

УДК 621.391.26

О.Л. Кузнецов, О.В. Коломійцев, К.В. Садовий

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РОЗРІЗНЕННЯ ЗА ШЛЯХОВОЮ ДАЛЬНОСТЮ РЛС З СИНТЕЗОВАНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ В УМОВАХ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ АТМОСФЕРИ

У статті надаються результати чисельного аналізу зниження роздільної здатності РЛС з синтезованою апертурою за шляховою дальністю, які виникають внаслідок впливу неоднорідностей тропосфери та іоносфери. Дослідження проведені для РЛС сантиметрового діапазону в залежності від характеристик середовища поширення радіохвиль.

**Ключові слова:** синтезована антенна решітка, розділення за шляховою дальністю, тропосфера, іоносфера, флуктуації фази.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасна тенденція проектування апаратури радіолокаційних систем (РЛС) космічного базування, як правило, передбачає її подвійне застосування. Це дозволяє, оптимізуючи параметри системи для основного призначення (цивільного або військового), закладати в неї гнучкі можливості для вирішення завдань за другим напрямком.

Отримання високоякісного радіолокаційного зображення земної поверхні космічними апаратами пов'язано із створенням та широким застосуванням синтезованої апертури (СА). Турбулентність атмосфери призводить до флуктуацій її показника заломлення та до викривлень фази радіолокаційного радіосигналу, які можуть трактуватися як мультиплікативна завада [1–5]. Дані флуктуації призводять до порушення просторово-часової когерентності прийнятого сигналу.

Таким чином, при поширенні електромагнітної хвилі внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей, реалізації розподілу фаз для різних моментів часу будуть різними. Тому кут приходу радіохвиль набуває нерегулярних змін відносно головного напрямку. Вказане призводить до зниження якості розділення об'єктів спостереження за шляховою дальністю РЛС космічного базування з СА на великих відстанях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [6] синтезовано алгоритм вимірювання кута приходу сигналу в РЛС з фазованими антенними решітками (ФАР). Для різних законів зміни коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій сигналу, що приймається елементами ФАР, запропонована методика оцінювання помилки вимірювання кута його приходу. З використанням даної методики, в роботі [7] проведено чисельний аналіз впливу неоднорідностей тропосфери та земної поверхні на зниження то-

чності вимірювання кутових координат цілі в РЛС з ФАР.

На підставі отриманих результатів, в роботі [8] наведена методика розрахунку можливого обмеження розміру синтезованої апертури антени космічного апарату космічної системи радіолокаційного спостереження внаслідок впливу флуктуацій фронту хвилі радіолокаційного сигналу.

Доцільно поширити наведені результати на оцінювання можливостей космічних апаратів щодо забезпечення необхідної роздільної здатності за шляховою дальністю в умовах впливу атмосферних неоднорідностей із застосуванням як теоретичних так й експериментальних даних.

**Метою статті** є дослідження можливостей використання РЛС космічного базування з синтезованою апертурою щодо забезпечення необхідної роздільної здатності за шляховою дальністю.

### Основний матеріал

Фаза хвилі  $\varphi(t)$ , яка проходить у середовищі шлях  $S$ , визначається згідно виразу

$$\varphi(t) = k \int_0^s n(s, t) ds, \quad (1)$$

де  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число;  $\lambda$  – довжина хвилі радіосигналу;  $n(t)$  – показник заломлення середовища.

В тропосфері для частот, які не превіщують 20 ГГц, показник заломлення визначається виразом [2–4]

$$n = 1 + \frac{0,776 \cdot 10^{-4}}{T} \left( P + \frac{4810v}{T} \right), \quad (2)$$

де  $T$  – абсолютна температура в градусах Кельвіна;  $P$  тиск повітря в мілібарах;  $v$  – абсолютна вологість або тиск водяної пари в мілібарах.

Згідно виразу (2) флуктуації тиску, температури та вологості в неоднорідностях тропосфери призводять до флуктуацій показника заломлення.

В іоносфері, коефіцієнт заломлення визначається виразом [2–4]

$$n = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N}{f^2}}, \quad (3)$$

де  $N$  – концентрація електронів;  $f$  [МГц] – частота радіосигналу.

Згідно з виразом (3), показник заломлення іоносфери визначається електронною концентрацією. Турбулентне перемішування повітря, сонячна активність, різного роду метеори призводять до флуктуацій електронної концентрації, які обумовлюють випадкові зміни показника заломлення.

Таким чином, випадкові зміни показника заломлення атмосфери викликають флуктуації фази  $\varphi(t)$ , що призводить до виникнення випадкових помилок вимірювання кута приходу сигналу.

Неоднорідності тропосфери знаходяться в основному у приземній області товщиною порядку  $h_t = 6$  км. Вираз для дисперсії флуктуацій кутів приходу, які обумовлені неоднорідностями тропосфери, має вид [3]

$$\sigma_{\theta t}^2 = 4\sqrt{\pi} \sigma_n^2 \frac{h_t}{b \cos(\alpha)}, \quad (4)$$

де  $\sigma_n^2$  – дисперсія флуктуацій коефіцієнта заломлення;  $b$  – масштаб неоднорідності;  $\alpha$  – кут огляду.

Іоносферні неоднорідності розташовані в основному в області висот  $h_i = 150 \div 300$  км. Вираз для дисперсії флуктуацій кутів приходу, що обумовлені іоносферними неоднорідностями, має вид [3]

$$\sigma_{\theta i}^2 = 286 \frac{\sigma_N^2 h_i}{f^4 b \cos(\alpha)}, \quad (5)$$

де  $\sigma_N^2$  – дисперсія флуктуацій електронної концентрації;  $f$  – частота радіосигналу.

На рис. 1 наведені графіки залежності середньоквадратичної помилки (СКП) вимірювання кутової координати, обумовленої впливом неоднорідностей тропосфери та іоносфери Землі, від кута огляду. Результати отримані згідно наступних виразів: криві 1 і 2 – (4), крива 3 – (5).

Вхідними даними для розрахунків були обрані наступні:  $h_t = 6$  км,  $h_i = 200$  км,  $\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}$  (крива 1),  $\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-10}$  (крива 2),  $b = 100$  м (криві 1 і 2),  $b = 10000$  м (крива 3),  $\alpha = 15 \dots 45^\circ$ ,  $\sigma_N = 10^{10}$  електрон/м<sup>3</sup>,  $f = 10$  ГГц ( $\lambda = 3$  см).

Згідно кривих 1 і 3, складова СКП вимірювання кута приходу хвилі з довжиною  $\lambda = 3$  см, яка обумовлена впливом неоднорідностей тропосфери  $\sigma_{\theta t}$ ,

більш ніж в 1300 разів перевищує складову  $\sigma_{\theta i}$ , що викликана впливом іоносферних неоднорідностей.

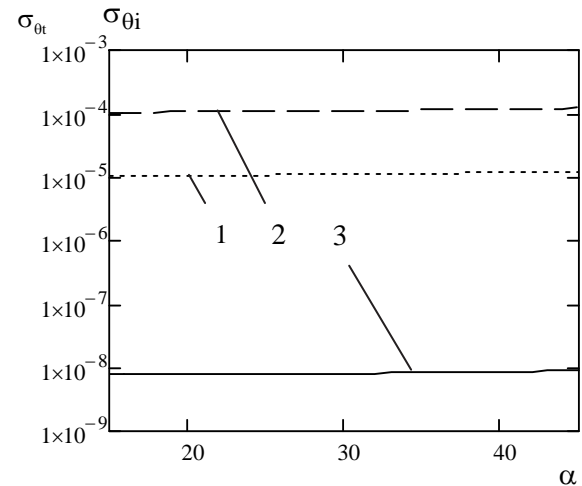


Рис. 1. Залежність СКП вимірювання кутової координати від кута огляду

В роботі [5] відмічено, що значення дисперсії флуктуацій показника заломлення тропосфери лежить в межах  $\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-12} - 0,25 \cdot 10^{-10}$ , причому, перша цифра відповідає середнім, а друга – максимально несприятливим умовам.

З кривих 1 і 2 видно, що ця різниця дисперсії флуктуацій показника заломлення обумовлює різницю СКП вимірювання кута приходу сигналу в 10 разів.

Доцільно провести сполучення теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

Сполучення теорії та дослідних даних дозволяє надати зручну формулу для визначення варіацій оцінок тропосферних кутів приходу радіохвиль [3]

$$\sigma_{\theta t} = \frac{X_1}{\sqrt{\cos(\alpha)}}, \quad (6)$$

де  $X_1 = (1 \div 3)$  кутових сек.

Значення  $X_1 = 3''$  відповідає граничним значенням флуктуацій кутів приходу радіохвиль.

Сполучення результатів теорії з експериментальними даними дозволяє визначити вираз для оцінок іоносферних кутів приходу радіохвиль [3]

$$\sigma_{\theta i} = \frac{X_2 \lambda^2}{\sqrt{\cos(\alpha)}}, \quad (7)$$

де  $X_2 = (0,1 \div 0,3)$  кутових хв/м<sup>2</sup>.

Значення  $X_2 = 0,1$  – середнє, а  $X_2 = 0,3$  кутових хв/м<sup>2</sup> – максимальне.

На рис. 2 наведені результати сполучення теоретичних та експериментальних результатів залежності СКП вимірювання кутової координати від кута огляду які отримані згідно виразів (6) і (7).

Криві 1 ( $X_1 = 3''$ ), 2 ( $X_1 = 2''$ ) і 3 ( $X_1 = 1''$ ) розраховані згідно виразу (6), а криві 4 ( $X_2 = 0,3$  куто-

вих  $\text{хв}/\text{м}^2$ ), 5 ( $X_2 = 0,2$  кутових  $\text{хв}/\text{м}^2$ ) і 6 ( $X_2 = 0,1$  кутових  $\text{хв}/\text{м}^2$ ) розраховані згідно виразу (7). Графіки отримані для  $\alpha = 15...45^\circ$  при  $\lambda = 3$  см.

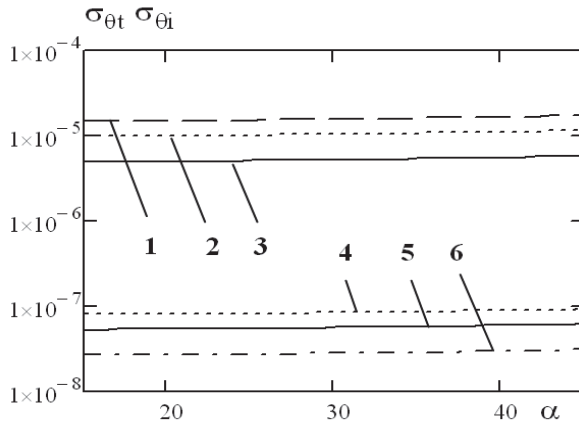


Рис. 2. Результати сполучення теоретичних та експериментальних досліджень

Згідно отриманих результатів можна вважати, що оцінки отримані згідно теоретичних виразів є співрозмірними з оцінками, які отримані згідно формул, що сполучають теоретичні та експериментальні результати.

Перевищення тропосферної складової СКП вимірювання кута приходу хвилі  $\sigma_{\theta t}$  з довжиною  $\lambda = 3$  см над іоносферною складовою  $\sigma_{\theta i}$  може складати від 60 до більш ніж 500 разів.

Оскільки флуктуації кутів приходу радіохвиль, які обумовлені тропосферним та іоносферними неоднорідностями є незалежними, тому загальну дисперсію флуктуацій кутів можна обчислити за наступною формулою

$$\sigma_{\theta}^2 = \sigma_{\theta t}^2 + \sigma_{\theta i}^2. \quad (8)$$

Таким чином, для хвиль сантиметрового діапазону основний внесок в загальну помилку вимірювання кутової координати здійснює вплив неоднорідностей тропосфери.

Використання СА антени дозволяє створювати антенні решітки великого розміру. В СА у визначені моменти часу здійснюється синфазне підсумовування прийнятих коливань з урахуванням і компенсацією набігу фаз протягом руху літального апарату.

Як показано в роботі [8] граничні розміри СА обумовлені впливом неоднорідностей атмосфери визначаються згідно виразу

$$L_{CA} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_{CA}} = \frac{\lambda}{2q\sigma_{\theta}}. \quad (9)$$

де  $L_{CA}$  – розмір СА;  $\Delta\theta_{CA}$  – ширина діаграми спрямованості СА;  $q$  – відношення сигнал-шум за напругою;  $\sigma_{\theta}$  – СКП вимірювання кутової координати.

З урахуванням виразів (4-7) можна визначити граничні розміри СА (9), з урахуванням СКП вимірювання кутової координати  $\sigma_{\theta}$ , отриманої як з результатами теоретичних так й експериментальних досліджень.

Роздільна здатність РЛС за шляховою дальністю визначається виразом

$$\Delta r = \frac{r_{\text{ц}}\lambda}{2L_{CA}}, \quad (10)$$

де  $r_{\text{ц}}$  – дальність до об'єкта радіолокаційного спостереження.

На рис. 3 наведені графіки залежності роздільної здатності РЛС за шляховою дальністю від кута огляду розраховані згідно виразу (10) з урахуванням наступних співвідношень для  $\sigma_{\theta t}^2$  і  $\sigma_{\theta i}^2$ : крива 1 – (4) і (5) ( $h_t = 6$  км,  $h_i = 200$  км,  $\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}$ ,  $\sigma_N = 10^{10}$  електрон/м<sup>3</sup>,  $b = 100$  м (для тропосфери),  $b = 10000$  м (для іоносфери)); криві 2-4 – (6) і (7) ( $X_2 = 0,1$  кутових  $\text{хв}/\text{м}^2$ ,  $X_1 = 1''$  (крива 2),  $X_1 = 2''$  (крива 3),  $X_1 = 3''$  (крива 4).

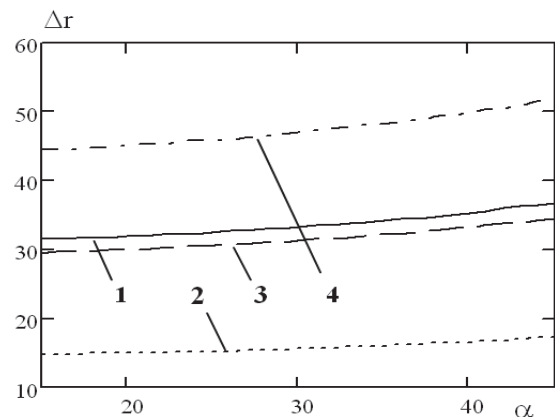


Рис. 3. Залежність роздільної здатності РЛС за шляховою дальністю від кута огляду

Результати отримані для наступних даних:  $\lambda = 3$  см,  $r_{\text{ц}} = 300$  км,  $q = 10$ .

Згідно наведених графіків, вплив атмосферних неоднорідностей, переважно неоднорідностей тропосфери, може призвести до зниження роздільної здатності РЛС за шляховою дальністю до величин 15...50 м при потрібних значеннях в одиниці метрів.

Порівняння результатів вказують на те, що теоретичні формули та вирази, що сполучають теорію і експериментальні дані дають співрозмірні значення варіацій оцінок вказаних роздільних здатностей. Так, крива 1, яка відображає теоретичні результати, буде приблизно співпадати з кривими: 2 – при  $b = 1800$  м; 3 – при  $b = 450$  м; 4 – при  $b = 200$  м.

При максимально можливій дисперсії флуктуацій показника заломлення  $\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-10}$ , розділь-

на здатність за шляховою дальністю може додатково знизитись в 10 разів і досягати сотень метрів.

## Висновки

Вплив неоднорідностей атмосфери призводить до викривлень фазової структури прийнятого радіолокаційного сигналу та зниження точності вимірювання кутової координати.

Для РЛС сантиметрового діапазону довжин хвиль переважний вплив на зниження точності визначення просторового положення об'єктів радіолокаційного спостереження здійснюють неоднорідності тропосфери.

Роздільна здатність РЛС з СА космічного базування за шляховою дальністю здатна знижуватись до десятків-сотень метрів в залежності від дисперсії флуктуацій показника заломлення тропосфери.

Подальший розвиток даного напрямку може бути пов'язаний з синтезом оптимальних алгоритмів обробки радіолокаційного сигналу в РЛС систем космічної радіолокаційної розвідки з СА.

## Список літератури

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАК-ВИС», 1999. – 828 с.
2. Долуханов М.П. Флюктуационные процессы при распространении радиоволн / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1971. – 183 с.

3. Колосов М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковлев. – М.: Связь, 1969. – 156 с.

4. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями / Л.А. Чернов. – М.: Наука, 1975. – 171 с.

5. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. Радио, 1970. – 383 с.

6. Кузнецов О.Л. Оцінювання впливу фазових флуктуацій сигналу на зниження точності вимірювання кутових координат цілі в РЛС з фазованими антенними решітками / О.Л. Кузнецов // Системи обробки інформації. – Х: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2008. – Вип. 1 (68). – С. 38-40.

7. Кузнецов О.Л. Обмеження якості просторових вимірювань в РЛС з фазованою антенною решіткою внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей та земної поверхні / О.Л. Кузнецов, О.Б. Танцюра, О.Л. Мельник // Системи управління навігації та зв'язку. – К: ЦНДІ навігації і управління, 2012. – Вип. 1 (21), том 2. – С. 49-52.

8. Методика розрахунку граничного розміру апертури синтезованої антенної решітки космічної системи радіолокаційного спостереження / О.Л. Кузнецов, Д.В. Карлов, В.М. Ковбаса, М.А. Матвійчук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України – Х: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2016. – Вип. 2 (23). – С. 131-134.

Надійшла до редколегії 11.01.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук доц. В.І. Василюшин, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## РАЗРЕШЕНИЕ ПО ПУТЕВОЙ ДАЛЬНОСТИ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ АТМОСФЕРЫ

А.Л. Кузнецов, А.В. Коломийцев, К.В. Садовый

В статье представлены результаты численного анализа снижения разрешения РЛС с синтезированной апертурой по путевой дальности, возникающие вследствие влияния неоднородностей тропосферы и ионосферы. Исследования проведены для РЛС сантиметрового диапазона в зависимости от характеристик среды распространения радиоволн.

**Ключевые слова:** синтезированная антенная решетка, разрешение по путевой дальности, тропосфера, ионосфера, флуктуации фазы.

## THE TRACK DISTANCE DISTINCTION OF SYNTHESIZED RADAR ANTENNA ARRAY UNDER THE INFLUENCE OF ATMOSPHERE'S HETEROGENEITY

O. Kuznetsov, O. Kolomyitsev, K. Sadovyi

The article provided results of numerical analysis of reduction of distinction of synthesized aperture for track range as a result of the impact of heterogeneity of the troposphere and ionosphere. The researches were conducted for radar centimeter range in depend of the characteristics of the propagation environment.

**Keywords:** synthesized antenna array, distinction for track range, troposphere, ionosphere, fluctuation of phase.