

**МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ  
В КОМП'ЮТЕРНИХ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**

В роботі наведено метод оцінювання параметрів фазового дрижання в інформаційних мережах, який характеризується високою точністю. Запропонований метод може використовуватись для довільної розрядності даних та при різних тактових частотах.

The method of estimation of parameters of jitter in information networks, is characterized by high accuracy in work is offered. The proposed method can be used for any data rate and for different clock frequencies.

Ключові слова: фазове дрижання, комп'ютерні та телекомунікаційні мережі

**Вступ**

В умовах сучасного розвитку комп'ютерних і телекомунікаційних мереж проблема фазового дрижання (ФД) цифрових сигналів набуває особливої актуальності. В результаті впровадження нових, більш досконалих високошвидкісних методів передачі постійно ускладнюється топологія мереж. Перевищення ФД допустимих норм суттєво знижує якість передачі інформації, що в свою чергу призводить до появи бітових помилок при прийманні сигналу, а також некерованих просковзувань і порушення циклової синхронізації. Тому при розробці та експлуатації сучасних мереж одним з найважливіших показників якості є значення ФД сигналів, що передаються. Отже, необхідність забезпечення норм на якість передачі в цифрових мережах вимагає врахування всіх параметрів та характеристик ФД, які виникають в процесі формування та передачі цифрових сигналів.

Результати досліджень ФД тактових сигналів в мережах зв'язку наведено у [1]. У цих дослідженнях вирішувались технічні проблеми, які пов'язані з появою ФД тактових сигналів в плезіохронних системах передавання. Результати аналізу методів і засобів оцінювання ФД в телекомунікаційних системах наведено в роботі [2].

ФД спричиняється амплітудним і фазовим шумом, як внутрішнього, так і зовнішнього походження. ФД сигналу має різні характеристики залежно від його причин і джерел [3]. Результати досліджень фазової нестабільності та ФД в інформаційних мережах наведено у [4]. Слід відмітити, що ці дослідження були спрямовані на розв'язання вузьких технічних задач, що стояли перед розробниками цифрового обладнання.

У роботі [5] розглянуто різні причини виникнення ФД, а також запропоновано методи оцінювання та зменшення їх значень (як правило, за допомогою спеціальних схем фазового автоналаштування частоти). У роботі [6] проведено аналіз сумарних ФД у цифрових трактах та обґрунтовано можливість використання функції максимальної помилки часового інтервалу для оцінювання стану мереж.

Задачею оцінювання параметрів ФД є виявлення його причин з метою забезпечення раннього виявлення пошкоджень або зниження якості передачі в цифрових трактах інформаційних мереж. Тому своєчасне виявлення тенденцій, що призводять до зниження якості передачі в цифровому тракті, набуває особливого значення.

Метою даної роботи є розробка методу оцінювання ФД, який характеризується підвищеною точністю визначення параметрів детермінованої та випадкової складових ФД, що створює умови для покращення якості функціонування комп'ютерних і телекомунікаційних мереж.

Для досягнення поставленої мети досліджень необхідно розв'язати наступні задачі:

- виконати аналіз параметрів ФД в комп'ютерних і телекомунікаційних мережах.
- розробити математичну модель оцінювання ФД на базі методології цифрового аналізу сигналів;
- виконати аналіз похибок оцінювання ФД.

**Аналіз параметрів ФД в комп'ютерних і телекомунікаційних мережах**

ФД необхідно розглядати як випадкову фазову модуляцію тактового сигналу в інформаційних мережах, що дає можливість оцінювання ФД як неперервну функцію часу та неперервного ряду частотних компонент.

Для повного оцінювання ФД та аналізу характеру його зміни в частотній та часовій областях необхідно виконати комплексне дослідження параметрів ФД у розрізі випадкової та детермінованої складових.

Випадкове ФД RJ має гауссову функцію густини ймовірності і характеризується двома параметрами: середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням. При такій функції густини ймовірності випадкове ФД може мати будь-яку амплітуду згідно закону нормального розподілення та визначається за допомогою виразу [5]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

де математичне сподівання  $\mu$  визначається з урахуванням виразу:

$$f(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}\sigma^2} \quad (2)$$

ФД цього типу вимірюється як в амплітудних  $UI_{p-p}$  (точніше, значеннях "пик-пик"), так і в середньоквадратичних значеннях UIRMS. Для ФД з гауссовою густиною ймовірності, подібного до білого шуму,  $UI_{p-p} = (5 \div 10)$  UIRMS. Для синусоїдального ФД співвідношення між вказаними параметрами дорівнює  $2\sqrt{2}$ .

Систематичне ФД DJ характеризується функцією розподілу густини ймовірності, що відрізняється від гауссової та містить ряд ФД:

- періодичне ФД (Periodic Jitter, PJ), яке ще називають синусоїдальним ФД SJ, математична модель якого має вигляд

$$PJ(t) = A \cos(\omega t + \theta) \quad ;$$

(3)

- ФД, залежне від інформаційного сигналу (даних) (Data Depending Jitter, DDJ);
- ФД, спричинене спотворенням коефіцієнта заповнення імпульсної послідовності сигналу (Duty Cycle Distortion, DCD);
- ФД, спричинене міжсимвольною інтерференцією імпульсних послідовностей сигналу (Intersymbol Interference, ISI);
- обмежене некорельоване ФД, спричинене перехресними впливами між сусідніми лініями передачі (Bounded Uncorrelated Jitter, BUJ).

Фізичний зміст поняття ФД полягає у тому, що значення потужності сигналу на виході фазового детектора  $\sigma_v^2$  пропорційне середньому квадратичному значенню ФД  $\sigma_\varphi^2$ :

$$\sigma_v^2 = K_d^2 \sigma_\varphi^2, \quad (4)$$

де  $K_d$  – коефіцієнт підсилення фазового детектора.

Якщо ФД виникають внаслідок дії адитивного гаусового шуму на стабільний сигнал, то фазові шуми можуть бути представлені наступним чином:

$$\sigma_\varphi^2 = \sigma_n^2 / 2P_s, \quad (5)$$

де  $\sigma_n^2$  – потужність адитивного шуму;

$P_s$  – потужність сигналу.

Вираз (5) є основою для оцінювання ФД, які виникають внаслідок дії адитивного шуму на синусоїдальний сигнал.

Оцінювання параметрів ФД необхідно виконувати за допомогою виразу, який описує сигнал з адитивним шумом:

$$s(t) = (A + a(t)) \sin(\omega t + \varphi(t)), \quad (6)$$

де  $s(t) = A \sin(\omega t)$  – сигнал без адитивного шуму;

$a(t)$  – амплітуда адитивного шуму;

$\varphi(t)$  – фаза адитивного шуму.

За наявності у цифровому сигналі фазового шуму вираз (6) буде наступним:

$$s(t) = [V_0 + P(t)] \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi(t)). \quad (7)$$

Виконавши перетворення (7), отримаємо вираз для сигналу з ФД, що характеризується амплітудою та фазою адитивного шуму:

$$V(t) = V_0 \sin(\omega_0 t) + V_0 \varphi(t) \cos(\omega_0 t) + P(t) \sin(\omega_0 t). \quad (8)$$

Даний вираз забезпечує пряме оцінювання періодичного ФД за допомогою цифрового аналізу сигналів (ЦАС).

#### Оцінювання параметрів ФД на базі цифрового аналізу сигналів

Оцінювання параметрів ФД за допомогою ЦАС забезпечує пряме вимірювання амплітуди періодичного ФД у цифровому сигналі

$$\varphi(t) = \alpha \sin(\omega t + \varphi_0) = \alpha \sin(2\pi / T + \varphi_0), \quad (9)$$

де  $\varphi_0$  - початкова фаза модульованого коливання;

$T$  – період модульованого коливання.

Різницю між відхиленнями фаз двох точок промодульованого сигналу, які відстають одна від одної на проміжок часу  $t_\zeta$ , визначимо за допомогою виразу:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(t) &= \alpha \sin(2\pi(t+t_c)/T + \varphi_0) - \alpha \sin(2\pi t/T + \varphi_0) = \\ &= 2\alpha \sin(\pi_c/T) \cdot \cos(2\pi t/T + \pi_c/T + \varphi_0). \end{aligned} \quad (10)$$

Вираз (10) показує, що  $\Delta\varphi(t)$  є гармонічною функцією у часі, в якій  $t_c$  є часом затримки. За допомогою відношення часу затримки до періоду модульовального коливання  $T$  визначають амплітуду  $2\alpha \sin(\pi_c/T)$  та фазу  $(2\pi t/T + \pi_c/T + \varphi_0)$  різниці відхилення фаз двох значень цифрового сигналу. Умову максимального значення амплітуди різниці відхилення фаз двох значень цифрового сигналу визначимо за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} (\pi_c/T) &= \pi/2 + k\pi, & (k = 0, 1, 2, \dots); \\ t_c/T &= 1/2 + k, & (k = 0, 1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (11)$$

З виразу (10) видно, що при неперервному вимірюванні різниці фаз між сигналом без затримки та сигналом із затримкою  $t_c$  отримуємо значення ФД, яке змінюється за гармонічним законом.

У випадку невиконання умови (11) необхідно для визначення ФД використовувати такий вираз:

$$2\alpha = A / \sin(\pi_c/T). \quad (12)$$

Отже, для досягнення високої точності оцінювання амплітуди ФД за допомогою даного методу необхідно, щоб досліджуваний цифровий сигнал був періодичним з цілим числом періодів:

$$t_c = n \cdot T_{\text{од}}, \quad (n = 1, 2, \dots), \quad (13)$$

де  $T_{\text{од}}$  – період цифрового сигналу.

Підставивши вираз (13) у (11), отримуємо умови максимальної різниці фаз для двох точок цифрового сигналу

$$\begin{aligned} nT_{\text{од}}/T &= 1/2 + k \\ n \cdot f/B &= 1/2 + k, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $f$  – частота ФД;

$B$  – швидкість передавання інформаційного сигналу.

З урахуванням (14) отримуємо вираз для визначення частот ФД, при яких необхідно виконувати оцінювання амплітуди ФД за допомогою ЦАС:

$$f = B \cdot \frac{T_{\text{од}}}{T}. \quad (15)$$

У випадку, коли значення частоти ФД не відповідає умові (14) необхідно використовувати вираз (13).

#### Аналіз похибок оцінювання ФД

Для визначення похибки методу оцінювання ФД виконаємо перетворення виразу (10):

$$\Delta\varphi = 2\alpha \cdot B \cdot C, \quad (16)$$

де  $B = \sin(\pi_c/T)$  – значення функції, яка залежить від похибки ЦАС;

$C = \cos(2\pi t/T + \pi_c/T + \varphi_0)$  – значення функції, яка залежить від тривалості вимірювання.

Враховуючи вираз (16), визначимо похибки оцінювання ФД, використовуючи часткові похідні за окремими змінними:

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta\varphi) &= l \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial\varphi}{\partial t_c} \right) \Delta t_c \right]^2 / 3 + \left[ \left( \frac{\partial\varphi}{\partial T} \right) \Delta T \right]^2 / 3 + \left[ \left( \frac{\partial\varphi}{\partial t} \right) \Delta t \right]^2 / 3 + (\Delta T_{\text{изм}})^2 / 3} = \\ &= l \sqrt{(4\alpha^2/3) \left\{ \left[ C \left( \frac{\partial B}{\partial t_c} \right) \Delta t_c \right]^2 + \left[ C \left( \frac{\partial B}{\partial T} \right) \Delta T \right]^2 + \left[ B \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right) \Delta t \right]^2 \right\} + (\Delta T_{\text{изм}})^2 / 3}, \end{aligned} \quad (17)$$

де  $l$  – коефіцієнт, який визначає ймовірність отриманого значення похибки вимірювання ФД;

$\Delta T_{\text{зці}}$  – похибка вимірювання зони коливання положення імпульсу.

Проведемо оцінювання похибки визначення параметру  $B$  для ФД в діапазоні змінювання значень  $\Delta t_c$  згідно виразу:

$$\Delta B(\Delta t_\zeta) = \sin\left(\frac{\pi t_\zeta}{T}\right) - \sin\left(\frac{\pi(t_\zeta \pm \Delta t_\zeta)}{T}\right) = \sin\left(\frac{\pi t_\zeta}{T}\right) - \sin\left(\frac{\pi t_\zeta}{T}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \Delta t_\zeta}{T}\right) \pm \cos\left(\frac{\pi t_\zeta}{T}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \Delta t_\zeta}{T}\right). \quad (18)$$

Враховуючи діапазон значень  $\Delta t_\zeta$ , що відповідають умові (11), з виразу (18) отримаємо:

$$\Delta B(\Delta t_\zeta) = 1 - \cos\left(\frac{\pi \Delta t_\zeta}{T}\right). \quad (19)$$

Якщо похибка оцінювання часу затримки буде представлена у відносних значеннях, то з виразу (19) отримаємо:

$$\Delta B(\Delta t_\zeta) = 1 - \cos\left(\frac{\pi \Delta t_\zeta \delta t_\zeta}{T}\right) = 1 - \cos\left[\left(\frac{\pi}{2} + k\pi\right) \delta t_\zeta\right]. \quad (20)$$

Тоді похибка оцінювання параметрів ФД дорівнює

$$\Delta B(\Delta T) = 1 - \cos\left(\frac{\pi \Delta T}{T^2}\right) = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + k\pi\right) \delta T. \quad (21)$$

Залежності похибок оцінювання параметрів ФД від тривалості вимірювання для різних інтервалів вибірок наведено на рис. 1.

Максимальна точність даного методу оцінювання параметрів ФД залежить від точності роботи засобу ЦАС і обмежується значенням 0,001 – (похибка визначення тривалості тактового інтервалу (ТІ) цифрового сигналу). Отже, запропонований метод забезпечує мінімальну похибку оцінювання амплітуди ФД  $\delta(t_\zeta) = 0,05\%$  при максимальній кількості інтервалів вибірки  $k = 10$  та похибці визначення тривалості ТІ, яка дорівнює 0,001.

Даний метод оцінювання амплітуди ФД є коректним при умові періодичності модульовального колювання інформаційного цифрового сигналу у комп'ютерних і телекомунікаційних мережах.

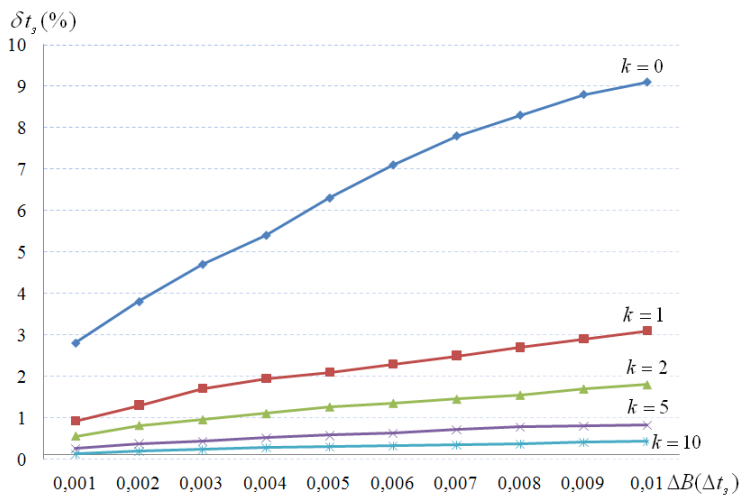


Рис. 1. Залежності похибок оцінювання параметрів ФД від тривалості вимірювання

### Висновки

1. Аналіз параметрів ФД в комп'ютерних і телекомунікаційних мережах дає можливість забезпечити комплексний підхід до оцінювання якості роботи інформаційних засобів, що в свою чергу забезпечить ефективний контроль функціонування систем передачі інформації.

2. Запропонований метод забезпечує оцінювання амплітуди ФД з високою точністю в широкому частотному діапазоні значень ФД. Діапазон значень тривалостей ТІ забезпечує необхідну точність оцінювання амплітуд ФД в телекомунікаційних та комп'ютерних мережах.

3. Запропонований метод оцінювання параметрів ФД в інформаційних мережах може використовуватись для довільної розрядності мережі та на різних частотах.

### Література

1. Бакланов И.Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях./ И.Г. Бакланов – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2007. – 354 с.
2. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи./ И.Г. Бакланов – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 195 с.
3. Бакланов И.Г. Тестирование и диагностика систем связи./ И.Г. Бакланов – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 264 с.
4. Бакланов И.Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 2. Системы синхронизации, В-ISDM, АТМ./ И.Г. Бакланов – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 149 с.
5. Бирюков Н.Л. Анализ суммарных фазовых искажений в цифровых трактах / Н.Л. Бирюков, Н.Р. Триска // Зв'язок, 2003. – № 4. С. 22-26.
6. Бирюков Н.Л. Использование функции максимальной ошибки временного интервала для оценки состояния цифровых трактов / Н.Л. Бирюков, Н.Р. Триска // Зв'язок, 2004. – № 1. С. 29-32.

Надійшла до редакції  
18.11.2010 р.