

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗНАЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ПЕРЕГРУЗКИ ПРИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ СИГНАЛА ТВ-ВЕЩАНИЯ

И. Р. Мамедов, профессор Азербайджанского технического университета (АЗТУ), д.т.н.; isamamedov@bk.ru

З. А. Исмаилов, старший преподаватель кафедры «Радиотехника» АЗТУ; zafar.aleskeroqlu@mail.ru

Определены допустимые уровни мощности шума ограничения, возникающего при аналого-цифровом преобразовании видеосигнала яркости изображения в системах цифрового ТВ-вещания. Рассмотрены различные условия наблюдения ТВ-изображения. Допустимое значение мощности рассчитывается с учетом психовизуальной способности глаза человека.

Ключевые слова: мощность шума ограничения, аналого-цифровое преобразование, сигнал ТВ-вещания, сигнал яркости, психовизуальная способность.

Введение. Источник исходного сигнала может формировать аналоговый сигнал, поэтому при его передаче по цифровым системам передачи может возникнуть необходимость в аналого-цифровом преобразовании (АЦП) сигналов. Преобразование аналогового сигнала в цифровой сопровождается преднамеренными искажениями. При этом изменяется спектральный состав исходного сигнала. Квантование (дискретизация аналогового сигнала по уровню) является одним из трех этапов АЦП сигнала.

Характеристику квантователя можно разделить на следующие области:

- область малых сигналов, когда уровень квантуемого сигнала меньше первого шага квантования;
- область квантования (основная область), когда на вход квантователя поступает сигнал, находящийся в пределах его разрешенной области;
- область ограничения. Этот режим имеет место при превышении уровня квантуемого сигнала разрешенного уровня квантователя и характеризуется шумами ограничения.

Таким образом, возникновение шумов ограничения на выходе аналого-цифрового преобразователя является результатом превышения входным сигналом максимально допустимого значения порога квантования; в общем случае суммарный шум квантования состоит из мощности шума квантования $\bar{P}_{\text{кв}}(u_{\text{вх}})$ и мощности шума ограничения $\bar{P}_{\text{огр}}(u_{\text{вх}})$ [1].

Мощность шума ограничения зависит от применяемой шкалы квантования, уровня входного сигнала и закона распределения амплитуды квантуемого сигнала.

Целью настоящей статьи является определение допустимого уровня мощности ограничения при передаче сигнала ТВ-вещания по цифровым системам связи.

Определение мощности шума перегрузки для различных типов изображений. Известно, что небольшие изменения яркости оказываются незаметными на воспроизводимом изображении, что связано с психовизуальной особенностью глаз наблюдателя. Для униполярного сигнала $u_{\text{вх}}$ мощность шума ограничения определяется по известной формуле [2]:

$$\bar{P}_{\text{огр}}(u_{\text{вх}}) = \frac{U_p^2}{U_{\text{макс}}^2} \int_{U_{\text{макс}}}^{u_p} (u_{\text{вх}} - U_{\text{макс}})^2 w(u_{\text{вх}}) du_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $w(u_{\text{вх}})$ — плотность вероятности амплитуды входного сигнала; $U_{\text{макс}}$ — максимально допустимое значение входного сигнала; U_p — реальное максимальное значение входного сигнала.

Определим мощность шума ограничения при квантовании сигнала яркости ТВ-вещания для следующих часто встречающихся на практике вариантов:

1. Плотность вероятности напряжения сигнала яркости выражается экспоненциально падающей функцией [3]:

$$w(u_{\text{вх}}) = \frac{1}{U_{\text{cp}}} \exp\left(-\frac{u_{\text{вх}}}{U_{\text{cp}}}\right), \quad (2)$$

где U_{cp} — напряжение сигнала яркости, соответствующее среднему значению яркости.

Подставив (2) в (1) и приняв $k = U_p^2 / U_{\text{макс}}^2$, находим выражение мощности шума ограничения при квантовании сигнала яркости таких типов изображений:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{огр}}(u_{\text{вх}}) = e^{-\frac{U_p}{U_{\text{cp}}}} & \left(-k^2 U_p^2 - 2k^2 U_p U_{\text{cp}} - 2k^2 U_{\text{cp}}^2 - \right. \\ & \left. - 2k U_p^2 - 2k U_p U_{\text{cp}} - U_p^2 \right) + \\ & + e^{-\frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{cp}}}} \left(4U_p^2 + 2k^2 U_p U_{\text{cp}} + 2k^2 U_{\text{cp}}^2 + 2k U_p U_{\text{cp}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

2. Распределение яркости на изображениях ТВ-вещания подчиняется нормальному закону. Аналогичным образом для мощности шума ограничения запишем

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{огр}}(u_{\text{вх}}) = \frac{U_p^2}{U_{\text{макс}}^2} \frac{\sigma\sqrt{2}}{C^2\sqrt{\pi}} & \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{CU_{\text{макс}} - CU_{\text{cp}}}{\sigma\sqrt{2}} \right) \times \right. \\ & \times \exp\left[-\frac{(CU_{\text{макс}} - CU_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2} \right] - \frac{\sqrt{\pi}}{4} \operatorname{erf}\left(-\frac{CU_{\text{макс}} - CU_{\text{cp}}}{\sigma\sqrt{2}} \right) \left. \right\} + \\ & + 2 \left(\frac{U_p^2}{U_{\text{макс}}^2} U_{\text{cp}} - \frac{U_p^2}{U_{\text{макс}}^2} \right) \frac{\sigma}{C\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(CU_{\text{макс}} - CU_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2} \right] + \\ & + \left(\frac{U_p^2}{U_{\text{макс}}^2} U_{\text{cp}}^2 - 2 \frac{U_p^2}{U_{\text{макс}}^2} U_{\text{cp}} \right) \operatorname{erf}\left(\frac{CU_{\text{макс}} - CU_{\text{cp}}}{\sigma\sqrt{2}} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где C — постоянный коэффициент в световой характеристике преобразователя «свет-сигнал»; σ^2 — дисперсия сигнала яркости; $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок.

3. Плотность вероятности сигнала яркости выражается обратно пропорциональным законом. При этом $w(u_{вх})$ описывается формулой [2, 3]:

$$w(u_{вх}) = \frac{1}{\ln\left(\frac{1+\alpha_0}{\alpha_0}\right)} \frac{1}{u_{вх} + \alpha_0 U_{\max}}, \quad (5)$$

где α_0 — постоянная величина.

Используя выражение (5), из формулы (1) находим мощность шума ограничения:

$$\bar{P}_{\text{огр}}(u_{вх}) = \frac{K_U^2 U_{\max}^2}{\ln\frac{1+\alpha_0}{\alpha_0}} \times \left[\frac{K_U^2 - 1}{2} - (2 + \alpha_0)(K_U - 1) + (1 + \alpha_0)^2 \ln\left(\frac{K_U + \alpha_0}{1 + \alpha_0}\right) \right], \quad (6)$$

где $K_U = U_p / U_{\max}$ — условный коэффициент, указывающий степень превышения реального максимального значения входного сигнала квантователя относительно максимально допустимого значения (коэффициент ограничения).

Выражение (6) показывает зависимость мощности шума ограничения от коэффициента ограничения.

Из выражений (1)—(6) следует, что при неправильном выборе динамического диапазона квантуемого сигнала к шумам квантования добавляются еще и шумы ограничения, уровни которых зависят как от закона распределения уровня самого сигнала, так и от коэффициента ограничения.

Графики зависимостей относительной мощности ограничения, построенные по формуле (6) для значений α_0 , равных 0,1, 0,2 и 0,3, приведены на рис. 1, из которого следует, что при увеличении отношения напряжения реального максимального значения к напряжению максимально допустимого значения входного сигнала мощность ограничения значительно увеличивается. Например, при $\alpha_0 = 0,2$ при увеличении коэффициента ограничения от 1,1 до 1,2 относительное значение мощности ограничения увеличивается примерно в 7,5 раза.

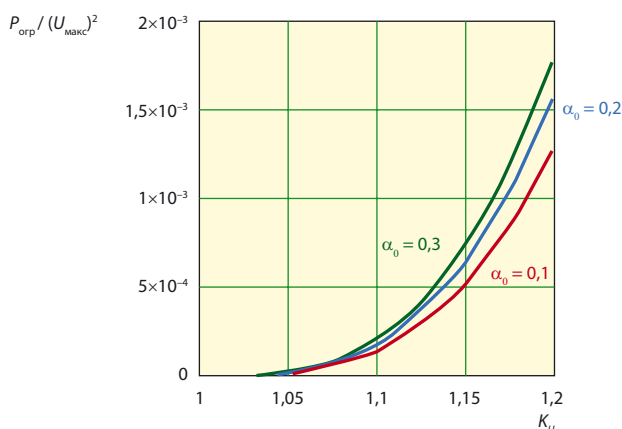


Рис. 1. Зависимость мощности шума ограничения от коэффициента ограничения

Шум ограничения, мощность которого превышает допустимый порог, должен быть компенсирован. Для этого необходимо определить допустимый уровень мощности шума ограничения (перегрузки).

Расчет допустимого уровня перегрузки. Уровни входного сигнала квантователя, превышающие допустимый порог квантования, фактически расцениваются как его пороговый уровень. На выходе квантователя при этом имеем уровень оценки, соответствующий максимальному значению порога квантования, т.е. полученный результат равносильен тому, когда в схему до квантователя включается ограничитель уровня сверху. Такая помеха, с одной стороны, уменьшает отношение сигнал/помеха, а с другой — приводит к искажению передаваемого сигнала.

При большом коэффициенте ограничения появляются искажения в сигнале яркости и обнаружение искажений на воспроизводимых ТВ-изображениях зависит от условий наблюдения изображения. Определим допустимый уровень мощности ограничения в аналого-цифровом преобразователе видеосигнала яркости ТВ-изображений с точки зрения заметности искажения яркости на воспроизводимых изображениях.

В общем случае предельно допустимые изменения в напряжении сигнала яркости зависят от яркости фона, эффективного значения флуктуационного шума, времени наблюдения элемента изображения, угловых размеров наблюдения элементов изображения, вероятности обнаружения порогового приращения яркости, расстояния до вертикальных линий на изображениях [4]:

$$\delta = \delta_0 \prod_{i=1}^6 f_i,$$

где δ_0 — контрастная чувствительность при нормальных условиях наблюдения, для которых справедлив закон Вебера-Фехнера; f_i — детерминированные функции; $i \in \overline{1,6}$ — вышеназванные факторы, определяющие заметность изменения яркости на воспроизводимых изображениях.

Мощность шума ограничения не должна превышать мощность предельно допустимого изменения в напряжении сигнала яркости, созданную на сопротивлении 1 Ом:

$$\Delta U_{\text{доп}}^2 \geq \bar{P}_{\text{огр}}(u_{вх}).$$

С учетом взаимосвязи между пороговым контрастом σ_k и контрастной чувствительностью $\delta = \lg(1 + \sigma_k)$ было получено условие незаметности изменения в сигнале яркости [4]:

$$\frac{U^2 \left(\exp\left(0,023 \prod_{i=1}^6 f_i\right) - 1 \right)^2}{\gamma^2} \geq \bar{P}_{\text{огр}}(u_{вх}), \quad (7)$$

где γ — световая характеристика передающей трубки; U — текущее значение напряжения сигнала яркости.

При линейной световой характеристике преобразователя «свет-сигнал» и обратно пропорциональном законе распределения яркости на изображениях при $\alpha_0 = 0,2$ выражение (7) с учетом (6) переписываем в виде

$$U^2 \left[\exp\left(0,023 \prod_{i=1}^6 f_i\right) - 1 \right]^2 \geq \frac{K_U^2 U_{\max}^2}{\ln\frac{1+\alpha_0}{\alpha_0}} \left[\frac{K_U^2 - 1}{2} - (2 + \alpha_0)(K_U - 1) + (1 + \alpha_0)^2 \ln\left(\frac{K_U + \alpha_0}{1 + \alpha_0}\right) \right].$$

Для учета влияния вышеназванных параметров на заметность изменения яркости изображений преобразуем формулу (7) к виду

$$\frac{\gamma^2 \bar{P}_{\text{огр}}(u_{\text{вх}})}{U^2} \leq \left[\exp\left(0,023 \prod_{i=1}^6 f_i\right) - 1 \right]^2. \quad (8)$$

Из выражения (8), написанного для униполярного положительного видеосигнала, и при практических значениях световой характеристики передающей трубки следует, что относительное значение мощности ограничения не должно превышать значения правой части этого соотношения.

Построим графики зависимости правой части формулы (8) от логарифма отношения яркости адаптации к яркости фона u (рис. 2, а) и угла наблюдения γ (рис. 2, б), используя известные выражения функций f_i [2]. Значения параметров для кривых приведены в табл. 1 и 2, где $v_{\text{ф}}$ — интенсивность флуктуационного шума; $\tau_{\text{и}}$ — время предъявления изображения; $x_{\text{р}}$ — вероятность обнаружения изменения в сигнале яркости.

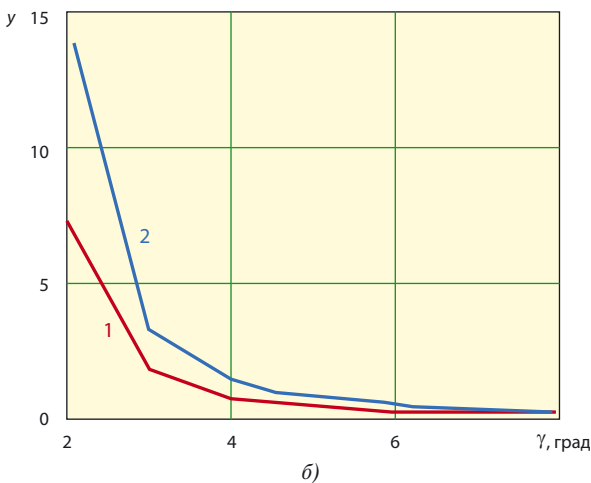
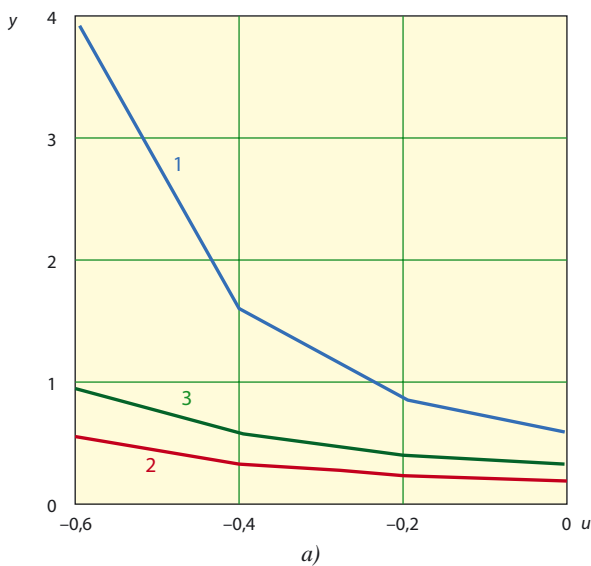


Рис. 2. Зависимости правой части формулы (8) от логарифма отношения яркости адаптации к яркости фона u (а) и от угла наблюдения γ (б)

С учетом монотонности логарифмической функции, логарифмируя выражение (8), запишем

$$\prod_{i=1}^6 f_i \geq 43,47 \ln \left(1 + \frac{\gamma \sqrt{\bar{P}_{\text{огр}}(u_{\text{вх}})}}{U} \right). \quad (9)$$

Таблица 1. Значения параметров для кривых, приведенных на рис. 2, а

Кривая	γ	$v_{\text{ф}}$	$\tau_{\text{и}}$, мс	$x_{\text{р}}$
1	5°	0,2	50	0,5
2	10°	0,3	100	1
3	15°	0,4	150	3

Таблица 2. Значения параметров для кривых, приведенных на рис. 2, б

Кривая	u	$v_{\text{ф}}$	$\tau_{\text{и}}$, мс	$x_{\text{р}}$
1	-0,2	0,1	50	0,5
2	1	0,3	100	1

Ясно, что при $U \leq U_{\text{макс}}$ мощность шума ограничения равна нулю. Поэтому неравенство (9) написано для условия, когда реальное значение входного сигнала квантователя превышает максимально допустимое значение.

Из рис. (2) следует, что допустимое значение шума мощности ограничения увеличивается с уменьшением яркости фона. При малых углах наблюдения изменения яркости на изображениях тоже малозаметны, поэтому допустимое значение этой мощности резко увеличивается.

Заключение. Таким образом, основным ограничивающим фактором уровня мощности перегрузки является заметность изменения яркости на ТВ-изображениях, определяемая психовизуальной особенностью глаз наблюдателя.

При увеличении коэффициента ограничения мощность ограничения значительно увеличивается. Например, при значении этого коэффициента 1,6 относительное значение мощности ограничения достигает 0,045.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Исмаилов З. А.** Уменьшение специфических нелинейных помех при многоканальной передаче сигналов телевизионного вещания по цифровым системам связи // Известия Азербайджанского национального аэрокосмического агентства.— 2007.— Т. 10.— № 1–2 (10).— С. 103–106.
2. **Исмаилов З. А.** Причины возникновения специфических помех при формировании и передаче сигналов ТВ-вещания по линейным трактам // Цифровые технологии.— 2010.— № 7.— С. 90–93.
3. **Мамедов И. Р., Исмаилов З. А.** Мощность шума ограничения при передаче сигналов ТВ вещания по цифровым системам связи // Труды 21-й Международной НТК «Современные телевидение и радиоэлектроника».— М., 2012.— С. 45–48.
4. **Исмаилов З. А.** Предельно допустимое значение мощности шума ограничения в цифровом телевидении // Науч. журнал Азербайджанской национальной авиационной академии.— 2007.— Т. 9.— № 3.— С. 29–32.

Получено 17.07.14