ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 621.317

В.П. Бабак, чл.-кор. НАН України
Ю.В. Куц, канд. техн. наук

ВИКОРИСТАННЯ КОРИГУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ У ФАЗОМЕТРІЇ

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: iidsu@ukrpost.net

Запропоновано використання коригуючих властивостей числової системи залишкових класів для багаточастотного методу усунення неоднозначності вимірювання великих фазових зсувів сигналів.

Вступ

Застосування теорії чисел для розв'язування задач фазометрії надає фазовим методам певні нові властивості і сприяє розширенню області їх застосування. Наприклад, використання системи залишкових класів (СЗК) дозволяє вирішити питання завадостійкого кодування інформації в системах передачі з фазовою модуляцією, забезпечити прихованість, виявляти і коригувати помилки під час передавання інформації, визначати фазові зсуви $\Phi(t) > 2\pi$ у задачах прецизійного вимірювання відстані, довжини, часової затримки, електричної довжини кабелю тощо [1–4].

Накопичений за час t фазовий зсув визначають за формулою

$$\Phi(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t) = 2\pi k(t) + \varphi(t),$$

де $k(t) \in N$ – кількість цілих фазових циклів; $\varphi(t)$ – фазовий зсув в інтервалі $[0,2\pi)$ між гармонічними сигналами:

$$u_1(t) = U_1 \cos\Phi_1(t);$$
$$u_2(t) = U_2 \cos\Phi_2(t),\ \ t \in [0,\infty), \qquad (1)$$

U_1, U_2 – амплітуди сигналів; $\Phi_1(t), \Phi_2(t)$ – фазові характеристики сигналів.

У науково-технічній літературі функція $\Phi(t)$ дістала назву кумулятивного фазового зсуву (КФЗ), оскільки $\Phi(t) >> 2\pi$ [5].

Сутність СЗК полягає у зображенні цілих чисел A з діапазону $A \in [0, A_р)$, де $A_р$ – границя робочого діапазону, лишками

$$\{\alpha_i = A(\bmod n_i), i = \overline{1,m}\},$$

які утворюються діленням A на взаємопрості цілі числа $n_1,...n_m$ – модулі СЗК.

У фазометрії початковий фазовий зсув сигналів (1) також є результатом ділення фазових характеристик на модуль 2π:

$$\varphi_1(t) = \Phi_1(t)(\bmod 2\pi) = \Phi_1(t) - 2\pi\left[\frac{\Phi_1(t)}{2\pi}\right]^+;$$

$$\varphi_2(t) = \Phi_2(t)(\bmod 2\pi) = \Phi_2(t) - 2\pi\left[\frac{\Phi_2(t)}{2\pi}\right]^+,$$

де $[\cdot]^+$ – операція вилучення цілої частини числа.

Один із відомих способів вимірювання КФЗ пов'язаний з виконанням фазових вимірювань у межах $[0,2\pi)$ і визначенням $k(t)$ за результатами цих вимірювань [6].

У праці [3] показано, що вибір значень частот та дискретності вимірювання фазових зсувів $\Delta\varphi_i$ за формулами

$$f_i = \frac{1}{n_i \tau_o}; \qquad (2)$$

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{n_i},\ \ i = \overline{1,m},$$

де τ_o – інтервал часу, якому кратні періоди гармонічних сигналів, дозволяє вирішити задачу визначення $\Phi(t) > 2\pi$ у багаточастотному методі так само, як і задачі відновлення цілого числа A з його представлення лишками

$$A_{СЗК} = (\alpha_1,...,\alpha_i,...\alpha_m).$$

У статичному режимі значення лишків обчислюють за результатами фазових вимірювань:

$$\alpha_i = \left[\frac{\varphi_i}{\Delta\varphi_i}\right]^+,$$

де φ_i – фазовий зсув гармонічних сигналів на частоті f_i.

Результат вимірювання КФЗ на цій частоті формується як

$$\Phi_i = A\Delta\varphi_i = A\frac{2\pi}{n_i},$$

тобто без розділу на k_i і φ_i, що відбувається в інших способах і вимагає додаткового узгодження цих величин, оскільки похибки вимірювання φ_i можуть призвести до помилок визначення $k(t)$.

Отже, визначення $\Phi(t)$ подібне відновленню числа A з його представлення $A_{\text{СЗК}}$. Маємо відповідність:

$n_i \Rightarrow f_i$;

$a_i \Rightarrow \varphi_i$;

$A \Rightarrow \Phi$.

Однозначний розв'язок задачі відновлення числа A з його представлення лишками $(\alpha_1,...,\alpha_i,...\alpha_m)$ можливий за умови, коли модулі системи є взаємно простими числами, а їх добуток $\prod_{i=1}^{m} n_i \geq A_{\text{р}}$ [1; 7]. При їх виконанні відновлення числа відбувається за формулою

$$A = \left[\sum_{i=1}^{m+1} \alpha_i B_i\right] (\operatorname{mod} A_{\text{р}}), \qquad (3)$$

де $(B_1,...,B_{m+1})$ – система ортонормованих базисів для обраної системи модулів.

Доповнення СЗК додатковим модулем $n_{m+1} > n_i$, $i = \overline{1,m}$ дозволяє виявити довільну однократну помилку, тобто помилку в одному довільному лишку, а в ряді випадків – і виправити помилку [1].

Виявлення складніших помилок (у двох чи більше лишках) вимагає збільшення кількості модулів.

Отже, застосування СЗК у задачах фазових вимірювань дозволяє не тільки знайти значення КФЗ

$$\Phi(t) = 2\pi k(t) + \varphi(t),$$

але й контролювати правильність визначення $k(t)$, виявляти і коригувати можливі помилки його визначення. Ця задача особливо актуальна при виконанні вимірювань в умовах дії шумів і завад, а також тоді, коли повторні вимірювання неможливі.

У статті досліджуються можливості корекції помилкового результату вимірювання у випадку представлення фазових вимірювань у СЗК.

Постановка задачі

У статичному режимі кумулятивний фазовий зсув $\Phi_i = A\Delta\varphi_i$ визначається за результатами багаточастотних фазових вимірювань між сигналами виду (1) на частотах, що вибрані відповідно до умови (2). Максимальне значення КФЗ не перевищує $A_{\text{р}}\Delta\varphi_i$, тобто $A < A_{\text{р}}$. За результатами вимірювань сформовано представлення числа $A = (\alpha_1,...,\alpha_m,\alpha_{m+1})$ лишками від його ділення на взаємно прості цілі числа $n_1,...,n_m,n_{m+1}$, причому $\prod_{i=1}^{m} n_i > A_{\text{р}}$. У представленні числа один *i*-й лишок може бути спотвореним, тобто представлення може мати вигляд $(\alpha_1,...,\tilde{\alpha}_i,...,\alpha_{m+1})$, де $\tilde{\alpha}_i \neq \alpha_i$. Необхідно виявити спотворений лишок, виправити помилку і подати результат вимірювання з підтвердженням його вірогідності.

Розв'язок

Будемо дотримуватися запропонованої в праці [1] термінології. Інтервал представлення чисел $[0, A_{\text{р}})$, обмежений значенням $A_{\text{р}} = \prod_{i=1}^{m} n_i$, називатимемо робочим діапазоном, цілі числа з інтервалу $[(0, A_p)$ – правильними числами, інтервал $[0, A_n)$, обмежений значенням $A_n = \prod_{i=1}^{m+1} n_i$ – повним діапазоном; цілі числа з інтервалу $[A_{\text{р}}, A_n)$ – неправильними.

Систему модулів $(n_1,...,n_i,...,n_{m+1})$, яка задовольняє умову $n_1 < n_2 < ... < n_{m+1}$, називатимемо упорядкованою, число $A_i = (\alpha_1,...,\alpha_{i-1},\alpha_{i+1},...,\alpha_{m+1})$, яке отримано з A вилученням лишку α_i– проекцією числа A за модулем n_i.

У працях [1; 4] викладено і доведено теорему, яка стверджує, що довільне спотворення одного з лишків у представленні $A_{\text{СЗК}} = (\alpha_1,...,\alpha_i,...,\alpha_{m+1})$ правильного числа за системою модулів $(n_1,...,n_i,...,n_{m+1})$ з одним додатковим модулем $n_{m+1} > n_i$, $i \in (1,m)$ перетворює число в неправильне $\tilde{A}_{\text{СЗК}} = (\alpha_1,...,\tilde{\alpha}_i,...,\alpha_{m+1})$. Ця теорема дозволяє виявити довільну помилку в довільному лишку. Ознакою такої помилки є належність відновленого числа до діапазону $\tilde{A} \in [A_{\text{р}}, A_n)$.

Природно, що корекція помилки потребує додаткових обчислень. Одним з ефективних способів виявлення і виправлення помилок у СЗК є метод зведення лишків у представленні числа A до нуля у всіх розрядах, крім додаткового контрольного. Цей спосіб дістав назву "нуль-спосіб порівняння чисел", або просто "нуль-спосіб" [1].

Сутність способу полягає в послідовному, розряд за розрядом, переході від вихідного представлення числа $(\alpha_1,...,\alpha_m,\alpha_{m+1})$ до числа $(0,...,\alpha_m,\alpha_{m+1})$, кратного n_1, потім до числа $(0,0,...,\gamma_{m+1})$, кратного $n_1 n_2$, за допомогою послідовного віднімання певних чисел, що називаються константами нуль-способа. Ці константи обираються як найменші можливі для виконання даної операції, числа. Виконання цієї умови дає можливість результату обчислень залишитись у межах робочого діапазону. Загальна кількість числових констант дорівнює $\sum_{i=1}^{m} n_i - m$.

Отриманий під час реалізації нуль-способа результат не залежить від порядку застосування констант і в той же час дає можливість визначити набір можливих помилок $\Delta\alpha_i, i=\overline{1,m}$, які призводять до певного значення γ_{m+1}. Підгрунтям такої можливості є теорема, яку наведемо без доведення [1].

Теорема 1. Якщо в упорядкованій системі модулів $(n_1,...,n_i,...,n_{m+1})$ задано неправильне число $\widetilde{A}=(\alpha_1,...,\widetilde{\alpha}_i,...,\alpha_{m+1})$ з рівною $\Delta\alpha_i$ помилкою в i-му розряді за модулем n_i, тобто $\widetilde{\alpha}_i=\alpha_i+\Delta\alpha_i(\mathrm{mod}\, n_i)$, і якщо в результаті застосування нулєспособу числа $\widetilde{A}$ отримано число $(0,...,0,\gamma_{m+1})$, то число γ_{m+1} зв'язане з помилкою таким співвідношенням

$$\gamma_{m+1}=\left[\frac{\Delta\alpha_i m_i n_{m+1}}{n_i}\right]^{+}(\mathrm{mod}\, n_{m+1})+\delta, \qquad (4)$$

де $\delta=\overline{0,1}$, m_i – вага i-го ортонормованого базиса, яка розраховується за формулою

$$m_i=\frac{B_i n_i}{A_\text{р}}. \qquad (5)$$

Формула (4) дозволяє вже на етапі проектування скласти таблицю можливих помилок залежно від γ_{m+1} і користуватися нею для їх виправлення.

Табл.1 і рис.1 пояснюють нуль-спосіб.

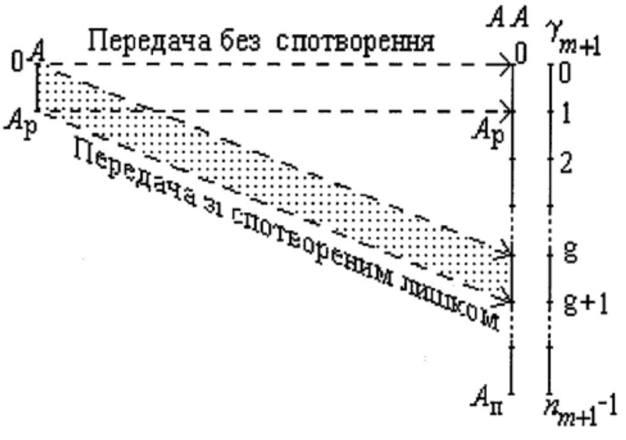

Рис.1. Розподіл помилок залежно від γ_{m+1}

За відсутності помилки $A\in[0,A_\text{р})$. Такій події відповідає значення $\gamma_{m+1}=0$. Кожна з можливих помилок переводить правильне число A в неправильне $\widetilde{A}$, яке належить до одного з інтервалів: $[A_\text{р},2A_\text{р})$, $[2A_\text{р},3A_\text{р}),...,[mA_\text{р},(m+1)A_\text{р})$. Номер інтервала збігається з γ_{m+1}, що формується за допомогою нуль-способу, і дозволяє визначити сукупність модулів з помилками, а також величину цих помилок.

Послідовність операцій коригування спотворених лишків і отримання правильного результату показано на рис. 2.

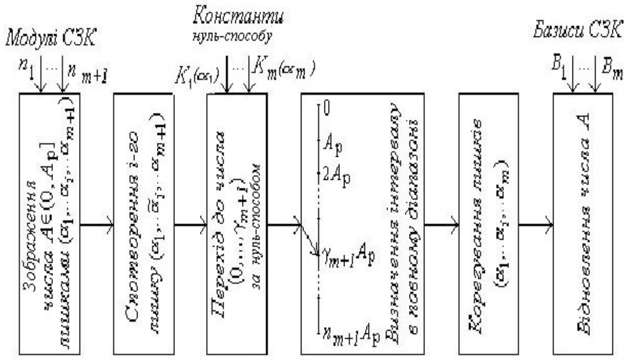

Рис.2. Коригування спотворених лишків за нуль-способом

Перехід до числа $(0,...,0,\gamma_{m+1})$ виконується з допомогою констант нуль-способу $K_1,...,K_m$, які розраховуються на стадії розробки системи і зберігаються впродовж усієї роботи. Отримане в результаті застосування нуль-способу число γ_{m+1} визначає набір можливих помилок, які також розраховуються на етапі проектування і зберігаються в системі у вигляді таблиці. Ідентифіковане значення помилки використовується для коригування числа і отримання його правильного представлення $(\alpha_1,...,\alpha_m,\alpha_{m+1})$. Число A відновлюється в позиційній системі числення за формулою (3).

Таблиця 1

γ_{m+1}	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_2$	⋮	$\Delta\alpha_{m+1}$
0	0	0	⋮	0
1	×	×	⋮	1
2	×	×	⋮	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
g	×	×	⋮	g
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$n_{m+1^{-1}}$	×	×	⋮	$n_{m+1^{-1}}$

Методика виконання нуль-способу включає такі складові:

на етапі підготовки:

– розрахунок констант нуль-способу;

– визначення розподілу помилок у повному діапазоні;

на етапі вимірювання:

– застосування нуль-способу до $A_{\text{СЗК}}$ і визначення γ_{m+1};

– визначення сукупності можливих помилок;

– локалізація помилки;

– виправлення помилки.

Розглянемо приклад застосування нуль-способу.

Приклад 1. Маємо систему модулів $n_1 = 5$, $n_2 = 6$, $n_3 = 7$, $n_4 = 11$ з робочим діапазоном

$$A_{\text{р}} = n_1 n_2 n_3 = 210,$$

повним діапазоном

$$A_{\text{п}} = n_4 A_{\text{р}} = 2310.$$

Ортонормовані базиси для системи модулів (5,6,7,11): $B_1 = 1386$, $B_2 = 385$, $B_3 = 330$, $B_4 = 210$. Береться число $A = 113$. Замість правильного представлення $A_{\text{СЗК}} = (3,5,1,3)$ цього числа прийнято $\widetilde{A}_{\text{СЗК}} = (3,5,6,3)$ з помилкою $\Delta\alpha_3 = 5$ у третьому лишку.

Під час відновлення числа без корекції маємо:

$$\hat{A} = (3 \cdot 1386 + 5 \cdot 385 + 6 \cdot 330 + 3 \cdot 210) \bmod 2310 = $$
$$= 1763 > A_{\text{р}}.$$

Необхідно знайти і виправити помилку й відновити правильне значення числа A.

Розраховані за формулою (5) ваги ортонормованих базисів становлять:

$m_1 = 3$, $m_2 = 1$, $m_3 = 1$, $m_4 = 1$.

Розраховані константи нуль-способу наведені в табл. 2, а розподіл можливих помилок $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2$, $\Delta\alpha_3, \Delta\alpha_4$, у відповідних лишках числа – в табл. 3.

Таблиця 2

$K_1(\alpha_1)$		$K_2(\alpha_2)$		$K_3(\alpha_3)$	
A_{10}	$A_{\text{СЗК}}$	A_{10}	$A_{\text{СЗК}}$	A_{10}	$A_{\text{СЗК}}$
1	1,1,1,1	25	0,1,4,3	120	0,0,1,10
2	2,2,2,2	20	0,2,6,9	30	0,0,2,8
3	3,3,3,3	15	0,3,1,4	150	0,0,3,7
4	4,4,4,4	10	0,4,3,10	60	0,0,4,5
		35	0,5,0,2	180	0,0,5,4
				90	0,0,6,2

Табл. 3 розраховувалася за формулою (4) для всіх можливих значень помилок:

$\Delta\alpha_i \in [1, n_i - 1]$, $i = \overline{1, m}$.

Під час складання таблиці враховано, що кожному значенню γ_4 може відповідати помилка за контрольним модулем n_4, що дорівнює $\Delta\alpha_4 = \gamma_4$. Застосуємо нуль-спосіб до числа $\widetilde{A}_{\text{СЗК}}$:

(3,5,6,3)
-(3,3,3,3)
(0,2,3,0)
-(0,2,6,9)
(0,0,4,2)
-(0,0,4,5)
(0,0,0,8)

Отже, $\gamma_4 = 8$. З табл. 3 видно, що такий результат можна отримати в чотирьох випадках:

1) $\Delta\alpha_1$ =3;
2) $\Delta\alpha_2$ =4;
3) $\Delta\alpha_3$ =5;
4) $\Delta\alpha_4$ =8.

Спробуємо зменшити кількість альтернатив шляхом обрахунку оцінки правильного результату $\hat{A}$ та його порівняння з A_p:

1) $\hat{A}_{\text{СЗК}} = (3,5,6,3) - (3,0,0,0) = (0,5,6,3)$, відновлення дає $\hat{A} = 2225 > A_{\text{р}}$;

2) $\hat{A}_{\text{СЗК}} = (3,5,6,3) - (0,4,0,0) = (3,1,6,3)$, відновлення дає $\hat{A} = 223 > A_{\text{р}}$;

3) $\hat{A}_{\text{СЗК}} = (3,5,6,3) - (0,0,5,0) = (3,5,1,3)$, відновлення дає $\hat{A} = 113 < A_{\text{р}}$;

4) $\hat{A}_{\text{СЗК}} = (3,5,6,3) - (0,0,0,8) = (3,5,6,6)$, відновлення дає $\hat{A} = 83 < A_{\text{р}}$.

Таблиця 3

γ_4	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\alpha_3$	$\Delta\alpha_4$
1	-	**1**	**1**	**1**
2	2	**1**	**1**	2
3	**2**	**2**	**2**	3
4	**4**	2	2,3	4
5	**4**	3	3	5
6	**1**	3	4	6
7	**1**	4	4,5	7
8	**3**	**4**	**5**	8
9	3	**5**	**6**	9
10	-	**5**	**6**	**10**

Таким чином, кількість можливих варіантів зменшилась до двох.

Отже, нуль-спосіб у загальному випадку не дає однозначної відповіді на запитання, який лишок в $A_{\text{СЗК}}$ є спотвореним. У ряді випадків це залежить від величини передбачуваної помилки.

Очевидно, що при вимірюванні фазових зсувів найбільш імовірними є малі похибки, тому найімовірніше очікувати, що спотвореним є лишок з мінімальним значенням $(\Delta\alpha_i)\bmod n_i$. У табл. 3 виділені найімовірніші значення помилок.

Для надійної локалізації лишка з помилкою необхідно виконати додаткову обробку одним зі способів: способом проекцій або способом множення на числа, кратні модулям СЗК [1].

Сутність способу проекцій полягає у формуванні проекцій числа, відновленні значень проекцій у позиційній системі числення й порівнянні результату з $A_{\text{р}}$. Теоретичне підгрунтя такої перевірки дає теорема.

Теорема 2. Якщо в упорядкованій системі модулів задано правильне число

$$A_{\text{СЗК}} = (\alpha_1, ..., \alpha_m, \alpha_{m+1}),$$

то проекції цього числа A_i за всіма модулями збігаються:

$$A = A_1 = A_2 = ... = A_{m+1} < A_{\text{р}}.$$

Отже, якщо $A > A_{\text{р}}$, а проекція $A_i < A_{\text{р}}$, то в i-му лишку можлива помилка. Ця властивість дозволяє за m обрахунків за формулою (3) визначити спотворені лишки $\tilde{\alpha}_i, i = \overline{1,m}$. Під час обрахунку A_i кожній модифікованій системі модулів $(n_2, n_3, ... n_{m+1}), (n_1, n_3, ... n_{m+1}), ..., (n_1, n_2, ... n_m)$ відповідає певна система ортонормованих базисів з різними границями робочого діапазону $A'_{\text{р}}$. Розглянемо застосування цього способу на прикладі.

Приклад 2. Для даних прикладу 1 розрахуємо проекції числа $\tilde{A}_{\text{СЗК}}$. Результати розрахунків зведені в табл. 4.

Таблиця 4

Модулі				Базиси	A_i	$A'_{\text{р}}$	$\hat{A}$
n_1	n_2	n_3	n_4				
-	6	7	11	(385,330,210)	(5,6,3)	462	377
5	-	7	11	(231,330,210)	(3,6,3)	385	223
5	6	-	11	(66,55,210)	(3,5,3)	330	113
5	6	7	-	(126,175,120)	(3,5,6)	210	83

Порівняння чисел $\hat{A}$ з $A_{\text{р}}$ дозволяє припустити можливість помилки в третьому чи четвертому лишках. Застосована в цьому прикладі перевірка також зменшила кількість варіантів до двох, але не дала чіткої вказівки на спотворений лишок. Такою перевіркою неможливо виявити спотворення в контрольному (четвертому) лишку, осільки для нього $A'_{\text{р}} = A_{\text{р}}$. Отже, завжди виконується одна умова: $\hat{A} = A_{\text{р}}$.

Одним із простих шляхів перевірки лишка за додатковим модулем є його "зміцнення", тобто гарантування його правильності. Це можна зробити, наприклад, повторним вимірюванням фазових зсувів на частоті f_{m+1} і подвійним формуванням додаткового лишка:

$$(\alpha_1, ..., \alpha_m, \alpha'_{m+1}, \alpha''_{m+1}).$$

Якщо $\alpha'_{m+1} = \alpha''_{m+1}$, приймається рішення про його правильність, у противному разі цей лишок вважається спотвореним.

Сутність способа множення на числа, кратні модулям СЗК, полягає у множенні $A_{\text{СЗК}}$ на такі числа K_i, $i = \overline{1,m}$, що $\frac{K_i}{n_i} \bmod n_i = 0$, тобто мають у представленні СЗК нуль в i-му лишку. Тому добуток $A_{\text{СЗК}} K_i$ буде мати нуль в i-му лишку. Якщо в числі $A_{\text{СЗК}}$ лишок $\tilde{\alpha}_i$ був спотворений, то в добутку він "обнуляється" і результат повертається до робочого діапазону. Природно, що робочий діапазон у цьому разі повинен бути розширений з урахуванням результату операції множення. Це можна зробити введенням ще одного додаткового модуля n_{m+2}. Тоді повний діапазон буде обмежений значенням $n_{m+1} n_{m+2} A_p$, а розширений робочий діапазон – $n_{m+1} A_{\text{р}}$.

Така система, крім властивості виправлення однократних помилок, дозволяє виявляти двократні чи більшої кратності помилки у q лишках, для яких

$$\prod_q n_q < n_{m+1} n_{m+2}.$$

Застосування цього способу розглянемо на прикладі.

Приклад 3. Доповнимо систему модулів прикладу 1 ще одним додатковим модулем $n_5 = 13$.

Для нової системи маємо:

$A_{\text{п}} = 30030$, $A_{\text{р}} = 2310$, $B_1 = 6006$, $B_2 = 5005$, $B_3 = 25740$, $B_4 = 16380$, $B_5 = 6930$.

Представлення числа $A = 113$ у новій системі, але з саме таким спотворенням $\Delta\alpha_3 = 5$, має вигляд: $\widetilde{A}_{СЗК}$=(3,5,6,3,9). Фактичний діапазон представлення чисел лишився без зміни: $A \in [0,210)$. Визначимо найменші константи для множення:

$K_1 = 5 = (0,5,5,5,5)$; $K_2 = 6 = (1,0,6,6,6)$;

$K_3 = 7 = (2,1,0,7,7)$; $K_4 = 11 = (1,5,4,0,11)$.

Діапазон чисел після множення обмежений значенням 210 · 11 = 2310 і не перевищує $A_р$.

За результатами множення $A_{СЗК}$ на константи маємо:

$A_{СЗК}K_1 = (0,1,2,4,6)$=13435;

$A_{СЗК}K_2 = (3,0,1,9,2)$=24854;

$A_{СЗК}K_3 = (1,5,0,10,11)$=791;

$A_{СЗК}K_4 = (3,1,3,0,8)$5533.

Тільки у випадку множення на K_3 отримуємо результат, який не перевищує $A_р$ і є правильним числом. Це свідчить про те, що спотвореним був саме третій лишок $\widetilde{\alpha}_3 = 6$.

Відновити число A можна і без виправлення лишка, якщо відновлення здійснити в новій системі модулів, наприклад, у системі (n_1, n_2, n_4), з якої виключений відповідний помилковому лишку модуль і робочий діапазон якої охоплює діапазон відновлюваних чисел. Для цієї системи маємо:

– робочий діапазон $A'_р = 330$;

– представлення числа $A'_{СЗК} = (3,5,3)$;

– базиси $B_1 = 66,\ B_2 = 55,\ B_3 = 210$.

У результаті відновлення за формулою (3) одержимо такий результат:

$(3 \cdot 66 + 5 \cdot 55 + 3 \cdot 210)\mathrm{mod}\,330 = 113$.

Отже, помилковий лишок виявлено і кінцевий результат отримано без помилки.

Розглянемо ще одну особливість виявлення помилок способом множення.

Складні помилки (у двох і більше лишках) можуть маскувати одна одну і не виявлятися перевіркою виконання співвідношення $A < A_р$. Однак множення представлення числа $\widetilde{A}_{СЗК}$ зі спотвореними лишками, серед яких є i-й, на константу K_i з нулем в i-му лишку дозволяє виявити складну помилку. Розглянемо приклад, який пояснює таку можливість.

Приклад 4. За основу візьмемо вихідні дані прикладу 3:

$n = (5,6,7,11,13)$, $A_п = 30030$, $A_р = 2310$,

$B_1 = 6006,\ B_2 = 5005,\ B_3 = 25740,$

$B_1 = B_4 = 16380$, $B_5 = 6930$.

У представленні числа

$A = 113$ [$A_{СЗК} = (3,5,1,3,9)$]

спотворено два лишка – $\Delta\alpha_1 = 3$, $\Delta\alpha_3 = 4$, отже, це число подається лишками $\widetilde{A}_{СЗК} = (1,5,5,3,9)$.

Відновлення числа $\widetilde{A}$ не дозволяє виявити помилку, оскільки воно знаходиться в межах робочого діапазону:

$$\widetilde{A} = (1 \cdot 6006 + 5 \cdot 5005 + 5 \cdot 25740 + 3 \cdot 16380 + $$
$$+ 9 \cdot 6930)\mathrm{mod}\,30030 = 971 < A_р.$$

Домножимо $A_{СЗК}$ на константу K_1:

$A_{СЗК}K_1 = (1,5,5,3,9) \cdot (0,5,5,5,5) = (0,1,4,4,6)$.

Відновимо цей результат у позиційній системі числення

$$\widetilde{A} = (0 \cdot 6006 + 1 \cdot 5005 + 4 \cdot 25740 + 4 \cdot 16380 + $$
$$+ 6 \cdot 6930)\mathrm{mod}\,30030 = 4855 > A_р.$$

Цей результат свідчить про те, що в останньому представленні числа є лишки з помилкою.

Способом множення можна виявляти складні помилки за такою ознакою: якщо відновлюване число до множення на константу належало робочому діапазону, а після множення на константу з нулем в i-му лишку виходить за границю робочого діапазону, то, по-перше, i-й лишок є спотвореним, по-друге, у представленні числа залишився ще хоча б один спотворений лишок.

Збільшення кількості додаткових (контрольних) модулів потребує проведення додаткових фазових вимірювань на допоміжних частотах. Це дозволяє застосувати способи корекції результатів багаточастотних фазових вимірювань і сприяє підвищенню вірогідності отримання правильного результату в задачі вимірювання великих фазових зсувів багаточастотним методом.

Уведення додаткових модулів потребує значних обчислювальних витрат. Тому в каналах передачі даних або фазових інформаційно-вимірювальних системах доцільно передбачити можливість відключення режиму корекції і його підключення на час передавання найбільш цінної інформації або на час проведення найвідповідальніших вимірювань.

Висновки

Процедури обчислень на ЕОМ при представленні числових даних у СЗК аналогічні обчисленню результатів багаточастотних фазових вимірювань. Розглянуто способи контролю правильності та корекції оцінки КФЗ сигналів при багаточастотних вимірюваннях – нуль-спосіб, способи проекцій та множення на додаткові константи.

Способи корекції потребують проведення додаткових вимірювань фазових зсувів на допоміжних частотах і дозволяють локалізувати і виправляти помилки під час визначення КФЗ.

Для виявлення однократних помилок в отриманому КФЗ за описаною методикою корекції результатів багаточастотних фазових вимірювань достатньо додаткового вимірювання на одній додатковій частоті.

Корекція помилки потребує не менше двох додаткових вимірювань на таких частотах.

Розглянуті приклади підтверджують коригуючі властивості СЗК для фазових вимірювань.

Запропоновані способи корекції результатів багаточастотних фазових вимірювань доцільно використовувати у фазових вимірювальних системах підвищеної надійності і точності.

Список літератури

1. *Акушский И.Я., Юдицкий Д.И.* Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Сов. радио, 1968. – 438 с.

2. *Куц Ю.В.* Застосування системи залишкових класів в задачах захисту інформації // Защита информации: Сб. науч. тр. НАУ.– 2003. – Вып. 10. – С.137 – 149.

3. *Бабак В.П., Куц Ю.В.* Метод однозначного визначення великих фазових зсувів сигналів // Вісн. НАУ.– 2003. – №1.– С. 3 – 8.

4. *Маевский С.М., Баженов В.Г., Батуревич Е.К., Куц Ю.В.* Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний. – К.: Вища шк., 1983.– 83 с.

5. *Pat.* 3512085 USA, МКИ^3 G01 R25/00. Cumulative Phase Meter Using Whole Cycle and Partial Cycle Comparison / L. Peterson Herbert, P.C. Washington, G. George – Опубл.12.05.70.– Off. Gasette, vol/ 874 – НКН 324 – 83.

6. *Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А*. Фазовый метод определения координат. –М.: Сов. радио, 1979.– 280 с.

7. *Виноградов И.М.* Основы теории чисел. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 176 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.03.

В.П. Бабак, Ю.В. Куц

Использование корректирующих свойств системы остаточных классов в фазометрии

Предложено использование корректирующих свойств числовой системы остаточных классов для многочастотного метода устранения неоднозначности измерения больших фазовых сдвигов сигналов.

V.P. Babak, Yu.V. Kuts

Usage of a residual classes system correcting properties in phase shift measuring

The correcting properties of a numeral residual classes systems for ilimination of measurements scattering at large phase shifts of signals has been presented.