

М.В. Васильківський, О.В. Стальченко

Вінницька філія ВАТ „Укртелеком”,  
Вінницький національний технічний університет**ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖИТЕРУ В СКЛАДНИХ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ****Вступ**

З розвитком синхронних цифрових телекомунікаційних мереж виникла необхідність синхронізації функціонування рознесених в просторі цифрових систем передачі (ЦСП). На даний час в телекомунікаційних мережах з синхронною цифровою ієрархією використовується метод синхронізації, який базується на одночасній синхронізації послідовно з'єднаних ЦСП.

Особливістю функціонування таких складних телекомунікаційних мереж є вплив на них великої кількості випадкових процесів різного типу. При синхронізації декількох послідовно з'єднаних ЦСП спостерігаються фазові флуктуації опорних сигналів, фазові дрижання сигналів генераторів, шуми кіл керування. В телекомунікаційних мережах, які побудовано на основі послідовно синхронізуємих ЦСП до джитеру синхро-сигналів, власних фазових флуктуацій сигналів, які синхронізують генераторне обладнання ЦСП та шумів кіл керування додаються каналні шуми. В результаті, всі ці процеси визначають якість функціонування як окремих ЦСП, так і всієї телекомунікаційної мережевої ієрархії. Слід також відзначити ефект накопичення джитеру при проходженні сигналу телекомунікаційною мережею, яку побудовано на базі послідовно з'єднаних ЦСП. Результатом цього є обмеження довжини лінійного тракту телекомунікаційної мережі при заданій якості сигналу на її виході [1, 2].

Існують різні методи пониження впливу ефекту накопичення. Один з них базується на використанні фільтрувальних ланок (синхрогенераторів підвищеної стабільності). Даний метод є складним і в даному випадку така мережа стає неоднорідною [3].

Другий метод базується на оптимізації структури всієї мережі шляхом коригування параметрів окремих ЦСП. У випадку індивідуальної оптимізації на перший план постає задача дослідження та оптимізації системи фазової синхронізації ЦСП. Задачу мінімізації джитеру сигналу на виході такої мережі можна розв'язати за допомогою моделі випадкових дій. Оцінювання параметрів джитеру дає змогу виявити причини його виникнення. Тому своєчасне виявлення тенденцій, що ведуть до зниження якості передачі в цифровому тракті, набуває особливого значення.

Метою даної роботи є розробка методу математичного моделювання комбінованого джитеру вихідного сигналу ЦСП в складних телекомунікаційних мережах, що дає змогу оцінити вплив джитеру на складний цифровий тракт телекомунікаційної мережі та оптимізувати структуру мережі для підвищення якості функціонування.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- дослідити вплив джитеру на складний цифровий тракт телекомунікаційної мережі;
- розробити модифікований метод дослідження впливу джитеру на якість функціонування складних телекомунікаційних мереж.

**Дослідження впливу джитеру на складний цифровий тракт телекомунікаційної мережі**

Для даного дослідження введено модель складного цифрового тракту. Складний цифровий тракт розглядається як послідовність перетворювачів сигналу – регенераторів чи мультиплексорів/ демультиплексорів довільного типу. Кожен з цих перетворювачів діє як генератор фазових спотворень та лінійна ланка типу фільтру нижніх частот (ФНЧ) з передатною характеристикою  $T_i(p)$ . Передатну характеристику складного цифрового тракту для фазових спотворень можна представити виразом:

$$T(p) = \prod_{i=1}^n T_i(p), \quad (1)$$

де  $n$  – загальна кількість елементів у тракті;

$T_i(p)$  – передатна характеристика  $i$ -го елемента.

Результуючий фазовий шум на виході цифрового тракту представлено у вигляді суми випадкових величин:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n a_i x_i(t), \quad t \in T, \quad (2)$$

де  $x_i(t)$  – власний фазовий шум  $i$ -го елемента тракту;

$a_i$  – ваговий коефіцієнт – детермінована величина, що в узагальненому вигляді враховує внесок кожного доданку в суму.

З точки зору класифікації за типом областей існування та зміни випадкових функцій

фазові спотворення представляють неперервну випадкову послідовність, тобто неперервну множину можливих значень фазових відхилень, визначену на дискретній множині значень аргументу  $t$ .

При розгляді фазових спотворень в часовій області розрізняють випадкові шуми та детерміновані (систематичні) складові (наприклад, постійний зсув і лінійний дрейф частоти). Виходячи з цього, фазові спотворення в загальному випадку можуть бути описані за допомогою моделей нестационарних випадкових процесів, тобто представлені сумою або добутком випадкового процесу та детермінованої функції.

Враховуючи те, що в обраній математичній моделі фазові спотворення на виході тракту розглядаються як сума власних фазових шумів елементів цифрового тракту, запропоновано використати для опису фазових спотворень модель адитивного нестационарного випадкового процесу. При цьому розглядається випадковий процес власних фазових спотворень (зокрема, процес зміни помилки часового інтервалу TIE  $x(t)$ ) як сума стаціонарного випадкового процесу  $\xi(t)$  та детермінованої функції  $\phi(t)$ .

Слід також відмітити, що навіть для стандартних змінних, які використовуються для опису систем синхронізації, можуть виникнути серйозні ускладнення при побудові моделей для випадку декількох випадкових дій. Це призводить до необхідності нестандартних підходів до використання апарату випадкових процесів, в першу чергу для побудови самої моделі випадкового процесу у формі векторного рівняння, а потім і на етапі розв'язання даного рівняння.

Аналіз впливу комбінованих вхідних процесів на систему фазової синхронізації можна виконати за допомогою моделі, яка вказує на наявність джитеру тактових сигналів опорного генератора та генератора. На рис. 1 зображено функціональну схему дискретної системи фазової синхронізації при наявності фазових шумів, а також зовнішнього широкопasmового впливу  $n$ , який перерахований на вихід фазового детектора.

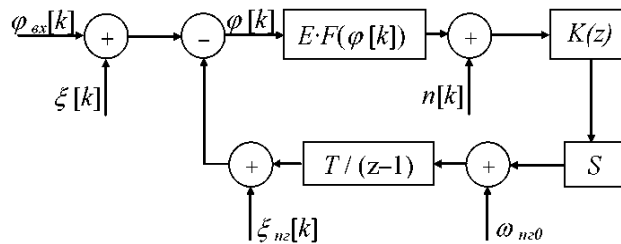


Рис. 1. Функціональна схема дискретної системи фазової синхронізації при наявності комбінованих флуктуаційних дій

### Модифікований метод дослідження впливу джитеру на якість функціонування складних телекомунікаційних мереж

Параметр якості послуг визначається ймовірністю виникнення помилок та періодичністю просковзувань синхросигналу, дія яких аналогічна до дії пакетної завади. Вплив семантичної прозорості на якість послуг визначається структурою, форматом послуги та ймовірністю виправлення помилок. Для послуг реального часу (телефонія і т.і.) допустимі втрати частини інформації, при цьому  $R$ -фактор визначається:

$$R_n(P_{BER}) = \left[ 1 - \prod_{d=1}^3 P_{\text{пом}}^{(d)} \right] \frac{V_n}{L_i} \left[ L_n \right] + \left( 1 - \frac{V_n}{L_i} [L_i P_{TP}] \right), \quad (3)$$

де  $P_{\text{пом}}^{(d)}$  – ймовірність виникнення ефекту багатократного спотворення;

$L_i$  та  $L_n$  – довжина інформаційної частини пакету та заголовку;

$V_n$  – об'єм послуги в бітах;

$P_{TP}$  – ймовірність виникнення помилки в тракці передавання.

Вплив якості синхронізації на якість послуг визначається періодичністю виникнення просковзувань:

$$t_n = \left( \left( \frac{-2y_0 E \pm 24K_b (P_{\text{кн}} + P_c) \pm \sqrt{(4y_0^2 E^2 + 8DEN(t)T_{\text{ц}})}}{2DE} \right) \Delta f_p + J_R(N) + J_S(N) \right), \quad (4)$$

де  $y_0$  – початковий зсув частоти;

$E$  – ємність еластичного буфера;

$K_b$  – кількість вирівнювань на цикл передавання;

$P_{\text{кн}}$  та  $P_c$  – об'єм полів корисного навантаження та полів секційних заголовків;

$D$  – дрейф частоти;

$T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу передавання;

$N(t)$  – величина розходження початкової і поточної частот;

$J_R (M)$  та  $J_S (M)$  – середньоквадратичні значення випадкового та систематичного джитера при проходженні синхросигналу через  $N$  транзитних вузлів.

$\Delta f_p$  – параметр, що враховує умови поширення синхросигналу між елементами мережі.

На затримку, джитер та опосередковані втрати пакетів впливає також метод маршрутизації та спосіб передавання сигнальних пакетів для встановлення з'єднання. Протокол транспортного рівня ТСП при передаванні даних користувачів відповідає за гарантовану доставку пакетів з'єднанням, у яких виникають спотворення. Як наслідок, відбувається повторне передавання раніше переданих пакетів – джитер ТСП з'єднання, що веде до зростання часу затримки на отримання цілісної послуги та неефективного використання пропускної спроможності тракту передавання. Середнє абсолютне значення джитера ТСП з'єднання дорівнює:

$$|M\{J_{TCP}\}| = \frac{K_1(p)(2T_{лз} + T_{обр}) \left( \sum_{i=2^j}^{j_{max}} iT_0 + jT_c \right) + K_2(p)RTT(M\{u\} + M\{v\})}{K_2(p)(M\{u\} + M\{v\})}, \quad (5)$$

де  $K_1(p)$  та  $K_2(p)$  – параметри, які показують взаємозв'язок між відправленою та втраченою кількістю ТСП сегментів при ймовірності втрат  $p$  в режимах повільного старту та уникнення перевантаження;

$T_{лз}$  – час затримки лінії зв'язку;

$T_{обр}$  – час формування відповіді про отримання ТСП-сегменту;

$T_0$  – час тайм-ауту,  $i = 2^j$  та  $j = 1, 2, \dots, 6$  – визначає кількість спроб повторного передавання;

$T_c$  – час передавання втраченого ТСП-сегменту;

$RTT$  – час, що дорівнює 1,5 періоду з'єднання ТСП;

$M\{u\}$  та  $M\{v\}$  – середній час використання розміру вікна сегментів ТСП в режимах повільного старту та уникнення перевантаження.

ТСП-протокол функціонує в тісній взаємодії з класифікатором, маркером і вимірювачем трафіку, які представляються вхідними буферами типу FIFO, алгоритмам Token Bucket і RED – алгоритмом довільного раннього виявлення перевантаження або їх модифікаціями. Затримка та джитер, що вносяться при сумісній роботі даних елементів вузла в режимі скидання визначаються як:

$$T_3 = \frac{K_{II}(t_{i-1})}{C_p - \frac{1}{R_i}} (t_i - t) \left( b_t(t_i - t) b_{FIFO}(t_i - t) - \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_p} \right) + RTT \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_p} \quad (6)$$

та

$$J = \sum_{i=1}^n T_{лз} + RTT + |M\{J_{TCP}\}| \quad \text{при} \quad K_{II}(t_i) > b_{FIFO}, \quad (7)$$

де  $\tau$  – час тривалості пакету;

$M_p$  – максимальний розмір пачки пакетів;

$N$  – загальна кількість переданих пакетів всіх абонентів;

$K_{II}$  – кількість пакетів, які не були обслужені у попередньому циклі ( $t_{i-1}$ );

$C_p$  – пікова швидкість надходження пакетів;

$\rho_i$  – інтенсивність надходження жетонів протягом  $i$ -того раунду алгоритму Token Bucket;

$b_{FIFO}$  – ємність вхідного буфера;

$m_i$  – кількість пакетів, що надійшла від одного абонента.

Ймовірність втрати пакетів в режимі скидання, визначається роботою алгоритму RED. Значення джитера в цьому випадку є параметром, що формується алгоритмом обслуговування черг внаслідок забезпечення необхідних часових рамок надання послуг. Згідно концепцій якості диференційованого та інтегрованого обслуговування практичне застосування знайшли алгоритми обслуговування черг з абсолютним та відносним пріоритетом, максимальне значення джитера яких дорівнює:

$$|J_{\Sigma max}| = \left| \sum_{j=1}^{j_{max}} \left( \sum_{i=1}^N I_i w_i \right)_j T_{затр\Sigma_j} t_{п_j} + \sum_{j=1}^{j-1} T_{затр\Sigma_j} p_{втр\Sigma_j} (w > T + t) \right|, \quad (8)$$

де  $p_{\text{втр}\Sigma_j}(w > T + t)$  – ймовірність того, що час зайняття системи пакетом довжиною  $\tau_{\Pi}$  пріоритету  $j$  більше допустимого;

$T_{\text{затр}\Sigma_j}$  – загальна затримка пакетів  $j$ -го пріоритету;

$\omega_i$  – ваговий коефіцієнт, що визначає пріоритет обслуговування буфера;

$\lambda_i$  – інтенсивність надходження пакетів в  $i$ -й буфер.

Обмежена довжина черг та висока інтенсивність надходження пакетів (80 % від пропускної здатності), призводить до зростання часу затримки, виникнення пікових значень джитера та втрат пакетів. Наслідком перевищення допустимих часових параметрів або втрат пакетів вище допустимого є розрив з'єднання з певною кількістю абонентів. Наслідок останнього є зниження якості обслуговування абонентів.

Час затримки та джитер сигнальних пакетів визначаються значенням завантаженості ланок сигналізації тракту передавання та ймовірністю виникнення помилок:

$$T_{\Sigma_{\text{ЗСО}}} = T_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{бп})} + T_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{зп})}, \quad \text{та} \quad J_{\Sigma_{\text{ЗСО}}} = J_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{бп})} + J_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{зп})}, \quad (9)$$

де  $T_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{бп})}$  та  $T_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{зп})}$  – загальний час затримки сигнальних пакетів при відсутності та наявності помилок;

$J_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{бп})}$  та  $J_{\Sigma_{\text{ЗСО}}}^{(\text{зп})}$  – максимальне абсолютне значення джитера сигнальних пакетів при відсутності та наявності помилок.

Завантаження тракту передавання та ймовірність виникнення помилок є основними чинниками впливу на час затримки та джитер, тому вони визначають якість послуг як на мережевому, так і на транспортному рівнях.

### Висновки

1. Аналіз результатів математичного моделювання комбінованого джитера в складних телекомунікаційних мережах дає можливість забезпечити комплексний підхід до оцінювання якості роботи телекомунікаційного обладнання, що в свою чергу забезпечить ефективний контроль функціонування мереж зв'язку.

2. Запропоновано метод дослідження джитера в телекомунікаційних мережах, який може використовуватись для довільної розрядності мережі та на різних швидкостях передавання інформації.

### Література

1. Бакланов И.Г. SDH-NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей – М.: Метротек, 2006. – 736 с.
2. Бакланов И.Г. NGN: принципы построения и организации – М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
3. Колюшко Т.А. Измерения в цифровых системах связи. – К.: ВЕК, 2002. – 320 с.

Надійшла до редакції  
16.6.2008 р.

УДК 621

М.Н. Сурду, А.С. Ахмадов, А.А. Ахмадов, М.Я. Мухаровский

Вінницький національний технічний університет

## АНАЛОГОВЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ ФАЗЫ И СПОСОБ ЕГО АВТОКАЛИБРОВКИ

Регулировка фазы синусоидального сигнала используется в процессе измерения разнообразных физических величин, начиная от измерения фазы и (или) мощности сигнала и до измерения параметров элементов цепей.

Известно значительное число способов построения аналоговых фазовращателей, в том числе, и фазовращателей с регулировкой фазы сигнала (5,6,7,8,9). К сожалению, известные способы построения регулируемых фазовращателей и их схемотехническая реализация не позволяют получить высокую точность регулировки фазы.

В последние годы широкое распространение получают цифровые фазовращатели, в которых формирование самого синусоидального сигнала и изменение его фазы производится с применением дискретных элементов (3,4). Такие фазовращатели стали использоваться как при