

Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил

УДК 621.391.26

О.Л. Кузнецов, Д.В. Карлов, В.М. Ковбаса, М.А. Матвійчук

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГРАНИЧНОГО РОЗМІРУ АПЕРТУРИ СИНТЕЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У статті надається методика розрахунку граничного розміру синтезованої апертури антени космічного апарату космічної системи радіолокаційного спостереження. Проводиться аналіз можливого обмеження розміру синтезованої антенної решітки внаслідок впливу флуктуацій фронту хвилі радіолокаційного сигналу.

Ключові слова: синтезована антенна решітка, кутова координата, радіолокаційний сигнал, фазовий метод.

Вступ

Постановка проблеми. Завдяки застосуванню у космічних апаратах РЛС з синтезованою апертурою стало можливим отримувати високоякісне радіолокаційне зображення земної поверхні, цілей і об'єктів, яке за детальністю порівнянне з аерофотознімком. Радіолокатори з синтезованою апертурою дозволяють отримувати високе розділення за шляховою дальністю на великих відстанях. Це можливо за рахунок формування вузької діаграми спрямованості за допомогою штучно створеної антенної решітки.

Розмір створеної штучної антенної решітки в горизонтальній площині дорівнює довжині ділянки траєкторії, на якій здійснюється запам'ятовування і когерентне накопичення сигналів.

Можна визначити дві області атмосфери, що суттєво впливають на викривлення фазової структури сигналу космічної системи радіолокаційного спостереження - тропосферу та іоносферу Землі [1 – 4].

У тропосфері постійно виникають складні турбулентні процеси. Флуктуації тиску, температури та вологості в неоднорідностях тропосфери призводять до флуктуацій її показника заломлення.

В іоносфері турбулентне перемішування повітря, сонячна активність, метеори призводять до флуктуацій електронної концентрації, які обумовлюють випадкові зміни показника заломлення.

Внаслідок флуктуацій показника заломлення, обумовлених впливом атмосфери, виникають флуктуації фази радіолокаційного радіосигналу, які можуть трактуватися як мультиплікативна завада.

Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій. В роботі [5] запропонована методика оцінювання помилки вимірювання кутової координати в

РЛС з ФАР за наявності фазових викривлень сигналу, що приймається елементами антенної решітки. В роботі [6] надано аналіз можливих помилок вимірювання кутових координат цілі в РЛС з ФАР, обумовлених впливом тропосферних неоднорідностей. Має практичну користь поширення отриманих результатів на питання дослідження якості виконання завдань за призначенням РЛС з синтезованою антенною решіткою за умовою спільного впливу тропосферних та іоносферних неоднорідностей.

Метою статті є дослідження впливу неоднорідностей тропосфери та іоносфери на обмеження граничного розміру синтезованої антенної решітки.

Основний матеріал

Флуктуації кутів приходу радіохвиль, які обумовлені тропосферним та іоносферними неоднорідностями можна вважати незалежними.

В роботі [1] показано, якщо вся траса заповнена неоднорідностями, то дисперсія флуктуацій кута приходу хвилі може бути оцінена згідно виразу

$$\sigma_{\theta}^2 = 0,81C_{\varepsilon}^2 l_0^{-1/3} S, \quad (1)$$

де $C_{\varepsilon} = \sqrt{2}\sigma_{\varepsilon} L_0^{-1/3}$ - структурна постійна; σ_{ε} - середньоквадратичне відхилення відносної діелектричної проникності середовища поширення радіосигналу; L_0 - середній розмір неоднорідності (зовнішній масштаб турбулентності); l_0 - внутрішній масштаб турбулентності; S - протяжність траси.

Згідно наведених в [1] даних, для траси протяжністю $S = 100$ км в тропосфері з $C_{\varepsilon}^2 = 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$ і $l_0 = 1$ см з (1) середньоквадратичне значення помилки кута приходу хвилі складає $\sigma_{\theta} \approx 10^{-4}$ рад. Для траси протяжністю $S = 1000$ км в іоносфері з

$L_0 = 100$ км, $l_0 \approx 1$ км і $\sigma_N = 10^{10}$ електрон/м³ при довжині хвилі $\lambda = 1$ м, структурній постійній $C_\epsilon^2 = 3,5 \cdot 10^{-15}$ см^{-2/3}, згідно з (1) $\sigma_\theta \approx 5 \cdot 10^{-5}$ рад. Вказані оцінки є близькими до експериментальних.

Тропосферні неоднорідності здійснюють суттєвий вплив на викривлення фазової структури хвиль сантиметрового діапазону, а іоносферні неоднорідності – хвиль метрового діапазону.

Якщо в області, суттєвою для поширення, міститься велика кількість статистично незалежних неоднорідностей, то в силу центральної граничної теореми, флукутації фази розподілені за нормальним законом.

В [4] надані величини дисперсії фазових флукутацій радіосигналу, який пройшов тропосферу та іоносферу. В тропосфері з середнім розміром турбулентних неоднорідностей $L_0 \approx 100$ м дисперсія флукутацій фази σ_ϕ^2 радіосигналу може досягати одиниць рад² для хвиль сантиметрового діапазону.

В іоносфері при розмірах неоднорідності $L_0 = 5, 10$ км, значенні зенітного кута $\xi = 80^\circ$, дисперсія фазових флукутацій σ_ϕ^2 при спокійному середньообуреному стані іоносфери може досягати одиниць рад² для метрових хвиль, а при великообуреному стані іоносфери – одиниць рад² для дециметрових хвиль і декількох десятків рад² для метрових хвиль.

Радіус кореляції фазових флукутацій, за умовою, що вся траса поширення радіосигналу знаходиться у випадково неоднорідному середовищі, може бути розрахована за формулою [1]

$$\rho = (11C_\epsilon^2 S / \lambda^2)^{-3/5}. \quad (2)$$

Для траси протяжністю $S = 100$ км, в тропосфері зі структурною постійною $C_\epsilon^2 = 10^{-14}$ см^{-2/3} при довжині хвилі РЛС $\lambda = 3$ см, згідно виразу (2), радіус кореляції складає $\rho \approx 140$ м. Для траси протяжністю $S = 1000$ км в іоносфері зі середньоквадратичним відхиленням електронної щільності $\sigma_N = 10^{10}$ електрон/м³ при $\lambda = 1$ м радіус кореляції фазових флукутацій складає $\rho = 4000$ м.

Для РЛС з ФАР коефіцієнт міжканальної кореляції фазових флукутацій сигналів, може бути описаний гаусовою залежністю

$$K(d) = e^{-(d/\rho)^2}, \quad (3)$$

де ρ – радіус кореляції флукутацій фази сигналу; d – відстань між сусідніми елементами ФАР.

Помилка вимірювання кута приходу сигналу фазовим методом обумовлена двома незалежними причинами: власними шумами приймального пристрою і фазовими флукутаціями прийнятих сигналів

в каналах АР. Загальна дисперсія помилки σ^2 визначається сумою дисперсій $\sigma_{\theta_{ш}}^2$ та $\sigma_{\theta_{фл}}^2$ – шумової складової помилки і дисперсії помилки, викликані фазовими флукутаціями відповідно:

$$\sigma^2 = \sigma_{\theta_{ш}}^2 + \sigma_{\theta_{фл}}^2. \quad (4)$$

Дисперсія шумової складової $\sigma_{\theta_{ш}}^2$ може бути визначена з виразу [6]:

$$\frac{1}{\sigma_{\theta_{ш}}^2} = \frac{q^2(4m^2 - 1) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right)^2}{12}. \quad (5)$$

де m – кількість пар елементів антенної решітки, симетричних відносно її центру; q^2 – відношення сигнал-шум за потужністю. Вираз для дисперсії флукутаційної складової помилки вимірювання кута приходу сигналу має вигляд [6]

$$\sigma_{\theta_{фл}}^2 = \frac{9\sigma_\phi^2 \lambda^2}{2\pi^2 d^2 m^2 (4m^2 - 1)^2} \left[\sum_{j=1}^m (2j-1)^2 (1 - \exp(-(\frac{d}{\rho})^2 (2j-1))) + 2 \sum_{l=1}^{m-j} \exp(-(\frac{d}{\rho})^2) \sum_{j=1}^{m-l} (2j-1)(2j+2l-1)(1 - \exp(-(\frac{d}{\rho})^2 (2j-1))) \right]. \quad (6)$$

де j – номери симетричних пар елементів антенної решітки, які відраховуються від її центру.

Вираз (8) дозволяє чисельно оцінити вплив фазових флукутацій сигналу, що виникають внаслідок атмосферних неоднорідностей на зниження точності вимірювання кутових координат цілі в РЛС з ФАР.

Згідно наведених вище статистичних характеристик при довжині хвилі РЛС $\lambda = 3$ см впливом іоносферних неоднорідностей можна знехтувати, вважаючи, що основний вплив на якість просторових вимірювань здійснюють неоднорідності тропосфери. В [4] наведені величини дисперсії фазових флукутацій, для різних умов поширення сигналу і станів тропосфери, які приймають значення $0,44 \cdot 10^{-4} \dots 19,4$ рад².

На рис. 1 наведені графіки залежності загальної СКП вимірювання кутової координати розрахованої згідно виразів (6-8) від дисперсії фазових флукутацій для наступних умов: крива 1 – $m = 8$, $d = 1$ м (розмір АР – 15 м); 2 – $m = 11$, $d = 100$ м (розмір АР – 2100 м); 3 – $m = 11$, $d = 1000$ м (розмір АР – 21 км). Результати отримані для наступних даних: $\lambda = 3$ см, $\rho = 140$ м, $q^2 = 100$. З графіків видно, що вплив неоднорідностей середовища поширення радіолокаційного сигналу є значним для АР, розміри яких складають одиниці - десятки метрів.

Шлях суттєвого підвищення точності вимірювання кутових координат досягається використанням синтезованої апертури антени, що дозволяє створити антенні решітки розміром сотні – тисячі метрів. Для наведених на рис. 1 результатів, зі зростанням дисперсії фазових флукутацій, підвищення в

точності вимірювання кутових координат може складати 137...24 рази при порівнянні АР розмірами 2100 м і 15 м та 1373...359 разів при порівнянні АР розмірами 21 км і 15 м.

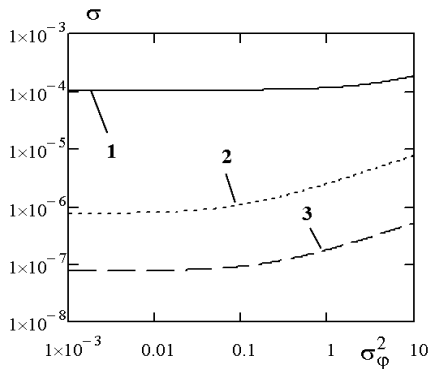


Рис. 1. Залежності загальної СКП вимірювання кутової координати від дисперсії фазових флуктуацій

Радіолокатори з синтезованою апертурою розділяють на РЛС із фокусованою та РЛС із нефокусованою антенами.

У фокусованій синтезованій апертурі підсумовування прийнятих коливань здійснюється з урахуванням і компенсацією набігу фаз на розкритті створеної антенної решітки. Прийом відбитих від цілі сигналів буде відбуватися на ділянці, в межах якої відбувається їхнє синфазне підсумовування. Розмір цієї ділянки визначає синтезовану апертуру фокусованої антени.

У нефокусованій синтезованій апертурі здійснюється векторне підсумовування прийнятих коливань без компенсації набігу фази, обумовленого рухом носія. При цьому, у РЛС із нефокусованою синтезованою антеною має місце обмеження в розмірі синтезованої апертури оскільки накопичення сигналів здійснюється тільки в частині діаграми спрямованості реальної антени.

У випадку синтезованої апертури ширина діаграми спрямованості антени визначається виразом

$$\Delta\theta_{CA} = \lambda/2L_{CA}, \quad (7)$$

де L_{CA} – розмір синтезованої апертури.

Середньоквадратична помилка вимірювання кутової координати визначається виразом виду [7]

$$\sigma = \Delta\theta_{CA}/q, \quad (8)$$

де $\Delta\theta_{CA}$ – ширина діаграми спрямованості синтезованої апертури.

З урахуванням виразів (4) - (8) можна визначити граничні розміри синтезованої апертури за наявністю впливу помилок, що виникають внаслідок впливу неоднорідностей поширення радіохвиль.

В РЛС з фокусованою синтезованою апертурою вплив випадкових викривлень фазового фронту хвилі прийнятого сигналу необхідно розглядати по відношенню до ділянки польоту літального апарату протягом якого створюється синтезована антена

решітка. Граничний розмір синтезованої антени в цьому випадку визначається виразом

$$L_{CA} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_{CA}} = \frac{\lambda}{2q\sigma} = \frac{\lambda}{2q\sqrt{(\sigma_{\theta_{ш}}^2 + \sigma_{\theta_{фл}}^2)}}. \quad (9)$$

При роботі РЛС з фокусованою синтезованою апертурою результати вимірювань через певні проміжки часу є залежними один від одного, що може призвести до накопичення флуктуаційних помилок вимірювання і, як слід, до суттєвого обмеження розміру створеної антенної решітки.

На рис. 2 надані графіки залежності граничних розмірів АР від дисперсії фазових флуктуацій для таких умов: крива 1 – $m=11$, $d=1000$ м (розмір АР – 21 км); 2 – $m=11$, $d=100$ м (розмір АР – 2100 м); 3 – $m=11$, $d=10$ м (розмір АР – 210 м).

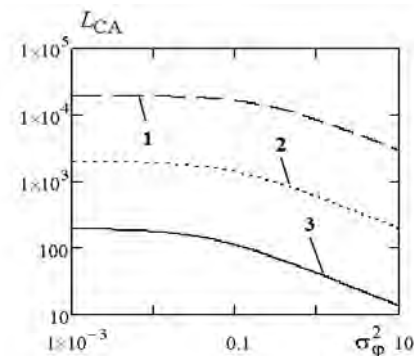


Рис. 2. Залежність граничних розмірів АР від дисперсії фазових флуктуацій для фокусованої СА

Отримані графіки свідчать про те, що вплив флуктуацій фронту хвилі прийнятого сигналу здатний суттєво обмежувати розміри апертури антени.

Так, згідно кривої 1, розмір антени 210 м обмежується до значень 197,2 ($\sigma_{\phi}^2 = 0,001 \text{ рад}^2$) ... 13,5 м ($\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ рад}^2$); згідно кривої 2, розмір антени 2100 м обмежується до значень 1983 ($\sigma_{\phi}^2 = 0,001 \text{ рад}^2$)... 196 м ($\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ рад}^2$); згідно кривої 3 розмір антени 21 км обмежується до значень 19,9 ($\sigma_{\phi}^2 = 0,001 \text{ рад}^2$)... 2,9 км ($\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ рад}^2$).

Таким чином, при невеликих значеннях дисперсії фазових флуктуацій, зменшення розміру антени складає лише 5...6 %. При великому впливі фазових флуктуацій, коли значення дисперсії фазових флуктуацій складають одиниці рад^2 , зменшення розміру антени досягає 86...94 %.

В РЛС з нефокусованою синтезованою апертурою вплив випадкових викривлень фазового фронту хвилі прийнятого сигналу необхідно розглядати безпосередньо до фізичних розмірів бортової ФАР.

Ширина діаграми спрямованості ФАР бортової РЛС визначається згідно виразу [8]

$$\Delta\theta_A = 0,89 \cdot \lambda / (nd \cos(\theta_c)), \quad (10)$$

де n – кількість елементів АР; θ_c – межі сектору сканування. Якщо вважати, що розмір бортової ФАР складає $L = (n-1)d$, то згідно виразу (10), його можна розрахувати таким чином

$$L = (n-1)d = 0,89 \cdot \lambda / (\Delta\theta_A \cos(\theta_c)) - d. \quad (11)$$

З урахуванням зв'язку між шириною діаграми спрямованості антени та середньоквадратичною помилкою вимірювання кутової координати

$$\Delta\theta_A = q\sigma \quad (12)$$

граничні розміри бортової ФАР визначаються наступним співвідношенням

$$L = 0,89 \cdot \lambda / (\Delta\theta_A \cos\theta_c) - d = 0,89 \cdot \lambda / (q\sigma \cos\theta_c) - d = \lambda / \left(q \sqrt{(\sigma_{\theta_{ш}}^2 + \sigma_{\theta_{фл}}^2)} \cos\theta_c \right) - d. \quad (13)$$

На рис. 3 надані графіки залежності граничних розмірів АР від дисперсії фазових флуктуацій σ_{ϕ}^2 для нефокусованої синтезованої АР розміром 15 м з різною кількістю елементів при $\lambda = 3$ см, $\rho = 140$ м, $q = 10$ та $\theta_c = 0^\circ$.

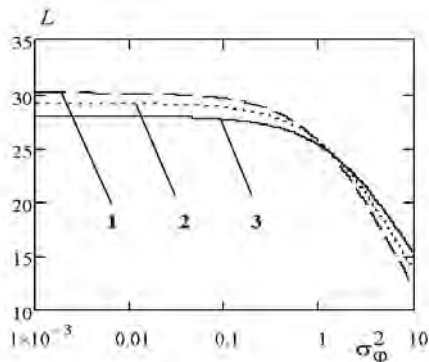


Рис. 3. Залежність граничних розмірів АР від дисперсії фазових флуктуацій для нефокусованої СА

Графіки отримані для наступних умов: крива 1 – $n = 4$, $d = 5$ м; крива 2 – $n = 6$, $d = 3$ м; крива 3 – $n = 16$, $d = 1$ м. При збільшенні дисперсії фазових флуктуацій до одиниць рад², граничний розмір знижується до 12...15 метрів і цей ефект стає більш суттєвим при зменшенні кількості елементів АР, що пояснюється більшими викривленнями фазового фронту хвилі при

збільшенні відстані між елементами АР. Тобто, граничний розмір може бути меншим, ніж геометричний розмір антени. Таким чином, наведена методика дозволяє чисельно оцінювати обмеження розмірів синтезованої апертури в залежності від статистичних характеристик флуктуацій фронту хвилі прийнятого сигналу.

Висновки

Отримані результати свідчать про можливість обмеження розмірів синтезованої апертури внаслідок впливу випадкових неоднорідностей середовища поширення радіосигналу. При цьому точність вимірювання координат наземних об'єктів може досягати суттєво знижена.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы. - Основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. - М.: З.А.О. «МА-КВИС», 1998. - 828 с.
2. Долуханов М.П. Флюктуационные процессы при распространении радиоволн / М.П. Долуханов. - М.: Связь, 1971. - 183 с.
3. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями / Л.А. Чернов. - М.: Наука, 1975. - 171 с.
4. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. - М.: Сов. радио, 1970. - 383 с.
5. 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, 2008. - Вип. 1 (68). - С. 38-40.
6. 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), т. 2. - С. 49-52.
7. Теоретические основы радиолокации Ч. 2 / В.Б. Алмазов, А.А. Белов и др. - Х.: ХВУ, 1996. - 467 с.
8. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. 2. Антенны / Г.Б. Белоцерковский. - М.: Радио и связь, 1983. - 296 с.

Надійшла до редколегії 17.02.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОГО РАЗМЕРА АППЕРТУРЫ СИНТЕЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

А.Л. Кузнецов, Д.В. Карлов, В.Н. Ковбаса, М.А. Матвийчук

В статье предоставлена методика расчета предельного размера синтезированной апертуры антенны космического аппарата космической системы радиолокационного наблюдения. Проводится анализ возможного ограничения размера синтезированной антенной решетки вследствие влияния флуктуаций фронта волны радиолокационного сигнала.

Ключевые слова: синтезированная антенная решетка, угловая координата, радиолокационный сигнал, фазовый метод.

CALCULATION METHODOLOGY OF SIZE LIMITATION OF THE SYNTHESIZED ANTENNA ARRAY OF RADIOLOCATION SUPERVISION SPACE SYSTEM

A.L. Kuznetsov, D.V. Karlov, V.M. Kovbasa, M.A. Matviychuk

Calculation methodology of size limitation of the synthesized antenna array of space vehicle of radiolocation supervision space system is obtained in the article. The size limitation of the synthesized antenna array with influence fluctuations of radiolocation signal front waves is analysed.

Keywords: synthesized antenna array, angular coordinate, radiolocation signal, phase method.