

References

1. Adler-Golden S. M., Perkins T., Matthew M. W., Berk A., Bernstein L. S., et al. Speed and accuracy improvements in FLAASH atmospheric correction of hyperspectral imagery, *SPIE Optical Engineering*, 2012, Vol. 51 (11), pp. 111707 (1–10).
2. BIL, BIP, and BSQ raster files. *ESRI. ArcGIS 9.2 Desktop Help*. Retrieved from. URL: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=BIL,_BIP,_and_BSQ_raster_files
3. **EarthExplorer**. *USGS*. Retrieved from <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
4. **Fast** Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH), *Exelis ENVI*. Retrieved from <http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>
5. **Hyperion** level 1 gst (L1GST) product output files data format control book. *Earth Observing-1 (EO-1)*. Version 1.0. Department of the Interior U. S. Geological Survey, 2006, 24 p.
6. Perkins T., Adler-Golden S. M., Cappelaere P., Mandl D. High-speed Atmospheric Correction for Spectral Image Processing, *SPIE Proceeding: Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*, 2012, Vol. 8390, pp. 245–252.
7. Qu Z., Goetz A. F. H., Kindel B. High-accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) model, *Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41 (6), pp. 1223–1231.
8. San B. T., Suzen M. L. Evaluation of different atmospheric correction algorithms for EO-1 Hyperion imagery, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Tokyo, 2010, vol. 38 (8), pp. 392–397.
9. **The IDL** Thread Pool. *Exelis ENVI*. Retrieved from http://www.exelisvis.com/docs/The_Thread_Pool.html.
10. Thompson B. J., Rahman Z., Park S. K. Multiscale retinex for improved performance in multispectral image classification, *SPIE Proceedings: Visual Information Processing IX*, 2000, vol. 4041, pp. 34–44.

УДК 621.391

С. В. Дворников, д-р техн. наук, проф., профессор каф.,
А. В. Пшеничников, канд. техн. наук, доц., доц. каф.,
С. С. Манаенко, канд. техн. наук, ст. преподаватель каф.,
Военная академия связи, г. Санкт-Петербург, e-mail: manaenkoss@mail.ru

Помехоустойчивая модель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием

Представлены результаты исследования, направленные на разработку модели сигнала КАМ-16 с трансформированной конstellационной диаграммой. Определяются показатели помехоустойчивости, по которым оценивается разработанная модель и модель с трансформированным созвездием в соответствии со стандартом цифрового телевидения DVB-T2.

Ключевые слова: помехоустойчивость, конstellационная диаграмма, вектор сигнального созвездия, квадратурная амплитудная манипуляция

Введение

В настоящее время в радиотехнике широко используются сигнальные конструкции (СК), формируемые квадратурным методом на основе синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала. В частности, к таковым относятся сигналы квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ). Каждый сигнал КАМ можно изобразить в виде сигнальной точки, координаты которой определяются значениями Q и I . Совокупность таких точек образует так называемое сигнальное созвездие (конstellационную диаграмму). При этом наибольшее распространение в радиотехнике получили созвездия, имеющие прямоугольную диаграмму из 16 сигнальных точек (КАМ-16) [1, 2].

Как правило [3], помехоустойчивость СК определяется минимальным евклидовым расстоянием (МЕР) d_E . Указанный показатель представляет собой наименьшее геометрическое расстояние между точками сигнального созвездия. Другим важным

энергетическим показателем СК является отношение максимальной мощности СК к ее среднему значению, определяемому в работе [4] как пик-фактор (ПФ). По показателю МЕР сигналы КАМ являются более помехоустойчивыми по отношению к сигналам фазовой манипуляции такой же размерности (позиционности), однако по показателю ПФ они проигрывают последним.

Между тем в телевизионном стандарте DVB-T2 для повышения помехоустойчивости рекомендуется использовать модели СК с трансформированными конstellационными диаграммами, полученными путем поворота всех точек сигнального созвездия на одинаковый угол. В результате применения указанной процедуры каждая точка сигнального созвездия получает независимые координаты, которые дают возможность на приемном конце восстановить позиции точки сигнального вектора конstellационной диаграммы СК даже по одной координате, и тем самым повысить помехоустойчивость процедур демодуляции.

Следует отметить, что рекомендованная в стандарте DVB-T2 трансформация не изменяет энергетические параметры модели СК, т. е. повышение помехоустойчивости достигается только за счет получения независимых координат каждой из точек сигнального созвездия.

Новизна работы заключается в разработке подхода оценки помехоустойчивости СК на основе их энергетических параметров, в том числе и значения МЕР. В связи с этим в статье представлена модель СК, в которой повышение помехоустойчивости достигается прежде всего за счет изменения ее энергетических параметров.

Энергетические параметры сигнальных конструкций

В общем случае математическую модель канала связи для произвольного сигнала $s(t)$ можно представить выражением

$$z(t) = \mu(t)s(t) + \xi(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где $\mu(t)$ — коэффициент передачи канала; $\xi(t)$ — аддитивный белый Гауссов шум (АБГШ) с односторонней спектральной плотностью шума N_0 ; T — длительность символа.

Заметим, что при $\mu(t) = 1$ в выражении (1) получаем классический канал с АБГШ. Если же $\mu(t) = \mu$, где μ — случайная величина, то получаем модель канала с неселективными замираниями. При условии $T < \tau_s$, где τ_s — интервал замираний, фазу принимаемого сигнала $z(t)$ можно оценить без ошибок.

В соответствии с теоремой ортогонализации Грамма—Шмидта [3] произвольный сигнал $s(t)$ может быть представлен в виде

$$s(t) = \sum_{v=1}^N s_v w(t),$$

где $w(t)$ — базисные функции.

Такой подход позволяет перейти к геометрической интерпретации сигналов и рассматривать их в конечном евклидовом пространстве. При этом энергия любого сигнала может быть определена как

$$E = \sum_{v=1}^N s_v^2.$$

Поскольку энергия конечна, $E < \infty$, то очевидно, что среди всех возможных моделей СК есть конструкции, имеющие максимальную энергию, которую будем обозначать E_m .

Тогда средняя энергия сигнала будет определяться как

$$E_c = \sum_{r=0}^{M-1} p(r) E_r,$$

где $p(r)$ — априорная вероятность передачи r -й составляющей СК.

Для условия равновероятных состояний всех составляющих СК, т. е. когда $p(r) = 1/M$, где M — позиционность сигнала, имеем [5]

$$E_c = \frac{1}{M} \sum_{r=0}^{M-1} E_r.$$

Рассмотрим энергетические показатели модели сигнала $s(t)$, одним из которых является ПФ, рассчитываемый как отношение максимальной энергии к ее среднему значению:

$$\Pi^2 = E_m/E_c. \quad (2)$$

Другим важным показателем, характеризующим энергетические свойства СК, является МЕР, определяющий минимальную геометрическую разность между двумя сигналами $d_{rk} = \|s_r - s_k\|$, или

$$d_{rk} = \sqrt{\sum_{v=1}^N (s_{rv} - s_{kv})^2}.$$

В этом случае МЕР можно определить как

$$d_E = \min_{r \neq k} d_{r,k}, \quad r, k = \overline{0, M-1},$$

отличную от нуля, если $r \neq k$.

В своей совокупности энергетические показатели определяют коэффициент помехоустойчивости СК:

$$g_m = \left(\frac{d}{2\sqrt{E_m}} \right)^2 \quad \text{и} \quad g_c = \left(\frac{d}{2\sqrt{E_c}} \right)^2.$$

Отношение максимальной энергии и средней энергии к односторонней спектральной плотности шума определяется, соответственно, как

$$h_m^2 = \frac{E_m}{N_0} \quad \text{и} \quad h_c^2 = \frac{E_c}{N_0}.$$

Тогда с учетом полученных формул значение максимальной энергии сигнала можно представить следующим образом [6]:

$$h_m^2 = \Pi_c^2 h_c^2 \frac{E_m}{N_0}.$$

При таком подходе величины $E_{bm} = \frac{E_m}{\log_2 M}$ и

$E_{bc} = \frac{E_c}{\log_2 M}$ — соответственно, представляют собой максимальное и среднее значения энергии, затраченной для передачи одного бита, а $h_{bm}^2 = \frac{E_{bm}}{N_0}$,

$$h_{bc}^2 = \frac{E_{bc}}{N_0}, \quad h_{bm}^2 = \Pi_c^2 h_{bc}^2 \quad \text{и} \quad h_c^2 = h_{bc}^2 \log_2 M.$$

Таким образом, поскольку помехоустойчивость любой модели СК определяется только ее энергетическими показателями, то именно их целесообразно использовать в качестве критерия оценки для сравнения моделей СК между собой. Причем равенство энергетических показателей различных моделей СК дает возможность утверждать, что они обладают одинаковыми свойствами помехоустойчивости.

Оценка помехоустойчивости модели сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием

Для повышения помехоустойчивости в телевизионном стандарте DVB-T2 сигналы КАМ с трансформированными конstellационными диаграммами передаются по каналу на основе технологии (OFDM) (*orthofonal frequency division multiplexing*) [7].

Сама же трансформация по стандарту DVB-T2 заключается в повороте всех точек сигнального созвездия на $16,8^\circ$ (рис. 1) [5]. В результате такого поворота каждая точка конstellационной диаграммы получает свои уникальные координаты по осям Q и I , 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 (рис. 1).

Указанный подход позволяет восстановить исходное положение точки A всего по одному из значений I_A или Q_A .

Между тем рассматриваемая трансформация не является единственно возможной. В частности, предлагается другой подход, реализация которого позволяет получить структурную модель созвездия, представленную на рис. 2. Аналитическая мо-

дель сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием имеет вид

$$s_r(t) = I_r \cos(2\pi f_0 t + \varphi_r) + Q_r \sin(2\pi f_0 t + \varphi_r),$$

где φ_r — угол поворота сигнальной точки; f_0 — несущая частота; $r = 1, 2, \dots, M$.

В предлагаемой модели СК для векторов сигнальных созвездий каждого из квадрантов конstellационной диаграммы реализовано свое независимое вращение на $17,1^\circ$. В качестве условий трансформации рассматривались сохранение значения МЕР и обеспечение для каждой точки векторов сигнального созвездия пары ее уникальных координат по осям I и Q .

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 рассматриваемые модели близки друг к другу.

Однако расчет средней энергии и ПФ показал, что значения совокупности этих показателей предпочтительней у модели сигнала КАМ-16, созвездие которой трансформировано на основе предлагаемого подхода.

В частности, согласно проведенным расчетам по показателю ПФ, выигрыш составит около 8 %. При этом проигрыш в средней энергии составит не более 1,2 %. Следовательно, можно утверждать о возможном энергетическом выигрыше в помехоустойчивости, полученном за счет предложенной трансформации сигнального созвездия КАМ-16.

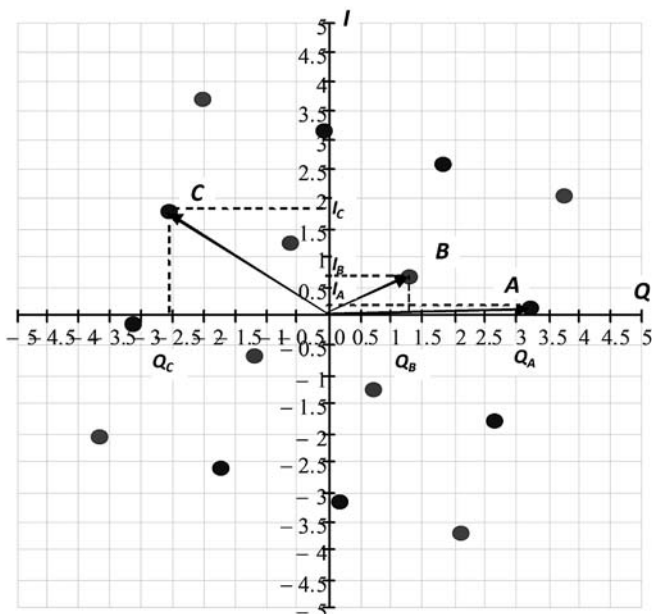


Рис. 1. Конstellационная диаграмма сигнала КАМ-16, трансформированная по стандарту DVB-T2

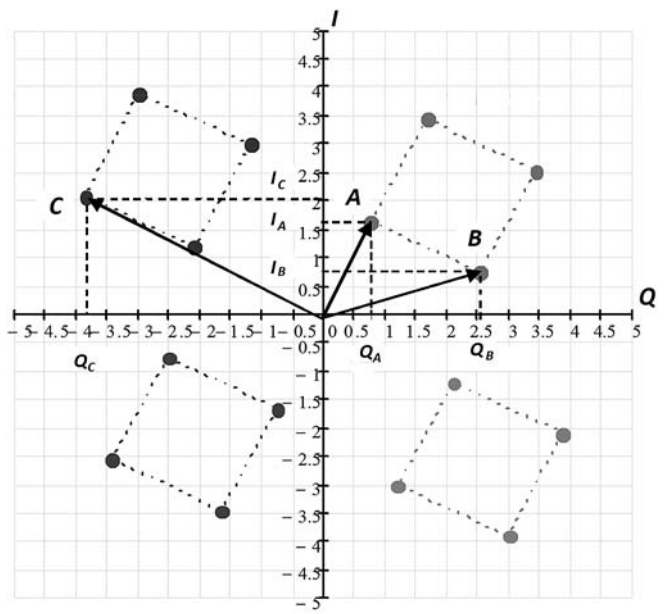


Рис. 2. Конstellационная диаграмма модели сигнала КАМ-16, трансформированная по альтернативному варианту

Результаты сравнительной оценки помехоустойчивости моделей сигнальных конструкций КАМ-16

В целях проверки полученных результатов было проведено компьютерное моделирование процесса приема элементов модели сигнала КАМ-16 по стандарту DVB-T2, а также модели сигнала КАМ-16 с трансформированным созвездием. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Помехоустойчивость приема сигналов КАМ-16 определяли с позиций ошибочного приема одного бита информации. В качестве анализируемого показателя была выбрана вероятность ошибки на бит, характеризующая частоту проявления одиночных ошибок в канале.

Указанный показатель, определяющий зависимость вероятности ошибки на бит (P_{bc}) от энергетических показателей СК, представлен в работе [6]:

$$P_{bc} = \frac{2}{\sqrt{M}} \log_2 \sqrt{M} \times \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} \left((-1)^{\frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}}} \left(2^{k-1} - \left(\frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right) \right) \right) \times Q \left((2i+1) \sqrt{\frac{6 \log_2 \sqrt{M} E_{bc}}{2(M-1) N_0}} \right), \quad (3)$$

где M — позиционность СК; $\frac{E_{bc}}{N_0}$ — отношение значения средней энергии бита к значению спектральной мощности шума.

По результатам анализа можно сделать следующие выводы.

Поворот всех векторов сигнального созвездия модели КАМ-16 на одинаковый угол (см. рис. 1) не изменяет ее помехоустойчивость в канале с АБГШ.

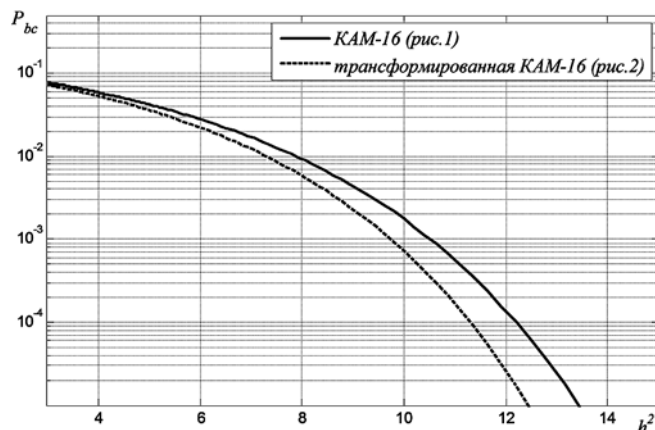


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки на бит от спектральной плотности мощности шума

Поворот векторов сигнального созвездия различных квадрантов констелляционной диаграммы на различные углы (см. рис. 2) позволяет улучшить энергетические параметры модели КАМ-16 по показателю помехоустойчивости. В результате, при приеме сигналов на основе такой модели снижается частота проявления одиночных ошибок при воздействии АБГШ.

Заключение

Таким образом, предложенный подход к формированию модели сигнала КАМ-16 с трансформированной констелляционной диаграммой позволит повысить помехоустойчивость его приема по отношению к модели, используемой в стандарте DVB-T2, и получить сигнальное созвездие, каждая точка которого имеет уникальные координаты в пространстве I и Q . Причем разность градаций координатных значений по осям будет такой же, как и у модели созвездия, трансформированного по стандарту DVB-T2. Следует заметить, что предложенная модель СК может быть демодулирована и в соответствии со стандартом DVB-T2, однако при этом уровень помехоустойчивости приема снизится не менее чем на 6 дБ.

Повысить помехоустойчивость, по мнению авторов, позволит и совместная частотно-временная обработка сигналов в трактах приема [8].

Дальнейшее исследование авторы связывают с разработкой эффективного способа формирования модели сигнальной конструкции в соответствии с предложенным подходом и с проведением экспериментов, связанных с оценкой помехоустойчивости ее приема при различных способах кодирования точек сигнального созвездия.

Список литературы

1. Smith J. G. Odd-bit quadrature amplitude-shift keying // IEEE Trans. Communications. March 1975. Vol. COM-23. P. 385—389.
2. Shi Q. Asymptotic clipping noise distribution and its impact on M-ary QAM transmission over optical fiber // IEEE Trans. Communications. June 1995. Vol. COM-43. P. 2077—2084.
3. Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.
4. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
5. Савищенко Н. В. Многомерные сигнальные конструкции: их частотная эффективность и помехоустойчивость приема / Под ред. Д. Л. Бураченко. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 420 с.
6. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
7. Framing structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). DVB Document A122, Jun. 2008.
8. Алексеев А. А., Аладинский В. А., Дворников С. В., Железняк В. К., Комарович В. Ф. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 1. С. 65—76.

Increased Noise Immunity Signal 16-QAM Constellation with Transformed

Currently, the television standard DVB-T2 to improve noise immunity, it is recommended to use a model of the signal of a quadrature manipulation transformed constellations diagrams obtained by turning all points of the signal constellation at the same angle. As a result of applying this procedure, each point of the signal constellation receives independent coordinates, which give the opportunity for the receiving end to restore the position of the signal vector constellation charts even for one coordinate, and thereby improve the robustness of the procedures demodulation. When this recommended standard DVB-T2 transformation does not change the energy parameters of the model signal design, and increased robustness is achieved only by obtaining independent of the coordinates of each point of the signal constellation.

In the paper, the rotation vectors of the signal constellation various quadrants constellational chart to make different angles, which will improve the energy parameters of the signal model QAM-16 in terms of noise immunity. Presents the results of a study aimed at developing a model for such a signal, determines the noise immunity by which to evaluate the developed model and the model with transformed constellation in accordance with the standard DVB-T2.

Keywords: immunity, constellation diagram, vector signal constellation, quadrature amplitude modulation

References

1. **Smith J. G.** Odd-bit quadrature amplitude-shift keying, *IEEE Trans. Communications*, March 1975, vol. COM-23, pp. 385–389.
2. **Shi Q.** Asymptotic clipping noise distribution and its impact on M-ary QAM transmission over optical fiber, *IEEE Trans. Communications*, June 1995, vol. COM-43, pp. 2077–2084.
3. **Korzhih V. I., Fink L. M., Shhelkunov K. N.** *Raschet pomehoustojchivosti sistem peredachi diskretnyh soobshhenij: spravochnik.* Moscow, Radio i svjaz', 1981. 232 p.
4. **Klovskij D. D.** *Peredacha diskretnyh soobshhenij po radiokanalam.* Moscow, Radio i svjaz', 1982. 304 p.
5. **Savishhenko N. V.** *Mnogomernye signal'nye konstrukcii: ih chastotnaja jeffektivnost' i pomehoustojchivost' priema*, Ed. D. L. Bura-chenko. SPb.: Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2005. 420 p.
6. **Prokis Dzh.** *Cifrovaja svjaz'*, per. s angl, ed. D. D. Klovskogo. Moscow: Radio i svjaz', 2000, 800 p.
7. **Framing** structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). *DVB Document A122*, Jun. 2008.
8. **Alekseev A. A., Aladinskij V. A., Dvornikov S. V., Zhelez-njak V. K., Komarovich V. F.** *Primenenie metodov chastotno-vremennoj obrabotki akusticheskikh signalov dlja analiza parametrov reverberacii.* *Nauchnoe priborostroenie*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 65–76.

УДК 519.688, 669.14.242

Н. Н. Светушков, канд. техн. наук, доц. каф., e-mail: svt.n.n@mail.ru

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Параллельный метод струн для численного решения нелинейных задач теплопроводности

Представлен способ организации параллельных вычислительных потоков для решения нелинейных задач нестационарной теплопроводности на основе разработанного ранее метода струн. В методе струн использован новый алгоритм, при котором уравнения в частных производных сведены к эквивалентной системе интегральных уравнений. Приведена структурная схема вычислительных потоков и показано, что наибольшее количество процессов может быть организовано в случае, когда в каждом потоке решается одно интегральное уравнение. Интегральное описание, лежащее в основе параллельного подхода, позволяет не только более эффективно моделировать процессы теплопередачи, подавляя осцилляционный характер поведения решения в случае больших градиентов температур, но и естественным образом учитывать меняющиеся с течением времени теплофизические характеристики изделия. Проведены тестовые расчеты для модельной задачи и показано, что значительная эффективность алгоритма может быть достигнута для задач большой размерности и в случае использования многопроцессорной техники (включая графические платы). Разработанный алгоритм может быть применен для расчета температурных полей в микровелах, при термической обработке заготовок из жаропрочных сталей, а также при формовании изделий из препрегов для авиационной и ракетной промышленности.

Ключевые слова: численные методы, параллельные вычисления, программные средства, моделирование, уравнения теплопроводности, интегральные уравнения, точность вычислений