УДК 621. 396.967

***ФЕДОТОВ Б.М.**, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент*

***СЛЮСАРЧУК О.О.**, ад'юнкт Національного університету оборони України*

ЦИФРОВА СИСТЕМА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ РАДІОЛОКАТОРА З ПОКАДРОВИМ СИНТЕЗУВАННЯМ АПЕРТУРИ ТА ВИРІВНЮВАННЯМ ФРОНТУ ХВИЛІ ЗОНДУВАЛЬНОГО СИГНАЛУ

В статті, з точки зору просторових частот, розглянуто метод спектрального аналізу при побудові кадрової радіолокаційної станції із синтезуванням апертури. Визначена структура цифрової системи обробки такої станції, яка не має структурних обмежень, що пов'язані із сферичністю фронту хвилі зондувального сигналу. Метод дозволяє отримувати радіолокаційне зображення в реальному масштабі часу.

***Ключові слова:** радіолокаційна станція з цифровим синтезуванням апертури антени, розрізнювальна здатність, траєкторний сигнал, метод гармонійного аналізу, алгоритм фільтрації.*

Вирішення проблеми отримання радіолокаційного зображення визначених ділянок земної поверхні за доцільний часовий інтервал між визначеною потребою та її задоволенням є завжди актуальною, важливою науковою та практичною задачею.

Сучасні авіаційні радіолокаційні системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) мають розрізнювальну здатність від часток до одиниць метра і дальність дії декілька десятків кілометрів [1]. Вирішення проблеми структурного обмеження щодо дальності дії смугової радіолокаційної станції з синтезуванням апертури (РСА) при надвисокому розрізненні запропоновано в [2], а підвищення енергетичного потенціалу в [3].

Метод гармонічного аналізу (ГА) для обробки траєкторних сигналів [4] дозволяє отримувати радіолокаційне зображення сцени зйомки шляхом швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) траєкторних сигналів, замість їх узгодженої фільтрації. Це при сучасному рівні обчислювальної техніки означає формування радіолокаційного зображення сцени зйомки фактично в реальному масштабі часу.

В той же час, РСА покадрового синтезування, цифрова система обробки (ЦСО) якої працює за методом ГА, також притаманне обмеження дальності дії, яке пов'язане з сферичністю фронту хвилі зондувального сигналу.

Метою даної статті є обґрунтування методу ГА з точки зору кутових частот та визначення структури ЦСО, яка не має структурних обмежень дальності дії, котрі обумовлені сферичністю фронту хвилі зондувального сигналу.

Суть синтезування апертури методом ГА при смуговому огляді полягає в тому, що обробка траєкторного сигналу при русі носія РСА по лінії заданого шляху

© Федотов Б.М., Слюсарчук О.О., 2011

(ЛЗШ) здійснюється парціальними кадрами – набором рядків радіолокаційного зображення (РЛЗ) за похилою дальністю [4].

Дискретне значення відбитого сигналу для кожної субсмуги по похилій дальності опрацьовуються порціями по $N_2 = 2^n$ відліків, де *n*-натуральне ціле число. А кількість субсмуг по похилій дальності визначається шириною смуги огляду (розміром парціального кадру) та розрізнювальною здатністю за похилою дальністю.

Розмір рядка парціального кадру РЛЗ L_c в процесі обробки сигналів способом ГА повинен задовольняти нерівності (див. рис. 2.)

$$L_c \le r_m \theta_0 - L \tag{1}$$

де L – інтервал синтезування; u_0 – ширина діаграми спрямованості (ДС) антени РСА в горизонтальній площині; r_m – дальність до *m*-го рядка парціального кадру.

Це співвідношення слідує з необхідності (при методі ГА) під час всього інтервалу синтезування опромінювати ділянку місцевості протяжністю L_c вздовж лінії шляху (рис. 1).

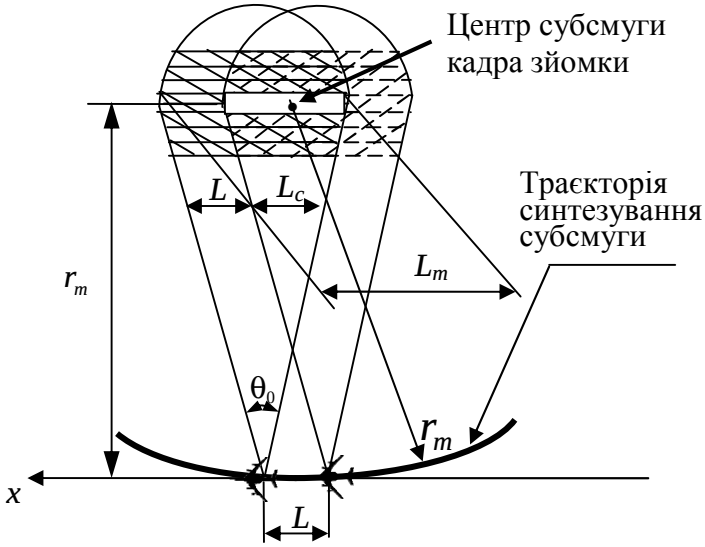

Рис. 1 . Взаємозв'язок інтервалу синтезування та стоки зображення

При покадровому синтезуванні методом ГА кут синтезування апертури (напрямок опромінення) дорівнює

$$\gamma \le \frac{\theta_0}{2} = \frac{\lambda}{2d_Г}, \tag{2}$$

де $d_Г$ – горизонтальний розмір антени; λ – довжина хвилі.

Формально в РСА ГА довжина рядка L_c та лінійний інтервал синтезування L можуть змінюватись від мінімально прийнятного до максимально доцільного з точки зору раціонального вибору характеристик станції.

В типовому варіанті побудови і найбільш раціональному з точки зору „здорового глузду" $L_c = L$. В цьому випадку потенційна розрізнювальна здатність по шляховій дальності дорівнює

$$\delta x = \frac{\lambda}{2\gamma} = \frac{\lambda}{\theta_0} = d_Г. \tag{3}$$

Визначимо зміну дальності до блискучої точки *Q(x,0)* центральної субсмуги дальності (рис. 3) при дуговій траєкторії синтезування.

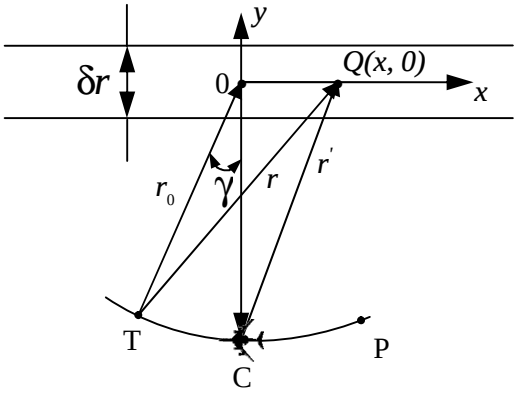

Рис. 2. Визначення функції *Dr(g)* при дуговій траєкторії синтезування

$$(CQ)=(r')=\sqrt{r_0^2+x^2}\cong r_0+\frac{x^2}{2r_0} \quad (4)$$

$$(TQ)=r=\sqrt{r_0^2+x^2+2r_0x\cos(\frac{\pi}{2}+\gamma)}=$$
$$=r_0+\frac{x^2}{2r_0}+x\sin(\gamma)\ . \quad (5)$$

Різниця відстаней до блискучої точки *Q (x,0)* при русі по дуговій траєкторії ∪ PCT дорівнює

$$\Delta r=r-r'=TQ-CQ=r_0+\frac{x^2}{2r_0}+x\sin(\gamma)-r_0-\frac{x^2}{2r_0}=x\sin(\gamma)\,. \quad (6)$$

Для кутів синтезування менше 10º . . . 15º

$$\Delta r=\gamma x\ . \quad (7)$$

Тобто для відносно малих кутів синтезування апертури зміна відстані до блискучої точки пропорційна відстані від центру кола, яке створює дугову траєкторію синтезування, до блискучої точки по координаті шляхової дальності. Траєкторний сигнал від блискучої точки є гармонічним коливанням просторової частоти $\mu=x$.

Зміна фази сигналу на дуговій траєкторії синтезування дорівнює

$$\Delta\varphi=\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r=\frac{4\pi}{\lambda}\gamma x\,. \quad (8)$$

Таким чином, фаза сигналу відбитого від блискучої точки, лінійно змінюється при зміні напрямку опромінення γ. Коефіцієнт лінійності визначається координатою відбиваючого елемента за шляховою дальністю відносно центру кола, яке утворює траєкторією синтезування.

Обробка траєкторного сигналу методом ГА при прямолінійній траєкторії авіаційного носія РСА дозволяє формувати неспотворений спектр функції відбиття. В той же час відомим структурам ЦОС, що використовуються при ГА в покадрових РСА, притаманні структурні обмеження дальності дії, які пов'язані із сферичністю фронту хвилі зондувального сигналу. Відома методика зняття структурних обмежень передбачає розділення відбитого сигналу за допомогою смугових фільтрів на складові частотні, спектри яких стикуються, і компонування відбитого сигналу від прямокутного елементу (субсмуги) відбиття [2].

Кількість фільтрів *j* для *m*-го каналу похилої дальності дорівнює

$$N_{jm}=\frac{\sqrt{r_m^2+\left[r_m tg\left(\frac{u_0}{2}\right)\right]^2}-r_m}{0{,}5\cdot\delta r}\cong\frac{r_m\gamma_0^2}{4\delta r}, \quad (9)$$

де δr - розрізнювальна здатність за похилою дальністю.

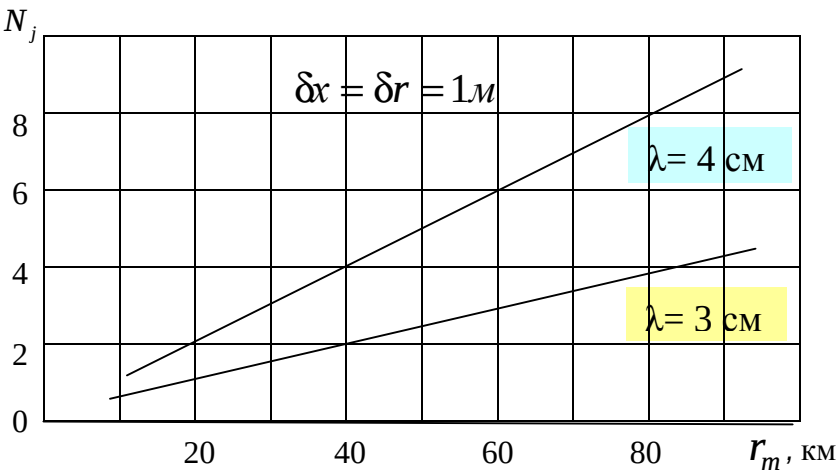

Рис. 3. Залежність кількості фільтрів від дальності до каналу похилої дальності

Наприклад, для $\delta r = 1м$, $d_Г = 1м$ залежність кількості фільтрів від дальності до каналу похилої дальності наведена на рис. 3.

Вклад кожного додаткового фільтра в загальний баланс збільшення лінійного інтервалу синтезування дорівнює

$$\frac{\Delta L_k}{L_m} = \frac{\sqrt{n} - \sqrt{(n-1)}}{\sqrt{N_{jm}}}, \quad (10)$$

де $n=1, 2, 3 \ldots N$; L_m – максимально можливий лінійний інтервал синтезування.

Графік відносного збільшення інтервалу синтезування для $N_j = 4$ та $N_j = 8$ наведений на рис. 4.

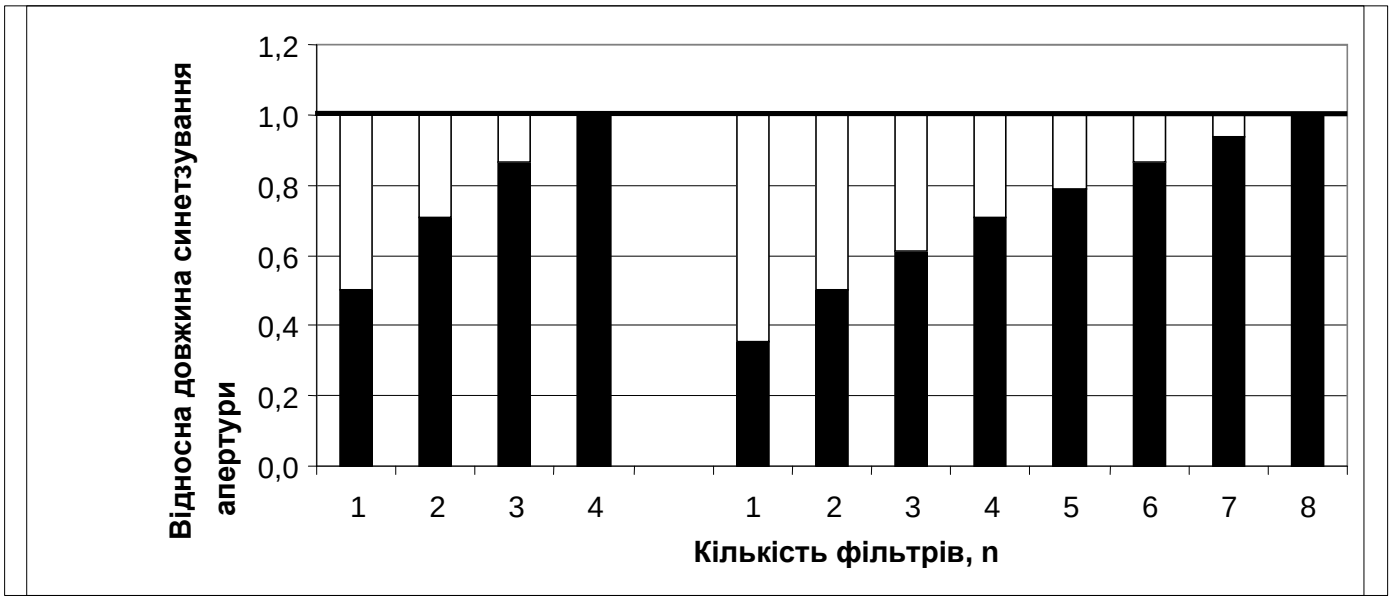

Рис. 4. Графік відносного збільшення інтервалу синтезування при використанні фільтрів розділення

Кількість фільтрів, яка необхідна для забезпечення потенційної розрізнювальної здатності при $\delta x = \delta r$ та $d_г = 1$ *м* на необхідній дальності дії R_m наведена в таблиці 1.

Таблиця 1.

R_m, км	10	20	40	60	80	90	100
N_j (λ=0.03 м)	0	1	2	3	4	4,5	5
N_j (λ=0.04 м)	1	2	4	6	8	9	10

Сутність методу покадрового синтезування з штучним вирівнюванням

фронту хвилі полягає в наступному:

По-перше, метод передбачає ведення розвідки в реальному (квазіреальному) часі. Режим огляду може бути смуговим або у вигляді окремих кадрів. Траєкторія руху носія РСА – прямолінійна.

По-друге, обробка інформації (синтезування апертури) здійснюється окремими кадрами виміряних траєкторних сигналів.

Ідеологія покадрової обробки методом ГА полягає в тому, що в процесі першого етапу обробки сигнали від кожного елементу розрізнення сцени на траєкторії синтезування мають свою індивідуальну просторову частоту.

Досягається це тим, що для кожної субсмуги вводиться віртуальна траєкторія синтезування – дуга кола, центр якого знаходиться в центрі субсмуги похилоїй дальності.

В процесі обробки траєкторних сигналів імітація руху РСА по віртуальній траєкторії синтезування здійснюється шляхом корекції фази прийнятого сигналу від субсмуги по похилій дальності.

Визначимо величину цієї фазової корекції від кута синтезування $\gamma_т$ (див. рис. 5).

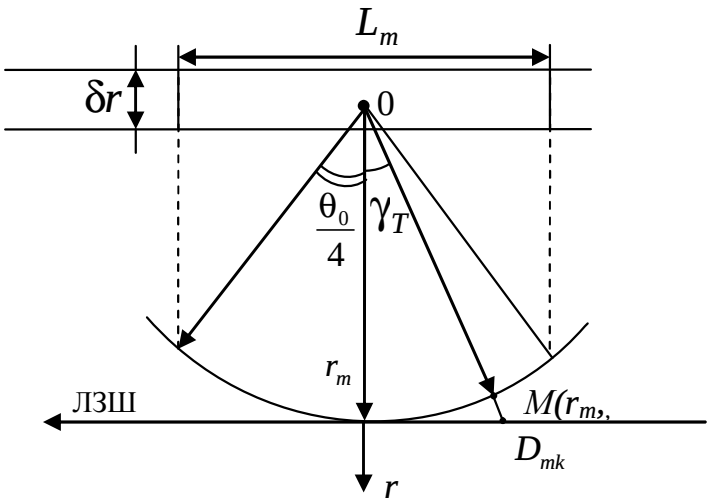

Рис. 5. Визначення величини фазової корекції від кута синтезування $\gamma_т$

Відстань до віртуальної траєкторії синтезування від ЛЗШ дорівнює

$$OD_{mk} - OM = M(r_m, \gamma_T)D_{mk} =$$

$$\Delta r_m = \frac{r_m}{\cos\gamma_T} - r_m = \frac{2r_m \sin^2(\frac{\gamma_T}{2})}{\cos\gamma_T}. \quad (11)$$

При малих кутах синтезування

$$\Delta r_m = 2r_m \frac{\gamma_T^2}{4} = r_m \frac{\gamma_T^2}{2}. \quad (12)$$

А величина фазової корекції складає

$$\Delta\varphi_k = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r_m = \frac{2\pi}{\lambda} r_m \gamma_T^2. \quad (13)$$

Структура ЦСО покадрової РСА з штучним вирівнюванням фронту хвилі наведена на рис. 6.

Представлена на рис. 6 структурна схема ЦСО функціонує наступним чином. До початку цифрової обробки відбитий радіосигнал приймається, підсилюється, перетворюється для зсуву його спектру на проміжну частоту, стискується по тривалості, детектується для виділення огинаючої, вимірюється та дискритизується в аналогово-цифровому перетворювачі (АЦП).

Сигнал $\hat{\xi}(m,p)$ з виходу АЦП в кожному періоді зондування p розподіляється по N_r каналам дальності у відповідності з номером відліку по дальності m. Потім в кожному m-*му* каналі дальності за допомогою суматора та буферної пам’яті реалізується операція визначення середнього значення отриманого

сигналу на максимально допустимому лінійному інтервалі дискретизації

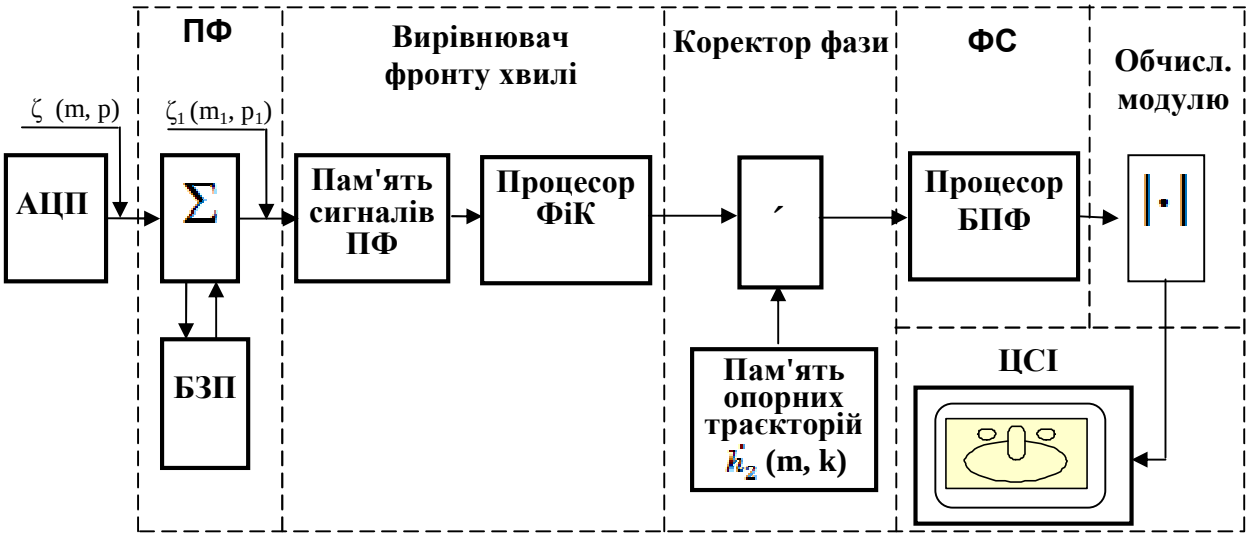

Рис. 6. Структура ЦСО покадрової РСА
з штучним вирівнюванням фронту хвилі

за шляховою дальністю, який дорівнює $\frac{d_Г}{2}$ – попередня фільтрація (ПФ). Сформовані відліки вихідного сигналу ПФ поступають в пам'ять сигналів ПФ. В пам'яті сигналів ПФ зберігаються не менш $N_r \cdot N_2$ сигналів, де N_2 – кількість відліків сигналів від субсмуг за шляховою дальністю. Із пам'яті сигналів ПФ сигнали подаються до процесора фільтрації та компонування, де здійснюється формування відбитого сигналу від прямокутних субсмуг по похилій дальності.

Процес фільтрації розділяє сигнал від кожної *m*-ої підсмуги відбиття поверхні, якій відповідає рядок числового масиву траєкторних сигналів дальності a_{mk} (сигналів відбиття від кільцевих секторів) на N_{jm} складових за допомогою смугових фільтрів. Їх смуги пропускання стикуються між собою та мають ширину

$$\Delta\omega_n = \sqrt{r\delta r}(\sqrt{n} - \sqrt{n-1}), \qquad (14)$$

де $n=1, 2, 3 \ldots N_{jm}$ – номер фільтру в *m*-му каналі дальності.

Ці фільтри повністю перекривають смугу кутових частот, які відповідають розміру рядка парціального кадру радіолокаційного зображення (РЛЗ) L_c.

Другим алгоритмом для зняття структурного обмеження на дальність дії РСА, яке обумовлено сферичністю фронту хвилі зондувального сигналу, є процес компонування масиву даних відбитих сигналів від прямокутних субсмуг парціальних кадрів. Він здійснюється шляхом підсумовування таких сигналів: 1-го фільтру кожного *m*-го рядка масиву; 2-го фільтру (*m*+1)-го рядка, що відповідає більшій на *0,5dr* дальності; 3-го фільтру (*m*+2)-го рядка, що в свою чергу відповідає дальності, яка на *dr* перевищує дальність до *m*-ої субсмуги; … N_j-го фільтра $(m+N_j-1)$-го рядка.

Алгоритм компонування забезпечує формування масиву відбитих сигналів від прямокутних субсмуг кадру радіолокаційного фотографування, ширина яких дорівнює розрізнювальній здатності за похилою дальністю *dr*. Їх довжина L_c

дорівнює частині лінійної ширини променя діаграми спрямованості (ДС) передавальної антенної системи в горизонтальній площині на відповідній дальності, тобто $L_c = L = 0{,}5r\theta_0$.

Алгоритм синтезу сигналу відбиття від прямокутних субсмуг парціального кадру є наступним:

$$a_{mk} = \sum_{n=1}^{N_j} b_{(m+n-1)k}\ , \qquad (15)$$

де a_{mk} – синтезоване значення сигналу відбиття від *m*-ої прямокутної субсмуги сцени (кадру) зйомки в *k*-ої точки інтервалу синтезування; $b_{(m+n-1)k}$ – сигнал *n*-го спектрального піддіапазону (*n*-го фільтра) при розділенні *k*-го дискретного виміру *(m+n-1)*-го каналу похилої дальності; *n* – номер частотного піддіапазону при розділенні дискретних вимірів сигналів у *m*-му каналі похилої дальності; N_{jm} – кількість піддіапазонів розділення сигналів в *m*-му каналі похилої дальності.

З виходу процесора фільтрації та компоновки сформовані сигнали відбиття від прямокутних субсмуг сцен зйомки за похилою дальністю подаються до пристрою фазової корекції.

Формування (корекція) відліків сигналів в рядках парціальних кадрів, для їх відповідності дуговим траєкторіям синтезування апертури довкола центру рядка – каналів похилої дальності парціальних кадрів, здійснюється шляхом множення відліків сигналів на опорну функцію $\hat{h}_2(m,k)$ одиничної амплітуди та фази, яка визначається співвідношенням (13).

Далі вихідні сигнали коректора фази (формувача вимірювань на віртуальних дугових траєкторіях синтезування) подаються в процесор ШПФ.

З виходу процесора ШПФ синфазна та квадратурна складові РЛЗ субсмуг за похилою дальності поступають в блок обчислення модулю комплексних чисел за їх дійсною та уявною частинами. Обчисленні значення представляють собою відліки сигналу РЛЗ *J(m, q).*

Отримана цифрова матриця відповідна РЛЗ парціального кадру (сцени радіолокаційного фотографування) перетворюється в зображення за допомогою цифрової системи індикації.

Таким чином, використання додаткових алгоритмів фільтрації та компонування в структурі ЦСО при використанні метода ГА дозволяє зняти структурне обмеження на дальність дії кадрової (покадрової) РСА. При цьому час виконання алгоритмів додаткової обробки менше чи одного порядку з часом основної обробки. Сучасний рівень швидкодії цифрових процесорів дозволяє отримувати за допомогою розглянутої структури ЦСО РЛЗ на відстанях до 100 км в реальному масштабі часу.

В подальших дослідженнях доцільно провести точну оцінку часу отримання РЛЗ на різних відстанях до смуги радіолокаційного фотографування з урахуванням об’єктивних факторів, що погіршують розрізнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Федотов Б.М. Сучасний стан авіаційних радіолокаційних станцій з синтезованою

апертурою та напрямки їх удосконалення/Б. Федотов, С. Станкевич//Труди університету.-2009.– №2 (92)- С. 128-140.

2. Патент № 92116. Україна. МПК G01S 13/90. Спосіб синтезування апертури РЛС бокового огляду і пристрій для його здійснення/ Федотов Б.М., Станкевич С. А., Пономаренко С. О. Власник патенту Державний науково-дослідний інститут авіації; – № а 2009 07223; заявл. 10.07.09; опубл. 27.09.10, Бюл. №18.

3. Патент на корисну модель №62861. Україна. МПК H01Q 19/00; H01P 1/10 (2006/01)/ Антенна система смугової радіолокаційної станції із синтезованою апертурою високої розрізненості та підвищеної дальності дії. / Федотов Б. М., Станкевич С. А., Бережний О. М. Власник патенту Національний Університет оборони України; – № u 2010 06597; заявл. 31.05.10; опубл. 26.09.11, Бюл. №18.

4. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны/[Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др.]; под ред. В. Т. Горяинова. – [производственное издание].-М.: Радио и связь, 1988 – 304 с.

Надійшло до редакції 28.11.2011