

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЧМН-2 СИГНАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ КОСВЕННОГО ТИПА

Введение

В системах цифровой радиосвязи для передачи сообщений через радиоэфир может применяться метод частотной манипуляции (ЧМн). В том случае, когда сообщение представляет собой последовательность двоичных информационных символов, каждому из которых соответствует радиоимпульс с определенной частотой несущей на выходе модулятора, имеем дело с двоичной ЧМн (ЧМн-2).

В качестве такого модулятора, который позволяет получить сигнал ЧМн-2, можно использовать синтезатор частот (СЧ) косвенного типа на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1]. Базовая структурная схема такого косвенного СЧ приведена на рис. 1, где ЭГ – эталонный генератор; ФД – фазовый детектор; Ф – фильтр; ПГ – подстраиваемый генератор; ДПКД – делитель частоты с переменным коэффициентом деления N .

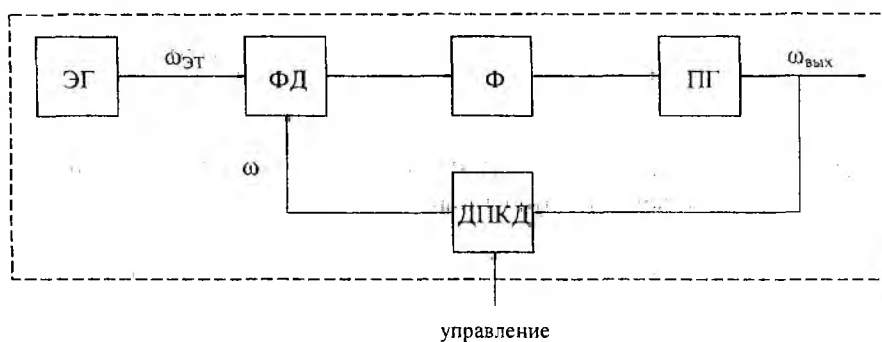


Рис. 1

Однако сигнал на выходе такого ЧМн-2 манипулятора будет отличаться от эталонного варианта ЧМн-2 сигнала. Инерционность контура ФАПЧ приводит к наличию переходных процессов по частоте в системе. Вследствие этого выходной сигнал рассматриваемой модели двоичного частотного манипулятора будет представлять собой последовательность не из двух типов радиоимпульсов с частотами радиозаполнения ω_1 или ω_2 , которые остаются постоянными на протяжении всей длительности радиоимпульса, как в эталонном варианте ЧМн-2 сигнала, а уже из четырех типов радиоимпульсов $s_{ij}(t)$ [1], где первый индекс определяется значением частоты, с которой начинается перестройка по частоте, а второй индекс определяется значением частоты, на которой эта перестройка заканчивается. Если в системе выполнены определенные условия устойчивости [2], тогда будут возможны только три типа режима переходных процессов по частоте: 1 – аperiodический, 2 – критический, 3 – квазипериодический (здесь и далее перечисленные типы режимов переходных процессов будут обозначаться этими же цифрами).

Постановка задачи

Ставится задача получения характеристик качества приема полученных с помощью СЧ косвенного типа ЧМн-2 сигналов и сравнения их между собой в различных режимах переходных процессов по частоте и со случаем эталонного ЧМн-2 сигнала. В системах цифровой радиосвязи качество приема обычно оценивается помехоустойчивостью. Количественно помехоустойчивость определяется вероятностью ошибки при приеме одного символа. Помехоустойчивость будем определять в условиях передачи сигналов по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). В данном случае будем считать, что канал связи стационарен и не вносит собственных искажений. Примем, что последовательность информа-

ционных манипулирующих символов является последовательностью независимых равновероятных двоичных символов. Кроме математической модели канала для определения параметров помехоустойчивости необходимо задать способ приема сигналов [3 – 6].

Результаты

Рассмотрим сначала когерентный прием двух сигналов. Это соответствует случаю, когда приемник имеет два канала обработки входного сигнала, рассчитанных на два эталонных типа радиоимпульсов с различной, но постоянной частотой заполнения.

Для случая приема эталонного ЧМн-2 сигнала вероятности ошибок

$$P_{\text{ош}} = \sum_i P\left(\hat{s}_j, s_i\right) = \sum_i P\left(\hat{s}_j / s_i\right) \cdot P\left(s_i\right), \quad i, j \in \{1, 2\} \quad i \neq j, \quad (1)$$

где s_i – переданный по каналу сигнал; \hat{s}_j – сигнал, в пользу которого было принято решение

о его передаче по каналу; $P\left(\hat{s}_j / s_i\right) = 0.5 - \Phi\left[\sqrt{h^2 \cdot (\rho_{ii} - \rho_{ji})}\right]$; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$;

$h^2 = \frac{E}{N_0}$; $E = \int_{\tau} s_i^2(t) dt$; $\rho_{ij} = \frac{1}{E} \cdot \int_{\tau} s_i(t) \cdot s_j^*(t) dt$, N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума.

В случае приема ЧМн-2 сигнала исследуемой модели частотного манипулятора вероятности ошибок будут определяться уже иным выражением:

$$P_{\text{ош}} = \sum_j \sum_k P\left(\hat{s}_{ii}, s_{jk}\right) = \sum_j \sum_k P\left(\hat{s}_{ii} / s_{jk}\right) \cdot P\left(s_{jk}\right), \quad i, j, k \in \{1, 2\} \quad i \neq k, \quad (2)$$

где

$$P\left(\hat{s}_{ii} / s_{jk}\right) = 0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{kkk} - \rho_{kii}} \cdot (\rho_{kjk} - \rho_{ijk})}\right]; \rho_{ijk} = \frac{1}{E} \cdot \int_{\tau} s_{ii}(t) \cdot s_{jk}^*(t) dt.$$

На рис. 2 представлены зависимости $P_{\text{ош}}(h^2)$ для эталонного ЧМн-2 сигнала и ЧМн-2 сигналов во всех трех вариантах режимов переходных процессов по частоте заполнения при одинаковой относительной длительности переходного процесса по частоте $\varepsilon_{\tau} = 0.4$ (рис. 2, а) и зависимости $P_{\text{ош}}(\varepsilon_{\tau})$ для сигналов во всех трех вариантах режимов переходных процессов по частоте при одинаковом значении параметра $h^2 = 30$ (рис. 2, б). Относительная длительность переходного процесса

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{t_x}{\tau}, \quad (3)$$

где τ – длительность радиоимпульса; t_x – длительность переходного процесса [7].

Как следует из анализа графиков, приведенных на рис. 2, а, эталонный вариант ЧМн-2 сигнала обладает наилучшей помехоустойчивостью. А сигналы с перестройкой по частоте в различных режимах при одинаковой длительности переходного процесса обладают существенными различиями по помехоустойчивости. Это объясняется следующим. Пусть допустимая величина нестабильности по частоте выходного сигнала, определяющая длительность переходного процесса, настолько мала, что после окончания переходного процесса отклонения частоты можно пренебречь. Однако даже в этом случае каждый тип режима переходного процесса по частоте определяет свою, отличающуюся от других, кривую переходного процесса. Следовательно, в каждом из режимов переходной процесс приходит в момент своего окончания со своим набегом по фазе, т. е. имеем дело с когерентным приемом в условиях возможного рассогласования по фазе.

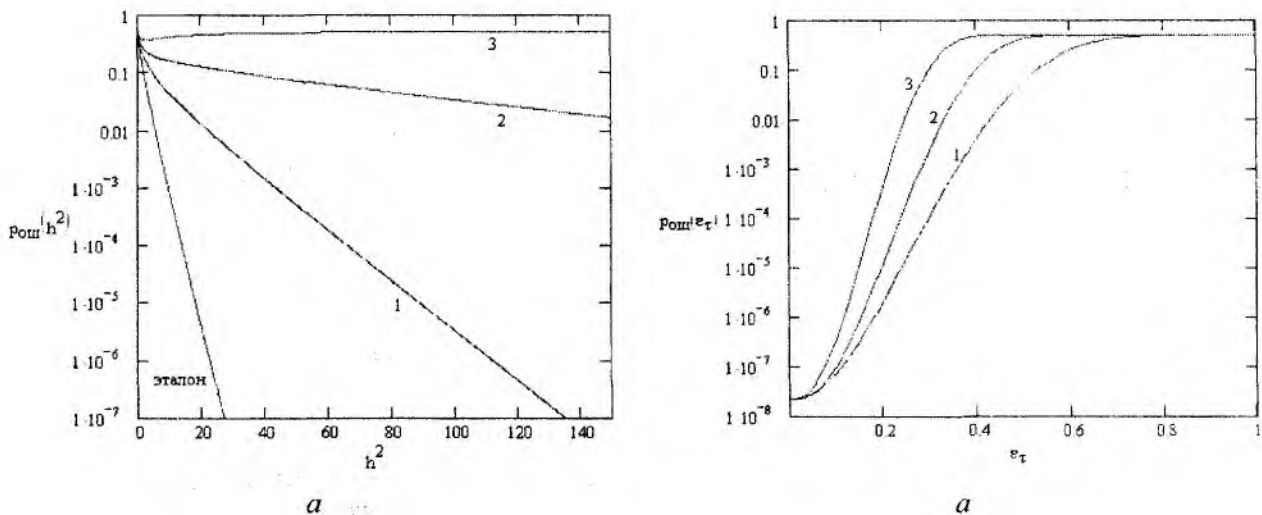


Рис. 2

Графики, приведенные на рис. 2, б, показывают, что помехоустойчивость ЧМн-2 сигналов с переходными процессами по частоте в любом режиме в данном способе приема существенно зависит от длительности переходного процесса.

Оба рассмотренных эффекта, иллюстрируемых графиками на рис. 2, а, б, являются нежелательными. Есть два пути их устранения. Оба связаны с переходом к альтернативным способам приема. Первый путь заключается в переходе от когерентного приема двух сигналов к когерентному приему уже всех четырех сигналов, когда приемник имеет четыре канала обработки входного сигнала, рассчитанных на все четыре возможных в радиозфере типа радиоимпульсов. Второй путь связан с использованием некогерентного способа приема.

Возвращаясь к когерентному приему двух сигналов, необходимо заметить, что для сравнения свойств помехоустойчивости ЧМн-2 сигналов в различных режимах переходного процесса по частоте радиозаполнения между собой недостаточно двух двумерных графиков, представленных на рис. 2. Для этого желательно сравнивать между собой вероятности ошибок как функции двух переменных – $p_{ош}(h^2, \epsilon_{\tau})$. Соответствующие трехмерные графики приведены на рис. 3. Ось функции прологарифмирована, а оси аргументов промасштабированы следующим образом: $h^2 \in [0, 150]$; $\epsilon_{\tau} \in [0, 1]$.

Из сравнения приведенных на рис. 3 поверхностей видно, что поверхность, соответствующая аperiodическому режиму переходного процесса по частоте лежит не выше, чем поверхности, соответствующие двум остальным режимам, а поверхность, соответствующая критическому режиму, лежит не выше, чем поверхность, соответствующая квазипериодическому режиму. Таким образом, при фиксированном значении параметра h^2 и относительной длительности переходного процесса ϵ_{τ} оптимальным режимом переходного процесса по частоте радиозаполнения ЧМн-2 сигналов, формируемых СЧ косвенного типа, является аperiodический режим, а самым худшим – квазипериодический по критерию вероятности ошибки при одиночном когерентном приеме двух сигналов в условиях передачи по каналу с АБГШ.

Перейдем теперь к рассмотрению уже упомянутого выше когерентного способа приема всех четырех возможных типов сигналов для данной модели двоичного частотного манипулятора. В данном случае вероятность ошибки будет определяться выражением

$$P_{ош} = \sum_i \sum_j \sum_k P \left(\hat{s}_{kn}, s_{ij} \right) = \sum_i \sum_j \sum_k P \left(\hat{s}_{kn} / s_{ij} \right) \cdot P \left(s_{ij} \right), \quad i, j, k, n \in \{1, 2\} \quad j \neq n, \quad (4)$$

$$\text{где } p\left(\hat{s}_{kn}/s_{ij}\right) \approx \left(0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{knkn} - \rho_{knij}}} \cdot (\rho_{ijij} - \rho_{knij})\right]\right) \times \\ \times \left(0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{knkn} - \rho_{knin}}} \cdot (\rho_{inkn} - \rho_{knkn})\right]\right) \cdot \left(0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{knkn} - \rho_{knkj}}} \cdot (\rho_{kjkn} - \rho_{knkn})\right]\right),$$

или

$$p\left(\hat{s}_{in}/s_{ij}\right) \approx \left(0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{inin} - \rho_{inij}}} \cdot (\rho_{ijij} - \rho_{inij})\right]\right) \times \\ \times \left(0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{inin} - \rho_{inkn}}} \cdot (\rho_{knin} - \rho_{inin})\right]\right) \cdot \left(0.5 - \Phi\left[\sqrt{\frac{h^2}{\rho_{inin} - \rho_{inkj}}} \cdot (\rho_{kjkn} - \rho_{inin})\right]\right), \\ i, j, k, n = \{1, 2\}, \quad j \neq n, \quad i \neq k; \quad \rho_{ijkn} = \frac{1}{E} \cdot \int_{\tau} s_{ij}(t) \cdot s_{kn}^*(t) dt, \quad i, j, k, n \in \{1, 2\}.$$

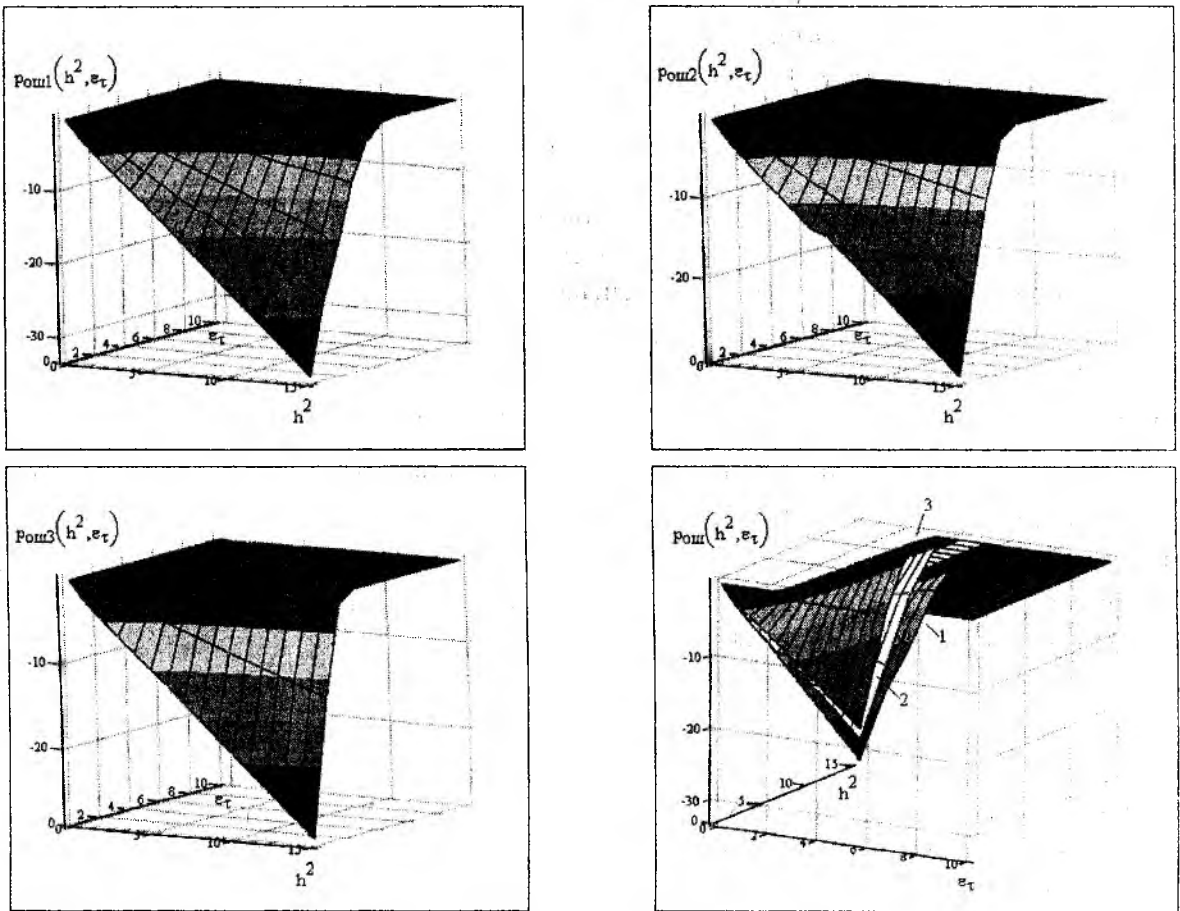


Рис. 3

На рис. 4 представлены зависимости $p_{ou}(h^2)$ для эталонного ЧМН-2 сигнала и ЧМН-2 сигналов во всех трех вариантах режимов переходных процессов по частоте при одинаковой относительной длительности переходного процесса по частоте $\epsilon_{\tau} = 0.4$ (рис. 4, а) и зависимости $p_{ou}(\epsilon_{\tau})$ для сигналов во всех трех вариантах режимов переходных процессов по частоте при одинаковом значении параметра $h^2 = 30$ (рис. 4, б).

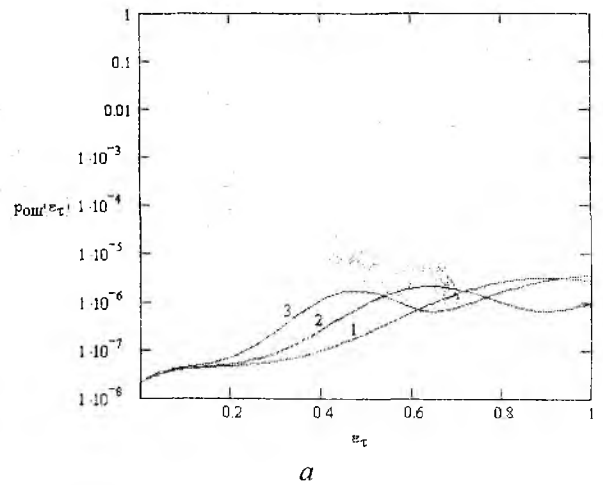
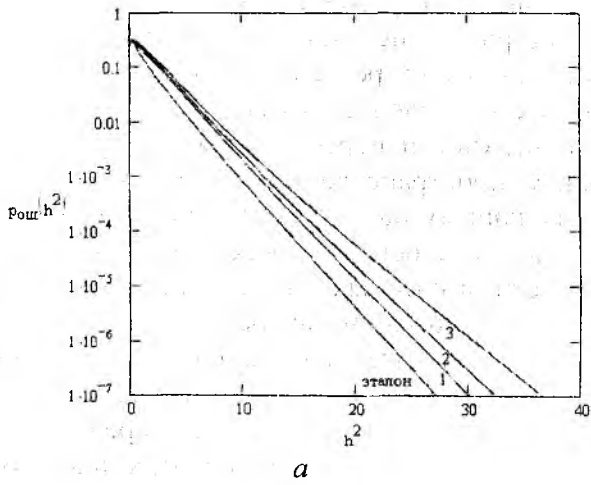


Рис. 4

Сравнивая между собой соответствующие зависимости, приведенные на рис. 2 и 4, можно убедиться, что переход от когерентного способа приема двух сигналов к когерентному способу приема четырех сигналов позволил существенно улучшить характер обеих зависимостей. Теперь свойства помехоустойчивости рассматриваемых ЧМн-2 сигналов в различных режимах переходных процессов по частоте при фиксированной относительной длительности переходного процесса не так сильно различаются между собой. Кроме того, помехоустойчивость этих сигналов стала не так чувствительна к длительности самого переходного процесса по частоте.

Здесь для сравнения ЧМн-2 сигналов в различных режимах переходного процесса по частоте радиозаполнения между собой целесообразно перейти к вероятности ошибки как функции двух переменных. Соответствующие трехмерные графики для данного способа приема приведены на рис. 5.

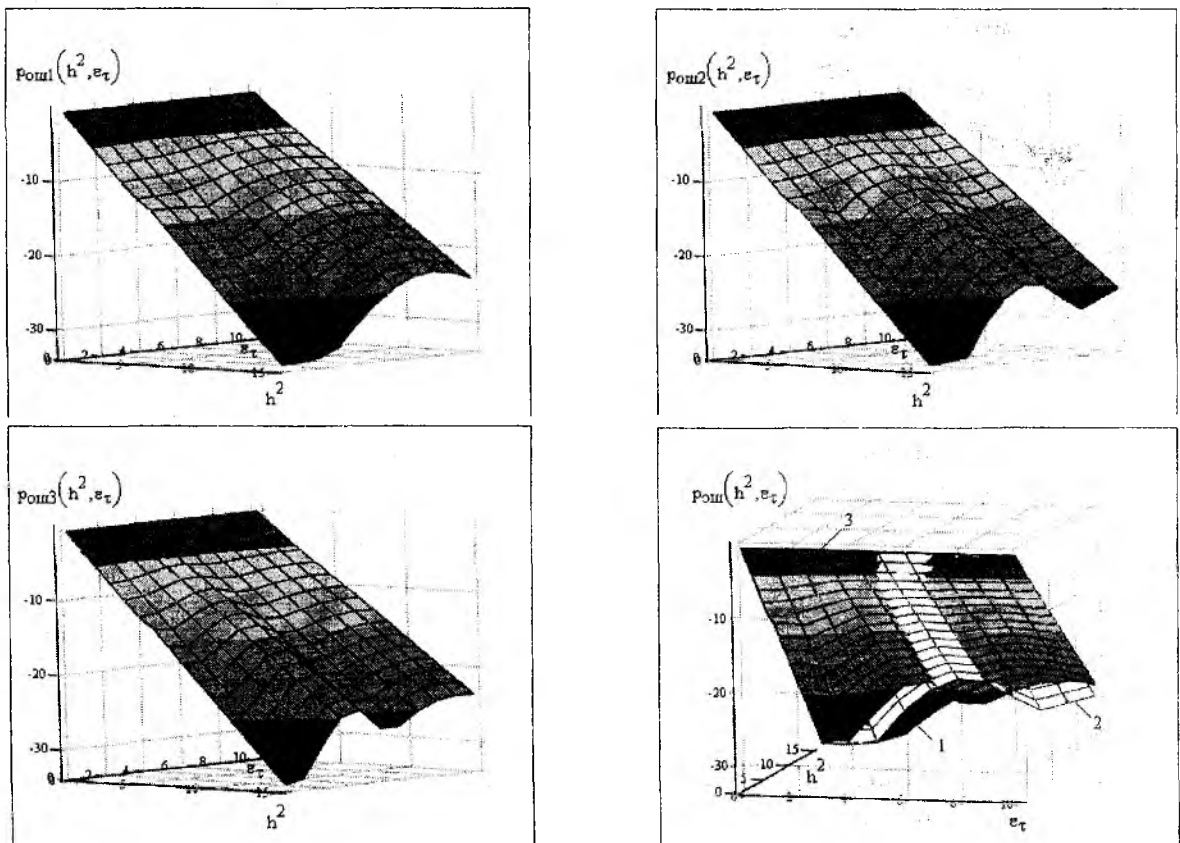


Рис. 5

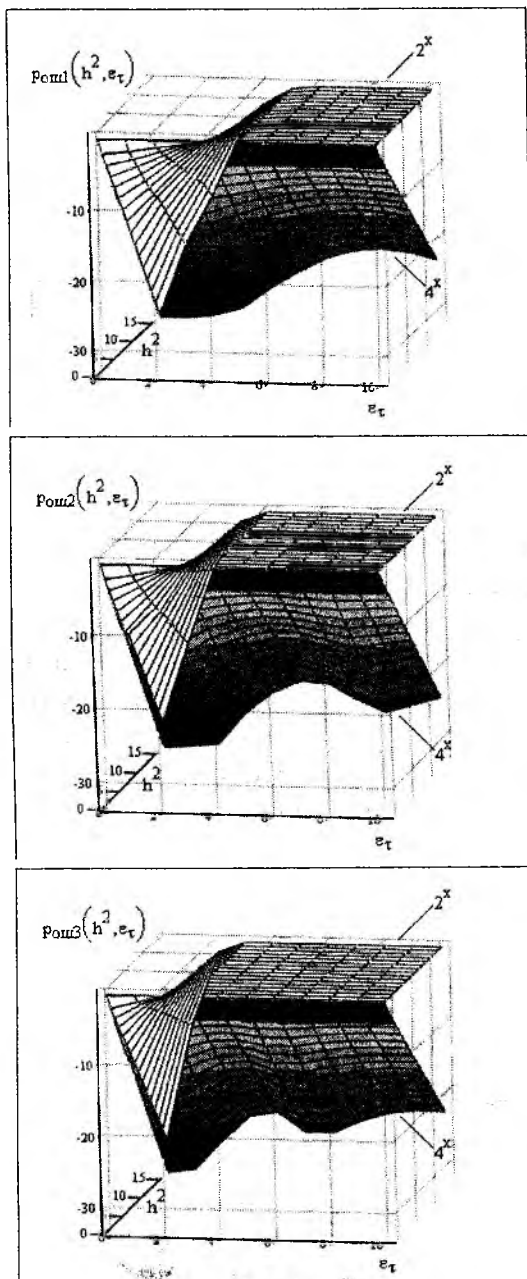


Рис. 6

Сравнение между собой поверхностей, приведенных на рис. 5, не дает однозначного ответа на вопрос, какому из режимов переходного процесса по частоте следует отдать предпочтение. Все три поверхности пересекаются между собой по сложным пространственным кривым. Проекциями этих кривых на плоскость аргументов являются сложные плоские кривые, определяющие собою области, в которых оптимальным является использование того или иного режима переходного процесса по частоте заполнения по критерию вероятности ошибки при одиночном когерентном приеме четырех сигналов в условиях передачи по каналу с АБГШ. Для нахождения этих плоских кривых необходимо приравнять между собой вероятности ошибок для ЧМн-2 сигналов в соответствующих режимах переходных процессов по частоте как функции двух аргументов. Получившееся равенство является уравнением с двумя неизвестными – переменными, которое представляет собой неявно заданную функцию одного из аргументов от другого.

Также определенный интерес представляет сравнение свойств помехоустойчивости исследуемой модели ЧМн-2 сигналов при фиксированном режиме переходного процесса по частоте радиозаполнения, но для различных способов приема. На рис. 6 представлены графики, на которых поверхность 2^x соответствует когерентному приему двух сигналов, а поверхность 4^x – когерентному приему четырех сигналов.

Результаты сравнения поверхностей показывают, что при фиксированной паре параметров h^2 и ϵ_τ и определенном варианте режима переходного процесса по частоте радиозаполнения, в условиях передачи ЧМн-2 сигналов исследуемой модели частотного манипулятора по каналу

с АБГШ когерентный прием четырех сигналов не хуже когерентного приема двух сигналов по критерию вероятности ошибки одиночного приема. Из приведенных графиков видно, что при стремлении относительной длительности переходного процесса по частоте заполнения к нулю в любом режиме переходного процесса обе поверхности сходятся в одну линию, соответствующую зависимости $P_{ош}(h^2)$ для когерентного приема эталонного ЧМн-2 сигнала (рис. 2, а), что полностью соответствует исходному представлению. Если же длительность переходного процесса по частоте заполнения радиоимпульсов значительная, то когерентный способ приема четырех сигналов дает существенный выигрыш по вероятности ошибки элементарного приема.

Автор выражает признательность проф. А.Н. Зеленину, доц. Д.В. Бондарю и проф. Ю.И. Волощуку за полезные советы и ценные замечания, высказанные в процессе работы над материалом данной статьи.

Список литературы: 1. Сыроветник В.С. Оценка спектральных характеристик ЧМн-2 сигналов, формируемых с помощью синтезатора частот косвенного типа // Восточно-Европейский журнал пе-

редовых технологий. 2009. 3/5. 2. Андронов А.А., Витт А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981. 568 с. 3. Волощук Ю.И. Сигналы и процессы в радиотехнике: Учебник для вузов. Харьков: ХНУРЭ, 2003. 648 с. 4. Зюко А.Г. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 304 с. 5. Пенин П.И. Системы передачи цифровой информации: Учеб. пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1976. 368 с. 6. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966. 678 с. 7. Сыроветник В.С., Бондарь Д.В., Зеленин А.Н. Особенности использования относительной неустойчивости частоты VCO в оценке динамических характеристик FS на основе PLL // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. 5/2. с. 68-71.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.05.2009