

УДК 621.396

О.В. Кувшинов

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”, Київ

АЛГОРИТМИ КОНТРОЛЮ СТАНУ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ СКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ОБСТАНОВКИ

Показана можливість синтезу ефективних обчислювальних алгоритмів динамічного контролю якості багатопроменевих каналів зв'язку з навмисними завадами на основі застосування методів теорії оптимальної лінійної фільтрації. Основними особливостями алгоритмів, що синтезуються, є врахування не тільки енергетичних, але і кореляційних параметрів сигналів і завад.

Ключові слова: канал зв'язку, навмисні завади, завмирання сигналів.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні системи і засоби радіозв'язку функціонують в складній радіоелектронній обстановці. Основними факторами, що впливають на якість радіозв'язку, є природні і навмисні завади, що діють в каналі, та завмирання сигналів внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль [1, 2]. При цьому одним з основних завдань при проектуванні систем і засобів радіозв'язку є вибір придатного алгоритму оцінювання стану каналу зв'язку [3, 4]. Можливості сучасної обчислювальної техніки стимулювали широке застосування методів статистичного аналізу часових рядів при побудові і вдосконаленні апаратури, що здійснює аналіз якості каналів.

Аналіз досліджень і публікацій. Застосовують дві групи методів аналізу часових рядів, які застосовуються при оцінці стану каналу зв'язку. До першої групи відносяться методи сумісної обробки вимірювань – найменших квадратів, максимальної правдоподібності, найменших модулів, непараметричні методи тощо [5, 6], які для отримання результату (оцінки) вимагають накопичення деякої вибірки об'ємом n -вимірювань (як правило, $n \gg 1$) і досить поширені на практиці. Другу групу утворюють методи, що використовують послідовну (по мірі надходження вимірювань) обробку даних. Їх теоретичною базою є оптимальна лінійна і нелінійна фільтрація [7 – 9].

Важливо відзначити, що методи, засновані на оптимальній фільтрації вимірювань, можуть застосовуватися при більш загальних припущеннях (нестационарний характер процесів, що аналізуються, випадковість різних факторів тощо). Ця обставина разом з істотними перевагами обчислювального порядку, що проявляються при рішенні задач оцінювання по мірі надходження вимірювань (особливо для великих масивів даних), робить доцільним і актуальним використання методів оптимальної фільт-

рації для синтезу алгоритмів динамічного контролю якості робочих і резервних каналів зв'язку.

Тому метою статті є синтез алгоритмів контролю якості багатопроменевих каналів зв'язку з навмисними завадами.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо питання статистичного синтезу ефективних обчислювальних алгоритмів динамічного контролю якості радіоканалів на основі застосування методів теорії оптимальної лінійної фільтрації. Основними особливостями алгоритмів, що синтезуються, є врахування не тільки енергетичних, але і кореляційних (швидкісних) параметрів сигналів і завад, а також рекурентний характер обробки інформації.

Динамічний контроль якості робочих радіоканалів в умовах впливу навмисних завад найдоцільніше здійснювати за співвідношенням сигнал/завада. При цьому обчислення відповідних оціночних значень може проводитися або за допомогою спеціальних вимірювальних сигналів, або безпосередньо в процесі передачі оперативної інформації.

Розглянемо методику рішення задачі синтезу рекурентного алгоритму обчислень оптимальних за середньоквадратичним критерієм роздільних оцінок згладжених рівнів сигналу і завади, які можна використовувати при контролі якості каналів за усередненим співвідношенням сигнал/завада.

Нехай сигнал, що приймається на аналізованій частоті, $A_c(t)$ і адитивна з ним зосереджена завада $B_s(t)$ є марківськими квазістационарними нормальними випадковими процесами з симетричним спектром. При зроблених допущеннях ці процеси можна представити через квадратурні складові [10]:

$$A_c(t) = Y_c(t) \cos \omega_c t + Y_s(t) \sin \omega_c t, \quad (1)$$

$$B_s(t) = X_c(t) \cos \omega_s t + X_s(t) \sin \omega_s t, \quad (2)$$

де $Y_c(t)$, $X_c(t)$ – синфазні, а $Y_s(t)$, $X_s(t)$ – ортогональні

квадратурні складові сигналу і завади відповідно; ω_c і ω_3 – середні частоти спектрів сигналу і завади.

Надалі будемо вважати, що $\omega_c \approx \omega_3 = \omega_0$, при цьому ω_0 точно визначена.

У разі релеївських завмирань, квадратурні складові сигналу $Y_c(t)$, $Y_s(t)$ і завади $X_c(t)$, $X_s(t)$ є попарно незалежними нормальними марківськими випадковими процесами з нульовим середнім і дисперсіями $\sigma_{Y_c}^2 = \sigma_{Y_s}^2 = \sigma_c^2$, $\sigma_{X_c}^2 = \sigma_{X_s}^2 = \sigma_3^2$ [10]. Кореляційні функції квадратур при цьому можна представити у вигляді

$$R_{Y_c}(\tau) = R_{Y_s}(\tau) = R_{Y_{KB}}(\tau) = \sigma_c^2 e^{-\alpha_c \tau}, \quad (3)$$

$$R_{X_c}(\tau) = R_{X_s}(\tau) = R_{X_{KB}}(\tau) = \sigma_3^2 e^{-\alpha_3 \tau}, \quad (4)$$

де $\alpha_c = \frac{1}{\tau_c}$, $\alpha_3 = \frac{1}{\tau_3}$ – параметри кореляційних функцій, що характеризують відповідно швидкості зміни сигналу і завади в квадратурних каналах приймання.

Для отримання оцінок згладжених за інтервал оцінки напруг сигналу і завади ($y(t) = 20 \lg \tilde{A}_c(t)$ і $x(t) = 20 \lg \tilde{B}_3(t)$), можна скористатися їх залежностями через відповідні оцінки згладжених за той же інтервал часу квадратурних складових:

$$y(t) = 20 \lg \sqrt{\tilde{Y}_c^2(t) + \tilde{Y}_s^2(t)}, \quad (5)$$

$$x(t) = 20 \lg \sqrt{\tilde{X}_c^2(t) + \tilde{X}_s^2(t)}. \quad (6)$$

Оцінка співвідношення згладжених напруг (рівнів) сигналу і завади визначається з виразу

$$s(t) = y(t) - x(t). \quad (7)$$

Модель, що визначає зміну складових сигналу $\tilde{Y}_{KB}(t)$ і завади $\tilde{X}_{KB}(t)$ в кожному квадратному каналі вимірювань, в дискретному часі задається в двовимірному просторі станів векторним різницеvim стохастичним рівнянням виду

$$\tilde{\mathbf{X}}(k+1) = \Phi(k+1)\tilde{\mathbf{X}}(k) + \Gamma(k+1)\tilde{\mathbf{U}}(k), \quad (8)$$

де $\tilde{\mathbf{X}}(k+1) = \|\tilde{Y}_{KB}(k+1), \tilde{X}_{KB}(k+1)\|^T$ – вектор стану складових сигналу і навмисної завади;

$$\Phi(k+1) = \text{diag} \left\| e^{-\alpha_y \Delta t}, e^{-\alpha_x \Delta t} \right\|;$$

$$\Gamma(k+1) = \text{diag} \left\| \sqrt{\frac{2}{\alpha_y}} (1 - e^{-\alpha_y \Delta t}); (1 - e^{-\alpha_x \Delta t}) \right\|;$$

$\tilde{\mathbf{U}}(k) = \|\tilde{U}_1(k), \tilde{U}_2(k)\|^T$ – вектор білого гауссівського шуму з нульовим математичним сподіванням і коваріаційною матрицею

$$Q(k) = \text{diag} \left\| \frac{\alpha_y \sigma_y^2 (1 + e^{-\alpha_y \Delta t})}{2(1 - e^{-\alpha_y \Delta t})}; \frac{\alpha_x \sigma_x^2 (1 + e^{-\alpha_x \Delta t})}{2(1 - e^{-\alpha_x \Delta t})} \right\|;$$

σ_y^2 і σ_x^2 – дисперсії, а α_y і α_x – параметри кореляційних функцій згладжених квадратурних складових сигналу і завади відповідно.

Рівняння (8) отримано в припущенні, що $\tilde{Y}_{KB}(k)$ і $\tilde{X}_{KB}(k)$ є кореляційно-марківськими нормальними випадковими послідовностями, квазістаціонарними в часі.

Сигнал і завада в кожному квадратурному каналі вимірювань спостерігаються в адитивній суміші з шумом вимірювань

$$\tilde{Z}_{KB}(k+1) = \mathbf{A}(k+1)\tilde{\mathbf{X}}(k+1) + \tilde{\mathbf{N}}_{KB}(k+1), \quad (9)$$

де $\mathbf{A}(k+1) = \|1, 1\|$, а $\tilde{\mathbf{N}}_{KB}(k+1)$ – гаусівська біла послідовність з нульовим математичним сподіванням і коваріаційною функцією $R_{\mathbf{N}}(k, l) = \sigma_{\mathbf{N}}^2 \delta_{k, l}$.

Рішення задачі оптимальної фільтрації для моделі стану і спостереження, що описується рівняннями (8) і (9), приводить до наступного рекурентного обчислювального алгоритму:

$$\tilde{\mathbf{X}}(k+1) = \left\| e^{-\alpha_y \Delta t} \tilde{Y}_{KB}(k), e^{-\alpha_x \Delta t} \tilde{X}_{KB}(k) \right\|^T + \mathbf{K}(k+1) \times \left\{ \tilde{Z}_{KB}(k+1) - \left[e^{-\alpha_y \Delta t} \tilde{Y}_{KB}(k) + e^{-\alpha_x \Delta t} \tilde{X}_{KB}(k) \right] \right\}. \quad (10)$$

У виразі (10) матричний ваговий коефіцієнт визначається у вигляді

$$\mathbf{K}(k+1) = \left\| \frac{\rho_{11}(\Delta t) + \rho_{12}(\Delta t)}{\rho_{11}(\Delta t) + 2\rho_{12}(\Delta t) + \rho_{22}(\Delta t) + \sigma_{\mathbf{N}}^2} \right\|, \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} \rho_{11}(\Delta t) &= P_{11}(k) e^{-2\alpha_y \Delta t} + \sigma_y^2 (1 - e^{-2\alpha_y \Delta t}), \\ \rho_{12}(\Delta t) &= P_{12}(k) e^{-(\alpha_y + \alpha_x) \Delta t}, \\ \rho_{22}(\Delta t) &= P_{22}(k) e^{-2\alpha_x \Delta t} + \sigma_x^2 (1 - e^{-2\alpha_x \Delta t}). \end{aligned} \quad (12)$$

В виразах (12) $P_{11}(k)$, $P_{22}(k)$, $P_{12}(k) = P_{21}(k)$ – елементи матриці середньоквадратичних помилок оцінки після k -кроків вимірювань.

Розглянутий обчислювальний алгоритм (10) – (12) може бути використаний при аналізі якості радіоканалів за допомогою спеціальних тестових сигналів.

При контролі якості радіоканалів безпосередньо в процесі передачі інформації доводиться зустрічатися з невизначеністю щодо наявності або відсутності сигналів в каналах приймання. Одним з найбільш конструктивних підходів до рішення цієї проблеми в даній ситуації є синтез обчислювальних алгоритмів контролю, заснованих на сумісному застосуванні процедур виявлення сигналів і оцінювання параметрів як сигналів, так і навмисних завад.

Розглянемо методику синтезу оптимальних за

середньоквадратичним критерієм алгоритмів роздільної оцінки амплітудних значень сигналів і завад при використанні даного підходу.

Нехай двійкові сигнали $A_c^{(l)}(t)$ ($l=1, 2$) мають однакову енергію і ϵ , як і адитивна завада $B_s(t)$, марківськими квазістаціонарними випадковими процесами з симетричним спектром. Зокрема, частотно-маніпульовані сигнали $A_c^{(l)}(t)$ ($l=1, 2$) можна представити через квадратурні складові

$$A_c^{(l)}(t) = Y_c(t) \cos \omega_{0l}t + Y_s(t) \sin \omega_{0l}t. \quad (13)$$

Не зменшуючи загальності, розглянемо випадок симетричного впливу навмисної завади на сигнали:

$$B_s(t) = X_c(t) \cos \omega_{0l}t + X_s(t) \sin \omega_{0l}t. \quad (14)$$

Для райсівського і релеївського каналів радіозв'язку динаміку зміни квадратурних складових сигналу і завади в дискретні моменти часу t_k ($k=0, 1, 2, \dots$) по аналогії з виразом (8) представимо системами стохастичних векторних різницьових рівнянь

$$\bar{X}_{c(s)}(k+1) = \Phi(k+1)\bar{X}_{c(s)}(k) + \Gamma(k+1)\bar{U}(k), \quad (15)$$

де $\bar{X}_c(k+1) = \|\bar{Y}_c(k+1), \bar{X}_c(k+1)\|^T$;

$\bar{X}_s(k+1) = \|\bar{Y}_s(k+1), \bar{X}_s(k+1)\|^T$;

$\bar{U}(k) = \|\bar{U}_1(k), \bar{U}_2(k)\|^T$; матриці $\Phi(k+1)$, $\Gamma(k+1)$ і $\mathbf{Q}(k)$ формально мають той же вигляд, що і в формулі (8), проте замість параметрів α_y , α_x і σ_y^2 , σ_x^2 в них використовуються відповідно параметри α_c , α_s і σ_c^2 , σ_s^2 .

Відзначимо, що інтервал дискретизації в часі $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ($k=0, 1, 2, \dots$), в даному випадку вибирається з умови $\Delta t \ll \min(\tau_c, \tau_s)$. Згідно із статистичними даними, значення інтервалів кореляції амплітуд завмираючих сигналів (завад) в каналах радіозв'язку складають десятки долі – одиниці секунд [11, 12].

Скалярні рівняння спостереження сигналів і завад на фоні шуму запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{z}(k+1) = & \\ = \chi [& \mathbf{A}\bar{X}_c(k+1) \cos \omega_{01}k\Delta t + \mathbf{A}\bar{X}_s(k+1) \sin \omega_{01}k\Delta t] + \\ & + (1-\chi) \times \\ \times [& \mathbf{A}\bar{X}_c(k+1) \cos \omega_{02}k\Delta t + \mathbf{A}\bar{X}_s(k+1) \sin \omega_{02}k\Delta t] + \\ & + \bar{N}(k+1), \end{aligned} \quad (16)$$

де $A = \|1, 1\|$; χ – випадкова величина, причому

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{з ймовірністю } P; \\ 0 & \text{з ймовірністю } Q = 1-P; \end{cases}$$

P , Q – апіорні ймовірності передачі сигналів $U_c^{(l)}(t)$ (зокрема, $P = Q = 0,5$); $\bar{N}(k+1)$ – нормаль-

ний білий шум з нульовим середнім і функцією коваріації $R_{\text{ш}}(k, l) = \sigma_{\text{ш}}^2 \delta_{k,l}$.

Оптимальне вирішальне правило за критерієм ідеального спостерігача для рівномірних сигналів у момент часу $T_a = n\Delta t$ визначається нерівністю

$$\Lambda[\bar{z}(n)] \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0, \quad (17)$$

де логарифм відношення правдоподібності знаходиться в послідовній формі

$$\begin{aligned} \Lambda[\bar{z}(k+1)] &= \ln \left\{ \frac{w[\bar{z}(k+1)/\chi=1]}{w[\bar{z}(k+1)/\chi=0]} \right\} = \\ &= \Lambda[\bar{z}(k)] + \ln \left\{ \frac{w[\bar{z}(k+1)/\bar{z}(k), \chi=1]}{w[\bar{z}(k+1)/\bar{z}(k), \chi=0]} \right\}, \end{aligned} \quad (18)$$

причому $\Lambda[\bar{z}(0)] = 0$.

Апостеріорні щільності ймовірностей $w[\bar{z}(k+1)/\bar{z}(k), \chi]$ у виразі (18) є гаусівськими і в даному випадку мають вигляд

$$\begin{aligned} w[\bar{z}(k+1)/\bar{z}(k), \chi] = & \\ = \left\{ 2\pi \det [\mathbf{A}\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{A}^T + \sigma_{\text{ш}}^2] \right\}^{1/2} \times & (19) \\ \times \exp \left\{ - \frac{\left\{ \begin{aligned} & \bar{z}(k+1) - \mathbf{A}\Phi(k+1) \times \\ & \times [\bar{X}_c(k) \cos \omega_{01}k\Delta t + \bar{X}_s(k) \sin \omega_{01}k\Delta t] \end{aligned} \right\}^2}{2\pi[\mathbf{A}\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{A}^T + \sigma_{\text{ш}}^2]} \right\}, \end{aligned}$$

де $\bar{X}_c(k) = \|\hat{Y}_c(k), \hat{X}_c(k)\|^T$; $\bar{X}_s(k) = \|\hat{Y}_s(k), \hat{X}_s(k)\|^T$ – вектори оцінок квадратурних складових сигналу і навмисної завади, процедура обчислення яких аналогічна алгоритму (10); $\mathbf{P}(k+1/k)$ – перехідна матриця помилок оцінки.

На підставі виразів (17) – (19) приходимо до наступного рекурентного обчислювального алгоритму сумісного виявлення і оцінювання:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{n-1} \{ \bar{z}(k+1) - \mathbf{A}\Phi(k+1) \times & \\ \times [\bar{X}_c(k) \cos \omega_{01}k\Delta t + \bar{X}_s(k) \sin \omega_{01}k\Delta t] \}^2 & \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \\ > \sum_{k=0}^{n-1} \{ \bar{z}(k+1) - \mathbf{A}\Phi(k+1) \times & \\ \times [\bar{X}_c(k) \cos \omega_{02}k\Delta t + \bar{X}_s(k) \sin \omega_{02}k\Delta t] \}^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Особливістю синтезованого алгоритму є залежність точності оцінок від якості реального каналу зв'язку (відношення сигнал/завада): при достатньо високій ймовірності ухвалення помилкових рішень може спостерігатися зміщення одержуваних оцінок і, як наслідок, зниження точності контролю якості каналу.

Для більш строгого судження про якість інформаційних каналів, особливо в умовах дії завад, структура яких схожа із структурою сигналу, необхідно здійснювати роздільну поточну оцінку амплітуд сигналу і навмисної завади без попереднього винесення рішень про приймання інформаційних символів. Для цього потрібна інформація про функції часової автокореляції маніпульованих сигналу і завади на виході каналу радіозв'язку. Така оцінка дозволить встановити ступінь впливу співвідношення швидкостей маніпуляції сигналу і завади, швидкості зміни характеристик середовища розповсюдження сигналу і завади на якість радіоканалу і тим самим видати рекомендації по вибору оптимальних робочих частот та інших параметрів сигналу засобів радіозв'язку з урахуванням кореляційних властивостей каналу, сигналу і завади.

Висновки

Таким чином, в статті показана можливість синтезу ефективних обчислювальних алгоритмів динамічного контролю якості радіоканалів на основі застосування методів теорії оптимальної лінійної фільтрації. Основними особливостями алгоритмів, що синтезуються, є врахування не тільки енергетичних, але і кореляційних (швидкісних) параметрів сигналів і завад, а також рекурентний характер обробки інформації.

Особливістю запропонованого методу оцінки якості каналу зв'язку з навмисними завадами є залежність точності оцінок від якості реального каналу зв'язку (відношення сигнал/завада): при достатньо високій ймовірності ухвалення помилкових рішень може спостерігатися зменшення одержуваних оцінок і, як наслідок, зниження точності контролю якості каналу.

Список літератури

1. Волков Л.Н. Системи цифрової радіосвязи: базові методи і характеристики: Учебное пособие / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

2. Теорія електричного зв'язку. Ч. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації: Підручник / [О.В. Кувишинов, С.П. Ливенцев, О.П. Лежнюк та ін.]. – К.: ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2008. – 286 с.

3. Коричнев Л.П. Статистический контроль каналов связи / Л.П. Коричнев, В.Д. Королев. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.

4. Міночкін Д.А. Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями / Д.А. Міночкін, І.В. Борисов // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – Вип. 3. – С. 66-71.

5. Rao С.Р. Линейные статистические методы и их применение / С.Р. Рао. – М.: Наука, 1968. – 548 с.

6. Space-time synchronisation algorithms for UMTS/TDD systems with strong co-channel interference / [K. Kopsa, G. Matz, H. Artes, P. Hlawatsch] // in Proc. IEEE Globecom 2007, Taipei, Taiwan. – Nov. 2007. – P. 254-258.

7. Тихонов В.И. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В.И. Тихонов, Н.К. Кульман. – М.: Сов. радио, 1975. – 704 с.

8. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К.Т. Леондеса; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 407 с.

9. Aladana C. Channel estimation for multicarrier multiple input single output systems using the EM algorithm / C. Aladana, E. de Carvalho, J. Cioffi // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2003. – V. 51, № 12. – P. 3280-3292.

10. Ливенцев С.П. Математическая модель канала передачи сигналов стандарта IEEE 802.11 / С.П. Ливенцев, А.В. Кувишинов // Зв'язок. – 2004. – № 7. – С. 24-25.

11. Morelli M. Comparison of Pilot-Aided Channel Estimation Methods for OFDM Systems / M. Morelli, U.A. Mengali // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2001. – Vol. 49. – № 12. – P. 3065-3073.

12. Нечаев Ю.Б. Методы оценки параметров многолучевого канала связи при итеративных алгоритмах приема / Ю.Б. Нечаев., А.А. Малютин // Теория и техника радиосвязи. – 2009. – Вып. 2. – С. 35-43.

Надійшла до редколегії 25.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, доцент І.Ю. Субач, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”, Київ.

АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ

А.В. Кувишинов

Показана возможность синтеза эффективных вычислительных алгоритмов динамического контроля качества многолучевых каналов связи с преднамеренными помехами на основе использования методов теории оптимальной линейной фильтрации. Основными особенностями синтезированных алгоритмов является учет не только энергетических, а и корреляционных параметров сигналов и помех.

Ключевые слова: канал связи, преднамеренные помехи, замирания сигналов.

ALGORITHMS FOR CHANNEL ESTIMATION IN CONDITIONS OF DIFFICULT RADIO ELECTRONIC SITUATION

O.V. Kuvshinov

Possibility of effective computational algorithms synthesis for dynamic quality control of multipath communication channels with intentional interferences using optimal linear filtration theory methods is shown. The basic features of the synthesized algorithms consist in accounting not only power but also correlated parameters of signals and interferences.

Keywords: communication channel, intentional interferences, fading of signals.