

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ I/Q СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ DVB-S2

Дворкович В.П., д.т.н., проф., зав. кафедрой Московского физико-технического института, e-mail: dvpr@niircom.ru;

Дворкович А.В., д.т.н., проф., зав. научно-технической лабораторией Московского физико-технического института, e-mail: a_dvork@niircom.ru;

Басий В.Т., к.т.н., ведущий научный сотрудник ООО «НПФ «САД-КОМ», e-mail: vbasiy@mail.ru.

ANALYSIS OF I/Q SIGNAL PARAMETERS FOR DIGITAL TELEVISION SYSTEM DVB-S2

Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V., Basiy V.T.

Standard procedures for I/Q signal parameter evaluation and the sequence of these procedures for digital television broadcasting systems DVB could not provide the independence of the parameter values, thus unambiguous tolerances could not be set for the parameters.

It concerns the following parameters:

- displacements of the constellation point centers;*
- mean system target error STEM and its deviation STED;*
- amplitude imbalance AI;*
- quadrature error QE;*
- modulation error rate MER and error vector magnitude EVM;*
- phase jitter PJ.*

The sequence of measurements and the parameter evaluation methods with its consequent exclusion from analysis, proposed in the article for ring constellations, allow to eliminate the problems pointed out above.

The algorithms of I/Q signal parameter evaluation for the second generation digital satellite television broadcasting system DVB-S2 ring constellations (QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK) are considered for the first time. The necessary consequence of measurements was analyzed. It allow to set independent tolerances for constellation point displacement, amplitude imbalance, quadrature errors, modulation error rate and phase jitter.

Key words: television, signal constellation, digital measurements, quadrature errors, phase jitter, DVB-S2.

Ключевые слова: телевидение, модуляционное созвездие, цифровые измерения, спектральная эффективность, DVB-S2.

Введение

Цифровые сигналы с OFDM модуляцией нашли широкое применение в современных системах связи и вещания [1]. В частности, они используются в системах цифрового наземного телевизионного вещания первого и второго поколений DVB-T [2] и DVB-T2 [3]. Важной составляющей измерений в этих системах является анализ I/Q сигналов [4,5]. Поскольку при передаче информационных несущих, рассеянных и непрерывных пилотных несущих, несущих параметров передачи (Transmission Parameter Signaling, TPS) применяются различные схемы модуляции, рекомендуется исключить эти несущие из анализа I/Q, или применять к ним анализ I/Q по отдельности [4].

По модуляционному созвездию измеряются такие параметры, как:

- смещение центра созвездия – вектор систематической ошибки каждого символа в каждой ячейке;
- средняя ошибка положения точек созвездия (System Target Error Mean, STEM) по всем символам и ее разброс (System Target Error Deviation, STED);

Рассмотрены алгоритмы оценки параметров I/Q сигналов системы цифрового спутникового вещания DVB-S2. Приводится необходимая последовательность измерений параметров модуляционного созвездия, что позволяет устанавливать допуски на ошибку положения точек созвездия (STE), дисбаланс амплитуды (AI), квадратурную ошибку (QE), относительную ошибку модуляции (MER) и фазовый джиттер (PJ) независимо друг от друга.

- дисбаланс амплитуды (Amplitude Imbalance, AI);
- квадратурная ошибка (Quadrature Error, QE);
- относительная ошибка модуляции (Modulation Error Ratio, MER) и вектор ошибки (Error Vector Magnitude, EVM);
- фазовый джиттер (Phase Jitter, PJ).

Предполагается, что облака в каждой ячейке созвездия обусловлены не только гауссовым шумом, но и эффектами некоторых других помех, таких как небольшие когерентные интерференционные помехи или остаточные ошибки коррекции канала.

Следует заметить, что использование алгоритмов оценки указанных параметров, приведенных в [4], затрудняет задание требований к погрешностям их измерений, поскольку результаты измерений оказываются зависимыми друг от друга.

В настоящей статье реализована попытка создания

методик и последовательности измерений параметров круговых модуляционных созвездий системы цифрового спутникового телевидения DVB-S2 [6], обеспечивающих независимую оценку указанных параметров I/Q сигналов.

Основные используемые обозначения

Радиус окружности на модуляционных созвездиях обозначается U_K , причем:

- для QPSK $K = 1$ (рис. 1а);
- для 8PSK $K = 2$ (рис. 1б₁, 1б₂);
- для 12PSK в составе 16APSK $K = 3$ (рис. 2а);
- для 16PSK в составе 32APSK $K = 4$ (рис. 2б₁, 2б₂).

На рис. 1 приведены возможные максимальные (U_{1max} , U_{2max}) и минимальные (U_{1min} , U_{2min}) изменения радиусов созвездий QPSK и 8PSK.

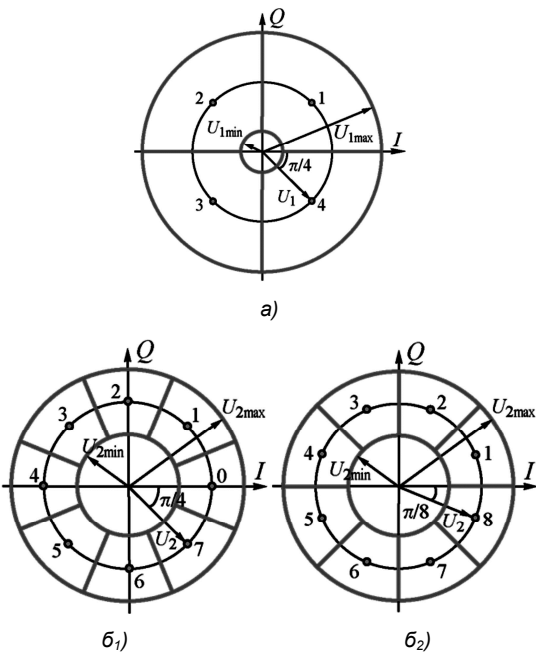


Рис. 1. Круговые созвездия QPSK (а), 8PSK (б₁), 8PSK со сдвигом на угол $\pi/8$ (б₂)

Радиусы QPSK на диаграммах 16APSK (рис. 2а) и 32APSK (рис. 2б₁, 2б₂) обозначены $U_{1/3}$ и $U_{1/4}$, а радиус 12PSK на диаграмме 32APSK (рис. 2б₁, 2б₂) – $U_{3/4}$.

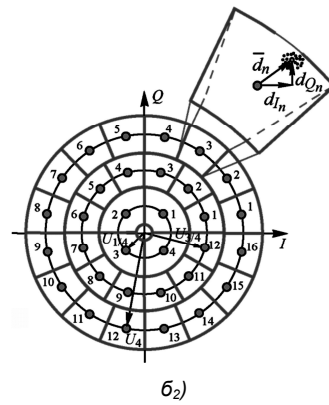
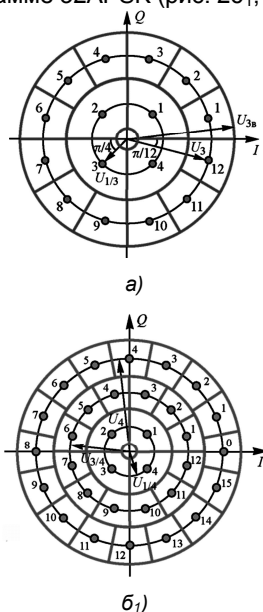


Рис. 2. Круговые созвездия 16APSK (а), 32APSK (б₁), 32APSK со сдвигом части 16PSK на угол $\pi/16$ (б₂)

Для упрощения индексации в последующем тексте радиусы всех диаграмм QPSK обозначаются U_1 , а радиусы диаграмм 12PSK – U_3 .

В табл. 1-4 приведены данные спектральной эффективности созвездий QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK (эффективного количества передаваемых бит на точку созвездия) при разных скоростях используемого помехозащитного кода в системе DVB-S2 [6]. Также в таблицах приведены минимальные значения отношения сигнал/шум (отношение энергии символа к мощности шума в полосе сигнала) для канала с аддитивным белым гауссовским шумом, при которых обеспечивается квазибезошибочная (QEF) передача данных (доля пакетных ошибок PER = 10^{-7}), для кадра данных нормальной длины (FECFRAME length = 64800 бит).

Таблица 1. Спектральная эффективность созвездия QPSK

Скорость кода	Спектральная эффективность	Отношение сигнал/шум, дБ
1/4	0,490243	-2,35
1/3	0,656448	-1,24
2/5	0,789412	-0,30
1/2	0,988858	1,00
3/5	1,188304	2,23
2/3	1,322253	3,10
3/4	1,487473	4,03
4/5	1,587196	4,68
5/6	1,654663	5,18
8/9	1,766451	6,20
9/10	1,788612	6,42

Таблица 2. Спектральная эффективность созвездия 8PSK

Скорость кода	Спектральная эффективность	Отношение сигнал/шум, дБ
3/5	1,779991	5,50
2/3	1,980636	6,62
3/4	2,228124	7,91
5/6	2,478562	9,35
8/9	2,646012	10,69
9/10	2,679207	10,98

Координаты точек созвездий, изображенных на рис. 1а, 1б₂, 2а и 2б₂, определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} Q_n = U_K \sin \frac{\pi(2n-1)}{4K}, \\ I_n = U_K \cos \frac{\pi(2n-1)}{4K}, \end{cases} \quad n = 1, \dots, 4K; \quad K = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Таблица 3. Спектральная эффективность созвездия 16APSK

Скорость кода	Спектральная эффективность	Отношение сигнал/шум, дБ	Отношение $U_{1/3}/U_3$
2/3	2,637201	8,97	0,31746
3/4	2,966728	10,21	0,35088
4/5	3,165623	11,03	0,36364
5/6	3,300184	11,61	0,37037
8/9	3,523143	12,89	0,38462
9/10	3,567342	13,13	0,38911

Координаты точек созвездий, изображенных на рис. 1б₁ ($K = 2$) и рис. 2б₁ ($K = 4$):

$$\begin{cases} Q_n = U_K \sin \frac{\pi n}{4K}, \\ I_n = U_K \cos \frac{\pi n}{4K}, \end{cases} \quad n = 0, \dots, 4K - 1. \quad (2)$$

Интервалы между соседними точками созвездий равны

$$\Delta U_K = 2U_K \sin \frac{\pi}{4K}, \quad K = 1, \dots, 4, \quad (3)$$

Принимаемые значения дискретных отсчетов сигнала вследствие воздействия шумов и различных искажений не совпадают с идеальными точками созвездий. Радиусы окружностей и изменения фаз, в пределах которых происходит смещение принимаемых отсчетов относительно точек созвездия, равны

$$\begin{aligned} U_{K \max} &= U_K \left(1 + \sin \frac{\pi}{4K}\right), \quad U_{K \min} = U_K \left(1 - \sin \frac{\pi}{4K}\right), \\ \varphi_{n \max} &= \varphi_n + \frac{\pi}{4K}, \quad \varphi_{n \min} = \varphi_n - \frac{\pi}{4K}, \quad \varphi_n = \frac{\pi(2n-1)}{4K}, \end{aligned} \quad (4)$$

$n = 1, \dots, 4K; \quad K = 1, \dots, 4.$

Эти пределы изменений радиуса окружности и фазы задают границы ячеек созвездия.

Мощности созвездий QPSK, 8PSK, 12PSK и 16PSK определяются следующими соотношениями:

$$P_K = 4K \frac{U_K^2}{2} = 4K \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_K}{2 \sin \frac{\pi}{4K}} \right)^2, \quad K = 1, \dots, 4. \quad (5)$$

Мощности созвездий 16APSK и 32APSK определяются иначе:

$$P_5 = 4 \frac{U_1^2}{2} + 12 \frac{U_3^2}{2} = 16 \frac{U_5^2}{2} = 16 \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_5}{2 \sin \frac{\pi}{16}} \right)^2, \quad (6)$$

где $U_5 = \frac{1}{2} \sqrt{U_1^2 + 3U_3^2}$ – эквивалентный радиус созвездия

для 16APSK, $\Delta U_5 = 2U_5 \sin \frac{\pi}{16}$ – эквивалентный интервал между точками созвездия 16APSK,

$$P_6 = 4 \frac{U_1^2}{2} + 12 \frac{U_3^2}{2} + 16 \frac{U_4^2}{2} = 32 \frac{U_6^2}{2} = 32 \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_6}{2 \sin \frac{\pi}{32}} \right)^2, \quad (7)$$

где $U_6 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{U_1^2 + 3U_3^2 + 4U_4^2}$ – эквивалентный радиус созвездия 32APSK, $\Delta U_6 = 2U_6 \sin \frac{\pi}{32}$ – эквивалентный интервал между точками созвездия 32APSK.

Заметим, что если мощности сигналов, используемых в DVB-S2 созвездиях QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK, равны, то

$$U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} U_1, \quad U_5 = \frac{1}{2} U_1, \quad U_6 = \frac{1}{2\sqrt{2}} U_1. \quad (8)$$

Если радиусы созвездий QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK (эквивалентные радиусы для 16APSK и 32APSK) равны, то мощности сигналов находятся в следующих соотношениях:

$$P_2 = \frac{1}{2} P_1, \quad P_5 = \frac{1}{4} P_1, \quad P_6 = \frac{1}{8} P_1. \quad (9)$$

И наконец, если интервалы между соседними точками созвездий QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK (эквивалентные интервалы для 16APSK и 32APSK) равны, то мощности сигналов находятся в следующих соотношениях:

$$\begin{aligned} P_2 &= 2P_1 \frac{1}{1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}}, \quad P_5 = 4P_1 \frac{1}{1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} + \sqrt{2}}, \\ P_6 &= 8P_1 \frac{1}{1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} + \sqrt{2} + \sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

При анализе геометрических искажений круговых созвездий наряду с использованием систем, представленных на рис. 1а и 2а, удобно измерять круговые диаграммы рис. 2а₂ и 2б₂.

В этом случае для всех круговых диаграмм имеются попарно равные координаты по осям Q и I соответственно:

$$\begin{cases} Q_m = Q_{3K+1-m} = Q_{3K+m} = U_K \sin \frac{\pi[(2m-1)-2K]}{4K}, \\ I_m = I_{2K+1-m} = I_{2K+m} = \\ = \operatorname{sgn}[(2m-1)-2K] U_K \cos \frac{\pi[(2m-1)-2K]}{4K}, \end{cases} \quad (11)$$

причем если $K + m > 4K$, то $m = m - K; \quad m = 1, \dots, 2K.$

Таблица 4. Спектральная эффективность созвездия 32APSK

Скорость кода	Спектральная эффективность	Отношение сигнал/шум, дБ	Отношение $U_{1/4}/U_4$	Отношение $U_{3/4}/U_4$
3/4	3,703295	12,73	0,53890	0,18975
4/5	3,951571	13,64	0,55852	0,20534
5/6	4,119540	14,28	0,56896	0,21552
8/9	4,397854	15,69	0,58661	0,23095
9/10	4,453027	16,05	0,58837	0,23256

Далее приводится расчет геометрических искажений круговых созвездий, причем для созвездий с амплитудно-фазовой манипуляцией APSK расчет необходимо производить для каждого кольца с фиксированной амплитудой раздельно (QPSK и 12PSK в составе 16APSK; QPSK, 12PSK и 16PSK в составе 32APSK).

Расчет геометрических искажений круговых созвездий

Смещения центров ячеек созвездия и вектора систематической ошибки

Эти параметры определяются для каждой ячейки созвездия $\{n = 1, \dots, 4K; K = 1, \dots, 4\}$. Кроме того, определяется вектор систематической ошибки центра всего созвездия.

Систематическая ошибка центра ячейки созвездия проиллюстрирована на рис. 2б₂.

Расчеты производятся следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{I}_n = \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{M_n} I_{in}, \\ \hat{Q}_n = \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{M_n} Q_{in} \end{cases} \quad \text{– центры } I \text{ и } Q \text{-компонент в ячейке}$$

$\{n\}$, $n = 1, \dots, 4K$, $K = 1, \dots, 4$, i – индекс дискретных отсчетов сигнала в ячейке, M_n – число дискретных отсчетов сигнала в ячейке;

$$\begin{cases} \delta I_n = I_n - \hat{I}_n, \\ \delta Q_n = Q_n - \hat{Q}_n \end{cases} \quad \text{– смещение центра в ячейке } \{n\} \text{ по}$$

координатам I и Q ;

$$\begin{cases} c_{I_k} = \frac{1}{4K} \sum_{n=1}^{4K} \delta I_n, \\ c_{Q_k} = \frac{1}{4K} \sum_{n=1}^{4K} \delta Q_n \end{cases} \quad \text{– величины смещения по координатам } I \text{ и } Q \text{ центров круговых диаграмм: QPSK } (K = 1),$$

8PSK ($K = 2$), 12PSK ($K = 3$) и 16PSK ($K = 4$);

$$c_k = \sqrt{c_{I_k}^2 + c_{Q_k}^2} \quad \text{– величины векторов смещения}$$

центров круговых диаграмм;

$$\begin{cases} d_{I_n} = \delta I_n - c_{I_k}, \\ d_{Q_n} = \delta Q_n - c_{Q_k} \end{cases} \quad \text{– систематические ошибки } I \text{ и } Q$$

Q -компонент центров ячеек $\{n\}$ при смещении центров круговых диаграмм в координаты $I = 0$ и $Q = 0$;

$$d_n = \sqrt{(d_{I_n})^2 + (d_{Q_n})^2} \quad \text{– длина вектора систематической ошибки в каждой ячейке } \{n\} \text{ при смещении центров круговых диаграмм в координаты } I = 0 \text{ и } Q = 0.$$

Систематические ошибки положений точек созвездия

Систематическая ошибка положения точек созвездия (STEM_K) и ее разброс (STED_K), нормализованные по амплитудам созвездий QPSK ($K = 1$), 8PSK ($K = 2$), 12PSK ($K = 3$) и 16PSK ($K = 4$), рассчитываются с использованием следующих формул:

$$STEM_K = \frac{100\%}{4KU_K} \sum_{n=1}^{4K} d_n, \quad (12)$$

$$STED_K = 100\% \sqrt{\frac{1}{4KU_K^2} \sum_{n=1}^{4K} d_n^2 - STEM_K^2}. \quad (13)$$

Для созвездий 16APSK и 32APSK эти параметры рассчитываются иначе:

$$STEM_5 = \frac{100\%}{U_5} \left[\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 d_{n \text{ QPSK}} + \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} d_{n \text{ 12PSK}} \right], \quad (14)$$

$$STEM_6 = \frac{100\%}{U_6} \left[\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 d_{n \text{ QPSK}} + \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} d_{n \text{ 12PSK}} + \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} d_{n \text{ 16PSK}} \right],$$

$$STED_5 = 100\% \sqrt{\frac{1}{U_5^2} \left[\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 d_{n \text{ QPSK}}^2 + \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} d_{n \text{ 12PSK}}^2 \right] - STEM_5^2},$$

$$STED_6 = 100\% \times \sqrt{\frac{1}{U_6^2} \left[\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 d_{n \text{ QPSK}}^2 + \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} d_{n \text{ 12PSK}}^2 + \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} d_{n \text{ 16PSK}}^2 \right] - STEM_6^2}$$

Очевидно, вектор смещения систематической ошибки в каждой ячейке состоит из нескольких составляющих, зависящих от суммы флуктуационных, импульсных и синусоидальных помех, неравномерности амплитудных характеристик и группового времени запаздывания, а также нелинейных искажений сигналов в канале связи. Однако из этой суммы возможно выделить ряд векторов смещения систематических ошибок, характеризующих:

- квадратурные искажения и дисбаланс амплитуды, приводящие к эллипсоидальным искажениям созвездия;
- искажения, определяющие иные факторы смещения положения точек созвездия (например, влияние нестационарных нелинейных искажений в канале связи).

Предположим, что суммарные векторы систематической ошибки в ячейках $\{n = 1, \dots, 4K; K = 1, \dots, 4\}$ можно представить в виде суммы:

$$\bar{d}_n = \bar{d}_{n_{\text{кв}}} + \bar{d}_{n_{\text{дб}}} + \bar{d}_{n_{\text{и}}}, \quad (16)$$

где $\bar{d}_{n_{\text{кв}}} = \{d_{I_{n_{\text{кв}}}}, d_{Q_{n_{\text{кв}}}}\}$ – векторы, определяющие квадратурные искажения; $\bar{d}_{n_{\text{дб}}} = \{d_{I_{n_{\text{дб}}}}, d_{Q_{n_{\text{дб}}}}\}$ – векторы, характеризующие дисбаланс амплитуды; $\bar{d}_{n_{\text{и}}} = \{d_{I_{n_{\text{и}}}}, d_{Q_{n_{\text{и}}}}\}$ – векторы, определяющие иные факторы смещения положения точек созвездия.

Квадратурные искажения

Квадратурные ошибки (QEK), вызывающие различные линейные искажения созвездия вдоль осей Q и I , рассчитываются в несколько этапов.

Усредненные наклонные линии по вертикали ($\bar{i}_k = a_{V_k} \bar{q}_k$) и горизонтали ($\bar{q}_k = a_{H_k} \bar{i}_k$) для круговых диаграмм QPSK ($K = 1$), 8PSK ($K = 2$), 12PSK ($K = 3$) и 16PSK ($K = 4$), а также соответствующих элементов диаграмм 16APSK и 32APSK, рассчитываются с использованием метода наименьших квадратов:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{2K} [a_{V_k} Q_m - d_{I_m}]^2 \Rightarrow \min, \\ \sum_{m=1}^{2K} [a_{H_k} I_m - d_{Q_m}]^2 \Rightarrow \min. \end{cases} \quad (17)$$

Здесь значения координат Q_m и I_m определены в соот-

ношениях (11), а систематические ошибки I - и Q -компонент центров ячеек d_{I_m} и d_{Q_m} соответственно равны

$$\begin{cases} d_{Q_m} = \frac{1}{2}(d_{3K+1-m} + d_{3K+m}), \\ d_{I_m} = \frac{1}{2}(d_{3K+1-m} + d_{3K+m}), \end{cases} \quad (18)$$

причем если $3K + m > 4K$, то $m = m - K$; $m = 1, \dots, 2K$; $K = 1, \dots, 4$.

Из соотношений (17) и (18) можно вычислить коэффициенты усредненных наклонных линий по вертикали a_{V_K} и горизонтали a_{H_K} :

$$\begin{cases} a_{V_K} = \frac{\sum_{m=1}^{2K} Q_m (d_{3K+1-m} + d_{3K+m})}{2 \sum_{m=1}^{2K} Q_m^2}, \\ a_{H_K} = \frac{\sum_{m=1}^{2K} I_m (d_{2K+1-m} + d_{2K+m})}{2 \sum_{m=1}^{2K} I_m^2}. \end{cases} \quad (19)$$

Данные, определяющие квадратурные искажения круговых диаграмм по осям Q и I , рассчитываются следующим образом:

$$\begin{cases} d_{Q_{n_{\text{сб}}}} = U_K a_{V_K} \sin \frac{\pi}{4K} (2n-1), \\ d_{I_{n_{\text{сб}}}} = U_K a_{H_K} \cos \frac{\pi}{4K} (2n-1), \end{cases} \quad (20)$$

$n = 1, \dots, 4K$; $K = 1, 2, 3$.

Исключение из суммарной систематической ошибки в ячейках $\{n = 1, \dots, K; K = 1, \dots, 4\}$ рассчитанного вектора, определяющего квадратурные искажения, позволяет производить расчет двух других геометрических искажений круговой диаграммы.

На рис. 3 в качестве примера изображены усредненные наклонные линии по вертикали ($\bar{i}_K = a_{V_K} \bar{q}_K$) и горизонтали ($\bar{q}_K = a_{H_K} \bar{i}_K$) для круговой диаграммы 12PSK ($K = 3$).

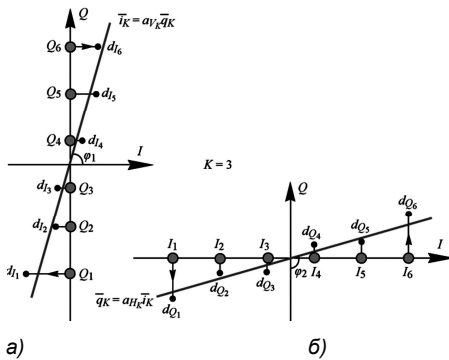


Рис. 3. Усредненные наклонные линии по вертикали и горизонтали для круговой диаграммы 12PSK

Угол наклона усредненной линии по вертикали

($\bar{i}_K = a_{V_K} \bar{q}_K$) (рис. 3а) равен $\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \arctg(a_V)$, а угол наклона усредненной линии по горизонтали

($\bar{q}_K = a_{H_K} \bar{i}_K$) (рис. 3б) – $\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg(a_H)$.

Величина квадратурной ошибки вычисляется аналогично алгоритму оценки этой величины, используемой при измерениях квадратной I/Q -диаграммы по формуле [4]:

$$QE = \frac{180^\circ}{\pi} |\varphi_1 - \varphi_2| = \frac{180^\circ}{\pi} \left| \arctg \frac{a_H + a_V}{1 - a_H \cdot a_V} \right|. \quad (21)$$

Если углы наклона усредненных наклонных линий по горизонтали и вертикали равны по модулю и противоположны по знаку: $a_H = -a_V = a$, то квадратурная ошибка тождественно равна нулю – $QE \equiv 0$, а созвездие оказывается повернутым на угол $\varphi_0 = \frac{180^\circ}{\pi} \arctg(a)$.

Вычитая из полных векторов систематической ошибки в каждой ячейке $\{n = 1, \dots, K; K = 1, \dots, 4\}$, рассчитанные вектора ошибки, определяемые квадратурными искажениями $\bar{d}_n - \bar{d}_{n_{\text{сб}}}$, получим сумму векторов $\hat{d}_{Kn} = \bar{d}_{n_{\text{сб}}} + \bar{d}_{n_{\text{сб}}}$, характеризующих дисбаланс амплитуды и иные факторы смещения положения точек созвездия.

Дисбаланс амплитуды

Дисбаланс амплитуды (АИК) вызывает сжатие (растяжение) созвездия по горизонтали и растяжение (сжатие) созвездия по вертикали. Подобно расчету параметров усредненных линий при оценке квадратурных искажений (рис. 3), можно рассчитать изменения структуры круговой диаграммы и в этом случае.

Структура искажений круговых диаграмм за счет дисбаланса амплитуды приведена на рис. 4. При этом растяжение (сжатие) круговой диаграммы при $K = 3$ по вертикали приведена на рис. 4а, а по горизонтали – на рис. 4б. Расчет искажений по вертикали и горизонтали осуществляется следующим образом.

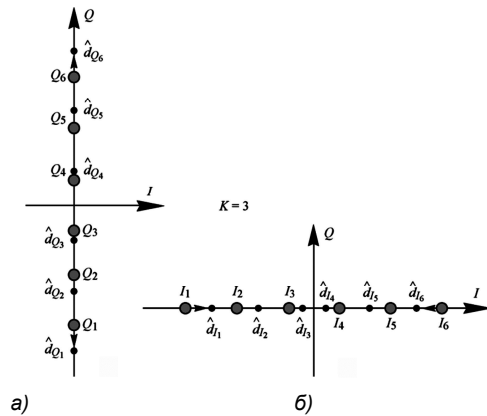


Рис. 4. Усредненные линии по вертикали и горизонтали для круговой диаграммы 12PSK

Производится взвешенное суммирование модулей парных искажений для крайних значений по осям Q_m и I_m , $m = 1$ и $m = 2K$:

$$\begin{cases} |d_{Q_{1,\text{сб}}}| = |d_{Q_{2K,\text{сб}}}| = \left(|\hat{d}_{Q_1}| + |\hat{d}_{Q_{2K}}| \right) / 2, \\ |d_{I_{1,\text{сб}}}| = |d_{I_{2K,\text{сб}}}| = \left(|\hat{d}_{I_1}| + |\hat{d}_{I_{2K}}| \right) / 2, \end{cases} \quad (22)$$

где

$$\begin{cases} \hat{d}_{Q_1} = \frac{1}{2}(\hat{d}_{3K} + \hat{d}_{3K+1}), \hat{d}_{Q_{2K}} = \frac{1}{2}(\hat{d}_{K+1} + \hat{d}_K), \\ \hat{d}_{I_1} = \frac{1}{2}(\hat{d}_{2K} + \hat{d}_{2K+1}), \hat{d}_{I_{2K}} = \frac{1}{2}(\hat{d}_1 + \hat{d}_{4K}). \end{cases} \quad (23)$$

При этом если $\hat{d}_{Q_1} < 0$, $\hat{d}_{Q_{2K}} > 0$, то имеет место растяжение круговой диаграммы по оси Q , в противном случае – сжатие по этой оси и

$$d_{Q_{1,ла}} = \text{sgn}(\hat{d}_{Q_1})|d_{Q_{1,ла}}|, d_{Q_{2K,ла}} = \text{sgn}(\hat{d}_{Q_{2K}})|d_{Q_{2K,ла}}|. \quad (24)$$

Если $\hat{d}_{I_1} > 0$, $\hat{d}_{I_{2K}} < 0$, то имеет место сжатие круговой диаграммы по оси I , в противном случае – растяжение по этой оси и

$$d_{I_{1,ла}} = \text{sgn}(\hat{d}_{I_1})|d_{I_{1,ла}}|, d_{I_{2K,ла}} = \text{sgn}(\hat{d}_{I_{2K}})|d_{I_{2K,ла}}|. \quad (25)$$

Последующие величины искажений рассчитываются по осям Q и I так:

$$\begin{aligned} d_{Q_{m,ла}} &= d_{Q_{1,ла}} \frac{Q_m}{Q_1}; \\ d_{I_{m,ла}} &= d_{Q_{2K,ла}} \frac{I_m}{I_1}; \quad m = 2, \dots, K; \\ d_{Q_{m,ла}} &= d_{Q_{2K,ла}} \frac{Q_m}{Q_{2K}}; \\ d_{I_{m,ла}} &= d_{I_{2K,ла}} \frac{I_m}{I_{2K}}; \quad m = K+1, \dots, 2K-1. \end{aligned} \quad (26)$$

Дисбаланс амплитуды (AI_K) можно определить следующим образом:

$$AI_K = \begin{cases} \frac{v_I - v_Q}{1 + v_Q}, & v_I \geq v_Q \\ \frac{v_I - v_Q}{1 + v_I}, & v_I < v_Q \end{cases} \cdot 100\% \cong (v_I - v_Q) \cdot 100\%, \quad (27)$$

где $v_I = |d_{I_{1,ла}}|/I_1$, $v_Q = |d_{Q_{1,ла}}|/Q_1$.

Вычитая из полного вектора систематической ошибки в каждой ячейке $\{n = 1, \dots, 4K, K = 1, \dots, 4\}$ рассчитанные вектора систематической ошибки, определяемые квадратными искажениями, и вектора систематической ошибки, характеризующие дисбаланс амплитуды, $\bar{d}_n - \bar{d}_{n_{ка}} - \bar{d}_{n_{ла}}$, получим значения векторов $\bar{d}_{n_n} = \{d_{I_{n_n}}; d_{Q_{n_n}}\}$, которые определяют оставшиеся факторы смещения положения точек созвездия.

Влияние других искажений

Искажения (RI_K), определяющие, например, влияние нестационарных нелинейных искажений в канале связи, можно оценить по формуле:

$$RI_K = \frac{\min\{r_I, r_Q\}}{\max\{r_I, r_Q\}} \cdot 100\%, \quad (28)$$

где $r_I = \frac{1}{4K I_K} \sum_{n=1}^{4K} |d_{I_{n_n}}|$, $r_Q = \frac{1}{4K Q_K} \sum_{n=1}^{4K} |d_{Q_{n_n}}|$, $|d_{I_{n_n}}|$ и $|d_{Q_{n_n}}|$ – соответствующие модули выделенных смещенных векторов по осям I и Q .

Для устранения всех видов геометрических искажений круговых созвездий ($c_K, STEM_K, QE_K, AI_K, RI_K$) все отсчеты и, соответственно, компоненты математического ожидания каждой точки созвездия $\{\hat{I}_n; \hat{Q}_n\}$ в ячейках $\{n = 1, \dots, 4K, K = 1, \dots, 4\}$ смещаются к центрам идеальных точек созвездия $\{I_n, Q_n\}$ путем преобразований $\{\hat{I}_n - d_{I_n}; \hat{Q}_n - d_{Q_n}\}$.

Расчет относительных ошибок модуляции и векторов ошибок

Относительные ошибки модуляции (MER_K) и вектора ошибки (EVM_K) рассчитываются в три этапа:

– в каждой ячейке созвездия оценивается дисперсия помехи по формулам:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{M_n} \left[(I_{in} - d_{I_n} - I_n)^2 + (Q_{in} - d_{Q_n} - Q_n)^2 \right]. \quad (29)$$

– оценивается среднее значение дисперсии помехи по всем ячейкам:

$$\sigma_{K sum}^2 = \frac{1}{4K} \sum_{n=1}^{4K} \sigma_n^2 \quad (30)$$

– вычисляется относительная ошибка MER и вектор ошибки EVM по формулам:

$$MER = 10 \lg \frac{U_K^2}{\sigma_{K sum}^2} \text{ дБ}; \quad EVM = \frac{\sigma_{K sum}}{U_K} \cdot 100\%. \quad (31)$$

Расчет фазового джиттера

Фазовый джиттер (PJ) рассчитывается в несколько этапов. Для созвездий APSK фазовый джиттер анализируется только по точкам внешнего кольца созвездия.

Сначала осуществляется смещение всех векторов в центр диаграммы всех ячеек $\{n = 1, \dots, K; K = 1, \dots, 4\}$ в точку с координатами $\{I = 0, Q = 0\}$.

Новые координаты всех преобразованных векторов во всех ячейках равны:

$$\tilde{I}_{in} = I_{in} - d_{I_n} - I_n, \quad \tilde{Q}_{in} = Q_{in} - d_{Q_n} - Q_n.$$

В качестве примера на рис. 5а приведены структуры преобразованных дискретных отсчетов для диаграммы QPSK ($K = 1$). Они состоят из четырех составляющих, смещенных последовательно на углы 90° .

На следующем этапе производится поворот всех преобразованных векторов следующим образом:

– все преобразованные вектора ячеек правого верхнего квадранта ($m = 1, \dots, K$) и левого нижнего квадранта ($m = 2K + 1, \dots, 3K$) смещаются на углы $-4K\pi/(2n - 1)$, $n = 1, \dots, K$ соответственно:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{im} &= \hat{I}_{im} \cos \frac{\pi(2n-1)}{4K} + \hat{Q}_{im} \sin \frac{\pi(2n-1)}{4K}, \\ \tilde{Q}_{im} &= -\hat{I}_{im} \sin \frac{\pi(2n-1)}{4K} + \hat{Q}_{im} \cos \frac{\pi(2n-1)}{4K}; \end{aligned} \quad (32)$$

– все преобразованные вектора ячеек левого верхнего квадранта ($m = K + 1, \dots, 2K$) и правого нижнего квадранта ($m = 4K, \dots, 3K + 1$) смещаются на углы $+4K\pi/(2n - 1)$, $n = 1, \dots, K$:

$$\tilde{I}_{im} = \hat{I}_{im} \cos \frac{\pi(2n-1)}{4K} - \hat{Q}_{im} \sin \frac{\pi(2n-1)}{4K},$$

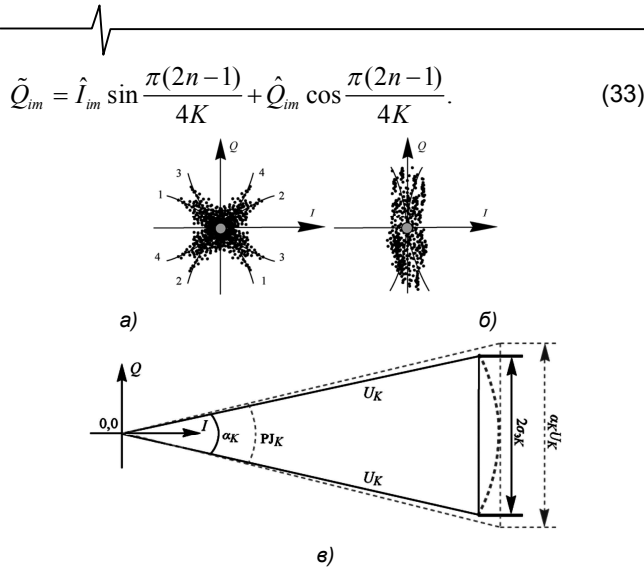


Рис. 5. К анализу преобразования структуры дискретных отсчетов круговых диаграмм при измерениях фазового джиттера

При этом структура преобразованных дискретных отсчетов состоит из $4K$ составляющих, сгруппированных в две части, смещенные друг относительно друга на 180° (рис. 5б).

Такой алгоритм построения структуры рис. 5б обладает следующим свойством: математические значения просуммированных I - и Q -координат всех преобразованных векторов практически становятся равными нулю:

$$\bar{Q}_K = \frac{1}{M_{n \text{ sum}}} \sum_{i=1}^{M_{n \text{ sum}}} \tilde{Q}_{i n} \cong 0, \quad (34)$$

$$\bar{I}_K = \frac{1}{M_{n \text{ sum}}} \sum_{i=1}^{M_{n \text{ sum}}} \tilde{I}_{i n} \cong 0,$$

где $M_{n \text{ sum}}$ – суммарное количество всех дискретных преобразованных векторов во всех ячейках круговой диаграммы.

Соотношения (34) позволяют вычислить дисперсии отклонений всех ошибок по осям Q и I :

$$\sigma_{Q_K}^2 = \frac{1}{4M_{n \text{ sum}}} \sum_{i=1}^{M_{n \text{ sum}}} \tilde{Q}_{i n}^2, \quad \sigma_{I_K}^2 = \frac{1}{4M_{n \text{ sum}}} \sum_{i=1}^{M_{n \text{ sum}}} \tilde{I}_{i n}^2.$$

Различие этих дисперсий характеризует наличие джиттера, если

$$\sigma_{P_{J_K}}^2 = \sigma_{Q_K}^2 - \sigma_{I_K}^2 > 0. \quad (35)$$

Предположим, что вектора систематических ошибок каждого символа в крайних ячейках распределены по нормальному закону. В этом случае следует считать, что размытие структуры определяется удвоенной величиной энтропии (условно показано на рис. 5в)

$$\sigma_{\alpha_K} = 2,07\sigma_{P_{J_K}}. \quad (36)$$

Величина PJ вычисляется в градусах с учетом кривизны графика фазового джиттера. Кроме того, при вычислении среднеквадратичного отклонения PJ следует принимать во внимание кривизну графика фазового джиттера (рис. 5в, выпрямленная величина участка кривой джиттера показана прямой линией красного цвета).

Среднее значение PJ равно

$$PJ_K = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot 2 \arctg(\alpha_K/2),$$

где $\alpha_K = 2 \arcsin(\sigma_{\alpha_K}/U_K)$.

Примечание. При величине $PJ > 0$ по рассчитанным параметрам всех ячеек созвездия возможно выполнение расчета относительной ошибки модуляции MER , учитывающего усредненное значение эксцентриситета

$$Eks_K = \sigma_{Q_K} / \sigma_{I_K},$$

с учетом которого вычисляется относительная ошибка модуляции

$$MER_{Eks_K} = 10 \lg \frac{U_K^2}{(\sigma_{Q_K} / Eks_K)^2 + (\sigma_{I_K} \cdot Eks_K)^2}.$$

Заключение

Стандартные процедуры оценки параметров I/Q сигналов и их последовательность для систем цифрового телевизионного вещания DVB [4] не обеспечивают независимость величин этих параметров, что не позволяет устанавливать однозначные допуски на их значения.

К параметрам I/Q сигналов относятся:

- смещения центров точек созвездия;
- средняя ошибка положения точек созвездия (STEM) и ее разброс (STED);
- дисбаланс амплитуды (AI);
- квадратурная ошибка (QE);
- относительная ошибка модуляции (MER) и вектор ошибки (EVM);
- фазовый джиттер (PJ).

Рассмотренная в данной статье последовательность измерений и методики оценки параметров круговых созвездий с последовательным исключением их из анализа, позволяют устранить указанные проблемы.

Впервые рассмотрены алгоритмы оценки параметров I/Q сигналов для круговых созвездий системы цифрового спутникового вещания DVB-S2 (QPSK, 8PSK, 16APSK и 32APSK), проанализирована необходимая последовательность измерений параметров созвездий, что позволяет устанавливать допуски на ошибки положения точек созвездий, дисбаланс амплитуды, квадратурные ошибки, относительную ошибку модуляции и фазовый джиттер независимо друг от друга.

Литература

1. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеотелекоммуникационные системы (теория и практика). – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
2. ETSI EN 300 744 V1.6.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (01/2009).
3. ETSI EN 302 755 V1.3.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) (04/2012).
4. ETSI TR 101 290 V1.3.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement Guidelines for DVB Systems (07/2014).
5. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Измерения в видеотелекоммуникационных системах (теория и практика). – М.: Техносфера, 2015. – 788 с.
6. ETSI EN 302 307-1 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2 (11/2014).