УДК 621.397.16

Н.М. Каращук, викл.
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ УСУНЕННЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ ЦІЛІ СУПУТНИКОВОЮ РЛС БО ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАСТОСУВАННЯ СИНТЕЗОВАНИХ НЕЕКВІДИСТАНТНИХ РЕШІТОК

Розглядається доцільність застосування нееквідистантних синтезованих антенних решіток для усунення неоднозначності визначення кутових координат супутниковою радіолокаційною станцією бокового огляду.

Постановка проблеми. Достатній інтерес на даний час представляють принципово нові радіолокаційні станції (РЛС) бокового огляду (БО), що розташовуються на аеродинамічних та космічних літальних об'єктах. Особливості РЛС БО дають можливість їм вирішувати ряд важливих завдань як у військовій, так і цивільній сферах. Для виконання поставлених функцій до РЛС БО пред'являються високі вимоги за кутовою та просторовою роздільними здатностями. Відповідно існує ряд методів забезпечення вказаних вимог. Найбільш доцільним є застосування методу синтезування апертури антени [3, 7]. Проте при використанні методу синтезування апертури антени РЛС БО, яка розташована на штучному супутнику Землі (ШСЗ), виникають деякі особливості. За відсутності методів їх усунення з'являються негативні фактори.

Існує неоднозначність у визначенні кутових координат цілей, а також неоднозначність у визначенні дальності до цілі (коли апріорно не відома висота польоту ШСЗ). Основними причинами цих неоднозначностей є: велика швидкість польоту ШСЗ; відносно велика дальність виявлення цілей радіолокації [1, 2, 7, 10].

В літературі [3, 7, 8, 9] запропоновані для розв'язання цієї проблеми використання спрямованих властивостей реальної антени РЛС БО або застосування широкосмугових зондувальних сигналів, вибір частоти повторення зондувальних сигналів. Проте при використанні нееквідистантної решітки неоднозначність можна усунути.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення усунення неоднозначності визначення кутових координат відомі такі методи [3, 7, 9]:

1. Використання спрямованих властивостей елементів антенної решітки.
2. Застосування широкосмугових зондувальних сигналів.
3. Перехід до нееквідистантних решіток.
4. Вплив частоти повторення зондувальних сигналів на однозначність визначення кутових координат.

Щоб за рахунок спрямованих властивостей реальної антени усунути неоднозначність визначення кутових координат, розмір антени, що розташована на ШСЗ, повинен бути достатньо великим. Антену великого розміру розташувати на ШСЗ в принципі можливо, але дуже складно і практично невигідно.

Застосування зондувальних сигналів з достатньо широким спектром може усунути проблему кутової невизначеності. Але випромінювання сигналів, ширина спектра яких сотні мегагерц, зустрічає великі труднощі на практиці. До речі, в [8] показано, що під час використання, так званих, несинусоїдальних радіосигналів (відеосигнали з дуже малою тривалістю) проблеми кутової невизначеності взагалі не існує.

При застосуванні нееквідистантної антенної решітки дифракційні максимуми в результуючій діаграмі спрямованості відсутні, тому неоднозначність визначення кутових координат усувається.

Доцільність використання нееквідистантної синтезованої решітки для усунення неоднозначності визначення кутових координат можна розглянути.

Постановка завдання. Як відомо, умова єдності головної пелюстки діаграми спрямованості (ДС) антени радіолокаційної станції (РЛС) бокового огляду (БО) з синтезованою апертурою визначається такою нерівністю [9]:

$$d \le \frac{\lambda}{2(1+|\sin\theta_г|)}, \qquad 1)$$

де λ – довжина хвилі РЛС; $\theta_г$ – напрямок головної пелюстки; d – відстань між приймальними елементами синтезованої антенної решітки.

Виконання умови (1) гарантує однозначність визначення РЛС БО кутових координат радіолокаційної цілі.

Відстань між приймальними елементами d очевидно становить:

 © Н.М. Каращук, 2013

$$d = v \cdot T_n, \quad (2)$$

де v – швидкість носія РЛС БО; T_n – період повторення зондувальних сигналів РЛС БО.

Якщо РЛС БО розташована на штучному супутнику Землі (ШСЗ), то можна прийняти, що $v = 7{,}5 \cdot 10^3$ м/с.

Щодо періоду повторення зондувальних сигналів T_n, то він знаходиться зі співвідношення:

$$T_n = \frac{2 \cdot R_{\max}}{c}, \quad (3)$$

де $R_{\max}$ – максимальна дальність до радіолокаційної цілі; с – швидкість світла ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Припустимо, що дальність до цілі дорівнює висоті ШСЗ ($R \approx H = 600 \cdot 10^3$ м).

Тоді, згідно з (3) та (2):

$$T_n = \frac{2 \cdot 600 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$d = 7{,}5 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ м}.$$

Права частина виразу (1) при $\lambda = 0{,}03$ м і $\theta_z = 0^\circ$ (ДС РЛС БО спрямована перпендикулярно до синтезованого розкриву антени) буде становити:

$$\frac{\lambda}{2\left(1 + \left|\sin \theta_z\right|\right)} = 0{,}015 \text{ м}.$$

Таким чином, умова (1) єдності головної пелюстки синтезованої антени РЛС БО не виконується $(30 >> 0{,}015)$ і виникає проблема усунення неоднозначності визначення кутових координат.

Розв'язання. Доцільність застосування нееквідистантних решіток для однозначності визначення кутових координат можна визначити шляхом математичного моделювання.

Результуюча ДС нееквідистантної антенної решітки (НАР) з синтезованою апертурою антени (САА) буде [9]:

$$F_p(\theta) = F_e(\theta) + F_c(\theta), \quad (4)$$

де $F_e(\theta)$ – нормована характеристика спрямованості реальної антени; $F_c(\theta)$ – нормований множник системи для синтезованої антенної решітки.

Відповідно, нормована характеристика спрямованості реальної антени визначається [10]:

$$F_e(\psi) = \left|\frac{\sin \psi}{\psi}\right|, \quad (5)$$

у формулі (5) ψ – узагальнена кутова координата, яка дорівнює [19]:

$$\psi = \frac{k d_a}{2} \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

де d_a – розмір розкриву реальної антени; k – хвильове число: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – довжина робочої хвилі.

Множник системи нееквідистантної антенної решітки з синтезованою апертурою антени знаходиться як [10]:

$$F_c(\theta) = \left|F_c(\theta)\right| = \frac{\left|f_c(\theta)\right|}{N} = \frac{f_c(\theta)}{N}, \quad (7)$$

де $\left|F_c(\theta)\right|$ – модуль комплексного нормованого множника системи синтезованої решітки; $\left|f_c(\theta)\right|$ – модуль комплексного ненормованого множника системи синтезованої решітки; N – кількість елементів синтезованої нееквідистантної антенної решітки (кількість точок приймання).

Комплексний множник нееквідистантної антенної решітки з синтезованою апертурою антени знаходиться як сума амплітудних і фазових розподілів від кожного елемента решітки [19]:

$$f_c(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{jk\rho_i \sin \theta}. \quad (8)$$

Формулу (8) можна записати як:

$$\dot{f}_c(\theta) = e^{jk\rho_0 \sin\theta} + e^{jk\rho_1 \sin\theta} + e^{jk\rho_2 \sin\theta} + \cdots + e^{jk\rho_{N-1} \sin\theta}. \quad (9)$$

Використовуючи формулу Ейлера, отримаємо

$$\left|\dot{f}_c(\theta)\right| = f_c(\theta) = \{[\cos(k\rho_0 \sin\theta) + \cos(k\rho_1 \sin\theta) + \cos(k\rho_2 \sin\theta) + \cdots + \cos(k\rho_{N-1} \sin(\theta))]^2 + [\sin(k\rho_0 \sin\theta) + \sin(k\rho_1 \sin\theta) + \sin(k\rho_2 \sin\theta) + \cdots + \sin(k\rho_{N-1} \sin\theta)]^2\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

У формулі (10) такі величини: k – хвильове число для РЛС БО, $k = \frac{4\pi}{\lambda}$; λ – довжина робочої хвилі; ρ_i – відстань від нульового елемента решітки до того, що розглядається (вказує на розташування випромінювача в системі): $\rho_0 = 0$; $\rho_1 = d_1$; $\rho_2 = d_1 + d_2$; $\rho_3 = d_1 + d_2 + d_3$; $\cdots \rho_{N-1} = d_1 + d_2 + \cdots + d_{N-1}$; d_i – відстань між сусідніми елементами решітки.

Геометричне розташування відстаней ρ_i, d_i зображено на рисунку 1.

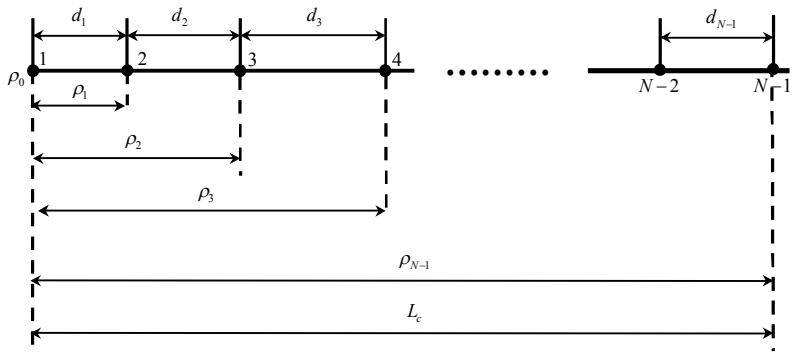

Рис. 1. Геометричне розташування елементів нееквідистантної антенної решітки в межах розміру синтезованої апертури (L_c)

Маємо дані: λ = 0,03 м; d_a = 30 м; кількість елементів решітки візьмемо рівною $N = 11$; $d = 30$ м. Величина синтезованого розкриву антени (рис. 1) буде [10]:

$$L_c = (N-1) \cdot d = (11-1) \cdot 30 = 300. \text{ м.} \quad (11)$$

Вказані формули та дані застосовано для математичного моделювання ДС нееквідистантної антенної решітки з синтезованою апертурою антени за допомогою програми “Delphi 7”.

Оскільки формула (4) є загальною для еквідистантних і нееквідистантних решіток, то, задавши в програмі d_i = 30 м = const, маємо ДС еквідистантної антенної решітки з САА (рис. 2). Це необхідно для подальшого порівняння ДС еквідистантної решітки з САА із ДС НАР з САА.

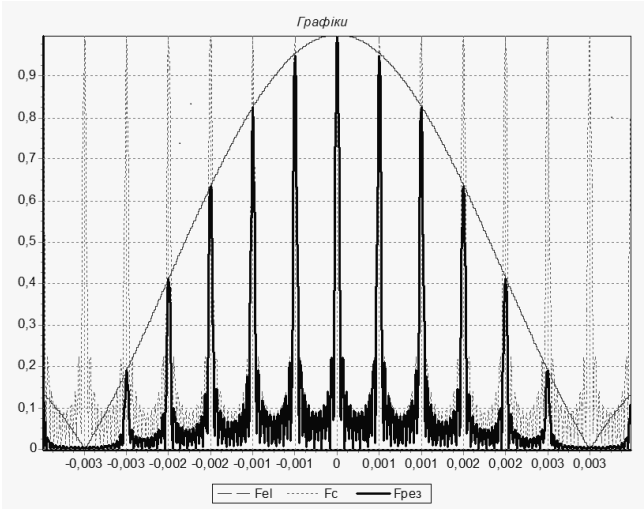

Рис. 2. Нормована результуюча ДС еквідистантної антенної решітки

В межах ширини ДС реальної антени $\left(F_e(\theta)\right)$ маємо, крім головного, десять дифракційних максимумів. Рівень бокових пелюсток складає $F_{бп}$ = 22 % (рис. 2). Ширина ДС реальної антени рівна $2\theta^e_{0,5p} = 0{,}17^0 = 0{,}003$ рад., що відповідає теоретичним розрахункам [10]:

$$2\theta^e_{0,5p} = \frac{\lambda}{d_a} = \frac{0{,}03}{10} \approx 0{,}17^0 \approx 0{,}003 \text{ рад.}$$

Отже ДС еквідистантної антенної решітки з САА має дифракційні максимуми – це повна неоднозначність у визначенні кутових координат. Рівень бокових пелюсток в межах ДС реальної антени еквідистантної антенної решітки з САА є незначним. Еквідистантні решітки не вирішують проблему неоднозначності визначення кутових координат. Проаналізуємо ДС НАР з САА.

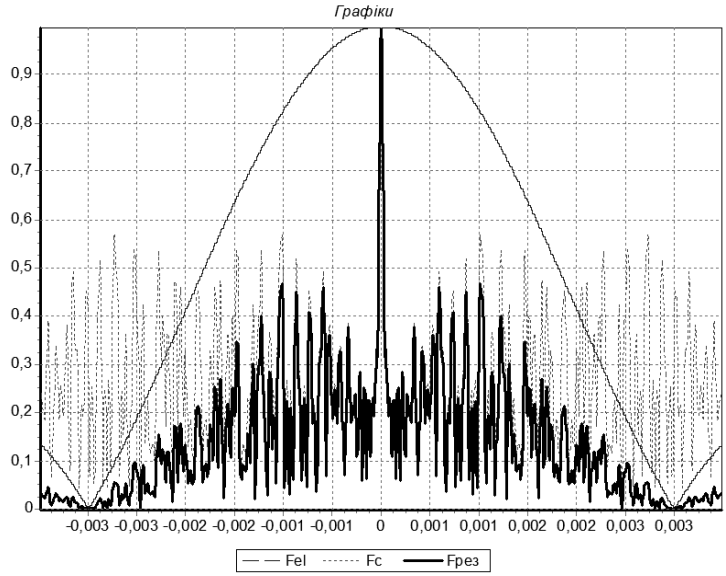

Рис. 3. Нормована результуюча ДС НАР при лінійному законі зміни відстані між елементами нееквідистантної антенної решітки

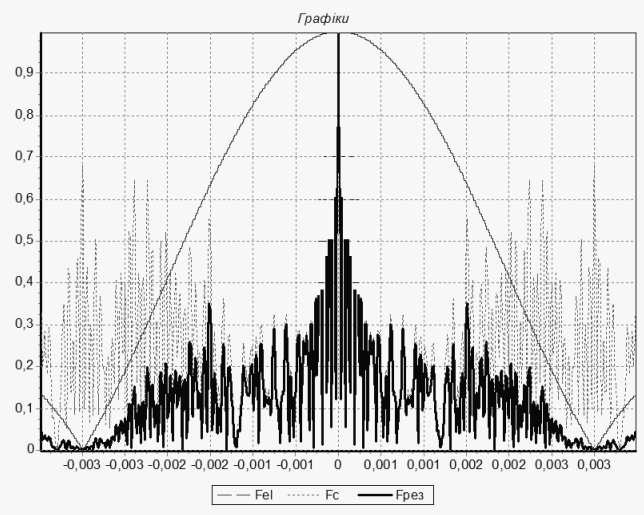

Рис. 4. Нормована результуюча ДС НАР коли всередині апертури елементи розташовані рідше, а по краях – густіше

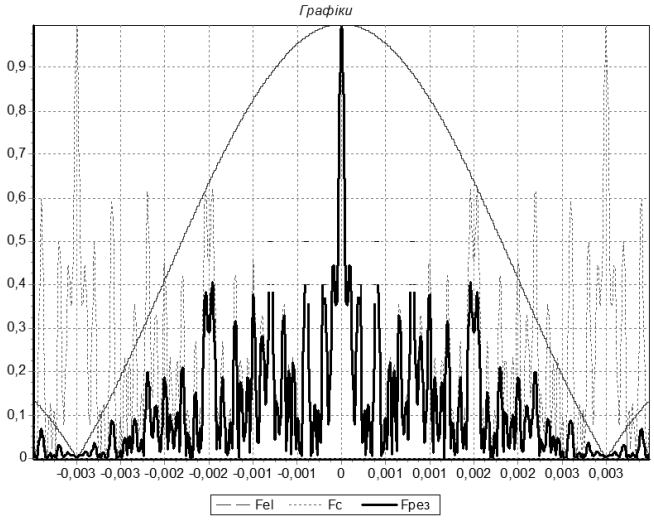

Рис. 5. Нормована результуюча ДС НАР коли всередині синтезованої апертури відстань між елементами менша, а по краях значно більша

На рисунках 3–5 зображено графіки нормованих ДС нееквідистантних антенних решіток з САА при трьох різних законах зміни відстані між елементами решітки.

Порівняльний аналіз даних рисунків дозволяє зробити такі висновки.

1. Порівняно із ДС еквідистантної решітки (рис. 2), у всіх трьох випадках відсутні дифракційні максимуми в межах ширини ДС реальної антени. Це пояснюється тим, що при розташуванні елементів решітки за певним законом у визначених напрямках умови синфазного складання полів окремих елементів, що призводить до утворення вторинних головних максимумів, порушуються [9].

2. Ширина головної пелюстки співмірна у всіх трьох випадках.

3. Існує наявність значного рівня бокових пелюсток.

При лінійному законі зміни відстані між елементами нееквідистантної антенної решітки з САА (рис. 3) рівень бокових пелюсток в ширині ДС реальної антени складає $F_{бп} = 49$ %, боковий фон (густота розташування бокових пелюсток) незначний.

Коли зміна відстані між елементами нееквідистантної антенної решітки в межах синтезованої апертури така, що всередині апертури елементи розташовані рідше, а по краях – густіше (рис. 4), то спостерігається $F_{бп} = 52$ %. У даному випадку рівень бокових пелюсток більший ніж при лінійному законі розміщення елементів в антенній решітці, його розташування переважне біля головного максимуму. Наявний значний боковий фон.

Отже, від закону розташування елементів у нееквідистантній антенній решітці залежить рівень бокових пелюсток в межах ширини ДС реальної антени. Тому, підбираючи закон розміщення елементів решітки в межах синтезованої апертури, можна знизити рівень бокових пелюсток, їх розташування і фон.

В екведістантних решітках для зниження рівня бокових пелюсток використовують спадаючий по краях амплітудний розподіл, що ускладнює схему ділення потужності [9].

У нееквідистантних решітках для зниження рівня бокових пелюсток в ДС досягається шляхом того, що густина розміщення елементів у рівноамплітудній нееквідистантній решітці вибирається пропорційною амплітуді збудження в елементах еквідистантної решітки, схема живлення значно простіша при цьому [11].

Тому оптимальним, в даному випадку, є розподіл, коли всередині синтезованої апертури нееквідистантної антенної решітки відстань між елементами менша, а по краях значно більша. Рівень бокових пелюсток складає $F_{бп}$ = 40 %, проте боковий фон незначний. Але такий закон розподілу елементів решітки призводить до незначного розширення головної пелюстки ДС [10].

Отже, загальним недоліком для трьох випадків є наявність бокових пелюсток в межах ширини ДС реальної антени, які створюють шуми на вході приймача. Але маємо синфазну нееквідистантну решітку. В ній, при випроміненні енергії в напрямках, перпендикулярних лінії розташування випромінювача, на великих відстанях промені від окремих елементів проходять однакові шляхи, складаються синфазно [9]. Відповідно, напрямок головного максимуму ДС не змінюється, що підвищує однозначність визначення кутових координат.

Висновки. Перевагою нееквідистантних антенних решіток є наявність одного головного максимуму в ширині ДС реальної антени, відсутність дифракційних максимумів. Оптимальними є графіки ДС нееквідистантної антенної решітки з САА зображені на рисунку 5. Проте спостерігається значний рівень бокових пелюсток $F_{бп} = 40$ %. Досягти зниження $F_{бп}$ можна шляхом наступних міркувань.

Якщо створити нерегулярне розташування елементів, наприклад, за випадковим законом, то можна досягти низького рівня бокових пелюсток. Але для цього необхідно збільшити розмір синтезованої апертури антени і, в деякій мірі, кількість елементів решітки.

В даному випадку обмеження довжини синтезованої апертури (L_c = 300 м) і незначна кількість елементів $(N = 11)$ не дозволяють створити хаотичний закон, оскільки в будь-якому випадку спостерігається закономірне розміщення елементів решітки.

При дослідженні нееквідистантних антенних решіток з великою синтезованою апертурою і значною кількістю елементів, розташованих за хаотичним законом, числові методи розрахунку з використанням ЕОМ малоефективні. Необхідні статистичні методи розрахунку нееквідистантних систем. Ці методи дозволяють передбачити орієнтовно параметри решітки при різних законах розподілу елементів у решітці до виконання детальних розрахунків [9].

Список використаної літератури:

1. *Богомолов А.Ф.* “Венера-15”, “Венера-16” – РСА на орбите искусственного спутника / *А.Ф. Богомолов //* Известия ВУЗов: Радиофизика. – 1985. – Т. 28, № 3. – С. 259–274.
2. *Манойлов В.П. Д*истанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації : монографія / *В.П. Манойлов, В.В. Омельчук, В.В. Опанюк*. – Житомир : ЖДТУ, 2008.–– 384 с.
3. Радиолокационные станции бокового обзора / *А.П. Реутов и др.* ; под ред. *Г.С. Кондратенкова*. – М. : Воениздат, 1983. – 360 с.
4. *Богачев А.С.* Цифровое синтезирование искусственной апертуры при маневре / *А.С. Богачев, Е.Ф. Толстов //* Зарубежная радиоэлекторника. – 1975. – № 6. – С. 64–79.
5. *Гаврилов Н.П.* Оборудование амерыканских космических аппаратов видовой разведки / *Н.П. Гаврилов //* Зарубежное военное обозрение. – 2003. – № 11. – С. 45.
6. *Клочко А.Ю*. Радиолокационные станции бокового обзора и возможности их применения / *А.Ю. Клочко //* Зарубежное военное обозрение. – 1987. – № 12. – С. 62–69.
7. *Кондратенков Г.С.* Радиолокационные станции воздушной разведки / *Г.С. Кондратенков*. – М. : Воениздат, 1983.
8. *Хармут Х.Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи : пер. с англ. / *Х.Ф. Хармут*. – М. : Радио и связь, 1985.
9. *Шифрин Я.С.* Антенны / *Я.С. Шифрин*. – Харьков : ВИРТА, 1976.
10. *Шифрин Я.С.* Новые типы антенн / *Я.С. Шифрин, П.А. Базарнов, Ю.Г. Гусаков*. – Харьков : ВИРТА, 1971.
11. *Кочержевский Г.Н.* Антенно-фидерные устройства : учебник // *Г.Н. Кочержевский, Г.А. Єрохин, Н.Д. Козырев*. – М. : Радио и связь, 1989.

12. www. radiotec. ru “Аэрокосмический портал Украины”/ Состояние, перспективы и проблемы рынка услуг дистанционного зондирования Земли из космоса.

КАРАЩУК Наталія Миколаївна – викладач кафедри радіотехнічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– електродинаміка та техніка НВЧ;

– усунення неоднозначності визначення кутових координат в РЛС БО з синтезованою апертурою антени.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2013