

УДК 621.396.722

**О. В. КАЛЬВАТИНСЬКИЙ**, спеціаліст (Центр прийому та обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України), **П. П. ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, начальник кафедри (Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова), **С. П. ФРИЗ**, канд. техн. наук (Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова)

## ВИКОРИСТАННЯ СИНФАЗНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК ДЛЯ ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ ВІД КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З МАЛИМ РІВНЕМ ВИПРОМІНЕННЯ В НАПРЯМКУ ПРИЙМАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

Проаналізовані можливості радіоліній передачі спеціальної інформації космічних апаратів (КА) дистанційного зондування землі (ДЗЗ) мікросупутникового типу. Запропоновано використовувати антенні решітки для збільшення можливостей якісного прийому спеціальної інформації з КА ДЗЗ, у випадку відвороту бортової передавальної антени від напрямку на приймальну станцію на значні кути. Розроблена структурна схема фазування антенної решітки, яка складається з двох дзеркальних антен, що рознесені на відстань, значно більшу за довжину хвилі.

Проанализированы возможности радиолиний передачи специальной информации космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) микроспутникового типа. Предложено использовать антенные решетки для улучшения возможностей качественного приема специальной информации с КА ДЗЗ в случае отворота бортовой передающей антенны от направления на приемную станцию на большие углы. Разработана структурная схема фазирования антенной решетки, которая состоит из двух зеркальных антенн, которые разнесены на расстояние большее, чем длина волны.

In the article analyzes the possibilities receiving information for radio link of remote sensing with a low level of radiation in the direction of the receiving station. It is proposed to use antenna arrays to increase the quality of information from remote sensing satellites, if the large angles at the reverse in the direction transmitting antenna to a receiving station. The developed «Phasing system», that consists of two reflector antennas that are spaced at a distance much larger than the wavelength.

Сучасні тенденції розвитку космічних систем спрямовані на зменшення маси КА. За звітом американського аерокосмічного агентства оператори космічних систем зацікавлені в експлуатації низькоорбітальних КА з масою, меншою 180 кг [1]. Зменшення маси КА спонукає до використання радіоліній з меншою потужністю бортового передавача. Відомо, що основним параметром, який характеризує якість прийнятої інформації користувачами, є ймовірність похибки інформації  $p_{ош}$ . Вона пропорційна співвідношенню сигнал/шум на вході приймача наземної станції  $E_s/N_0$  [2]. Зазвичай у космічних радіолініях для зменшення значення  $p_{ош}$  використовують завадостійке кодування [3]. Разом з тим, ще одним можливим

напрямом зменшення значення  $p_{ош}$  є підвищення співвідношення  $E_s/N_0$ , яке не завжди достатньо для якісної демодуляції прийнятих сигналів. Причиною цього є низька випромінювана потужність бортового передавача КА або відворот бортової передавальної антени від напрямку на наземну приймальну станцію.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання синфазних антенних решіток, що дозволить підвищити коефіцієнт підсилення приймальної частини радіолінії «борт – Земля». Оскільки сучасні космічні радіолінії для передачі спеціальної інформації працюють у X-діпазоні (довжина хвилі  $\lambda = 3...4$  см), то основні труднощі при експлуатації синфазних решіток полягають у

© О. В. КАЛЬВАТИНСЬКИЙ, П. П. ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ, С. П. ФРИЗ, 2015

складності фазування елементів антенних систем. Тому *актуальним* є розробка структурної схеми фазування антенної решітки, яка складається із дзеркальних антен, що рознесені на відстань, значно більшу за довжину хвилі.

На початку 2000-х років провідні космічні держави спільно розробили та широко використовують міжнародний стандарт CCSDS для створення радіоліній передачі спеціальної інформації з КА [2]. Його аналіз показує, що для зменшення значення  $p_{ou}$  широко використовують таке завадостійке кодування: з використанням кодів Ріда–Соломона, згорткове та турбокодування. Крім того, проводяться експерименти щодо використання багатопорогового кодування [3, 4]. Разом з тим, огляд літератури свідчить, що зазвичай синфазні антенні решітки широко використовується тільки для реалізації радіотелескопів [5, 6]. У наземному сегменті прийому спеціальної інформації в космічних системах ДЗЗ застосовуються дзеркальні антени. При цьому в доступних джерелах не наводиться інформація про створення з цих антен синфазних решіток для прийому спеціальної інформації.

Метою статті є розробка структурної схеми фазування антенної решітки, яка складається з двох дзеркальних антен, що рознесені на відстань, значно більшу за довжину хвилі.

На сучасному етапі розвитку космічної техніки широко використовуються КА мікросупутникового типу, в тому числі для виконання завдань ДЗЗ. При зменшенні маси КА виникає проблема забезпечення енергетичного потенціалу радіолінії “борт–Земля”, що пов’язано з меншою потужністю бортової системи електропостачання. При цьому оператори космічних систем прагнуть, щоб інформативність радіолінії була щонайбільшою, що пов’язано з використанням апаратури бортового спеціального комплексу з високими інформаційними ресурсами. У залежності від просторового розділення швидкість передачі даних спеціальної інформації складає  $t_{simb} = 7...500$  Мбіт/с. Максимальна пропускна спроможність радіолінії  $C_b$  визначається за виразом [7]

$$C_b = B \log_2(1 + E_s/N_0), \quad (1)$$

де  $B$  – смуга частот.

Аналіз виразу (1) показує, що можливим напрямом збільшення  $C_b$  є підвищення співвідношення сигнал/шум  $E_s/N_0$ . Для цього проаналізуємо рівняння радіозв’язку в логарифмічному вигляді [8]:

$$E_s/N_0 (dB) = C_p + Gst - 10 \log(kT_{sys} B), \quad (2)$$

де  $C_p$  – потужність сигналу на вході приймальної системи;  $Gst$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени;  $k$  – стала Больцмана;  $T_{sys}$  – шумова температура приймальної системи.

Потужність сигналу на вході приймальної системи в логарифмічному вигляді

$$C_p = EIRP - L_0 - L_{atm} - L_{pol}, \quad (3)$$

де  $EIRP$  – ефективна ізотропно-випромінювана потужність;  $L_0$  – затухання у вільному просторі;  $L_{atm}$  – затухання, що пов’язані з атмосферними опадами (сніг, дощ тощо);  $L_{pol}$  – поляризаційні втрати, які залежать від типу поляризації (у низькоорбітальних космічних системах, коли застосовується кругова поляризація,  $L_{pol} = 2$  dB).

У свою чергу, ефективна ізотропно-випромінювана потужність залежить від технічних характеристик передавального тракту космічного апарата:

$$EIRP = P_t + G_t - L_{fid}, \quad (4)$$

де  $P_t$  – потужність бортового передавача;  $G_t$  – коефіцієнт підсилення бортової антенної системи в напрямку приймальної станції;  $L_{fid}$  – затухання фідера передавального тракту.

Ефективна ізотропно-випромінювана потужність (4) є ключовою характеристикою, що визначає енергетику радіолінії спеціальної інформації КА. Для оцінки можливостей приймальної станції щодо забезпечення прийому цієї інформації необхідно оцінити величину  $EIRP$  в сучасних космічних системах. Енергетичні показники радіолінії спеціальної інформації для космічних систем ДЗЗ наведені у табл. 1.

Аналіз табл.1 показує, що в сучасних космічних системах ДЗЗ застосовуються бортові антенні системи як з вузькою діаграмою спрямованості, так і з широкою. Зокрема, КА “WorldView 1” і “OrbView-5” мають малу потужність передавача, при цьому коефіцієнт підсилення передавальної антенної системи складає  $G_t = 26...27$  dB, що пов’язано з вузькою діаграмою спрямованості  $2\Theta_{0,5p} = 10^{\circ}...15^{\circ}$ . Тобто при передачі спеціальної інформації бортова антенна система спрямовується на приймальну станцію.

В інших КА, характеристики яких надані в табл.1, потужність передавача на порядок більше:  $P_t = 15...20$  dBW, при цьому коефіцієнт підсилення бортової антенної системи складає  $G_t = 5,5...8$  dB.

Таблиця 1

Енергетичні показники радіолінії спеціальної інформації сучасних КА ДЗЗ

Назва КА	$f, \text{МГц}$	$P_t, \text{dBW}$	$G_t, \text{dB}$	$EIRP, \text{dBW}$	Тип поляризації
Cartosat-2	120	16	7	23	Кругова права
Cosmo-SkyMed	88	18,5	5,5	24	Кругова права
Radarsat-2d	60	20	7	27	Кругова права
Rapid Eye	100	20	7	27	Кругова права
Terra-SAR X-1	275	15	8	23	Кругова права
WorldView 1	375	-1,2	27	25,8	Кругова права та ліва
OrbView-5	370	1,7	26	27,7	Кругова права та ліва

Як правило антенні системи з низьким коефіцієнтом підсилення мають широку діаграму спрямованості. Тому розробники космічних систем передбачали багатостанційний одночасний доступ до спеціальної інформації.

Зазначимо, що у табл. 1 представлені комерційні системи ДЗЗ. Тому доцільно провести аналіз елементів передавальних трактів, які пропонуються на світовому ринку. Технічні характеристики передавачів спеціальної інформації масою  $m_n$  надані в табл. 2.

Аналіз табл. 2 показує, що сучасні бортові передавачі мають характеристики, що достатні для створення радіолінії КА мікросупутникового типу, яка забезпечить передачу спеціальної інформації з просторовим розділенням  $\delta l = 1 \dots 10$  м.

Технічні характеристики бортових антенних систем масою  $m_a$  для передачі спеціальної інформації, що пропонуються на світовому ринку, надані в табл. 3.

Крім того, фірма "Surrey satellite technology" розробила опорно-поворотні пристрої для передавальних

антен, що дозволяють здійснювати повороти за азимутом в межах  $\alpha = -270^\circ \dots + 270^\circ$ , поворот за кутом місця в межах  $\beta = 0^\circ \dots 110^\circ$ , з кроком повороту  $\Delta\alpha = \Delta\beta = 0,024^\circ$  та швидкістю повороту  $\alpha' = \beta' = 20^\circ / \text{с}$ .

Слід зауважити, що з врахуванням можливостей бортового опорно-поворотного пристрою коефіцієнт підсилення передавальної антени у виразі (4) буде змінюватись в залежності від відвороту відносно напрямку на приймальну станцію. Тоді вираз (4) набуде вигляду

$$EIRP(\alpha, \beta) = P_t + G_{t_{\max}} \cdot ffs(\alpha, \beta) - L_{fid} \quad (5)$$

де  $ffs(\alpha, \beta)$  – нормований коефіцієнт, який характеризує діаграму спрямованості.

Аналіз виразу (2) показує, що важливим фактором, який впливає на співвідношення сигнал/шум на вході наземної станції, є коефіцієнт підсилення приймальної антени  $G_{st}$ . Тому в табл. 4 подані його значення для різних антен наземних станцій.

Аналіз табл. 4 показує, що коефіцієнт підсилення антенної системи сучасних наземних

Таблиця 2

Характеристики бортових передавачів малих КА

Розробник	Технічні характеристики	Застосовано в космічних системах
Surrey satellite technology (Великобританія)	$m_n = 4 \text{ кг}$ ; $P_t = 120 \text{ Вт}$ ; $t_{\text{simb}} < 500 \text{ Мбіт/с}$	9
L-3 Cincinatti electronics (США)	$m_n = 3,9 \text{ кг}$ ; $P_t = 90 \text{ Вт}$ ; $t_{\text{simb}} < 400 \text{ Мбіт/с}$	9
Cyrlink (Франція)	$m_n = 0,4 \text{ кг}$ ; $P_t = 10 \text{ Вт}$ ; $t_{\text{simb}} < 50 \text{ Мбіт/с}$	6

Таблиця 3

Характеристики бортових антенних систем малих КА

Розробник	Технічні характеристики	Застосовано в космічних системах
Surrey satellite technology (Великобританія)	$m_a = 3 \text{ кг}; G_t = 15 \text{ dB}$	9 (Nigeriasat-2, Kazeosat-2, DMC-2, NovaSAR-2, TechDemosat-1)
	$m_a = 3,3 \text{ кг}; G_t = 18 \text{ dB}$	
Users Space Engineering Research Center (США)	$m_a = 1 \text{ кг}; G_t = 15 \text{ dB}$	9
Boing Defense and Space (США)	$m_a = 1 \text{ кг}; G_t = 18 \text{ dB}$	6

приймальних станцій космічних систем ДЗЗ знаходиться в межах  $Gst = 44...59 \text{ dB}$ .

Для дзеркальних антен, що використовують в наземних пунктах прийому спеціальної інформації, коефіцієнт підсилення антенної системи визначається за виразом [7]

$$Gst = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт використаної площі, який залежить від якості виготовлення антени та змінюється в межах  $\eta = 0,5...0,65$ ;  $D$  – діаметр рефлектора антенної системи;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Використовуючи вираз (6) та дані табл. 4, можна визначити діаметр рефлектора приймальної антени наземної станції космічної системи ДЗЗ. Він знаходиться в межах  $D = 5...15 \text{ м}$ . У разі зниження потужності передавача або відвороту бортової передавальної антени від напрямку на приймальну станцію технічні характеристики наземної станції можуть не забезпечити якісний прийом інформації.

Тому виникає необхідність оцінки максимального кута відвороту від напрямку на приймальну

станцію, при якому забезпечується якісний прийом інформації. Для цього проведено моделювання діаграми спрямованості з використанням програмного комплексу “Antenna Magus 5.1”. Результатом моделювання є значення величини нормованого коефіцієнта  $ffs(\alpha, \beta)$  у залежності від кутів повороту антенної системи.

Відомо [2], що для отримання спеціальної інформації з ймовірністю похибки  $P_{out} < 10^{-6}$ , що є стандартною вимогою до сучасних радіоліній космічних систем ДЗЗ, необхідно забезпечити певну величину  $E_s/N_0$ . Значення  $E_s/N_0$  за умови відсутності завадостійкого кодування становить для BPSK модуляції  $E_s/N_0 = 12 \text{ dB}$ , для QPSK модуляції  $E_s/N_0 = 14 \text{ dB}$  та 8PSK модуляції  $E_s/N_0 = 16 \text{ dB}$ . Припустимо, що передавач має потужність  $P_t = 10 \text{ Вт}$  з шириною спектра сигналу  $\Pi = 300 \text{ МГц}$  для забезпечення значення  $E_s/N_0 = 12 \text{ dB}$  необхідно провести аналіз порогу прийому інформації для дзеркальних антенних систем з різним діаметром рефлектора. Визначимо затухання у вільному просторі за виразом [7]

Таблиця 4

Характеристики приймальних станцій космічних систем ДЗЗ

Космічна система ДЗЗ	Назва наземної станції, місцезнаходження	Коефіцієнт підсилення антенної системи $Gst, \text{ dB}$
Cosmo Sky-Med	MAL1, Malindi	52,0
	SVA8, Svalbard, Norway	52,0
	TDF1, Tierra del Fuego	52,0
Radarsat-2A/B	SAS1, Saskatoon	45,2
	STH1, St. Hubert	44,4
Pleiades	KIR3, Kiruna, Sweden	59

$$L_0 = 20 \log \left( 4\pi \frac{d}{\lambda} \right), \quad (7)$$

де  $d$  – похила дальність до КА.

Використовуючи методику розрахунку дальності [9], визначимо, що для низькоорбітальних КА ДЗЗ при куті місця  $\beta = 10^\circ$  значення дальності становить  $d \approx 200$  км. Введемо поняття  $G_{t\_min}$  – мінімальний коефіцієнт підсилення бортової передавальної антени, що забезпечує граничну величину  $E_s/N_0$ . Використовуючи вирази (2)–(7), отримуємо

$$G_{t\_min} = E_s/N_{0\_min} + L_0 + L_{am} + L_{pol} - P_t + L_{fid} - G_{st} + 10 \log(kT_{sys} \Pi), \quad (8)$$

де  $E_s/N_{0\_min}$  – мінімальне відношення сигнал/шум, що забезпечує якісний прийом інформації.

З використанням виразу (8), даних табл. 1–4, за допомогою комплексу моделювання пристроїв НВЧ “CST Studio 2015” проведені розрахунки величини  $G_{t\_min}$  для антенних систем з діаметром рефлектора  $D_1 = 5$  м та  $D_2 = 12$  м. Результати розрахунків показані на рис. 1.

Пунктирними лініями зображені енергетичні пороги антенних систем з діаметром антен  $D_1 = 5$  м та  $D_2 = 12$  м. Крім того, на рис. 1 подвійною лінією зображений енергетичний поріг для синфазної антенної решітки, яка складається з двох однакових

дзеркал з діаметром  $D = 12$  м (позначений на рис. 1 2xD (D=12 м)).

Аналіз рис. 1 показує, що приймальні антенні системи з діаметром дзеркала  $D < 5$  м не забезпечують якісний прийом швидкісних потоків  $t_{simb} > 300$  Мбіт/с за умови широкої діаграми спрямованості передавальної антени та потужності передавача  $P_t < 10$  Вт. Разом з тим, забезпечується якісний прийом інформації при високому коефіцієнті підсилення передавальної антени  $G_{st} > 17$  дБ за умови спрямованості в напрямку приймальної станції. Антенна система з діаметром рефлектора  $D = 12$  м забезпечує прийом спеціальної інформації на швидкостях  $t_{simb} > 300$  Мбіт/с за умови потужності передавача  $P_t = 10$  Вт та при широкій діаграмі спрямованості  $2\Theta_{0,5p} > 50^\circ$ .

Збільшення коефіцієнта підсилення приймальної станції  $G_{st}$  на 6 дБ можна досягнути шляхом використання синфазної антенної решітки, яка складається з двох рефлекторів з однаковим діаметром [6]. Розрахунки максимального кута відвороту передавальної антени від напрямку на приймальну станцію  $\Theta_{max}$  для різних антенних систем наведені в табл. 5.

Аналіз табл. 5 показує, що антенна система з діаметром рефлектора  $D = 12$  м забезпечує прийом спеціальної інформації від КА з вузькою діаграмою спрямованості  $G_t = 21 \dots 24$  дБ у разі відвороту

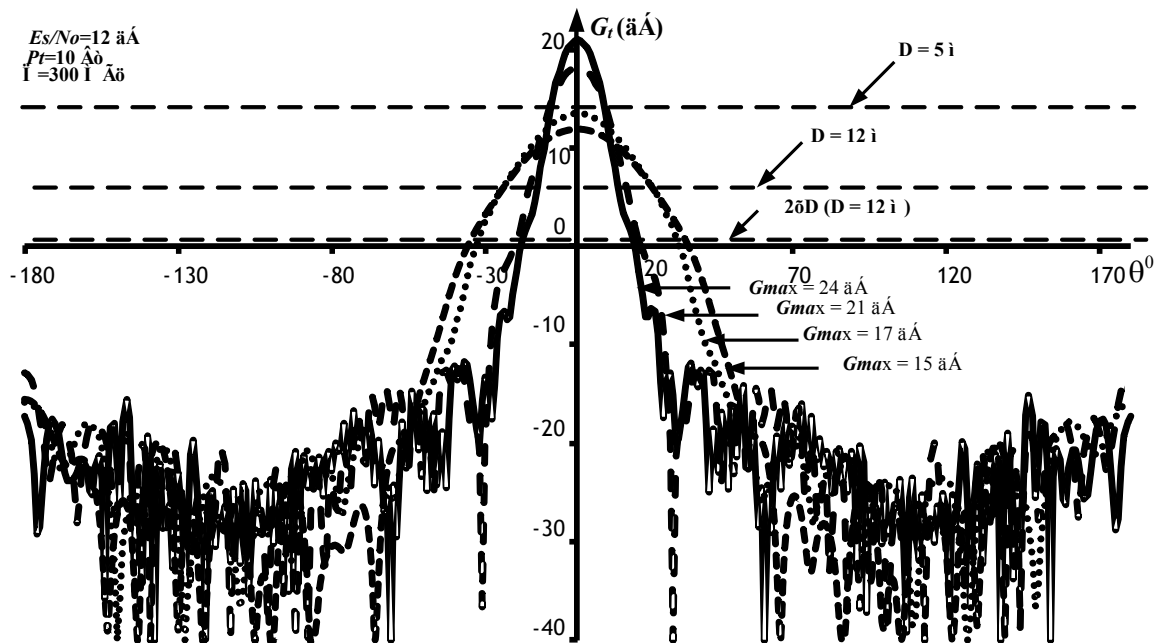


Рис. 1. Діаграми спрямованості бортових передавальних рупорних антен з різними максимальними коефіцієнтами підсилення та енергетичні пороги для дзеркальних приймальних систем

Таблиця 5

Максимальні кути відвороту  $\Theta_{max}$  для різних антенних систем

Діаметр рефлектора	$\Theta_{max}, G_{max} = 24\text{дБ}$	$\Theta_{max}, G_{max} = 21\text{дБ}$	$\Theta_{max}, G_{max} = 17\text{дБ}$	$\Theta_{max}, G_{max} = 15\text{дБ}$
5 м	15°	15°	-	-
12 м	30°	36°	56°	56°
2x12 м	40°	46°	68°	70°

передавальної антени від приймальної станції на кут  $\Theta < 36^\circ$  та на кут  $\Theta < 56^\circ$  при використанні антен з широкою діаграмою спрямованості. При використанні синфазної решітки, яка складається з 2-х рефлекторів діаметром  $D = 12$  м, якісний прийом спеціальної інформації можливий при кутах відвороту  $\Theta$ , більших на  $10^\circ$ , ніж при використанні однієї антени з діаметром рефлектора  $D = 12$  м.

Таким чином, застосування синфазної решітки є ефективним в умовах малого рівня сигналу КА в напрямку приймальної станції. Основні теоретичні основи принципів побудови синфазних решіток для забезпечення зв'язку з КА дальнього космосу описані в [10]. Інформація щодо застосування синфазних решіток для прийому спеціальної

інформації від космічних систем ДЗЗ у доступних авторах джерелах інформації відсутня.

Тому актуальним є питання розробки структурної схеми антенної решітки з двох дзеркальних антен.

Загальна структурна схема фазування антенних решіток, яка розроблена в [10], зображена на рис. 2. Принцип фазування полягає в автоматичному корегуванні ліній затримок вхідного сигналу та об'єднанні корельованих сигналів з метою підвищення відношення  $E_s/N_0$ . Така схема застосована в радіотелескопі VLA (Нью Мехіко) та в обсерваторії Голдстоун (Каліфорнія) з метою управління КА дальнього космосу.

Основною проблемою застосування синфазних решіток є фазування елементів решітки при використанні дзеркальних систем, відстань між елементами решітки яких складає десятки метрів.

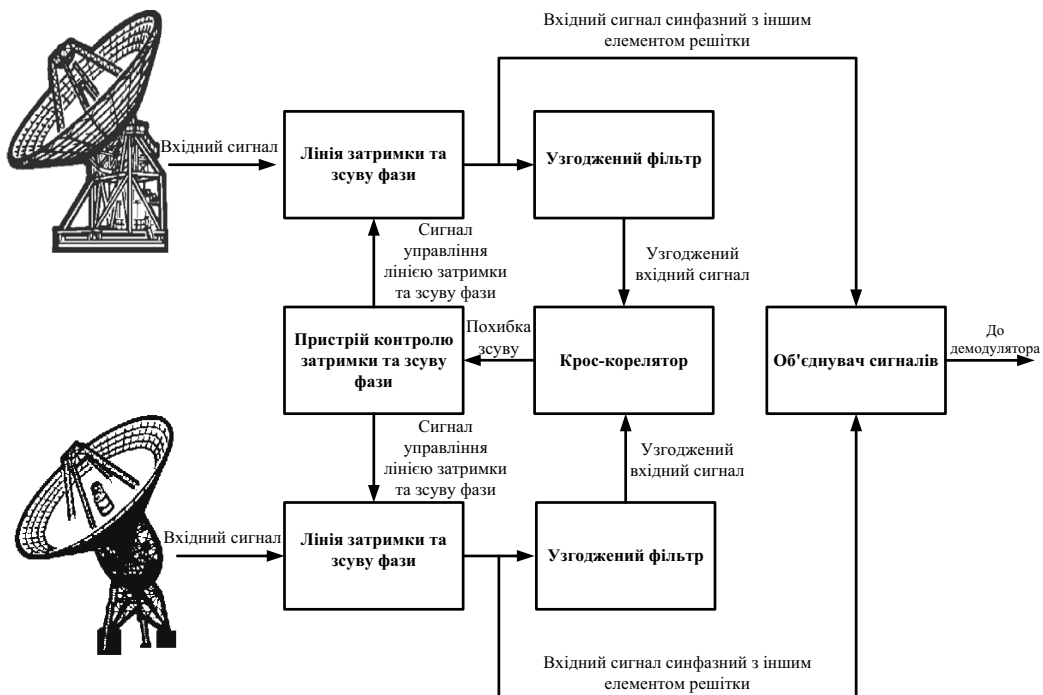


Рис. 2. Загальна структурна схема фазування антенних решіток

Тому авторами пропонується здійснювати фазування в цифровому вигляді, а перенос спектра сигналів спеціальної інформації – за допомогою одного гетеродина для різних елементів синфазної решітки. Спеціальна інформація систем ДЗЗ передається в X-діапазоні, тому частота гетеродина конверторів складає  $f_2 = 7,0...7,5$  ГГц. Коливання гетеродина необхідно передавати на значні відстані, що пов'язано з великою відстанню між елементами синфазної решітки. Це, у свою чергу, викликає фазові шуми. Особливістю синтезаторів на основі петлі фазового автопідстроювання частоти є генерація коливань з опорного коливання. При умові одного опорного коливання сформоване коливання гетеродина буде синфазне опорному.

Враховуючи ці міркування, синтезована структурна схема фазування антенної решітки, що складається з двох однакових рефлекторів. Схема зображена на рис. 3. По суті вона є корисною моделлю фазування антенної решітки, в якій реалізовані принципи, запропоновані в [10].

Схему слід розділити на аналогову та цифрову частини. Спрощена математичну модель аналогової частини схеми фазування антенної решітки описується виразом

$$\begin{cases} X_1(t) = K \times S_{x1}(t) \times U_{r1}(t) \\ X_2(t) = K \times S_{x2}(t) \times U_{r2}(t) \\ U_{r1}(t) = U_{r2}(t) \\ U_{r1}(t) = \sin(2\pi f_2 t + \Psi) \\ f_2(t) = 2 \times f_{op}(t) \times (INT + FRAC / MOD) \end{cases}, \quad (9)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення малошумного підсилювача;  $S_{x1}(t)$  – прийнятий сигнал з першого елемента синфазної решітки;  $S_{x2}(t)$  – прийнятий

сигнал з другого елемента синфазної решітки;  $U_{r1}(t)$  – коливання першого гетеродина;  $U_{r2}(t)$  – коливання другого гетеродина;  $\Psi$  – фазовий зсув гетеродина;  $f_2$  – частота гетеродина;  $f_{op}$  – частота опорного генератора;  $INT, FRAC, MOD$  – константи синтезатора, що залежать від частоти гетеродина [11].

Аналіз виразу (9) дозволяє зробити висновок, що аналогова частина схеми здійснює синфазний перенос спектрів сигналів за умов великої відстані між елементами синфазної решітки, що пов'язано з однаковою частотою та фазою гетеродинів.

Цифрова складова схеми фазування побудована як система автоматичного управління замкнутого типу. Її математичну модель опишемо як

$$\begin{cases} P_s(nT) = P_{s1}(nT) + P_{s2}((n+z(nT))T) \\ ds(nT) = P_{s1}(nT) - P_{s2}((n+z(nT))T) \\ dz(nT) = K_p \times ds(nT) + K_i \times ds((n-1)T) + dz((n-1)T) \\ z(nT) = K_{os} \times dz(nT) \end{cases}, \quad (10)$$

де  $P_s(nT)$  – фазований сигнал;  $P_{s1}(nT)$  – оцифрований сигнал з першого елемента синфазної решітки;  $P_{s2}(nT)$  – оцифрований сигнал з другого елемента синфазної решітки;  $ds(nT)$  – різниця між вхідними сигналами елементів синфазної решітки;  $dz(nT)$  – сигнал на виході пропорційно-інтегруючого фільтра;  $K_p$  – коефіцієнт пропорційності;  $K_i$  – інтеграційний коефіцієнт;  $K_{os}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку.

Запропонована схема фазування антенної решітки потребує дослідження технічних характеристик за допомогою математичного моделювання та в реальних умовах на технічних засобах прийому інформації ДЗЗ.

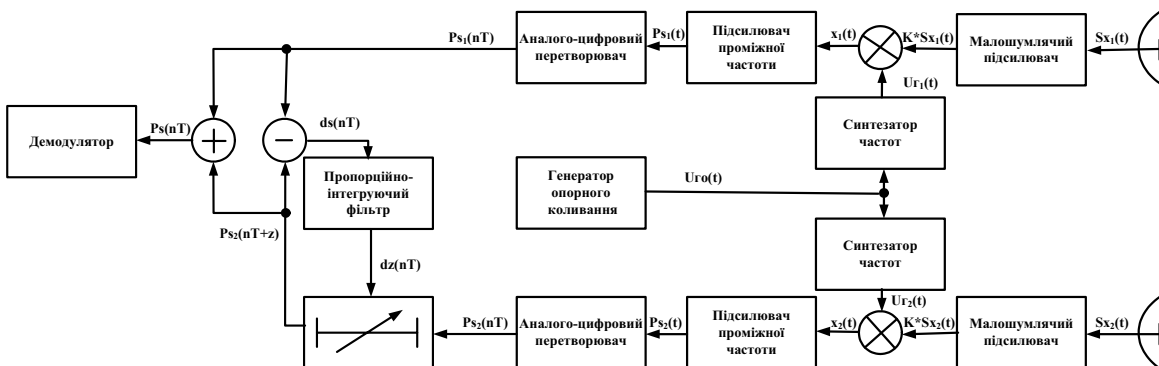


Рис. 3. Структурна схема фазування антенної решітки, яка складається з двох рефлекторів

## Висновки

1. Аналіз технічних характеристик сучасних бортових систем КА свідчить про тенденції широкого використання КА ДЗЗ мікросупутникового типу з низьким енергетичним потенціалом радіоліній та з напрямленими бортовими антенними системами.

2. У випадку застосування на КА ДЗЗ радіоліній з інформаційною швидкістю передачі даних  $t_{simb} > 300 \text{ Мбіт/с}$  антенні системи наземної приймальної станції з діаметром рефлектора  $D < 5 \text{ м}$  не забезпечать якісний прийом інформації ДЗЗ.

3. Приймальні антенні системи з діаметром рефлектора  $D = 12 \text{ м}$  надають можливість якісного прийому спеціальної інформації з КА ДЗЗ у випадку відвороту бортової передавальної антени від напрямку на приймальну станцію на кут  $\Theta < 30^\circ$ . Використання синфазної антенної решітки, яка складається з двох рефлекторів діаметром  $D = 12 \text{ м}$  дозволить здійснювати якісний прийом спеціальної інформації при кутах відвороту  $\Theta < 40^\circ$ .

4. Розроблена схема фазування дозволяє застосовувати елементи антенної решітки як окремі приймальні станції спеціальної інформації й у комплексі як синфазну антенну решітку для прийому інформації від одного КА ДЗЗ з низьким енергетичним потенціалом.

## Список літератури

1. *Small Spacecraft Technology State of the Art. Mission Design Division Staff Ames Research Center, Moffett Field. California: July 2014.*
2. *TM Space Data Link Protocol. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 130.1-G-2. Green Book. Washington, D.C.: CCSDS, November 2012.*
3. *Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справ. / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М. : Горячая Линия–Телеком, 2004. – 128 с.*
4. *Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. – М. : Техносфера, 2005. – 319 с.*
5. *Louis J. Satellite Communications Systems Engineering Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance / Louis J. Ippolito Jr. California : A JOHN WILEY & SONS, INC., 2008. – 396 p.*
6. *Garrett M. Radio astronomy. Radio Telescopes, receivers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.astron.nl/~mag/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=radio\\_astronomy Lec\\_3\\_ma\\_garrett.pdf](https://www.astron.nl/~mag/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=radio_astronomy Lec_3_ma_garrett.pdf).*
7. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория : справ. / под ред. Я. Д. Ширмана. – Изд 2-е, перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.*
8. *Ziener, Rodger E. Principles of communication : systems, modulation, and noise / Rodger E. Ziener, William H. Tranter. – Seventh edition, California : A John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 746 p.*
9. *Фриз П. В. Основы орбитального ruchu космических аппаратов : підручник / П. В. Фриз. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. – 348 с.*
10. *Rogstad D., Mileant A., Pham T. Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network / Rogstad D., Mileant A., Pham T. - California: Jet Propulsion Laboratory, 2003. - 168 p.*
11. *Analog Device. Wideband Synthesizer with Integrated VCO. ADF435. Mode of access: World Wide Web : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4350.pdf>.*