Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью

Structural-functional model of signal constellation with the raised noise immunity

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

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

Ключевые слова: помехоустойчивость – noise immunity; констеляционная диаграмма – signal constellation; квадратурная четырехпозиционная манипуляция – quadrature phase shift keying.

В статье предложена структурно-функциональная модель сигнальной конструкции с повышенной помехоустойчивостью. Показан вариант сигнального созвездия конструкции QPSK, сформированной методом балансной модуляции синфазной и квадратурной составляющих. Доказано увеличение помехоустойчивости предложенной модели. Разработаны предложения по ее технической реализации.

Structural-functional model of signal construction with the raised noise immunity is suggested. The signal constellation of a QPSK design option created by inphase and quadrature components balanced modulation method is shown. The increase in noise immunity of the suggested model is proved. Offers on its technical realization are developed.

Введение

В настоящее время все более актуальными становятся вопросы передачи видеосигналов в ограниченном частотном канале с требуемым качеством. Между тем, в соответствии с теорией о потенциальной помехоустойчивости, наилучшие показатели достоверности обеспечиваются при передаче двоичной информации без избыточности посредством противоположных колебаний при условии их когерентной обработки на приеме [1].

Однако указанному требованию в полной мере удовлетворяет только ограниченное число модуляционных форматов на основе *M*-ных сигнальных конструкций (СК). К сигнальным конструкциям относят сигналы, формируемые на основе синфазной и квадратурной составляющих несущего колебания. В частности, таковыми являются сигналы квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ).

В общем случае помехоустойчивость СК определяется таким показателем как минимальное евклидово расстояние (МЕР) $d_э$, который, согласно [2], представляет наименьшее геометрическое расстояние между точками сигнального созвездия (констелляционной диаграммы).

С позиций показателя МЕР сигналы КАМ предпочтительнее, чем аналоговые многомерные сигналы фазовой манипуляции (ФМ) [2].

С целью повышения помехоустойчивости в телевизионном стандарте DVB-T2 предложена трансформация констелляционных диаграмм сигналов, формируемых на принципах квадратурного синтеза [3]. Указанные процедуры позволяют определить каждой точке сигнального созвездия независимые координаты, которые при демодуляции дают возможность воссоздать констелляционную диаграмму сигнала даже по одной восстановленной координате и тем самым повысить помехоустойчивость процедур демодуляции в целом. При этом энергетические параметры формируемой СК остаются неизменными.

Целью настоящей статьи является разработка предложений по трансформации созвездий СК, в частности четырехпозиционной КАМ, в которой повышение свойств помехоустойчивости достигается за счет изменения показателя МЕР (при сохранении средней энергии) по отношению к традиционным, в том числе и трансформированным, формам сигналов КАМ.

Предложения по повышению помехоустойчивости сигнальных конструкций

Требования к качеству передачи видеоинформации стимулировали поиск эффективных подходов к практической реализации высокоскоростных модуляционных форматов, в частности, сигналов Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). В телевизионном стандарте DVB-T2 предлагается использовать сигналы QPSK (формируемых квадратурным методом) с трансформированными констелляционными диаграммами, которые в дальнейшем передаются по каналу методом Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

Согласно стандарту DVB-T2, для СК QPSK трансформация констелляционной диаграммы связана с поворотом всего сигнального созвездия на 29 градусов (см. рис. 1а) [4].

В результате поворота сигнального созвездия каждая точка констелляционной диаграммы получила свои координаты по осям Q и I, которые принадлежат только ей, т.е. значения I_A и Q_A больше не встречаются ни у одной другой точки констелляционной диаграммы, кроме точки A (см. рис. 1б). Следовательно, предоставляется возможность восстановления искомого положения точки A всего по одному из значений I_A или Q_A.

Между тем, рассматриваемая трансформация не является единственно возможной. В частности, предлагается другой альтернативный подход, представленный на рис. 2б.

Согласно предлагаемому подходу, расстояние между точками сигнального созвездия B и D было увеличено ровно на такое значение, на какое уменьшено расстояние между A и C. Такой подход позволяет сохранить значение средней энергии СК неизменным.

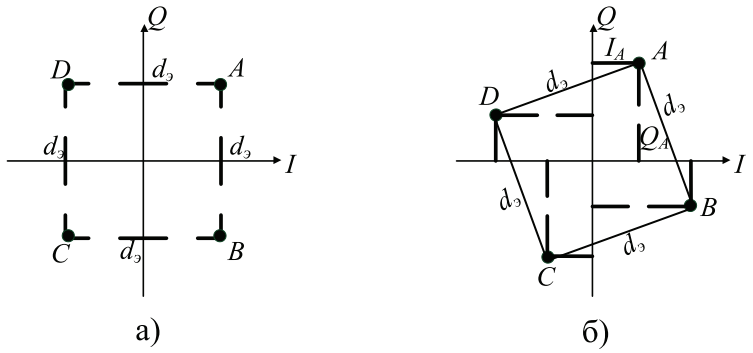

Рис. 1. Констелляционная диаграмма сигнала QPSK:
а) стандартная;
б) трансформированная по стандарту DVB-T2

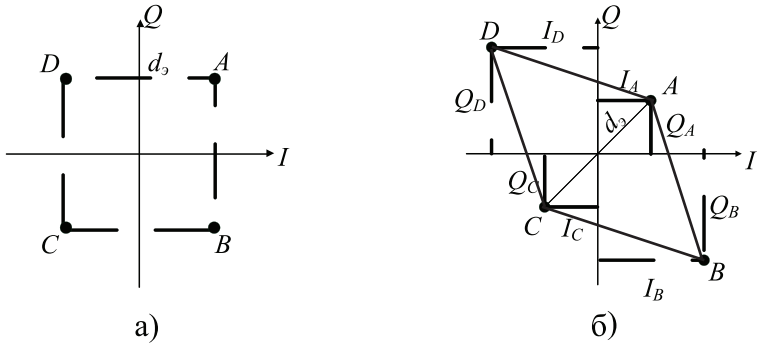

Рис. 2. Констеляционная диаграмма сигнала QPSK:
а) стандартная;
б) трансформированная по альтернативному варианту

Аналогичным образом указанные вопросы трансформации созвездий решались для сигналов КАМ-16 в [5]. В качестве условий предлагаемой трансформации рассматривались: сохранение величины МЕР и обеспечение для каждой точки сигнального созвездия пары ее уникальных координат по осям *I* и *Q*.

Следует отметить, что у новой СК (см. рис. 2б), несмотря на сохранение средней энергии, изменилось значение МЕР для отдельных точек сигнального созвездия. Если для точек *C* и *A* значения $d_э^C$ и $d_э^A$ (верхний индекс указывает точку, к которой относится значение МЕР) оно осталось аналогичным исходной СК, то для точек *D* и *B* их указанные значения изменились. Проведенный расчет показывает, что

$$d_э^D = d_э^B = \frac{\sqrt{5}}{2} \approx 1{,}118,$$

при условии, что в исходной СК $d_э = 1$. В связи с изменением параметра целесообразно для новой сигнальной конструкции рассчитать новый энергетический показатель, который можно определить как среднее значение МЕР всей СК

$$\overline{d}_э^* = \frac{d_э^A + d_э^B + d_э^C + d_э^D}{4}$$

Введение нового показателя обусловлено тем, что отдельные комбинации информационных битов будут формировать точки СК с большим значением помехоустойчивости, поскольку они имеют большее значение МЕР. В результате увеличивается помехоустойчивость всей конструкции в целом. Указанный эффект связан с тем, что все точки сигнальных векторов ранее известных СК связаны друг с другом посредствам МЕР, в связи с чем данный показатель и определял помехоустойчивость СК. В разработанной конструкции ситуация иная. Этим обстоятельством и определяется введение нового показателя.

Следует отметить, что для модели СК, предлагаемой стандартом DVB-T2, значение МЕР $\overline{d}_э^*$ после поворота созвездия не изменилось, т.е. $\overline{d}_э^* = \overline{d}_э$. В то время как в предложенном подходе новая величина

$$\overline{d}_э^* = \frac{2+\sqrt{5}}{2} \approx 1{,}059\,.$$

Таким образом, увеличение значения МЕР $\overline{d}_э$ определяет повышение помехоустойчивости новой СК при сохранении ее средней энергии.

Предложения по технической реализации модели сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью

Разработанная структурно-функциональная модель СК позволяет синтезировать сигналы с четырехпозиционной квадратурной модуляцией. Действительно, у предложенной модели результирующий сигнал будет представлять собой СК вида КАМ, у которой каждой комбинации битов соответствуют колебания определенной амплитуды и фазы (рис. 3).

Между тем, анализ структуры результирующего сигнала указывает на то, что при смене битов будет происходить разрыв фазы. Указанное явление в общем случае негативно сказывается на эффективности приемо-передающих устройств радиолинии.

В связи с этим предлагается следующее техническое решение. Для избежания разрывов фазы при смене битов целесообразно обеспечить требуемый поворот фазы на длительности элемента. Такой подход аналогичен модуляции с минимальным набегом фазы. В результате такой операции обеспечивается портативность представления сигнала в частотном пространстве.

Указанный вид модуляции целесообразно определить как амплитудо-фазо-балансной. В общем случае формулировка сигналов будет по-прежнему соответствовать сигналам КАМ-4, но с более высокой помехоустойчивостью.

На рис. 4 представлена структурная схема устройства, реализующего предлагаемое техническое решение. Устройство функционирует следующим образом. На входы амплитудного модулятора из двух источников сообщений поступает исходная битовая последовательность (ИБП). Дополнительно на вход амплитудного модулятора подается высокостабильное гармоническое колебание с выхода опорного генератора. В амплитудном модуляторе производится двухуровневая амплитудная модуляция несущей.

Полученный таким образом сигнал подается на входы фазовых модуляторов. Причем на входе второго фазового модулятора фаза синтезированного сигнала сдвигается на 90°. В блоках фазовых модуляторов производится фазовая задержка ИБП первого и второго источников на половину длительности импульса, а также фазовая модуляция амплитудно-модулированных сигналов. С выхода фазовых модуляторов полученные сигналы поступают на входы балансных модуляторов.

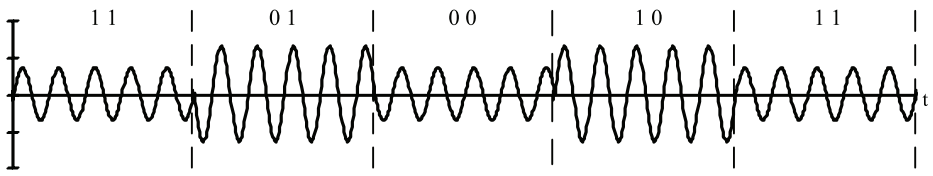

Рис. 3. Временная диаграмма амплитудо-фазо-манипулированного сигнала

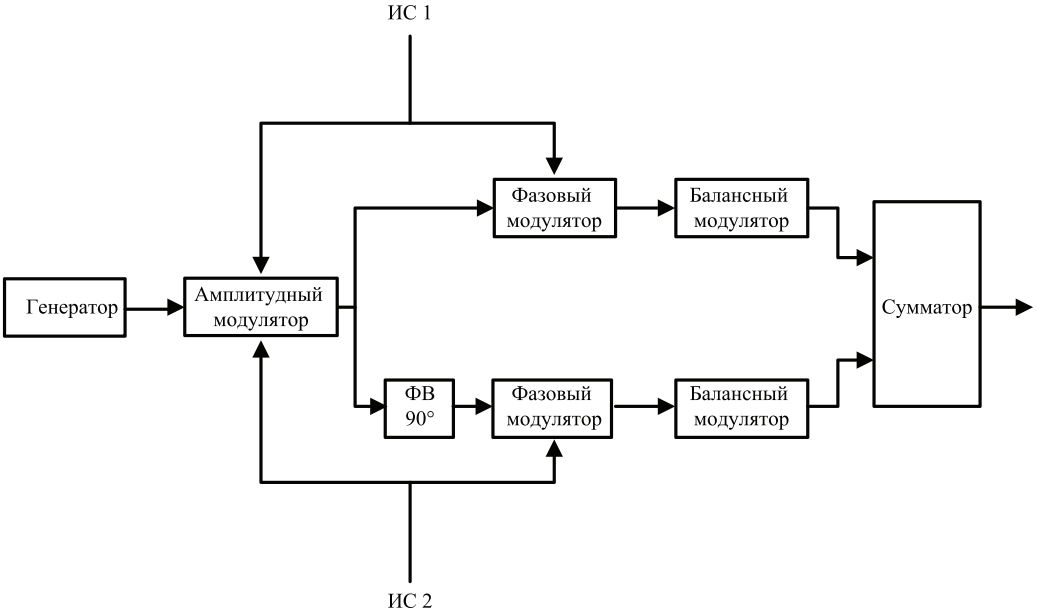

Рис. 4. Структурная схема устройства формирования сигналов с четырехпозиционной квадратурной модуляцией

Балансные модуляторы формируют синфазную и квадратурную составляющие, сложение которых на выходе сумматора образуют исходную СК.

Заключение

Предложенный подход к формированию модели сигнала КАМ-4 с трансформированной констелляционной диаграммой позволит повысить помехоустойчивость его приема по отношению к стандартной модели, а также модели, используемой в стандарте DVB-T2. Кроме того, предлагаемый подход позволяет получить сигнальное созвездие, каждая точка которого имеет уникальные координаты в пространстве *I* и *Q*.

Следует заметить, что предложенная модель СК может быть демодулирована и в соответствии со стандартом DVB-T2. Однако при этом снижается уровень помехоустойчивости приема элементов СК.

Дальнейшее повышение помехоустойчивости, по мнению авторов, возможно методом совместной частотно-временной обработки сигналов в трактах приема [6]. В связи с этим направление дальнейших исследований авторы связывают с разработкой эффективного способа формирования модели СК в соответствии с предложенным подходом и проведением экспериментов, связанных с оценкой помехоустойчивости ее приема при различных способах кодирования точек сигнального созвездия.

Литература

1. Коржик, В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник / В.И. Коржик, Л.М. Финк, К.Н. Щелкунов.– М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

2. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [пер. с англ.] / Б. Скляр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

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

4. Шахнович, И. DVB-T2 – новый стандарт цифрового телевизионного вещания / И. Шахнович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 6. – С. 30–35.

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