

визначеності, яка спричиняється флуктуацією сигналу збудження радіопоглинаючого покриття радіолокаційного об'єкту.

Оцінка параметричної чутливості синтезованої системи керування антеною на математичній моделі, реалізованої за допомогою ПЕОМ, показує достатній ступінь «грубості» до похибок виміру параметрів руху радіолокаційного об'єкту.

Визначення знака паразитного зворотного зв'язку відбувається в основному правильно, якщо він не змінюється на відрізку часу, на якому вимірюються параметри руху об'єкту.

Сполучення функціональної і структурної компенсації дозволяє забезпечити стійкий процес супроводження із допустимою динамічною помилкою.

### Список використаних джерел

1. *Артемьев В. М.* Основы автоматического управления систем радиоэлектронных средств. / Артемьев В.М., Яшулен Е.А. – М.: Воениздат, 1984. – 86 с.
2. *Архангельский В. И.* Системы фуцци-управления. / Архангельский В.И. – К.: «Техніка», 1997. – 98 с.
3. *Воскресенский Д. И.* Радиооптические антенные решетки. / Д. И. Воскресенский, А. Ю.Гринев, Е. Н. Воронин. – М.: «Радио и связь», 1986. – 120 с.
4. *Востриков А. К.* Радиолокационные станции сопровождения цели и визирования. / А. К. Востриков, А. Н.Раинкин – К.: КВЗРИУ, 1974. – 84 с.
5. *Гирко В.Л.* Теория электрических систем управления. / В. Л.Гирко. – К.: «Лыбидь», 1990. – 168 с.
6. *Вуд П.* Анализ и проектирование зеркальных антенн. / П. Вуд. пер. с англ. – М.: «Радио и связь», 1984. – 202 с.

УДК 621.391.68

І. Р. Пархомей

## АДАПТИВНІ БАГАТОПОЗИЦІЙНІ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЇ

*Анотація:* В роботі розглянуті методи, які можуть бути реалізовані на етапах виявлення і супроводження РЛС сучасних радіолокаційних об'єктів

*Ключові слова:* ефективна площа віддзеркалення, резонансне збудження кристалічної структури, радіопоглинаюче покриття.

### Вступ

В цей час існує ряд науково-технічних проблем, які пов'язані зі складністю одержання радіозображень (РЗ) високого розділення і якості в різних режимах спостереження, у тому числі й у передній зоні огляду бортових радіолокаційних засобів (БРЛЗ) систем радіобачення (СРБ).

### Основна частина

Вирішення даної проблеми можливе за рахунок реалізації режиму багатопозиційного прийому інформації в системах радіобачення (СРБ) з керованою групою дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА), що виконують функцію носіїв БРЛЗ (рис. 1).

Метою даної роботи є проведення аналізу особливостей функціонування даних радіотехнічних систем в режимі багатопозиційного прийому радіолокаційної інформації від об'єктів моніторингу.

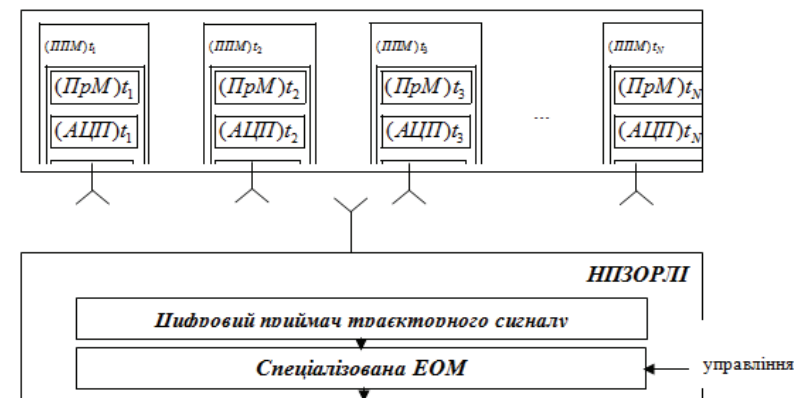


Рис. 1. Спрощена структурна схема СРБ з керованою групою ДПЛА

де  $(\text{ППМ})_{tk}$  – приймально-передавальний модуль БРЛЗ ДПЛА, який опромінює

та приймає сигнал від об'єкта спостереження в  $t_k$  – момент часу й після аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу передає його на наземний пункт збору й обробки радіолокаційної інформації (НПЗОРЛІ).

Високе кутове розділення в даних системах реалізується шляхом синтезу апертури системи при сукупному русі опромінюючого й приймального БРЛЗ [1]. При цьому число ППМ та їх взаємне переміщення щодо об'єкта моніторингу визначається з необхідності вирішення конкретної задачі системи.

Однопозиційна радіолокаційна система з синтезом апертури антени (РСА) забезпечує необхідну роздільну здатність за азимутом у всій зоні огляду, крім переднього сектору. Однак, передній сектор огляду ( $\pm 10^\circ$  щодо вектора шляхової швидкості носія БРЛЗ) має важливе практичне значення при розв'язанні багатьох завдань системи. При прямолинійній траєкторії носія РСА зі сполученої антеною розділення за кутовою координатою  $\delta l$  визначається кутовим розміром апертури при бічному огляді  $\beta_0 = X_C / R_H$  й кутом спостереження  $\theta_H$  (рис.2):

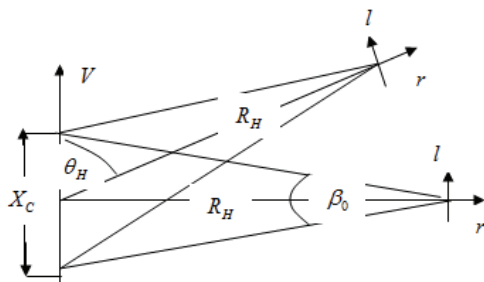


Рис. 2. Система координат при сполученій приймально-передавальній антені

$$\delta l = \frac{\lambda R_H}{2 X_C \sin \theta_H} \quad (1)$$

Однак, при огляді в передньому секторі ( $\theta_H \rightarrow 0$ ) розділення за кутовою координатою різко падає. Тому в передньому секторі огляду розділення СА практично того ж порядку, що й розділення реальної антени. При  $\theta_H = 0^\circ$  розділення за кутом дорівнює:

$$\delta \theta_c = 1,3 \sqrt{\frac{\lambda}{X_C}} = 1,3 \sqrt{2 \theta_{CO}} = 1,8 \sqrt{\frac{\theta_0}{K_{3T}}} \quad (2)$$

де  $\theta_{CO} = \lambda / 2 X_C$  – ширина синтезованої діаграми спрямованості (ДС) при бічному

огляді;  $K_{3T} = \theta_0 / \theta_{CO}$  – коефіцієнт стиску ДС у результаті синтезування при бічному огляді.

Для отримання високого розділення в передньому секторі огляду доцільно використовувати багатопозиційні РСА до яких також відносяться СРБ з дистанційним пілотуванням носіїв бортових засобів локації [1–10].

Керування місцезнаходженням у просторі (траєкторіями руху опромінюючих об'єкти БРЛЗ і БРЛЗ, що приймають віддзеркалені від об'єктів сигнали) оптимізується виходячи з одержання необхідної роздільної здатності в заданому секторі огляду.

При багатопозиційному режимі СРБ можливе використання одночасно багатьох БРЛЗ, що працюють тільки в режимі приймання, при одному БРЛЗ, який опромінює задану зону моніторингу (рис.3). Відсутність випромінювання в приймальних БРЛЗ підвищує скритність роботи останніх, а також значно знижує їх масу та енергоспоживання. Однак одночасно підвищуються вимоги до потужності опромінюючого БРЛЗ, тому що він перебуває на значному видаленні.

Основною проблемою реалізації функціонування СРБ, що розглядається, є забезпечення синхронізації опромінюючих та приймальних БРЛЗ за несучою частотою, частотою повторення імпульсів і положенню зони моніторингу.

Найпростішим [1, 2] варіантом багатопозиційної СРБ є напівактивна система, у якій опромінюючий та приймальний БРЛЗ рухаються за різними траєкторіями.

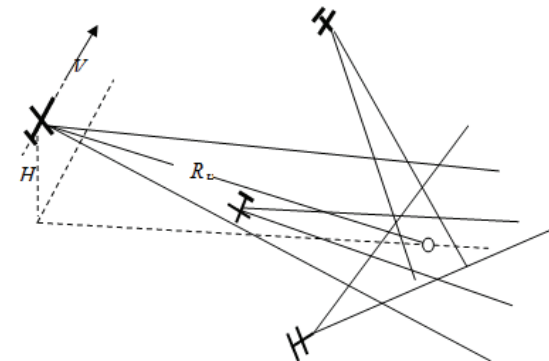


Рис. 3. Режим багатопозиційного функціонування СРБ

Приймальні БРЛЗ перебувають у промені радіолокаційного засобу, який реалізує опромінення об'єкта спостереження, а синхронізація сигналів забезпечується за рахунок реєстрації випромінювання передавача спеціальними приймачами пасивних засобів локації. Якщо активний БРЛЗ рухається за прямоли-

нійною траєкторією зі швидкістю  $V$  (рис. 3), забезпечуючи опромінення зони огляду в бічному напрямку в межах ширини ДС антени  $\theta_0$ , то кожний  $i$ -й елемент зони огляду за кутом опромінюється електромагнітною хвилею зі своєї доплерівською частотою

$$f_{ДД} = \frac{V}{\lambda} \theta_i \quad (3)$$

т.ч. у межах ширини ДС антени активного БРЛЗ системи здійснюється частотне «підфарбовування» кожного напрямку  $\theta_i$ ; у межах зони огляду. При цьому досягається кутове розділення

$$\delta l = \frac{\lambda}{\beta_0} \quad (4)$$

де  $\beta_0 = VT_C / R_H$  – кутовий розмір синтезованої площинної апертури.

За аналогією з відомими системами напівактивного наведення, метод синтезування апертури за рахунок руху активних БРЛЗ при русі пасивних засобів локації на об'єкт спостереження також може бути названий напівактивним синтезуванням апертури. У більш загальному випадку траєкторії переміщення засобів локації СРБ, що розглядаються, можуть бути найрізноманітнішими й визначаються розв'язуванням завданням.

Таким чином, при напівактивному синтезуванні апертури використовуються рознесені у просторі ДПЛА, що й рухаються за  $N$  – різними траєкторіями.

Активний бортовий радіолокаційний засіб (АБРЛЗ) звичайно містить свою приймальну частину і є однопозиційної РСА цілевказання й підсвітлювання для пасивних засобів локації (ПЗЛ) СРБ. За допомогою ДС передавальної антени РСА підсвітлює заданий район розташування об'єктів (зону моніторингу). Одночасно активний БРЛЗ, приймаючи відбиті сигнали, одержує за допомогою своєї системи обробки РЗ об'єктів й формує сигнали цілевказання для ДПЛА з пасивними засобами локації.

Кожний ПЗЛ має два канали прийому радіолокаційної інформації. Основний канал забезпечує приймання відбитих від об'єктів спостереження сигналів. Додатковий канал (канал синхронізації) приймає зондувальні сигнали АБРЛЗ для формування опорного сигналу приймача основного каналу. Система обробки забезпечує одержання зображення об'єктів з високою роздільною здатністю в зоні огляду ПЗЛ СРБ.

Для забезпечення розділення за дальністю використовується розділення відбитих сигналів за їхньою затримкою на трасі  $R_H + R_{П}$  (рис. 4), де  $R_{П}$  – відстань від об'єкту моніторингу до ПЗЛ. Для розділення за азимутом використовується доплерівська селекція сигналів.

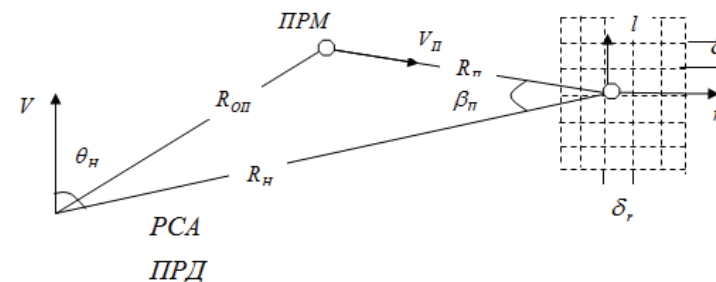


Рис. 4. Формування радіолокаційних зображень при напівактивній СРБ

Розглянемо функцію невизначеності за азимутом напівактивної СРБ при роботі по нерухливим об'єктам. ФН за кутовою координатою  $l$  має вигляд

$$J(l) = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} W(t) \exp\{j\varphi_{ц}(t, l)\} \exp\{-j\varphi_{ц}(t, 0)\} dt \quad (5)$$

де  $W(t)$  – вагова функція обробки;

$\varphi_{ц}(t, l)$  – фазова функція траєкторного сигналу ПЗЛ позиції залежно від азимутального положення об'єкту  $l$ .

Для спрощення запису ФН без обмеження спільності висновків розглянемо випадок, коли в момент  $t = 0$  кут  $\beta_{П} \approx 0$ , тобто АБРЛЗ, ПЗЛ і об'єкт спостереження перебувають приблизно на одній прямій лінії. Вважаємо також, що підсвітлювання здійснюється з дальності  $R_H \gg R_{П}$ . Тоді поточні дальності можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} r_H &= R_H - Vt \cos \theta_H + \frac{V^2 t^2}{2R_H} \sin^2 \theta_H \\ r_{П} &= R_H - Vt \\ r_{0П} &= R_{0П} + V_{П} t - Vt \cos \theta_H + \frac{V^2 t^2}{2R_{0П}} \sin^2 \theta_H \end{aligned} \quad (6)$$

Фаза траєкторного сигналу цілі визначається: відстанню  $r_H$ , яку проходить зондувальний сигнал від АБРЛЗ до об'єкту; відстанню  $r_{П}$ , яку проходить відби-

тий від об'єкту сигнал до ПЗЛ; відстанню  $r_{0П}$  між ПЗЛ і АБРЛЗ (опорний сигнал).

Таким чином, фаза траєкторного сигналу являє собою різниця між сумою фаз зондувального й відбитого сигналів і фазою опорного сигналу

$$\begin{aligned} \varphi_{П}(t, 0) &= \varphi_{Н} + \varphi_{П} - \varphi_{0П} = k(r_{Н} + r_{П} - r_{0П}) = \\ &= k \left[ R_{Н} + R_{П} - R_{Н} + R_{П} - 2V_{П}t - \frac{V^2 t^2 R_{П}}{2R_{Н}(R_{Н} - R_{П})} \sin^2 \theta_{Н} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

За умови  $R_{Н} \gg R_{П}$  й  $V T_{С} \ll R_{Н}$  останнім членом можна знехотити. Фаза сигналу від об'єкту в цьому випадку змінюється за лінійним законом:

$$\varphi_{П}(t, 0) = \frac{4\pi}{\lambda} V_{П} t \quad (7)$$

т. ч. сигнал має постійну доплерівську частоту.

Тому що на ПЗЛ швидкість  $V_{П}$  відома й відома геометрія взаємного розташування АБРЛЗ, ПЗЛ і об'єкту, т.ч. траєкторний сигнал об'єкту являє собою гармонійний сигнал з відомою доплерівською частотою  $f_{ДЦ} = \frac{2V_{П}}{\lambda}$ .

Фаза сигналу від об'єкту для елемента, зміщеного на кутову координату  $l$ , визначається відповідними відстанями:

$$\varphi_{П}(t, l) = k(r_{Нl} + r_{Пl} - r_{0Пl}) \quad (8)$$

де 
$$r_{Нl} = R_{Н} - Vt \cos \theta_{Н} + \frac{Vl}{R_{Н}} \sin^2 \theta_{Н}; \quad r_{Пl} = R_{П} - Vt + \left(\frac{l}{R_{П}}\right)^2 \frac{V_{П} t}{2}$$

$$r_{0Пl} = R_{0П} + V_{П} t - Vt \cos \theta_{Н} + \frac{V^2 t^2}{2R_{0П}} \sin \theta_{Н}$$

Для випадку  $R_{Н} \gg R_{П}$  без обліку початкової фази

$$\varphi_{П}(t, l) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ 2V_{П} t + Vt \left(\frac{l}{R_{Н}}\right) \sin \theta_{Н} + \frac{V_{П} t}{2} \left(\frac{l}{R_{Н}}\right)^2 \right]$$

Відповідно доплерівська частота траєкторного сигналу об'єкту спостереження з координатою  $l$

$$f_{Д}(t, l) = \frac{2V_{П}}{\lambda} + \frac{V}{\lambda} \left(\frac{l}{R_{Н}}\right) \sin \theta_{Н} + \frac{2V_{П}}{\lambda} \left(\frac{l}{R_{Н}}\right)^2 \quad (9)$$

Таким чином, доплерівська частота траєкторного сигналу визначається кутовою координатою об'єкту ( $l/R_{Н}$ ). Лінійна залежність частоти від координати формується рухом передавальної позиції зі швидкістю  $V$ , а квадратична залежність – рухом прийомної позиції зі швидкістю  $V_{П}$ .

Функція невизначеності траєкторного сигналу при  $W(t) = 1$  має вигляд:

$$\begin{aligned} J(l) &= \frac{1}{T_{С}} \int_{-T_{С}/2}^{T_{С}/2} \exp \left\{ j[\varphi(t, l) - \varphi(t, 0)] \right\} dt = \frac{1}{T_{С}} \int_{-T_{С}/2}^{T_{С}/2} \left\{ jk \left[ Vt \frac{l}{R_{Н}} \sin \theta_{Н} + \frac{V_{П} t}{2} \left(\frac{l}{R_{Н}}\right)^2 \right] \right\} dt = \\ &= \frac{\sin \left[ \frac{\pi T_{С}}{\lambda} \left(\frac{l}{R_{Н}}\right) V \sin \theta_{Н} + \left(\frac{l}{R_{Н}}\right)^2 \frac{V_{П}}{2} \right]}{\frac{\pi T_{С}}{\lambda} \left(\frac{l}{R_{Н}}\right) V \sin \theta_{Н} + \left(\frac{l}{R_{Н}}\right)^2 \frac{V_{П}}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

Розглянемо основні властивості ФН при напівактивному синтезуванні й спостереженні нерухливого об'єкту моніторингу. Помітимо, що при  $\vec{V}_{П} = \vec{V}$  й  $R_{Н} = R_{П}$  система відповідає звичайній однопозиційній СРБ.

При наближенні ПЗЛ до об'єкту ( $R_{П} \rightarrow 0$ ) настає момент, коли розділення  $\delta l_2 = \delta l_1$ , т.ч починає впливати розділення за рахунок руху ПЗЛ. Граничне значення  $R_{П}$ , коли  $\delta l_2 = \delta l_1$ , при  $V = V_{П}$  дорівнює

$$R_{Пгр} = \frac{R_{Н}}{2,6} \sqrt{\frac{\lambda}{V_{П} T_{С}}}$$

ФН траєкторного сигналу має два максимуми: при  $l_1 = 0$  й  $l_2 = \frac{-2R_{П}^2 V}{R_{Н} V_{П}} \sin \theta_{Н}$ . Перший і другий максимуми рознесені за кутом на величину

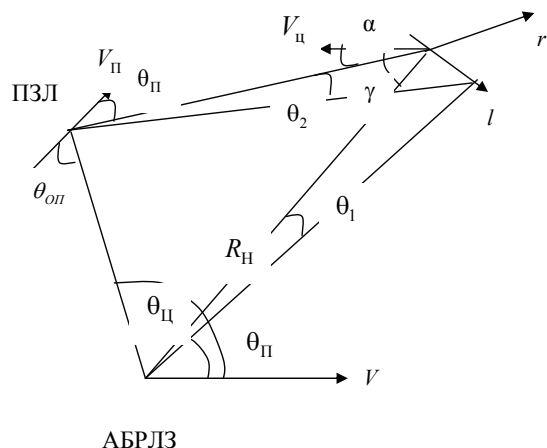
$$\frac{l_2}{R_{П}} = -\frac{2R_{П} V}{R_{Н} V_{П}} \sin \theta_{Н} \cong -\frac{2R_{П}}{R_{Н}}$$

яка звичайно більше ширини ДС реальної антени, тобто перебуває поза зоною огляду. При  $R_{П} < R_{Пгр}$  другий максимум збігається з основним

При  $R_{0П} \approx R_{Н}$  ( $R_{П} \ll R_{Н}$ ) відбувається повна компенсація фазових нестабільностей траєкторного сигналу, обумовлених траєкторними нестабільностями й нестабільностями середовища поширення. Це пояснюється тим, що й зон-

дувальний сигнал (опорний) і сигнал підсвітлювання проходять той же самий шлях.

Таким чином, при напівактивному синтезуванні розділення у передній зоні огляду нерухомих об'єктів не залежить від дальності й становить половину розділення РСА цілевказання й підсвітлювання при бічному огляді.



АБРЛЗ

Рис. 5. Формування РЗ в напівактивній СРБ при довільному русі ПЗЛ та АБРЛЗ

Траекторний сигнал ПЗЛ має доплерівську частоту, обумовлену відповідною частотою відбитого сигналу в основному каналі

$$f_{до} = \frac{1}{\lambda} (V \cos \theta_n + V_c \cos \gamma + V_c \cos \alpha + V_n \cos \theta_c)$$

і частотою опорного сигналу в каналі синхронізації  $f_{оп} = \frac{1}{\lambda} (V \cos \theta_{\pi} - V_n \cos \theta_{оп})$ .

Частота траекторного сигналу дорівнює різниці цих частот:  $f_{ц} = f_{до} - f_{оп}$ .

Тому що частота опорного сигналу  $f_{оп}$  не залежить від параметрів об'єкту то опорний сигнал визначає тільки зміна несучої частоти сигналу від об'єкту моніторингу.

Зсув об'єкту на відстань  $l$  за кутовою координатою приводить до зсуву кута спостереження на величину  $\theta_1$  відносно АБРЛЗ і  $\theta_2$  відносно ПЗЛ. Тоді доплерівська частота сигналу основного каналу ПЗЛ буде дорівнювати:

$$f_{до}(l) = \frac{1}{\lambda} [V \cos(\theta_n - \theta_1) + V_c \cos(\gamma - \theta_1) + V_c \cos(\alpha + \theta_2) + V_n \cos(\theta_c + \theta_2)] \quad (11)$$

Частота опорного сигналу при цьому не змінюється. Функція невизначено-сті траекторного сигналу

$$J(l) = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \exp\{j2\pi[f_{ц}(0) - f_{ц}(l)]t\} dt = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \exp\{j2\pi[f_{до}(0) - f_{до}(l)]t\} dt \quad (12)$$

Різниця доплерівських частот при  $\theta_1 \ll 1$  й  $\theta_2 \ll 1$

$$f_{до}(0) - f_{до}(l) = \frac{1}{\lambda} [V \theta_1 \sin \theta_n + V_c \theta_1 \sin \gamma + V_c \theta_2 \sin \alpha + V_n \theta_2 \sin \theta_c] \quad (13)$$

У випадку, коли  $\theta_n \approx \theta_{\pi}$ , можна вважати, що  $\theta_1 = l/R_n$  й  $\theta_2 = l/R_{\pi}$ .

При цьому різниця доплерівських частот

$$f_{до}(0) - f_{до}(l) = \frac{l}{\lambda} [(V \sin \theta_n + V_c \sin \gamma)/R_n + (V_c \sin \alpha - V_n \sin \theta_c)/R_{\pi}] = \frac{l}{\lambda} (\Omega_n - \Omega_{\pi}) \quad (14)$$

де  $\Omega_n = (V \sin \theta_n + V_c \sin \gamma)/R_n$  – кутова швидкість лінії візування об'єкту щодо АБРЛЗ;  $\Omega_{\pi} = (V_c \sin \alpha - V_n \sin \theta_c)/R_{\pi}$  – кутова швидкість лінії візування об'єкту відносно ПЗЛ.

Роздільна здатність за кутовою координатою  $l$  (ширина ФН на рівні – 3 дБ) визначається, як і в інших випадках, кутовим розміром синтезування апертури:

$$\delta l = \frac{\lambda}{\beta_0} = \frac{\lambda}{(\Omega_n - \Omega_{\pi})T_c} \quad (15)$$

Кутовий розмір апертури визначається зміною кута спостереження об'єкта щодо ПЗЛ та АБРЛЗ:

$$\beta_0 = (\Omega_n - \Omega_{\pi})T_c \quad (16)$$

При цьому важливо враховувати також напрямок переміщень, оскільки вони можуть компенсувати один одного. Якщо ПЗЛ та АБРЛЗ розташовані таким чином, що кути  $\theta_n$  й  $\theta_{\pi}$  близькі один одному, то забезпечується мінімальний роздільний майданчик. Розмір його за дальністю визначається шириною спектру зондувального сигналу, а за азимутом – кутовим розміром синтезованої апертури.

**Висновки**

1. У багатопозиційних СРБ доцільне використання одного АБРЛЗ, який рухається за обраною траєкторією, що забезпечує підсвітлювання заданої зони огляду. Взаємно незалежні ПЗЛ, використовуючи відбиті сигнали, формують РЛЗ об'єктів, розташованих у зоні огляду. Число ПЗЛ і траєкторії їх руху повинно визначатися завданнями СРБ.

2. При багатопозиційному прийомі забезпечується: висока роздільна здатність у всій зоні огляду СРБ, в тому числі в передній зоні; скритність роботи ПЗЛ; малі маса, енергоспоживання й вартість апаратури ПЗЛ системи.

3. Найбільш складним завданням при реалізації багатопозиційної СРБ є забезпечення синхронізації ПЗЛ з АБРЛЗ за несучою частотою, частотою повторення й напрямком ДС антен та забезпечення завадозахисту радіолокаційних каналів системи.

**Список використаних джерел**

1. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов // Радиовидение. — М.: «Радиотехника», 2005. — 368 с: ил. (Сер. Радиолокация).
2. Радиолокационные станции бокового обзора. / А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко // — М.: Сов. радио, 1970.
3. Synthetic aperture radar system. / R. O. Harger // — New-York, London, Academic Press, 1970.
4. Обработка информации когерентными оптическими системами./ Г. С. Кондратенков — М.: Сов. радио, 1972.
5. Ультразвуковой спектроанализатор радиолокационных сигналов с использованием явления дифракции света на ультразвуковых волнах в прозрачной среде, возбуждаемых радиолокационными сигналами / Г. С. Кондратенков // Авторское свидетельство № 21080 заявлено 08.09.59 г.
6. Некоторые вопросы теории оптической обработки радиолокационных сигналов. / Г. С. Кондратенков // — Труды ВВИА им. Н. Е. Жуковского № 944, 1962.
7. Радиолокационные станции обзора Земли / Под. ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радио и связь, 1983.
8. Разведывательно-ударные комплексы и радиолокационные системы наблюдения земной поверхности. /Саблин В.Н. — М.: Радиотехника, 2002.

9. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны / Л. Б. Неронский, В. Ф. Михайлов, К. В. Брагин — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 1999.
10. Основы радиоэлектронной борьбы. / С. А. Вакин, Л. Н. Шустов — М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1998.