

УДК 621.396.96

В.І. Клімченко, О.А. Малишев, І.М. Невмержицький

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ЗАСТОСУВАННЯ БАЙЕСІВСЬКОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРУ ВИСОТИ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ В ОГЛЯДОВИХ ТРЬОХКООРДИНАТНИХ РЛС

Пропонується варіант підвищення точності виміру висоти повітряних об'єктів, спостережуваних в області малих кутів місця, в оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону хвиль. Рішення ґрунтується на байесівському методі оцінки параметрів.

Ключові слова: оглядові трьохкоординатні РЛС, малі кути місця, байесівський метод оцінки параметрів.

Вступ

Постановка питання. В оглядових трьохкоординатних РЛС виміру висоти цілей, спостережуваних під малими кутами місця, утруднені через інтерференційне перекручування діаграм спрямованості антен (ДСА). Особливо гостро це питання сто-

їть в метровому діапазоні хвиль, що пов'язане з неможливістю створення вузької ДСА у вертикальній площині. Внаслідок цього "притиснення" головного променя ДСА до Землі призводить до того, що поле на раскриві антени наводиться як прямим, так і відбитим від земної поверхні луна-сигналами.

У результаті, оцінки кута місця повітряних об'єктів в області малих кутів місця стають недостовірними. Зокрема, в існуючих зразках оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону при кутах місця цілей, меншого 2/3, значення ширини ДНА у вертикальній площині, від даних, одержуваних за висотомірним каналом, відмовляються, а висоту цілей визначають за моментом їхнього входу в зону виявлення РЛС [1]. При цьому точність видаваних значень висоти непринятно низька.

Аналіз літератури. Рішенню описаного завдання в умовах апріорної невизначеності про поверхню, що підстилає, присвячене значне число робіт. У цілому їх можна поділити на кілька груп. До однієї з них ставляться рішення, спрямовані на поліпшення технічних характеристик РЛС [2], але розміри антен метрового діапазону істотно обмежують їх практичну реалізацію. Інші рішення засновані на компенсації перевідбитих від земної поверхні лун-сигналів, як перешкодових коливань [3, 4], а також на пеленгації прямого й перевідбитого від земної поверхні луна-сигналів, як джерел перешкод [5, 6]. Однак, внаслідок відносно малого часу опромінення мети зондувальними сигналами й порівняно високого ступеня просторової кореляції прямого й перевідбитого лун-сигналів такі рішення в оглядових трьохкоординатних РЛС стають малоефективними.

Таким чином, на сьогодні відсутні практичні рішення підвищення точності виміру висоти повітряних об'єктів в оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону.

Метою статті є розробка способу підвищення точності вимірів висоти цілей, спостережуваних під малими кутами місця, для оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону хвиль, заснованого на байєсівському методі оцінювання параметрів при відсутності апріорних відомостей про підстилачу поверхню.

Основна частина

Пояснити характер впливу Землі на процедуру виміру висоти (кута місця) повітряних об'єктів можна на прикладі методу оцінки висоти, реалізованого в існуючих зразках оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону хвиль [1].

Суть методу зводиться до аналізу амплітудно-фазового розподілу поля, що наводиться на раскриві антенної решітки (АР) луна-сигналом, шляхом Фур'є-перетворення (рис. 1). Результатом такого перетворення є, по суті, просторовий спектр прийнятого сигналу. По положенню максимуму цього спектра на кутомісцевій осі визначається кут місця повітряного об'єкта $\epsilon_{ц}$. За отриманим значен-

ням $\epsilon_{ц}$, а також за обмірюваним значенням дальності $R_{ц}$ у спецобчислювачі (наявному в станції) визначається висота мети $H_{ц}$.

$$H_{ц} = R_{ц} \cdot \sin(\epsilon_{ц}) + \frac{R_{ц}^2}{2 \cdot R_{ез}}, \quad (1)$$

де $R_{ез}$ – еквівалентний радіус Землі, що враховує тропосферну рефракцію радіохвиль.

Вплив земної поверхні на кутомісцеві виміри в РЛС проявляється в тому, що на антену одночасно впливають два сигнали: прямий луна-сигнал і цей же сигнал, перевідбитий від земної поверхні. Отже, після операції Фур'є-перетворення формується два спектри, рознесених щодо нульового значення в різні сторони (рис. 2).

При локації повітряних об'єктів в області більших кутів місця ці спектри досить рознесені і їхній вплив один на одного невеликий. У результаті, просторовий спектр луна-сигналу має симетричну унімодальну форму (рис. 2, а), а положення його максимуму на кутомісцевій осі збігається із дійсним кутомісцевим положенням повітряного об'єкта (рис. 2, а).

При спостереженні повітряних об'єктів в області малих кутів місця ($\epsilon < \Delta\epsilon_a$) просторові спектри, що відповідають прямому й перевідбитому сигналам, істотно зближуються й накладаються один на один (рис. 2, б). Це призводить до того, що результуючий просторовий спектр спотворюється (він стає несиметричним і мнотгомодовим), а його максимум зміщується щодо широго кутомісцевого положення повітряного об'єкта. У результаті, у станції точність проведених вимірів висоти (кута місця) повітряних об'єктів, що перебувають в області малих кутів місця, істотно знижується.

Для підвищення точності кутомісцевих вимірів в умовах апріорної невизначеності про поверхню, що підстилає, у РЛС розглянутого класу пропонується модернізація алгоритму виміру кута місця, застосовуваного до просторових спектрів лун-сигналів.

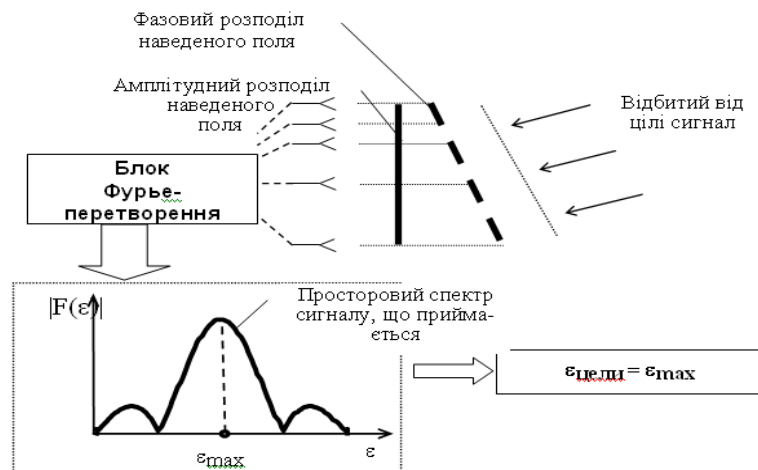


Рис. 1. До методу оцінки висоти цілей, реалізованого в РЛС

Така модернізація може бути запроваджена на положеннях байесівського методу одержання оцінок [8]. Завдання полягає у визначенні точкової оцінки параметра α . При байесівському підході одержати таку оцінку можна з використанням функції ризику $r(\alpha - \hat{\alpha})$ або функції вартості (втрат). У якості останньої можуть використатися, наприклад, проста, прямокутна, трапецеїдальна функції (рис. 3).

Після визначення умовного середнього ризику відповідно до виразу

$$r_y(\hat{\alpha}) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\alpha - \hat{\alpha}) \cdot p_y(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

оптимальна точкова оцінка визначається по мінімуму розрахованого умовного середнього ризику. Залежно

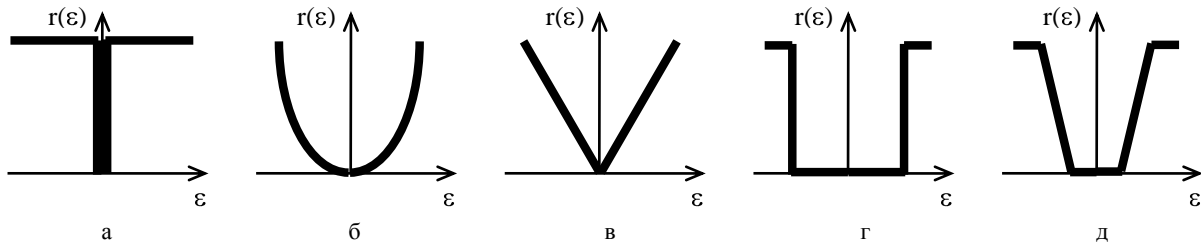
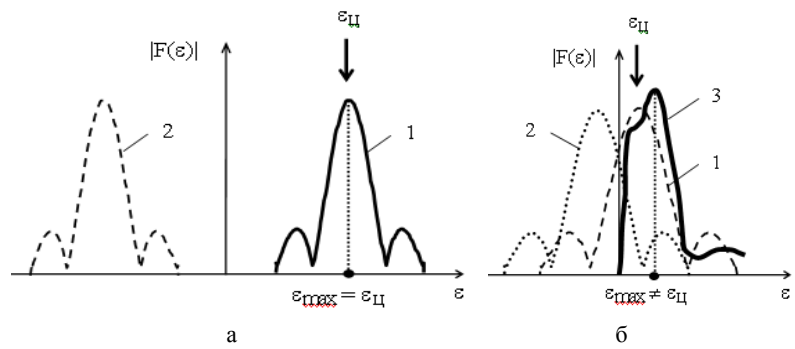


Рис. 3. Функції ризику:
а – проста; б – квадратична; в – модульня; г – прямокутна; д – трапецевидна

При допущенні можливості розгляду просторового спектра луна-сигналу (одержуваного при описаному вище методі виміру висоти в оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону хвиль) як апостеріорної щільності ймовірності розподілу оцінюваного параметра (кутомісцевого положення цілі) можна відзначити, що в зазначених РЛС при розрахунку умовного середнього ризику як функція втрат використовується проста функція вартості (рис. 3, а), тобто мінімум середнього ризику буде відповідати точці максимуму апостеріорної щільності ймовірності.

При такому варіанті трактування процедури виміру висоти повітряних об'єктів, спостережуваних в області малих кутів місця (де вплив Землі проявляється істотно, і результуючий просторовий спектр сигналу спотворюється (рис. 2, б)), визначення кута місця цілей з використанням простої функції ризику призводить до значних помилок вимірів типу "відскік" [1].

З погляду байесівського методу теорії вимірювань таке зниження точності пояснюється тим, що використовується в алгоритмі проста функція втрат є досить чутливою до спотворень функції щільності ймовірності [8]. Зокрема, при мультимодальній формі функції щільності ймовірності в межах її глобального максимуму є кілька локальних максимумів (рис. 4), і, по суті, (при реалізованому в РЛС методі вимірів кута місця) кожної з них може бути виділений для точкової оцінки параметра.



Просторові спектри:
1 – прямого сигналу; 2 – відбитого сигналу; 3 – результуючого сигналу

Рис. 2. Форма просторового спектра при кутах міста цілі:
а – $\epsilon_{max} > \epsilon_{ц}$; б – $\epsilon_{max} < \epsilon_{ц}$

від форми апостеріорної щільності ймовірності (симетрична, асиметрична, мультимодальна й т.п.) і від обраної функції втрат якість оцінки є різною.

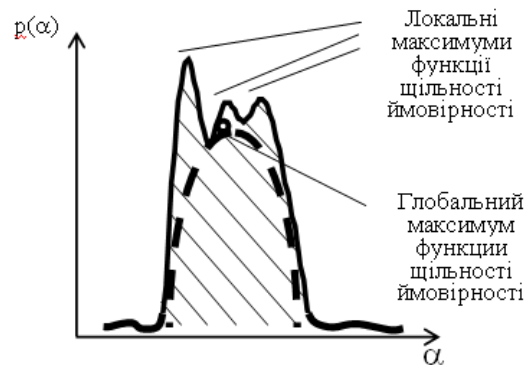


Рис. 4. Пояснення локального та глобального максимумів функції щільності вірогідності

Правомірно припустити, що для підвищення точності оцінок вимірюваного параметра при мультимодальній формі щільності ймовірності доцільно при розрахунку умовного середнього ризику використати такі функції вартості, які мають меншу чутливість до перекручувань функції щільності ймовірності, наприклад, квадратичну або модульну функції (рис. 3, б, в).

Для оцінки правомірності запропонованого способу вимірювання висоти цілей були досліджені очікувані показники точності кутومیсцевих вимірів, проведених з використанням різних алгоритмів оцінювання. Дослідження проводилися методом математичного моделювання з використанням пакета MathCAD. У якості вихідних даних вибиралися наступні.

1. Параметри РЛС: довжина хвилі $\lambda = 1,5$; відстань між елементами (крок) $\Delta d = 1,3 \lambda$; кількість елементів $M=16$; висота електричного центра антени над поверхнею Землі $h_a = 21$ м; ширина ДНА РЛС у вертикальній площині $\Delta \epsilon_a = 3^\circ$.

2. Підстилаюча поверхня представлялася плоскою поверхнею, а також крупнофасетною моделлю, характерною для середньопересіченної місцевості.

3. Діапазон кутомісцевих положень повітряного об'єкта відповідав ширині ДНА РЛС у вертикальній площині.

4. Відстань від РЛС до повітряної мети приймалося рівним значенню далекої границі зони виявлення РЛС (сотні кілометрів). Відповідно до цього вибиралося й типове значення відносини "сигнал/шум" на вході антени $q^2 = 14$ дБ.

Для обраних вихідних умов спочатку були визначені показники точності кутомісцевих вимірів для випадку перевідбиття луна-сигналів від рівної гладкої площини з коефіцієнтом відбиття $R = 1$. При цьому, з метою аналізу характеру впливу на точність кутомісцевих вимірів лише земної поверхні, відношення "сигнал/шум" вибиралося досить великим: $q^2 = 100$ дБ.

Для зазначених умов ($q^2 = 100$ дБ, рівна гладка відбиваюча поверхня) були отримані залежності модуля помилок вимірів кута місця $|\Delta \epsilon|$ від дійсного кутомісцевого положення повітряного об'єкта ϵ_c при використанні в алгоритмах вимірювань різних функцій вартості. Результати моделювання представлені на рис. 5. Слід зазначити, що дані помилки (рис. 5) є, по суті, систематичними, і можуть бути враховані. При зміні форми підстилаючої поверхні (використалася крупнофасетна модель поверхні) і зменшенні відношення "сигнал/шум" до величини $q^2 = 14$ дБ залежність модуля помилок вимірювань $|\Delta \epsilon|$ від кута місця ϵ здобуває трохи інший характер (рис. 6).

Як показують результати, алгоритми, що використовують квадратичну або модульну функцію вартості,

в області кутів місця до 2° (область недостовірних вимірювань) дають погрішності вимірів, в 2...3 рази менші, у порівнянні з алгоритмом, що використовує просту функцію ризику. При кутах місця, більших 2° (за межами області недостовірних вимірювань), алгоритми дають практично однакові результати.

Описані вище показники помилок вимірів розраховувалися й в області більших кутів місця ($\epsilon > \Delta \epsilon_a$). Як показали результати моделювання, помилки кутомісцевих вимірів, обумовлені лише впливом земної поверхні (тобто при великому відношенні "сигнал/шум") для всіх трьох розглянутих алгоритмів практично збігаються й при цьому досить малі ($\sigma < 0,02^\circ$). Помилки, обумовлені шумового складового вхідного сигналу, також практично збігаються й визначаються, в основному, величиною відносини "сигнал/шум".

При практичному втіленні пропонованого рішення в існуючі зразки оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону хвиль не потрібно істотної доробки РЛС.

Висновок

Однієї з особливостей роботи оглядових трьохкоординатних РЛС метрового діапазону є те, що при визначенні висоти повітряних об'єктів, що перебувають в області малих кутів місця, точність проведених вимірів у зазначених РЛС, внаслідок впливу земної поверхні, значно знижується. Для підвищення точності кутомісцевих вимірів доцільно при байєсівському підході умовний середній ризик розраховувати з використанням функцій вартості, менш чутливих до перекручувань просторового спектра лун-сигналів, наприклад, квадратичної або модульної. Результати досліджень показали можливість зменшення в 2...3 рази погрішностей кутомісцевих вимірів у порівнянні з існуючим у РЛС способом оцінки висоти повітряних об'єктів. Більше ефективними шляхами підвищення точності виміру висоти повітряних об'єктів у зазначених РЛС є рішення з використанням апріорних відомостей про підстилаючу поверхню.

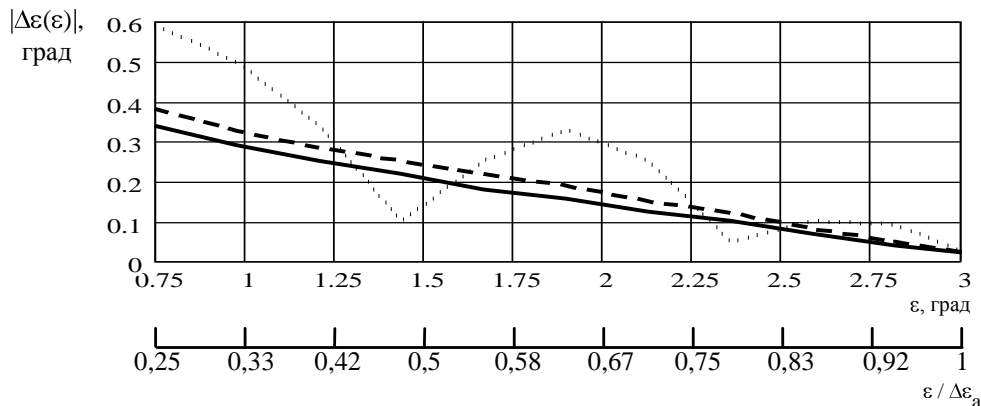


Рис. 5. Залежності середньоквадратичних помилок вимірів кута місця від кутомісцевого положення цілі (для рівної плоскої відбиваючої поверхні) при використанні функцій вартості:

— квадратичної; - - - модульної; — простої

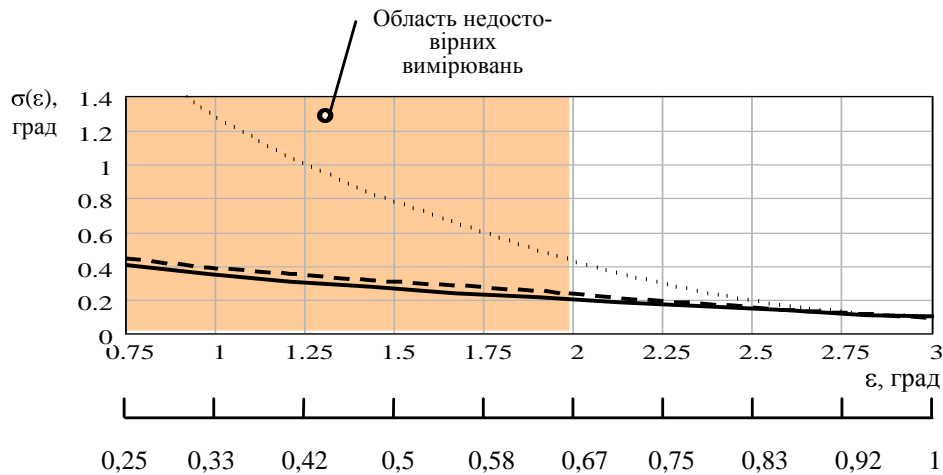


Рис. 6. Залежності сумарних СКВ вимірювань кута місця від кутомісцевого положення мети (для довільної поверхні) з використанням функцій вартості:

— квадратичної; - - - - модульної; — простої

Список літератури

1. Климченко В.И. Вооружение и военная техника радиотехнических войск. Трёхкоординатная радиолокационная станция 55Ж6 / Уч. пос. – Х.: ВИРТА, 1990 – 269 с.
2. Бартон Д.К. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места // ТИИЭР.– 1974. – №6. – С. 37-61.
3. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
4. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Родзивилов В.А., Федоров И.Б., Чернов М.В. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №2. – С. 3-17.
5. Дзвонковская А.Л., Дмитриенко А.Н., Кузьмин А.В. Эффективность измерения углов прихода

сигнала радиопеленгаторами на основе метода максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т.46, №10. – С. 1242-1247.

6. Леховицкий Д.И., Флексер П.М., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г. Статистический анализ некоторых «сверхразрешающих» методов пеленгации источников шумовых излучений в АР при конечном объеме обучающей выборки // Радиотехника. – 2001. – №6. – С. 23-29.

7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. – М.: Сов. радио, 1975. – 392 с.

Надійшла до редколегії 30.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.І. Леховицький, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ПРИМЕНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОБЗОРНЫХ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ РЛС

В.И. Климченко, А.А. Мальшев, И.М. Невмержицкий

Предлагается вариант повышения точности измерения высоты воздушных объектов, наблюдаемых в области малых углов места, в обзорных трехкоординатных РЛС метрового диапазона волн. Решение основывается на байесовском методе оценки параметров.

Ключевые слова: обзорные трехкоординатные РЛС, малые углы места, байесовский метод оценки параметров.

APPLICATION BAESS A METHOD PARAMETERS FOR INCREASE OF ACCURACY OF MEASUREMENT HEIGHT OF AIR OBJECTS IN SURVEY THREE-COORDINATE RADAR

V.I. Klimchenko, A.A. Malyshev, I.M. Nevmerzhiickiy

The variant of increase of accuracy of measurement of height of the air objects observable in the field of small corners of a place, in survey three-coordinate radar a meter wave band is offered. The decision is based on Baess a method of an estimation of parameters.

Keywords: survey THREE-XY RLS, small corners of place, байесовский метод of estimation of parameters.