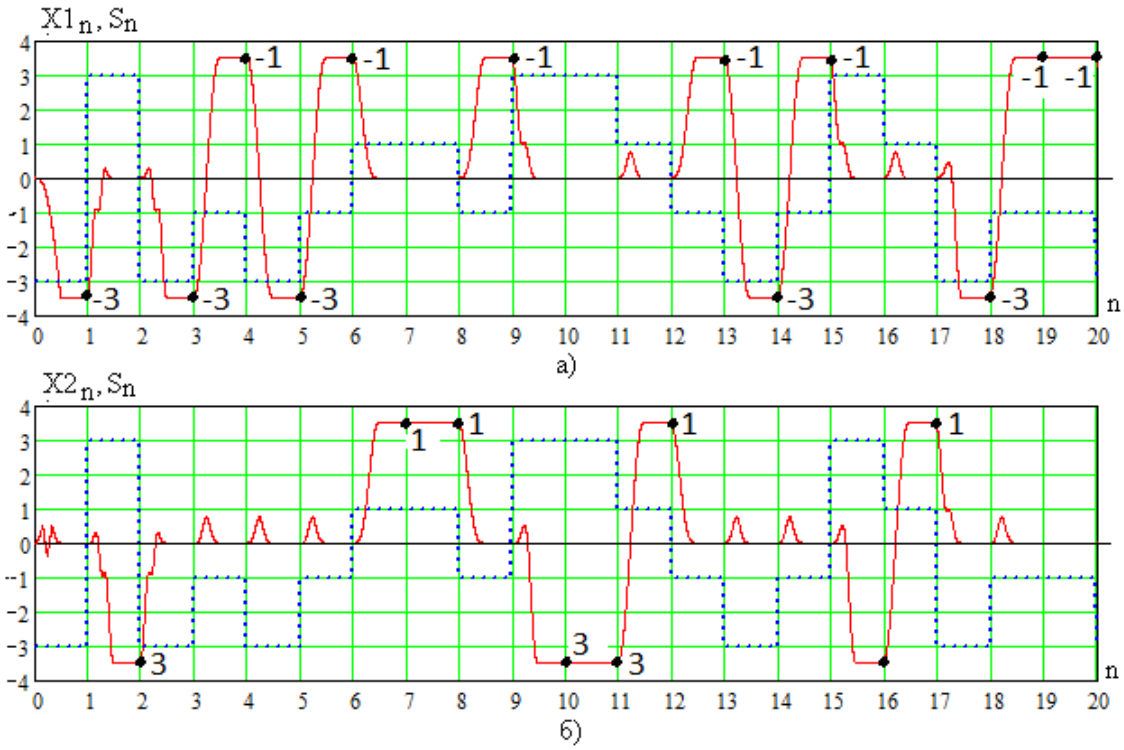


Рис. 11. Результаты имитационного моделирования демодулятора FSK

Точками на рис. 11 отмечены моменты принятия решения о принятом символе, рядом приведены значения символов в соответствии с рис. 9 для выбранной кодировки частот. На рис. 11,а показана зависимость разности откликов амплитудных демодуляторов АДМ1 и АДМ2 (рис. 2,б) $X1_n = z2 - z1$ (сплошная линия) и модулирующего сигнала $S_n$, принимаются решения о том, что принятый символ равен -3 или -1. На рис. 11б показаны аналогичные зависимости для амплитудных демодуляторов АДМ3 и АДМ4, $X2_n = z4 - z3$ и принимаются решения о том, что принятый символ равен 1 или 3.

В моменты принятия решения о принятом символе в одном из каналов $X1_n$ или $X2_n$ в другом имеются нулевые значения отклика, что свидетельствует об ортогональности обрабатываемых сигналов. Наблюдается слабое взаимное проникновение откликов $X1$ и $X2$.

На рис. 12 показаны аналогичные зависимости при длительности модулирующего сигнала, равной $NT_0$ (минимальное значение для бинарного сигнала CPFSK). Как видно, и в этом случае обеспечивается оптимальная демодуляция четырехпозиционного сигнала с частотной манипуляцией.

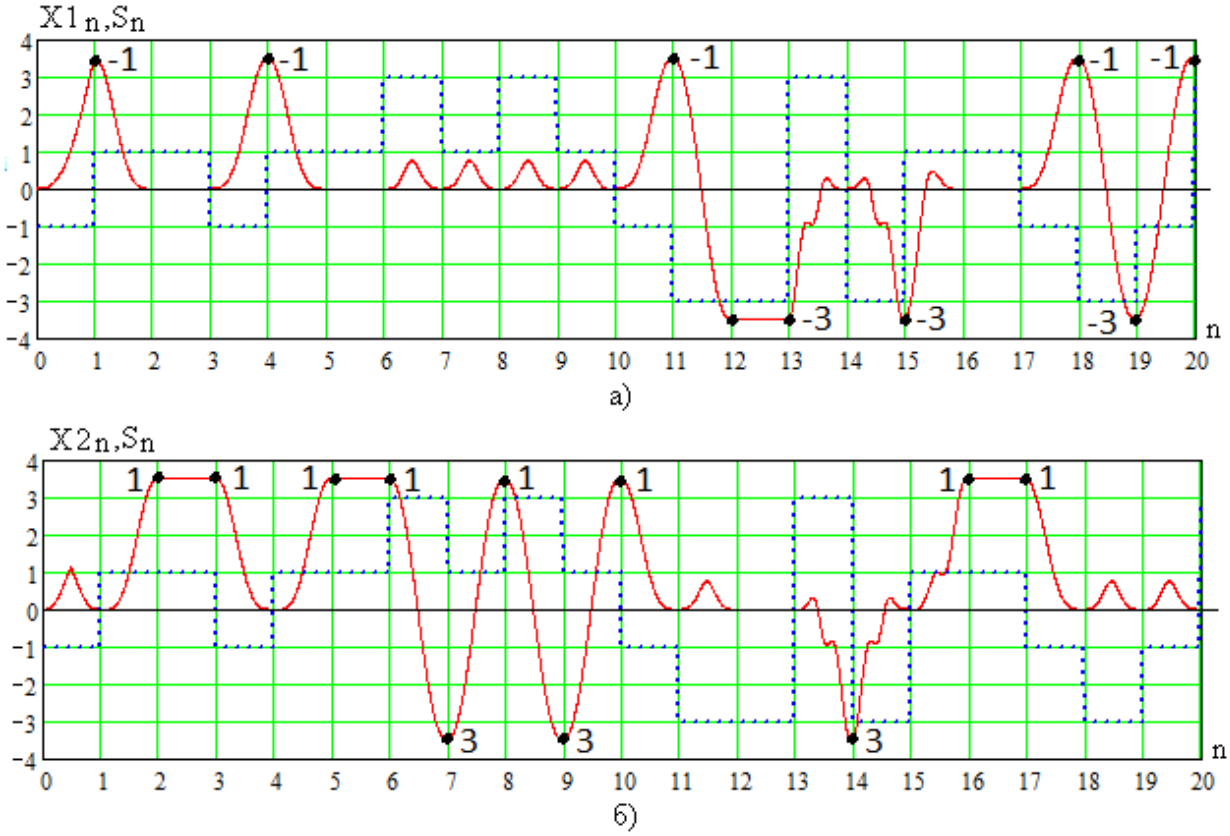


Рис. 12. Зависимости разности откликов амплитудных демодуляторов

**Выводы.** Разработанное устройство частотной демодуляции для сигналов с минимальным частотным сдвигом (MSK и GMSK) показывает хорошие характеристики при длительности информационного сигнала $T = \frac{N \cdot T_0}{2}$, однако не оптимально при $\Delta f = \frac{f_0}{4N}$, так как в связи с сильным перекрытием частотных характеристик амплитудных демодуляторов затрудняется разделение сигналов различных частотных посылок.

Оптимальная демодуляция четырехпозиционного сигнала с частотной манипуляцией при использовании предложенного устройства обеспечивается в случае, если длительность модулирующего сигнала равна $NT_0$ (минимальное значение для бинарного сигнала CPFSK).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушков А. Н., Сидоров А. В., Хохлов Н. С. Помехоустойчивость цифрового устройства демодуляции дискретных сигналов с частотной модуляцией // Вестник Воронежского института МВД России. — 2015. — №1. — С. 273—277.

2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М. : Радио и связь, 2006. — 608 с.

3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

REFERENCES

1. Glushkov A. N., Sidorov A. V., Hohlov N. S. Pomehoustojchivost' cifrovogo ustrojstva demoduljacii diskretnyh signalov s chastotnoj moduljaciej // Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. — 2015. — №1. — S. 273—277.
2. Gonorovskij I. S. Radiotehnicheskie cepi i signaly. — M. : Radio i svjaz', 2006. — 608 s.
3. Sergienko A. B. Cifrovaja obrabotka signalov. – SPb. : BHV-Peterburg, 2011. — 768 s.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ляшенко Сергей Николаевич. Начальник Департамента информационных технологий, связи и защиты информации МВД России.
E-mail: lsn1967@yandex.ru
Россия, 119049, г. Москва, улица Житная, 16. Тел. (495) 667-73-13.

Глушков Алексей Николаевич. Доцент кафедры инфокоммуникационных систем и технологий. Кандидат технических наук.
Воронежский институт МВД России.
E-mail: anglush@rambler.ru
Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 200-52-31.

Герасименко Евгений Сергеевич. Адъюнкт кафедры инфокоммуникационных систем и технологий.
Воронежский институт МВД России.
E-mail: jenya35353@yandex.ru
Россия, 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53. Тел. (473) 200-52-31.

Lyashenko Sergey Nikolaevich. Head of Department of information technologies, communications and information security of the Ministry of the Interior of Russia.
E-mail: lsn1967@yandex.ru
Work address: Russia, 119049, Moscow, Zhitnaya Str. , 16. Tel. (495) 667-73-13.

Glushkov Alexey Nikolaevich. Assistant professor of the chair of Communication Systems and Technologies. Candidate of technical sciences.
Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.
E-mail: anglush@rambler.ru
Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473) 200-52-31.

Gerasimenko Evgeniy Sergeevich. Post-graduate cadet of the chair of Communication Systems and Technologies.
Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia.
E-mail: jenya35353@yandex.ru
Work address: Russia, 394065, Voronezh, Prospect Patriotov, 53. Tel. (473) 200-52-31.

**Ключевые слова**: частотная манипуляция; цифровая двоичная модуляция; цифровая обработка сигнала; устройство обработки сигнала.

**Key words**: frequency shift keying; binary digital modulation; digital signal processing; signal processing device.

**УДК 621.391**