

УДК 621.39:519.876.5

Л. Н. БЕРКМАН, д-р техн. наук, професор;

Л. О. КОМАРОВА, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник;

О. А. КІЛЬМЕНІНОВ, здобувач;

В. Б. ТОЛУБКО, д-р техн. наук, професор,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ ОТРИМУВАНОЇ УПРАВЛЯЮЧОЇ ІНФОРМАЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФАЗОРІЗНИЦЕВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВИСОКОЇ КРАТНОСТІ

**Запропоновано оптимальний алгоритм когерентної обробки багаточастотних групових сигналів із застосуванням АФМ і АФРМ, а також показано, що організований на базі цього алгоритму цифровий канал передавання управляючої інформації характеризується значним (не менш як 6–8 дБ) виграшем щодо відношення сигнал/шум на вході демодулятора із відповідним підвищенням вірогідності передавання управляючої інформації системи управління телекомунікаційними мережами.**

**Ключові слова:** система управління телекомунікаційними мережами; фазорізнцева модуляція; вірогідність передавання управляючої інформації; багаточастотний груповий сигнал; оптимальний алгоритм когерентної обробки багаточастотних групових сигналів; відношення сигнал/шум.

### Вступ

Розв'язування завдань щодо визначення вірогідності управляючої інформації з урахуванням вартості системи управління (СУ) телекомунікаційними мережами безпосередньо стосується побудови ефективного цифрового каналу передавання управляючої інформації.

У свою чергу, до побудови ефективного каналу можна підійти одним із двох способів. Перший передбачає розгляд можливості застосування каналів передавання інформації споживачів як каналів передавання інформації в системі управління. Цей тип завдань розв'язується вибором такого каналу (з уже відомими інформаційними та ймовірнісними характеристиками), що найбільшою мірою відповідає поставленим вимогам. Другий тип завдань на побудову ефективного каналу полягає в розробці спеціальних каналів.

Зауважимо, що сучасні СУ мають задовольняти достатньо жорсткі вимоги у плані завадостійкості. Адже процеси інтеграції та конвергенції в сучасних телекомунікаційних мережах уможливають спільне надання телекомунікаційних послуг і послуг мовлення, взаємопроникнення послуг фіксованого та мобільного зв'язку. З огляду на це постає необхідність використовувати найрізноманітніші канали зв'язку як при наданні телекомунікаційних послуг, так і під час передавання управляючої інформації між об'єктами і суб'єктами СУ.

Зокрема, для передавання управляючої інформації в системі управління доводиться використовувати канали зв'язку різного типу, покладені в основу телекомунікаційних мереж. Це означає, що на другому рівні ієрархії TMN (*Telecommu-*

*nication Managment Network*) необхідно реалізувати надійну систему передавання даних. Проаналізуємо методи досягнення цієї мети.

### Забезпечення надійності передавання даних

У каналі зв'язку з постійними характеристиками ймовірність помилки — величина постійна, і, отже, можна заздалегідь спроектувати систему так, щоб її завадостійкість задовольняла задані вимоги.

У каналах зв'язку зі змінними характеристиками ймовірність помилки являє собою змінну величину (неоднорідний канал зв'язку). Отже, якщо навіть вдасться забезпечити середню ймовірність помилки, нижчу від заданого припустимого значення, усе ж в окремі інтервали часу ймовірність помилки неодмінно перевищуватиме припустиме значення. Більш того, у нестационарному каналі зв'язку, на відміну від стаціонарного, зменшення середньої ймовірності помилки не свідчить однозначно про поліпшення якості функціонування системи. Якщо, наприклад, поряд зі зменшенням середньої ймовірності помилки зростає частка випадків, коли ймовірність помилки більша за припустимого, то є сенс вважати, що завадостійкість системи не підвищилася, а зменшилася.

Отже, для забезпечення прийнятної якості роботи реальної системи передавання дискретної інформації в каналі зі змінними характеристиками необхідно підтримувати ймовірність помилки на рівні, що не перевищує деякого заданого припустимого значення. Це завдання може вважатися виконаним, якщо:

1) імовірність помилки менша від заданої та не змінюється, незважаючи на наявність завад, що викликають нестаціонарність каналу зв'язку;

2) імовірність помилки під впливом завад, що викликають нестаціонарність каналу, змінюється, набуваючи довільних значень, менших від заданого, і не перевищує цього значення за жодних змін характеристик каналу зв'язку.

В обох випадках можна вважати, що задана якість функціонування системи досягається завдяки незмінності ймовірності помилки та її незалежності (повної в першому випадку і часткової в другому) від тих причин, що викликають нестаціонарність каналу зв'язку. Для позначення цієї властивості використовують термін *інваріантність*.

Отже, потреба в інваріантних до всіляких збурень СУ зумовлюється необхідністю забезпечити задану якість передавання інформації в каналі зі змінними характеристиками.

Вирішальне значення цифрового каналу передавання управляючої інформації у функціонуванні телекомунікаційної мережі та велика перевага кількості передаваної інформації споживачів мережі порівняно з кількістю управляючої інформації здебільшого змушують закладати більш жорсткі вихідні вимоги до цього каналу з надійності, а також із вірогідності й затримки при передаванні управляючої інформації, а економічні вимоги — помірніші, ніж для каналів передавання інформації споживачів. Це дає змогу забезпечити для цифрового каналу передавання управляючої інформації відношення середньої потужності сигналу в смузі каналу до спектральної щільності потужності шуму — відношення сигнал/шум (*signal to noise rate* — *SNR*), яке перевищує 10 дБ. За таких значень відношення сигнал/шум уможливується визначення фази сигналу на вході демодулятора з точністю, достатньою для реалізації квазікогерентного методу демодуляції. Цим самим для багатопозиційних сигналів забезпечується додатковий вииграш близько 6–8 дБ порівняно з неоптимальними методами прийому.

#### Синтез оптимального алгоритму когерентної обробки багаточастотних групових сигналів

Сигнали з амплітудно-фазовою та амплітудно-фазорізницевою модуляцією (АФМ і, відповідно, АФРМ) зазвичай застосовують для досягнення високих (3 біт/(с·Гц) і більших) питомих швидкостей цифрового передавання в каналах із жорстким обмеженням смуги частот і порівняно доброю енергетикою. До найбільш відомих і часто використовуваних належать 16-позиційні системи АФМ і АФРМ сигналів, що відповідають чотириразовій маніпуляції.

Приклад 16-позиційного сигналу з квадратурно-амплітудною модуляцією (КАМ) наведено на рис. 1.

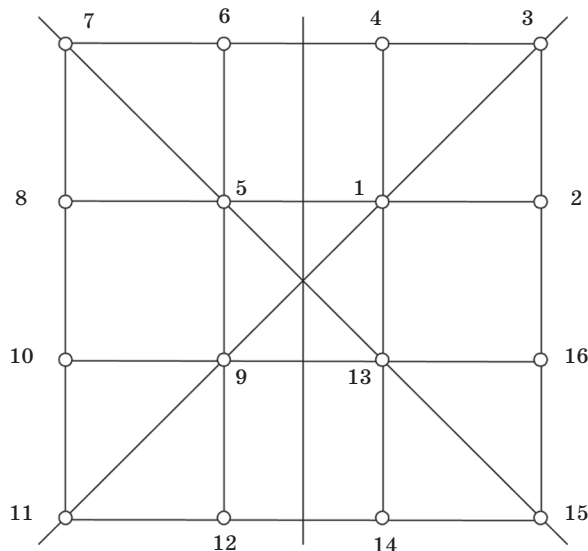


Рис. 1

Відомі також випадки практичного використання сигналів і вищої кратності.

Розглянемо загальний випадок цифрового передавання за допомогою  $m$ -позиційного сигналу з довільними амплітудами  $a_1, a_2, \dots, a_m$  і початковими фазами  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ , не розрізняючи поки що АФМ і АФРМ.

За такої постановки задачі  $i$ -й варіант переданого сигналу можна подати у вигляді:

$$S_i(t) = a_i \sin(\omega t + \varphi_i), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

У каналі з гауссівським некорельованим шумом оптимальний алгоритм прийому сигналів (1) сформулюємо так: переданий  $i$ -й варіант сигналу фіксуємо за умови, що при всіх  $j \neq i$  виконується нерівність

$$\int_0^T [x(t) - S_i(t)]^2 dt < \int_0^T [x(t) - S_j(t)]^2 dt, \quad (2)$$

де  $x(t)$  — прийнятий сигнал;  $T$  — тривалість послідовки;

$$i = \arg \min \int_0^T [x(t) - S_i(t)]^2 dt. \quad (3)$$

У разі цифрової обробки зручно переходити від високочастотного сигналу (2) до його відображення через координати у двовимірному просторі, що на практиці відповідає, наприклад, операціям перенесення чи формуванню спектра поділу ортогональних каналних сигналів у багатоканальній системі.

Отже, нехай відомі обчислені на інтервалі однієї послідовки проєкції прийнятого сигналу  $x(t)$  і деяких сигналів  $s_i(t)$  на опорні коливання з довільною фазою  $\varphi_0$ :

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \int_0^T x(t) \cos(\omega t + \varphi_0) dt, \\ y_0 &= \int_0^T x(t) \sin(\omega t + \varphi_0) dt, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \int_0^T s_i(t) \cos(\omega t + \varphi_i) dt, \\ y_i &= \int_0^T s_i(t) \sin(\omega t + \varphi_i) dt, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, m$ .

Тоді оптимальний алгоритм (3) можна подати у вигляді

$$i = \arg \min \int_0^T [(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2] dt. \quad (6)$$

Величини  $x_0$  і  $y_0$  визначаються, як впливає з (4), у результаті обробки поточної прийнятої послідовності сигналів, а значення  $x_i$  та  $y_i$ , кількість яких дорівнює  $2m$ , мають бути відомі апріорно чи обчислені (оцінені) у процесі приймання попередніх послідовностей сигналів.

Для обчислення оцінок даної проекції прийнятого сигналу скористаємося методом зведення та усереднення зазначеної проекції. Наприклад, роль усереднюваних величин відіграватимуть проекції першого варіанта сигналу (1), тобто величини  $x_1$  і  $y_1$ . Далі будемо перетворювати (зводити) до них інші варіанти прийнятого сигналу в процесі підстроювання за інформаційним сигналом. Якщо прийнятий сигнал  $x(t)$  на деякому інтервалі містить  $N$  послідовностей сигналів  $S_1(t)$  у суміші з гауссівським шумом, то, як відомо, максимально правдоподібні оцінки величин  $x_1$  і  $y_1$  подаються такими рівностями:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{0n}, \\ \tilde{y}_1 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_{0n}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де  $x_{0n}$  і  $y_{0n}$  — значення розглянутих проекцій на інтервалі  $n$ -ї послідовності. Оцінки (7) є незміщені й ефективні, причому їх можна перетворити на незміщені й ефективні оцінки проекції решти варіантів сигналу, що входять в оптимальний алгоритм (6). Для цього, скориставшись позначенням  $\varphi_j = \varphi_1 + \Delta\varphi_j$ , побудуємо проекцію за таким правилом:

$$\begin{aligned} x_j &= \int_0^T a_j \sin(\omega t + \varphi_j) a_0 \sin(\omega t + \varphi_0) dt = \\ &= \frac{a_j}{a_1} \int_0^T a_1 \sin(\omega t + \varphi_1 + \Delta\varphi_j) a_0 \sin(\omega t + \varphi_0) dt = \\ &= \frac{a_j}{a_1} \left[ \cos \Delta\varphi_j \int_0^T a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) a_0 \sin(\omega t + \varphi_0) dt - \right. \\ &\quad \left. - \sin \Delta\varphi_j \int_0^T a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) a_0 \cos(\omega t + \varphi_0) dt \right] = \\ &= \frac{a_j}{a_1} (x_1 \cos \Delta\varphi_j - y_1 \sin \Delta\varphi_j). \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогічно будемо проектувати  $y_j$ . Замінивши тепер величини  $x_1$  і  $y_1$  їхніми оцінками, дістанемо:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_j &= \frac{a_j}{a_1} (\tilde{x}_1 \cos \Delta\varphi_j - \tilde{y}_1 \sin \Delta\varphi_j), \\ \tilde{y}_j &= \frac{a_j}{a_1} (\tilde{x}_1 \sin \Delta\varphi_j + \tilde{y}_1 \cos \Delta\varphi_j), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $\Delta\varphi_j$  — відома різниця фаз між сигналами  $S_j(t)$  і  $S_1(t)$ .

Зазначимо, що при обчисленні оцінок згідно з (9) немає потреби в інформації про амплітуди варіантів сигналу  $a_j$  і  $a_1$ , а цілком достатньо знати **відношення цих амплітуд**  $a_j / a_1$ .

Побудовані алгоритми забезпечують когерентний прийом багатопозиційного АФМ сигналу за наявності спеціального синхросигналу, що, наприклад, передуватиме передаванню інформаційних послідовностей. При цьому згідно з (5) обчислюються проекції синхросигналу на опорне коливання з довільною початковою фазою, далі за (7) визначаються оцінки  $\tilde{x}_1$  і  $\tilde{y}_1$  проекцій першого варіанта сигналу, а за (8) обчислюються оцінки проекцій усіх  $m$  варіантів сигналу і, нарешті, оцінки  $\tilde{x}_j$  і  $\tilde{y}_j$ ; усі варіанти сигналу підставляються замість  $x_j$  і  $y_j$  в алгоритм (6), відповідно до якого відбувається демодуляція інформаційних послідовностей.

Наголосимо, що розглянутий алгоритм зорієнтовано на прийом сигналу з абсолютною фазовою модуляцією, оскільки наявність синхросигналу усуває невизначеність початкової фази, яка заважає застосуванню абсолютної фазової модуляції.

Повернемося тепер до розглянутого алгоритму й пристосуємо його до практично найбільш важливого випадку, коли синхросигнал відсутній і «підстроювання» проекцій зразків сигналу доводиться здійснювати безпосередньо за інформаційними послідовностями. У цьому разі необхідно усереднювати не самі проекції прийнятого сигналу,

а зведені проекції. Тут операція зведення полягає в перетворенні прийнятих проекцій до проекцій першого варіанта сигналу з використанням ухваленого рішення про переданий зразок сигналу.

Нехай, як і раніше,  $\Delta\tilde{\varphi}_n$  — різниця фаз між варіантом сигналу, на користь якого ухвалено рішення на  $n$ -й посилювачі, і першим варіантом сигналу;  $\tilde{a}_n$  — амплітуда сигналу, на користь якого ухвалено рішення на  $n$ -й посилювачі. Тоді  $\Delta\tilde{\varphi}_n$  набуває значень із дискретної множини дозволених фаз, визначених в (1).

Що ж до  $\tilde{a}_n$ , то значення цієї величини дорівнює фактичній амплітуді прийнятої на  $n$ -й посилювачі суміші сигналу з шумом. Проте надалі ця величина ототожнюється з амплітудою того варіанта сигналу, на користь якого винесено рішення на  $n$ -й посилювачі. *Хвиляста лінія над символами в обох випадках застерігає, що ці оцінки фактично можуть бути помилкові.* Тоді зведені проекції  $x_{1n}$  і  $y_{1n}$  прийнятого сигналу на  $n$ -й посилювачі обчислюються через прийняті проекції  $x_{0n}$  і  $y_{0n}$  за формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_{1n} &= \frac{a_1}{\tilde{a}_n} (x_{0n} \cos \Delta\tilde{\varphi}_n + y_{0n} \sin \Delta\tilde{\varphi}_n), \\ y_{1n} &= \frac{a_1}{\tilde{a}_n} (y_{0n} \cos \Delta\tilde{\varphi}_n - x_{0n} \sin \Delta\tilde{\varphi}_n). \end{aligned} \right\} (10)$$

Варто наголосити, що  $\tilde{a}_n$  і  $\Delta\tilde{\varphi}_n$  визначаються рішенням про переданий на  $n$ -й посилювачі варіант сигналу, ухваленим за результатами обробки величин  $x_{0n}$  і  $y_{0n}$ .

Далі, як і в алгоритмі прийому за синхросигналом, величини (10) усереднюються:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{a_1}{\tilde{a}_n} (x_{0n} \cos \Delta\tilde{\varphi}_n + y_{0n} \sin \Delta\tilde{\varphi}_n), \\ \tilde{y}_1 &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{a_1}{\tilde{a}_n} (y_{0n} \cos \Delta\tilde{\varphi}_n - x_{0n} \sin \Delta\tilde{\varphi}_n). \end{aligned} \right\} (11)$$

Відмінність алгоритму (11) від (7) полягає в тому, що в (7) усереднення здійснюється на інтервалі синхросигналу, а в (11) — на «плинному» інтервалі в  $M$  посилок, що передують посилювачу, оброблюваній у даний момент.

Зауважимо, що при обчисленні оцінок згідно з (11) немає потреби в апіорних відомостях про середню потужність сигналу, що підлягає визначенню, оскільки цей алгоритм включає в себе лише відношення амплітуд.

Таким чином, співвідношення (10), (11) разом із (6) являють собою *шуканий алгоритм когерентної обробки сигналу*.

Варіанти різниць фаз  $\Delta\varphi_j$ , необхідні для обчислення за формулами (9) і (10), неважко визначити, скориставшись рис. 2.

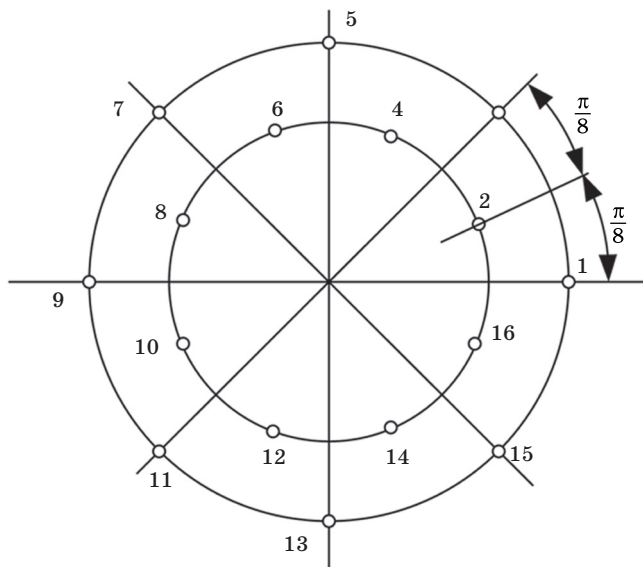


Рис. 2

Для деяких варіантів зручно обчислювати безпосередньо  $\cos\Delta\varphi_j$  і  $\sin\Delta\varphi_j$ . Наприклад, для 4-го варіанта сигналу маємо:

$$\begin{aligned} \sin\Delta\varphi_j &= \sin\left(\varphi_4 - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2}(\sin\varphi_4 - \cos\varphi_4) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{y_4}{\sqrt{x_4^2 + y_4^2}} - \frac{x_4}{\sqrt{x_4^2 + y_4^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{3}{\sqrt{10}} - \frac{1}{\sqrt{10}} \right) = \frac{1}{\sqrt{5}}; \end{aligned} (12)$$

$$\cos\Delta\varphi_j = \cos\left(\varphi_4 - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2}(\sin\varphi_4 + \cos\varphi_4) = \frac{2}{\sqrt{5}}. (13)$$

Таким чином, у разі приймання 4-го варіанта сигналу зведені проекції обчислюються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_{1n} &= \frac{a_1}{a_4} \left( x_{0n} \frac{2}{\sqrt{5}} - y_{0n} \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = \frac{1}{5} (2x_{0n} - y_{0n}), \\ y_{1n} &= \frac{a_1}{a_4} \left( y_{0n} \frac{2}{\sqrt{5}} - x_{0n} \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = \frac{1}{5} (2y_{0n} - x_{0n}). \end{aligned} \right\} (14)$$

Аналогічно для 2-го варіанта сигналу дістаємо  $\sin\Delta\varphi_2 = -\frac{1}{\sqrt{5}}$ ,  $\cos\Delta\varphi_2 = \frac{2}{\sqrt{5}}$ , а відповідні зведені проекції під час приймання цього варіанта сигналу набирають вигляду

$$\begin{aligned} x_{1n} &= \frac{1}{5} (2x_{0n} - y_{0n}), \\ y_{1n} &= \frac{1}{5} (2y_{0n} - x_{0n}). \end{aligned} (15)$$

Тригонометричні функції решти фазових вузлів даної системи сигналів знаходимо з фазових кутів сигналів 1, 2, 3, 4 (див. рис. 2).

Справді, ця система сигналів формується в результаті подвійної фазової модуляції, так що сиг-

нали 5, 6, 7, 8 утворюються поворотом сигналів 1, 2, 3 і 4 на  $90^\circ$ , сигнали 9, 10, 11 і 12 — поворотом зазначених сигналів на  $180^\circ$ , сигнали 13, 14, 15, 16 — поворотом цих самих сигналів на  $-90^\circ$ .

Знайдені в такий спосіб зведені проєкції усереднюємо, дістаючи оцінки  $\tilde{x}_1$  і  $\tilde{y}_1$  проєкцій 1-го варіанта сигналу. Далі згідно з (9) обчислюємо оцінки всіх проєкцій  $\tilde{x}_j$  і  $\tilde{y}_j$ .

### Висновки

Пропонований алгоритм когерентної обробки багатопозиційних АФМ чи АФРМ сигналів особливо зручний для багатоканальних (багаточастотних) систем з ортогональними каналними сигналами. Річ у тім, що в цих системах для поділу ортогональних сигналів використовуються ті самі, що й у пропонованому алгоритмі, процедури обчислення проєкцій прийнятого сигналу на два взаємно ортогональні опорні коливання з довільною початковою фазою.

Як відомо, у багаточастотних демодуляторах опорні коливання всіх каналів звичайно формуються від однієї довільної частоти. Проте початкові фази каналних сигналів мають різні зсуви, причому вони, загалом кажучи, слабко зв'язані між собою (наприклад, у радіоканалах із селективними загасаннями — некорельовані). Саме тому в багатоканальних демодуляторах важко використовувати методи формування опорних коли-

вань, що ґрунтуються на підстроюванні фази керуваного генератора.

Натомість *пропонований алгоритм когерентної обробки не потребує підстроювання фази опорних коливань каналних сигналів, завдяки чому дозволяє досить просто реалізувати як ортогональний поділ сигналів, так і когерентний прийом.*

Адже для поділу каналів використовуються ті самі опорні коливання, що й у разі оптимального некогерентного прийому, тоді як когерентний прийом здійснюється на підставі підстроювання варіантів сигналу в кожному каналі багатоканального модема.

### Література

1. *Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж* / [В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. О. Комарова, Є. В. Орлов] // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*.— 2014.— № 4.— С. 3–8.

2. *Беркман, Л. Н. Теоретичні основи методології синтезу інформаційно-комунікаційних систем* / Л. Н. Беркман, О. В. Копійка // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*.— 2014.— № 4.— С. 12–20.

3. *Окунев, Ю. Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами* / Ю. Б. Окунев.

Л. Н. Беркман, Л. А. Комарова, А. А. Кильменинов, В. Б. Толубко

### ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОЛУЧАЕМОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗОРАЗНОСТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ВЫСОКОЙ КРАТНОСТИ

*Предложен оптимальный алгоритм когерентной обработки многочастотных групповых сигналов с применением АФМ и АФРМ, а также показано, что организованный на базе этого алгоритма цифровой канал передачи управляющей информации характеризуется значительным (не менее 6–8 дБ) выигрышем по отношению сигнал/шум на входе демодулятора с соответствующим повышением достоверности передачи управляющей информации системы управления телекоммуникационными сетями.*

**Ключевые слова:** система управления телекоммуникационными сетями; фазоразностная модуляция; достоверность передачи управляющей информации; многочастотный групповой сигнал; оптимальный алгоритм когерентной обработки многочастотных групповых сигналов; отношение сигнал/шум.

L. N. Berkman, L. O. Komarova, O. A. Kilmenginov, V. B. Tolubko

### INCREASE OF CONTROLLING INFORMATION VALIDITY WITH MAKING USE OF HIGH MULTIPLICITY DIFFERENTIAL PHASE MODULATION

*The optimal algorithm for coherent multy-frequency group amplitude and phase difference modulated sygnal processig is proposed. It's shown, that digital control information transmission channal organized according to this algorithm have the important (at least 6–8 dB) concerning SNR on demodulator input with corresponding increase of control system transmission validity.*

**Keywords:** telecommunication management system; amplitude and phase difference modulation; control system transmission validity; multy-frequency group signal; optimal algorithm for coherent multy-frequency group signal pocessing; SNR.

УДК 519.816

О. В. БАРАБАШ, д-р техн. наук, професор;

С. В. БОДРОВ, здобувач;

А. П. МУСІЄНКО, канд. фіз.-мат. наук,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## АНАЛІЗ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ВІДЕОКОНТРОЛЮ ПУНКТІВ МИТНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНО СТІЙКОЇ СИСТЕМИ

**Розкрито переваги застосування кількісних методів оцінювання функціональної стійкості за такими показниками, як межа та запас функціональної стійкості.**

**На основі здобутих цими методами оцінок можна давати рекомендації щодо побудови мережі відеоконтролю пунктів митного спостереження. Окрім того, зазначені оцінки допоможуть чітко сформулювати вимоги до структури системи відеоконтролю, яку буде спроектовано для безперебійного передавання даних на робочу станцію.**

**Ключові слова:** система обробки даних; функціональна стійкість; відеоконтроль.

### Вступ

Як об'єкт дослідження виступає система обміну даними мережі відеоконтролю пункту митного спостереження, яка належить до класу складних організаційних систем. Зазначену систему побудовано на основі технології корпоративних обчислювальних мереж, в яких апаратні та програмні ресурси розподілено на території всієї держави. Ця система складається з вузлів комутації та каналів (ліній) зв'язку між ними.

Головна вимога, що висувається до системи обміну даними, є виконання нею *головної функції* — забезпечення абонентів мережі потенційною змогою доступу до розподілених інформаційних ресурсів, об'єднаних у систему обміну даними. Решта вимог — *продуктивність, надійність, точність, сумісність, керованість, живучість, розширюваність і масштабованість* — пов'язані з якістю виконання згаданої головної функції [1]. У сучасних умовах на систему обміну даними впливають внутрішні (відмови, збої, помилки) і зовнішні (навмисне пошкодження елементів відеоконтролю) чинники. Тому задача забезпечення стійкого функціонування системи обміну даними справді актуальна.

Розв'язанню цієї задачі присвячено багато наукових праць [1–5]. Утім, на наш погляд, основна увага в них приділяється розв'язанню частинних задач, а саме: побудові резервованих інформаційно-керуючих систем, відмовостійких керуючих обчислювальних систем, адаптивних систем управління.

У [6] уведено поняття *функціональної стійкості складних динамічних об'єктів*, які можуть підлягати опису за допомогою системи диференціальних рівнянь. Проте для складних організаційних систем цей апарат неприйнятний. У теорії надійності [2] визначення показників надійності спирається здебільшого на зведення структури до послідовних і паралельних з'єднань, але й такий підхід неприйнятний для складних організаційних систем.

*Мета цієї статті* — побудова математичного апарату для кількісного оцінювання функціональної стійкості системи обміну даними мережі відеоконтролю пункту митного спостереження.

### Основна частина

Під *функціональною стійкістю* розуміється властивість системи виконувати свої функції протягом заданого часу, незважаючи на вплив потоку експлуатаційних відмов, навмисних ушкоджень, втручання в обмін і обробку інформації, а також на помилки обслуговувального персоналу [6; 7]. Фактично *функціональна стійкість складної технічної системи поєднує в собі властивості надійності, відмовостійкості та живучості, характеризуючи здатність об'єкта до відновлення роботоздатного стану за рахунок використання надмірності*.

Математична модель, що характеризує структуру системи обміну даними, має вигляд неорієнтованого графа  $G(V, E)$ ,  $v_i \in V$ ,  $e_{ij} \in E$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ , описуваного матрицею суміжності. Множині вершин  $V$  відповідає множина робочих станцій відеоконтролю розмірності  $n$ , а множині ребер  $E$  — множина ліній зв'язку між елементами відеоконтролю. Припускається, що система обміну даними виконуватиме основну функцію — обмін даними, якщо між будь-якою парою вузлів комутації знайдеться хоча б один маршрут передавання інформації. Таким чином, вимога зв'язності графа дає підставу для кількісного оцінювання такої властивості, як функціональна стійкість системи обміну даними.

Зауважимо, що в цій статті не розглядається описувана часом затримки повідомлення при пересиланні якості виконання системою основних її функцій. Припускається також, що канали зв'язку мають пропускну здатність, достатню для пересилання будь-якого за обсягом інформаційного потоку.

У технічній кібернетичі, а саме в теорії автоматичного керування, побудовано класичну теорію стійкості динамічних систем, засновником якої є А. М. Ляпунов. Ця теорія дає змогу оцінити стійкість, не розв'язуючи системи диференціальних рівнянь, які описують об'єкт, а використовуючи лише прості ознаки, умови й критерії стійкості, що їх розробили І. О. Вишнеградський, А. Гурвіц, А. В. Михайлов, Х. Найквіст та інші вчені.

За аналогією з класичною теорією стійкості пропонується оцінювати функціональну стійкість за параметрами графа, який описує структуру системи обміну даними. Виявляється, що за зовнішнім виглядом графа та його параметрів можна визначити, чи буде система функціонально стійка, нестійка або нейтральна.

**Ознака функціональної стійкості структури.** Структура системи обміну даними функціонально стійка, якщо граф структури однокомпонентний і не має мостів і вузлів з'єднання.

Навпаки, функціональна нестійкість структури визначається за такою ознакою.

**Ознака функціональної нестійкості структури.** Структура системи обміну даними функціонально нестійка, якщо її граф багатокомпонентний і незв'язний.

Отже, зовнішній вигляд графа (кількість компонентів, наявність мостів і вузлів) характеризує функціональну стійкість структури, тобто закладену в ній здатність давати відсіч відмовам та ушкодженням.

Проте в разі сильно розгалуженого і багатoverшинного графа здійснити оцінювання за зовнішнім його виглядом складно. Тому для кількісного оцінювання ступеня функціональної стійкості системи введемо такі показники.

- **Число вершинної зв'язності  $\chi(G)$**  — найменша кількість вершин, вилучення яких разом з інцидентними їм ребрами призводить до незв'язного чи одновершинного графа.

- **Число реберної зв'язності  $\lambda(G)$**  — найменша кількість ребер, вилучення яких призводить до незв'язного графа.

- **Імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$**  — імовірність того, що повідомлення з вузла  $i$  у вузол  $j$  буде передано за час, який не перевищує  $t$ .

Аналізуючи ці показники, доходимо таких висновків:

- числа вершинної і реберної зв'язності характеризують тільки поточну структуру, незалежно від надійності вузлів комутації чи ліній зв'язку;

- показники  $\chi(G)$  і  $\lambda(G)$  набувають цілочислових значень і пов'язані таким співвідношенням:

$$\chi(G) \leq \lambda(G);$$

- імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$  дозволяє враховувати надійність комутаційного обладнання, вид фізичного каналу передавання інформації, наявність резервних каналів і маршрутів, а також

зв'язність розподіленої структури. Утім обчислення значення  $P_{ij}(t)$  — складна і громіздка задача;

- імовірність зв'язності характеризує тільки зв'язність між однією парою вершин. Для того щоб схарактеризувати зв'язність між усіма парами вершин, необхідно розглянути матрицю суміжності [8]:

$$A = \|a_{ij}\|, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{якщо } e_{ij} \notin E. \end{cases}$$

Скориставшись запропонованими ознаками й показниками, можна розробити **критерії функціональної стійкості структури.**

- ♦ Структура функціонально стійка, якщо число вершинної зв'язності задовольняє умову

$$\chi(G) \geq 2. \quad (1)$$

- ♦ Структура функціонально стійка, якщо число реберної зв'язності задовольняє умову

$$\lambda(G) \geq 2. \quad (2)$$

- ♦ Структура функціонально стійка, якщо ймовірність зв'язності між кожною парою вершин не менша від заданої:

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^{\text{задан}}, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

де  $n$  — кількість вершин графа  $G(V, E)$ .

Наведені критерії дозволяють на основі точних розрахунків визначити функціональну стійкість поточної структури системи обміну даними.

На межі областей стійкості і нестійкості існує специфічна область, в якій система не є ні функціонально стійкою, ні функціонально нестійкою. Таку область, за аналогією з теорією стійкості динамічних систем, називатимемо межею **функціональної стійкості структури.**

Ознака межі функціональної стійкості формулюється так.

Поточна структура перебуває на межі функціональної стійкості, якщо граф структури зв'язний, має у своєму складі мости ( $N_E > 0$ ) чи вузли ( $N_V > 0$ ) з'єднання:

$$\{K = 1\} \wedge [\{N_V > 0\} \vee \{N_E > 0\}], \quad (4)$$

де  $K$  — кількість компонентів графа, а умова  $K = 1$  означає, що граф зв'язний;  $N_V(N_E)$  — кількість вузлів з'єднання (мостів) графа.

**Мостом** називається ребро зв'язного графа, що сполучає два підграфи, після вилучення якого граф з однокомпонентного перетворюється на двокомпонентний. У деяких працях із теорії графів міст називають **перешийком.**

**Вузлом з'єднання** називається така вершина зв'язного графа, після вилучення якої разом з інцидентними їй ребрами граф з однокомпонентного перетворюється на двокомпонентний.

Наявність у структурі моста чи вузла з'єднання, що сполучає два підграфи, означає таке: усі маршрути передавання інформації з вершин одного підграфа у вершини іншого включатимуть у себе

цей міст чи вузол з'єднання, через що істотно знижується структурна надійність і функціональна стійкість системи обміну даними. Тому для надання системі функціонально стійкого стану необхідно вводити в структуру резервні лінії зв'язку для того, щоб уникнути в структурі мостів чи вузлів з'єднання. Цим самим буде забезпечено появу кількох незалежних і альтернативних маршрутів передавання інформації.

Аналіз структур показує, що коли система перебуває на межі стійкості, то вона роботоздатна і виконує покладений на неї обсяг функцій. Проте в разі хоча б однієї відмови моста чи вузла з'єднання система переходить у нестійкий стан.

Області функціональної стійкості і нестійкості можна подати також у декартовому просторі в координатах  $N_E, N_V$  (див. рисунок).



Залежно від параметрів  $N_E, N_V$  графа структури визначається точка на площині, яка характеризує стан системи. За належністю точки тій чи іншій області можна судити про функціональну стійкість чи нестійкість системи.

Із погляду графічного подання межею функціональної стійкості системи буде геометричне місце точок, що лежать на двох прямих  $N_E = 1$  і  $N_V = 1$ .

На підставі введених понять постає запитання: якою мірою поточна структура віддалена від межі стійкості, тобто який запас функціональної стійкості має система?

Визначити цей запас можна, наприклад, у сенсі зв'язності структури. У такому разі він характеризується кількістю відмов (розривів ребер чи виходу з ладу вершин), котрі можуть надати структурі нестійкого стану.

Розглянемо показники, за якими можна кількісно визначити запас функціональної стійкості.

♦ **Реберний запас стійкості** — число  $Z_E$ , що дорівнює потужності мінімального розрізу, який переводить граф з однокомпонентного у двокомпонентний.

♦ **Вершинний запас стійкості** — мінімальна кількість  $Z_V$  вершин графа, після вилучення яких разом з інцидентними їм ребрами граф переходить з однокомпонентного в двокомпонентний.

Геометрична інтерпретація запасу стійкості така: це мінімальна відстань від точки на площині, заданій параметрами  $N_E, N_V$ , до межі стійкості.

Можна також обчислювати запас функціональної стійкості за ймовірністю зв'язності як різницю між заданим і поточним значеннями. Очевидно, що в цьому разі запас буде подано квадратною матрицею, в якій кожний елемент матиме значення  $(P_{ij}^{\text{задан}} - P_{ij})$ .

Отже, скориставшись ознаками функціональної стійкості, можна схарактеризувати стан системи обміну даними, з'ясувавши який він: функціонально стійкий чи функціонально нестійкий.

Ступінь функціональної стійкості визначається за запасом функціональної стійкості, а його можна знайти як аналітично за запропонованими формулами, так і графічно (див. рисунок).

Виконані дослідження уможливають:

♦ обґрунтування вимог до проєктованих систем обміну даними;

♦ розв'язання задачі синтезу оптимальної структури за критерієм максимуму функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови та експлуатації мережі відеоконтролю пункту митного спостереження, а також обґрунтованого нарощення структури системи обміну даних у процесі експлуатації.

### Висновки

Розкрито переваги застосування кількісних методів оцінювання функціональної стійкості за такими показниками, як межа та запас функціональної стійкості.

На основі здобутих оцінок, можна подавати рекомендації щодо побудови мережі відеоконтролю пунктів митного спостереження, а також достатньо чітко формулювати вимоги стосовно структури системи відеоконтролю, яка проєктуватиметься для безперебійного передавання даних на робочу станцію.

### Література

1. Додонов, А. Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А. Г. Додонов, М. Г. Кузнецова, Е. С. Горбачик; отв. ред. В. А. Гуляев. — К.: Наукова думка, 1990. — 184 с.
2. Кравченко, Ю. В. Визначення проблематики теорії функціональної стійкості щодо застосування в комп'ютерних системах / Ю. В. Кравченко, С. В. Нікіфоров // Телекомунікаційні та інформаційні технології. — 2014. — № 1. — С. 12–18.
3. Барабаш, О. В. Модель бази знань інтелектуальної системи управління високошвидкісного рухомого об'єкта на основі її верифікації / О. В. Барабаш, Д. М. Обідін, А. П. Мусієнко // Системи обробки інформації. — Харків: ХУПС, 2014. — № 5 (121). — С. 3–6.



4. Королев, А. В. *Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях* / А. В. Королев, Г. А. Кучук, А. А. Пашнев.— Харьков: ХВУ, 2003.— 224 с.

5. Барабаш, О. В. *Алгоритм самодиагностики технического stanu вузлів комутації інформаційних систем* / О. В. Барабаш, Д. М. Обідін, А. П. Мусієнко // *Сучасний захист інформації*.— 2014.— № 2.— С. 114–121.

6. Артюшин, Л. М. *Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам* / Л. М. Артюшин, О. А. Машков.— К.: КВВАИУ, 1991.— 89 с.

7. Барабаш, О. В. *Функциональная стойкость — свойство сложных технических систем: сб. науч. праць НАОУ* / О. В. Барабаш, Ю. В. Кравченко.— К.: НАОУ, 2002.— Бюл. № 40— С. 225–229.

О. В. Барабаш, С. В. Бодров, А. П. Мусієнко

#### АНАЛИЗ ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ ВИДЕОКОНТРОЛЯ ПУНКТОВ ТАМОЖЕННОГО НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО УСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ

Показаны преимущества применения количественных методов оценки функциональной устойчивости по таким показателям, как граница и запас функциональной устойчивости.

На основе полученных этими методами оценок можно давать рекомендации по построению сети видеоконтроля пунктов таможенного наблюдения. Кроме того, данные оценки помогут четче сформулировать требования к структуре системы видеоконтроля, которая будет проектироваться для бесперебойной передачи данных на рабочую станцию.

**Ключевые слова:** система обработки данных; функциональная устойчивость; видеоконтроль.

O. V. Barabash, S. V. Bodrov, A. P. Musienko

#### ANALYSIS OF BUILDING A NETWORK VIDEO SURVEILLANCE POINT OF CUSTOMS SUPERVISION ON THE BASIS OF FUNCTIONAL STABILITY SYSTEM

The advantages of the application of quantitative methods for assessing functional stability on such parameters as border and margin functional stability are viewed.

On the basis of estimates obtained by these methods we can provide advice on building a network of video surveillance of the customs points. In addition, these estimates will help to better formulate requirements for the video surveillance system, which will be designed for trouble-free data transmission to the workstation.

**Keywords:** data processing system; functional stability; video surveillance.

УДК 621.391; 519.863 (045)

Є. В. ОРЛОВ, аспірант; І. Е. ПОХАБОВА, аспірантка,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## УПРОВАДЖЕННЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНОЮ МЕРЕЖЕЮ SDN

**Розглянуто спосіб підвищення швидкодії та пропускної здатності мережних компонентів програмно-конфігурованих мереж, що спирається на принцип організації адаптивного управління відповідними мережними потоками. Зазначений принцип передбачає зміну таблиць мережних потоків OpenFlow-комутаторів та OpenFlow-маршрутизаторів, коли мережний пакет спрямовується до контролера даної мережі, схема якого додатково включає в себе функціональний блок зі встановлення пріоритету мережного потоку. Цей блок забезпечує також сукупність параметрів якості мережного трафіку за байтом типу обслуговування ToS.**

**Ключові слова:** програмно-конфігурована мережа; система управління; оптимізація; OpenFlow.

### Вступ

Завдяки інтенсивному впровадженню новітніх технологій, що дозволяють операторам телекомунікаційних мереж стрімко розширювати спектр надаваних користувачам послуг, відбувається водночас істотне вдосконалення самих мереж. Адже потреби в підвищенні пропускної здатності та швидкодії телекомунікаційних мереж постійно зростають. Для їх задоволення використовується дедалі більша кількість протоколів і механізмів контролю та управління ресурсами телекомунікаційних мереж [1; 3], що, у свою чергу, змушує

вдаватися до оновлення класичної моделі побудови телекомунікаційних мереж.

Один із важливих напрямків «модернізації» класичних принципів організації мережної архітектури полягає у створенні програмно-конфігурованих мереж (ПКМ) — *Software-Defined Networks* — *SDN*), що використовують протокол OpenFlow [2]. Сьогодні ця мережна технологія розглядається як найбільш прийнятна і тому активно розвивається. Важлива перевага ПКМ порівняно з традиційними комп'ютерними мережами — це механізм ухвалення рішення про зміну марш-