



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО КАНАЛА СОТОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОСТИ

С.В. Шапырина, курсант

e-mail: sofiyavladimirovna01@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический
университет»

В статье представлены результаты моделирования цифрового канала сотовой связи стандарта GSM в условиях действия частотно-селективных и амплитудных замираний и аддитивного белого гауссова шума. Приведены результаты модельных исследований коэффициента битовых ошибок (КБО) при различных отношениях сигнал/шум (ОСШ) в канале и различном числе дискретных компонент в многолучевом сигнале GMSK. Показано, что увеличение числа дискретных компонент и уменьшения ОСШ приводят к межсимвольной интерференции (МСИ) и существенному ухудшению качества канала связи.

цифровой канал сотовой связи стандарта GSM, GMSK радиосигнал, МСИ, АБГШ, коэффициент битовых ошибок, ОСШ

Качество канала в сотовых системах мобильной связи зачастую определяется многолучевой структурой поля в точке приема, приводящей к различного рода замираниям сигнала и явлению МСИ. Количественной мерой качества канала связи является вероятность битовой ошибки (BER) при заданном ОСШ в канале. По этой причине разработка и программная реализация цифрового канала передачи информации с ограниченной частотной полосой и модельная оценка качества его работы - актуальная научно-техническая задача.

Согласно существующей классификации замираний [1] к ухудшению качества цифрового канала в условиях городской застройки приводят мелкомасштабные замирания с временным расширением сигнала и временной дисперсией канала. В рамках данной работы ставится задача моделирования цифрового канала сотовой связи стандарта GSM в условиях действия аддитивного белого гауссова шума (АБГШ) и наличия в канале частотно-селективного и амплитудного замираний.

Известна математическая модель канала передачи цифровой информации в виде релейского канала, в котором реализовано большое количество многократно отражающихся путей при отсутствии зеркального компонента сигнала.

Частотно-селективные замирания проявляются в том случае, если максимальная задержка во времени дискретного компонента больше времени передачи символа в канале $\tau_{\max} < T_n$, амплитудные – $\tau_{\max} > T_n$, где τ_{\max} – максимальная временная задержка, сек, T_n – длительность одной посылки, с.

1. Математическая модель многолучевой структуры GMSK сигнала в точке приема на фоне АБГШ.

GMSK сигнал в виде множества многолучевых дискретных компонент описывается выражением вида

$$r(t) = \sum_{n=0}^N \alpha_n(t) s[t - \tau_n(t)] = \operatorname{Re}\left\{ \left(\sum_n \alpha_n(t) e^{-j\omega_0 \tau_n(t)} g(t - \tau_n(t)) \right) e^{-i\omega_0 t} \right\}, \quad (1)$$

где α_n и $\tau_n(t)$ – переменная амплитуда и переменная временная задержка распространения n-го дискретного компонента многолучевого распространения GMSK сигнала; ω_0 – угловая частота несущего колебания, рад/с; $s[t - \tau_n(t)]$, $g(t - \tau_n(t))$ – GMSK сигнал, прибывающий в точку приема по n-му пути распространения с временной задержкой, и его комплексная огибающая.

Амплитуда полученного сигнала в отсутствие зеркального компонента есть случайный процесс (СП) с распределением Релея, определенная выражением

$$W(R) = \frac{R}{\sigma^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}, R \geq 0, \quad (2)$$

где R – случайное значение огибающей GMSK сигнала; σ – параметр распределения Релея.

Математическая модель АБГШ представляет собой широкополосный СП с нормальным законом распределения, нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Математическая модель аддитивной смеси многолучевого GMSK сигнала в релейском канале с замираниями и АБГШ на входе демодулятора реализована в виде:

$$r_{\text{add}}(t) = r(t) + Z(t), \quad (3)$$

где $r(t)$ – GMSK сигнал после прохождения релейского канала с замираниями и сигнального тракта приемника; $Z(t)$ – нормированный узкополосный шум (АБГШ, прошедший сигнальный тракт приемника).

2. Программная реализация формирователя и демодулятора GMSK сигнала.

На первом этапе работы программно реализована структурная схема универсального квадратурного модулятора GMSK сигналов (рис. 1) [2].

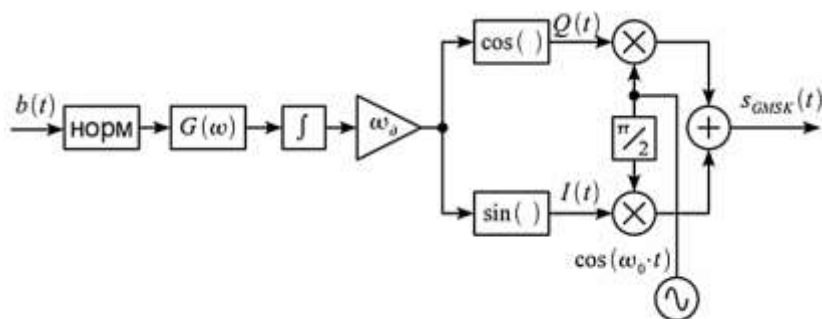


Рисунок 1 – Схема универсального квадратурного модулятора GMSK сигналов

Принцип формирования GMSK сигнала осуществляется за счет использования гауссова ФНЧ, предназначенного для сглаживания фронтов прямоугольных импульсов в составе исходной информационной бинарной последовательности, что ведет за собой сглаживание вершин пилообразной временной зависимости фазы радиосигнала.

Первым блоком модулятора является интегратор, на выходе которого формируется сигнал. Второй блок модулятора выполняет операцию усиления полученного сигнала в ω_d раз, где ω_d – девиация частоты. Таким образом, сигнал после усилителя есть совокупность мгновенных значений фазы формируемого GMSK сигнала в рад.

Далее на выходах функциональных преобразователей формируются две низкочастотные квадратурные компоненты GMSK сигнала в виде гармонических синусоидального и косинусоидального колебаний $I(t)$ и $Q(t)$, аргумент которых изменяется в соответствии с изменением испытательного сигнала во времени. Каждая из низкочастотных квадратур посредством перемножителя переносится в высокочастотную область в окрестности частоты несущего колебания ω_0 , вырабатываемого опорным генератором. На последнем этапе формируется высокочастотное колебание - GMSK радиосигнал.

На рис. 2 – 5 приведены результаты верификации математической модели формирователя GMSK сигнала, которые свидетельствуют о корректности проведенной программной реализации формирователя.

На втором этапе программно реализовано схемотехническое решение демодулятора GMSK сигнала, обладающего повышенной помехоустойчивостью приема в области малых ОСШ. Структурная схема демодулятора представлена на рис. 6 [3].

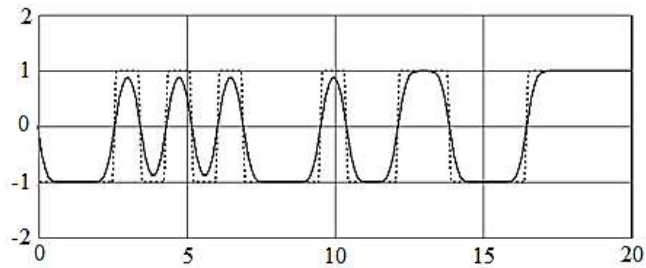


Рисунок 2 – Временные диаграммы испытательного информационного сигнала на входе (пунктирная линия) и на выходе (сплошная линия) гауссова ФНЧ: по оси абсцисс отложено время в мкс, по оси ординат – мгновенные значения испытательного сигнала, В

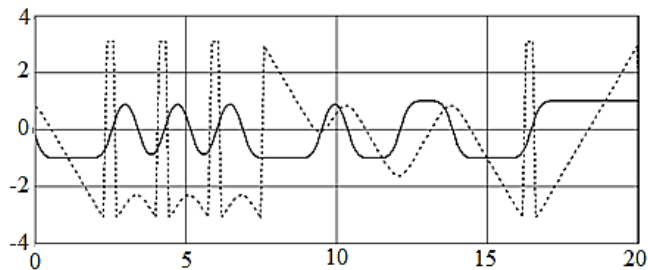


Рисунок 3 – Зависимость фазы GMSK сигнала от времени (пунктирная линия) и испытательный сигнал на выходе интегратора (сплошная линия): по оси абсцисс отложено время в мкс, по оси ординат – мгновенное значение фазы, рад

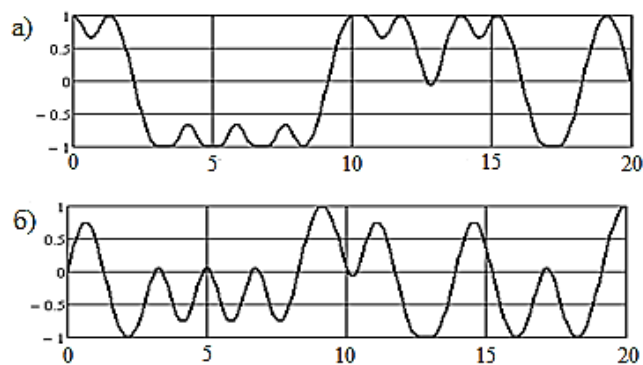


Рисунок 4 – Временные зависимости составляющих $I(t)$ и $Q(t)$ по оси абсцисс отложено время в мкс, по оси ординат – мгновенные значения сигналов, В

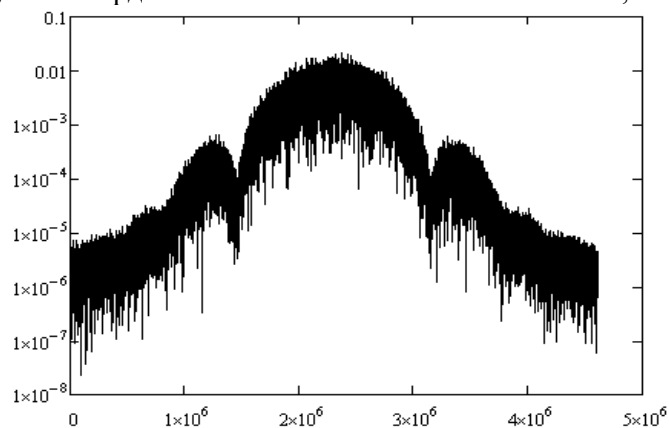


Рисунок 5 – Амплитудный спектр GMSK сигнала при значении параметра: по оси абсцисс отложена частота в Гц, по оси ординат в логарифмическом масштабе – значения модуля комплексного спектра сигнала

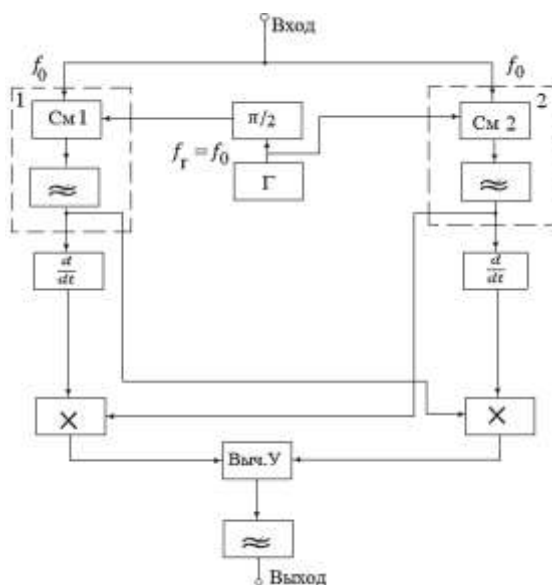


Рисунок 6 – Структурная схема беспорогового демодулятора

Принцип работы беспорогового демодулятора GMSK сигналов состоит в следующем: входной сигнал делится на синфазную (блок 1) и квадратурную (блок 2) составляющие посредством смещения сигнала с опорными сигналами (блоки генератор и фазовращатель) и выделения низкочастотных квадратурных составляющих с помощью ФНЧ, входящих в блоки 1 и 2. Сигналы сдвинуты относительно друг друга на $\pi/2$. Далее происходит дифференцирование синфазной и квадратурной составляющих. Следующим действием является перемножение крест-накрест синфазной и продифференцированной квадратурной составляющих и перемножение квадратурной составляющей с продифференцированной синфазной составляющей. Заключительная операция состоит в вычислении разности напряжений с выходов перемножителей и последующей фильтрации разностного напряжения в окончательном ФНЧ.

На рис. 7 и 8 приведены результаты верификации модели демодулятора.

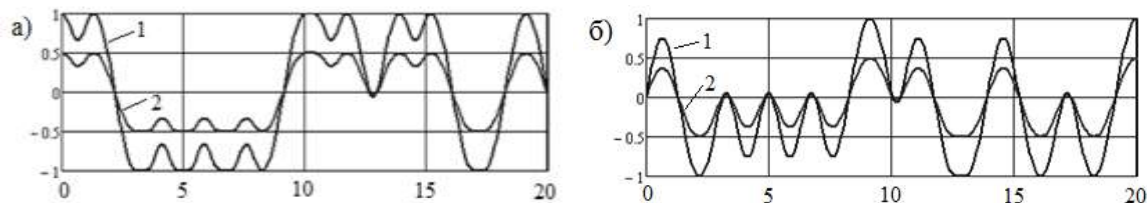


Рисунок 7 – Временные реализации квадратурных составляющих I(t) (а) и Q(t) (б): линия 1 – на выходах функциональных преобразователей формирователя GMSK сигнала; линия 2 – на выходах блоков 1 и 2 демодулятора; по оси абсцисс отложено время в мкс, по оси ординат – мгновенные значения сигналов, В

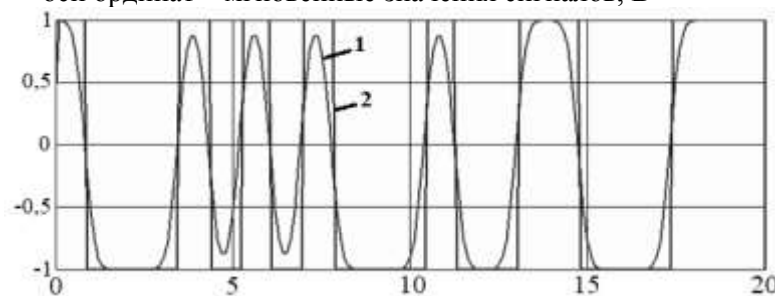


Рисунок 8 – Временные реализации сигналов на выходе окончательного ФНЧ (линия 1) и решающего устройства (линия 2): по оси абсцисс отложено время в мкс, по оси ординат – мгновенные значения сигналов, В

Сравнительный анализ временных реализаций низкочастотных составляющих GMSK сигнала, полученных при формировании и демодуляции, свидетельствует об их идентичном характере, равно как и информационной последовательности и сигнала на выходе решающего устройства демодулятора. Следовательно, реализация беспорогового демодулятора в программной среде Mathcad проведена корректно.

Реализация модели АБГШ, входящая в классический идеальный цифровой канал передачи, состояла в следующем: формировании двух выборок случайной величины (СВ), равномерно распределенной в интервале значений; формировании случайного широкополосного процесса с ограниченным спектром; формировании узкополосного СП с гауссовским законом распределения (модель аддитивного компонента шума на входе демодулятора).

На рис. 9-11 приведены результаты верификации модели аддитивного шумового компонента.

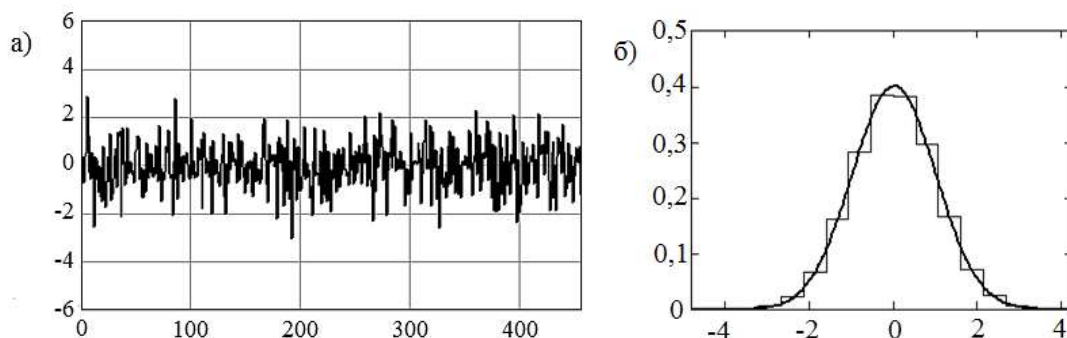


Рисунок 9 – Временная реализация широкополосного гауссова шума с ограниченным спектром (а) (по оси абсцисс отложены номера дискретных отсчетов, по оси ординат – величина дискретных отсчетов, В) и гистограмма распределения широкополосного модельного СП (нормальный закон) (б), полученного линейно-конгруэнтным методом

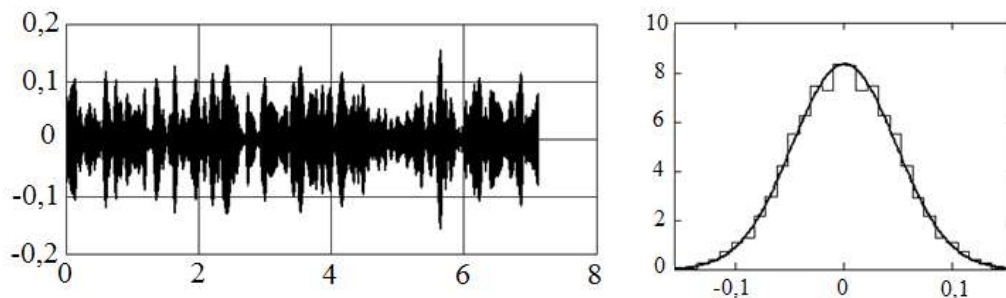


Рисунок 10 – Временная реализация модельного узкополосного СП на входе демодулятора (а) (по оси абсцисс отложено время в мс, по оси ординат – мгновенные значения шума, В) и его гистограмма (б)

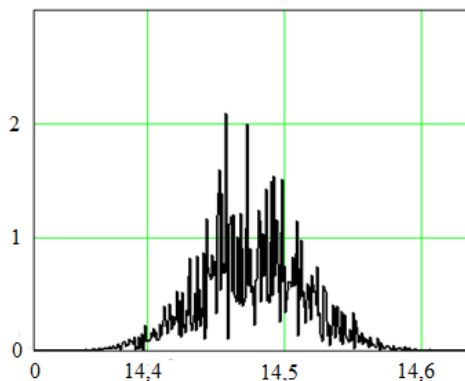


Рисунок 11 – Амплитудный спектр модельного узкополосного СП на входе демодулятора: по оси абсцисс отложена частота в МГц, по оси ординат – значения модуля комплексного спектра сигнала

Временная реализация широкополосного шума характеризуется быстрыми флуктуациями его значений с течением времени, что характерно для широкополосных СП, а гистограмма его распределения соответствует теоретической кривой нормального закона распределения СП с нулевым средним. Временная реализация узкополосного шума характеризуется наличием медленно меняющейся огибающей и высокочастотным заполнением с частотой, равной центральной частоте спектра этого шума, а его амплитудный спектр свидетельствует об ограниченной полосе частот, в которой сосредоточена практически вся энергия шума. Гистограмма распределения узкополосного шума также совпадает с теоретической кривой нормального закона распределения СП. Таким образом, можно говорить о корректности построенных модельных СП.

На третьем этапе исследования реализована модель многолучевого GMSK радиосигнала в релеевском канале с частотно-селективными и амплитудными замираниями на фоне АБГШ. Данная модель описана выражением

$$a_{k1} = \sum_{i=0}^4 \left[Y_{1i} \left(A_{c_{k1+n1_i}} \cdot \cos \left(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot k1 \cdot \Delta t + \frac{n1_i \cdot \pi}{128} \right) - B_{s_{k1+n1_i}} \cdot \sin \left(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot k1 \cdot \Delta t + \frac{n1_i \cdot \pi}{128} \right) \right) \right], \quad (4)$$

где $i = 0 \dots 4$ – номер дискретного компонента в многолучевом сигнале; Y_{1i} – текущий отсчет СП с распределением по Релею; A_c и B_s – обозначения НЧ квадратурных составляющих GMSK сигнала; $k1$ – номер текущего дискретного отсчета в любой из составляющих; $n1_i$ – временная задержка в единицах отсчета в каждом из сформированных лучей; f_0 – циклическая частота несущего колебания, Гц; Δt – шаг дискретизации по времени, с.

В рассматриваемой модели многолучевого сигнала фаза любого дискретного компонента многолучевого сигнала реализована в виде СВ с равномерным законом распределения методом Фибоначчи, а огибающая любого дискретного компонента многолучевого сигнала – в виде СВ с распределением Релея (аналог модуля передаточной функции канала).

На рис. 12 приведена временная реализация модельного многолучевого полосового сигнала, состоящего из пяти лучей.

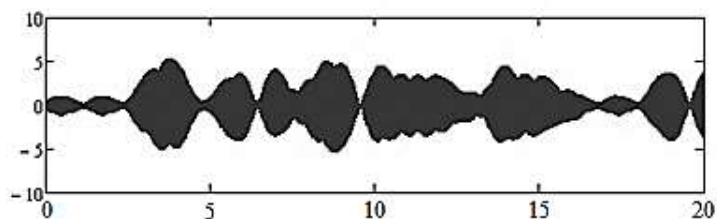


Рисунок 12 – Временная реализация многолучевого GMSK сигнала в Релеевском канале с замираниями: по оси абсцисс отложено время в мс, по оси ординат – мгновенные значения многолучевого сигнала, В

Анализ временной реализации показывает, что ее структура аналогична узкополосному сигналу, подверженному паразитной амплитудной модуляции с характерными провалами огибающей к нулю, что свидетельствует о наличии частотно-селективных и амплитудных замираний в релеевском канале.

Программная реализация решающего устройства выполнена по принципу интегратора с синхронным разрядом. За каждую длительность посылки производилось суммирование значений отсчетов продемодулированного сигнала, если результат к моменту окончания посылки больше нуля, то принимается решение логической единицы «1», если меньше нуля – логического нуля «0». Сигнал на выходе решающего устройства (линия 1) и исходная информационная последовательность (линия 2) приведены на рис. 13.

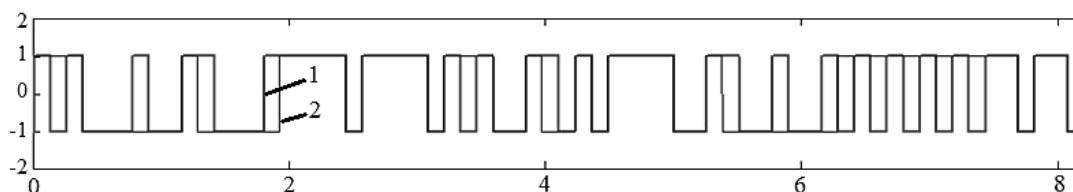


Рисунок 13 – Временная реализация сигнала на выходе решающего устройства после принятия многолучевого сигнала (количество лучей 5) (линия 2) и исходной информационной последовательности (линия 1) при отсутствии в канале АБГШ

Сравнительный анализ данных сигналов свидетельствует о наличии ошибочно принятых символов, что обусловлено замираниями в канале и МСИ.

На заключительном этапе исследований проведен модельный эксперимент, суть которого сводилась к оценке зависимостей КБО от ОСШ при различном числе дискретных компонент в многолучевом сигнале. На рис. 14 приведены усредненные кривые КБО, полученные для двух (линия 1), шести (линия 2) и десяти (линия 3) компонент многолучевого сигнала.

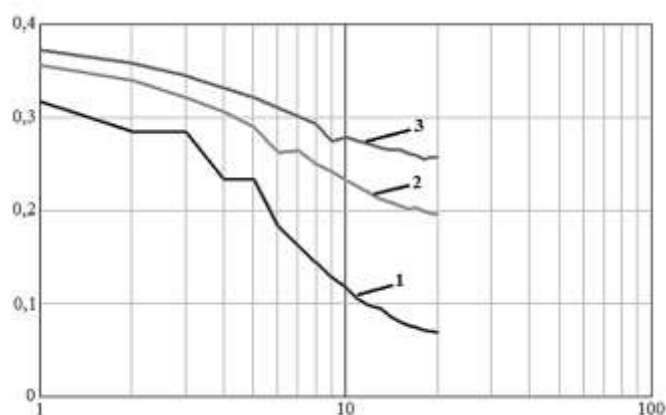


Рисунок 14 – Графические зависимости КБО от ОСШ

Результаты модельных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. с увеличением количества дискретных компонент в точке колебаний при фиксированном значении ОСШ, значение КБО возрастает;
2. увеличение ОСШ в цифровом канале при любом количестве дискретных компонент ведет к уменьшению КБО;
3. минимальное значение КБО составило 0,069 при нормах на параметр BER в системах сотовой связи от 10^{-6} до 10^{-3} . Данный факт может быть объяснен наличием частотно-селективных и амплитудных мелкомасштабных замираний, свидетельствующих о наличии явления МСИ, а также ограничением в ОСШ 20 дБ в модельных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банк лекций SIBLEC.RU [Электронный ресурс] <http://siblec.ru/index.php?dn=html&way=bW9kL2h0bWwvY29udGVudC84c2VtLzA4OC8xNS0yLmh0bQ> (дата обращения 21.04.2018)
2. Omoled. Коллаборация в области образования [Электронный ресурс] <http://omoled.ru/publications/view/202> (дата обращения 29.04.2018)
3. Карлов, А.М. Беспороговый прием частотно-модулированных сигналов: моногр. / А.М. Карлов, Е.В. Волхонская.– Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010. – 174 с.

MODEL OPERATION OF THE DIGITAL CHANNEL OF CELLULAR COMMUNICATION IN THE MULTIPATH CONDITIONS

S.V. Shapyrina, Kaliningrad State Technical University BALTIC FISHING FLEET STATE ACADEMY, cadet, e-mail: sofiyavladimirovna01@mail.ru

The results of a digital channel of cellular communication of the GSM standard modeling in the presence of frequency selective and amplitude fadings and the additive white Gaussian noise are presented in article. The results of a bit error rate (BER) simulations at different values signal to noise ratio (SNR) and various number of discrete components in a multibeam signal of GMSK are also presented here. It is shown that increase in number of discrete components and decrease of SNR is led to an intersymbolical interference (ISI) and essential deterioration of a communication channel quality.

digital channel of cellular communication of the GSM, GMSK standard radio signal, ISI, AWGN, coefficient of bit mistakes, GSN.