

**МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ**

**Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного  
технічного університету України “Київський політехнічний інститут”**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
ВІЙСЬКОВОГО ІНСТИТУТУ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА ІНФОРМАТИЗАЦІЇ  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ “КИЇВСЬКИЙ  
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

52028

**Випуск № 3**

**Київ – 2003**

Київський політехнічний інститут  
УЧЕБНИЙ ЦЕНТР

Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” . – Випуск № 3. – Київ: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2003. – 200 с.

У збірнику опубліковані статті вчених, ад’юнктів і здобувачів інституту, в яких розглядаються питання побудови сучасних мереж та систем зв’язку, пеленгу і радіолокації, а також розробки автоматизованих систем управління зв’язком.

*Редакційна колегія:*

*Герасимов Б. М., д.т.н., професор (голова редколегії); Осинський Л.М., д.т.н., професор; (заступник голови редколегії); Міночкін А.І., к.т.н., (заступник голови редколегії); Креденцер Б.П., д.т.н., професор; Гостев В.І., д.т.н., професор; Жердев М.К., д.т.н., професор; Смирнов Ю.О., д.т.н., професор; Шохін Б.П., д.т.н., професор; Трифонов І.І., д.т.н., професор; Цібізов К.М., д.т.н., професор; Горицький В.М., д.т.н., професор; Богданов О.М., д.т.н., професор; Почерняєв В.М., д.т.н., професор; Бессалов А.В., д.т.н., професор; Шелепенко Ю.В., к.т.н., доцент; Субач І.Ю., к.т.н., доцент; Старков В.М., к.в.н., доцент; Яковлев К.І., (відповідальний редактор).*

Всі наукові статті, включені до збірника, прорецензовані фахівцями по галузям, та отримали позитивний відгук.

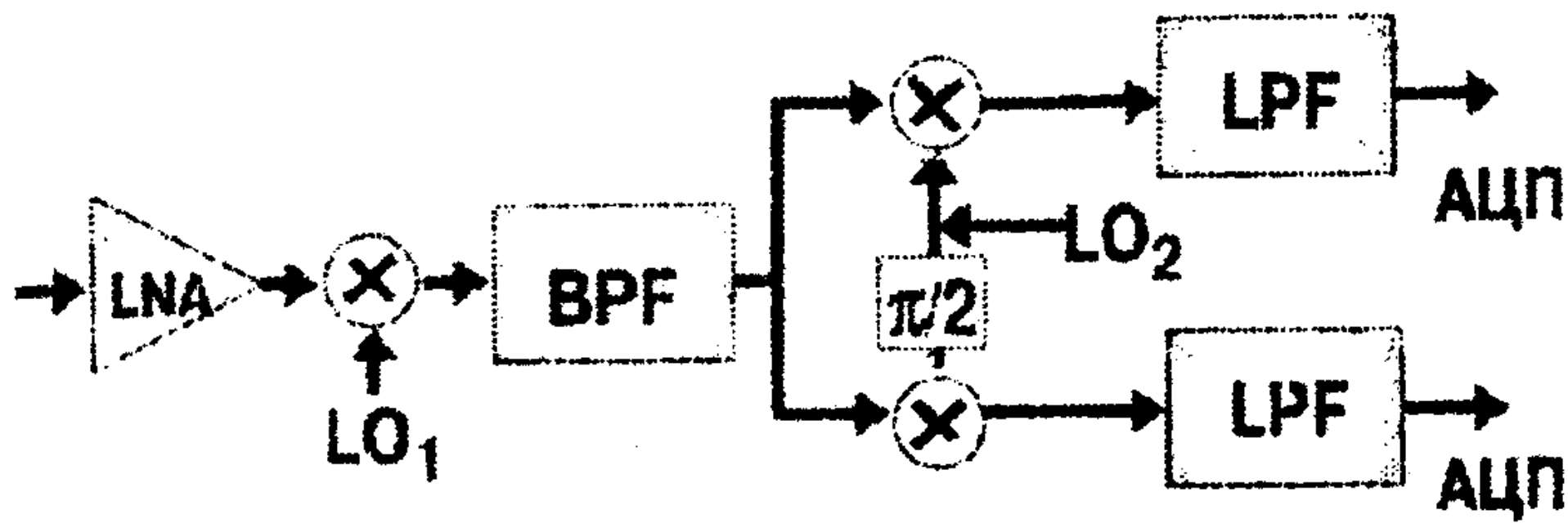
• Збірник затверджено на засіданні вченої ради інституту.

17.	Слюсар В.І., Солощев О.М., Тітов І.В. Спосіб корекції характеристик приймальних каналів цифрової антенної решітки.	124
18.	Слюсар І.І. Концепція перспективної системи тропосферного зв'язку з цифровим діаграмоутворенням.	133
19.	Столяр І.Л., Бондаренко Г.І. Особливості побудови пристроїв управління розподілом інформації мереж військового зв'язку.	138
20.	Сусь Б.А., Коломоєць В.В., Шут М.І., Сусь Б.Б. Збереження імпульсу фотона при масо-енергетичних перетвореннях.	150
21.	Тарашкевич С.С., Рижаків В.А.. Обґрунтування основних вимог до аналізу та синтезу функціональних структур технічного забезпечення зв'язку і автоматизованого управління військами.	154
22.	Толюпа С.В., Сухін А.В. Структура інформаційної мережі та показники її ефективності.	165
23.	Цибізов К.М., Льїнов М.Д., Бондар В.В. Розрахунок поляризатора на квадратному хвилеводі з погоджуючим елементом, у виді чвертьхвилевідного трансформатора.	176
24.	Шохін Б.П., Гоменюк Ю.А. Синтез алфавіту спеціальних умовних знаків на засобах візуалізації АСУ.	182
25.	Анотації	190

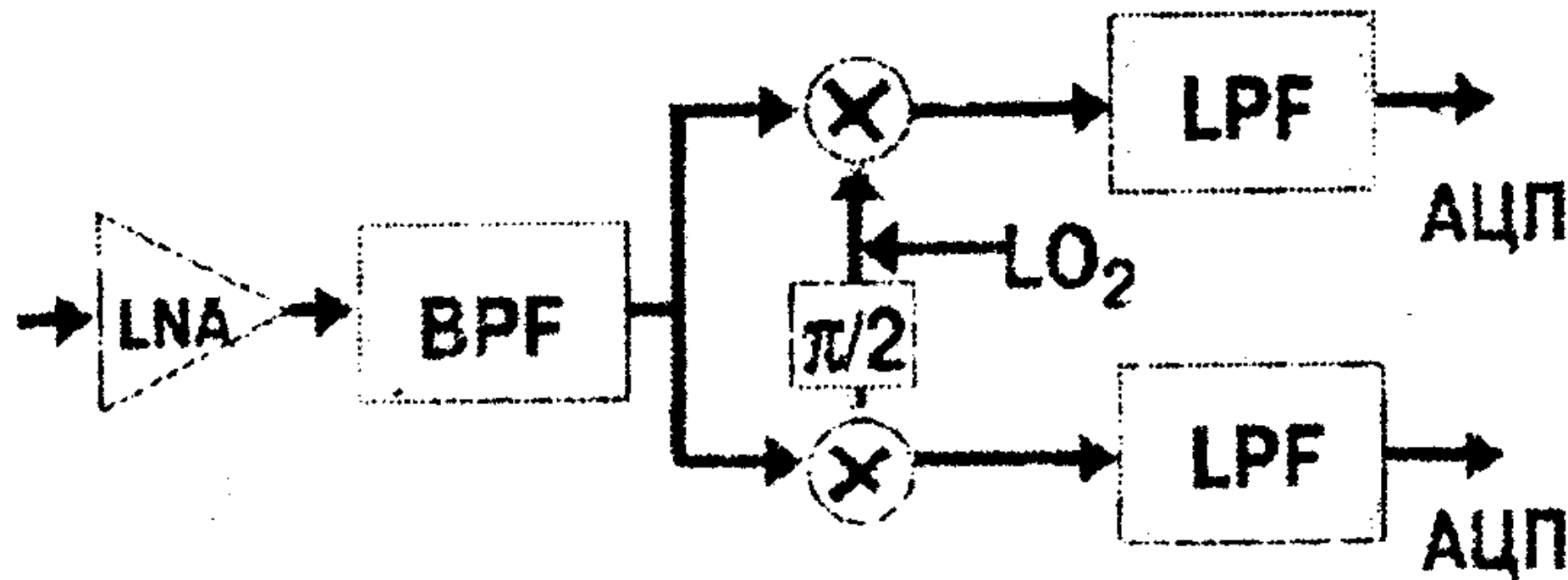
## СПОСІБ КОРЕКЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЙМАЛЬНИХ КАНАЛІВ ЦИФРОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

Для розширення функціональних можливостей перспективних систем мобільного стільникового зв'язку, наприклад, в інтересах рішення задач радіотехнічної і радіолокаційної розвідки [1], важливе значення має зниження апаратних помилок, що виникають при обробці сигналів. Одним із шляхів рішення цієї проблеми є застосування спеціальних процедур корекції характеристик приймальних каналів, оскільки неідентичності коефіцієнтів передачі приводять до викривлення сигнальних масивів і, отже, до інформаційних втрат. У цьому напрямку останнім часом ведуться інтенсивні дослідження, особливо щодо підвищення ідентичності характеристик приймальних каналів цифрових антенних решіток (ЦАР). Підтвердженням тому є робота [2]. Однак незалежно від прийнятої структури приймачів, що навантажуються до антенних елементів (одноканальна чи двоканальна з ортогональними каналами), дотепер основна увага приділялася компенсації міжканальних неідентичностей амплітудних і фазочастотних характеристик каналів ЦАР [2]. У той же час при аналоговій ортогоналізації сигналів, варіанти реалізації якої представлені на рис. 1, процедури корекції міжканальних неідентичностей не дозволяють усунути негативний вплив розходжень у коефіцієнтах підсилення квадратурних підканалів і порушення їх ортогональності.

Враховуючи, що можливості двоканального алгоритму обробки (рис. 1) значно перевершують одноканальну схему прийому в умовах широкопasmових сигналів, метою статті є розробка способу корекції неідентичностей квадратурних каналів при аналоговій ортогоналізації сигналів у приймальному тракті цифрових антенних решіток.



LNA – малошумящий усилитель  
 LO – местный гетеродин  
 BPF – полосовой фильтр  
 LPF – низкочастотный фильтр



LNA – малошумящий усилитель  
 LO – местный гетеродин  
 BPF – полосовой фильтр  
 LPF – низкочастотный фильтр

Рис. 1.

Як відомо, похибки, що виникають у приймачах з ортогональними каналами, умовно можна розділити на два класи: похибки, пов'язані з внутрішньоканальними неідентичностями приймачів, і похибки міжканальні. Основними джерелами внутрішньоканальних неідентичностей є розходження коефіцієнтів підсилення ортогональних каналів і помилка фазового зсуву на  $\frac{\pi}{2}$ , що вводиться в один із ортогональних каналів. До фазової похибки може бути віднесене і розходження фазових шляхів ортогональних каналів.

Якщо один канал прийняти за опорний, записавши напругу на його виході у вигляді

$$a_k(i) = a_c \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(f_{\text{пр}} + f_d\right) \cdot i \cdot T_{\text{ацп}} + \varphi_c\right) \quad (1)$$

де  $k$  – номер просторового каналу,  $i = 0, 1, 2, \dots, (I-1)$ ,

$I$  – кількість часових вибірок АЦП,

$a_c, \varphi_c$  – амплітуда і початкова фаза сигналу, відповідно;

$f_{\text{пр}}, f_{\text{д}}$  – проміжна частота приймача і доплерівська частота сигналу;

$T_{\text{ацп}}$  – темп оцифровки сигналу в АЦП,

то відносні неідентичності коефіцієнтів передач ортогональних каналів можна відобразити у вибірках другого каналу таким чином:

$$b'_k(i) = (1 + \Delta A) a_c \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(f_{\text{пр}} + f_{\text{д}}\right) \cdot i \cdot T_{\text{ацп}} + \left(\frac{\pi}{2} + \Delta\right) + \varphi_c\right), (2)$$

де  $\Delta$  – фазова похибка розквдратурення,

$\Delta A$  – абсолютне значення амплітудного викривлення.

Вплив внутрішньоканальних похибок на синтезовані за алгоритмом [3] ортогональні складові  $U_k^c(j)$ ,  $U_k^s(j)$  комплексної амплітуди напруги  $k$ -го просторового каналу в  $j$  – ому часовому стробі:

$$U_k^s(j) = \sum_{n=0}^{\frac{1}{2}-1} [a_k(2n) - b_k(2n+1)] \cdot (-1)^n,$$

$$U_k^c(j) = \sum_{n=0}^{\frac{1}{2}-1} [a_k(2n+1) + b_k(2n)] \cdot (-1)^n, (3)$$

перевірено за допомогою, розробленої в пакеті Mathcad програми. Результати дослідження приведені в таблицях 1 і 2. У першій відображений вплив фазової неідентичності ортогональних каналів, у другий – амплітудної, без урахування внутрішніх шумів приймачів.

Графік вибірок АЦП без викривлень синусоїдального сигналу ( $b_{21j}$ ) і з квадратурними похибками ( $b_{2j}$ ) приведений на рис. 2.

Таблиця №1. Вплив фазових неідентичностей ортогональних каналів.

$$(A=1, \varphi = -\pi/8, \Delta\psi = \arctg(U^s / U^c) - \varphi)$$

$\Delta$ , град	-18	-9	-4.5	0	4.5	9	18
$U^c$	26.949	28.424	29.038	29.564	29.999	30.34	30.733
$U^s$	-16.514	-14.483	-13.387	-12.246	-11.067	-9.858	-7.378
$U$	31.606	31.901	31.975	32	31.975	31.901	31.606
$\Delta U$ , %	-1.23	-0.31	-0.078	0	-0.078	-0.31	-1.23
$\Delta\psi$	-9	-4.5	-2.25	0	2.25	4.5	9

Таблиця № 2. Вплив амплітудних неідентичностей ортогональних каналів.

$$(A=1, \varphi = -\pi/8)$$

$(1+\Delta A)$	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
$\Delta A$ , %	-30	-20	-10	0	10	20	30
$U^c$	25.13	26.608	28.086	29.564	31.042	32.521	33.999
$U^s$	-10.409	-11.021	-11.634	-12.246	-12.858	-13.47	-14.083
$U$	27.2	28.8	30.4	32	33.6	35.2	36.8
$\Delta U$ , %	-15	-10	-5	0	5	10	15
$\Delta\psi$	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0

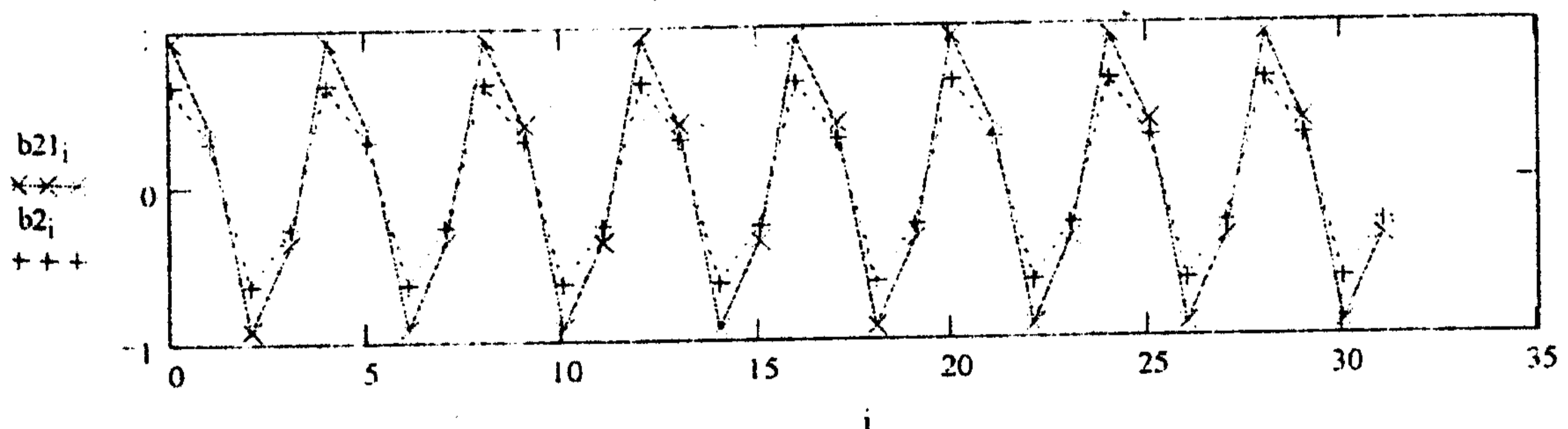


Рис. 2.

Результати свідчать про те, що:

по-перше, фазова квадратурна похибка приводить до амплітудних і фазових викривлень комплексної амплітуди сигналу;

по-друге, абсолютне значення фазового викривлення комплексної амплітуди сигналу в два рази менше значення фазової квадратурної похибки очевидно, за рахунок перерозподілу її по ортогональних каналах;

по-третє, з цієї ж причини абсолютне значення амплітудного викривлення комплексної амплітуди сигналу в два рази менше значення амплітудної квадратурної похибки;

по-четверте, амплітудна квадратурна похибка призводить, головним чином, до амплітудних викривлень результуючої комплексної амплітуди сигналу.

Для виключення впливу квадратурної неідентичності коефіцієнтів передач приймачів на комплексну амплітуду сигналу на вході цифрового сегмента обробки сигналів пропонується новий спосіб корекції. Першим кроком реалізації цього алгоритму є розрахунок амплітудної і фазової похибки по часових вибірках АЦП.

Використовуючи сусідні часові вибірки обох ортогональних каналів, і піддавши вирази (1), (2) тригонометричним перетворенням, можна одержати розрахункові формули для оцінювання фазової ( $\Delta^*$ ) і амплітудної ( $\Delta A^* = (1 + \Delta A)^*$ ) неідентичностей за довільними сусідніми у часі вибірками ( $i, i+1$ ):

$$\Delta^* = \operatorname{arctg}\left(\frac{a_i \cdot b_{i+1} + a_{i+1} \cdot b_i}{a_i \cdot b_i - a_{i+1} \cdot b_{i+1}}\right), \quad (4)$$

$$\Delta A^* = \sqrt{\frac{b_i^2 + b_{i+1}^2}{a_i^2 + a_{i+1}^2}}. \quad (5)$$

Оцінки квадратурних неідентичностей по сукупності серії з  $I$  вибірок можуть бути отримані за наступними формулами:

$$\Delta^* = \left( \sum_{i=0}^{I-1} \left( \operatorname{arctg}\left(\frac{a_i \cdot b_{i+1} + a_{i+1} \cdot b_i}{a_i \cdot b_i - a_{i+1} \cdot b_{i+1}}\right) \right) \right) : (I-1), \quad (6)$$



$$\Delta A^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{I-1} (b_i^2 + b_{i+1}^2)}{\sum_{i=0}^{I-1} (a_i^2 + b_{i+1}^2)}} \quad (7)$$

Аналіз отриманих формульних залежностей свідчить про те, що оцінки фазових неідентичностей ортогональних приймальних каналів не залежать від амплітудних неідентичностей і навпаки.

Результати перевірки запропонованих алгоритмів оцінювання квадратурних неідентичностей приймальних каналів при відсутності внутрішніх шумів наведені в таблицях 3 і 4.

Таблиця № 3. Результати оцінювання фазової неідентичності ортогональних приймальних каналів

Δ, град	-18	-9	-4.5	0	4.5	9	18
Δ*, град	-18	-9	-4.5	0	4.5	9	18

Таблиця № 4. Результати оцінювання амплітудної неідентичності ортогональних приймальних каналів

(1+ΔA)	0.7	0.8	0.9	0	1.1	1.2	1.3
ΔA*	0.7	0.8	0.9	0	1.1	1.2	1.3

Використовуючи отримані оцінки квадратурних неідентичностей, пропонується в реальному масштабі часу проводити відповідну корекцію фазових вибірок, що надходять з АЦП на вхід цифрового сегмента приймального тракту. В зв'язку з тим, що алгоритм знаходження оцінок квадратурних неідентичностей отриманий у припущенні відхилення

коефіцієнта передачі лише одного з приймальних каналів, корекцію часових вибірок логічно проводити в цьому ж каналі.

Для знаходження алгоритму корекції представимо поточну  $i$ -у вибірку (2) викривленого ортогонального каналу у вигляді:

$$b'_k(i) = (1 + \Delta A) a_c \cdot \left[ \sin \left( 2\pi \cdot \left( f_{\text{пр}} + f_d \right) \cdot i \cdot T_{\text{ацп}} + \left( \frac{\pi}{2} \right) + \varphi_c \right) \cdot \cos(\Delta) + \sin \left( 2\pi \cdot \left( f_{\text{пр}} + f_d \right) \cdot i \cdot T_{\text{ацп}} + \varphi_c \right) \cdot \sin(\Delta) \right] \quad (8)$$

На підставі (8) алгоритм корекції може бути записаний так:

$$b_{\text{кор}}(i) = \frac{b'(i)}{\Delta A^* \cdot \cos(\Delta^*)} + a(i) \cdot \text{tg}(\Delta^*) \quad (9)$$

де  $a(i)$  і  $b'(i)$  – часові вибірки АЦП на виході ортогональних приймальних каналів,

$\Delta^*$ ,  $\Delta A^*$  – розраховані за формулами (4), (5) чи (6), (7) оцінки фазової похибки розквadrатурення і абсолютної величини амплітудного викривлення.

Перевірка синтезованого алгоритму корекції проводилася розрахунковим шляхом у пакеті Mathcad. Результати корекції квадратурних неідентичностей ортогональних каналів за допомогою запропонованих алгоритмів при відсутності внутрішніх шумів приймачів показані в таблицях 5 і 6.

Порівняння таблиць 1, 2 і 5, 6 свідчить про ефективність розроблених алгоритмів корекції квадратурних неідентичностей ортогональних каналів.

Для зниження негативного впливу внутрішніх шумів приймального тракту на якість розрахунку коефіцієнтів корекції варто використовувати гармонійний контрольний сигнал, що на 20-25 дБ перевищує дисперсію шумів, а також застосовувати його когерентне накопичення.

Таблиця № 5. Корекція фазових неідентичностей ортогональних каналів.

$$(A=1, \varphi = -\pi/8, \Delta\psi = \arctg(U^S / U^C) - \varphi)$$

$\Delta$ , град	-18	-9	-4.5	0	4.5	9	18
$U^C$	29.564	29.564	29.564	29.564	29.564	29.564	29.564
$U^S$	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246
$U$	32	32	32	32	32	32	32
$\Delta U, \%$	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta\psi$	0	0	0	0	0	0	0

Таблиця № 6. Корекція амплітудних неідентичностей ортогональних каналів.

$$(A=1, \varphi = -\pi/8)$$

$(1+\Delta A)$	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
$\Delta A, \%$	-30	-20	-10	0	10	20	30
$U^C$	29.564	29.564	29.564	29.564	29.564	29.564	29.564
$U^S$	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246	-12.246
$U$	32	32	32	32	32	32	32
$\Delta U, \%$	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta\psi$	0	0	0	0	0	0	0

Таким чином, запропонований у статті метод корекції дозволяє зняти вимоги до ідентичності квадратурних каналів при аналоговій ортогоналізації сигналів у приймальних каналах ЦАР. В результаті зростає вартість багатоканального аналогового тракту перспективних систем мобільного стільникового зв'язку, з'являється можливість розширити смугу пропускання для одночасної роботи в декількох стандартах роботи сигналів, а також рішення на тлі цього задач радіотехнічної і локаційної розвідки.

## Література

1. Слюсар В.І., Тітов І.В. Спосіб виявлення повітряних цілей за допомогою систем стільникового зв'язку //Заявка на винахід України № 2002119018 від 12.11.2002. Позитивне рішення на видачу деклараційного патента від 19.03.2003.
2. Слюсар В.И. Коррекция характеристик приемных каналов цифровой антенной решетки по контрольному источнику в ближней зоне// Изв. вузов сер. Радиоэлектроника.- 2003. - Т. 46, № 1. - С. 44 - 52.
3. Слюсар В. И. Синтез алгоритмов измерения дальности М источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП// Изв. вузов сер. Радиоэлектроника.- 1996.- Т. 39, № 5.- С. 55 - 62.