

Асигнальные конструкции КАМ-256 на основе гексагональных решеток

Signal structures КАМ-256 based on hexagonal grid

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Викторович

(practicdsv@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,

профессор кафедры радиотехнических и

оптоэлектронных комплексов.

г. Санкт-Петербург

Жданов / Zhdanov A.

Артемий Юрьевич

(practicdsv@yandex.ru)

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», студент.

г. Санкт-Петербург

Аюков / Ayukov B.

Борис Алексеевич

(practicdsv@yandex.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,

доцент кафедры радиотехнических и

оптоэлектронных комплексов.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: помехоустойчивость сигналов – noise immunity of signals; квадратурная модуляция – quadrature modulation; минимальное евклидово расстояние – minimum Euclidean distance; гексагональные решетки – hexagonal lattices.

В статье рассмотрены сигналы квадратурной амплитудной модуляции, синтезируемые на основе гексагональных решеток. Проанализирована зависимость помехозащищенности рассматриваемых сигналов от уровня их позиционности. Представлены аналитические и графические зависимости значений минимальных евклидовых расстояний гексагональных сигналов как функции их позиционности. Иллюстрируются фрагменты фазовых созвездий сигналов КАМ-256, синтезированных на основе гексагональных решеток, и графики зависимости вероятности битовой ошибки от соотношения сигнал/шум. Сформулированы предложения по практическому применению полученных результатов.

The article considers signals of quadrature amplitude modulation synthesized on the basis of hexagonal gratings. The dependence of the noise immunity of the considered signals on the level of their positioning is analyzed. Analytical and graphical dependences of the values of the minimum Euclidean distances of hexagonal signals as a function of their position are presented. The fragments of the phase constellations of the QAM-256 signals synthesized on the basis of hexagonal lattices and plots of the dependence of the bit error probability on the signal-to-noise ratio are illustrated. Proposals for the practical application of the results obtained are formulated.

Введение

Высокие требования к объему передаваемого информационного контента в сетях радиодоступа стимулируют разработчиков к поиску новых сигнальных конструкций, обеспечивающих высокую пропускную способность при сохранении общей помехоустойчивости приема [1, 2]. Сложность решения данной задачи обусловлена изначальной ограниченностью частотных каналов, определяемых требованиями общепринятых стандартов [3]. В таких условиях сложно ориентироваться только на возможности канальных кодеров, поскольку вносимая ими избыточность существенно снижает скорость информационного трафика. Поэтому актуальным видится поиск иных компромиссных решений, основанных, в частности, на трансформации сигнальных созвездий (фазовых диаграмм) [4, 5].

Например, такой подход, примененный в телевизионном стандарте DVB-T2, позволил повысить общую помехоустойчивость приема на 4–5 дБ [6]. Анализ различных работ по этому направлению показал его перспективность для радиоканалов [7]. Другим интересным направлением является синтез сигналов квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) на основе так называемых гексагональных решеток (ГЕКС) [8].

Согласно [9], ГЕКС обеспечивает наибольшую достижимую плотность упаковки двумерного пространства, что позволяет осуществлять на их основе синтез

сигналов, изначально обладающих наилучшим показателем пик-фактора [10, 11].

Таким образом, в настоящей статье представлены результаты по симбиозу методов синтеза сигналов КАМ на основе ГЕКС-структур, позволивших получить новый тип сигналов, обладающих свойствами повышенной помехоустойчивости.

Общий подход к синтезу сигналов КАМ-М

Многопозиционные сигналы КАМ (англ. Quadrature Amplitude-Shift Keying, QASK), далее КАМ-М, где M – число позиций результирующей фазовой диаграммы, формируемой в плоскости синфазной I и квадратурной Q составляющих [12]. Класс сигналов КАМ-М достаточно хорошо изучен [12–15], что позволило их продуктивно использовать в высокоскоростных модемах при передаче фото и видео данных.

Практический интерес к сигналам КАМ-М обусловлен их улучшенной помехоустойчивостью по отношению к сигналам обычной фазовой манипуляции такой же размерностью [16], обусловленной более высоким значением показателя минимальной евклидова расстояния (МЕР) при прочих равных условиях. Это связано с тем, что информация в сигналах КАМ-М вложена в кодирование совместной комбинации изменения фазы и амплитуды. С таких позиций сигналы КАМ-М можно интерпретировать как некоторую разновидность сигналов амплитудной манипуляции, при которой функция огибающей результирующего излучения формируется суммированием двух его квадратурных составляющих $I(t)$ и $Q(t)$. То есть $I(t)$ и $Q(t)$ формируются в виде несущих колебаний с одинаковой частотой, но сдвинутых по фазе на 90° относительно друг друга [12]

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t). \quad (1)$$

Здесь $I(t)$ и $Q(t)$ – манипулирующие сигналы; f_0 – несущая частота.

Рассмотренный подход позволяет использовать на приеме сигналов КАМ-М стандартный квадратурный демодулятор, но учитывающий не только сдвиг по фазе между $I(t)$ и $Q(t)$ на $\pi/2$ радиан, но и их амплитудные различия [17].

Учитывая, что помехоустойчивость приема сигнальных конструкций определяется минимальным евклидовым расстоянием Δ_E между фазовыми центрами их сигнальных созвездий [18], целесообразно рассмотреть зависимость МЕР Δ_E от количества сигнальных элементов M (фазовых центров на плоскости сигнального созвездия), используемых в формируемом сигнале КАМ-М. Для этого положим

$$M = 2^b, \quad (2)$$

где b – число бит, приходящихся на один сигнальный символ.

Далее, полагая, что $b = 2k$, где k – натуральное число, запишем

$$\sqrt{M} = 2^k. \quad (3)$$

В соответствии с полученными выражениями можно полагать, что любому формируемому сигналу КАМ-М с номером n можно поставить в соответствие два числа n_1 и n_2 таким образом, что

$$n_1, n_2 = 0, 1, \dots, \sqrt{M} - 1. \quad (4)$$

Следует отметить, что числа n_1 и n_2 связаны непосредственно с n следующим образом

$$n = n_1 \sqrt{M} + n_2. \quad (5)$$

Если теперь сделать допущение, что существуют некоторые два числа

$$s_{n_1} = A \left(1 - \frac{2n_1}{\sqrt{M} - 1} \right) \text{ и } s_{n_2} = A \left(1 - \frac{2n_2}{\sqrt{M} - 1} \right), \quad (6)$$

где A – произвольное значение, то условием того, что эти числа s_{n_1} и s_{n_2} равномерно распределены в интервале $[-A; A]$, будет выполнение следующего равенства:

$$\Delta = A \frac{2A}{\sqrt{M} - 1}. \quad (7)$$

Следовательно, полагая, что поскольку величина $b = 2k - 1$ определяется в результате прореживания множества значений на интервале $[-A; A]$ для условия $M = 2b$, то возникновение случая, при котором расстояние между любыми s_{n_1} и s_{n_2} будет минимально, можно определить в соответствии с выражением

$$\Delta_E = \sqrt{2} \Delta = \frac{2\sqrt{2}A}{\sqrt{M} - 1}. \quad (8)$$

Возвращаясь к рассмотрению сигнальной ситуации, рассмотрим величину МЕР согласно формуле (8) как функцию параметров A и M , имеющих, соответственно, размерность амплитуды и количество (числа) сигнальных позиций в допустимом пространстве.

Так, на рис. 1 демонстрируется распределение $\Delta E(A, M)$, построенное при условии $M \in [2; 16]$ и $A \in [1; 10]$.

Анализ структуры полученного распределения $\Delta E(M, A)$ позволяет заключить, что относительно изменения параметра A оно линейно, что подтверждается выражением (1). А вот изменения параметра

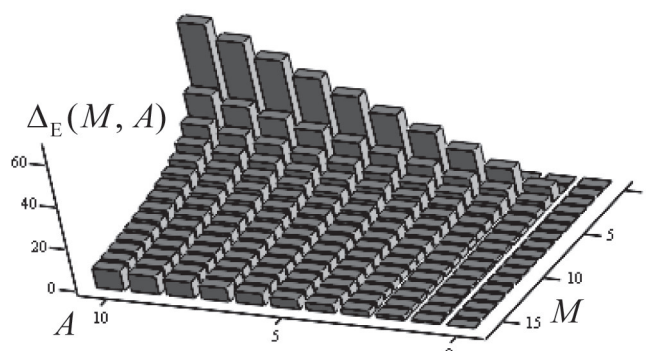


Рис. 1. Распределение значений МЕР в зависимости от величины амплитуды A и позиционности сигнала M

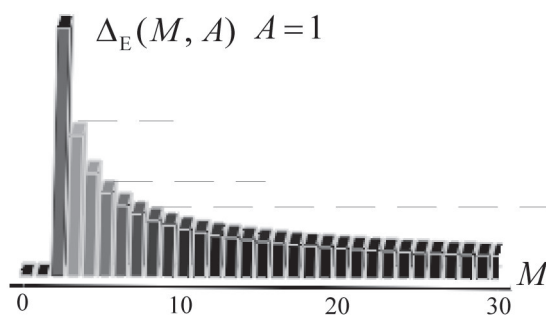


Рис. 2. Распределение значений МЕР в зависимости от позиционности сигнала M

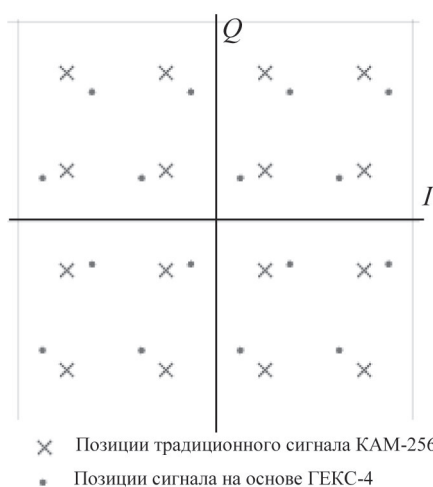


Рис. 3. Фрагменты сигналов КАМ-256 созвездий КАМ-256 для четырех квадрантов

M как раз и определяют нелинейность $\Delta E(A, M)$. В качестве примера, на рис. 2 показана зависимость функции $\Delta E(A, M)$ при $A = 1$.

Заметим, что диапазон изменения параметра M начинается со значения двух, так как при наличии не менее чем двух позиций сигнала, возможно осуществлять его манипуляционное кодирование бинарной информацией [11, 15].

В общем случае функция $\Delta E(M)$ является математической абстракцией, т.к. в сигнально-кодовых конструкциях КАМ-М операция информационного кодирования сигнальных символов для бинарных символов предполагает распределение символов в соответствии с формулой (2).

Предложения по применению гексагональных структур

Полученные результаты аналитического моделирования показали, что количественный рост символов, используемых для кодирования сигнальных позиций, ведет к снижению величины МЕР, что в свою очередь ведет к снижению помехоустойчивости приема [12, 19]. Причем указанные изменения функции $\Delta E(M)$ от параметра M носят нелинейный характер. Поэтому рассмотрим структуру основных видов сигнальных конструкций, формируемых квадратурным способом. Таковыми являются: КАМ-2, КАМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 [20]

Вместе с тем анализ результатов работ [1, 4–6, 7, 9–16] показал, что одной из существенных проблем, синтезируемых указанным образом сигналов КАМ-М, является достаточно высокий их пик-фактор. Он обусловлен тем, что фазовые созвездия сигналов КАМ построены в соответствии с формируемой структурой квадрата. Однако такой подход не является опти-

мальным для заполнения двумерных пространств. В частности, для двумерного пространства Евклида наилучшее заполнение будет обеспечено при условии размещения центров фазовых созвездий в вершинах фигуры, образованной правильными шестиугольниками [8].

Учитывая указанные обстоятельства, предлагается в качестве основы для синтеза сигналов использовать так называемые двумерные гексагональные сигнальные конструкции (ГЕКС-М) [9]. Особенность ГЕКС структур состоит в том, что лежащие в их основе гексагональные решетки, изначально имеют наибольшую достижимую плотность заполнения пространства. С таких позиций заполнение пространства фазовой плоскости ГЕКС-структурой является оптимальными. Следовательно, именно их целесообразно использовать при синтезе новых сигнальных конструкций.

Анализ основных ГЕКС-структур, представленных в [9], показал, что применительно к синтезу сигналов они могут быть дополнительно модифицированы. Это обусловлено тем, что помехоустойчивость приема определяется не только показателями МЕР, но и зависит от средней энергии сигнала E , которая определяется его пик-фактором Π . Поэтому в ходе синтеза сигнальных конструкций целесообразно минимизировать значение Π и максимизировать показатель E . Указанная модификация сводится к выбору начального положения ГЕКС-структуры, поскольку геометрические размеры квадрата и ромба, лежащего в основе ГЕКС-структуры, при равной площади различны.

В качестве примера, на рис. 3 представлен фрагмент сигнальных созвездий КАМ-256 для четырех квадрантов, построенных на основе традиционного квадратурного синтеза (на рисунке отмечены крестиком) и на основе модифицированной структуры ГЕКС-4 (на рисунке отмечены точками).

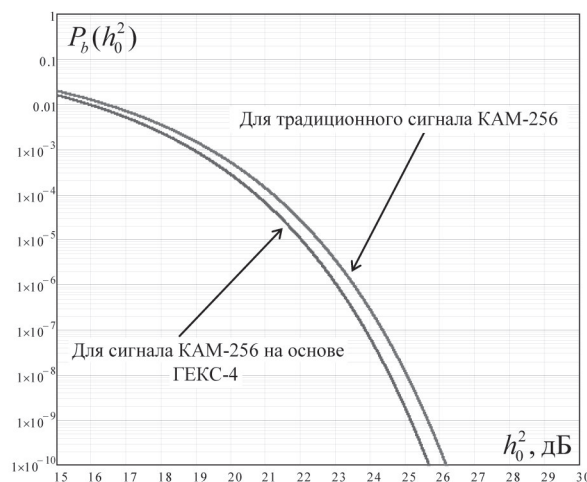


Рис. 4. Фрагменты сигналов КАМ-256 созвездий КАМ-256 для четырех квадрантов

Заметим, что именно указанные геометрические различия и наделяют сигналы на основе структуры ГЕКС-4 лучшими показателями помехоустойчивости. В частности, сигналы КАМ-256, на основе ГЕКС-4, превосходят аналогичные традиционные сигналы КАМ-256 по показателю средней энергии более чем на 15%, хотя и уступают по показателю значения пик-фактора где-то около 2%.

Для перехода к оценке помехоустойчивости предлагаемых сигнальных конструкций на основе ГЕКС структур, см. рис. 4, было использовано аналитическое выражение, характеризующее вероятность битовой ошибки при модуляции КАМ, представленное в [12].

$$P_b \approx \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q \left[\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \right) \frac{2E_b W_0}{N_0}} \right], \quad (9)$$

где M – количество сигнальных элементов (фазовых центров на плоскости сигнального созвездия); E_b – сигнальная энергия, приходящаяся на бит; N_0 – спектральная плотность мощности шума;

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

– гауссов интеграл ошибок; W_0 – энергетический выигрыш по показателю средней энергии.

Отметим, что при расчете величины P_b как функции от $h_0^2 = E_b / N_0$, использована функция ошибок

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2) du.$$

Заключение

Полученные результаты аналитического и компьютерного моделирования подтвердили целесообразность синтеза сигналов КАМ-М с использованием ГЕКС-структур. При этом авторы полагают, что данный вопрос требует проведения дополнительного исследования. Несмотря на то, что представленная в статье сигнальная конструкция КАМ-256 на основе структуры ГЕКС-4 уже оригинальна по своей структуре, ее дальнейшая модификация видится в трансформации сигнального созвездия, которая, по мнению авторов, позволит повысить общую помехоустойчивость приема еще на 4–5 дБ [21]. Кроме того, интересным решением, по мнению авторов, видится и применение на приеме методов совместной частотно-временной обработки сигналов. В частности, рассмотренных в [22–24].

Литература

1. Довбня, В. Г. Влияние качества функционирования гетеродинов на помехоустойчивость приема сигналов с

квадратурной амплитудной модуляцией / В.Г. Довбня, Д.С. Коптев // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 9 (17). – С. 40–48.

2. О новом подходе к формированию сигнально-кодовых конструкций с высокой спектральной эффективностью / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Д.И. Ушаков, И.А. Старовойт // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12, № 3. – С. 17–22.

3. Пипия, Л. К. Связь 5G и развитие телекоммуникаций / Л.К. Пипия, В.С. Дорогокупец // Наука за рубежом. – 2021. – № 96. – С. 1–67.

4. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, А.А. Русин, А.С. Дворников // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2014. – № 2. – С. 51–56.

5. Сидельников, Г. М. Помехоустойчивость демодулятора сигнала КАМ-16 при трансформации границ сигнального созвездия в канале с многолучевостью / Г.М. Сидельников // Вестник Новгородского государственного университета. – 2021. – № 2 (123). – С. 76–81.

6. Шахнович, И. DVB-T2 – новый стандарт цифрового телевизионного вещания / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2009. – № 6 (96). – С. 30–35.

7. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость сигналов квадратурной амплитудной манипуляции / С.В. Дворников, А.А. Устинов, А.А. Русин [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

8. Слоэн, Н. Дж. А. Упаковка шаров / Н.Дж.А. Слоэн // В мире науки. – 1984. – № 3. – С. 72–83.

9. Бураченко, Д. Л. Геометрические модели сигнально-кодовых конструкций / Д.Л. Бураченко, Н.В. Савищенко. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Изд-во ВАС, 2020. – 390 с.

10. Дворников, С. В. Метод оценки помехоустойчивости сигнальных конструкций квадратурной модуляции с трансформированными констелляционными диаграммами / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, В.П. Эконом // Радио-промышленность. – 2017. – № 1. – С. 51–56.

11. Митасов, И. Ю. Исследование методов снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием / И.Ю. Митасов, Р.Б. Саткенов // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2018. – № 4 (15). – С. 1–11.

12. Прокис, Дж. Цифровая связь / Джон Прокис ; перевод с английского под ред. Д.Д. Кловского. – Москва : Радио и связь. – 2000. – 800 с.

13. Дворников, С. В. Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, С.С. Манаенко // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 9. – С. 685–689.

14. Выболдин, Ю. К. Сравнительная оценка помехоустойчивости приема сигналов с КАМ / Ю.К. Выболдин // Научная сессия ГУАП : сб. докладов (Санкт-Петербург, 11–15 апреля 2016 г.). – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. – 2016. – С. 26–31.

15. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, С.С. Мананенко [и др.] // Информация и Космос. – 2015. – № 3. – С. 13–16.

16. Методика трансформации сигнального созвездия сигнала КАМ-16 с изменением его формы / А.Ю. Гужва, С.В. Дворников, А.А. Русин, А.В. Пшеничников // Электросвязь. – 2015. – № 2. – С. 28–31.

17. Быстрый цифровой алгоритм демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией / В.П. Литвиненко, Е.А. Бокова, А.О. Апалихин, С.В. Шкильная // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14, № 4. – С. 108–112.

18. Еремеев, А. В. О поиске подмножества векторов минимальной мощности с ограничением на сумму квадратов евклидовых попарных расстояний / А.В. Еремеев,

М.Я. Ковалёв, А.В. Пяткин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9, № 4. – С. 17–19.

19. Теоретические положения трансформации констелляционных диаграмм сигнальных конструкций / С.В. Дворников, А.А. Погорелов, А.В. Пшеничников, Г.Ю. Литкевич // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2015. – № 6. – С. 119–126.

20. Довбня, В. Г. Способы восстановления несущего колебания для демодуляторов сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией / В.Г. Довбня, Д.С. Коптев // Телекоммуникации. – 2020. – № 8. – С. 2–7.

21. Носов, В. И. Особенности определения параметров цифрового телевизионного вещания / В.И. Носов, М.В. Зиновьев, А.С. Ладан // Вестник СибГУТИ. – 2021. – № 2 (54). – С. 48–59.

22. Дворников, С. В. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных частотно-временных распределений / С.В. Дворников // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 2. – С. 7–11.

23. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных распределений / С.В. Дворников, А.И. Осадчий, С.С. Дворников, Д.В. Родин // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 10. – С. 46–54.

24. Метод измерения параметров кратковременных сигналов на основе распределения Алексева / С.В. Дворников, А.Ф. Яхеев, А.Ю. Супян, А.С. Дворников // Информация и Космос. – 2011. – № 1. – С. 66–74.