

УДК 621.396.669

СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНО-ИНВЕРСНОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

В. А. Сивов, старший научный сотрудник Военной академии Ракетных войск стратегического назначения (ВА РВСН), к.т.н.

В. А. Васильев, старший научный сотрудник ВА РВСН, к.т.н.

В. Ф. Моисеев, старший научный сотрудник ВА РВСН, к.т.н.; mvwvas@rambler.ru

М. В. Савельева, научный сотрудник ВА РВСН, к.т.н.; marina-savelieva-62@mail.ru

В. И. Филатов, старший научный сотрудник ВА РВСН.

Предложен способ многопозиционной квадратурной амплитудно-инверсной модуляции сигналов (КАИМ), улучшающий спектрально-энергетические характеристики систем радиосвязи. Получены аналитические выражения для оценки помехоустойчивости КАИМ. Проведена оценка помехоустойчивости декодирования принимаемой информации. Результаты моделирования хорошо согласуются с аналитическими оценками. Установлено, что энергетические затраты на передачу информации методом КАИМ меньше, чем с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ), приблизительно на 6 дБ.

Ключевые слова: модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, квадратурная многоуровневая амплитудно-инверсная модуляция.

Введение. Интенсивное развитие систем сотовой, беспроводной, спутниковой и профессиональной стационарной и подвижной радиосвязи привело к активному использованию частотного ресурса. Ограниченность частотного ресурса и возросшая потребность в нем привели к необходимости изыскания способов рационального его использования. Повышение эффективности использования частотного ресурса можно обеспечить за счет комплексного применения ортогональных способов разделения каналов (частотного, временного или кодового) совместно с спектрально-эффективными методами модуляции сигналов, (например, М-значными амплитудными или фазовыми методами модуляции сигналов). Рекомендуется также применение поляризационного разделения сигналов и так называемых «умных» антенн.

В статье проводится оценка эффективности использования радиочастотного спектра многоканальными системами радиосвязи с ортогональным кодовым разделением каналов и многоуровневой квадратурной амплитудно-инверсной модуляцией (КАИМ) сигналов в каждом канале.

Представление и обработка двоичной информации в каждом из K информационных каналов. Каждый канал состоит из двух квадратурных каналов. В синфазном канале для передачи $m/2$ символов двоичной информации используется кодовая последовательность $P1$, где m — число кодируемых двоичных информационных символов; в квадратурном канале для передачи второй комбинации из $m/2$ символов двоичной информации — последовательность $P2$. Причем $P1$ ортогональна $P2$. При этом старший разряд $(m/2)$ -значной кодовой комбинации определяет вид последовательностей $P1$ и $P2$ — прямая или инвертированная (инверсная), а $m/2-1$ информационных разрядов определяет дискретное значение амплитуды последовательности.

В свою очередь, в приемнике (корреляторе или согласованном фильтре) конкретного информационного канала в каждом квадратурном канале производится сверка принимаемых последовательностей $P1$ и $P2$ с соответствующими опорными последовательностями. Они используются отдельно в каждом из квадратурных каналов с последующим определением в амплитудно-инверсном демодуляторе (АИД) знака отклика согласованного фильтра или коррелятора. Затем в каждом квадратурном канале определяется $(m/2-1)$ — разрядный номер интервала, где находится амплитуда отклика принятого сигнала (рис. 1). Следовательно, в каждом канале (демодуляторе — АИД) приемника производится одновременная оценка $m/2$ двоичных единиц принимаемой информации.

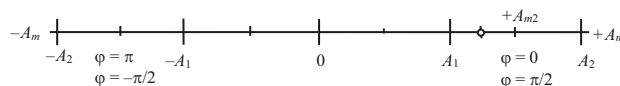


Рис. 1. Расположение интервалов селекции амплитуды сигнала при многоуровневой амплитудной и инверсной модуляции сигнала

Оценка помехоустойчивости квадратурного АИД. Для определения значений параметров помехоустойчивости m -значного квадратурного АИД (m -КАИД) достаточно оценить помехоустойчивость АИД в одном из квадратурных каналов, допустим в синфазном (квадратурный канал будет обладать теми же параметрами характеристик помехоустойчивости). Тогда вероятность правильного приема символа длиной $m/2$ для i -го интервала амплитуд может быть представлена в виде:

$$P_{пр.i} = P_{пр.Аи}(A'_{mi} / \varphi_i) P_{пр\varphi}(\varphi_i), \quad (1)$$

где $P_{пр.Аи}(A'_{mi} / \varphi_i) = \text{erf}\left(\frac{A'_{mi}}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ — вероятность правильного вычисления амплитуды принятого сигнала на выходе коррелятора приемника при определенном значении поляризации (фазы) сигнала; $P_{пр\varphi}(\varphi_i) = \text{erf}\left(\frac{A_{mi}}{\sigma}\right)$ — вероятность правильного определения знака отклика сигнала на выходе демодулятора определителя полярности сигнала (знака старшего разряда принимаемых информационных символов).

лов), искаженного белым гауссовым шумом. Это эквивалентно приему двоичных разнополярных символов;

$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ — интеграл вероятности [4];

$A_{mi} = (A_i - A_{i-1})/2$ — половина размера i -го интервала; A_i, A_{i-1} — граничные значения амплитуд i -го интервала ($i = 1, \dots, m/2$); $A_{mi} = (A_i + A_{i-1})/2$ — математическое ожидание амплитуды сигнала на i -м интервале амплитуд сигнала; $\sigma^2 = \frac{R N_0}{m/2}$ — мощность шума в квадратурном канале, приходящаяся на символ, длиной $m/2$ двоичных символов; N_0 — спектральная плотность мощности белого гауссового шума на входе информационного канала; R — скорость двоичных информационных символов на входе информационного канала.

Тогда вероятность ошибочного приема одного бита информации

$$P_{\text{ош}} = \frac{M/2}{M-1} \left\{ 1 - \frac{2}{M} \left[\sum_{i=1}^{M/2-1} P_{\text{прА}}(A'_{mi} / \varphi_i) P_{\text{прФ}}(\varphi_i) + \frac{1}{2} (1 + P_{\text{прА}}(A'_{mM})) P_{\text{прФ}}(\varphi_M) \right] \right\}, \quad (2)$$

где $M = 2^{m/2}$.

В выражении (2) второе слагаемое (в квадратных скобках) определяет значение вероятности правильного приема символа, состоящего из $m/2$ двоичных единиц информации на верхнем $M/2$ интервале, не ограниченном сверху. Поэтому среднее значение амплитуды (математическое ожидание) сигнала будет смещено несколько ближе к нижней границе этого интервала для обеспечения заданной ошибки селекции амплитуд сигналов.

Нижние границы интервалов и размеры интервалов таковы, что на каждом интервале обеспечивается селекция амплитуд сигналов с заданной вероятностью ошибочного приема информационного символа $P_{\text{ош.з}}$.

Интервалы имеют различные размеры, поскольку результирующая вероятность ошибочного приема символа зависит от надежности определения знака символа и надежности селекции амплитуды сигнала, хотя разность интервалов незначительна.

Очевидно, что при малых уровнях амплитуд сигналов, т.е. малом отношении сигнал/шум (ОСШ), вероятность ошибки будет больше по сравнению с заданным значением. Заданная вероятность принятия правильных решений относительно знака и амплитуды принимаемых сигналов может быть обеспечена на интервалах селекции амплитуд больших размеров.

При больших уровнях амплитуд сигналов, например, начиная с третьего интервала, вероятность ошибочного определения знака сигнала близка к нулю (результатирующая ошибка в приеме сигнала в основном определяется ошибочной селекцией амплитуды сигнала). Тогда заданная вероятность ошибки будет обеспечиваться на интервалах селекции амплитуд меньших размеров.

Указанные особенности декодирования КАИМ-сигналов определяют большую энергетическую эффективность рассматриваемого метода модуляции относительно таких спектрально-эффективных методов модуляции сигналов, как М-PSK и квадратурной амплитудной модуляции (КАМ).

На рис. 2 приведены графики энергетической эффективности (ОСШ на бит) рассматриваемого метода модуля-

ции m -КАИМ сигналов и m -КАМ для различных значений заданной вероятности ошибки на бит информации.

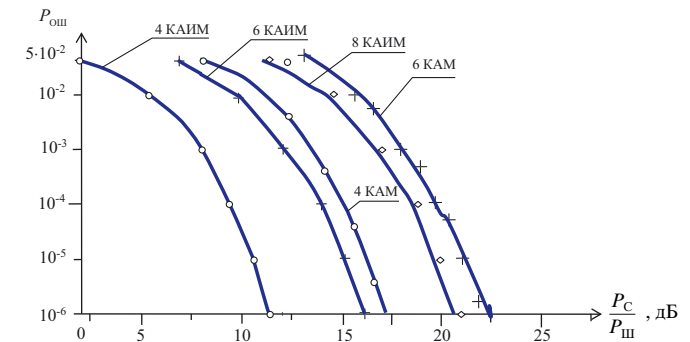


Рис. 2. Оценка энергетической эффективности видов модуляции m -КАИМ и m -КАМ

При использовании модуляции КАИМ в каждом из квадратурных каналов передаются одновременно по $m/2$ бит информации (в обоих квадратурных каналах — m бит информации) с числом уровней амплитудной модуляции $M_{\text{КАИМ}} = 2^{m/2}$ в каждом канале ($M_{\text{КАИМ}} = 2^{m/2+1}$). В случае применения m -КАМ максимальное число уровней квантования амплитуды сигнала $M_{\text{КАМ}} = 2^m$, т.е. при использовании m -КАМ число уровней квантования амплитуды сигнала значительно выше, чем при m -КАИМ. В связи с этим энергетические затраты на бит информации в случае КАМ значительно превышают энергетические затраты на бит с КАИМ.

Из рис. 2 следует, что для $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$ на бит информации и $m = (4; 6)$ бит, энергетический выигрыш при использовании КАИМ составляет около 6 дБ относительно КАМ. Графики, отражающие помехоустойчивость КАМ, взяты из [1].

Границы интервалов селекции сигналов по выражению (2) определяли методом последовательных приближений посредством численных расчетов на ЭВМ, начиная с первого интервала для каждой заданной вероятности ошибки на бит информации.

Используя метод статистического моделирования гауссовых шумов (период повторения датчика равномерно распределенных случайных чисел равен 10^9 [2]) и алгоритм формирования случайных чисел, распределенных по нормальному закону [3], для различных значений вероятности ошибки на бит ($P_{\text{ош.з},i}$, где $i = 1, 2, \dots, M$) были определены верхние и нижние границы интервалов уровня амплитуд принимаемых сигналов, а также средние значения интервалов — прообразы математических ожиданий амплитуд сигналов $A_{mi} = (A_i + A_{i-1})/2$, где $i = 1, \dots, M$.

Затем было проведено статистическое моделирование канала связи при передаче двоичной псевдослучайной информации и датчика шумов, указанного выше, а также канальной последовательности длиной 16 элементов. Эта последовательность модулировалась по фазе (инвертировалась значениями старшего разряда из $m/2$ -размерного блока двоичных информационных символов) и амплитуде в смеси с шумом со спектральной плотностью мощности $N_0/2 = 0,5$. Значения амплитуд и фазы канальной последовательности по отношению к шуму обеспечивали требуемые ОСШ для различных значений вероятности ошибки $P_{\text{ош.з}}$.

Результаты моделирования оказались несколько лучше «теоретических» по параметру ОСШ приблизительно до

0,5 дБ, очевидно, из-за представления входной информации кодом Грея, тогда как в первом случае (аналитические оценки) кодирование входной информации не использовалось. Слово «теоретических» взято в кавычки, так как пороги интервалов декодирования сигнала были определены методом последовательных приближений с помощью численных расчетов на ЭВМ.

Заключение. При одинаковой спектральной эффективности рассматриваемых способов модуляции, определяемой величиной m , метод КАИМ по показателю ОСШ, приходящемуся на бит информации, приблизительно на 6 дБ лучше, чем КАМ, т.е. энергетически предпочтительнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Проксис Дж.** Цифровая связь.: Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского.— М.: Радио и связь, 2000.— 800 с.
2. **Еланечников В. А., Цветков А. Н.** Справочник по прикладным программам для микрокалькуляторов.— М.: Финансы и статистика, 1988.— 320 с.
3. **Хастингс Н., Пикок Дж.** Справочник по статистическим распределениям.— М.: Статистика, 1980.— 371 с.
4. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 1.— М.: Сов. радио, 1974.— 552 с.

Получено 12.01.15

УДК 621.396.1

СТЕК ПРОТОКОЛОВ МОБИЛЬНОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ

С. Н. Жарков, старший инженер АО «Концерн «Созвездие»; szharkov@mail.ru

В. В. Бессонов, начальник отдела АО «Концерн «Созвездие»; stvm@list.ru

Описаны функциональные особенности мобильной самоорганизующейся сети и предложен двухмерный стек протоколов для ее исследования и проектирования.

Ключевые слова: мобильная самоорганизующаяся (ad hoc) сеть (MANET), стек протоколов.

Введение. В последние десять лет активно развиваются мобильные самоорганизующиеся (ad hoc) сети (MANET) [1–3], которые представляют собой множество географически распределенных мобильных узлов, связанных друг с другом радиоканалами. Их отличительной особенностью является отсутствие фиксированной инфраструктуры. MANET динамически формируются мобильными узлами таким образом, что создание маршрутов существенно не зависит от конкретных узлов, и если какие-то из них «покинут» сеть или выйдут из строя, то она продолжит функционировать без ухудшения своих характеристик. С учетом того, что оставшиеся узлы должны быть способны выполнять функции вышедших из

строения или переместившихся узлов, они должны обладать функциональной однородностью. Тем не менее, на практике при развертывании MANET возникает задача использования разнофункциональных радиостанций и поэтому актуальным становится объединение таких радиостанций в узлы MANET при условии обеспечения функциональной однородности узлов.

Один из способов решения задачи — проектирование мобильной сети на основе принципов самоорганизующихся систем. В статье для исследования и проектирования MANET предложен двухмерный стек протоколов.

Описание мобильной самоорганизующейся сети (MANET). При разработке мобильной сети на основе принципов самоорганизующихся систем ставится задача спроектировать сеть, узлы которой должны:

- выполнять различные задачи в зависимости от изменения сетевой топологии и среды, в которой сеть функционирует, т.е. быть взаимозаменяемыми для обеспечения надежности выполнения сетевых задач;

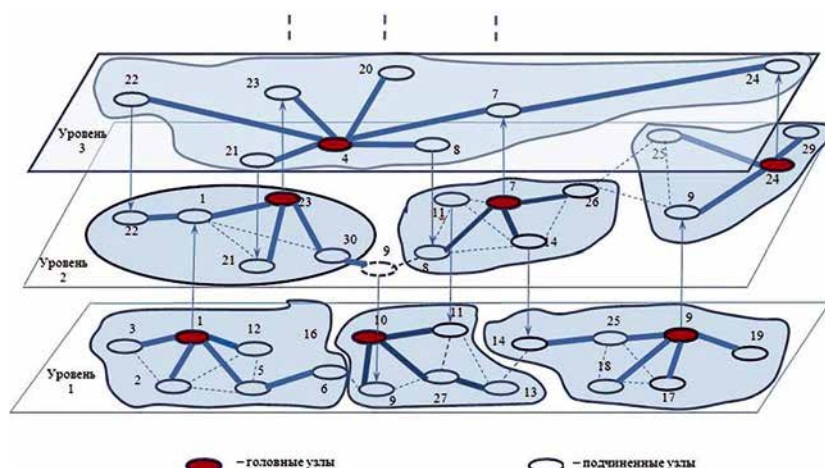


Рис. 1. Пример иерархической структуры MANET