

МЕТОД ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОСНОГО РУХУ СУПУТНИКІВ У СКЛАДІ РОЗПОДІЛЕНОГО СУПУТНИКА

¹Денисенко М.С., ¹Нарушкевич О.М., ¹Наритник Т.М., ²Капштик С.В.

*¹Навчально науковий Інститут телекомунікаційних систем
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*²Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Україна
E-mail: maxdeniss56@gmail.com; sashanarushevych@gmail.com;
director@mitris.com; s.kapshtyk@spacecenter.gov.ua*

METHOD OF UTILIZATION OF PHASED ANTENNA ARRAY WITH DIGITAL BEAMFORMING TO MEASURE THE PARAMETERS OF THE RELATIVE MOVEMENT OF SATELLITES IN A DISTRIBUTED SATELLITE

A method of utilization of the Phased Antenna Array with Digital Beamforming Technology for the operation of the Internal Radio Network of a Distributed Satellite and measurement of relative satellite motion parameters is proposed. The possibility of simultaneous provision of information exchange between satellites and measurement of relative motion of satellites by means of the Internal Radio Network based on Phased Antenna Array with Digital Beamforming technology is shown. Modernization of the Monopulse Method of determining the angular parameters of the signal source and the method of approximation of the envelope coefficient of the array to simplify the calculation of the deviation of the direction to the final satellite from the direction of orientation of the fixed beam of the digital antenna array.

Запропоновано метод використання цифрової антенної решітки для функціонування внутрішньої радіомережі розподіленого супутника та вимірювання параметрів відносного руху супутників. Показана можливість одночасного забезпечення інформаційного обміну між супутниками та вимірювання відносного руху супутників за допомогою внутрішньої радіомережі, що побудована на технології цифрової антенної решітки. Запропонована модернізація моноімпульсного методу визначення кутових параметрів джерела сигналу та метод апроксимації обвідної коефіцієнту масиву для спрощення розрахунків відхилення напрямку на прикінцевий супутник від напрямку орієнтації фіксованого променя цифрової антенної решітки.

Сьогодення характеризується швидким розвитком інформаційних та телекомунікаційних технологій. Важливим чинником та драйвером розвитку інфокомунікаційних технологій став Інтернет речей. Технологія Інтернету речей спирається на телекомунікаційну інфраструктуру наземних радіомереж. Переважно така інфраструктура розгорнута в районах із високою щільністю населення, що можна пояснити економічними чинниками. За межами районів з високим рівнем урбанізації, де розгортання наземних радіомереж стає не вигідним, стає доцільним використання супутникових універсальних та спеціалізованих телекомунікаційних систем. Серед супутникових систем перевагу по показнику мінімізації затримки в двосторонньому обміні інформацією Інтернету речей мають низькоорбітальні супутникові системи. В роботі [1] запропоновано створення низькоорбітальної супутникової системи Інтернету речей на базі архітектури «Розподіленого супутника» (РС).

Архітектура РС передбачає груповий політ мікроугруповання малих космічних апаратів, кожен з яких виконує певні функції, а разом усі супутники реалізують завдання за функціональним призначенням. Це – надання послуг Інтернету речей для споживачів та

реалізація граничних та туманних обчислень для підвищення ефективності систем та послуг Інтернету речей.

1. Використання цифрової антенної решітки для забезпечення функціонування внутрішньої радіомережі розподіленого супутника.

В РС важливим питанням є забезпечення інформаційного обміну між супутниками зі складу мікроугруповання та вимірювання взаємного положення супутників для підтримки встановленого розташування та запобігання небезпечному зближенню чи зіткненню супутників. Ці функції покладено на внутрішню радіомережу (ВРМ) РС. ВРМ побудована на основі модифікованого протоколу із групи протоколів 3GPP. Модифікація стосується введення додатково механізмів вимірювання похиленої дальності між центральним (кореневим) супутником та прикінцевими супутниками і між прикінцевими супутниками [2]. Для реалізації просторового розділення у складі кореневого супутника застосовується цифрова антенна решітка (ЦАР) [3]. Технологія ЦАР дозволяє комплексно вирішувати завдання щодо забезпечення інформаційного обміну та надає можливість вимірювати параметри взаємного руху супутників у складі РС.

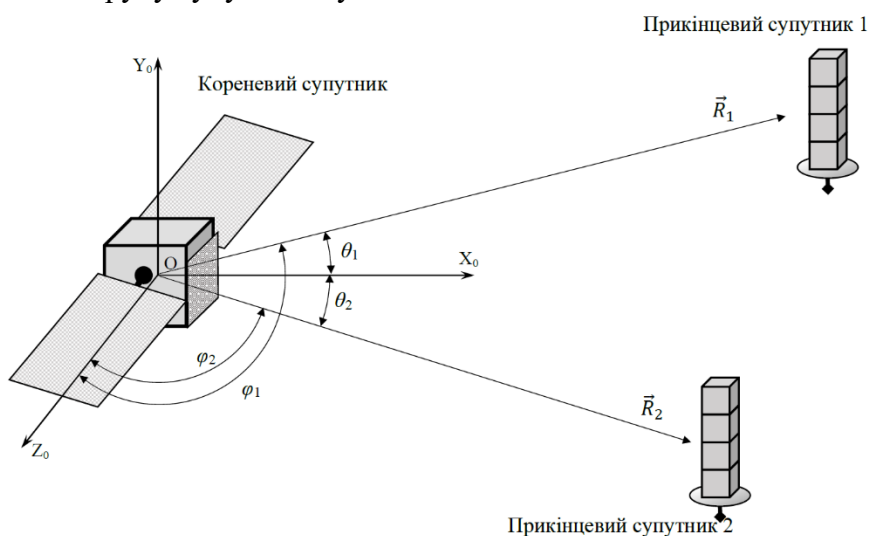


Рис.1. Визначення координат прикінцевих супутників у пов'язаній системі координат кореневого супутника.

2. Модифікація моноімпульсного методу для застосування у ВРМ РС.

Особливість ЦАР полягає в тому, що ЦАР формує цифровим методом фіксовані промені. ЦАР розміром 32×32 формує фіксовані промені шириною $3^\circ \div 5^\circ$. Така точність визначення поточних відносних координат дозволяє забезпечити просторовий розподіл для передачі інформаційних потоків, але є недостатньою для прогнозування відносного руху прикінцевих супутників у складі РС. Тому використання широковідомого моноімпульсного методу [5] вимірювання руху потребує деякої модифікації. Завданням ЦАР у складі ВРМ щодо вимірювання параметрів взаємного руху є вимірювання векторів $\vec{R}_1$ та $\vec{R}_2$ (див. рис.1) в зв'язаній польотній системі координат кореневого супутника. Орієнтація векторів $\vec{R}_1$ та $\vec{R}_2$ визначається кутами місця θ_1 , θ_2 та азимуту φ_1 , φ_2 відповідно.

ЦАР формує сукупність фіксованих променів, які перекриваються в просторі (див. рис.2). Кутова відстань між напрямком орієнтації фіксованих променів ЦАР приблизно відповідає ширині променів за рівнем половинної потужності θ_3 (відповідає межі зони 3 дБ). Радіосигнал прикінцевого супутника приймається в трьох суміжних променях з різним рівнем по амплітуді або потужності. Сигнал в одному промені буде входити в зону 3 дБ, а в інших променях цей сигнал буде прийматись поза межею цієї зони. Рівень прийнятого прикінцевим супутником сигналу визначається величиною кута відхилення променя від напрямку орієнтації променю ЦАР.

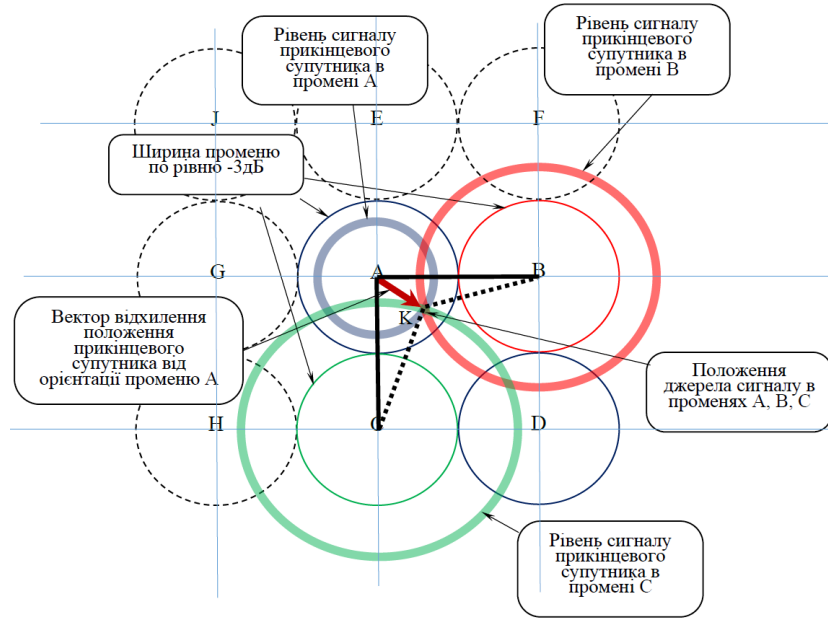


Рис.2. Схематичне представлення визначення кутового положення супутника в фіксованих променях ЦАР.

Потужність сигналу i -го прикінцевого супутника, яка приймається в k -му промені ЦАР, визначається основним рівнянням зв'язку при поширенні радіосигналів у вільному просторі. Відома відстань між супутниками дозволяє розрахувати прогнозований рівень потужності сигналу $P_{\text{пр} \max}$ прикінцевого супутника, що приймається, за формулою

$$P_{\text{пр} \max} = (P_{\text{пер}} G_{\text{пер}}(\varphi_{\text{ок}})) \left(\frac{1}{L_{FS_{\text{ок}}}} \right) G_{\max k}$$

де: $G_{\max k}$ – максимальний коефіцієнт посилення по потужності k -го променю ЦАР.

Таким чином, при прийманні сигналу від прикінцевого супутника в k -му промені ЦАР виникає різниця між рівнем прийнятого сигналу і прогнозованим рівнем сигналу.

$$\Delta P_{\text{пр} k} = P_{\text{пр} \max} - P_{\text{пр} k}$$

Ця різниця обумовлена відхиленням напрямку на прикінцевий супутник від напрямку орієнтації k -го променя ЦАР і залежить від коефіцієнта посилення k -го променя ЦАР в напрямку прикінцевого супутника. Оцінивши величину цього зниження, можна визначити величину кута відхилення напрямку на прикінцевий супутник від напрямку орієнтації k -го променя.

Для спрощення прямих і зворотних обчислень використовується лінійно-кусова апроксимація нормованої обвідної коефіцієнта решітки. Дискретність відліків аргументу огибаючої $\Delta\theta_N$ кута відхилення від напрямку орієнтації k -го променя ЦАР α_k , вибирається з умови:

$$\Delta\theta_N = \frac{\Delta\theta_1}{(N \cdot \cos \alpha_k)}$$

де: $\Delta\theta_1$ – крок відліків кута, $\Delta\theta_1 = 0,08$ рад; N – розмірність ЦАР.

Значення нормованої огибаючої коефіцієнта решітки ЦАР $\hat{G}(\theta)$ [4] при величині кута відхилення $\Delta\theta$ від напрямку орієнтації k -го променя α_k може бути апроксимоване наступним виразом:

$$\hat{G}(\theta) = \hat{G}_i - \Delta\hat{G}_i \cdot |x|$$

тут i – номер дискретної складової аргументу функції апроксимації

$$i = \left\lfloor \frac{\theta}{\Delta\theta_N} \right\rfloor$$

$\lfloor \cdot \rfloor$ - позначає цілу частину від ділення; x – залишок від ділення

$$x = \theta - i \cdot \Delta\theta_N = \theta - \left\lfloor \frac{\theta}{\Delta\theta_N} \right\rfloor \cdot \Delta\theta_N$$

$\hat{G}_i$ – складова, яка набуває значення відповідно до таблиці 1

Таблиця 1. Значення складової $\hat{G}_i$

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
G_i	1,0	0,9974	0,9896	0,9766	0,9587	0,9359	0,9086	0,8768	0,8410
i	9	10	11	12	13	14	15	16	17
G_i	0,8014	0,7585	0,7126	0,6642	0,6136	0,5614	0,5079	0,4537	0,3993
i	18	19	20	21	22	23	24	25	
G_i	0,3450	0,2913	0,2386	0,1875	0,1381	0,0910	0,0464	0,0047	

$\Delta\hat{G}_i$ – коефіцієнт нахилу відрізка прямої на i -тої ділянці апроксимації. Цей коефіцієнт приймає значення

$$\Delta\hat{G}_i = \Delta\hat{G}_{0i} \cdot \cos \alpha_k$$

$\Delta\hat{G}_{0i}$ – коефіцієнт апроксимації для i -го участка, який обирається у відповідності до таблиці 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнта апроксимації $\Delta\hat{G}_{0i}$

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ΔG_{0i}	0	0,0325	0,0979	0,1616	0,2238	0,2850	0,3421	0,3971	0,4479
i	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ΔG_{0i}	0,4946	0,5358	0,5738	0,6054	0,6321	0,6529	0,6683	0,6775	0,6808
i	18	19	20	21	22	23	24	25	
ΔG_{0i}	0,6788	0,6708	0,6583	0,6396	0,6160	0,5892	0,5575	0,5216	

За допомогою лінійно-кускової апроксимації нормованої обвідної коефіцієнта ЦАР можна вирішити зворотну задачу – визначення кута відхилення $\Delta\theta_k$ напрямку на прикінцевий супутник від напрямку орієнтації k -го променю ЦАР. Беручи до уваги особливості діаграми спрямованості променів ЦАР, аналогічно може бути отримана оцінка відхилення напрямку на прикінцевий супутник від орієнтації сусіднього $k\pm 1$ -го фіксованого променю ЦАР $\Delta\theta_{k\pm 1}$. Для плоскої ЦАР буде отримано як мінімум три оцінки: оцінка для k -го променю, для якого кінцевий супутник знаходиться в межах зони ширину діаграми спрямованості за рівнем половинної потужності, тобто $\Delta\theta_k \leq \theta_3$, і дві оцінки для двох сусідніх променів $k\pm 1$, для яких виконується умова $\theta_3 < \Delta\theta_k \leq \theta_0$.

На рис.3. показаний приклад прийому сигналу прикінцевого супутника на виході лінійної рівномірної півхвильової ЦАР розмірності $N=16$. На рис.3 показано рівень коефіцієнта посилення ЦАР по рівню -3дБ, який визначає ширину діаграми спрямованості фіксованих. Сигнал прикінцевого супутника надходить під кутом 20° (на рис.3. кут прийому сигналу прикінцевого супутника виділений вертикальною прямою). Як видно з рис.3, сигнал від прикінцевого супутника приймається в межах основної частини діаграми спрямованості променю +3 дБ, тобто. в межах ширини діаграми спрямованості θ_3 , і приймається в межах ширини діаграми спрямованості за рівнем перших нулів θ_0 променю +2.

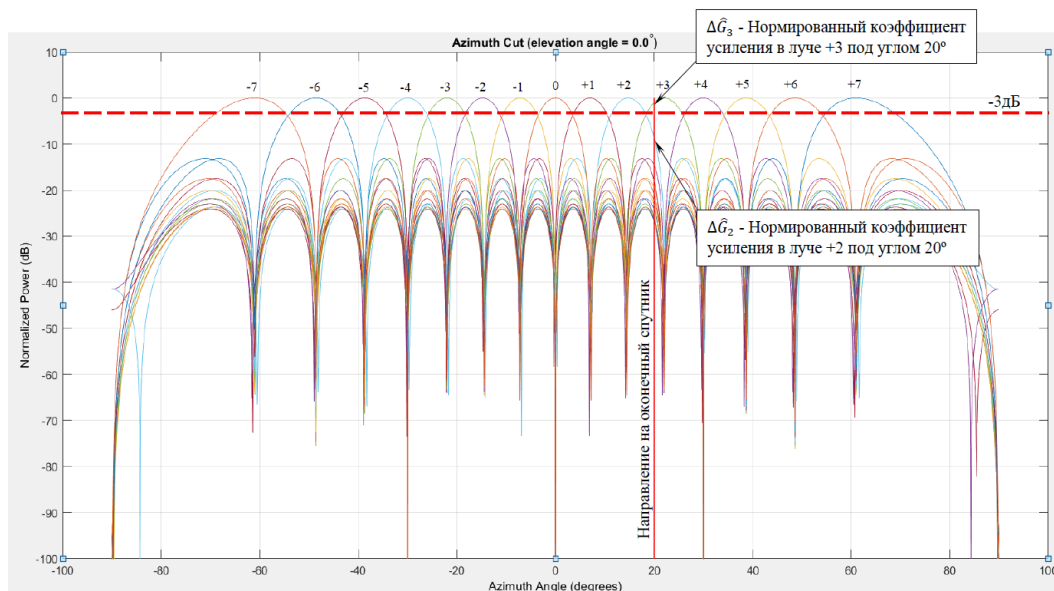


Рис.3. Графік залежності рівня сигналу прикінцевого супутника на виході лінійної ЦАР розмірності N=16.

Висновки:

1. Використання технології цифрової антенної решітки для формування внутрішньої радіомережі розподіленого супутника дозволяє забезпечити просторовий розподіл передачі сигналів до прикінцевих супутників та проводити вимірювання взаємного положення супутників у складі мікроугруповання розподіленого супутника.
2. Для здійснення вимірювань кутових координат запропоновано використовувати модернізований моноімпульсний метод, який комплексно використовує прогнозоване та прийняте значення потужності сигналу прикінцевого супутника.
3. Для спрощення розрахунків кутового відхилення напрямку на прикінцевий супутник від напрямку орієнтації фіксованого променя ЦАР застосовано лінійно-кусову апроксимацію огинаючої коефіцієнта решітки ЦАР.

Література

1. Low-Earth Orbital Internet of Things Satellite System based on Distributed Satellite Architecture / Mikhail Ilchenko, Teodor Narytnyk, Vladimir Prisyazhny, Segii Kapshtyk, and Sergey Matvienko / Advances in Computer, Communication and Computational Sciences. Proceedings of IC4S 2019. Volume 1158. Springer, 2021. P.p. 301-313.
2. Modification of the IEEE 802.16 Standard in Application to the "Distributed Satellite" / Mykhailo Ilchenko; Teodor Narytnyk; Vladimir Prisyazhny; Sergii Kapshtyk; Sergey Matvienko / 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 9-12 Oct. 2018 / IEEE Xplore: 04 February 2019 / DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632067
3. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010. – 144 с.; ил.
4. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Второе издание. – М.: Техносфера, 2012. – 560с.
5. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. - М.: Сов.радио, 1970, - 392с.