

УДК 623.396

М.В. Бархударян

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУМІЩЕНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАГАЛЬНИХ НЕУЗГОДЖЕНЬ

Проведено аналіз математичного апарату визначення основних показників якості функціонування суміщених радіотехнічних систем в умовах впливу загальних неузгоджень шкал часу та частоти засобів єдиного часу. Показано, що обмеження величини тривалості символу інформації для забезпечення прийнятої ймовірності помилки його прийому у ряді випадків призводить до різкого збільшення дисперсії похибки, що не може бути обґрунтовано фізично досить коректно. Таким чином, відомі співвідношення, що застосовуються на цей час, в даних умовах не є коректними. Доцільно запропонувати більш коректну методику визначення похибок суміщеної радіотехнічної системи за рахунок впливу неузгоджень по частоті і часу.

Ключові слова: суміщена радіотехнічна система, показник якості функціонування, ширококутовий шумоподібний сигнал.

Вступ

Аналіз літератури та постановка задачі. Аналіз якості функціонування суміщених радіотехнічних систем (СРС) з ширококутовими шумоподібними сигналами (ШШС) [1] показує, що поряд з перевагами, до основних з яких можливо віднести підвищену завадозахищеність, можливість сумісних вимірювань навігаційних параметрів сигналу і передавання інформації, достатню паспортну точність і ймовірність приймання інформації, вони мають і суттєві невраховані недоліки.

Основними з таких недоліків є:

- зниження точності вимірювань параметрів руху об'єктів, зумовлене неточністю прив'язування фазових центрів антен СРС; недостатньою кількістю вимірюваних параметрів руху; неточністю прив'язування шкал частоти і часу та їх нестабільністю; ймовірністю аномальних явищ; невизначеністю вимог до швидкості передавання інформації;

- зниження достовірності приймання інформації в умовах невизначеності вимог і перевищення похибок вимірювальних каналів СРС зазначених меж, низької стабільності шкал часу і частоти;

- енергетичні втрати, зумовлені неточністю синхронізації сигналів, опорних і тих, що прийняті;

- можливість входження в хибний синхронізм;

- надлишковість апаратури наземних засобів, зокрема, антенних пристроїв.

Аналіз існуючих методів оцінки похибок вимірювальних каналів суміщених радіотехнічних систем за рахунок загальних неузгоджень [3-4] показує, що вони також мають суттєві недоліки:

- зазначені методи не дають чіткого уявлення про фізику процесів, які відбуваються в СРС;

- деякі розрахунки, які застосовують дані методи, можуть привести до прямо протилежних висновків щодо функціонування реальних СРС;

- квадратична залежність зниження відношення сигнал/шум від неузгоджень приводить до можливості збільшення цього відношення при $\Delta f^2 T^2 > 2$.

Дані неузгодження виникають за рахунок впливу похибок засобів єдиного часу і (або) взаємного впливу каналів в системі.

Мета статті – аналіз математичного апарату оцінки показників якості функціонування суміщених радіотехнічних систем з урахуванням впливу загальних неузгоджень.

Основний матеріал

Як показує аналіз принципів побудови суміщених систем з ширококутовими шумоподібними сигналами, канали вимірювання та приймання інформації пов'язані між собою як через вхідний сигнал, так і через додаткові необхідні зв'язки. Похибки одного каналу визивають відповідні похибки у другому. Це, в свою чергу, визвано зменшенням центрального піку автокореляційної функції (АКФ) ШШС. Відомо [4], що величина центрального піку АКФ ШШС при неузгодженні по частоті має вид:

$$R = R(\Delta\omega) = \frac{\sin(\Delta\omega T/2)}{\Delta\omega T/2} \approx 1 - \frac{\Delta\omega^2 T^2}{4\pi^2}, \quad (1)$$

де $\Delta\omega$ – величина неузгодження сигналів по частоті; T – період сигналу.

Відношення сигнал/шум при наявності неузгоджень можливо представити у вигляді:

$$\mu = \mu_0 R^2(\Delta\omega), \quad (2)$$

де $R^2(\Delta\omega)$ – квадрат амплітуди центрального піку функції невизначеності при наявності неузгоджень $\Delta\omega$; μ_0 – відношення сигнал/шум в ідеальному випадку.

В [5] показано, що ймовірність похибки приймання символу інформації має вигляд

$$P_{\text{пох.е}} = 0,5 \exp \left\{ -\frac{P_c T_{\text{інф}}}{2N_0} \left(1 - \frac{(\Delta\omega T_{\text{інф}})^2}{4\pi^2} \right)^2 \right\}, \quad (3)$$

де $T_{\text{інф}}$ – тривалість символу інформації; N_0 – спектральна щільність шуму на вході інформаційного каналу; P_c – потужність сигналу на вході каналу.

Аналіз виразу (3) показує, що $P_{\text{пох.е}}$ має мінімум по $T_{\text{інф}}$. Знайдемо цей мінімум, використовуючи стандартну процедуру $dP_{\text{пох.е}}/dT_{\text{інф}} = 0$.

Застосовуючи логарифмування та диференціювання, одержимо

$$\frac{dP_{\text{пох.е}}}{dT_{\text{інф}}} = -\frac{P_c}{2N_0} + \frac{3P_c \Delta\omega^2 T_{\text{інф}}^2}{4\pi^2 N_0} - \frac{5P_c \Delta\omega^4 T_{\text{інф}}^4}{32\pi^2 N_0} = 0.$$

Здобудемо корені квадратного рівняння:

$$T_{\text{інф}1} = \frac{2\pi}{\sqrt{5}\Delta\omega}; \quad T_{\text{інф}2} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \quad (4)$$

Другий корінь при підстановці в рівняння (3) дає ймовірність, яка дорівнює $P_{\text{пох.е}} = 0,5$ і є верхньою межею для ймовірності похибки, тому вірним є перший корінь.

Розрахунки ймовірності похибки на елемент інформації при змінній величині $T_{\text{інф}}$ наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Ймовірність похибки на елемент інформації

$T_{\text{інф}}$	10^{-6}	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-4}$	$3,74 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$P_{\text{пох.е}}$	$4,9 \cdot 10^{-1}$	$4,4 \cdot 10^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
$T_{\text{інф}}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$1,3 \cdot 10^{-2}$
$P_{\text{пох.е}}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	10^{-11}	$9 \cdot 10^{-28}$	$1,6 \cdot 10^{-54}$	$1,4 \cdot 10^{-70}$

Аналіз приведених даних свідчить, що тривалість символу інформації в суттєвому ступеню впливає на величину ймовірності похибки. Тому слід вибирати цю тривалість, виходячи із заданих величин дисперсії похибки, яка однозначно пов'язана з ймовірністю похибки.

Для СРС з ШШС наявність каналу вимірювання дальності є обов'язковою. Тому, враховуючи вплив обох вимірювальних каналів (дальності та швидкості), загальний вираз для ймовірності похибки приймання символу інформації можливо представити у вигляді:

$$P_{\text{пох.е}} = 0,5 \exp \left\{ -\frac{P_c T_{\text{інф}}}{2N_0} \left(1 - \frac{\Delta\omega^2 T_{\text{інф}}^2}{4\pi^2} \right)^2 \exp(-4\pi^2 F^2 \sigma_\tau^2) \right\}, \quad (5)$$

де F – частота сигналу на виході підсилювача проміжної частоти (тобто на вході системи слідкування за затримкою сигналу); σ_τ^2 – дисперсія похибки визначення затримки сигналу.

При цьому дисперсія похибки передавання числа N дорівнює

$$\sigma_N^2 = (M^2 / 3) \cdot P_{\text{пох.е}}. \quad (6)$$

Знову-таки, визначена дисперсія має мінімум в залежності від значення $T_{\text{інф}}$. Оптимальне з точки зору мінімуму дисперсії (6) значення $T_{\text{інф}}$, визначається співвідношенням [5]

$$T_{\text{інф}} = \frac{2\pi}{\sqrt{5}\Delta\omega} \sqrt{1 + 0,2\sqrt{5}\pi F^2 \left(\frac{\Delta\dot{N}_0 \tau_0^2}{c \cdot P_c} \right)^{2/3} \left(1 + \frac{\sqrt{5}N_0 \Delta\omega}{\pi P_c} \right)^{-1/3}}, \quad (7)$$

де c – швидкість світла.

Значення $T_{\text{інф}}$, визначене останньою формулою, для забезпечення прийняттого значення $P_{\text{пох.е}}$ повинно бути в межах $T_{\text{інф}} = 10^{-1} \div 10^{-3}$.

Між тим, з фізичної точки зору визначене обмеження величини $T_{\text{інф}}$ викликано прив'язуванням цієї величини до інтервалу накопичення сигналу у вимірювальних каналах. Але в реальних ситуаціях, як показує аналіз СРС з ШШС [1–3], такої прив'язки, як правило, не буває. Більш того, дослідження відношення (5) на визначеному інтервалі $T_{\text{інф}}$ показує, що різкий сплеск дисперсії похибки не може бути пояснений фізично достатньо коректно. Як слід, необхідно припустити, що вихідне співвідношення (1) справедливе тільки на обмежених ділянках, а з'явлення нового сплеску функції взаємної кореляції пов'язано з аномальними викидами. При аналізі СРС слід також звертати увагу на похибки вимірювальних каналів за рахунок впливання каналу передавання інформації. Так, дисперсія сумарної похибки каналу дальності при впливанні каналу передавання інформації визначається співвідношенням [5]

$$\sigma_{\Sigma D}^2 = \left(\frac{\Delta\dot{D}}{4\Delta f_{\text{ш}}} \right)^2 + \frac{c^2 \tau_0^2 N_0 (1 + 2\Delta F N_0 / P_c)}{8P_c} \Delta f_{\text{ш}}. \quad (8)$$

При цьому мінімальне значення дисперсії (при оптимальному значенні ефективної смуги шуму $\Delta f_{\text{ш}}$)

$$\sigma_{\Sigma \tau}^2 \cong 0,2 \frac{[\Delta\dot{D} \tau_0^2 N_0 (1 + 2\Delta F N_0 / P_c)]^{2/3}}{(c \cdot P_c)^{2/3}}, \quad (9)$$

де \dot{D} – похибка визначення радіальної швидкості; τ_0^2 – тривалість елементарного символу псевдовипадкової послідовності; $\Delta f_{\text{ш}}$ – смуга пропускання фільтрів в каналі вимірювання дальності.

Аналогічно можливо розглянути дисперсію похибки вимірювання радіальної швидкості [5]

$$\sigma_{\Sigma \dot{D}}^2 = \frac{\lambda_0^2 N_0 \Delta f_{\text{ш}} (1 + N_0 / (2P_c T_{\text{інф}}))}{P_c (\pi T_{\text{інт}})^2} + \left(\frac{\ddot{D}}{\Delta f_{\text{ш}}} \right)^2, \quad (10)$$

де $T_{\text{інт}}$ – стала інтегрування каналу швидкості; \ddot{D} – третя похідна від функції дальності.

Застосуємо співвідношення (1), (2) для виявлення похибок вимірювальних каналів. Одержимо:

$$\sigma_{\Sigma D}^2 = \left(\frac{\Delta \dot{D}}{4\Delta f_{\text{ш}}} \right)^2 + \frac{c^2 \tau_0^2 N_0 \left(1 + \frac{2\Delta F N_0}{P_c} \right)}{8P_c \left(1 - \frac{(\Delta \omega T_{\text{инт}})^2}{4\pi^2} \right)^2} \Delta f_{\text{ш}}; \quad (11)$$

$$\sigma_{\Sigma f}^2 = \frac{N_0 \Delta f_{\text{ш}} \left(1 + \frac{N_0}{2P_c T_{\text{инф}}} \right)}{P_c \left(1 - \frac{(\Delta \omega T_{\text{инт}})^2}{4\pi^2} \right)^2 (\pi T_{\text{инт}})^2} + \left(\frac{\ddot{D}}{\Delta f_{\text{ш}}} \right)^2. \quad (12)$$

Розрахунки показують, що досить коректного тлумачення визначених сплесків похибок в вимірювальних каналах, окрім можливих аномальних викидів, або недостатньо обґрунтованих вимог до величин $\Delta \omega$ та $T_{\text{инт}}$, уявити неможливо. Так, якщо вважати, що величина $\left(1 - \frac{(\Delta \omega T_{\text{инт}})^2}{4\pi^2} \right) \geq 0$, то при $T_{\text{инт}} \geq 30$ мс виходить, що

$$\Delta f = 1 / (2\pi) \leq 33 \text{ Гц}. \quad (13)$$

У той же час, величину останньої нерівності можливо оцінити з вимог, що пред'являються сьогодні до СРС. Так, в роботі [6] доведено, що точність вимірювання радіальної швидкості має бути $\sigma_{\dot{D}} \leq 10$ см/с. При цьому для штатних умов роботи СРС ($f_0 = 1,5 \cdot 10^{10}$ Гц) одержимо

$$\sigma_f = \sigma_{\dot{D}} \cdot (f_0 / c) = 0,1 \cdot (1,5 \cdot 10^{10} / 3 \cdot 10^8) \approx 5 \text{ Гц}, \quad (14)$$

що майже у 7 разів розходиться з величиною, що одержана при використанні співвідношення (13).

Висновки

В роботі проведено аналіз математичного апарату визначення основних показників якості функ-

ціонування СРС. Обмеження величини тривалості символу інформації для забезпечення прийнятої ймовірності помилки його прийому призводить до збільшення дисперсії похибки. Тому, відомі співвідношення в даних умовах є некоректними. У той же час теорія синтезу ІВС з ІППС показала, що схеми фільтрації навігаційних функцій в каналах приймання таких систем пов'язані одна з іншою як через вхідний сигнал, так і через додаткові необхідні зв'язки. При цьому з'явлення похибок синхронізації в одному каналі приводить до додаткових похибок в іншому каналі. Тому в наступному доцільно розглянути вплив зазначених неузгоджень з урахуванням визначених вище функціональних зв'язків.

Список літератури

1. Хомяков Э.Н. Измерительно - информационные радиосистемы / Э.Н. Хомяков. – Х.: ХВКИУ РВ, 1985. – 220 с.
2. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы / В.А. Чердынцев. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 370 с.
3. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем / Ю.С. Лезин. – М.: Радио и связь, 1986. – 280 с.
4. Варакин Л.Е. Системы связи с ШПС / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
5. Чумак Б.А. Оценка эффективности многокомпонентных информационно-измерительных систем / Б.А. Чумак, А.В. Дремлюга // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1998. – Вып. 3 (11). – С. 46-49.
6. Чумак Б.О. Оценка качества работы радиотехнических станций при выявлении та супроводі космічних об'єктів / Б.О. Чумак, О.М. Роянов, І.Г. Лисаченко // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: XV ІС, 2005. – Вып. 4 (44). – С. 96-103.

Надійшла до редколегії 21.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ОБЩИХ РАССОГЛАСОВАНИЙ

Н.В. Бархударян

Проведен анализ математического аппарата определения основных показателей качества функционирования совмещенной радиотехнической системы в условиях влияния общих рассогласований шкалы времени и частоты средств единого времени. Показано, что ограничение величины длительности символа информации для обеспечения принятой вероятности ошибки его приема в ряде случаев приводит к резкому увеличению дисперсии погрешности, которая не может быть обоснована физически достаточно корректно, а всплеск функции взаимной корреляции связан с аномальными выбросами. Таким образом, известные соотношения, которые применяются в данное время, в данных условиях не являются корректными. Целесообразно предложить более корректную методику определения погрешности совмещенной радиотехнической системы за счет влияния рассогласований по частоте и времени.

Ключевые слова: совмещенная радиотехническая система, показатель качества функционирования, широкополосный шумоподобный сигнал.

ANALYSIS OF MATHEMATICAL APPARATUS OF THE QUALITY FUNCTIONING DETERMINATION OF COMBINED RADIO ENGINEERING SYSTEM IN THE CONDITIONS OF GENERAL MISMATCHES INFLUENCE

N.V. Burkhudaryan

Analysis of mathematical apparatus of basic quality indexes determination of combined radio engineering system operation is represented in the conditions of general time-scale and frequency mismatch influence of universal time facilities. The article shows that limitation of an information symbol duration which is used for ensuring accepted error probability level of its reception can lead to abrupt increase of error dispersion. This increase can not be correctly justified from physical point of view and the cross-correlation function splash is linked with anomalous discharges. Thus, usage of used known mathematical methods for these conditions is not correct. It is expedient to offer more correct error determination method of the combined radio engineering system in consideration of frequency and time mismatch influence.

Keywords: combined radio engineering system, index of quality of functioning, broadband noise-type signal.