

пулы. Получены экспериментальные значения амплитудно-частотных характеристик физической модели ампулы при различных температурных режимах. Определены значения резонансных частот и коэффициентов усиления физической модели ампулы в диапазоне 100—1000 Гц при трех температурных режимах.

Л и т е р а т у р а

1. Миненко В. Е. Исследование принципов и экологических аспектов создания системы удаления радиоактивных отходов в космос. Сб. «Космос, время, энергия. Сборник статей, посвященных 100-летию Д. Д. Иваненко». М.: Белка, 2004.
2. Семенов Ю. П., Филин В. М., Солов Б. А. и др. О космическом захоронении особо опасных радиоактивных отходов атомной энергетики // Известия РАН. Энергетика. 2003. № 3. С. 6—14.
3. Семенов Ю. П., Баканов Ю. А., Синявский В. В. Исследования перспектив использования космических ядерных энергетических двигательных установок в разработках РКК «Энергия» имени С. П. Королева // Ядерная энергетика в космосе: Пятая междунар. конф. Сборник докладов. Ч. 1. 1999. С. 61—74.
4. Онуфриев А. В., Дмитриев С. Н., Онуфриев В. В. Об особенностях транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 3. С. 129—138.

5. Пат. 2492537 РФ. Способ космического захоронения радиоактивных отходов в дальнем космосе и космический аппарат для его осуществления / А. В. Онуфриев, В. В. Онуфриев, С. Н. Дмитриев // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 20.

6. Крутиков В. Н., Фрунзе А. В. О прослеживаемости современных пирометров к первичному эталону единицы температуры и классификации методов пирометрии // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 32—37; Krutikov V. N., Frunze A. V. The traceability of modern pyrometers to the primary standard of the unit of temperature and the classification of methods of pyrometry // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 2. P. 156—162.

7. Хлевной Б. Б., Гаврилов В. Р., Отряскин Д. А., Григорьева И. А., Солодилов М. В., Самойлов М. Л., Саприцкий В. И. Измерение термодинамической температуры высокотемпературных реперных точек // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 53—57; Khlevnoi B. B., Gavrilov V. R., Otryaskin D. A., Grigor'eva I. A. Measurement of the thermodynamic temperature of high-temperature fixed points // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 4. P. 433—439.

8. Савельев А. И., Фетисов И. Н. Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента. М.: Изд-во МГТУ, 1990.

Дата принятия 24.11.2014 г.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317:621.397

Анализ параметров I/Q-сигналов в системах цифрового телевидения

В. П. ДВОРКОВИЧ¹, А. В. ДВОРКОВИЧ²

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: dvp@niircom.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, e-mail: a_dvork@niircom.ru

Изложены алгоритмы оценки параметров I/Q-сигналов, исследована необходимая последовательность измерений параметров звездной диаграммы, что позволяет устанавливать допуски на ошибку положения точек созвездия, дисбаланс амплитуды, квадратурные ошибки, относительную погрешность модуляции и фазовый джиттер независимо друг от друга.

Ключевые слова: телевидение, сигнальное созвездие, цифровые измерения.

The algorithms for I/Q-signal parameters estimation were described in details. The required sequence of the measurements of the constellation diagram has been analyzed. That enabled to set error tolerances independently for such constellation parameters as system target error (STE), amplitude imbalance (AI), quadrature error (QE), modulation error ratio (MER) and phase jitter (PJ).

Key words: television, signal constellation, digital measurements.

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 и DVB-T2 [2, 3]. Важной составляющей измерений в этих системах является анализ параметров I/Q-сигналов [4]. I/Q-сигналом называют сигнал с цифровой модуляцией, представленный в виде сигнального созвездия в координа-

тах I (синфазная составляющая) и Q (квадратурная составляющая). Анализ данных сигналов можно применить как к одной несущей сигнала с OFDM-модуляцией, так и к группам несущих. Если рассматривать группы несущих, то путем наложения всех принятых символов данной группы можно получить одну общую диаграмму созвездия. Поскольку в сигнале с OFDM-модуляцией обычно присутствует несколько видов несущих с различными схемами модуляции (информационные несущие, пилотные несущие, несущие параметров передачи), то рекомендуется анализировать параметры каждого вида несущих по отдельности [4].

По звездным диаграммам измеряют следующие параметры: смещение центра созвездия — вектор систематической ошибки каждого символа в ячейке; среднюю ошибку положения точек созвездия (System Target Error Mean, STEM) по всем символам и ее разброс (System Target Error Deviation, STED); дисбаланс амплитуды (Amplitude Imbalance, AI); квадратурную ошибку (Quadrature Error, QE); относительную погрешность модуляции (Modulation Error Ratio, MER) и вектор ошибки (Error Vector Magnitude, EVM); фазовый джиттер (Phase Jitter, PJ).

Погрешности измерений всех этих параметров определяются соответствующими средствами измерений и зависят от количества точек созвездия и требований к соответствующим системам телерадиовещания. Предполагается, что облака в каждой ячейке звездной диаграммы обусловлены не только гауссовым шумом, но и эффектами некоторых других помех, таких как небольшие когерентные интерференционные помехи или остаточные погрешности коррекции канала. Следует заметить, что использование алгоритмов оценки указанных параметров [1] затрудняет задание требований к погрешностям их измерений, поскольку результаты измерений оказываются зависимыми друг от друга.

В настоящей статье предложены методики и их последовательность, обеспечивающие независимую оценку указанных параметров I/Q -сигналов.

Введем обозначения: $N_c = n^2$ — количество точек созвездия; $m = 0, 1, 2, \dots, n-1$, $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ — индексы ячеек и точек созвездия по горизонтали и вертикали, соответственно; U — размер созвездия по горизонтали (вертикали); U/n — интервал между соседними идеальными точками созвездия (по горизонтали и вертикали); $\{I_{km0}, Q_{km0}\}$ — компоненты идеальной точки созвездия в ячейке с индексами $\{km\}$; $\{I_{km}, Q_{km}\}$ — компоненты математического ожидания точки созвездия в ячейке $\{km\}$; A_c — усредненная амплитуда сигналов созвездия (формулы расчета амплитуд сигналов при различных видах модуляции приведены в таблице); $P_c = A_c^2/2$ — усредненная мощность созвездия; $A_{\max}$ — амплитуда максимально удаленного центра ячейки созвездия; M_{km} — количество дискретных отсчетов сигнала в ячейке $\{km\}$.

Формулы расчета A_c , $A_{\max}$

Амплитуда	Виды модуляции сигнала			
	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
A_c	$U/(2\sqrt{2})$	$U\sqrt{5/2}/4$	$U\sqrt{21/2}/8$	$U\sqrt{85/2}/16$
$A_{\max}$	$U/(2\sqrt{2})$	$3U/(4\sqrt{2})$	$7U/(8\sqrt{2})$	$15U/(16\sqrt{2})$

Вектор смещения центра созвездия $\mathbf{c}$ и вектор систематической ошибки символа в каждой ячейке $\mathbf{d}_{km}$ (рис. 1) рассчитывают следующим образом.

Находят центры I - и Q -компонент в ячейке $\{km\}$, соответственно:

$$I_{km} = \frac{1}{M_{km}} \sum_{i=1}^{M_{km}} I_{i(km)}; Q_{km} = \frac{1}{M_{km}} \sum_{i=1}^{M_{km}} Q_{i(km)},$$

где i — индекс дискретного отсчета сигнала в ячейке.

Смещение центра созвездия по координатам I , Q :

$$c_I = \frac{1}{N_c} \sum_{\forall k,m} I_{km}; c_Q = \frac{1}{N_c} \sum_{\forall k,m} Q_{km},$$

тогда вектор смещения центра созвездия и его значение определяют как

$$\mathbf{c} = \{c_Q, c_I\}, C = \sqrt{c_Q^2 + c_I^2}.$$

Систематическая погрешность I - и Q -компонент в ячейке $\{km\}$:

$$d_{I_{km}} = I_{km} - c_I - I_{km0}; d_{Q_{km}} = Q_{km} - c_Q - Q_{km0},$$

соответственно вектор систематической ошибки символа в ячейке $\{km\}$ и его длина:

$$\mathbf{d}_{km} = \{d_{I_{km}}, d_{Q_{km}}\}; d_{km} = \sqrt{(d_{I_{km}})^2 + (d_{Q_{km}})^2}.$$

Среднюю ошибку положения точек созвездия по всем символам и ее разброс, нормализованные по усредненной амплитуде созвездия, рассчитывают следующим образом:

$$\text{STEM} = \frac{1}{A_c N_c} \sum_{\forall k,n} d_{km} \cdot 100;$$

$$\text{STED} = \sqrt{\frac{1}{A_c^2 N_c} \sum_{\forall k,n} d_{km}^2 - \left(\frac{1}{A_c N_c} \sum_{\forall k,n} d_{km} \right)^2} \cdot 100.$$

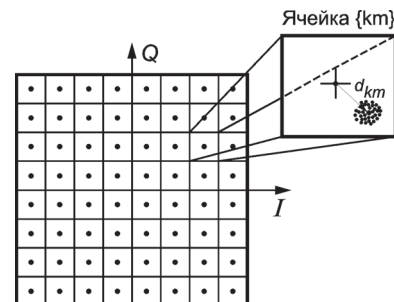


Рис. 1. Оценка смещения центров в ячейках созвездия

Усредненную амплитуду созвездия вычисляют по формуле

$$A_c = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{\forall k,m} (I_{km0}^2 + Q_{km0}^2)}.$$

Дисбаланс амплитуды определяют следующим образом:

$$AI = \begin{cases} \frac{v_I - v_Q}{1 + v_Q}, & v_I \geq v_Q \\ \frac{v_I - v_Q}{1 + v_I}, & v_I < v_Q \end{cases} \cdot 100 \equiv (v_I - v_Q) \cdot 100,$$

$$\text{где } v_I = \frac{1}{N_c} \sum_{\forall k,m} \frac{|d_{I_{km}}|}{I_{km0}}, v_Q = \frac{1}{N_c} \sum_{\forall k,m} \frac{|d_{Q_{km}}|}{Q_{km0}}.$$

Оценка квадратурной ошибки (рис. 2), определяемая смещением центров ячеек по горизонтали (оси I) и вертикали (оси Q), может быть реализована двумя способами.

В одном варианте сначала оценивают искажение смещения каждой горизонтально расположенной последовательности центров ячеек и усредняют полученные результаты по вертикали. Затем таким же образом оценивают смещение каждой вертикально расположенной последовательности центров ячеек и усредняют полученные результаты по горизонтали. По полученным результатам считывают значение параметра QE.

В другом, более простом варианте, исходно рассчитывают усредненные наклонные линии, определяющие смещение последовательности центров ячеек по горизонтали и вертикали соответственно, а затем в 3 этапа находят квадратурную ошибку.

1. Усреднение ошибки I - и Q -компонент по вертикали определяют как

$$d_{I_m} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} d_{I_{km}}; d_{Q_m} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} d_{Q_{km}}.$$

Усредненную наклонную линию по горизонтали ($\bar{i} = a_r \bar{q} + b_r$) рассчитывают с использованием метода наименьших квадратов:

$$\sum_{m=0}^{n-1} \left[a_r \left(d_{Q_m} + \frac{m}{n} U \right) + b_r - d_{I_m} \right]^2 \Rightarrow \min.$$

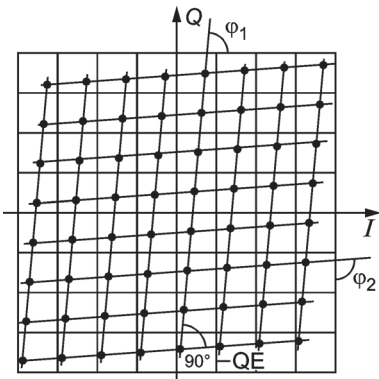


Рис. 2. Квадратурные искажения созвездия

Параметры усредненной наклонной линии по горизонтали определяют по формулам:

$$a_r = \frac{\sum_{m=0}^{n-1} d_{I_m} \left(d_{Q_m} + \frac{m}{n} U \right)}{\sum_{m=0}^{n-1} \left(d_{Q_m} + \frac{m}{n} U \right)^2},$$

$$b_r = \frac{U}{n} \left[\sum_{m=0}^{n-1} d_{I_m} + \sum_{m=0}^{n-1} d_{I_m} \left(d_{Q_m} + \frac{m}{n} U \right) \right] / \sum_{m=0}^{n-1} \left(d_{Q_m} + \frac{m}{n} U \right).$$

Угол наклона этой линии по оси ординат (см. рис. 2) равен $\phi_1 = \pi/2 - \arctg(a_r)$.

2. Усреднение ошибки I - и Q -компонент по горизонтали:

$$d_{I_k} = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{n-1} d_{I_{km}}, d_{Q_k} = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{n-1} d_{Q_{km}}.$$

Усредненная наклонная линия по вертикали ($\bar{q} = a_b \bar{i} + b_b$):

$$\sum_{k=0}^{n-1} \left[a_b \left(d_{I_k} + U \frac{k}{n} \right) + b_b - d_{Q_k} \right]^2 \Rightarrow \min.$$

Параметры усредненной наклонной линии по вертикали:

$$a_b = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} d_{Q_k} \left(d_{I_k} + U \frac{k}{n} \right)}{\sum_{k=0}^{n-1} \left(d_{I_k} + U \frac{k}{n} \right)^2},$$

$$b_b = \frac{U}{n} \left[\sum_{k=0}^{n-1} d_{Q_k} + \sum_{k=0}^{n-1} d_{Q_k} \left(d_{I_k} + U \frac{k}{n} \right) \right] / \sum_{k=0}^{n-1} \left(d_{I_k} + U \frac{k}{n} \right).$$

Угол наклона этой линии по оси абсцисс (см. рис. 2) равен $\phi_2 = \pi/2 - \arctg(a_b)$.

3. Квадратурную ошибку (в градусах) вычисляют как

$$QE = \frac{180^\circ}{\pi} |\phi_1 - \phi_2| = \frac{180^\circ}{\pi} \arctg \left| \frac{a_r - a_b}{1 + a_r a_b} \right|.$$

Если углы наклона усредненных наклонных линий по горизонтали и вертикали равны $a_r = -a_b = a$, то квадратурная ошибка тождественно равна нулю $QE \equiv 0$, а звездная диаграмма оказывается повернутой на угол $\phi_0 = (180^\circ/\pi) \arctg a$.

Анализ относительной погрешности модуляции, вектора ошибки и фазового джиттера целесообразно проводить после устранения всех видов нелинейных искажений, определяемых уже измеренными параметрами $\{d_{km}\}$, STEM, AI, QE.

С этой целью все компоненты математических ожиданий каждой точки созвездия $\{I_{km}, Q_{km}\}$ в ячейках $\{km\}$ смещаются в центры идеальных точек созвездия $\{I_{km0}, Q_{km0}\}$ путем преобразований $\{I_{km} - d_{I_{km}}, Q_{km} - d_{Q_{km}}\}$.

Относительную погрешность модуляции и вектор ошибки рассчитывают в три этапа.

1. Оценивают дисперсию помехи в каждой ячейке созвездия по формулам

$$\sigma_{km}^2 = \frac{1}{M_{km}} \sum_{i=1}^{M_{km}} \left[\left(I_{i(km)} - d_{I_{km}} - I_{km0} \right)^2 + \left(Q_{i(km)} - d_{Q_{km}} - Q_{km0} \right)^2 \right].$$

2. Оценивают среднее значение дисперсии помехи по всем ячейкам:

$$\sigma_{\text{sum}}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{\forall k,m} \sigma_{km}^2.$$

3. Вычисляют относительную погрешность модуляции (в децибелах) и вектор ошибки (в процентах) по формулам

$$\text{MER} = 10 \lg (A_c^2 / \sigma_{\text{sum}}^2), \text{EVM} = (\sigma_{\text{sum}} / A_{\text{max}}) \cdot 100.$$

Этапы расчета PJ.

1. Поворот всех ошибок векторов в четырех крайних ячейках (рис. 3): правой верхней ячейки $\{n-1, n-1\}$ на угол $\pi/4$; левой верхней ячейки $\{n-1, 0\}$ на угол $-\pi/4$; правой нижней ячейки $\{0, n-1\}$ на угол $-3\pi/4$; правой нижней ячейки $\{0, n-1\}$ на угол $3\pi/4$.

2. Смещение всех векторов в центр диаграммы от крайних ячеек. Новые координаты всех преобразованных векторов правой верхней ячейки:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i(n-1, n-1) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(Q_{i(n-1, n-1)} - d_{Q(n-1, n-1)}) - (I_{i(n-1, n-1)} - d_{I(n-1, n-1)}) \right] - Q_{\text{max}}; \\ \tilde{I}_i(n-1, n-1) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(Q_{i(n-1, n-1)} - d_{Q(n-1, n-1)}) + (I_{i(n-1, n-1)} - d_{I(n-1, n-1)}) \right] - I_{\text{max}}. \end{aligned}$$

Новые координаты всех преобразованных векторов левой верхней ячейки:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i(n-1, 0) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(Q_{i(n-1, 0)} - d_{Q(n-1, 0)}) + (I_{i(n-1, 0)} - d_{I(n-1, 0)}) \right] + Q_{\text{max}}; \\ \tilde{I}_i(n-1, 0) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[-(Q_{i(n-1, 0)} - d_{Q(n-1, 0)}) + (I_{i(n-1, 0)} - d_{I(n-1, 0)}) \right] - I_{\text{max}}. \end{aligned}$$

Новые координаты всех преобразованных векторов левой нижней ячейки:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i(0, 0) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[-(Q_{i(0, 0)} - d_{Q(0, 0)}) + (I_{i(0, 0)} - d_{I(0, 0)}) \right] + Q_{\text{max}}; \\ \tilde{I}_i(0, 0) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(Q_{i(0, 0)} - d_{Q(0, 0)}) - (I_{i(0, 0)} - d_{I(0, 0)}) \right] + I_{\text{max}}. \end{aligned}$$

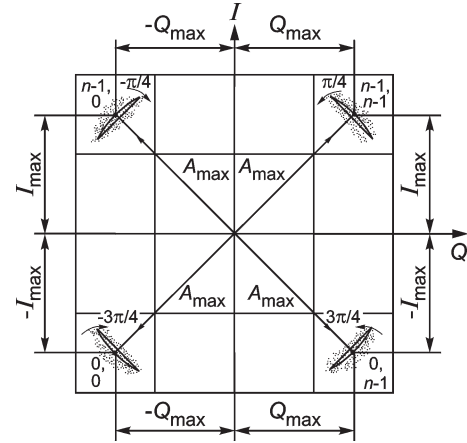


Рис. 3. Фазовый джиттер в крайних точках созвездия

Новые координаты всех преобразованных векторов правой нижней ячейки:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i(0, n-1) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[-(Q_{i(0, n-1)} - d_{Q(0, n-1)}) - (I_{i(0, n-1)} - d_{I(0, n-1)}) \right] - Q_{\text{max}}; \\ \tilde{I}_i(0, n-1) &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(Q_{i(0, n-1)} - d_{Q(0, n-1)}) - (I_{i(0, n-1)} - d_{I(0, n-1)}) \right] + I_{\text{max}}. \end{aligned}$$

3. Вычисление дисперсий отклонений по четырем крайним ячейкам всех ошибок по осям Q и I:

$$\begin{aligned} \sigma_{Q(n-1, n-1)}^2 &= \frac{1}{N_{n-1, n-1}} \sum_{i=1}^{N_{n-1, n-1}} \tilde{Q}_i^2(n-1, n-1); \\ \sigma_{I(n-1, n-1)}^2 &= \frac{1}{N_{n-1, n-1}} \sum_{i=1}^{N_{n-1, n-1}} \tilde{I}_i^2(n-1, n-1); \\ \sigma_{Q(n-1, 0)}^2 &= \frac{1}{N_{n-1, 0}} \sum_{i=1}^{N_{n-1, 0}} \tilde{Q}_i^2(n-1, 0); \\ \sigma_{I(n-1, 0)}^2 &= \frac{1}{N_{n-1, 0}} \sum_{i=1}^{N_{n-1, 0}} \tilde{I}_i^2(n-1, 0); \\ \sigma_{Q(0, 0)}^2 &= \frac{1}{N_{0, 0}} \sum_{i=1}^{N_{0, 0}} \tilde{Q}_i^2(0, 0); \\ \sigma_{I(0, 0)}^2 &= \frac{1}{N_{0, 0}} \sum_{i=1}^{N_{0, 0}} \tilde{I}_i^2(0, 0); \\ \sigma_{Q(0, n-1)}^2 &= \frac{1}{N_{0, n-1}} \sum_{i=1}^{N_{0, n-1}} \tilde{Q}_i^2(0, n-1); \\ \sigma_{I(0, n-1)}^2 &= \frac{1}{N_{0, n-1}} \sum_{i=1}^{N_{0, n-1}} \tilde{I}_i^2(0, n-1). \end{aligned}$$

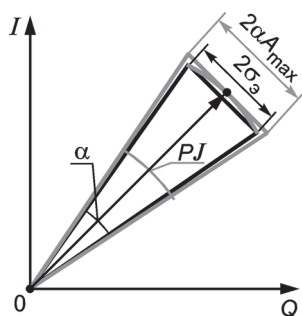


Рис. 4. Расчет фазового джиттера

4. Вычисление средних значений среднеквадратичных отклонений по четырем крайним ячейкам всех ошибок по осям Q и I :

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{4} (\sigma_{Q(n-1,n-1)}^2 + \sigma_{Q(n-1,0)}^2 + \sigma_{Q(0,0)}^2 + \sigma_{Q(0,n-1)}^2)};$$

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{4} (\sigma_{I(n-1,n-1)}^2 + \sigma_{I(n-1,0)}^2 + \sigma_{I(0,0)}^2 + \sigma_{I(0,n-1)}^2)}.$$

5. Различие среднеквадратичных отклонений характеризует джиттер: $\sigma_{\text{sum}} = \sigma_Q - \sigma_I > 0$.

6. Если предположить, что векторы систематических ошибок каждого символа в крайних ячейках распределены по нормальному закону, то следует считать, что размытие структуры определяется удвоенной энтропией (условно показано на рис. 4): $\sigma_\phi = 2,07 \sigma_{\text{sum}}$.

7. Вычисление PJ в градусах с учетом кривизны графика фазового джиттера. При этом следует принимать во внимание, что угол αPJ соответствует отрезку длиной $2\alpha A_{\text{max}}$, равной длине дуги, на которую опирается угол α (рис. 4). Среднее значение $PJ = (180^\circ/\pi) 2 \arcsin(\alpha/2)$, где $\alpha = 2 \arcsin(\sigma_\phi/A_{\text{max}})$.

При $PJ > 0$ по рассчитанным параметрам четырех угловых ячеек звездной диаграммы можно выполнить расчет относительной погрешности модуляции с учетом его усредненного значения эксцентриситета:

$$E = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_{Q(n-1,n-1)}^2}{\sigma_{I(n-1,n-1)}^2} + \frac{\sigma_{Q(n-1,0)}^2}{\sigma_{I(n-1,0)}^2} + \frac{\sigma_{Q(0,0)}^2}{\sigma_{I(0,0)}^2} + \frac{\sigma_{Q(0,n-1)}^2}{\sigma_{I(0,n-1)}^2} \right)}.$$

8. Вычисление относительной погрешности модуляции с учетом усредненного значения эксцентриситета:

$$\text{MER}_E = 10 \lg \frac{A_c^2}{(\sigma_Q/E)^2 + (\sigma_I/E)^2}.$$

Заключение. Проведен подробный анализ измерений параметров звездной диаграммы цифровых систем телевизионного вещания. Разработанная последовательность измерений параметров звездной диаграммы и алгоритмы оценки средней ошибки положения точек созвездия, дисбаланса амплитуды, квадратурной ошибки, относительной ошибки модуляции и фазового джиттера позволяют устанавливать независимые допуски на эти параметры.

Представленные алгоритмы существенно дополняют материал, приведенный в Руководстве по измерениям систем DVB [4], и устраняют ряд неоднозначностей при расчете параметров созвездия. Поэтому считаем целесообразным внести предложения в Технический комитет ETSI по вещанию по дополнению Руководства по измерениям систем DVB. Данный материал также может быть представлен на рассмотрение соответствующих Исследовательских комиссий Сектора радиосвязи и Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи.

Л и т е р а т у р а

1. **Дворкович В. П., Дворкович А. В.** Цифровые видеотрансляционные системы (теория и практика). М.: Техносфера, 2012.
2. **ETSI EN 300 744 V1.6.1.** Digital Video Broadcasting (DVB). Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (01/2009) [Электрон. версия]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_60/en_300744v010601p.pdf (дата обращения 27.08.2014 г.)
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). [Электрон. версия]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.03.01_60/en_302755v010301p.pdf (дата обращения 27.08.2014 г.)
4. **Технический отчет** Европейского института стандартизации телекоммуникаций ETSI TR 101 290 V1.3.1. Measurement Guidelines for DVB Systems (07/2014) [Электрон. версия]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101200_101299/101290/01.03.01_60/tr_101290v010301p.pdf (дата обращения 27.08.2014 г.)

Дата принятия 27.10.2014 г.