

возможного сосредоточения персонала. А также смоделировано влияние судового радиооборудования, находящегося на палубе судна, на пассажиров и членов экипажа судна, то есть проведен экологический мониторинг электромагнитной обстановки.

### Литература

1. Фок В.А. Успехи физических наук / В.А. Фок / Дифракция. – 1948. – Т. XXX. – VI. – Вып. 3, – 327 с.
2. Shckorbatov Y.G. He-Ne laser light induced changes in the state of chromatin in human cells / Y.G. Shckorbatov // Naturwissenschaften. – 1999. – V. 86, № 9. – P. 452– 453. НД № 2– 020101– 053. Правила по оборудованию морских судов. Правила по грузоподъемным устройствам морских судов. Правила о грузовой марке морских судов. – введ. 2008-10-01. – СПб.: Российский морской регистр, 2008. – 412 с.
3. Рек. МСЭ-R М.1172. Различные сокращения и сигналы, используемые для радиосвязи в морской подвижной службе, 1995-10-1. – С-Пб.: Ассамблея радиосвязи МСЭ, 1995. – 251 с.
4. РД 31.54.26-00. Нормы и правила обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) на морских подвижных объектах и методы комплексной оценки ЭМС. – введ. 1999-02-04 – С-Пб.: ЦНИИМФ, 2000, – 100 с.
5. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг – М.: Солон-Пресс, 2004 – 240 с.
6. РД5Р.8713-93. Аппаратура радиосвязи и радиолокации. – введ. 97-02-03. – СПб.: ГМП Звезда, 1997. – 38 с.
7. Comrod Modular Antennas / Comrod. – Б. М., Comrod, Б. Г. – 6 с.
8. Furuno. Руководство оператора. УКВ радиотелефон / Furuno, – Furuno EURUS. – 130 с.
9. Kongsberg AIS 200 Руководство пользователя / Kongsberg. – М.: СайтМосква, 2007. – 85 с.
10. Arpa marine radar with full arpa and AIS function / Furuno. – Furuno. – 8 с.

Надійшла до редакції  
17.5.2012 р.

УДК 621.396

**Г.Г. БОРТНИК, М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ**

Вінницький національний технічний університет,  
ПАТ „Укртелеком”

## СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРІОДИЧНОГО ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ ГРУПОВИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ

У роботі представлено спектральний метод оцінювання параметрів періодичного фазового дрижання (ФД) групових сигналів у цифрових системах передавання на базі відновлення пропущених значень помилок часових інтервалів. Запропонований метод характеризується високою точністю за рахунок розділення періодичної та випадкової складових ФД і зниженої дисперсії оцінювання спектра потужності ФД.

The paper presents the spectral method of parameter estimation of periodic phase shake (PS) group signals in digital transmission systems based on the restoration of missing values error time intervals. The proposed method has high accuracy by separating periodic and random components of the PS and reduced variance estimation of the power spectrum of the PS.

Ключові слова: фазове дрижання групових сигналів, помилки часових інтервалів, цифрова система передавання.

### Вступ

Використання нових стандартів високошвидкісної передачі даних передбачає підвищення вимог до якості роботи цифрових систем передавання (ЦСП). У сучасних ЦСП основним параметром якості роботи є фазове дрижання (ФД) групових сигналів. Підвищений рівень періодичних складових ФД групових сигналів призводить до зниження стійкості функціонування ЦСП та спотворення переданої інформації [1]. Найпоширенішим методом оцінювання ФД групових сигналів є спектральний аналіз його параметрів з використанням частотно-селективного приймача [2]. Цей метод характеризується низькою точністю та складністю реалізації внаслідок застосування аналогової методології оброблення сигналів.

У практиці експлуатаційних вимірювань більшого поширення набули методи, що базуються на двох етапах оцінювання ФД, які відрізняються фільтрами нижніх і верхніх частот [3]. Незважаючи на простоту реалізації, ці методи характеризуються низькою точністю та обмеженим числом контрольованих параметрів ФД.

Для повного дослідження причин виникнення ФД та характеру його зміни в частотній та часовій областях необхідно виконувати комплексний аналіз параметрів ФД у розрізі випадкової та детермінованої складових. Відомі методи аналізу параметрів ФД не дають можливості всебічно досліджувати детерміновані складові ФД.

Отже, існує необхідність у розробленні спектрального методу оцінювання періодичного ФД, який би забезпечував високу точність у широкій смузі робочих частот.

Метою роботи є підвищення точності оцінювання параметрів періодичного ФД групових сигналів у телекомунікаційних системах за рахунок відновлення пропущених значень помилок часових інтервалів (ПЧІ), що створює умови для покращення якості зв'язку в ЦСП. Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- аналіз особливостей методології спектрального оцінювання параметрів ФД;
- коригування та спектральне оцінювання послідовності складових періодичного ФД;
- аналіз точності визначення параметрів періодичного ФД.

#### Аналіз особливостей методології спектрального оцінювання параметрів ФД

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

- вимірювання значень помилок часових інтервалів (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 детермінованого ФД з подальшим оцінюванням їх параметрів.

Найповнішими з точки зору кількості контрольованих параметрів ФД є методи спектрального аналізу на базі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [4]. Параметри ФД зручно оцінювати, використовуючи цифровий спектральний аналіз на основі алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) з віконним зважуванням. Основною метою спектрального аналізу ФД з виходу системи зв'язку є визначення на базі ДПФ спектра потужності (СП) цифрових еквівалентів ФД:

$$S(k) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \right|^2, \quad (1)$$

де  $N$  – число дискретних значень сигналу;  
 $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$  – повертальні множники ДПФ;  
 $x(n)$  – вибірка сигналу у часовій області.

Спектральний аналіз компонентів ФД, який базується на заповненні пропущених значень послідовності шляхом заміни їх на значення, які характеризують періодичну складову ФД 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 ШПФ з віконним зважуванням 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 ШПФ, 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 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.

#### Коригування та спектральне оцінювання послідовності складових періодичного ФД

Процес заміни невідомих значень ПЧІ на послідовність нулів та одиниць виконуємо згідно виразу:

$$Y(n) = X(n) \cdot R(n), \quad (2)$$

де  $R(n)$  – послідовність нулів та одиниць.

Враховуючи загальну формулу для послідовності ПЧІ  $X(n)$ :

$$X(n) = A_0 \cos\left(2\pi \frac{k_0}{N} n + \varphi_{k_0}\right) + \eta(n), \quad (3)$$

де  $A_0$  – амплітуда періодичної складової послідовності  $X(n)$ ;

$\varphi_{k_0}$  – початкова фаза послідовності  $X(n)$ ;

$\eta(n)$  – випадкова складова ФД,

та використовуючи пряме ДПФ, запишемо вираз для визначення спектра послідовності  $X(n)$ :

$$X(k) = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ \frac{A_0}{2} N \cdot e^{j\varphi_{k_0}} + \sqrt{D(\eta)N} \cdot e^{j\theta_{k_0}}, & k = k_0 \\ \frac{A_0}{2} N \cdot e^{-j\varphi_{k_0}} + \sqrt{D(\eta)N} \cdot e^{-j\theta_{k_0}}, & k = N - k_0 \\ \sqrt{D(\eta)N} \cdot e^{j\theta_k}, & k \neq 0, k \neq k_0, k \neq N - k_0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\theta_k$  – фаза частотної складової спектра послідовності  $X(n)$ ;

$D(\eta)$  – дисперсія випадкової складової ФД послідовності  $X(n)$ .

Використовуючи формулу для автокореляційної функції (АКФ) послідовності  $R(n)$  [4]:

$$R_{akf}(n) = \begin{cases} 2p(1-p)((1-p)^2 + p^2), & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

визначимо вираз для спектральної густини потужності  $R(n)$ :

$$S_{sgp}(k) = 4p^2(1-p)^2 N^2 \delta(k) + 2p(1-p)((1-p)^2 + p^2)N. \quad (6)$$

З виразу (6) знайдемо амплітудний спектр послідовності  $R(n)$ :

$$S_{as}(k) = 2p(1-p)N \cdot \delta(k) + \sqrt{2p(1-p)((1-p)^2 + p^2)}N. \quad (7)$$

Враховуючи (7), запишемо вираз для ДПФ послідовності  $R(n)$ :

$$R(k) = 2p(1-p)N \cdot \delta(k) + \sqrt{2p(1-p)((1-p)^2 + p^2)}N \cdot e^{j\varphi_k}, \quad (8)$$

де  $\varphi_k$  – випадкова фаза складових спектра послідовності  $R(n)$ .

Використовуючи (4), (8) та пряме ДПФ  $Y_p(k)$

$$Y_p(k) = \sum_{n=0}^{N-1} Y_p(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad (9)$$

запишемо загальну формулу для визначення спектра послідовності  $Y(n)$ :

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X(i) \cdot R(k-i). \quad (10)$$

Підставимо (4), (8) у (10) та виконавши перетворення, отримаємо остаточний вираз для визначення спектра послідовності  $Y(n)$ :

$$Y(k_0) = \frac{A_0}{2} N \cdot 2p(1-p) \cdot e^{j\varphi_{k_0}}. \quad (11)$$

З (11) видно, що оцінювання амплітудного спектра періодичної складової ФД послідовності ПЧ  $X(n)$  при великому значенні об'єму вибірки  $N$  необхідно виконувати за допомогою формули

$$|X(k_0)| = \frac{|Y(k_0)|}{2p(1-p)}. \quad (12)$$

Використання перекривних ШПФ з оптимальним віконним зважуванням забезпечує підвищення точності запропонованого методу спектрального оцінювання параметрів ФД. Спектр потужності окремого зваженого сегмента даних у результаті спектрального оцінювання параметрів ФД можна знайти за формулою

$$S_p(k) = |X_{pw}(k)|^2. \quad (13)$$

Для отримання статистично стійких оцінок СП пропонується процедура спектрального усереднення зважених перекривних сегментів даних. Кінцева оцінка СП досліджуваного сигналу ФД з урахуванням усереднення спектральних складових буде мати вигляд

$$S(k) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P S_p(k) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P |X_{pw}(k)|^2. \quad (14)$$

Завдяки перекриванню сегментів даних вдається збільшити число аналізованих підпослідовностей для заданого обсягу відної реалізації порівняно з іншими способами згладжування. А це призводить до зменшення дисперсії підсумкового СП.

Процедура синтезу оптимального «вікна» полягає у виконанні математичної задачі пошуку обмеженої в часі функції, ДПФ якої найкращим способом апроксимує обмежений за частотою СП сигналу, тобто має мінімальну енергію за межами заданого масиву даних.

У техніці спектрального аналізу використовується низка неперервних косинусних вагових функцій, які описуються кінцевим тригонометричним рядом і мають вигляд [4]

$$W_C(t) = \sum_{r=0}^R a_r \cos\left(\frac{2\pi r t}{T}\right). \quad (15)$$

Після перетворення Фур'є вираз (15) набуде вигляду

$$W_C(\omega) = \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{T/2\omega^{2m}} \sum_{r=0}^R (-1)^r r^{2m} a_r. \quad (16)$$

Аналіз виразу (16) показує, що чим більше членів ряду (другої суми у виразі) на межі вікна будуть дорівнювати 0, тим вища швидкість спадання бічних пелюсток. Це є визначальним критерієм під час синтезу вагової функції.

Дискретна косинусна функція у загальній формі буде мати вигляд

$$W_C(n) = \sum_{r=0}^R (-1)^r a_r \cos\left(\frac{2\pi r n}{M}\right), \quad (17)$$

де  $r$  – номер члена тригонометричного ряду.

Задача синтезу цієї вагової функції полягає в обчисленні коефіцієнтів  $a_r$ , які забезпечують максимальну асимптотичну швидкість спадання бічних пелюсток. Крім того, враховуючи подальше оброблення СП з метою знаходження конкретних параметрів ФД, необхідно виконувати нормування коефіцієнтів так, щоб їх сума дорівнювала одиниці.

### Аналіз точності визначення періодичного ФД

Для аналізу точності визначення ФД залежно від діапазону зміни його значень за допомогою запропонованого методу, виконаємо імітаційне моделювання періодичної фазової нестабільності групових сигналів ЦСП з використанням виразу (12) та програмного пакету MatLab. На рис. 1 представлено залежності відносних похибок оцінювання періодичного ФД для трьох значень об'єму вибірок:  $N_1 = 2^{10}$ ;  $N_2 = 2^{12}$ ;  $N_3 = 2^{14}$ .

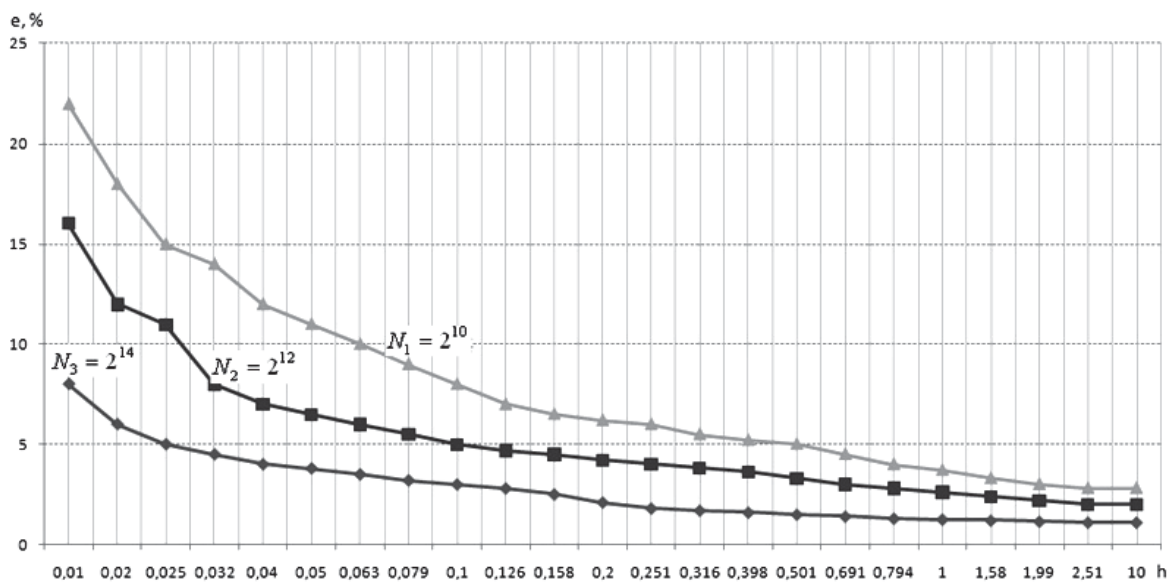


Рис. 1. Залежність відносної похибки оцінювання періодичного ФД від діапазону зміни його значень

Для усталених значень періодичного ФД відносну похибку оцінювання параметрів фазової нестабільності групових сигналів ЦСП можна зменшити за рахунок збільшення об'єму вибірки  $N$  досліджуваної послідовності.

### Висновки

Враховуючи, що комплексний аналіз детермінованого ФД групових сигналів ЦСП базується на дослідженні відмінностей відповідних автокореляційних функцій (АКФ) компонентів загального ФД, запропоновано ефективний метод оцінювання параметрів випадкового ФД в ЦСП за допомогою визначення АКФ ФД та процедури коригування гістограми ПЧІ. Даний метод має високу точність за рахунок зниження дисперсії оцінювання СП ФД та ефективного подавлення бічних паразитних пелюсток сигналу ФД у частотній області.

### Література

1. Бакланов И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2007. – 354 с.

2. Колюшко Т. А. Измерения в цифровых системах связи / Т. А. Колюшко. – К.: ВЕК, 2002. – 320 с.
3. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис – М.: ИД «Вильямс», 2008. – 992 с.
4. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

Надійшла до редакції  
19.5.2012 р.

УДК 612.315:623.611

**К.Л. ГОРЯЩЕНКО**

Хмельницький національний університет

## ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОВІДНИКОВИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

Стаття присвячена дослідженню стану сучасних кабельних ліній зв'язку та силових ліній, що використовуються в народному господарстві. Показано сучасний стан проблеми діагностики провідникових кабельних ліній. Показано фактори, що впливають на надійність ліній.

Article is devoted to research of state of modern cable lines and power lines used in the economy. Is shown the current state of problem diagnosis conductor cable lines. Show the factors affecting the reliability of of lines.

Ключові слова: кабельна лінія, пошкодження, діагностика стану.

**Вступ.** Забезпечення високої надійності кабелів зв'язку та силових кабелів зростає з часом починаючи фактично від моменту виготовлення, прокладання безпосередньо у робочому місці і до моменту виявлення пошкодження. Діагностика технічного стану кабельних ліній є ключовим елементом в програмах управління терміном служби (старінням) кабелів на всіх етапах життєвого циклу.

**Аналіз світових джерел** показує, що однією з актуальних проблем сучасності є надання якісного та стабільного енергетичного постачання до клієнтів. Існує подальша тенденція до збільшення кількості провідникових ліній, що пов'язано зі зростанням кількості споживачів та їх енергетичних витрат. Фактично, забезпечення надання енергетичних та інформаційних послуг реалізується шляхом введення в експлуатацію нових ліній, а також використанням вже наявних відомчих кабельних ліній.

Нажаль, частина вже прокладених ліній знаходиться на межі морального та фізичного зносу. Так, наприклад, на території Puget Sound, Washington (Puget Sound Energy [1]<sup>1</sup>) фіксується щомісячно від 12 до 20 крупних виходів з ладу кабельних ліній живлення, що зривають забезпечення електрозабезпечення одночасно на великій території [8].

Порушення електрозабезпечення призводять до колосальних втрат в промисловості - відсутність електроживлення на підприємстві електронної промисловості на декілька хвилин веде до простою протягом тижня. В результаті, тільки по США аварійне відключення електричної енергії в наслідок виходу з ладу кабельних ліній обходиться по різним оцінкам від \$104 до \$164 мільярдів дол. США [8].

Кабельні мережі відносяться до дороговартісних, відповідальних та з великим часом експлуатації елементів систем зв'язку та електрозабезпечення. Надійне функціонування кабельних ліній особливо важливе для користувачів I та II категорій електроспоживання та зв'язку.

Зростання надійності рівня експлуатаційної надійності кабельних ліній може бути досягнуто за рахунок підвищення рівня технологій виробництва, застосуванням нових ізоляційних матеріалів, нових підходів до конструкції кабелів (рис. 1).



Рис. 1. Різні типи кабелів [11]

<sup>1</sup> Засновано у 1873 році. Надає електричну енергію 1,1 млн користувачам. Площа обслуговування 16,000 км<sup>2</sup>. Загальна довжина ліній складає понад 20920 км