

DOI: 10.18372/2310-5461.43.13981

УДК 621.372

О. А. Ладигіна, аспірант

Центральноукраїнський національний технічний університет

orcid.org/0000-0003-2886-2238

e-mail: ladyginaoa@ukr.net;

ОПТИМАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТРАФІКУ

Вступ

У гетерогенних комп'ютерних мережах інформаційний сигнал може передаватися шляхом модуляції одного або кількох параметрів гармонічного коливання і зі збільшенням об'ємів інформації з'являються нові різновиди комбінованої модуляції [1].

Різноманітні складові гетерогенних комп'ютерних мереж також впливають на показники якості формування, обробки і вимірювання параметрів трафіку, що може приводити до його викривлення.

Тобто прийом та обробка нестаціонарного трафіку проводиться на фоні значного рівня завад (природних/штучних), які маскують інформативні ознаки трафіку і в цілому спотворюють його параметри. Дані також можуть спотворюватися внаслідок втрати деяких відліків нестаціонарного трафіку в каналі передавання або внаслідок низького співвідношення сигнал/шум [2].

Таким чином, у процесі обробки зашумленого нестаціонарного трафіку в реальних умовах постійного супроводження і значного співвідношення сигнал/шум є актуальним розв'язання задач адекватного виявлення корисного інформаційного сигналу і визначення гармонійних складових трафіку в його об'ємі у заданому діапазоні частот.

Постановка проблеми та огляд останніх досліджень і публікацій

Серед багатьох методів визначення трафіку на фоні завад інтерес представляють оптимальні методи, що задовольняють деяким вихідним вимогам критерію оптимальності і ці, що реалізують мінімум середнього ризику [3].

В умовах параметричної і непараметричної невизначеності достатню ефективність дають методи, які базуються на критеріях непараметричної статистики і забезпечують постійне значення ймовірності.

Крім цього, одним зі шляхів подолання апріорної невизначеності є застосування принципу адаптації, що ґрунтується на одержанні відомостей про розподіли на базі відомих опорних реалізацій шуму [4].

Традиційні методи визначення спектрів інформаційних сигналів засновані на використанні розкладання функцій на ряди Фур'є або уявлення їх інтегралами Фур'є із застосуванням системи базисних ортогональних функцій. При цьому одержуються спектри сигналів є значно надмірними для опису коротких сигналів. А для деяких сигналів вони можуть бути окремими випадками нового спектру, розрахованого для будь-якої початкової тривалості. Якщо існує гармонійний спектр, то він є періодичним і повторне застосування перетворення Фур'є виявляють піки, що повторюються з певним періодом.

Метою статті є експериментальне підтвердження методу оптимального оцінювання гармонійних складових нестаціонарного трафіку, зокрема в заданому діапазоні частот, за допомогою апроксимації коротких процесів неортогональними гармоніками. Тобто суть оптимального оцінювання є визначення оптимальної оцінки істинного значення трафіку по викривленій завадою реалізації трафіку.

Виклад основного матеріалу

На початку ітераційної процедури оптимального оцінювання, розробленої у праці [5] і ускладненої у праці [6], реалізацію трафіку, що отримують на виході сніферу, використовують для наближеного визначення періоду сигналу. Період визначається через різницю моментів часу, що спостерігаються при однакових сусідніх значеннях трафіку. Кругова частота визначається по відомій формулі:

$$\omega_1 = 2\pi / T. \quad (1)$$

Після визначення кругової частоти (1) організовують першу ітераційну процедуру визначення фази. Отримані оптимальні оцінки частоти і фази використовують в формулі (2) для визначення оптимальної оцінки амплітуди.

$$A_{1opt} = \frac{\sum [Z(h, n_0, k, t) \cos(\omega_1 t - \phi_1)]}{\sum_t \cos(\omega_1 t - \phi_1)^2}. \quad (2)$$

Цю ітераційну процедуру оцінювання параметрів основної гармоніки періодичного трафіку

завершують тоді, коли всі три параметри (амплітуда, частота, фаза) визначаються з наперед заданою кількістю знаків після крапки. Для прикладу оцінювання фази на початку ітераційного процесу задається розширений інтервал зміни фаз $[-\pi/2; \pi/2]$ при відношеннях сигнал/шум $h_0 = 81; 162; 243$. На підставі даних рис. 1 інтервал зміни фаз звужується до значень $[0,512 - 0,531]$, зручних для визначення мінімуму.

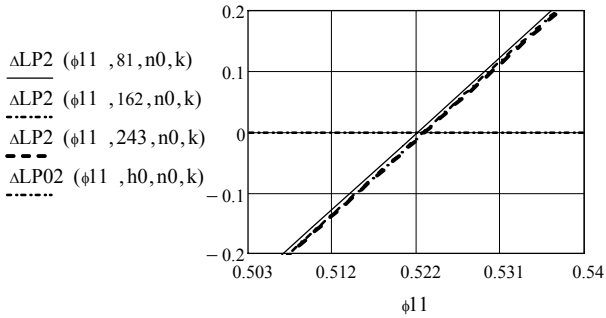


Рис. 1. Графіки зміни оцінки фази за різних значень відношення сигнал/шум

Оптимальна оцінка фази обчислюється системою рівнянь (3):

$$\sum_t [Z(h, n_0, k, t) - X(A_1, \omega_1, \phi_1, t)] \sin(\omega_1 t - \phi_1) = 0, \quad (3)$$

за якою потрібно отримати нев'язку рівняння (4):

$$\Delta LP2(\phi_1, h, n_0, k) = LP2(\phi_1) - RP2(\phi_1, h, n_0, k), \quad (4)$$

де $LP2(\phi_1) = \sum_t X(A_1, \omega_1, \phi_1, t) \sin(\omega_1 t - \phi_1)$ — ліва частина рівняння (3);

$RP2(\phi_1, h, n_0, k) = \sum_t Z(h, n_0, k, t) \sin(\phi_1 t - \phi_1)$ — права частина рівняння (3).

При відношенні сигнал/шум $h_0 = 81$, коефіцієнтів $n_0 = 29, k = 18$ значення нев'язки набувають певних значень відповідно з оцінками фаз (табл. 1).

Таблиця 1

Інтервал зміни оцінки фази [0.512–0.531]

φ12	ΔLR2(φ12, 81, 29, 18)
0,512	-0,31
0,513	-0,117
0,514	-0,104
0,515	-0,09
0,516	-0,077
0,517	-0,063
0,518	-0,05
0,519	-0,036
0,52	-0,023
0,521	-9,012·10 ⁻³
0,522	4,531·10 ⁻³
0,523	0,018
0,524	0,032
0,525	0,045
0,526	0,059
...	...

Із табл. 1 видно, що нев'язка «проходить через нуль» в інтервалі фаз $[0.521 - 0.522]$ — у ньому нев'язка змінює знак. Тому для другої ітерації саме цей інтервал обирається для подальшого опрацювання.

На наступній ітерації поточні значення фази задаються вже з точністю до 4 знаку:

$$\phi_{13} = 0,5211, 0,5212, 0,5219.$$

Аналогічно визначається наступний зменшений інтервал зміни фаз $\phi_{14} = [0,52161 - 0,52169]$ (табл. 3) із зазначенням 5 знаків після крапки на підставі даних табл. 2.

Таблиця 2

Інтервал зміни оцінки фази [0,5211–0,5219]

φ13	ΔLR2(φ13, h0, n0, k)
0,5211	-7,658·10 ⁻³
0,5212	-6,304·10 ⁻³
0,5213	-4,949·10 ⁻³
0,5214	-3,595·10 ⁻³
0,5215	-2,241·10 ⁻³
0,5216	-8,863·10 ⁻⁴
0,5217	4,68·10 ⁻⁴
0,5218	7,822·10 ⁻³
0,5219	3,177·10 ⁻³

Таблиця 3

Інтервал зміни оцінки фази [0,52161–0,52169]

φ14	ΔLR2(φ14, h0, n0, k)
0,52161	-7,509·10 ⁻⁴
0,52162	-6,155·10 ⁻⁴
0,52163	-4,8·10 ⁻⁴
0,52164	-3,446·10 ⁻⁴
0,52165	-2,091·10 ⁻⁴
0,52166	-7,371·10 ⁻⁵
0,52167	6,173·10 ⁻⁵
0,52168	1,972·10 ⁻⁴
0,52169	3,326·10 ⁻⁴

Із табл. 3 випливають нові значення інтервалу $\phi_{15} = [0,521661 - 0,521669]$ для подальшої ітерації (табл. 4), яка є останньою, тому що наперед задана до 6 знаків після крапки точність обчислення фази досягнута.

Таблиця 4

Інтервал зміни оцінки фази [0,521661–0,521669]

φ15	ΔLR2(φ15, h0, n0, k)
0,521661	-6,017·10 ⁻⁵
0,521662	-4,662·10 ⁻⁵
0,521663	-3,308·10 ⁻⁵
0,521664	-1,954·10 ⁻⁵
0,521665	-5,992·10 ⁻⁶
0,521666	-7,551·10 ⁻⁶
0,521667	7,551·10 ⁻⁶
0,521668	3,464·10 ⁻⁵
0,521669	4,818·10 ⁻⁵

Оптимальна оцінка фази визначається як середнє значення інтервалу оцінювання:

$$\phi_{101} = (0,521665 + 0,521666) / 2 = 0,5216655.$$

Відносна погрішність фази:

$$\delta\phi_0 = (0,521666 - 0,521665) / 0,5216655 = 1,917 \cdot 10^{-6}$$

Середнє значення нев'язки:

$$\Delta LP2_{00} = (7,551 - (-5,992)) \cdot 10^{-6} / 2 = 6,771 \cdot 10^{-6}$$

Таким чином, оптимальнє значення фази при вказаних вхідних даних визначається з достатнє високою точністю до 6 знаків після крапки.

Оцінка є зміщеною із-за дії завади. Показник відносної зміщеності оцінки

$$\delta\phi_{01} = (\phi_{101} - \phi_1) / \phi_1 = -0,369\%.$$

Аналогічно здійснюється пошук оптимальної оцінки частоти сигналу. Критерій оптимізації оцінки частоти ω_1 має вигляд:

$$S_{01}(\omega_1, h_0) = \sum_{i1} Z_2[(\omega_1 l, h_0, n_0, k, t_1) - A_1 \cos(\omega_1 l t_1 - \phi_1)]^2. \quad (5)$$

На рис. 2 зображені графіки залежності критерію оптимізації від частоти за різних значень відношення сигнал/шум $h_0 = 81; 162; 243$.

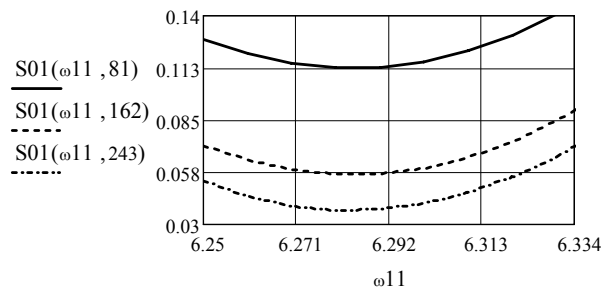


Рис. 2. Графіки зміни критерію оптимізації оцінки частоти за різних значень відношення сигнал/шум

Графіки показують існування мінімумів, що дозволяють розв'язувати численним графоаналітичним ітераційним методом [5] рівняння оптимізації

$$\Delta LP1(\omega_1, h, n_0, k) = LP1(\omega_1) - RP1(\omega_1, h, n_0, k). \quad (6)$$

На рис. 3 представлені графіки залежності нев'язки рівняння оптимізації оцінки частоти (6) за різних значень відношення сигнал/шум.

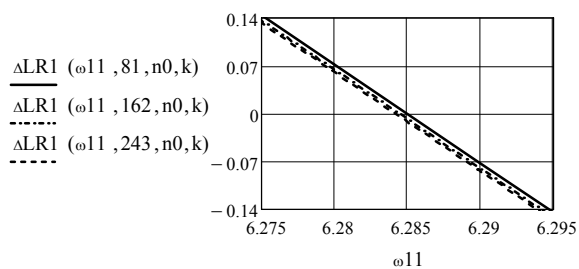


Рис. 3. Графіки залежності нев'язки рівняння оптимізації оцінки частоти за різних значень відношення сигнал/шум

Ці графіки показують, що оптимальна оцінка частоти знаходиться в інтервалі [6.28–6.29], тому на початку ітераційного процесу задається поточне значення частоти ω_{12} в цьому інтервалі.

Аналогічно, як це було показано в деталях раніше при визначенні оптимальної оцінки фази, обираються наступні поточні інтервали ω_{13}, ω_{14} з побудовою табл. 5–7.

Таблиця 5

Інтервал зміни оцінки частоти [6.281–6.289]

ω_{12}	$\Delta LR1(\omega_{12}, 81, 29, 18)$
6,281	0,058
6,282	0,043
6,283	0,029
6,284	0,014
6,285	$1,053 \cdot 10^{-5}$
6,286	-0,014
6,287	-0,029
6,288	-0,043
6,289	-0,058

Таблиця 6

Інтервал зміни оцінки частоти [6.2848–6.2853]

ω_{13}	$\Delta LR1(\omega_{13}, 81, 29, 18)$
6,2848	$2,895 \cdot 10^{-3}$
6,2849	$1,453 \cdot 10^{-3}$
6,285	$1,053 \cdot 10^{-5}$
6,2851	$-1,432 \cdot 10^{-3}$
6,2852	$-2,874 \cdot 10^{-3}$
6,2853	$-4,316 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 7

Інтервал зміни оцінки частоти [6.2850006–6.2850009]

ω_{14}	$\Delta LR1(\omega_{14}, 81, 29, 18)$
6,2850006	$1,874 \cdot 10^{-6}$
6,2850007	$4,321 \cdot 10^{-7}$
6,2850008	$-1,01 \cdot 10^{-6}$
6,2850009	$-2,452 \cdot 10^{-6}$

Оптимальна оцінка частоти:

$$\omega_{101} = (6,2850007 + 6,2850008) / 2 = 6,28500075.$$

Відносна погрішність оптимальної оцінки частоти:

$$\delta\omega_1 = (6,2850008 - 6,2850007) / 6,28500075 = 1,591 \cdot 10^{-8}.$$

Середнє значення нев'язки рівняння оптимізації частоти:

$$\Delta LP_{100} = (4,321 - (-0,101)) \cdot 10^{-7} / 2 = 2,211 \cdot 10^{-7}.$$

Таким чином, оптимальнє значення частоти визначено з високою наперед заданою точністю до 8 знаків після крапки.

Оцінка є зміщеною із-за дії завади. Зміщення тим більше, чим менше відношення сигнал/шум.

Показник відносної зміщеності оцінки:

$$\delta\omega_{01} = (\omega_{101} - \omega_1) / \omega_1 = 0,029\% .$$

Оптимальні оцінки всіх трьох параметрів, визначені з точністю до 6–8 знаків після крапки:

- амплітуда: $A_{101}(81, 29, 18) = 0,727148$;
- фаза: $\phi_{101} = 0,5216655$;
- частота: $\omega_{101} = 6,28500075$.

Оптимальна оцінка періодичного трафіку в цілому (з урахуванням усіх трьох оптимальних оцінок параметрів):

$$X_{101}(h_0, n_0, k, t_1) = A_{101}(h_0, n_0, k, \cos(\omega_{101}t_1 - \phi_{101})) . (7)$$

Абсолютна та відносна погрішності цієї оптимальної оцінки:

$$\Delta X_{101}(h_0, n_0, k, t_1) = X_{101}(h_0, n_0, k, t_1) - X(t_1); \quad (8)$$

$$\delta X_{101}(h_0, n_0, k, t_1) = [X_{101}(h_0, n_0, k, t_1) - X(t_1)] / X(t_1). \quad (9)$$

На рис. 4–5 проілюстровані погрішності у вигляді графіків.

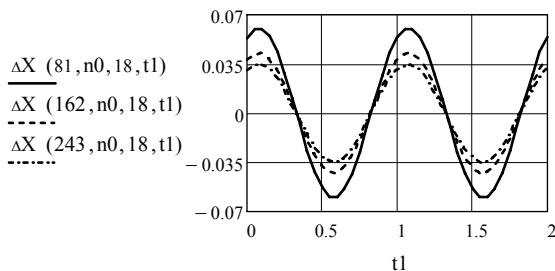


Рис. 4. Графіки залежностей від часу абсолютних погрішностей оптимального оцінювання періодичного трафіку за різних відношень сигнал/шум

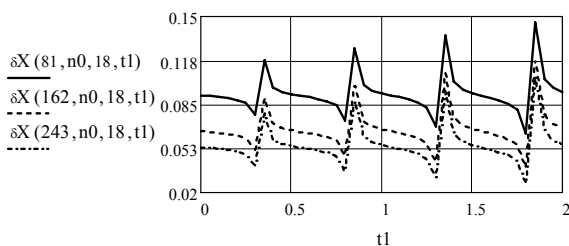


Рис. 5. Графіки залежностей від часу відносних погрішностей оптимального оцінювання періодичного трафіку за різних відношень сигнал/шум

Отримано всі необхідні співвідношення для оптимального оцінювання трьох параметрів основної гармоніки періодичного трафіку за наявності завад. Таким чином, процедура і алгоритм оптимального оцінювання виконуються чисельними методами вирішення нелінійних рівнянь оптимізації. Вони дозволяють оцінити з наперед заданою точністю оптимальні оцінки і погрішностей цих оцінок, що виражені через відносну довжину інтервальних оцінок і нев'язки рівнянь оптимізації.

Висновки

Приклади методу оптимального оцінювання гармонійних складових нестационарного трафіку в заданому діапазоні частот наглядно продемонстрували можливість побудувати перетворення Фур'є для зашумленого періодичного сигналу.

Задачу спектрального аналізу періодичного сигналу було узагальнено на випадок дії завади при різних значеннях сигнал/шум, що дало змогу виконати верифікацію гармонійних складових періодичного трафіка на фоні завади та оптимальне за методом найменших квадратів оцінювання параметрів основної гармоніки трафіку (амплітуди, частоти і фази) по результатам моніторингу огинаючої трафіку на протязі декількох періодів.

Цей метод у перспективі може дозволити досліджувати вплив всіх параметрів обсягу завади на максимальну кількість інформації, яку сигнал передає. Для цього отримані результати поширюються на модульовані сигнали і простір Гільберта.

ЛІТЕРАТУРА

1. Політанський Л. Ф., Кушнір М. Я., Політанський Р. Л., Еліяшів О. М. Багатокористувальницька система зв'язку з використанням хаотичної частотної модуляції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010.– № 1/5(43). С. 44–47.
2. Палагін В. В. Нелінійні алгоритми виявлення радіосигналів на тлі адитивно-мультиплікативних негаусівських завад. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. Т. 6, № 11(60). С. 23–28.
3. Воробйов С. М. Ефективне виявлення детермінованих сигналів: Монографія. СПб.: СПбГУАП, 2003. 139 с.
4. Деденок В. П., Певцов Г. В., Карлов Д. В., Резников Ю. В., Чернявський О. Ю. Застосування інформаційного підходу до синтезу непараметричних вирішальних правил виявлення та оцінювання параметрів сигналу на фоні завад з невідомим законом розподілу. *Системи обробки інформації*. 2017. №5(151). С. 5–15.
5. Ладигіна О. А. Спосіб виявлення скритої шумом періодичності трафіку. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. №2(50). С. 86–90.
6. Ігнатов В. О., Ладигіна О. А. Визначення та дослідження спектру періодичного трафіку. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. №3(51). С. 61–66.
7. Ladygina O. A. Optimal Identification of the Periodic Traffic Structure in Heterogeneous Computer Networks Distorted by Noise. *XIV International Scientific Conference "AVIA-2019"*, North America, April 23-25. 2019. С. 8.39–8.41.

Ладигіна О. А.

ОПТИМАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТРАФІКУ

Мета роботи полягає в експериментальному підтвердженні методу оптимального оцінювання гармонійних складових нестационарного трафіку в заданому діапазоні частот. Тобто суть оптимального оцінювання є визначення оптимальної оцінки істинного значення трафіку по викривленій завадою реалізації трафіку. Якщо існує гармонійний спектр, то він є періодичним і повторне застосування перетворення Фур'є виявляють піки, що повторюються з певним періодом. Тому доцільно припустити, що спостерігається така реалізація трафіку, яка має довжину не менше двох, трьох періодів трафіку, що дозволяє оптимально оцінювати його параметри. Статистичні задачі оптимального оцінювання параметрів сигналів на фоні завади вирішують за допомогою критерію максимальної правдоподібності у припущенні, що оцінки мають гаусівський розподіл. Якщо вважати у першому наближенні справедливим це припущення, можна в ролі критерію оптимальності обирати критерій методу найменших квадратів. Для розв'язання рівнянь оптимізації частоти і фази розроблено численний графоаналітичний ітераційний метод, що дозволяє отримувати оптимальні оцінки частоти і фази з наперед заданою точністю, а також і погрешностей цих оцінок, що виражені через відносну довжину інтервальных оцінок і нев'язки рівнянь оптимізації. Задачу спектрального аналізу періодичного сигналу було узагальнено на випадок дії завади при різних значеннях сигнал/шум, що дало змогу виконати верифікацію гармонійних складових періодичного трафіку на фоні завади та оптимальне за методом найменших квадратів оцінювання параметрів основної гармоніки трафіку (амплітуди, частоти і фази) по результатам моніторингу огинаючої трафіку на протязі декількох періодів. Цей метод в перспективі може дозволити досліджувати вплив всіх параметрів обсягу завади на максимальну кількість інформації, яку сигнал передає. Створений розрахунковий пакет визначення оптимальних оцінок гармонійних складових періодичного трафіку дозволяє виконувати різноманітні масштабні експерименти по дослідженню періодичного трафіку за результатами натурних спостережень нестационарного трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах.

Ключові слова: нестационарний трафік; періодичність трафіку; гармонійна складова трафіку; численний графоаналітичний ітераційний метод; оптимальне оцінювання параметрів трафіку.

Ladygina O.A.

OPTIMUM EVALUATION OF HARMONIOUS COMPONENTS OF NON-STATIONARY TRAFFIC

The purpose of the work is experimental confirmation of the method for optimal estimation of harmonic components of non-stationary traffic in a given frequency range. That is, the essence of optimal estimation is to determine the optimal estimate of the true value of the traffic from the distorted interference of the traffic realization. If there is a harmonious spectrum, then it is periodic and repeated application of the Fourier transform detects peaks that repeat with a certain period. Therefore, it is advisable to assume that such an implementation of traffic is observed that has a length of at least two, three periods, which allows optimal estimation of its parameters. The statistical problems of optimal estimation of signal parameters against a background of interference are solved using the maximum likelihood criterion under the assumption that the estimates must have a Gaussian distribution. If we consider this assumption as a first approximation, then we can choose the least squares criterion as an optimality criterion. To solve the equations of frequency and phase optimization, a numerical graph-analytical iterative method has been developed that allows one to obtain optimal estimates of the frequency and phase with a predetermined accuracy, as well as the errors of these estimates expressed in terms of the relative length of the interval estimates and residuals of the optimization equations. The task of spectral analysis of a periodic signal was generalized to the case of interference at different signal-to-noise values, which made it possible to verify the harmonic components of periodic traffic against the background of interference and to estimate the parameters of the main harmonic of the traffic (amplitude, frequency, and phase) by the least-square method based on monitoring results traffic envelope over several periods. This method in the future may allow us to study the effect of all parameters in the full amount of interference on the maximum amount of information that a signal transmits. The created calculation package for determining the optimal estimates of the harmonic components of periodic traffic allows performing various large-scale experiments to study periodic traffic based on the results of field observations of unsteady traffic in heterogeneous computer networks.

Keywords: non-stationary traffic; traffic frequency; harmonic component of traffic; numerous graph-analytical iterative method; optimal estimation of traffic parameters.

Ладыгина О.А.

ОПТИМАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТРАФИКА

Целью работы является экспериментальное подтверждение метода оптимального оценивания гармонических составляющих нестационарного трафика в заданном диапазоне частот. То есть суть оптимального оценивания является определение оптимальной оценки истинного значения трафика по искривленной помехой реализации трафика. Если существует гармоничный спектр, то он является периодическим и повторное применение преобразования Фурье обнаруживает пики, повторяющиеся с определенным периодом. Поэтому целесообразно предположить, что наблюдается такая реализация трафика, которая имеет длину не менее двух, трех периодов, что позволяет оптимально оценивать его параметры. Статистические задачи оптимального оценивания параметров сигналов на фоне помехи решают с помощью критерия максимального правдоподобия в предположении, что оценки должны иметь гауссовское распределение. Если считать в первом приближении справедливым это предположение, то можно в качестве критерия оптимальности выбирать критерий метода наименьших квадратов. Для решения уравнений оптимизации частоты и фазы разработан численный графоаналитический итерационный метод, позволяющий получать оптимальные оценки частоты и фазы с заранее заданной точностью, а также и погрешностей этих оценок, выраженных через относительную длину интервальных оценок и невязки уравнений оптимизации. Задача спектрального анализа периодического сигнала была обобщена на случай действия помехи при различных значениях сигнал/шум, что позволило выполнить верификацию гармонических составляющих периодического трафика на фоне помехи и оптимальное по методу наименьших квадратов оценивание параметров основной гармоники трафика (амплитуды, частоты и фазы) по результатам мониторинга огибающей трафика на протяжении нескольких периодов. Этот метод в перспективе может позволить исследовать влияние всех параметров в полном объеме помехи на максимальное количество информации, которую сигнал передает. Созданный расчетный пакет определения оптимальных оценок гармонических составляющих периодического трафика позволяет выполнять различные масштабные эксперименты по исследованию периодического трафика по результатам натурных наблюдений нестационарного трафика в гетерогенных компьютерных сетях.

Ключевые слова: нестационарный трафик; периодичность трафика; гармоническая составляющая трафика; многочисленный графоаналитический итерационный метод; оптимальное оценивание параметров трафика.

Стаття надійшла до редакції 02.09.2019 р.
Прийнято до друку 07.10.2019 р.