

УДК 51-74

*А.В. Корольков, В.А. Дамм, В.А. Шалагинов***РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ОБЩЕГО ФАЗОВОГО ДРОЖАНИЯ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА ДАННЫХ**

Предложен способ разделения случайного фазового дрожания и ограниченного некоррелированного фазового дрожания на основе вычисления автокорреляционной функции последовательности ошибок временных интервалов цифрового сигнала данных.

Ключевые слова: случайное фазовое дрожание, ограниченное некоррелированное фазовое дрожание, разделение компонентов, автокорреляционная функция, последовательность ошибок временных интервалов, подгонка «хвостов» гистограммы.

Введение. Переход к цифровым методам передачи и коммутации сигналов помимо преимуществ, обусловленных новыми технологиями связи, вызвал множество проблем, специфически связанных с принципами передачи сигналов в цифровом виде.

Применение новых стандартов высокоскоростной передачи данных накладывает более жесткие требования к достоверности принимаемого сигнала. В цифровых системах связи эта характеристика в значительной степени определяется общим фазовым дрожанием системы.

Фазовое дрожание является одной из основных проблем при проектировании устройств цифровой электроники, в частности, цифровых интерфейсов. Неточный расчет фазового дрожания может привести к его накоплению при прохождении цифрового сигнала по тракту и, в конечном счете, к неработоспособности системы связи.

Фазовым дрожанием (ФД) называется отклонение показательных участков цифрового сигнала (например, фронтов) от своих идеальных положений во времени [1].

Классификация компонентов общего фазового дрожания представлена в [3, 4, 17].

При решении различных задач оценки характеристик цифровых систем передачи возникает необходимость разложить общее фазовое дрожание ТД на составляющие его компоненты и определить их параметры. Это можно осуществить на основе анализа данных, полученных при измерении ошибок временных интервалов ТИЕ (Time Interval Error) общего фазового дрожания.

В настоящее время существуют следующие методы анализа данных фазового дрожания [4]:

1) прямой анализ функции распределения вероятностей / интегральной функции распре-

ления значений фазовых отклонений сигнала;

2) последовательный временной анализ с передискретизацией;

3) последовательный временной анализ с субдискретизацией на особых фронтах сигнала (после устранения DDJ);

4) статистический анализ на времени между n фронтами сигнала;

5) анализ спектральной плотности на совокупности фазовых дрожаний.

Как показал анализ, существующие методы анализа данных фазового дрожания не позволяют разделить случайное фазовое дрожание RJ и ограниченное некоррелированное фазовое дрожание BUJ.

Таким образом, была сформулирована следующая задача: разработать способ, позволяющий разделить случайное фазовое дрожание RJ и ограниченное некоррелированное фазовое дрожание BUJ, вызванное наводками.

Разделение общего фазового дрожания ТД на компоненты. Так как общее фазовое дрожание ТД определяется как сумма всех его компонентов [4], то справедливо выражение:

$$\Delta t_{TJ}(i) = \Delta t_{DCD}(i) + \Delta t_{ISI}(i) + \Delta t_{PJ}(i) + \Delta t_{RJ}(i) + \Delta t_{BUJ}(i). \quad (1)$$

Плотность распределения вероятностей общего фазового дрожания ТД будет определяться как свертка плотностей вероятностей всех его компонентов:

$$f_{TJ}(t) = f_{DCD}(t) \otimes f_{ISI}(t) \otimes f_{PJ}(t) \otimes f_{RJ}(t) \otimes f_{BUJ}(t). \quad (2)$$

В общем виде методику разделения компонентов общего фазового дрожания цифрового

сигнала данных можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 1.

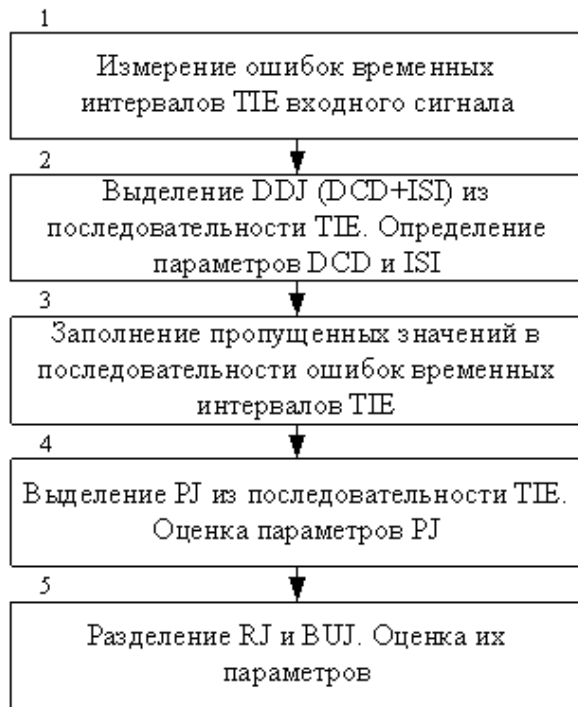


Рисунок 1 – Методика разделения компонентов общего ФД

Способы отделения межсимвольной интерференции ISI и ФД, вызванного искажением коэффициента заполнения импульсной последовательности DCD, от общего фазового дрожания TJ, а также определения их параметров известны и описаны, например, в [5–7].

Для отделения периодического ФД от смеси RJ + BUJ широко используются спектральные методы, основанные на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ). Методы выделения и определения параметров RJ известны и описаны, например, в [4, 8–10].

Для применения спектрального метода выделения RJ из последовательности ТИЕ необходимо произвести заполнение пропущенных значений последовательности ТИЕ, так как выполнить операцию ДПФ для последовательности с пропущенными значениями не представляется возможным. Пропущенные значения ТИЕ восстанавливаются либо путем интерполяции по ближайшим известным [4, 8, 11], либо другим способом, например, описанным в [17], и помечаются как «интерполированные». После выделения периодического фазового дрожания RJ «интерполированные» значения последовательности ТИЕ отбрасываются (заменяются на пустые значения) и не участвуют в анализе случайного фазового дрожания RJ и ограниченного некоррелированного фазового дрожания BUJ.

Разделение случайного фазового дрожания RJ и ограниченного некоррелированного фазового дрожания BUJ. Разделение RJ и BUJ может быть основано на различии такой статистической характеристики данных компонентов общего ФД, как автокорреляционная функция (АКФ). В [12] приведена математическая модель определения автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности ограниченного некоррелированного фазового дрожания.

Как показано в [12], для случая, когда сигналы во влияющих и подверженных влиянию цепях сформированы независимыми двоичными источниками без памяти с одинаковой вероятностью появления логических нулей и единиц, а также при наличии D независимых влияющих цепей, АКФ BUJ описывается следующим выражением:

$$k_{BUJ}(n) = \begin{cases} 0,5 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & n = 0 \\ 0,25 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & n = 1 \\ 0, & n \geq 2, \end{cases} \quad (3)$$

где Δ_d – изменение положения фронта/спада передаваемого импульса из-за наводок с d -й влияющей цепи, D – количество влияющих цепей.

График АКФ ограниченного некоррелированного фазового дрожания BUJ представлен на рисунке 2.

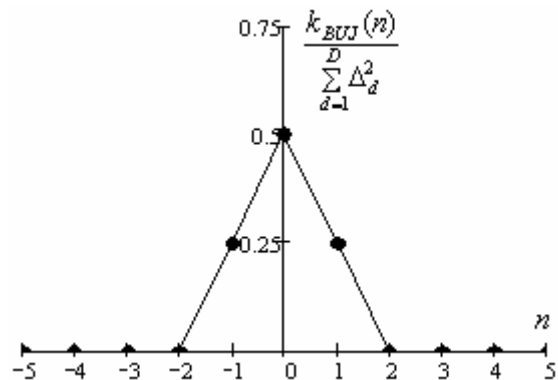


Рисунок 2 – Функция автокорреляции BUJ

Так как основным источником случайного фазового дрожания RJ является тепловой шум, то АКФ RJ будет описываться выражением:

$$k_{RJ}(n) = \begin{cases} \sigma_{RJ}^2, & n = 0 \\ 0, & n \geq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где σ_{RJ} – среднеквадратическое отклонение (СКО) значений случайного фазового дрожания.

Так как случайное фазовое дрожание RJ и ограниченное некоррелированное фазовое дро-

жание BUJ являются независимыми, то функция автокорреляции их суммы будет определяться как сумма их функций автокорреляции [13]:

$$k_{BUJ+RJ}(n) = k_{BUJ}(n) + k_{RJ}(n), \quad (5)$$

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \begin{cases} \sigma_{RJ}^2 + 0,5 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & n = 0 \\ 0,25 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & n = 1 \\ 0, & n \geq 2. \end{cases} \quad (6)$$

Определим $k_{BUJ+RJ}(0)$ в выражении (6) через $k_{BUJ+RJ}(1)$:

$$k_{BUJ+RJ}(0) = 2 \cdot k_{BUJ+RJ}(1) + \sigma_{RJ}^2. \quad (7)$$

Отсюда получаем

$$\sigma_{RJ} = \sqrt{k_{BUJ+RJ}(0) - 2 \cdot k_{BUJ+RJ}(1)}. \quad (8)$$

Таким образом, на основе известной АКФ смеси случайного фазового дрожания RJ и ограниченного некоррелированного фазового дрожания BUJ можно на основании выражения (8) оценить значение среднеквадратического отклонения $RJ_{RMS} = \sigma_{RJ}$ случайной составляющей общего фазового дрожания.

Для случая, когда все значения анализируемой последовательности ошибок временных интервалов TIE известны, оценка функции автокорреляции вычисляется по выражению:

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=0}^{N-n-1} (TIE(i) - \overline{TIE}) \cdot (TIE(i+n) - \overline{TIE}), \quad n = 0, 1, 2 \dots n_{\max}, \quad (9)$$

где $n_{\max} \ll N$ – максимальный сдвиг, на который оценивается автокорреляционная функция, \overline{TIE} – среднее значение последовательности ошибок временных интервалов:

$$\overline{TIE} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} TIE(i). \quad (10)$$

Однако при вычислении функции автокорреляции последовательности ошибок временных интервалов необходимо учитывать только известные значения, не помеченные как «интерполированные».

В случае если известны не все значения последовательности ошибок временных интервалов, выражения (9), (10) примут вид:

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \frac{1}{K_n} \sum_{i=0}^{N-n-1} (TIE(i) - \overline{TIE}) \cdot (TIE(i+n) - \overline{TIE}) \Big|_{\substack{TIE(i) \neq NaN \\ TIE(i+n) \neq NaN}}, \quad (11)$$

где

$$\overline{TIE} = \frac{1}{K_0} \sum_{i=0}^{N-1} TIE(i) \Big|_{TIE(i) \neq NaN}, \quad (12)$$

где K_n – количество пар значений последовательности ошибок временных интервалов, сдвинутых относительно друг друга на n тактов, при условии, что эти значения являются известными; NaN (Not-a-Number) – неизвестное (пропущенное) значение последовательности TIE.

После оценки среднеквадратического отклонения σ_{RJ} случайного фазового дрожания RJ можно оценить размах значений ограниченного некоррелированного фазового дрожания с помощью метода подгонки «хвостов» гистограммы значений последовательности ошибок временных интервалов [4, 14–16].

Сущность данного метода состоит в оценке размаха значений ограниченного некоррелированного фазового дрожания при известном значении среднеквадратического отклонения σ_{RJ} случайного фазового дрожания путем подбора соответствующих значений математических ожиданий μ^+ и μ^- нормальных распределений, описывающих «хвосты» гистограммы последовательности TIE, содержащей значения, описывающие RJ и BUJ (рисунок 3).

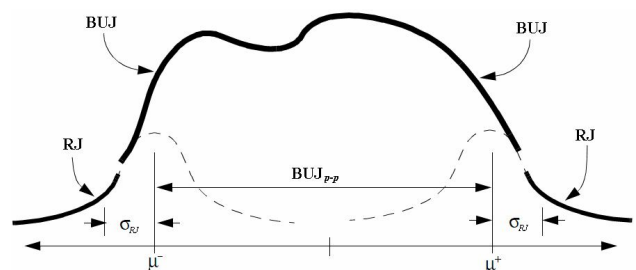


Рисунок 3 – Метод подгонки «хвостов» гистограммы

В этом случае размах значений ограниченного некоррелированного фазового дрожания определяется согласно выражению:

$$BUJ_{p-p} = \mu^+ - \mu^-. \quad (13)$$

Таким образом, способ разделения случайного фазового дрожания RJ и ограниченного некоррелированного фазового дрожания BUJ можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 4.

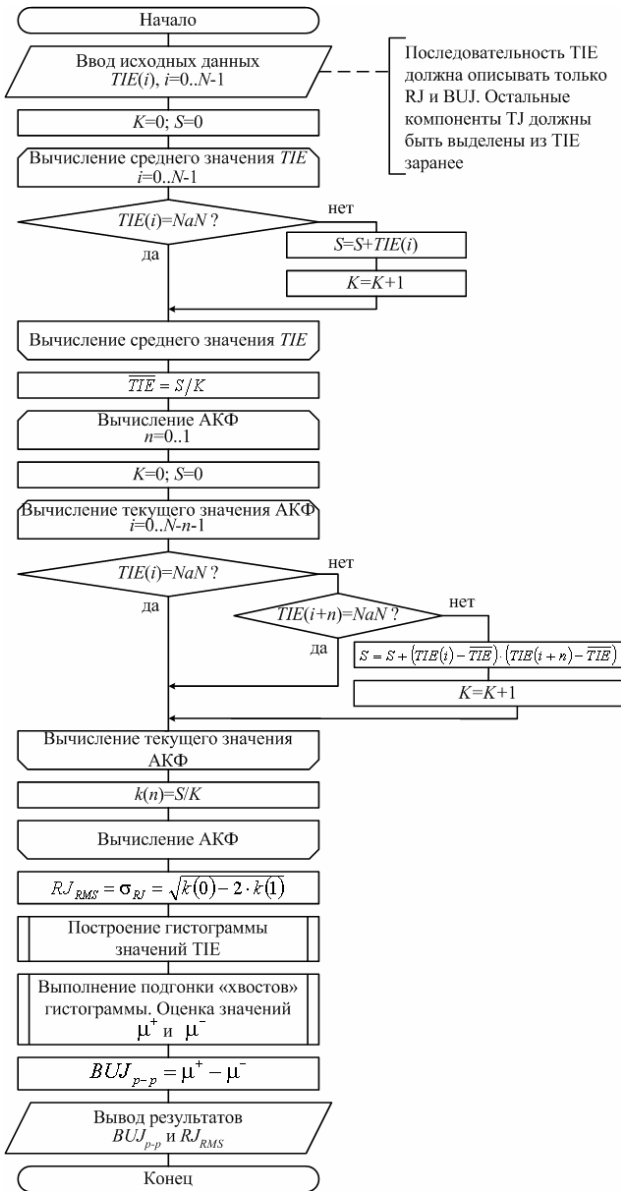


Рисунок 4 – Блок-схема способа разделения RJ и BUJ и определения их параметров

Результаты моделирования. Для доказательства работоспособности, а также оценки точности предложенного способа было проведено имитационное моделирование в среде технических расчетов *MatLab*. В качестве исходных данных использовалась последовательность ошибок временных интервалов, описывающая смесь случайного и ограниченного некоррелированного фазового дрожания. При этом случайное фазовое дрожание моделировалось как случайная последовательность с нормальным законом распределения, а ограниченное некоррелированное фазовое дрожание моделировалось на основе алгоритма, представленного в [2].

В качестве показателей, по которым проводилась оценка точности предлагаемого способа, выступали средняя относительная ошибка оцен-

ки размаха значений ограниченного некоррелированного фазового дрожания:

$$e_{BUJ} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|BUJ_{p-p}^{исх} - BUJ_{p-p}^i|}{BUJ_{p-p}^{исх}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

и средняя относительная ошибка оценки среднеквадратического отклонения случайного фазового дрожания:

$$e_{RJ} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_{RJ}^{исх} - \sigma_{RJ}^i|}{\sigma_{RJ}^{исх}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где n – количество проведенных опытов; $BUJ_{p-p}^{исх}$ – исходное значение размаха значений BUJ; BUJ_{p-p}^i – размах значений BUJ, полученный в ходе i -го опыта; $\sigma_{RJ}^{исх}$ – исходное значение СКО RJ; σ_{RJ}^i – значение СКО RJ, полученное в ходе i -го опыта.

На рисунке 5 представлены зависимости средних ошибок, полученных по выражениям (14) и (15) в ходе имитационного моделирования при длине выборки $N = 2^{14}$, количестве опытов для каждой точки $n = 50$ при различных значениях h^2 :

$$h^2 = 10 \log \left(\frac{P_{BUJ}}{P_{RJ}} \right), \quad (16)$$

где P_{BUJ} – мощность ограниченного некоррелированного фазового дрожания; P_{RJ} – мощность случайного фазового дрожания.

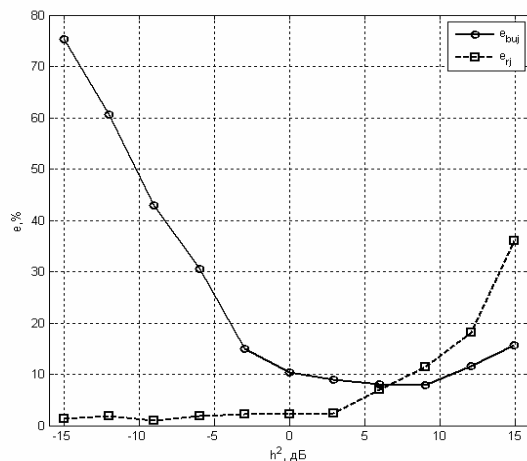


Рисунок 5 – Результаты имитационного моделирования

Как видно из рисунка 5, средняя относительная ошибка оценки размаха значений ограниченного некоррелированного фазового дрожания уменьшается при увеличении его мощности относительно мощности случайного фазового дрожания и составляет менее 15 % при

$h^2 > -3$ дБ. В свою очередь, средняя относительная ошибка оценки СКО случайного фазового дрожания с ростом мощности BUJ увеличивается и составляет менее 15 % при $h^2 < 10$ дБ.

Выводы. Таким образом, на основе выражения для автокорреляционных функций RJ и BUJ с помощью метода подгонки «хвостов» гистограммы значений последовательности ошибок временных интервалов TIE был разработан способ, позволяющий оценить среднеквадратическое значение случайного фазового дрожания RJ_{RMS} , а также размах значений ограниченного некоррелированного фазового дрожания BUJ_{p-p} . Путем имитационного моделирования была доказана его работоспособность и оценена точность.

Разложение общего фазового дрожания на компоненты является важной задачей, решение которой может быть необходимо при анализе работоспособности, оценке надежности и поиске неисправностей исследуемой цифровой системы.

Библиографический список

1. Рекомендация МСЭ-Т O.172.
2. Andy Kuo, Roberto Rosales, Touraj Farahmand, Sassan Tabatabaei. Andre Ivanov. Crosstalk Bounded Uncorrelated Jitter (BUJ) for High-Speed Interconnects – «IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement», vol.54, no. 5, pp. 1800-1810, Oct. 2005.
3. Comparison of Different Jitter Analysis Techniques With a Precision Jitter Transmitter, Agilent Technologies Application Note 5989-3205EN, www.agilent.com.
4. Fiber Channel—Methodologies for Jitter and Signal Quality Specification, 2003. National Committee for Information Technology Standardization (NCITS), working draft for Rev 10. Washington, DC.
5. US Patent № US 7203610 B2. System and method of obtaining data- dependent jitter (DDJ) estimates from measured signal data / S. Tabatabaei, M. Ben-Zeev, P.F. Miller. Apr. 10, 2007.
6. US Patent № US 7248982 B1. Finding data dependent jitter with a DDJ calculator configured by regression / S.D. Draving, A. Montijo. Jul. 24, 2007.
7. US Patent № US 7388937 B1. Systems and methods for jitter analysis of digital signals / K.L. Rodger, K.W. Ferguson, K. Chun Yeung Hung, J. Paul James Benson, A.S. Wright. Jun. 17, 2008.
8. US Patent № US 6898535 B2. Method and apparatus for decomposing signal jitter using multiple acquisitions / Steven D. Draving. May 24, 2005.
9. US Patent № US 7251572 B1. Finding random jitter in an arbitrary non-repeating data signal / Steven D. Draving, Allen Montijo. Jul. 31, 2007.
10. US Patent № US 6853933 B2. Method of identifying spectral impulses for RJ DJ separation / Kan Tan, Mark L. Guenther. Feb. 8, 2005.
11. US Patent № US 6356850 B1. Method and apparatus for jitter analysis / J.B. Wilstrup, D.M. Petrich. Mar. 12, 2002.
12. Шалагинов В.А. Математическая модель определения характеристик ограниченного некоррелированного джиттера, вызванного наводками // Телекоммуникации. – 2008. – № 10. С. 13–19.
13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Издательство "Наука", 1969. – 576 с.
14. M.P. Li et al. A New Method For Jitter Decomposition Through Its Tail Fitting – IEEE Proceeding of the International Conference on Computer Design, pp. 788–794, Sept. 1999.
15. US Patent № US 6298315 B1. Method and apparatus for analyzing measurements / P. Li, R.A. Jessen, J.B. Wilstrup, D. Petrich. Oct. 2, 2001.
16. US Patent № US 7149638 B2. Separation of random and deterministic components of jitter / R.W. Stephens. Dec. 12, 2006.
17. Дамм В.А., Шалагинов В.А., Елифферевский В.В., Кутузов А.В. Восстановление пропущенных значений ошибок временных интервалов при разделении компонентов общего фазового дрожания цифрового сигнала // Вестник РГРТУ, № 4 (выпуск 26), 2008. С. 10–18.