

**А.В. Гомозов, к.т.н., доц.***Харківський національний університет радіоелектроніки***І.О. Коваленко, к.т.н., доц.***Житомирський інженерно-технологічний інститут***С.В. Тітов, нач. НДЛ***Харківський військовий університет*

### **ВЕРТОЛІТНИЙ РАДІОЛОКАТОР ВІЯВЛЕННЯ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄКТІВ НА МАЛІЙ ГЛИБИНІ НА ОСНОВІ ВЗАЄМОПОГОДЖУВАНОВОГО ПРОСТОРОВО-ФАЗОВО-ЧАСОВОГО УПРАВЛІННЯ СИГНАЛАМИ**

*Використання взаємопогоджуваного просторово-фазово-часового управління сигналами у каналах ФАР при випромінюванні і прийомі дозволяє забезпечити високу подовжню і поперечну роздільну здатність виявлення підповерхневих об'єктів при порівняно невеликих вертикальному і поперечному розмірах бортової антенної системи. Запропонована структурна схема вертолітного радіолокатора виявлення підповерхневих об'єктів, виконана з еквідистантних лінійок вертикальних несиметричних передавальних вібраторів і горизонтальних несиметричних прийомних вібраторів, розташованих уздовж фюзеляжу.*

Використання традиційних методів для створення бортових радіолокаторів ближньої дії зустрічає ряд специфічних труднощів, суперечливих при рішенні питань технічної реалізації. Такі радіолокатори повинні мати мінімальні енергоспоживання і рівень щільності потоку потужності поза зоною виявлення цілей (у зоні розташування операторів та інших членів екіпажів) у силу їхнього розміщення на рухливих об'єктах обмежених розмірів, а також, як правило, мати високі роздільні здатності по координатах і мінімально можливу ближню границю виявлення цілей [1–5].

При традиційних методах знизити потужність передавача й енергоспоживання зі збереженням заданої дальності виявлення цілей можна при збільшенні коефіцієнта підсилення антени шляхом збільшення в припустимих межах її апертури і використанні коротких радіоімпульсів. Однак зменшення тривалості радіоімпульсів призводить до необхідності збільшення їхньої імпульсної потужності для забезпечення заданої імовірності виявлення цілей на одній і тій же дальності, що, у кінцевому рахунку, зажадає додаткового збільшення енергоспоживання в силу зниження коефіцієнта корисної дії таких передавачів зі зменшенням тривалості формованих імпульсів. Збільшення ж апертури антени призводить до збільшення далекої границі зони Френеля, ближче якої виявлення цілей і однозначне вимірювання їх координат з гарантованою точністю не представляється можливим у силу несинфазності складання полів випромінюючих елементів ФАР, тобто відсутності необхідних умов для повного формування діаграми спрямованості антени. У результаті збільшується реальна ближня границя виявлення цілей (мінімально можлива дальність гарантованого виявлення цілей) [2, 5]. Так, при розміру апертури  $L = 5$  м і робочій довжині радіохвиль  $\lambda = 0,04$  м величина далекої границі зони Френеля (границі далекої зони) антени  $Z_D = 1,25$  км, а при  $L = 20$  м і  $\lambda = 0,5$  м величина  $Z_D = 1,6$  км, тобто ближня границя виявлення цілей  $Z_{Rmin}$  у даних випадках при використанні синфазних антен не може бути меншою 1,25–1,6 км. Крім того, для забезпечення високого кутового розділення у вертикальній площині при використанні синфазних антен необхідний більший вертикальний розмір останніх, що важко реалізувати в бортових умовах об'єктів.

Зазначені протиріччя можуть бути переборені при забезпеченні мінімальної дальності гарантованого виявлення цілей від десятків до сотень метрів за рахунок використання в радіолокаторах ближньої дії ФАР з фокусуванням електромагнітного випромінювання (ЕМВ) у зоні Френеля на основі взаємопогоджуваного просторово-фазово-часового (ПФЧ) управління при випромінюванні і прийомі безперервних сигналів. При цьому, якщо вибрати  $Z_{Rmin}/Z_D = 0,02...0,1$  додатковий енергетичний вииграш за щільністю потоку потужності за рахунок фокусування в порівнянні із синфазною антеною складає відповідно  $\delta S_F \approx 27...14$  дБ.

Передбачуваний радіолокатор призначений для виявлення з борту вертольота з малої висоти на малій глибині в землі і виміру координат з високим дозволом таких підповерхневих об'єктів, як міни на мінному полі і залізобетонні укриття, а також польові броньовані кабельні лінії і трубопроводи різного призначення. В основу принципу його роботи покладене використання ФАР із просторово-фазовим управлінням, взаємопогоджуваним у часі при випромінюванні і прийомі сигналів. Спрощена структурна схема такого вертолітного радіолокатора представлена на рис. 1.

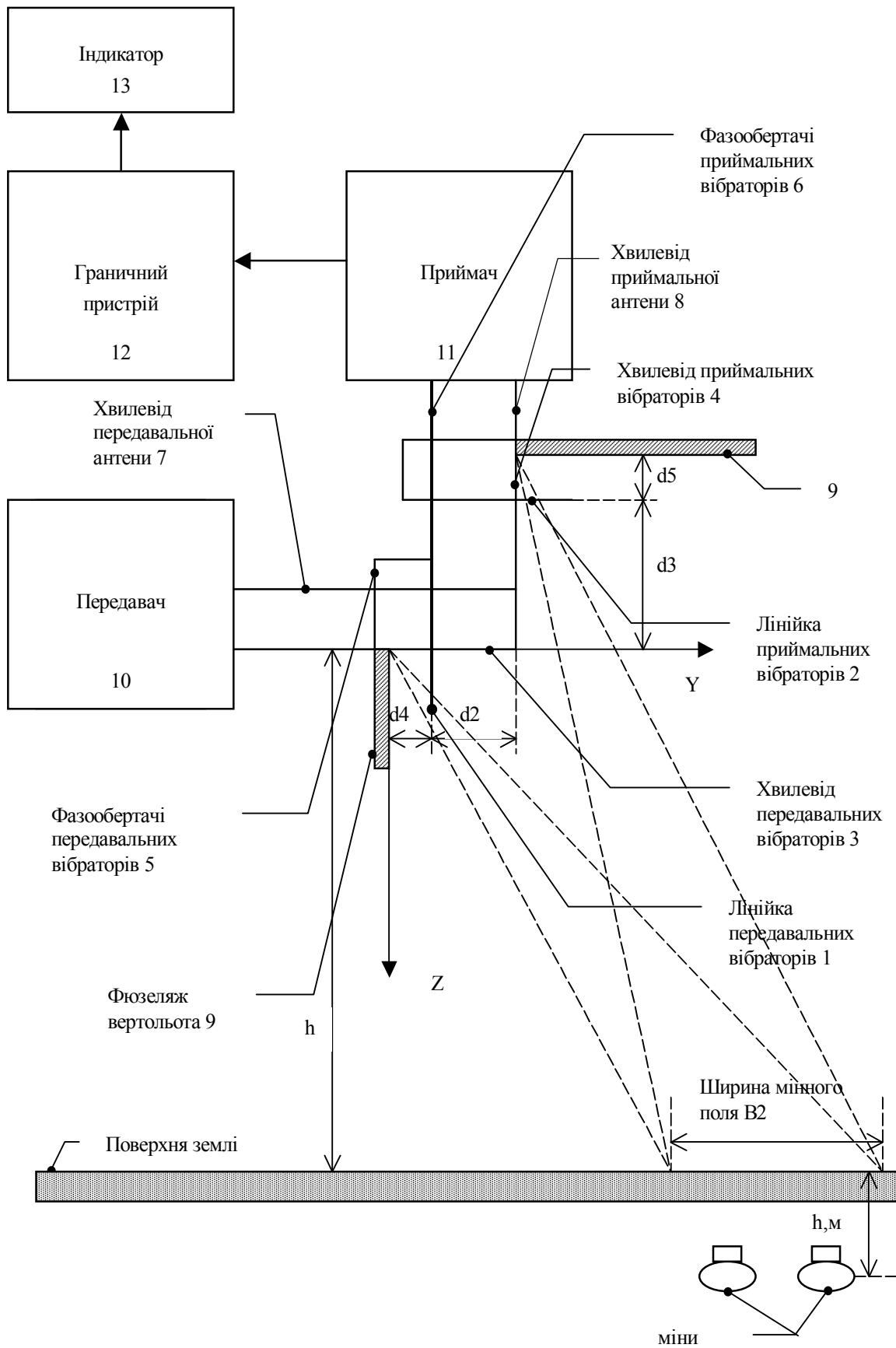


Рис. 1

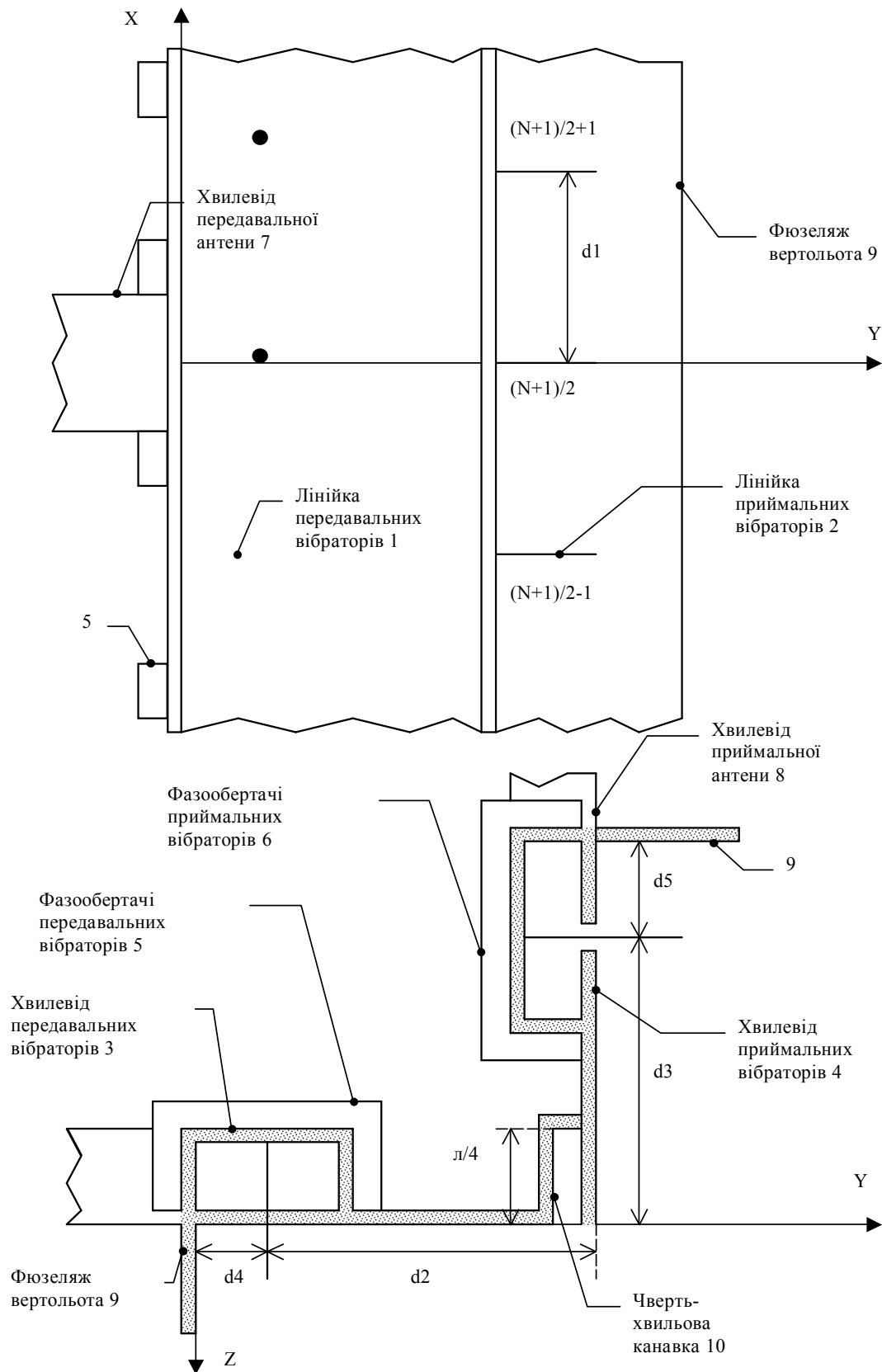


Рис. 2

На рис. 2 показаний спрощений ескіз антенної системи, що використовує як розв'язувальний екран корпус вертольота. Остання виконана з еквідистантних лінійок вертикальних несиметричних передавальних вібраторів і горизонтальних несиметричних прийомних вібраторів, розташованих уздовж фюзеляжу. При цьому передача безупинних зондувальних сигналів здійснюється на вертикальній поляризації, а відбиті радіохвилі приймаються на горизонтальній поляризації, що має місце при

відображенні від об'єктів у зоні Френеля. Крім того, в антенній системі передбачені додаткові заходи щодо розв'язки приймальної і передавальної лінійок вібраторів. Їхні вібратори заживлюють хвилеводами, а самі лінійки екрановані одна від одної металоконструкцією, на якій закріплені живильні хвилеводи вібраторів. Затікання струмів передавальних вібраторів в бік розташування прийомних вібраторів істотно знижується також за допомогою чвертьхвильової канавки, вхідний опір якої дуже великий. У результаті горизонтальні і вертикальні вібратори електрично майже не зв'язані один з одним і прямі радіохвилі передавальних вібраторів не заважають приймати відбиті сигнали. Для зменшення габаритів антенної системи використовуються радіохвилі сантиметрового діапазону, оскільки ступінь їхнього загасання в землі при виявленні зазначених вище підповерхневих об'єктів можна вважати припустимим, враховуючи істотний вигравш при цьому за масо-габаритними характеристиками [3].

Періодичний огляд поверхні під вертольотом за довжиною уздовж його фюзеляжу і за шириною в поперечному напрямку, починаючи з правого кута цієї ділянки, здійснюється шляхом періодичного в часі фазового фокусування безперервного випромінювання на поверхні ділянки в поточних точках у зоні Френеля антенної системи. Високе розподілення за дальністю уздовж та поперек відносно фюзеляжу при великому подовжньому і малому вертикальному і поперечному розмірах розмірах антенної системи забезпечується шляхом взаємопогоджуваної зміни в часі відповідних відхилень фаз керованих фазообертачів 5 і 6 (рис. 1) передавальних і прийомних вібраторів у відповідності до наступних співвідношень:

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{F_n} - R_{F_{n+1}}) \tag{1}$$

для вібраторів з номером  $n = 1, \dots, (N + 1/2) - 1$

$$i \quad \varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{F_n} - R_{F_{n-1}}) \tag{2}$$

для вібраторів з номерами  $n = (N + 1/2) + 1, \dots, N$ , де  $N, n$  – кількість і номер вібраторів у передавальній (чи приймальній) лінійці антенної системи;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінюваних сигналів;  $R_{F_n}$  – похила дальність від відповідного вібратора до поточної точки фокусування на заданій глибині ділянки підповерхневого зондування, яка проглядається [1, 2]. При цьому для передавальних вібраторів

$$R_{F_n} = \sqrt{h^2 + \left(y_0 + \frac{B_2 t}{T_2}\right)^2} + \left[ x_0 + B_1 \left( \frac{t}{T_1} - \text{entier} \frac{t}{T_1} \right) - d_1 \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \right]^2, \tag{3}$$

а для прийомних вібраторів

$$R_{F_n} = \sqrt{h_1^2 + \left(y_{01} + \frac{B_2 t}{T_2}\right)^2} + \left[ x_0 + B_1 \left( \frac{t}{T_1} - \text{entier} \frac{t}{T_1} \right) - d_1 \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \right]^2, \tag{4}$$

де  $h$  – висота польоту вертольота;  $d_1$  – відстань між сусідніми вібраторами в лінійках;  $d_2$  і  $d_3$  – відповідно горизонтальна і вертикальна відстані між передавальною і приймальними лінійками вібраторів;  $d_4$  і  $d_5$  – відповідно відстані від лінійок передавальних і прийомних вібраторів до обшивки фюзеляжу вертольота;  $x_0$  і  $y_0$  – горизонтальні дальності від вертольота відповідно до нижньої і лівої границі ділянки підповерхневого зондування;  $B_1$  і  $B_2$  – відповідно довжина уздовж осі фюзеляжу вертольота і ширина в поперечному напрямку ділянки підповерхневого зондування;  $T_1$  і  $T_2$  – періоди огляду ділянки підповерхневого зондування за довжиною і шириною;  $t$  – час від початку огляду; *entier* – ціла частина числа;

$$h_1 = h + d_3 + d_5; \quad y_{01} = y_0 - d_2 - d_4.$$

Вібратори з номером  $(N + 1)/2$  не мають фазообертачів. Співвідношення (1–4) отримані з геометрії антенної системи, наведеної на рис. 1, 2.

На виході амплітудного детектора приймача встановлений граничний пристрій, вихід якого зв'язаний з індикатором. Граничний пристрій І2 (рис. 1) не пропускає на вихід сигнали низького рівня, обумовлені зворотним розсіюванням радіохвиль на дрібномасштабних нерівностях земної поверхні, пропускаючи на вихід тільки більш інтенсивні сигнали, відбиті від зазначених вище підповерхневих об'єктів. Огляд цієї ділянки за її довжиною здійснюють з періодом рядка  $T_1$  знизу вгору, а за її шириною – періодом кадру  $T_2$  зліва направо. При цьому період  $T_2$  кратний і значно більше періоду  $T_1$ . У процесі огляду випромінювання фокусується послідовно в поточних точках ділянки, що проглядається, з урахуванням заданої глибини підповерхневого зондування відповідно до виразів (1–4). Горизонтальна розгортка індикатора І3 (рис. 1) здійснюється з періодом  $T_1$ , а вертикальна розгортка – з періодом  $T_2$  синхронно з процесом фокусування випромінювання. На екрані індикатора двокоординатне зображення в картинній площині (по  $x, y$ ) ділянки, що проглядається, буде відображати місце розташування як підповерхневих об'єктів, так і об'єктів, що знаходяться на поверхні.

Відрізнити підповерхневі об'єкти від поверхневих об'єктів можна шляхом зіставлення зображення на екрані індикатора з аерофотознімком цієї ж ділянки поверхні.

Розрахунки показали, що характер і величини зміни відхилень фаз фазообертачів, які впливають з (1–4), у даному випадку аналогічні з потрібними для відомих синфазних ФАР з фазовим скануванням діаграми спрямованості в заданому кутовому секторі. Відміни за величиною відхилень фаз і характером змін порівняно невеликі. Тому в даному радіолокаторі можна використовувати відомі фазообертачі ФАР, технологія виготовлення яких відома та освоєна промисловістю.

Величина напруженості горизонтально поляризованої електричної складової ЕМВ з урахуванням загасання в землі в заданій точці з координатами  $(x, y, h + h_M)$  (система координат показана на рис. 1, 2) визначається наступним співвідношенням:

$$E_r = \frac{120\pi L_g}{\lambda} \left\{ \sum_{n=1}^N \left[ \frac{2(\varepsilon - j60\lambda\sigma) \cos \alpha_n \sin \alpha_n \sin\left(\frac{2\pi y \alpha_n}{\lambda R_n}\right)}{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) \cos \alpha_n + \sqrt{\varepsilon - j60\lambda\sigma - \sin^2 \alpha_n}} \right] \frac{J_n}{R_n} \times \right. \\ \left. \times \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \sqrt{h^2 + y_F^2 + \left[ x_F - d_1 \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \right]^2} - R_n - h_M \sqrt{\varepsilon - j60\lambda\sigma} \right] \right\} \right\}, \quad (5)$$

де  $h$  – глибина залягання об'єкта підповерхневого зондування;  $L_g$  – діюча довжина передавального чвертьхвильового вібратора, що з урахуванням розміру хвилеводу дорівнює  $L_g = \lambda/\pi$ ;  $J_n$  – амплітуда струму в  $h$ -ому передавальному вібраторі;  $\varepsilon, \sigma$  – відносна діелектрична провідність і провідність верхнього шару землі на ділянці підповерхневого зондування.

При цьому відстань від  $h$ -го передавального вібратора до точки з координатами  $(x, y)$ , розташованої над точкою фокусування на поверхні ділянки підповерхневого зондування, дорівнює:

$$R_n = \sqrt{h^2 + y^2 + \left[ x - d_1 \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \right]^2}, \quad (6)$$

а кут напрямку радіохвиль  $h$ -ого передавального вібратора в цю ж точку дорівнює

$$\alpha_n = \arctg \frac{\sqrt{\left[ x - d_1 \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \right]^2 + y^2}}{h}. \quad (7)$$

Співвідношення (5–7) отримані з використанням відомих співвідношень для поля випромінювання вібратора з урахуванням впливу фізеляжу вертольота як екрана і коефіцієнта проходження радіохвиль у землю і поглинання в землі.

Приклади розрахунку напруженості електричного поля  $E_r$  поперек і уздовж області фокусування з координатами  $(x = 90 \text{ м}, y = 90 \text{ м})$  на глибині  $h$  у землі проведені при наступних значеннях параметрів:  $\lambda = 0,04 \text{ м}$ ; потужність передавача  $P = 100 \text{ Вт}$ ;  $d_1 = 0,04 \text{ м}$ ;  $d_2 = 0,12 \text{ м}$ ;  $d_3 = 0,12 \text{ м}$ ;  $d_4 = 0,018 \text{ м}$ ;  $d_5 = 0,016 \text{ м}$ ;  $h = 100 \text{ м}$ ;  $x_0 = 40 \text{ м}$ ;  $y_0 = 40 \text{ м}$ ;  $B_1 = 100 \text{ м}$ ;  $B_2 = 100 \text{ м}$ ;  $T_1 = 1/15625 \text{ с}$ ;  $T_2 = 1/25 \text{ с}$ ;  $N = 151$ ; довжина лінійки вібраторів уздовж фізеляжу вертольота  $6 \text{ м}$ ; середня подовжня роздільна здатність за дальністю  $1,5 \text{ м}$ ; середня поперечна роздільна здатність за дальністю  $3 \text{ м}$ . Розрахунки показують, що при  $h = 0,3 \text{ м}$  величина  $E_r \geq 2 \text{ В/м}$ , що цілком достатньо для виявлення мін із діаметром  $d \geq 0,2 \text{ м}$ , а тим більше інших зазначених раніше більш розмірних підповерхневих об'єктів за відбитим сигналом при потужності передавача не більш  $100 \text{ Вт}$ .

Таким чином, запропонований радіолокатор за рахунок взаємопогоджуваного ПФЧ управління у ФАР при випромінюванні і прийомі сигналів забезпечує досить високі подовжню і поперечні лінійні роздільні здатності виявлення підповерхневих об'єктів на глибині  $0,3...0,5 \text{ м}$  при порівняно невеликих вертикальному і поперечному розмірах бортової антенної системи і прийнятної для бортових умов потужності передавача.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Грановская Р.А. и др. Антенны и устройства СВЧ: Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1981. – 431 с.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
3. Скольник М. Справочник по радиолокации. – М: Сов. радио, 1977, т. 2. – 408 с.
4. Педак А.М., Баклашев П.И. и др. Справочник по основам радиолокационной техники / Под ред. В.В. Дружинина. – М.: Воениздат, 1967. – 448 с.
5. Шелухин О.И. Радиосистемы ближнего действия. – М.: Радио и связь, 1989. – 238 с.

ГОМОЗОВ Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету радіоелектроніки.

Наукові інтереси:

– радіотехнічні та телевізійні системи.

Тел.: 8-0572-490212.

КОВАЛЕНКО Іван Олексійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютерної техніки Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– радіотехнічні та телевізійні системи.

ТІТОВ Сергій Володимирович – начальник науково-дослідної лабораторії Наукового центру Військ ППО при Харківському військовому університеті.

Наукові інтереси:

– радіотехнічні та телевізійні системи.

Тел.: 8-0572-476316.

Подано 20.01.2002

**Гомозов А.В., Коваленко І.О., Тітов С.В.** Вертолітний радіолокатор виявлення підповерхневих об'єктів на малій глибині на основі взаємопогоджуваного просторово-фазово-часового управління сигналами

**Гомозов А.В., Коваленко І.О., Тітов С.В.** Вертолетный радиолокатор обнаружения подповерхностных объектов на малой глубине на основе взаимосогласованного пространственного фазово-временного управления сигналами.

**Gomozov A.V., Kovalenko I.A., Titov S.V.** The helicopter radar of detection the undersurface objects on small depth on the basis of coordinated space and phase-time managements of signals.

УДК 621.396.677.494

**Вертолетный радиолокатор обнаружения подповерхностных объектов на малой глубине на основе взаимосогласованного пространственного фазово-временного управления сигналами / А.В. Гомозов, І.О. Коваленко, С.В. Тітов**

Использование взаимосогласованного пространственно-фазово-временного управления сигналами в каналах ФАР при излучении и приеме позволяет обеспечить обеспечивает высокую продольную и поперечную разрешающую способность обнаружения подповерхностных объектов при сравнительно небольших вертикальном и поперечном размерах бортовой антенной системы. Предложена структурная схема вертолетного радиолокатора обнаружения подповерхностных объектов выполнена из эквидистантных линеек вертикальных несимметричных передающих вибраторов и горизонтальных несимметричных приемных вибраторов, расположенных вдоль фюзеляжа.

УДК 621.396.677.494

**The helicopter radar of detection the undersurface objects on small depth on the basis of coordinated space and phase-time managements of signals / A.V. Gomozov, I.A. Kovalenko, S.V. Titov**

The use of coordinated space and phase-time managements of signals in channels of PAA when radiating and receiving allows to supply a high longitudinal and transversal resolution of detection the undersurface objects with rather small vertical and transversal sizes of an onboard antenna system. The offered block diagram of the helicopter radar of detection the undersurface objects is executed from equidistant bars of vertical asymmetrical transmitting vibrators and horizontal asymmetrical receiving vibrators located along a fuselage.