Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов

Theoretical provisions of increase of signal noise resistance and code constructions of quadrature signals

Дворников / Dvornikov S.
Сергей Викторович
(practicdsv@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГКВОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного),
профессор кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Пшеничников / Pshenichikov A.
Александр Викторович
(siracooz77@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВАС им. С. М. Буденного,
доцент кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Манаенко / Manaenko S.
Сергей Сергеевич
кандидат технических наук, доцент.
ВАС им. С. М. Буденного,
доцент кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Бурыкин / Burykin D.
Дмитрий Александрович
(demon13_84@mail.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Кузнецов / Kuznetsov D.
Денис Александрович
кандидат технических наук, доцент.
ВАС им. С. М. Буденного,
доцент кафедры радиосвязи.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: помехоустойчивость – noise resistance; пик-фактор – peak-factor; квадратурная амплитудная манипуляция – quadrature amplitude modulation.

В статье предложена новая форма сигнального созвездия с уменьшенным значением пик-фактора. Обосновываются теоретические положения трансформации сигнально-кодовых конструкций с позиций повышения помехоустойчивости их приема.

New form of signal star pattern with a reduced peak-factor value is offered in the article. Theoretical provisions of signal and code construction transformation are substantiated in terms of increased noise resistance of their reception.

В настоящее время в радиотехнике широко используется метод формирования сигнально-кодовых конструкций (СКК) на основе синфазной и квадратурной составляющих. В частности, к таким сигналам относятся сигналы квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ).

Сигналы КАМ в большинстве случаев синтезируются на основе биортогональных решеток [1], которые позволяют определить заданную степень помехоустойчивости. Вместе с тем, исследования показывают, что трансформация констеляционной диаграммы позволяет добиться повышения помехоустойчивости при неизменном уровне энергетических затрат. В предыдущем номере журнала авторами были рассмотрены вопросы синтеза сигнальных созвездий с трансформированной констелляционной диаграммой [2], однако недостаток подобного подхода заключается в относительно высоком значении пик-фактора (ПФ) полученной СКК, а также ограниченности в вопросах повышения помехоустойчивости вследствие итоговой формы полученной констелляционной диаграммы.

В связи с этим на практике применяются различные способы трансформации СКК КАМ при использовании современных телекоммуникационных технологий. В частности, для повышения помехоустойчивости в теле-

визионном стандарте DVB-T2 сигналы КАМ с трансформированными констелляционными диаграммами передаются по каналу на основе технологии orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) [3]. Сущность трансформации по стандарту DVB-T2 заключается в повороте всех точек сигнального созвездия на 16,8 градусов (см. рис. 1) [2].

В результате такого поворота каждая точка констелляционной диаграммы получает свои уникальные координаты по осям Q и I (соответственно квадратурной и синфазной составляющих), которые принадлежат только ей, т.е. значения I_A и Q_A больше не встречаются ни у одной из точек сигнального созвездия, кроме точки A (см. рис. 1).

Указанный подход позволяет идентифицировать искомое положение точки A всего по одному из значений I_A или Q_A. Между тем, рассматриваемая трансформация не является единственно возможной. Так, в [4] обоснован другой подход, реализация которого представлена на рис. 2.

Согласно предложенному подходу для векторов сигнальных созвездий каждого из квадрантов констелляционной диаграммы реализовано свое независимое вращение на 17,1 градуса. В качестве условий предлагаемой трансформации рассматривались сохранение величины минимального евклидового расстояния (МЕР) и обеспечение для каждой точки векторов сигнального созвездия пары ее уникальных координат по осям I и Q (в ограничение выведено условие сохранения средней энергии сигнальных конструкций).

Заметим, что в относительных значениях координат, представленных на рис. 1 и 2, значения МЕР одинаковы у обоих созвездий, что дает основание предположить, что по данному показателю помехоустойчивости рассматриваемых моделей близки друг к другу.

Между тем расчет ПФ показал, что его значения предпочтительней у модели СКК КАМ-16, созвездие которой трансформировано на основе предлагаемого подхода, что подтверждают результаты имитационного моделирования, согласно которым выигрыш составляет около 1,5%.

Полученные результаты позволяют обосновать теоретические положения трансформации СКК с позиций повышения помехоустойчивости их приема. С этой целью докажем следующее теоретическое утверждение:

При произвольной трансформации любых двух точек сигнального созвездия повышение взаимной помехоустойчивости приема образованных ими сигнальных векторов обеспечивается при выполнении следующего условия:

$$P_a(\alpha-1)+P_b(\beta-1)-2\sqrt{\frac{P_b}{P_a}}\left[\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}\cos(\gamma+\Delta\gamma)-\cos\gamma\right]>0,$$

где α и β – коэффициенты трансформации;

$\Delta\gamma$ – приращение угла между ВСС;

P_a и P_b – мощности точек СКК, определяемые соответствующими векторами сигнального созвездия (ВСС).

Для доказательства данного утверждения оценим изменение взаимной помехоустойчивости приема ВСС при трансформации образующих их точек A_3 и A_4,

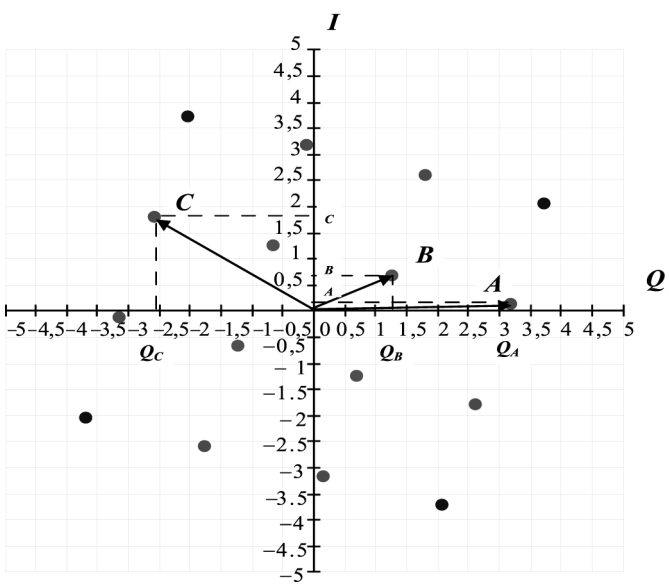

Рис. 1. Констелляционная диаграмма сигнала КАМ-16, трансформированная по стандарту DVB-T2

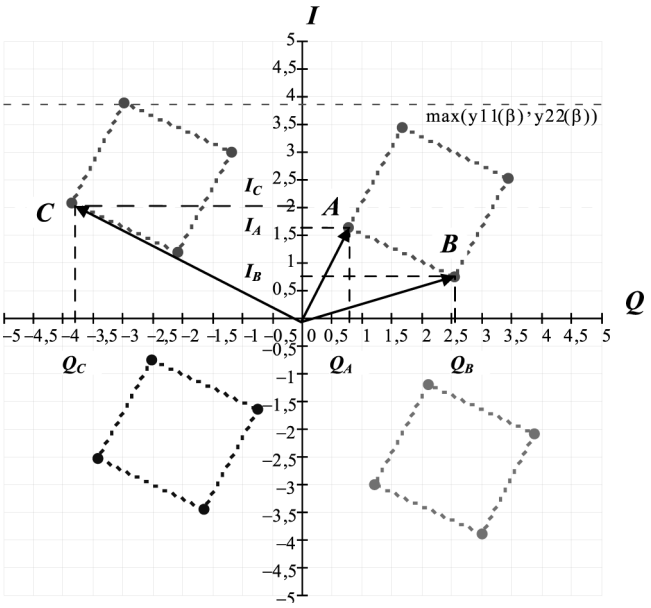

Рис. 2. Констелляционная диаграмма модели сигнала КАМ-16, трансформированная по альтернативному варианту

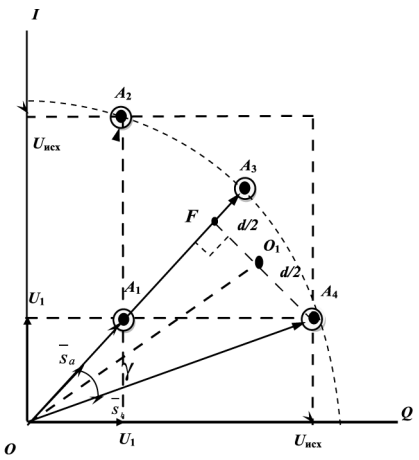

Рис. 3. Созвездие сигнально-кодовой конструкции

представленных на рис. 3. Под взаимной помехоустойчивостью двух ВСС будем понимать вероятность неправильного отображения принятого вектора.

Предположим, что на комплексной плоскости ВСС $\overline{OA}_3$ и $\overline{OA}_4$ СКК трансформируется в ВСС $\overline{OA}_3''$ и $\overline{OA}_4''$:

$$\overline{OA}_3'' = \alpha\,\overline{OA}_3,$$

$$\overline{OA}_4'' = \beta\,\overline{OA}_4.$$

Допустим, что известны значения модулей векторов $\left|\overline{OA}_3\right| = \sqrt{P_a}$ и $\left|\overline{OA}_4\right| = \sqrt{P_b} = \sqrt{P_a}$. Тогда помехоустойчивость трансформированной СКК оценим с позиций определения вектора переходной вероятности, который определим совокупностью возможных значений ошибочного приема произвольных точек СКК. Подобный подход наиболее подробно описан в [5–6].

При условии, что трансформируются только две точки СКК, изменение помехоустойчивости полученной конструкции определяется изменением взаимной помехоустойчивостью данных точек.

Из [1] следует, что вероятность парной ошибки приема элемента СКК определяется величиной МЕР между точками ВСС. Значение МЕР (d) между ВСС $\overline{OA}_3$ и $\overline{OA}_4$ определим из прямоугольного базиса с использованием треугольников OA_4F и A_4FA_3:

$$d = \sqrt{P_a\left(1+\frac{P_b}{P_a}\right) - 2\sqrt{\frac{P_b}{P_a}}\cos\gamma}\,. \qquad (1)$$

После трансформации СКК МЕР между точками A_3'' и A_4'' полученной СКК может быть представлено как

$$d'' = \sqrt{P_a\left(1+\frac{\beta P_b}{\alpha P_a}\right) - 2\sqrt{\frac{\beta P_b}{\alpha P_a}}\cos(\gamma+\Delta\gamma)}\,, \qquad (2)$$

Для увеличения помехоустойчивости СКК необходимо выполнение условия

$$d'' - d > 0$$

т.е.

$$\sqrt{P_a\left(1+\frac{\beta P_b}{\alpha P_a}\right) - 2\sqrt{\frac{\beta P_b}{\alpha P_a}}\cos(\gamma+\Delta\gamma)} - \sqrt{P_a\left(1+\frac{P_b}{P_a}\right) - 2\sqrt{\frac{P_b}{P_a}}\cos\gamma} > 0, \qquad (3)$$

что эквивалентно

$$P_a(\alpha-1) + P_b(\beta-1) - 2\sqrt{\frac{P_b}{P_a}}\left[\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}\cos(\gamma+\Delta\gamma) - \cos\gamma\right] > 0. \qquad (4)$$

Таким образом, сформулированное утверждение доказано.

Из представленного теоретического утверждения можно определить следующие важные заключения, которые представим в виде следствий:

Следствие 1: Для увеличения помехоустойчивости приема двух произвольных точек трансформируемого сигнального созвездия с фиксированным отношением их мощностей и постоянным значением угла их взаимного расположения на комплексной плоскости необходимо трансформировать каждую из этих точек с одинаковым коэффициентом большим единицы.

Действительно, при $\alpha = \beta$, а также при неизменном значении угла γ, образованного векторами сигнального созвездия, условие (4) выполняется при $\alpha > 1$.

Следствие 2: Для увеличения помехоустойчивости приема двух произвольных точек сигнального созвездия с фиксированными значениями мощностей необходимо увеличить угол между ними на величину в пределах от нуля до 180°.

Действительно, из неравенства (4) следует, что при неизменном значении мощности трансформируемых точек ВСС

$$\cos(\gamma+\Delta\gamma) - \cos\gamma < 0.$$

При этом функция косинуса убывает на интервале от нуля до 180°.

Таким образом, полученные результаты можно рассматривать как теоретические положения, определяющие трансформацию констелляционных диаграмм СКК, поскольку они позволяют получить новые формы сигнальных созвездий, отличающихся повышенной помехоустойчивостью.

Дальнейшее направление исследования авторы видят в применении рассмотренных СКК в автоматизированных системах контроля интенсивности физических полей [7].

Литература

1. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис ; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

2. Дворников, С. В. Структурно–функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, Д.А. Бурыкин // Информация и Космос. – 2015. – № 2. – С. 4–7.

3. Framing structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). – DVB Document A122, Jun. 2010. – 179 p.

4. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформируемыми сигнальными созвездиями / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия техника телевидения. – 2014. – № 2 – С. 51–56.

5. Noncoherent Amplitude/Phase Modulated Transmission Schemes for Releigh Block Fading Channels / Yen-Ming Chen [et. al.] // IEEE Transaction on communication. – 2013. – V. 61. – Issue 1. – P. 217–227.

6. Методика трансформации сигнального созвездия КАМ-16 с изменением его формы / А.Ю. Гужва [и др.] // Электросвязь. – 2015. – № 2. – С. 28–32.

7. Автоматизированная система контроля интенсивности физических полей рассеивания сигналов / А.А. Алексеев [и др.] // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10.– № 3. – С. 77–87.