

УДК 621.396

Г. Г. Бортник, к. т. н., доц.;

М. В. Васильківський, асп.;

О. В. Стальченко

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

*Запропоновано метод підвищення точності оцінювання параметрів фазового дрижання (ФД) у системах передавання даних на базі відновлення пропущених значень помилок часових інтервалів. Перевагою запропонованого методу є висока точність оцінювання параметрів ФД за рахунок розділення періодичного, випадкового та обмеженого некорельованого ФД.*

### Вступ

Використання нових стандартів високошвидкісної передачі даних передбачає підвищення вимог до якості роботи систем передавання (СП). В сучасних СП основним параметром якості роботи є фазове дрижання (ФД) сигналів, які передаються. Підвищений рівень ФД в СП призводить до пониження стійкості функціонування СП та спотворення інформації [1]. На сьогодні розроблено такі методи оцінювання параметрів ФД:

- прямий аналіз функції розподілу значень ФД [2],
- послідовний аналіз у часовій області фронтів імпульсів [3];
- статистичний аналіз в часовій області між  $n$  фронтами сигналу [4];
- аналіз спектральної густини сукупності ФД [4].

Для повного дослідження причин виникнення ФД та характеру його зміни в частотній та часовій областях необхідно виконати комплексний аналіз параметрів ФД у розрізі випадкової та детермінованої складових. Відомі методи аналізу параметрів ФД не дають можливості всебічно досліджувати випадкову та детерміновану складові ФД, а саме обмежену некорельовану складову ФД, яка виникає внаслідок перехресних впливів між сусідніми лініями передачі.

### Мета та задачі дослідження

*Метою роботи є підвищення точності оцінювання параметрів ФД у системах передавання даних за допомогою відновлення пропущених значень помилок часових інтервалів (ПЧІ).*

Задачами дослідження є:

- аналіз методології оцінювання основних параметрів ФД;
- розробка моделей випадкового та обмеженого некорельованого ФД;
- оцінювання точності визначення параметрів складових ФД.

### Методологія оцінювання основних параметрів ФД

У загальному випадку аналіз компонентів ФД цифрового сигналу СП можна реалізувати, виконавши:

- вимірювання значень ПЧІ сигналу з виділенням ФД та визначення параметрів складових ФД, а саме: ФД, залежного від коефіцієнта заповнення імпульсної послідовності та ФД, залежного від міжсимвольної інтерференції;
- заповнення пропущених значень ПЧІ вхідного сигналу з виділенням періодичного ФД та оцінювання його параметрів;
- комплексний аналіз випадкового ФД та обмеженого некорельованого ФД з подальшим оцінюванням їх параметрів.

Для комплексного аналізу періодичного ФД, випадкового ФД та обмеженого некорельованого

ФД можна використовувати спектральну методологію, яка базується на дискретному перетворенні Фур'є (ДПФ). Реалізація цієї методології під час аналізу ФД базується на заповненні пропущених значень послідовності ПЧІ методом інтерполяції [4]. В результаті інтерпольовані значення ПЧІ ігноруються. Використання інтерполяції невідомих значень ПЧІ за найближчими відомими значеннями спотворює спектр послідовності ПЧІ у смузі нижніх частот з подавленням амплітуд високочастотних складових. Такі спотворення спектра призводять до погіршення точності оцінювання усіх складових ФД [4].

У роботі пропонується метод спектрального аналізу компонентів ФД, який базується на заповненні пропущених значень послідовності шляхом заміни їх на значення, які характеризують періодичну складову ФД, що дозволяє розділити періодичну та випадкову складові ФД.

Цей метод можна реалізувати шляхом виконання таких етапів:

— невідомі значення в послідовності ПЧІ замінюються періодичною послідовністю нулів та одиниць та за допомогою ДПФ виконується перехід з часової у частотну область;

— визначення пікових складових спектра послідовності ПЧІ, які відповідають значенням періодичного ФД з відкиданням складових спектра, які не відповідають піковим значенням періодичного ФД;

— виконання процедури зворотного ДПФ, в результаті чого отримуємо послідовність періодичних складових ФД у часовій області;

— виконання процедури коригування послідовності складових періодичного ФД та заміни невідомих значень послідовності ПЧІ на відповідні значення отриманої послідовності складових періодичного ФД;

— за допомогою рахунок фільтрації у частотній області виконується процедура виділення з послідовності ПЧІ періодичної складової ФД;

— значення послідовності, що характеризують періодичне ФД замінюють на невідомі значення і в подальшому аналізі під час розділення та оцінювання параметрів випадкової та періодичної складових ФД не враховуються.

### Моделі випадкового та обмеженого некорельованого ФД

Комплексний аналіз випадкового та обмеженого некорельованого ФД базується на дослідженні відмінностей відповідних автокореляційних функцій (АКФ) компонентів загального ФД. Для аналізу характеристики появи ФД у  $D$  взаємодіючих ланках та через  $d$  виникаючих наведень, можна АКФ обмеженого некорельованого ФД подати як [5]

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

де  $\Delta_d$  — параметр, який характеризує зміну положення фронту/спаду імпульсу, що передається в умовах наведень з  $d$ -ї ланки.

Враховуючи, що основним джерелом випадкового ФД є тепловий шум, то його АКФ будемо описувати за допомогою виразу

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

де  $\sigma_{RJ}$  — середньоквадратичне відхилення (СКВ) значень випадкового ФД.

Враховуючи, що причини виникнення випадкового та обмеженого некорельованого ФД є незалежними, сумарна АКФ буде визначатися як

$$k_{BUJ+RJ}(n) = k_{BUJ}(n) + k_{RJ}(n). \quad (3)$$

Підставивши у вираз (3) значення параметрів ФД, отримаємо:

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \begin{cases} \sigma_{RJ}^2 + 0,5 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & \text{для } n = 0; \\ 0,25 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & \text{для } n = 1; \\ 0, & \text{для } n \geq 2. \end{cases} \quad (4)$$

Визначимо  $k_{BUJ+RJ}(0)$  з виразу (4)

$$k_{BUJ+RJ}(0) = 2k_{BUJ+RJ}(1) + \sigma_{RJ}^2. \quad (5)$$

Звідси отримаємо:

$$\sigma_{RJ} = \sqrt{k_{BUJ+RJ}(0) - 2k_{BUJ+RJ}(1)}. \quad (6)$$

Таким чином, за допомогою відомої загальної АКФ для випадкового і обмеженого некорельованого ФД та, використовуючи вираз (6), визначимо СКВ  $RJ_{RMS} = \sigma_{RJ}$  випадкової складової загального ФД. У випадку, коли відомі значення ПЧІ, оцінювання АКФ можна проводити за допомогою виразу

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=0}^{N-n-1} (\overline{TIE}(i) - \overline{TIE})(\overline{TIE}(i+n) - \overline{TIE}), \quad (7)$$

де  $n = 0, 1, 2 \dots n_{\max}$ ;  $\overline{TIE}$  — середнє значення послідовності ПЧІ:

$$\overline{TIE} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} TIE(i). \quad (8)$$

Для визначення АКФ ПЧІ необхідно враховувати лише відомі значення послідовності. Для випадку, коли враховуються невідомі значення ПЧІ, вирази (7) та (8) будуть мати вигляд

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \frac{1}{K_n} \sum_{i=0}^{N-n-1} (TIE(i) - \overline{TIE})(TIE(i+n) - \overline{TIE}) \Big|_{\substack{TIE(i) \neq NaN \\ TIE(i+n) \neq NaN}}; \quad (9)$$

$$\overline{TIE} = \frac{1}{K_0} \sum_{i=0}^{N-1} TIE(i) \Big|_{TIE(i) \neq NaN}, \quad (10)$$

де  $K_n$  — кількість пар відомих значень ПЧІ, які зсунуті один від одного на  $n$  тактів,  $NaN$  — невідоме (пропущене) значення послідовності  $TIE$ .

Після оцінювання СКВ  $\sigma_{RJ}$  випадкового ФД необхідно визначити діапазон обмеженого некорельованого ФД за допомогою коригування гістограми значень послідовності ПЧІ. Коригування гістограми ПЧІ базується на оцінюванні обмеженого некорельованого ФД з відомим СКВ  $\sigma_{RJ}$  випадкового ФД шляхом підбору відповідних значень математичних очікувань  $\mu^+$  та  $\mu^-$  нормальних розподілень значень гістограми випадкового та обмеженого некорельованого ФД. Тоді діапазон обмеженого некорельованого ФД можна знайти за допомогою виразу  $BUJ_{p-p} = \mu^+ - \mu^-$ . У результаті аналіз розподілення випадкового та обмеженого некорельованого ФД можна виконати за допомогою таких процедур:

- визначення середнього значення  $TIE$  та АКФ;
- побудова гістограми значень  $TIE$  та оцінювання математичного очікування, що характеризує діапазон значень випадкового та обмеженого некорельованого ФД.

### Оцінювання точності визначення параметрів складових ФД

Для оцінювання точності запропонованого методу проведемо імітаційне моделювання з використанням програмного пакету MatLab. Як вхідні дані використаємо ПЧІ, що характеризують ви-

падкове та обмежене некорельоване ФД. Критеріями ефективності, за якими можна проводити аналіз точності запропонованого методу, є відносні похибки оцінювання: діапазону значень обмеженого некорельованого ФД, середньоквадратичного відхилення випадкового ФД та амплітуди періодичної складової ФД.

Імітаційне моделювання виконано з метою аналізу точності оцінювання ФД залежно від діапазону зміни параметрів ФД. В ході моделювання взято: довжину однієї вибірки  $N = 2^{14}$ ; кількість досліджень для кожної точки  $n = 50$  для різних значень динамічного діапазону  $h$ .

На рис. 1 зображено результати дослідження відносних похибок оцінювання випадкового та обмеженого некорельованого ФД.

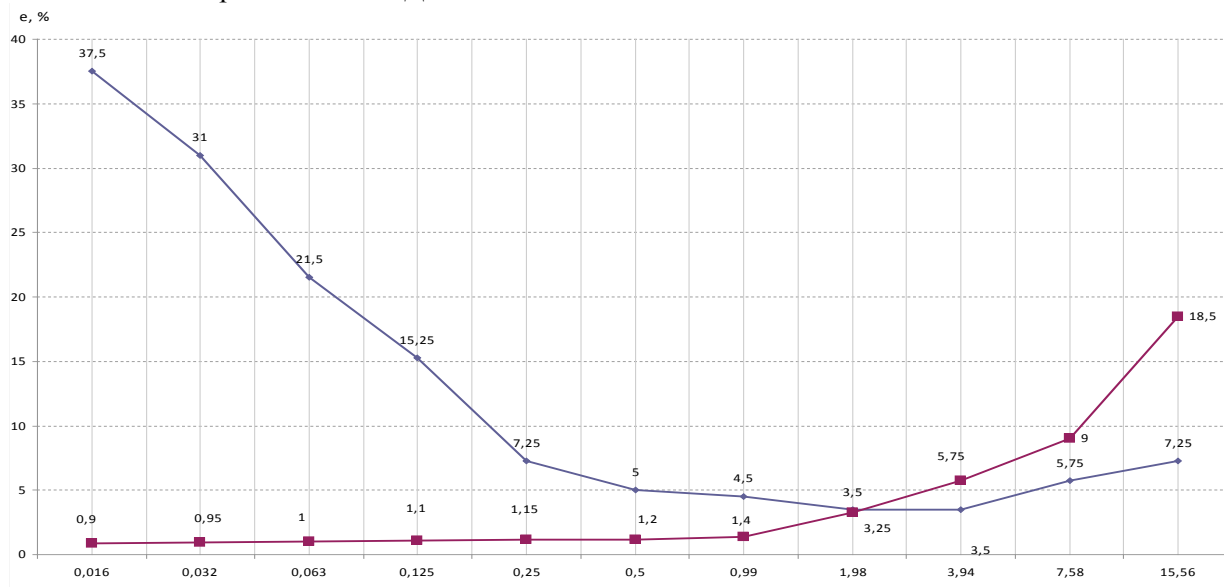


Рис. 1. Залежність відносної похибки оцінювання обмеженого некорельованого та випадкового ФД від діапазону зміни його значень

На рис. 2 показано залежності відносних похибок оцінювання періодичного ФД для трьох значень об'єму вибірок:  $N_1 = 2^{10}$ ;  $N_2 = 2^{12}$ ;  $N_3 = 2^{14}$ .

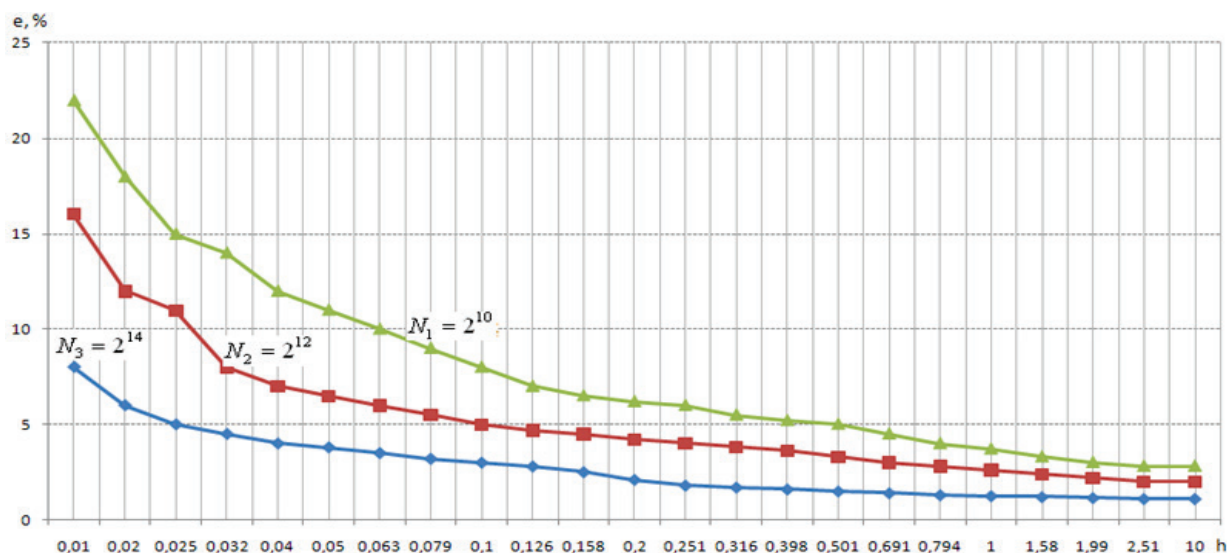


Рис. 2. Залежність відносної похибки оцінювання періодичного ФД від діапазону зміни його значень

Отже, відносна похибка оцінювання обмеженого некорельованого ФД зменшується зі збільшенням динамічного діапазону випадкового ФД та дорівнює мінімальному значенню 3,5 % для  $h = 1,98$ . Відносна похибка оцінювання випадкового ФД зі зростанням потужності обмеженого

некорельованого ФД збільшується. Мінімальне значення відносної похибки оцінювання випадкового ФД дорівнює 1 % для  $h \leq 0,063$ . Для постійних значень періодичного ФД відносну похибку оцінювання діапазону значень ФД можна зменшити за рахунок збільшення об'єму вибірки  $N$ .

### Висновки

Запропоновано ефективний метод оцінювання параметрів випадкового ФД в СП, який базується на визначенні АКФ ФД та процедури коригування гістограми ПЧІ. В результаті моделювання визначено мінімальні значення похибок оцінювання параметрів ФД для запропонованого методу, які дорівнюють 0,9 % для випадкового ФД та 1,1 % для періодичного ФД, тоді як відомий інтерполяційний метод має похибки оцінювання параметрів ФД, які дорівнюють 4 % для випадкового ФД та 7 % для періодичного ФД.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yu Chang. Jitter modeling in statistical link simulation / Yu Chang, Dan Oh, C.Madden // Electromagnetic Compatibility, 2008. EMC 2008 // IEEE International Symposium.
2. Бортник Г. Г. Аналіз методів оцінювання джитеру в телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, М. Л. Мінов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — Хмельницький, 2007. — № 1. С. 169—175.
3. Бакланов И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов. — М. : Эко-Трендз, 2007. — 354 с.
4. Колинко Т. А. Измерения в цифровых системах связи. Практическое руководство / Т. А. Колинко. — К. : «Век», 2002. — 320 с.
5. Шалагинов В. А. Математическая модель определения характеристик ограниченного некоррелированного джитера, вызванного наводками / В. А. Шалагинов // Телекоммуникации. — 2008. — № 10. — С. 13—19.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем і телебачення

Надійшла до редакції 1.07.10  
Рекомендована до друку 28.09.10

**Бортник Геннадій Григорович** — доцент, **Васильківський Микола Володимирович** — аспірант, **Стальченко Олександр Володимирович** — асистент.

Кафедра телекомунікаційних систем і телебачення, Вінницький національний технічний університет