

УДК 654.1 (045)

Паук С. М., канд. техн. наук

Потапов В.Г.

Тараненко А.Г., канд. техн. наук

Ткалич О.П., канд. техн. наук

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА MSK СИГНАЛОВ

Институт информационно-диагностических систем
Национальный авиационный университет

Проведено оцінку впливу точності синхронізації на помехоустойчивість систем зв'язи з частотною модуляцією (MSK). Отримані переваги MSK сигналу. Проаналізовані неточності синхронізації по високій частоті і по тактовим імпульсам на помехоустойчивість MSK сигналу. Визначено ступінь впливу рассинхронізації для MSK сигналу по тактовим імпульсам і по високій частоті

Постановка проблемы

Цифровизация и интеграция сетей и услуг связи с использованием современных телекоммуникационных технологий обуславливают необходимость соблюдения определенных требований к качеству обслуживания пользователей. В цифровых сетях и системах связи, как общего пользования, так и ведомственного, качество обслуживания пользователей определяется по обобщенным критериям, которые охватывают несколько параметров системы. В соответствии с рекомендациями Международного Союза Электросвязи (МСЭ) таким критерием является *QoS (Quality of Service)* – качество обслуживания. Одним из важных параметров систем связи, влияющих на *QoS*, является частота битовых ошибок *BER (Bit Error Rate)*. Величина *BER* зависит от целого ряда характеристик системы связи, в том числе и от точности синхронизации.

Проблема оценки влияния точности синхронизации на помехоустойчивость системы связи возникает всякий раз при появлении новых и модернизации известных методов и устройств систем связи. Сказанное относится к методу частотной модуляции *MSK (Minimum Shift Keying)*.

Анализ исследований и публикаций

На современном этапе развития телекоммуникационных мобильных систем метод *MSK* в модемной технике занимает

одно из основных положений. В соответствии с рекомендациями *ICAO* и *МККТТ* метод модуляции *MSK* целесообразно использовать в системах радиосвязи «Земля-Борт-Земля («ЗБЗ»)» в диапазоне метровых волн, а также в системах сотовой радиосвязи [1–5]. Спектрально-эффективная гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (*GMSK*) рекомендована общеевропейским стандартом *GSM* для цифровой сети сотовой подвижной связи.

Преимущество *MSK* сигналов заключается в том, что при когерентном приеме можно обеспечить их потенциальную помехоустойчивость.

Второе преимущество *MSK* сигналов состоит в том, что огибающая сигнала постоянна, а частота сигнала изменяется без разрыва фазы.

Третье преимущество *MSK* сигналов состоит в том, что последовательность дибитов имеет скорость передачи вдвое меньшую по сравнению с исходным сигналом. Это существенно уменьшает ширину полосы частот спектра *MSK* сигналов и обеспечивает низкий уровень внеполосных излучений.

С целью еще большего уменьшения полосы частот спектра *MSK* сигналов используют гауссовскую *MSK (GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying)*. Метод *GMSK* отличается от *MSK* тем, что последовательность информационных битов до модулятора проходит через фильтр ниж-

них частот (ФНЧ) с характеристикой Гаусса. Сигналы *GMSK*, обладающие компактным спектром и возможностью когерентного приема, тоже находят применение в системах подвижной радиосвязи и радиомодемах.

Исследованиям методов регистрации и демодуляции *MSK* сигналов посвящено большое количество работ, среди которых можно выделить работы [1–6]. Наиболее детально вопросы влияния точности синхронизации на помехоустойчивость *MSK* сигналов рассмотрены в работе [3], где проанализирована рассинхронизация по высокой частоте и по тактовым импульсам.

Постановка задачи

В статье анализируется влияние неточности синхронизации на помехоустойчивость приема *MSK* (*GMSK*) сигналов. Различают синхронизации: по высокой частоте, по тактовым импульсам и по кадрам. В статье рассматриваются два из трех методов синхронизации – по высокой частоте и по тактовым импульсам.

Оценка влияния синхронизации на помехоустойчивость *MSK* сигналов

При оценке влияния ошибок синхронизации в устройстве выделения высокой частоте на помехоустойчивость приема *MSK* сигнала учитывается явление межсимвольной интерференции при прохождении сигналов через стандартные фильтры Баттерворта. В работе [3] для модифицированной схемы Костаса разработана процедура вычислений, в результате использования которой получен ряд практически важных результатов. Так, для схемы канальных фильтров Баттерворта второго порядка установлено наличие оптимального значения нормированной полосы $\gamma = 0.55$ при отношении сигнал/шум $h_0^2 = 9.9 \text{ dB}$, при котором обеспечивается минимум вероятности ошибки $P_{ош} = 10^{-5}$.

Там же представлены зависимости вероятности ошибки $P_{ош} = f(h_0^2)$ при раз-

ных значениях отношения сигнал/шум в полосе устройства выделения высокой частоте (УВЧ) – $A(\text{dB})$, взятых как параметр. Анализ зависимостей $P_{ош} = f(A)$ показывает, что для уменьшения потерь при демодуляции требуется иметь большее значение отношения сигнал/шум в полосе УВЧ.

Проведено оценку влияния ошибок синхронизации по высокой частоте и тактовым импульсам на помехоустойчивость приемника де Буда [3]. При этом выходное воздействие имеет вид:

$$A(t) = S(t) + n(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ – гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью $\frac{N_0}{2}$,

$S(t)$ – *MSK* сигнал, который равен

$$S(t) = \cos(\omega_0 t + \frac{u_k t}{2T} + x_k), \quad (2)$$

$$kT \leq t \leq (k+1)T$$

В уравнении (2) ω_0 – несущая частота; T – длительность символа; u_k – передаваемый символ, равновероятно принимающий значения ± 1 ; x_k – параметр, определяющий непрерывность фазы. Параметр x_k и вычисляется по рекуррентной формуле

$$x_k = x_{k-1} + (u_{k-1} - u_k) \frac{\pi k}{2}. \quad (3)$$

Поскольку $x_{k \bmod 2\pi} \in \{0; \pi\}$, $S(t)$ можно представить в виде [3]

$$S(t) = \cos x_k \cos \frac{\pi}{2T} \cos \omega_0 t -$$

$$- u_k \cos x_k \sin \frac{\pi}{2T} \sin \omega_0 t \quad (4)$$

Если ψ и φ это ошибки соответственно по фазе высокой частоты и по тактовым импульсам, то для интервала времени $[kT, (k+1)T]$ для сигналов на выходах фильтров нижних частот можно записать

$$S_1(t) = \cos x_k \cos \varphi [\cos(\frac{\pi}{2T} + \psi) + \cos \psi] + u_k \cos x_k \sin \varphi [\sin(\frac{\pi}{2T} + \psi) - \sin \psi] + n_1, \quad (5)$$

$$S_2(t) = \cos x_k \cos \varphi [\sin(\frac{\pi}{2T} + \psi) + \sin \psi] + u_k \cos x_k \cos \varphi [\cos(\frac{\pi}{2T} + \psi) - \cos \psi] + n_2,$$

где n_1, n_2 – независимые гауссовские процессы.

После интегрирования с учетом того, что

$$U_{2k} \cos(x_{2k}) = U_{2k+1} \cos(x_{2k+1}), \quad (6)$$

получаем:

$$S_3[(2k+1)T] = U_{2k} \cos x_{2k} [\cos \varphi \cos \psi + \frac{1}{\pi} \cos \psi \sin \varphi (U_{2k} - U_{2k-1}) - \frac{1}{2} \sin \varphi \sin \psi (U_{2k-1} - U_{2k})] + n_1 \quad (7)$$

$$S_4[2(k+1)T] = -U_{2k} \cos x_{2k} [\cos \varphi \times \cos \psi + \frac{1}{\pi} \cos \psi \sin \varphi (U_{2k-1} - U_{2k}) - \frac{1}{2} \sin \varphi \sin \psi (U_{2k+1} + U_{2k})] + n_2$$

Таким образом, для оценки символа U_{2k} , на четных интервалах, достаточно вычислить произведение

$$- \text{sign} S_3[(2k+1)T] \cdot \text{sign} S_4[2(k+1)T]. \quad (8)$$

Символ принимается с ошибкой, когда один из сомножителей в выражении (8) имеет неверный знак. Аналогично производится оценка символа на нечетных тактовых интервалах.

Введем обозначение

$$W_k(\varphi, \psi) = \cos \varphi \cos \psi + \frac{1}{\pi} \cos \psi \sin \varphi (U_k - U_{k-1}) - \frac{1}{2} \sin \varphi \sin \psi (U_k - U_{k-1}) \quad (9)$$

С учетом (9) выражение для вероятности ошибки будет иметь вид [3].

$$P_e = [1 - \Phi(h_0 \sqrt{2} W_{2k})] \Phi(h_0 \sqrt{2} W_{2k+1}) + [1 - \Phi(h_0 \sqrt{2} W_{2k+1})] \Phi(h_0 \sqrt{2} W_{2k}) \quad (10)$$

где $\Phi(\bullet)$ – интеграл вероятности,

$$h_0 = \sqrt{\frac{E}{N_0}}.$$

Вероятность P_e зависит от последовательности информационных символов, передаваемых на трех соседних интервалах. Поэтому оценка потерь, обусловленных фазовыми ошибками, требует усреднения P_e по ансамблю комбинаций передаваемых символов. Если считать, что символы U_k некоррелированы и равновероятны, то

$$\bar{P}_e(\varphi, \psi) = \frac{1}{8} \sum_{i,j,l \in \{\pm 1\}} P_e(\varphi, \psi), \quad (11)$$

$$(U_{2k-1} = i, U_{2k} = j, U_{2k+1} = l)$$

Обозначим:

$$\Phi_1 = \Phi[h_0 \sqrt{2} \cos(\varphi - \psi)],$$

$$\Phi_2 = \Phi[h_0 \sqrt{2} \cos \psi (\cos \varphi + \frac{2}{\pi} \sin \varphi)],$$

$$\Phi_3 = \Phi[h_0 \sqrt{2} \cos \psi (\cos \varphi - \frac{2}{\pi} \sin \varphi)],$$

$$\Phi_4 = \Phi[h_0 \sqrt{2} \cos(\varphi + \psi)].$$

Тогда вместо (11) получим, что

$$\begin{aligned} \bar{P}_{e1} = & \frac{1}{4} [\Phi_1(1 - \Phi_1) + \Phi_2(1 - \Phi_3) + \Phi_3(1 - \Phi_2) + \\ & + \Phi_4(1 - \Phi_4)] + \frac{1}{8} [\Phi_1(1 - \Phi_2) + \Phi_1(1 - \Phi_3) + \\ & + \Phi_1(1 - \Phi_4) + \Phi_2(1 - \Phi_1) + \Phi_2(1 - \Phi_2) + \\ & + \Phi_2(1 - \Phi_4) + \Phi_3(1 - \Phi_1) + \Phi_3(1 - \Phi_3) + \\ & + \Phi_3(1 - \Phi_4) + \Phi_4(1 - \Phi_1) + \\ & + \Phi_4(1 - \Phi_2) + \Phi_4(1 - \Phi_3)]. \end{aligned}$$

Помехоустойчивость приемника при вероятности ошибочного приема одного символа $P_{ош}$ с учетом дифференциального кодирования определяется известным выражением:

$$P_{e_2} = 2P_{ош}(1 - P_{ош}).$$

Для оценки степени влияния рассинхронизации по высокой частоте и тактовым импульсом введем критерий проигрыша $Q = h_0^2(\varphi, \psi) - h_0^2$, который показывает, на сколько нужно поднять отношение сигнал/шум h_0^2 , чтобы скомпенсировать влияние нестабильности.

На рис. 1 приведены графики, показывающие зависимости необходимой степени добавки отношения сигнал/шум $Q(dB)$ по отношению к идеальному случаю в зависимости от вероятности ошибки при различных значениях φ , ψ .

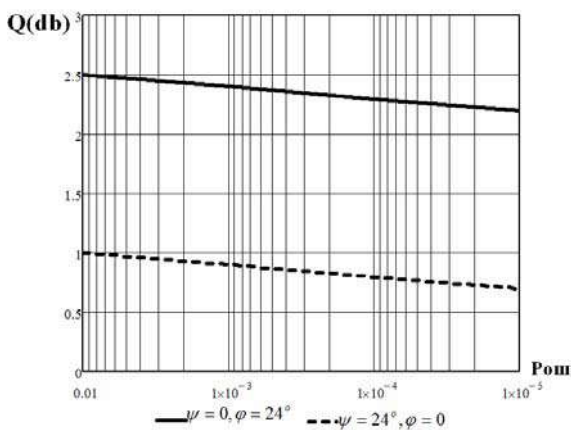


Рис. 1. Графики зависимости необходимой степени добавки отношения сигнал/шум $Q(dB)$ по отношению к идеальному случаю в зависимости от вероятности ошибки при различных значениях φ , ψ

Анализ этих зависимостей показывает, что с увеличением качества приема величина $Q(dB)$ несколько уменьшается. Так, при $P_{ош} = 10^{-3}$ для компенсации рассинхронизации по высокой частоте необходимо увеличение отношения сигнал/шум на $0.9dB$, а при $P_{ош} = 10^{-5}$ – $0.7dB$. Для компенсации такой же по величине рассинхронизации по тактовым импульсам необходимо увеличение отношения сигнал/шум на $2.4dB$ и $2.2dB$ соответственно.

Кроме того анализ показал, что прием *MSK* сигналов более чувствителен к нестабильности по тактовым импульсам. Так, при изменении качества канала в пределах $10^{-2} < P_{ош} < 10^{-5}$ компенсация одинаковой величины рассинхронизации по тактовым сигналам требует увеличения Δh на $1.5dB$ по сравнению с рассинхронизацией по высокой частоте.

Выводы

1. Проведен анализ влияния рассинхронизации по высокой частоте и по тактовым импульсам на прием *MSK* сигналов.

2. Показано, что с увеличением качества канала величина добавки мощности сигнала для компенсации рассинхронизации уменьшается.

3. Степень влияния рассинхронизации по тактовым импульсам для *MSK* сигнала больше чем, по высокой частоте.

Список литературы

1. Паук С. М. Сети авиационной электросвязи. – М: Транспорт, 1986. – 272 с.
2. Харченко В.П., Паук С.М., Нестерова Л.М., Бабак Е.А. Супутникові системи авіаційного зв'язку. – К.: НАУ, 2003. – 188 с.
3. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации / П.Н. Сердюков, А.В. Бельчиков и др. – М.: АСТ, 2006. – 403 с.
4. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 240 с.
5. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.