

УДК 629.735.45.052.3

doi: 10.32620/aktt.2022.3.07

С. С. ЖИЛА, О. С. ІНКАРБАСВА

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна*

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ БОРТОВИМ ВЕРТОЛІТНИМ РАДАРМ

До основних переваг вертольотів можна віднести можливість зниження висоти та швидкості польоту, зависання в повітрі, позапланове приземлення та мала чутливість до метеоумов. Зазначені переваги над літаками дозволяють використовувати вертольоти для вирішення цивільних та військових завдань. У той же час залишається невирішена проблема посадки вертольоту на необладнані майданчики з невідомим рельєфом у поганих метеоумовах, за малої видимості, вночі та в задимлених територіях. Метою дослідження є оптимізація алгоритму формування рельєфу місцевості з борта вертольоту. Для досягнення цієї мети в роботі використовується радіодіапазон хвиль, що дозволяє виконувати роботу системи не залежно від зовнішніх умов та освітленості. Геометрія задачі припускає, що дальність до кожної точки поверхні вимірюється імпульсним методом. У носовій частині вертольоту розташовані дві антени, які за рахунок просторового рознесення формують дві діаграми спрямованості, що перекривають деяку область підстильної поверхні. З виходів антени формуються сумарний та різницевий канали. При формуванні вхідних даних наведені математичні моделі зондуючого сигналу та прийнятих спостережень з урахуванням впливу атмосфери на розповсюдження хвиль та внутрішніх шумів системи. Теоретичне дослідження оптимального алгоритму формування рельєфу поверхні бортовим вертолітним радаром виконано в рамках методу максимальної правдоподібності. Отримані аналітичні вирази допомагають розрахувати кутове положення імпульсного об'єму, які в подальшому можна використовувати при побудові поверхні місцевості, на яку необхідно здійснити посадку. У результаті аналізу запропоновано структурну схему бортової сумарно-різницевої системи вимірювання дальності та кутового положення розсіяних радіолокаційних імпульсів. Структурна схема наочно пояснює принцип роботи оптимального алгоритму та реалізує побудову рельєфу. У відповідності до розробленого алгоритму було проведено імітаційне моделювання, у результаті якого отримані кутові положення у градусах. Отримані вихідні дані доводять працездатність представленого бортового радара формування підстильної поверхні місцевості.

Ключові слова: вертолітний радар; необладнаний майданчик; побудова рельєфу; алгоритм оптимальної обробки сигналів; структурна схема радара.

Вступ

При виконанні багатьох рятувальних операцій та урядових завдань необхідно здійснювати посадку гвинтокрила на необладнані аеродроми в умовах недостатньої видимості, що пов'язано з підвищеним ризиком аварії та людських жертв. Посадка вертольоту в умовах поганої видимості небезпечна тим, що змушує пілота покладатися на власні відчуття та бортові навігаційні прилади, даних від яких, найчастіше, виявляється недостатньо. Перебуваючи у повітрі, інформація, що передається вестибулярним апаратом пілота, може неправильно тлумачитись мозком, це додає фізичного навантаження на пілота та потенційно штовхає на небезпечні дії. Маючи такі суперечливі фізичні відчуття, може статися просторова дезорієнтація, яка набуває різних форм. Пілот не усвідомлює бічного ухилу, руху або повороту літального апарату, хоча насправді судно

перебуває у стані висіння.

Доведено, що більшість авіакатастроф відбуваються саме через посадку на непідготовлений аеродром [1]. Дуже небезпечними умовами вважається піщана поверхня, через те, що гвинтом вертольоту підіймається пильна завіса та рівень видимості майже дорівнює нулю. Нажаль, датчики, які встановлені на сучасних вертольотах не дають всієї необхідної інформації у складних метеорологічних умовах, через те, що не здатні здійснювати ефективне сканування зони посадки крізь піщану або снігову завісу.

При посадці на непідготовлений майданчик, окрім подолання умов низької видимості безпосередньо під час приземлення вже на етапі підльоту до зони посадки виникає необхідність точного визначення типу рельєфу та характеристик підстильної поверхні. Взимку, при посадці на сніжно-льодовий ґрунт необхідно знати його склад, товщину льодово-

го покритву та його щільність, щоб уникнути потрапляння вертольоту під лід. Тому пілоту необхідно використовувати системи безпечної посадки, що передбачають попереднє формування рельєфу місцевості та оцінок його характеристик.

Системи, засновані на використанні радіодіапазону хвиль, дозволяють забезпечити гарну видимість, не залежно від метеорологічних умов та часу доби. Необхідно відзначити, що дані системи є перспективними і вдосконалюються по всьому світу, але більшість будуються на основі узагальнення інженерного досвіду, а не у результаті вирішення оптимізаційних завдань наскрізного синтезу на основі статистичної теорії прийняття оптимальних рішень. У даній роботі буде вирішено таке завдання.

У якості прототипу радіотехнічної системи було обрано двоантенну сумарно-різницеву вертолітну систему відновлення рельєфу місцевості.

1. Геометрія задачі та модель рівняння спостереження

Розглянемо на рис. 1 геометрію зондування поверхні з борту вертольоту, що знаходиться на висоті H і переміщується вздовж осі x з постійною швидкістю V . Параметри H та V відомі. Припустимо, що на борту літального апарату, у його носовій частині, в єдиному радіопоглинаючому кожусі на підвісі розташовані дві антени, рознесені у вертикальній площині, перпендикулярно до осі вертольоту. Аналог такої конструкції показану на рис. 2 та встановлено на літаковій системі рельєфометрії RTV (Rapid Terrain Visualization) [2, 3].

За рахунок просторового рознесення антен у напрямку області спостереження формуються дві діаграми спрямованості (ДС), напрями максимумів яких зміщені на деякий кут θ_0 відносно заданого рівносигнального напрямку (РСН). ДС перекривають у просторі деяку площу за допомогою близького розташування антен. Рівносигнальний напрямок вважається відомим і задається кутом θ_0 , який може змінюватися у часі у процесі польоту, виконуючи послідовний огляд поверхні вздовж координати. Переміщення РСН уздовж траси польоту виконується системою стабілізації та наведення, пов'язаної з кардановим підвісом антенної системи.

Згідно наведеної геометрії, вимірювання рельєфу місцевості буде виконуватись з використанням імпульсного режиму роботи радіовиміральної системи за наступною основною формулою:

$$h(x) = H - D_h \cos[\theta_h(x)], \quad (1)$$

де $h(x)$ – висота рельєфу, H – барометрична висота або середня висота щодо нерівностей рельєфу або висота над рівнем моря, D_h – дальність до імпульсного об'єму, який має просторовий розмір за дальністю $\Delta D = c\tau_i / 2$, c – швидкість світла, τ_i – тривалість імпульсу, $\theta_h(x)$ – кутове положення імпульсного об'єму сигналу.

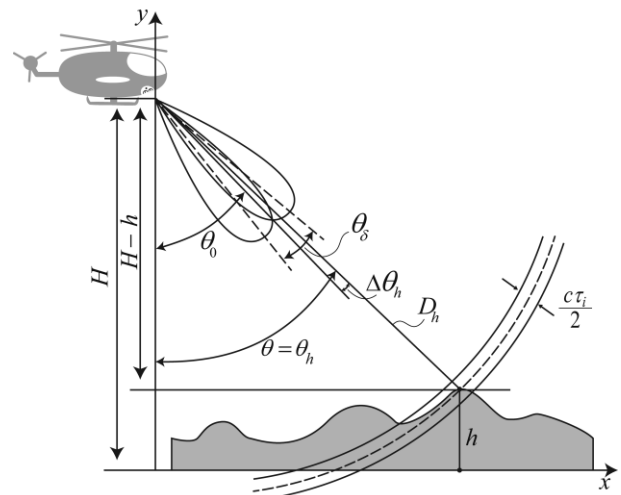


Рис. 1. Геометрія зондування поверхні з борту вертольоту

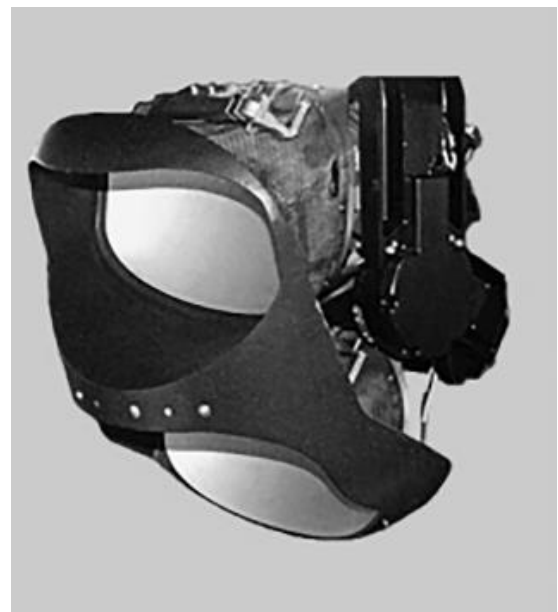


Рис. 2. Антенна система RTV в єдиному радіопоглинаючому кожусі

Передбачається, що кожною антенною в напрямку області спостереження випромінюється сигнал

$$s_t(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi) = \operatorname{Re}\{\dot{A}(t)e^{j\omega_0 t}\}, \quad (2)$$

де $\dot{A}(t) = A(t)e^{j\phi}$ – комплексна огинаюча зондуючого сигналу, f_0 – резонансна частота, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – кутова частота, ϕ – початкова фаза, $A(t)$ – амплітуда сигналу.

Випромінений сигнал віддзеркалюється від поверхні та повертається з часом затримки t_3 , що визначає положення імпульсних об'ємів. У даній роботі передбачається, що дальності до імпульсних об'ємів на поверхні відомі і оцінюванню у виразі (1) підлягає кутове положення цих імпульсних об'ємів.

При постановці завдання також передбачається, що на високій частоті, до вхідних трактів приймача, з виходів антен формуються сума та різниця сигналів. У такому разі шуми додаються у відповідних каналах після формування сумарного та різницевого сигналів. З практики радіовимірювань [4] відомо, що у такому випадку є вигреш у величині відношення сигнал/шум та точності пеленгації. Формування суми та різниці після того, як вже у вхідних каскадах приймача до кожного сигналу додано шум, не підвищує точності вимірювань. Рівняння спостереження у разі можна записати так:

$$\bar{u}(t) = \|u_+(t), u_-(t)\|, \quad (3)$$

де

$$u_+(t) = \operatorname{Re}\dot{s}_+(t, \theta) + n_+(t), \quad (4)$$

$$u_-(t) = \operatorname{Re}\dot{s}_-(t, \theta) + n_-(t), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_+(t, \theta) &= \dot{F}_Q \varepsilon \dot{A}(t - t_3) e^{j\omega_0(t-t_3)} \times \\ &\times [G(\theta - \theta_0 - 0,5\theta_\delta) + G(\theta - \theta_0 + 0,5\theta_\delta)] = \\ &= \dot{s}_0(t) G_+(\theta - \theta_0), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_-(t, \theta) &= \dot{F}_Q \varepsilon \dot{A}(t - t_3) e^{j\omega_0(t-t_3)} \times \\ &\times [G(\theta - \theta_0 - 0,5\theta_\delta) - G(\theta - \theta_0 + 0,5\theta_\delta)] = \\ &= \dot{s}_0(t) G_-(\theta - \theta_0), \end{aligned} \quad (7)$$

де $n_+(t), n_-(t)$ – внутрішні шуми приймачів у сумарному та різницевому каналах, \dot{F}_Q – комплексний коефіцієнт розсіювання області спостереження Q , ε – коефіцієнт, що враховує ослаблення електромагнітних хвиль у середовищі при поширенні, t_3 – відомий час затримки сигналу, $G_\pm(\theta - \theta_0)$ – сумарна й різницева ДС.

Сумарна і різницева діаграми спрямованості мають такий вигляд:

$$G_\pm(\theta - \theta_0) = G(\theta - \theta_0 - 0,5\theta_\delta) \pm G(\theta - \theta_0 + 0,5\theta_\delta), \quad (8)$$

де $G(\theta - \theta_0 \pm 0,5\theta_\delta)$ – ДС рознесених антен у носовій частині вертольоту, зміщені на величину $0,5\theta_\delta$ щодо рівносигнального напрямку θ_0 . В азимутальному напрямку ці ДС збігаються.

Сумарний та різницевий канали мають статистично не пов'язані внутрішні білі шуми $n_+(t), n_-(t)$ з однаковою спектральною щільністю потужності $N_0/2$ та кореляційною функцією

$$R_{n_\pm}(t_1 - t_2) = R_{n_-}(t_1 - t_2) = 0,5N_0\delta(t_1 - t_2). \quad (9)$$

Параметром, який ми шукаємо та який підлягає оцінюванню, являється кутове положення $\theta_h(x)$.

2. Постановка задачі

За результатами спостереження сумарного і різницевого сигналів $\dot{s}_\pm(t, \theta)$ в адитивній суміші з шумами $n_\pm(t)$ сумарного і різницевого каналів приймача необхідно знайти оптимальну оцінку кутового положення імпульсного об'єму сигналу $\theta_h(x)$ за умови, що інші параметри прийнятих сигналів і кореляційні характеристики внутрішніх шумів відомі.

3. Вирішення оптимізаційної задачі

Вирішення оптимізаційної задачі отримаємо в рамках методу максимальної правдоподібності. Використовуючи сучасні методи статистичної оптимізації [5, 6] було визначено функціонал правдоподібності для некорельованих шумів у різних каналах сумарно-різницевої системи у вигляді добутку двох умовних щільностей ймовірностей:

$$\begin{aligned} P[\bar{u}(t) | \lambda] &= P[u_+(t) | \lambda] P[u_-(t) | \lambda] = \\ &= k \exp \left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^2 \int_0^T [u_i(t) - \operatorname{Re}\dot{s}_i(t, \lambda)]^2 dt \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

де $i = \overline{1, 2}$, $t \in (0, T)$, k – коефіцієнт, який залежить від оцінюваного параметра $\theta_h(x)$.

Для пошуку максимуму функції правдоподібності необхідно вираз (10) продиференціювати за оцінюваним параметром λ і прирівняти до нуля. Оскільки

експонента та її показник пов'язані монотонно один з одним, то замість диференціювання функціоналу правдоподібності (10) продиференціюємо його логарифм та отриманий результат прирівняємо до нуля:

$$\left. \frac{d \ln P[\bar{u}(t) | \lambda]}{d\lambda} \right|_{\lambda=\hat{\lambda}_{opt}} = 0. \quad (11)$$

У результаті отримаємо

$$\frac{d \ln k}{d\lambda} + \frac{d \ln \left(\exp \left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^2 \int_0^T [u_i(t) - \text{Re} \dot{s}_i(t, \lambda)]^2 dt \right\} \right)}{d\lambda} = 0,$$

або

$$\frac{d}{d\lambda} (N_0^{-1} \sum_{i=1}^2 \int_0^T [u_i(t) - \text{Re} \dot{s}_i(t, \lambda)]^2 dt) = 0, \quad (12)$$

що дорівнює

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^2 \int_0^T u_i(t) \text{Re} \frac{d\dot{s}_i(t, \lambda)}{d\lambda} dt = \\ & = \sum_{i=1}^2 \int_0^T \text{Re} \dot{s}_i(t, \lambda) \text{Re} \frac{d\dot{s}_i(t, \lambda)}{d\lambda} dt. \end{aligned} \quad (13)$$

В якості оцінюваного параметра λ вибрано кутове положення імпульсного об'єму сигналу θ . Після низки математичних операцій та спрощень був отриманий вираз:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^2 G_i(\theta - \theta_0) \frac{dG_i(\theta - \theta_0)}{d\theta} = \\ & = E_s^{-1} \sum_{i=1}^2 \frac{dG_i(\theta - \theta_0)}{d\theta} \int_0^T u_i(t) \text{Re} \dot{s}_0(t) dt, \end{aligned} \quad (14)$$

де $E_s = \int_0^T [\text{Re} \dot{s}_0(t)]^2 dt$ – енергія прийнятого сигналу.

Розкладемо ДС в лівій частині виразу в ряд Тейлора до третього члена в околиці точки θ_0 . У результаті математичних перетворень ДС прийме такий вигляд:

$$\begin{aligned} & G_i(\theta - \theta_0) = \\ & = G_i(\theta_0) + G_i(\theta_0)'(\theta - 2\theta_0) + 0,5G_i(\theta_0)''(\theta - 2\theta_0)^2. \end{aligned}$$

Тоді похідна ДС дорівнює:

$$\frac{dG_i(\theta - \theta_0)}{d\theta} = G_i(\theta_0)' + G_i(\theta_0)''(\theta - 2\theta_0) \quad (15)$$

Підставимо похідну ДС (15) у вираз (14) та виділимо оцінюваний параметр. Тоді кутове положення імпульсного об'єму сигналу θ визначається наступним чином:

$$\hat{\theta} = \frac{E_s^{-1} \sum_{i=1}^2 \frac{dG_i(\theta - \theta_0)}{d\theta} \int_0^T u_i(t) \text{Re} \dot{s}_0(t) dt}{\sum_{i=1}^2 G_i(\theta - \theta_0) G_i(\theta_0)''} - \frac{\sum_{i=1}^2 G_i(\theta - \theta_0) G_i(\theta_0)'}{\sum_{i=1}^2 G_i(\theta - \theta_0) G_i(\theta_0)''} + 2\theta_0 \quad (16)$$

де $\int_0^T u_i(t) \text{Re} \dot{s}_0(t) dt$ – оптимальний алгоритм внутрішньо-імпульсної обробки, що представляє собою математичну операцію згортки прийнятих коливань $U(t)$ з опорним сигналом $\text{Re} \dot{s}_0(t)$, $\sum_{i=1}^2 \frac{dG_i(\theta - \theta_0)}{d\theta}$ – похідна від ДС сумарного та різницевого каналів.

Цей оптимальний алгоритм спрямований на зменшення рівня шумів і підвищення енергетики прийнятого сигналу, решта операцій призначена для визначення кутового положення. Зокрема результати даного оптимального алгоритму зважуються із похідною сумарної ДС та різницевої ДС.

Також, ці результати необхідно унормувати щодо енергії сигналу E_s^{-1} , яка вноситиме зміщення в оцінку кутового положення. Після того, як проведена попередня оцінка кутового положення, вона буде зміщена так само через ДС, згідно до операцій віднімання та ділення в виразі (16). У результаті даних математичних операцій буде отримана первинна оцінка кутового положення в межах напрямку θ_0 . Для отримання незміщеного значення кута від початку координат, необхідно додати зсув $2\theta_0$.

Тобто, використовуючи алгоритм (16) можливо знайти кутове положення імпульсного об'єму кожного прийнятого імпульсу θ . Можна сформулювати рельєф поверхні.

Отже, сформувавши алгоритми розрахунку кутового положення та дальності до поверхні ми зможемо знайти висоту рельєфу, опираючись на формулу (1) та побудувати рельєф місцевості. Даний рельєф надалі може піддаватися вторинній обробці різними фільтрами [7, 8], лінійними та нелінійними, та буде використаний для побудови області посадки вертольоту. Отриманий вираз відновлює рельєф вздовж напрямку польоту в межах перекриття ДС. Щоб побудувати рельєф в більшій області необхідно ще здійснити сканування на борту ЛА для побудови двомірною рельєфу місцевості.

4. Структурна схема оптимального алгоритму формування рельєфу поверхні

Відповідно до отриманих математичних операцій була розроблена структурна схема практичної реалізації алгоритму бортовою радіолокаційною системою формування рельєфу місцевості, що зображена на рис. 3.

Схема на рис. 3, відображає роботу оптимального алгоритму (16). Вона містить антену з двома опромінювачами, зміщеними щодо фокальної площини, пристрої додавання та віднімання прийнятих сигналів, антенний комутатор (АК), змішувачі (ЗМ), гетеродин (Г), підсилювачі проміжної частоти (ППЧ), детектори (Д), підсилювачі та кутові дискримінатори (КД₁ і КД₂).

Передавач відправляє сформований сигнал (2) у простір. Випромінений сигнал відбивається від поверхні та повертається з часом затримки. Прийнятий сигнал з виходів антени надходить на блок підсумовування та віднімання, внаслідок чого формуються два канали: сумарний (4) та різницевий (5). Далі в кожному з каналів сигнал піддається внутрішньоімпульсній обробці: в змішувачі відбувається перенесення на проміжну частоту, ППЧ посилює сигнал і детектор виділяє огинаючий сигнал. Далі сигнал проходить через кутовий дискримінатор, в якому відбувається порівняння кутових положень θ із сумарною (КД₂) і різницевою (КД₁) ДС, що приймаються одночасно двома антенами в різницево-сумарних каналах. Після, сигнали підсумовуються та нормуються щодо енергії сигналу $1/E_s$. Сигнал, отриманий після попередньої оцінки, підсумовано з коефіцієнтом k_1 і посилено у $1/k_2$ рази для отримання кутового положення щодо напрямку θ_0 , де $k_1 = \sum_{i=1}^2 G_i(\theta - \theta_0)G_i(\theta_0)'$, $k_2 = \sum_{i=1}^2 G_i(\theta - \theta_0)G_i(\theta_0)''$. Для отримання незміщеного положення кута θ до сигналу додається зміщення $2\theta_0$. Далі для побудови рельєфу інформація про кут θ надходить до бортового обчислювача, де реалізується розрахунок за допомогою формули (1).

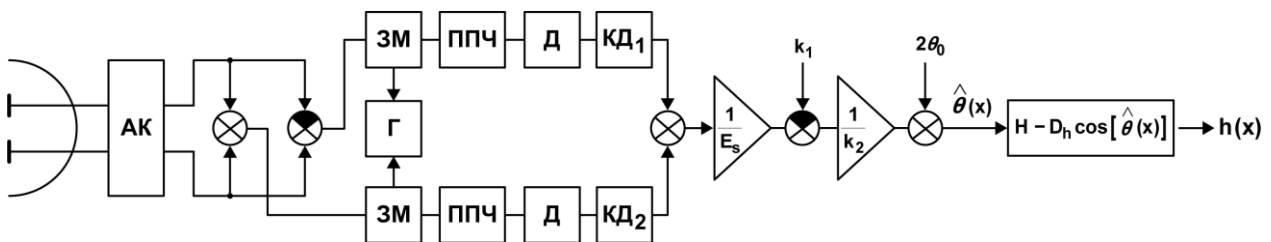


Рис. 3. Структурна схема сумарно-різницевої амплітудної системи формування рельєфу місцевості

5. Імітаційне моделювання

За отриманими результатами було проведено імітаційне моделювання в середовищі Matlab, яке показало працездатність розробленого алгоритму. Під час моделювання було припущено, що висота польоту вертольоту дорівнює 7,7 км. Модель поверхні задавалася у вигляді випадкового процесу Орнштейна-Уленбека на виході фільтру першого порядку, типу RC кола. Присутні високочастотні коливання, що характеризують дрібні нерівності поверхні та низькочастотні коливання, що характеризують зміни рельєфу місцевості. Рельєф був промодельований для висоти 4,8 км над рівнем моря і з коливанням (перепади висоти) у межах півкілометра. Модель рельєфу показана на рис. 4.

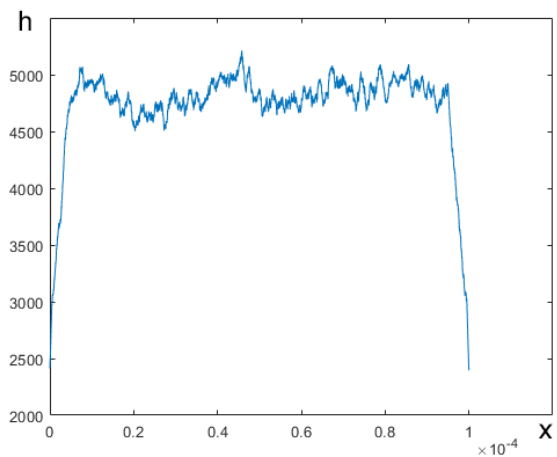


Рис. 4. Модель рельєфу

Пачка імпульсів, яка відбилася від кожної точки запропонованої моделі поверхні, показана на рис. 5. По одній координаті показаний номер імпульсу, по іншій час затримки, через які імпульси прийшли в приймач.

Щоб визначити з яких кутових напрямів прийшли імпульси – використовуються діаграми спрямованості. Їх вид показаний на рис. 6, де синій графік – діаграма спрямованості з виходу першої антени, червоний графік – ДС з виходу другої антени.

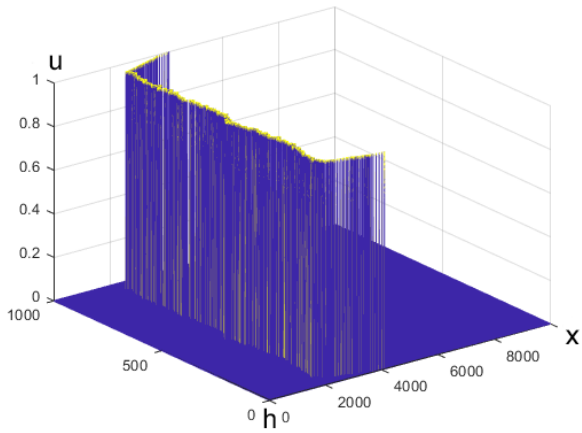


Рис. 5. Сигнал, відбитий від кожної точки моделі поверхні

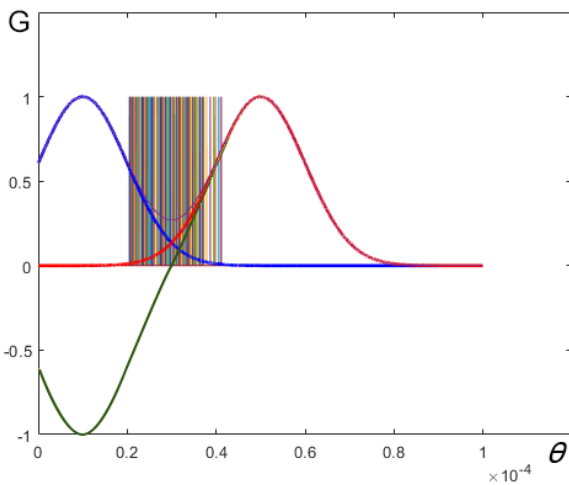


Рис. 6. Сумарна й різницева ДС, відновлені імпульси за дальністю

Данні діаграми спрямованості рознесені у просторі. У приймачі виконується сумарна та різницева обробка, яка з практики вимірювань характеризується підвищеною ефективністю співвідношення сигнал/шум. Сумарна та різницева діаграма спрямованості показані на рис. 6 (фіолетовий та жовтий графік). Подальша обробка проводилася згідно з оптимальним алгоритмом, описаним у 3 розділі. Перша операція була необхідна для того, щоб сумарні імпульси помножити на сумарну діаграму спрямованості, а різницеві імпульси помножити на різницеву діаграму спрямованості. Результат показано на рис. 7 та 8.

Після первинної обробки було виконано зміщення діаграм спрямованостей, нормування на енергію сигналів та отримані оцінки кутового положення кожного імпульсу. Ці оцінки показані на рис 9.

По осі абсцис відкладено номер імпульсу, а по осі ординат показано кутове положення у градусах, яке змінювалося від 30° до 35°. Це кутове положен-

ня збігається з попередньо заданим і розрахованим, що доводить працездатність запропонованого бортового радару побудови рельєфу місцевості.

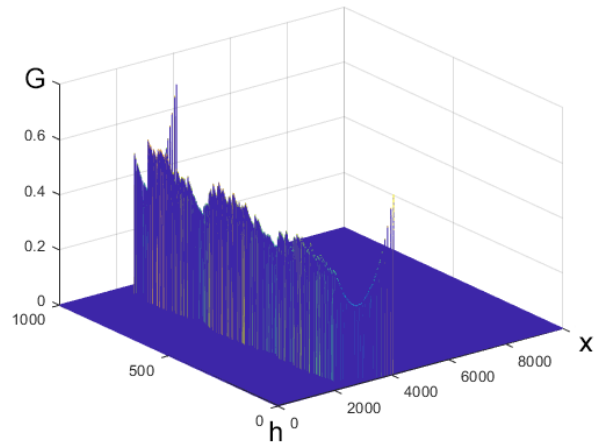


Рис. 7. Сумарні імпульси

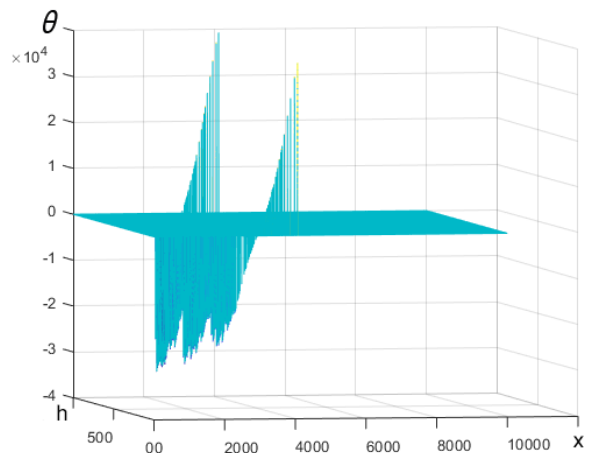


Рис. 8. Різницеві імпульси

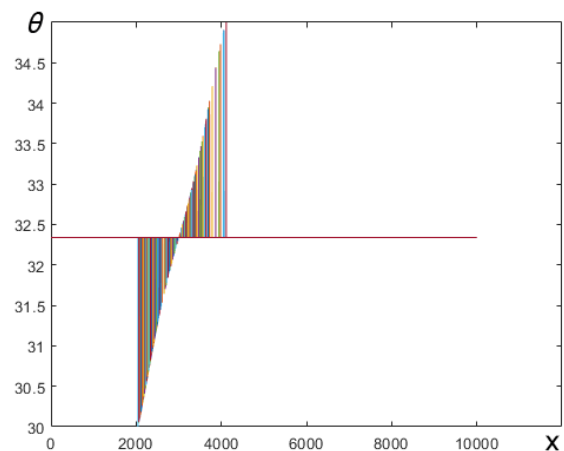


Рис. 9. Оцінки кутового положення кожного імпульсу

Висновки

Радіоелектронне обладнання на борту вертольоту має велике значення, бо виконує найважливішу задачу – виявляє морські, повітряні та наземні об'єкти методом радіолокації та використовується у війсьній авіації. Вертольоти, як носії радарних установок, поступаються літакам через свої розміри та невелику вантажопідйомність. Але мають важливу перевагу за рахунок того, що можуть виконувати посадку в складних умовах. Таким чином виконана актуальна задача оптимізації цих систем. У ході виконання роботи був отриманий оптимальний алгоритм вимірювання рельєфу місцевості з використанням імпульсного режиму роботи радіовимірювальної системи. Вирішення оптимізаційної задачі отримано в рамках методу максимальної правдоподібності.

Розглянута задача відноситься до класу задач оптимізації. У результаті вирішення задачі був отриманий алгоритм, який передбачає формування сумарного і різницевого сигналів. Проведено розрахунок кутового положення імпульсного об'єму зондувальних імпульсів та дальність до поверхні. Розроблено структурну схему бортового вимірювача рельєфу місцевості. Доведена працездатність отриманих математичних операцій імітаційним моделюванням в середовищі Matlab.

У межах подальшої роботи планується розглянути, окрім амплітудного, фазовий інтерферометричний метод формування рельєфу. Це буде доповненням до даної системи, яка буде працювати за тією ж структурою, змінюючи тільки цифровий алгоритм обробки даних, що підвищить надійність роботи системи.

Література

1. *Analysis of Weather-Related Helicopter Accidents and Incidents in the United States [Text] / C. Ramee, A. Speirs, A. P. Payan and D. Mavris // AIAA AVIATION 2021 FORUM, 2-6 August 2021. – 2021. – P. 2021-2954.*

2. *IFSAR for the rapid terrain visualization demonstration [Text] / B. L. Burns, P. H. Eichel, W. H. Hensley and T. J. Kim // Conference Record of the Thirty-Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (Cat. No.00CH37154), 29 October - 01 November 2000. – Pacific Grove, 2000. – P. 8-15.*

3. *Pat. US8249346B2 United States. Three dimensional imaging and apparatus [Text] / John F. Dammann ; assignee The United States of America as represented by the Secretary of the Army, Washington. – № 12/360757 ; filed. 21.01.2009 ; public. 21.08.2012.*

4. *Леонов А. И. Моноимпульсная радиолокация [Текст] / А. И. Леонов, К. И. Фомичев. – М. : Радио и связь, 1984. – 312 с.*

5. *Optimal Signal Processing Method for Synthetic Aperture Radar with Planar Antenna Array [Text] / V. Volosyuk, S. Zhyla, N. Ruzhentsev, E. Tserne, V. Kosharskyi, O. Inkarbaieva // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 21-25 September. – Kharkiv, 2020. – P. 293-298.*

6. *Statistical Optimization of Imaging Technique in Radar Scatterometer with Planar Antenna Array [Text] / V. Volosyuk, S. Zhyla, N. Ruzhentsev, A. Sobkolov, K. Nezhalskaya, G. Cherepnin // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 21-25 September. – Kharkiv, 2020. – P. 299-304.*

7. *Digital adaptive robust algorithms for radar image filtering [Text] / V. Lukin, V. Melnik, A. Progrebniak, A. Zelensky, J. Astola and K. Saarinen // Journal of Electronic Imaging. – 1996. – Vol. 5(3). – P. 410-421.*

8. *Image filtering based on discrete cosine transform [Text] / V. Lukin, R. Oktem, N. Ponomarenko and K. Egiazarian // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66. – P. 1685-1701.*

References

1. Ramee, C., Speirs, A., Payan, A. and Mavris, D. Analysis of Weather-Related Helicopter Accidents and Incidents in the United States. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*, 2021, pp. 2021-2954. DOI: 10.2514/6.2021-2954.

2. Burns, B. L., Eichel, P. H., Hensley, W. H. and Kim, T. J. IFSAR for the rapid terrain visualization demonstration. *Conference Record of the Thirty-Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (Cat. No.00CH37154)*, 2000, vol. 1, pp. 8-15. DOI: 10.1109/ACSSC.2000.910909.

3. Dammann, John F. *Three dimensional imaging and apparatus*. Patent U.S., no. US8249346B2, Aug. 21, 2012.

4. Leonov, A. I., Fomichev, K. I. *Monopul'snaya radyolokatsyya* [Monopulse radar], Moscow, Radio y svyaz' Publ., 1984. 312 p.

5. Volosyuk, V., Zhyla, S., Ruzhentsev, N., Tserne, E., Kosharskyi, V., Inkarbaieva, O. Optimal Signal Processing Method for Synthetic Aperture Radar with Planar Antenna Array. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, 2020, pp. 293-298. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252617

6. Volosyuk, V., Zhyla, S., Ruzhentsev, N., Sobkolov, A., Nezhalskaya, K., Cherepnin, G. Statistical Optimization of Imaging Technique in Radar Scatterometer with Planar Antenna Array. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, 2020, pp. 299-304. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252656

7. Lukin, V. V., Melnik, V. P., Progrebniak, A. B., Zelensky, A. A., Astola, J. T., Saarinen, K. P. Digital adaptive robust algorithms for radar image filtering. *Journal of Electronic Imaging*, 1996, vol. 5, no. 3, pp. 410-421. DOI: 10.1117/12.240715.

8. Lukin, V. V., Oktem, R., Ponomarenko, N. N., Egiazarian, K. O. Image filtering based on discrete cosine transform. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2007, vol. 66, no. 18, pp. 1685-1701. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v66.i18.70.

Надійшла до редакції 4.01.2022, розглянута на редколегії 16.05.2022

OPTIMIZATION OF ALGORITHM FOR SURFACE RELIEF FORMATION BY ON-BOARD HELICOPTER RADAR

Simeon Zhyla, Olha Inkarbaeva

The main advantages of helicopters include the ability to reduce altitude and flight speed, hover in the air, unscheduled landings, and low sensitivity to weather conditions. These advantages over the aircraft allow the use of helicopters for civilian and military purposes. Simultaneously, the problem of landing the helicopter on an unequipped area with unknown terrain in bad weather conditions, in low visibility, at night, and in smoky areas remains unsolved. This research optimizes the algorithm of terrain formation from a helicopter. To achieve this goal, the radio wave range is used, which allows to operate the system regardless of external conditions and lighting. The geometry of the problem assumes that the distance to each point of the surface is measured by the pulse method. In the bow of the helicopter, there are two antennas, which due to the spatial diversity form two patterns that overlap some areas of the underlying surface. The summary and differential channels are formed from the antenna outputs. During the formation of the input data, mathematical models of the probing signal and the received observations are given, considering the influence of the atmosphere on the propagation of waves and the internal noise of the system. A theoretical study of the optimal algorithm for forming the surface relief by on-board helicopter radar was performed within the method of maximum likelihood. The obtained analytical expressions help calculate the angular position of the pulse volume, which can then be used in the formation of the surface of the area to be landed. Because of the analysis, a structural scheme of the onboard sum-difference system of measurement of range and the angular position of the scattered radar pulses is proposed. The block diagram clarifies the principle of operation of the optimal algorithm and implements the construction of relief. In accordance with the developed algorithm, a simulation was performed, which resulted in angular positions in degrees. The obtained initial data prove the efficiency of the presented on-board radar for the formation of the underlying surface.

Keywords: helicopter radar; unequipped area; relief measurements; algorithm optimization; radar block diagram.

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ БОРТОВЫМ ВЕРТОЛЕТНЫМ РАДАРМ

С. С. Жила, О. С. Инкарбаева

К основным преимуществам вертолетов можно отнести возможность снижения высоты и скорости полета, зависание в воздухе, внеплановое приземление и низкая чувствительность к метеоусловиям. Указанные преимущества над самолетами позволяют использовать вертолеты для решения гражданских и военных задач. В то же время, остается нерешенная проблема посадки вертолета на необорудованные площадки с неизвестным рельефом в плохих метеоусловиях, при малой видимости, ночью и на задымленных территориях. Целью исследования является оптимизация алгоритма формирования рельефа местности с борта вертолета. Для достижения этой цели в работе используется радиодиапазон волн, позволяющий выполнять работу системы независимо от внешних условий и освещенности. Геометрия задачи предполагает, что дальность к каждой точке поверхности измеряется импульсным методом. В носовой части вертолета расположены две антенны, которые за счет пространственного разнесения формируют две диаграммы направленности, перекрывающие некоторую область подстилающей поверхности. С выходов антенны формируются суммарный и разностный каналы. При формировании входных данных приведены математические модели зондирующего сигнала и принятых наблюдений с учетом влияния атмосферы на распространение волн и внутренних шумов системы. Теоретическое исследование оптимального алгоритма формирования рельефа поверхности бортовым вертолетным радаром выполнено в рамках метода максимального правдоподобия. Полученные аналитические выражения помогают рассчитать угловое положение импульсного объема, которое

в дальнейшем можно использовать при построении поверхности местности, на которую необходимо совершить посадку. В результате анализа предложена структурная схема бортовой суммарно-разностной системы измерения дальности и углового положения рассеянных радиолокационных импульсов. Структурная схема наглядно объясняет принцип работы оптимального алгоритма и реализует построение рельефа. В соответствии с разработанным алгоритмом было проведено имитационное моделирование, в результате которого получены угловые положения в градусах. Полученные выходные данные доказывают работоспособность представленного бортового радара формирования подстилающей поверхности местности.

Ключевые слова: вертолетный радар; необорудованная площадка; построение рельефа; алгоритм оптимальной обработки сигналов; структурная схема радара.

Жила Семен Сергійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Інкарбаєва Ольга Сергіївна – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Simeon Zhyla – Sc.D. in Radioengineering, Professor, Head of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.zhyla@khai.edu, ORCID: 0000-0003-2989-8988.

Olha Inkarbaieva – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.inkarbayeva@khai.edu, ORCID: 0000-0002-2547-8241.