

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 116374

ПАСИВНИЙ КОРЕЛЯЦІЙНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ
ПОЛОЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.05.2017.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



UA04-1K/567

(11) 116374

(51) МПК

G01S 13/66 (2006.01)
G01S 17/66 (2006.01)

(19) UA

(21) Номер заявки:	u 2017 02724	(72) Винахідники:	Калюжний Микола Панасович, UA, Шульга Олександр Васильович, UA, Бушев Фелікс Іванович, UA
(22) Дата подання заявки:	23.03.2017		
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	10.05.2017		
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня:	10.05.2017, Бюл. № 9	(73) Власники:	НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ "МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ", вул. Обсерваторна, 1, м. Миколаїв, 54030, UA, Калюжний Микола Панасович, вул. Космонавтів, 140, корпус В, кв. 127, м. Миколаїв, 54031, UA, Шульга Олександр Васильович, вул. Обсерваторна, 1, корпус 5, кв. 2, м. Миколаїв, 54030, UA, Бушев Фелікс Іванович, вул. Обсерваторна, 1, корпус 9, кв. 32, м. Миколаїв, 54030, UA

ПАСИВНИЙ КОРЕЛЯЦІЙНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

(54) Назва корисної моделі:

(57) Формула корисної моделі:

Пасивний кореляційний спосіб визначення положення космічного апарата, при якому на розташованих в зоні покриття контролюваного космічного апарата рознесеніх у просторі наземних станціях, синхронізованих за допомогою GPS, реєструють сигнали DVB-S, які випромінює космічний апарат, отримані вибірки сигналів каналами зв'язку передають в центр обробки, де за допомогою кореляційного аналізу обчислюють значення різниці в часі прийому станціями сигналів TDOA (Time Difference Of Arrival), випромінюваних космічним апаратом, і шляхом порівняння отриманих в результаті кореляційного аналізу TDOA і відомих координат наземних станцій визначають координати космічного апарата і прогнозують його орбітальне положення, який **вдвізначється** тим, що для прийому сигналів (In і Qn), що надходять з космічного апарата, в наземних станціях використовують розташовані в приймачах станції радіочастотні блоки з квадратурними детекторами, виконаними з можливістю виводу прямого (In) і квадратурного сигналів (Qn), прийняті сигнали з виходу радіочастотного блока приймачів подають на зовнішні відносно до приймачів аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), за які використовують двоканальні USB-осцилографи з зовнішнім запуском, на зовнішній запуск осцилографів подають щосекундні синхронізуючі (PPS - Pulse-Per-Second), сформовані GPS-приймачами станції мережі, забезпечуючи при цьому щосекундно в момент приходу сигналу PPS-затис у внутрішні пам'яті осцилографів вибірок (IQ) сигналів DVB-S з космічного апарата заданої тривалості у вигляді цифрових значень амплітуд квадратурних каналів приймачів, вибірки (IQ) з використанням програмного забезпечення

щосекундно переміщують із внутрішньої пам'яті осцилографів в комп'ютери станцій, де їх обробляють шляхом перетворення комплексних вибірок в дійсні згідно з наступним виразом: $F(t_i) = A_i \sin(\varphi_i - \varphi_i - 1)$, де A_i і φ_i - амплітуда і фаза комплексного сигналу в момент часу t_i , і шляхом нормування вибірок $F_i = F(t_i)$ згідно з наступним виразом: $\hat{F}_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\sigma}$, потім округлюють отримані нормовані значення з точністю, яка відповідає

заданому коефіцієнту k_{round} , та перетворюють округлені значення в цілі числа: $g_i = \text{floor}(\hat{F}_i \cdot k_{\text{round}} + 0,5)$, де \bar{F} і σ - середнє та середньоквадратичне відхилення вибірки F_i , а функція $\text{floor}()$ дорівнює найбільшому цілому, що не перевищує значення, задане в дужках функції, після цього за допомогою Internet коефіцієнт k_{round} передають разом з масивом (g) в центр обробки для відновлення вибірок (\hat{F}) , в центрі обробки обчислюють щосекундні значення TDOA $(\Delta\tau_{ij})$, використовуючи

наступний вираз $\Delta\tau_{ij} = \left(\frac{n_{xi}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSi} \right) - \left(\frac{n_{oj}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSj} \right) - \Delta\tau_{hij}$, де

i, j - умовні порядкові номери станцій мережі;

τ_{PPSi} та τ_{PPSj} - задані початкові затримки від початку секунди UTC (Coordinated Universal Time - всесвітній координований час) синхроімпульсів PPS, які дозволяють розташовувати станції мережі на довільній відстані одна від одної незалежно від тривалості вибірки T_s і які формуються GPS-приймачами станцій;

$\Delta\tau_{hij}$ - вимірне значення різниці апаратурних затримок станцій;

k_{sr} - вимірний коефіцієнт пропорційності між діючою частотою дискретизації f_v і номінальною: $f_v = k_{sr} \cdot f_n$,

n_{xi} - обчислене зміщення максимуму кореляційної функції від початку вибірки, отриманої i -ою станцією,

n_{oj} - задане зміщення середньої частини вибірки, отриманої j -ою станцією, від її початку, після чого порівнюють TDOA з відомими координатами наземних станцій для визначення положення космічного апарата.

(11) 116374

Пронумеровано, прошито металевими
люверсами та скріплено печаткою
3 арк.
10.05.2017



Уповноважена особа

(підпис)



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **116374** (13) **U**
(51) МПК
G01S 13/66 (2006.01)
G01S 17/66 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2017 02724**
(22) Дата подання заявки: **23.03.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.05.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.05.2017, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):
**Калюжний Микола Панасович (UA),
Шульга Олександр Васильович (UA),
Бушуєв Фелікс Іванович (UA)**

(73) Власник(и):
**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
"МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА
ОБСЕРВАТОРІЯ",**
вул. Обсерваторна, 1, м. Миколаїв, 54030 (UA),
Калюжний Микола Панасович,
вул. Космонавтів, 140, корпус В, кв. 127, м. Миколаїв, 54031 (UA),
Шульга Олександр Васильович,
вул. Обсерваторна, 1, корпус 5, кв. 2, м. Миколаїв, 54030 (UA),
Бушуєв Фелікс Іванович,
вул. Обсерваторна, 1, корпус 9, кв. 32, м. Миколаїв, 54030 (UA)

(74) Представник:
Могилевський Валентин Михайлович,
реєстр. №13

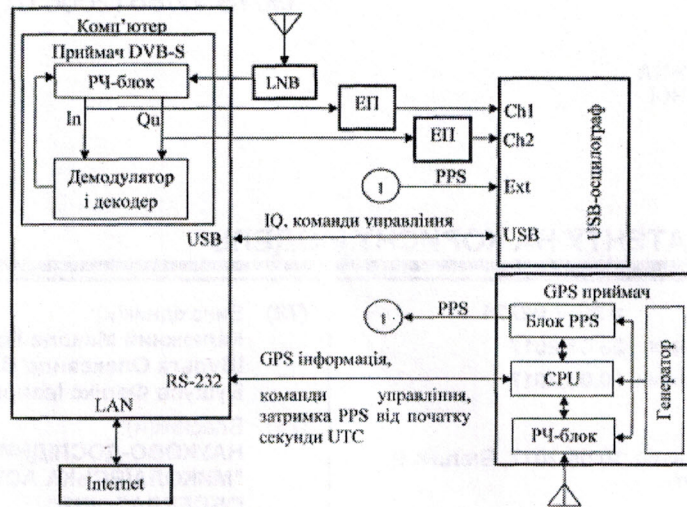
(54) ПАСИВНИЙ КОРЕЛЯЦІЙНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

(57) Реферат:

Пасивний кореляційний спосіб визначення положення космічного апарата, при якому на розташованих в зоні покриття контрольованого космічного апарата рознесених у просторі наземних станціях, синхронізованих за допомогою GPS, реєструють сигнали DVB-S, які випромінює космічний апарат, отримані вибірки сигналів каналами зв'язку передають в центр обробки, де за допомогою кореляційного аналізу обчислюють значення різниці в часі прийому станціями сигналів TDOA (Time Difference Of Arrival), випромінюваних космічним апаратом, і шляхом порівняння отриманих в результаті кореляційного аналізу TDOA і відомих координат наземних станцій визначають координати космічного апарата і прогнозують його орбітальне положення, причому для прийому сигналів (In і Qu), що надходять з космічного апарата, в наземних станціях використовують розташовані в приймачах станцій радіочастотні блоки з квадратурними детекторами, виконаними з можливістю виводу прямого (In) і квадратурного сигналів (Qu), прийняті сигнали з виходу радіочастотного блока приймачів подають на зовнішні відносно до приймачів аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), за які використовують двоканальні USB-осцилографи з зовнішнім запуском, на зовнішній запуск осцилографів подають щосекундні синхроімпульси (PPS - Pulse-Per-Second), сформовані GPS-приймачами станцій мережі, забезпечуючи при цьому щосекундно в момент приходу сигналу PPS-запис у внутрішні пам'яті осцилографів вибірок (IQ) сигналів DVB-S з космічного апарата заданої тривалості у вигляді цифрових значень амплітуд квадратурних каналів приймачів, вибірки (IQ) з використанням програмного забезпечення щосекундно переміщують із внутрішньої пам'яті осцилографів в комп'ютери станцій, де їх обробляють шляхом перетворення комплексних

UA 116374 U

вибірок в дійсні, після чого порівнюють TDOA з відомими координатами наземних станцій для визначення положення космічного апарата.



Фіг. 2

Корисна модель належить до позиційних спостережень космічних об'єктів на навколосемних орбітах, особливо до визначення положення телевізійних супутників на геостаціонарних орбітах в геоцентричній неінерційній прямокутній системі координат.

Найпоширенішим радіотехнічним засобом супроводу космічних апаратів (КА) є
5 однопозиційний радар, який має вузьконаправлену антену, призначену для супроводу супутника по азимуту та куту місця та систему тонового або кодового дистанціювання, призначену для визначення дальності. Похибка визначення кутових координат на частоті 14 ГГц за допомогою антени з діаметром 10 м становить 10 кутових секунд [1], що обумовлює похибку визначення положення КА на геостаціонарних орбітах порядку 1500 м. До основних недоліків
10 такого радара можна віднести невисоку точність визначення координат КА, значну вартість як виготовлення, так і експлуатації радара, створення перешкод для функціонування обладнання як контрольованого, так і сусідніх КА завдяки випромінюванню радаром електромагнітної енергії в напрямку КА, можливість контролю положення тільки своїх КА.

Проблему електромагнітної сумісності вдалося частково усунути в системі DARTS (Digital
15 Advanced Ranging with Transport-stream Signals) завдяки використанню для передачі пакета дистанціювання транспортного потоку цифрового супутникового телебачення стандарту DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) з корисним навантаженням [2]. Система була створена компанією SES (Societe Europeenne des Satellites) Astra спільно з Інститутом інтегральних схем ім. Фраунгофера (Фраунгофер ГІС) для контролю положення геостаціонарних КА, що
20 транслюють цифрове супутникове телебачення в форматі DVB-S. Система може працювати як в однопозиційному, так і в багатопозиційному варіанті. Система може контролювати лише свої КА, оскільки для визначення моменту випромінювання пакета дистанціювання один із приймачів повинен бути суміщений зі штатним передавачем корисного навантаження. Для визначення моменту випромінювання на вхід приймача подається сигнал зі спеціального відгалуження в
25 антенно-фідерному тракту передавача. Передавач і приймач при цьому мають один спільний опорний генератор. Для визначення відстані до супутника рознесеними у просторі приймачами момент випромінювання передається їм з приймача, суміщеного з передавачем. Тобто, у випадку несправності цього приймача, вся система перестає працювати. Як момент випромінювання, так і момент прийому пакета визначається з використанням згортки
30 випроміненого та прийнятого сигналів з опорним сигналом. Опорний сигнал формується у відповідності до повідомлення, отриманого після декодування прийнятого сигналу, за допомогою тракту аналогічного тому, який використовується для формування випромінюваного та обробки прийнятого сигналів. Оскільки декодування сигналу потребує часу, прийнятий сигнал після оцифровування попередньо запам'ятовується. Для згортки використовуються оцифровані
35 сигнали з виходу квадратурного детектора-приймача. Багатопозиційна система DARTS синхронізується за допомогою GPS. При цьому як опорний сигнал приймачів DVB-S, включаючи їхні АЦП (аналого-цифровий перетворювач), використовується сигнал 10 МГц, що формується приймачами GPS. Незважаючи на високу точність визначення дальності, яка є кращою ніж 0.3 м, у випадку однопозиційної DARTS похибка визначення координат супутника співпадає з
40 похибкою традиційного радара дистанціювання, оскільки обумовлена похибками визначення кутових координат супутника. Випробовування трипозиційної DARTS показали, що система також має невисоку точність визначення координат супутника, обумовлену недостатньою точністю синхронізації системи за допомогою GPS [3]. Наведена похибка визначення дальності отримана DARTS для сигналу DVB-S з шириною спектра 30 МГц. Цю похибку, зважаючи на
45 умови експерименту, можна вважати мінімально можливою для такого сигналу. Зазначимо також, що сигнал DVB-S має псевдошумовий характер, а отже його автокореляційна функція близька до 5-функції, тобто, даний тип сигналу є ідеальним для використання в пристроях вимірювання затримки.

Протягом 2010-2013 років корпорація SES спільно з Фраунгофер ІІС виконала проект
50 Європейського космічного агентства (ЄКА) по створенню системи PaCoRa (Passive Correlation Ranging), призначеної для високоточного супроводу геостаціонарних супутників. Спосіб визначення положення космічних апаратів - телевізійних супутників, що реалізується цією системою, полягає в наступному. Рознесені у просторі наземні термінали (станції) системи, розташовані в зоні покриття контрольованого супутника, синхронно реєструють сигнал, який
55 випромінюється супутником. Отримані вибірки сигналу каналами зв'язку надходять в центр обробки, де за допомогою кореляційного аналізу обчислюються значення TDOA (Time Difference Of Arrival) - різниці в часі прийому станціями сигналів, випромінюваних супутниками. Для визначення координат супутника і прогнозування його орбітального положення використовуються отримані значення TDOA та відомі координати наземних станцій. Станції
60 синхронізуються за допомогою GPS.

На сайтах ЄКА та SES наводиться лише загальна інформація про спосіб та про створення системи з п'яти приймальних станцій, одна з яких є резервною, а також повідомляється, що система була випробувана в діапазоні радіохвиль Ки (12-18 ГГц) [4, 5]. В доповіді [6] наводяться дані про похибку вимірювання TDOA, яка склала приблизно 7.7 нс або 2 м і була отримана системою РаCoRa протягом двох діб у березні 2014 року. Тут і далі похибка TDOA в метрах дорівнює похибці в секундах помноженій на швидкість світла і відповідає похибці різниці нахилених дальностей від супутника до станцій. До складу РаCoRa входили дві станції, розташовані в Бецдорфі (Люксембург) і в Мюнхені (Німеччина), що відповідає відстані між станціями приблизно рівній 425 км. В доповіді також наводиться похибка обчислення координат супутника, отримані в результаті моделювання, які не перевищують 119 м. В доповіді відсутня інформація як про характеристики приймальних станцій РаCoRa, так і про параметри моделювання. В останньому повідомленні, відомому нам на даний час, йдеться про впровадження проекту РаCoRa в США [7].

Реалізований в системі РаCoRa спосіб визначення положення КА можна вважати однією з реалізацій радіоінтерферометричного методу радіоастрономії, оскільки основою обох способів є використання кореляційного аналізу радіосигналів для визначення просторових характеристик джерел радіовипромінювання. Оскільки в радіоастрономії досліджуються надзвичайно віддалені від Землі джерела радіовипромінювання, то радіотелескопи - складові радіоінтерферометрів являють собою надчутливі радіоприймачі з антенами, розміри яких часто сягають десятки і сотні метрів. Високі вимоги пред'являються до стабільності і ідентичності амплітудно-фазових характеристик приймальних трактів радіотелескопів. Все це в свою чергу потребує використання, в тому числі, квантових стандартів часу і частоти як опорних генераторів і криогенних установок для охолодження вхідних каскадів радіоприймачів. Оскільки виготовлення і експлуатація радіотелескопів потребують значних витрат, то потужні радіоінтерферометри з наддовгими базами (РНДБ) для задач, не пов'язаних з астрономією, використовуються епізодично, наприклад, для калібрування супутникових навігаційних систем. В роботі [8] китайська мережа РНДБ (КМР) із 4 радіотелескопів протягом доби в серпні 2010 року супроводжувала геостационарний супутник, який входить до складу китайської супутникової навігаційної системи COMPASS. Максимальна відстань між радіотелескопами КМР по широті дорівнювала 1114 км, а по довготі - 3249 км. Як маяк для КМР слугував радіосигнал з частотою 2.2 ГГц і з шириною спектра приблизно 2 МГц. Похибка обчислення TDOA становила 3.6 нс, а похибка визначення координат супутника дорівнювала 10 м. Для визначення орбітального положення супутника, при цьому використовувалася сучасна модель руху супутника і сучасна модель вимірювання, які враховували гравітаційне тяжіння Сонця і Місяця, гравітаційне тяжіння несферичної Землі, гравітаційне тяжіння приливів в твердій Землі і океанських приливів, радіаційний тиск Сонця, релятивістські ефекти, атмосферну рефракцію та ін. В роботі зазначається, що порівняно невисока точність визначення TDOA обумовлена вузькістю спектра сигналу радіомаяка.

Задачею винаходу є створення повністю пасивного кореляційного способу визначення положення космічного апарата (супутника), який забезпечує досягнення такого технічного результату:

- мала похибка обчислення координат супутника в геоцентричній неінерційній прямокутній системі координат;
- відсутність впливу на функціонування обладнання супутника завдяки відсутності електромагнітного випромінювання в напрямку супутника;
- можливість контролю орбітального положення будь якого діючого телекомунікаційного супутника, включаючи власні супутники та супутники третьої сторони;
- збереження працездатності при деградації мережі до 3 станцій або до 75 % від повної працездатності;
- мінімізація витрат на супровід супутника за рахунок автоматизації вимірювань;
- можливість використання малих антен та стандартних радіоприймачів.

В пасивному кореляційному способі визначення положення космічного апарата, при якому на розташованих в зоні покриття контрольованого космічного апарата рознесених у просторі наземних станціях, синхронізованих за допомогою GPS, реєструють сигнали DVB-S, які випромінює космічний апарат, отримані вибірки сигналів каналами зв'язку передають в центр обробки, де за допомогою кореляційного аналізу обчислюють значення різниці в часі прийому станціями сигналів (TDOA-Time Difference Of Arrival), випромінюваних космічним апаратом, і шляхом порівняння отриманих в результаті кореляційного аналізу TDOA і відомих координат наземних станцій визначають координати космічного апарата і прогнозують його орбітальне положення, згідно з винаходом, поставлена задача вирішена тим, що для прийому сигналів (In і

Q_u), що надходять з космічного апарата, в наземних станціях використовують розташовані в приймачах станцій радіочастотні блоки з квадратурними детекторами, виконаними з можливістю виводу прямого (I_n) і квадратурного сигналів (Q_u), прийняті сигнали з виходу радіочастотного блока приймачів подають на зовнішні відносно до приймачів аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), за які використовують двоканальні USB-осцилографи з зовнішнім запуском, на зовнішній запуск осцилографів подають щосекундні синхроімпульси (PPS-Pulse-Per-Second), сформовані GPS приймачами станцій мережі, забезпечуючи при цьому щосекундно в момент приходу сигналу PPS запис у внутрішні пам'яті осцилографів вибірок (IQ) сигналів DVB-S з космічного апарата заданої тривалості у вигляді цифрових значень амплітуд

квадратурних каналів приймачів, вибірки (IQ) з використанням програмного забезпечення щосекундно переміщують із внутрішньої пам'яті осцилографів в комп'ютери станцій, де їх обробляють шляхом перетворення комплексних вибірок в дійсні згідно з наступним виразом: $F(t_i) = A_i \sin(\varphi_i - \varphi_i - 1)$, де A_i і φ_i - амплітуда і фаза комплексного сигналу в момент часу t_i , і шляхом нормування вибірок $F_t = F(t_i)$ згідно з наступним виразом: $\hat{F}_t = \frac{F_t - \bar{F}}{\sigma}$, потім округлюють отримані нормовані значення з точністю, яка відповідає заданому коефіцієнту k_{rbound} , та перетворюють округлені значення в цілі числа: $g_t = \text{floor}(\hat{F}_t \cdot k_{rbound} + 0,5)$, де \bar{F} і σ - середнє та середньоквадратичне відхилення вибірки F_t , а функція floor() дорівнює найбільшому цілому, що не перевищує значення, задане в дужках функції, після цього за допомогою Internet коефіцієнт k_{rbound} передають разом з масивом (g) в центр обробки для відновлення вибірок (\hat{F}), в центрі обробки обчислюють щосекундні значення TDOA ($\Delta\tau_{ij}$),

використовуючи наступний вираз $\Delta\tau_{ij} = \left(\frac{n_{xi}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSi} \right) - \left(\frac{n_{oj}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSj} \right) - \Delta\tau_{nij}$, де

i, j - умовні порядкові номери станцій мережі;

τ_{PPSi} і τ_{PPSj} - задані початкові затримки від початку секунди UTC (Coordinated

Universal Time - всесвітній координований час) синхроімпульсів PPS, які дозволяють розташовувати станції мережі на довільній відстані одна від одної незалежно від тривалості вибірки T_s і які формуються GPS приймачами станцій;

$\Delta\tau_{nij}$ - вимірне значення різниці апаратних затримок станцій;

k_{sr} - вимірний коефіцієнт пропорційності між діючою частотою дискретизації f_v і номінальною: $f_v = k_{sr} \cdot f_n$,

n_{xi} - обчислене зміщення максимуму кореляційної функції від початку вибірки, отриманої i -ою станцією,

n_{oj} - задане зміщення середньої частини вибірки, отриманої j -ою станцією, від її початку, після чого порівнюють TDOA з відомими координатами наземних станцій для визначення положення космічного апарата.

Далі описано спосіб здійснення винаходу з посиланнями на креслення, де на Фіг. 1 схематично показана мережа станцій і супутник, що випромінює сигнал, а на Фіг. 2 блок-схема станцій.

Повністю пасивний кореляційний спосіб визначення положення КА, аналог PaCoRa, був випробуваний спочатку в серпні 2011 року з використанням мережі із двох станцій, синхронізованих за допомогою GPS і рознесених у просторі приблизно на 150 км. Під час випробувань протягом двох діб контролювався телекомунікаційним геостационарним супутником (TK ГСС) "HotBird-9" (13° с.д.) з використанням випромінюваного супутником на частоті 11179 МГц сигналу DVB-S з горизонтальною поляризацією та символною частотою 27000 кГц.

Пізніше була створена та функціонує експериментальна мережа пасивного кореляційного моніторингу (МПКМ) ТК ГСС у складі з 5 станцій, розташованих в містах Харків, Рівне, Мукачеве, Миколаїв (Україна) і в місті Вентспілс (Латвія). Відстань між станціями мережі по широті і довготі приблизно дорівнює 1000 км. Станції мережі укомплектовані широкорозповсюдженими (побутовими) приймачами DVB-S (а саме, приймачами SkyStar1 і SkyStar2, виготовленими у вигляді PCI-плат) та стандартними антенно-фідерними трактами з антенами, діаметри яких не перевищують 2 метри. З метою забезпечення реєстрації сигналів цифрового супутникового телебачення, приймачі були допрацьовані для виводу прямого і квадратурного сигналів їхніх квадратурних детекторів.

На блок-схемі станції МПКМ, показаній на фіг. 2, використані такі позначення: LNB-Low-Noise Block (малошумовий підсилювач), "PC-блок" - радіочастотний блок, "In" і "Qu" - прямий та

квадратурний сигнали, ЕП - емітерний повторювач, PPS-Pulse-Per-Second (синхроімпульс), "IQ" - вибірка значень амплітуд сигналів "In" і "Qu", LAN -адаптер локальної комп'ютерної мережі станції, CPU - мікропроцесор GPS приймача, "Генератор" - опорний генератор GPS приймача.

Згідно з винаходом спосіб здійснюється наступним чином.

5 Сигнали (In і Qu) з виходу радіочастотного блока ("РЧ-блок") подають на зовнішні (відносно до приймачів) АЦП, за які використовуються двоканальні (Ch1 і Ch2) USB-осцилографи з зовнішнім запуском (Ext). На зовнішній запуск осцилографів подають щосекундні синхроімпульси PPS (Pulse-Per-Second), сформовані GPS-приймачами станцій мережі. Таким

10 чином, щосекундно, в момент приходу сигналу PPS, у внутрішню пам'ять осцилографів записуються вибірки сигналів DVB-S заданої тривалості (7Y) у вигляді цифрових значень амплітуд квадратурних каналів приймачів.

За допомогою програмного забезпечення вказані вибірки (IQ) щосекундно переміщують із внутрішньої пам'яті осцилографів в комп'ютери станцій, де вони обробляються, архівуються і записуються на жорсткі диски. При цьому типова конфігурація комп'ютерів складається з

15 одноплатного процесора з тактовою частотою 1.5 ГГц, 1 гігабайта оперативної пам'яті та 100 гігабайтного жорсткого диска. Обробка вибірок полягає, перш за все, в перетворенні комплексних вибірок в дійсні згідно з наступним виразом (1):

$$F(t_i) = A_i \sin(\varphi_i - \varphi_{i-1}), \quad (1)$$

20 де A_i і φ_i , - амплітуда і фаза комплексного сигналу в момент часу t_i .

Це перетворення забезпечує:

- згортку вибірок, що реєструються станціями мережі,
- зменшення вдвоє об'єму інформації, що передається зі станцій в центр обробки.

Необхідність перетворення, пов'язана з забезпеченням згортки вибірок, обумовлена властивостями сигналу DVB-S та особливостями реєстрації вибірок станціями МПКМ. Стандарт цифрового супутникового телебачення DVB-S передбачає використання модуляції QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) для передачі цифрової інформації, тобто абсолютне значення фази радіосигналу несе інформацію про число (символ), що передається. При розповсюдженні

25 радіосигналу від передавача до супутника і від супутника до приймача значення його фази змінюється. Для відновлення фази в приймачах супутникового телебачення використовується петля автоматичного підстроювання фази або PLL (Phase-Locked Loop), коли фаза гетеродину змінюється таким чином, щоб забезпечити максимальну відповідність вихідної послідовності символів відомій інформаційній структурі транспортного потоку. Перетворення аналогового комплексного сигналу DVB-S в цифровий вид поза петлі PLL, як це має місце в МПКМ,

30 приводить до того, що значення φ_i містять додаткові фазові зсуви, обумовлені, перш за все, індивідуальними фазовими характеристиками приймачів та несинхронністю зчитування даних внутрішніми аналого-цифровими перетворювачами приймачів і зовнішніми АЦП станцій. Однак, враховуючи вид модуляції DVB-S, можна припустити, що послідовність значень різниці $(\varphi_i - \varphi_{i-1})$, обчислена для одних і тих же моментів часу t_i різними приймачами, буде

40 однаковою або близькою, якщо врахувати різницю затримок сигналу при розповсюдженні від супутника до приймачів. Відповідно, будуть однакові або близькі значення функції $F(t_i)$. Застосування перетворення $F(t_i)$ дозволило отримати згортку сигналів, зареєстрованих різними приймачами, з відношенням сигнал/шум на виході корелятора порядку 5-10, при тому, що вихідні комплексні сигнали не згортаються.

45 Крім зазначеного перетворення, для зменшення об'єму інформації, що передається зі станцій в центр обробки, спочатку виконують нормування вибірок $F_i = F(t_i)$ згідно з наступним

виразом: $\hat{F}_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\sigma}$, а потім округлення отриманих нормованих значень з точністю, яка

відповідає заданому коефіцієнту k_{round} та перетворення округлених значень в цілі числа: $g_i = \text{floor}(\hat{F}_i \cdot k_{\text{round}} + 0,5)$, де \bar{F} і σ - середнє та середньоквадратичне відхилення вибірки F_i , а

50 функція $\text{floor}()$ дорівнює найбільшому цілому, що не перевищує значення, задане в дужках функції.

Коефіцієнт k_{round} передають разом з масивом (g) в центр обробки для відновлення вибірок (\hat{F}). Саме ці вибірки безпосередньо використовують для обчислення в результаті кореляційного аналізу значення TDOA. В даний час значення $k_{\text{round}}=10$ і було визначено шляхом спеціальних

55 тестувань, при тому, що АЦП USB-осцилографів МПКМ мають розрядність 9 біт.

Отже, темп реєстрації вибірок мережею i , відповідно, темп обчислення TDOA, складає 1 секунду. Тривалість вибірок дорівнює 200 мкс, номінальна частота дискретизації (f_n) становить 51.2 МГц, а об'єм однієї архівованої вибірки не перевищує 12 кбайт. Вказане значення f_n відповідає частоті дискретизації Найквіста, оскільки під час спостережень реєструється сигнал DVB-S з шириною спектра 30 МГц. В МПКМ використовують осцилографи, максимальна смуга пропускання яких узгоджена з можливими значеннями ширини спектра реєстрованого сигналу DVB-S і дорівнює 200 МГц.

Передачу даних спостережень зі станцій в центр обробки здійснюють по Internet. По Internet, також, проводять контроль функціонування обладнання станцій. Центр обробки знаходиться в Миколаєві.

В центрі обробки для обчислення щосекундних значень TDOA ($\Delta\tau_{ij}$) використовується наступний вираз (2):

$$\Delta\tau_{ij} = \left(\frac{n_{xi}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSi} \right) - \left(\frac{n_{oj}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSj} \right) - \Delta\tau_{hij}, \quad (2)$$

В наведений вираз входять наступні параметри:

- i, j - умовні порядкові номери станцій мережі;
- τ_{PPSi} і τ_{PPSj} - задані початкові затримки від початку секунди UTC синхроімпульсів PPS (Pulse-Per-Second), які дозволяють розташовувати станції мережі на довільній відстані одна від одної незалежно від тривалості вибірки T_s (формуються GPS приймачами станцій);
- $\Delta\tau_{hij}$ - вимірне значення різниці апаратурних затримок станцій;
- k_{sr} - вимірний коефіцієнт пропорційності між діючою частотою дискретизації f_v і номінальною: $f_v = k_{sr} \cdot f_n$.

Передбачається, що $\Delta\tau_{hij}$ залежать від характеристик обладнання станцій (наприклад, від різниці електричних довжин кабелів зниження антен цифрового супутникового телебачення, антен GPS приймачів і т.п.), а k_{sr} є величиною постійною для даного типу АЦП. Параметри $\Delta\tau_{hij}$ і k_{sr} визначаються в процесі калібрування до відправки станцій в місця дислокації. В виразі (2) n_{xi} і n_{oj} вимірюються у відліках частоти дискретизації. Параметр n_{xi} дорівнює зміщенню максимуму кореляційної функції від початку вибірки, отриманої i -ою станцією. Положення максимуму уточнюється інтерполяцією отриманих вибірок [9] та з використанням перетворення Гільберта від кореляційної функції по методу, запропонованому в роботі [10]. Тому значення n_{xi} в загальному випадку є дробовою невід'ємною величиною. Значення n_{oj} також невід'ємне, але завжди ціле, оскільки дорівнює заданому зміщенню середньої частини вибірки, отриманої j -ою станцією, від її початку. Об'єм цієї середньої частини завжди менший кількості відліків у вибірці $N_s = T_s \cdot f_n$ і дорівнює об'єму вибірки корелятора (N_c). Параметри n_{oj} і N_c вибираються таким чином, щоб можливі значення TDOA відносно ($\tau_{PPSi} - \tau_{PPSj}$) попадали в інтервал

$\left[\frac{-n_{oj}}{f_v}, \frac{N_s - N_c - n_{oj}}{f_v} \right]$. Зазвичай $n_{oj} = n_0$, тобто, значення n_{oj} постійне, не залежить від номера станції.

Для обчислення кореляційної функції використовується добре відомий метод з застосуванням дискретного швидкого перетворення Фур'є (ДШПФ). Нехай (x_i : $i=0, N_s-1$) - масив (\hat{F}) $_i$ нормованих вибірових значень дійсного сигналу об'ємом N_s , отриманий i -ою станцією, а (y_i : $i=0, N_c-1$) масив нормованих вибірових значень дійсного сигналу об'ємом N_c , взятий з середньої частини вибірки (\hat{F}) $_j$, отриманої j -ою станцією. Доповнимо вибірки (x) і (y) нулями до об'єму $N_{ff} = 2^p \geq N_s$, де $p > 0$ - ціле число. Позначимо через (X) і (Y) масиви значень прямого ДШПФ від вибірок (x) і (y), а через q - коефіцієнт, який задає крок інтерполяції і дорівнює $q = 2^p$, де $p \geq 0$ є ціле число. Зазвичай; $p=1$, а отже $q=2$, тобто, крок за часом зменшується в два рази. Для інтерполяції масиви (X) і (Y) доповнюються $q \cdot (N_{ff}-1)$ нулями у відповідності з наступним виразом [9]:

$$\hat{G}_k = \begin{cases} G_k, & 0 \leq k \leq N-1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} G_N, & k = N \\ 0, & N+1 \leq k \leq 2Nq - N - 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} G_N, & k = 2Nq - N \\ G_n, & N+1 \leq n \leq 2N - 1, k = n + 2N(q-1) \end{cases}, \quad (3)$$

де $N=N_{fft}/2$. Далі обчислюється спектр згортки інтерпольованих вибірок:

$$\hat{C}_k = \hat{Y}_k \cdot \hat{X}_k^*, \quad 0 \leq k \leq q \cdot N_{fft} - 1, \quad C_k = Y_k \cdot r_k, \quad 0 < k < q \cdot N_{fft} - 1,$$

де (\hat{X}) і (\hat{Y}) спектри вхідних вибірок після інтерполяції згідно з виразом (3), а знак «*» означає комплексне сполучення. Беручи обернене дискретне швидке перетворення Фур'є від спектра згортки (\hat{C}) , отримаємо $q \cdot N_{fft}$ комплексних чисел $(\hat{c} : m = 0, \dots, q \cdot N_{fft} - 1)$. Шуканим значенням кореляційної функції (c) відповідають дійсні частини перших $(q \cdot N_s - q \cdot N_c + 1)$ значень (\hat{c}) , для яких об'єм вибірки корелятора дорівнює заданому значенню $q \cdot N_c$:

$$c_m = \text{Re}(\hat{c}_m) : m = 0, \dots, q \cdot (N_s - N_c).$$

де вираз $\text{Re}()$ означає взяття дійсної частини комплексного числа, яке вказане в дужках. В першому наближенні значення n_x в виразі (2) дорівнює $\frac{m_x}{q}$, де m_x - індекс, якому відповідає локальний максимум кореляційної функції c . Для уточнення положення максимуму використовується перетворення Гільберта \tilde{c} від c , згідно з роботою [10], в точці, де кореляційна функція має локальний максимум, її перетворення Гільберта дорівнює нулю. Для обчислення \tilde{c} використовується відома властивість спектра від перетворення Гільберта, згідно з якою [11]:

$$\tilde{U}(f) = \begin{cases} U(f) \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}, & f > 0 \\ 0, & f = 0 \\ U(f) \cdot e^{+j\frac{\pi}{2}}, & f < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

де f - частота, $U(f)$ - спектр сигналу до перетворення Гільберта, $\tilde{U}(f)$ - спектр сигналу після перетворення Гільберта, а j - мніма одиниця. Позначимо через $\tilde{\hat{c}}$ перетворення Гільберта від

\hat{c} . Тоді, скориставшись виразом (4), можна знайти спектр $\tilde{\hat{C}}$ від $\tilde{\hat{c}}$ знаючи спектр \hat{C} від \hat{c} :

$$\tilde{\hat{C}}_k = \begin{cases} \text{Im}(\hat{C}_k) + j \cdot \text{Re}(\hat{C}_k), & 0 < k \leq q \cdot \frac{N_{fft}}{2} \\ 0, & k = 0 \\ -\text{Im}(\hat{C}_k) + j \cdot \text{Re}(\hat{C}_k), & q \cdot \frac{N_{fft}}{2} < k < q \cdot N_{fft} \end{cases},$$

де вираз $\text{Im}()$ означає взяття мнімої частини комплексного числа, яке стоїть в дужках. При записі співвідношення (5) враховувався загальноприйнятий порядок розміщення спектральних компонент після дискретного перетворення Фур'є, згідно з яким від'ємним частотам відповідають спектральні компоненти з індексами, більшими половини об'єму вибірки, який в даному випадку дорівнює $q \cdot N_{fft}$. Тепер значення $\tilde{\hat{c}}$ дорівнюють оберненому ДШПФ від $\tilde{\hat{C}}$, а значенням \tilde{c} відповідають дійсні частини перших $(q \cdot (N_s - N_c) + 1)$ значень $\tilde{\hat{c}}$. Для уточнення положення максимуму кореляційної функції спочатку знаходиться індекс m_+ , найближчий до m_x , де знак \tilde{c}_{m_+} відрізняється від знака c_{m_+1} , тобто, в інтервалі $m_- \leq m \leq m_+$ перетворення Гільберта приймає нульове значення. Уточнене значення n_x положення максимуму кореляційної функції знаходиться лінійну інтерполяцію значень c в інтервалі $m_- \leq m \leq m_+$ в припущенні, що $\tilde{c}_{q \cdot N_s} = 0$:

$$n_x = \frac{1}{q} \cdot \left(-\frac{\tilde{c}_{m_-}}{\tilde{c}_{m_-+1} - \tilde{c}_{m_-}} + m_- \right).$$

Загальний об'єм спостережень, отриманих за допомогою МПКМ складає 890 діб, із них 453 доби супутник спостерігався одночасно 4 та 5 станціями. Майже весь цей час контролювався супутник "Eutelsat-13B" (13° с.д.).

- 5 Статистичний аналіз отриманих даних в результаті реалізації способу показав, що похибка обчислення TDOA дорівнює 8.7 не, або 2.6 м. Похибка обчислення координат супутника в геоцентричній неінерційній прямокутній системі координат не перевищує 100 м при спостереженні супутника не менше ніж 3 станціями і використанні для обчислення положення супутника чисельної моделі руху супутника, яка враховує гравітаційне тяжіння Сонця і Місяця, а також гравітаційне тяжіння несферичної Землі.

- 10 Визначено, що оптимально-мінімальною кількістю станцій слід вважати чотири. В цьому випадку є можливість обчислювати координати супутника без залучення небесно-механічних законів руху супутника. Більш стійкою є конфігурація з 5 станцій, коли одна станція вважається резервною.

- 15 Отже, отримана похибка визначення координат супутника способом згідно з корисною моделлю значно менша, ніж у способах з використанням традиційних радарів дистанціювання, включаючи DARTS, а також по порядку величини співпадає з модельною похибкою PaCoRa, та більша ніж похибка КМР.

- 20 Спосіб, згідно з корисною моделлю, з використанням МПКМ має наступні переваги перед способами з використанням традиційних радарів та DARTS:

- відсутній вплив на функціонування обладнання супутника завдяки відсутності електромагнітного випромінювання в напрямку супутника;
- можливість контролю орбітального положення будь якого діючого телекомунікаційного супутника, включаючи власні супутники та супутники третьої сторони;
- 25 - збереження працездатності при деградації мережі до 3 станцій або до 75 % від повної працездатності;
- мінімізація витрат на супровід супутника за рахунок автоматизації вимірювань;
- можливість використання малих антен та стандартних радіоприймачів.

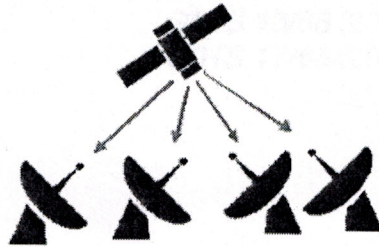
- 30 Останні дві переваги справедливі також при порівнянні способу згідно з винаходом і способу з використанням мереж РНДБ. Головною перевагою заявленого способу при достатньо задовільних значеннях похибки обчислення координат є низька вартість створення і експлуатації МПКМ порівняно як з мережами РНДБ, так і з традиційними радарними дистанціювання, включаючи DARTS.

- Список цитованих документів

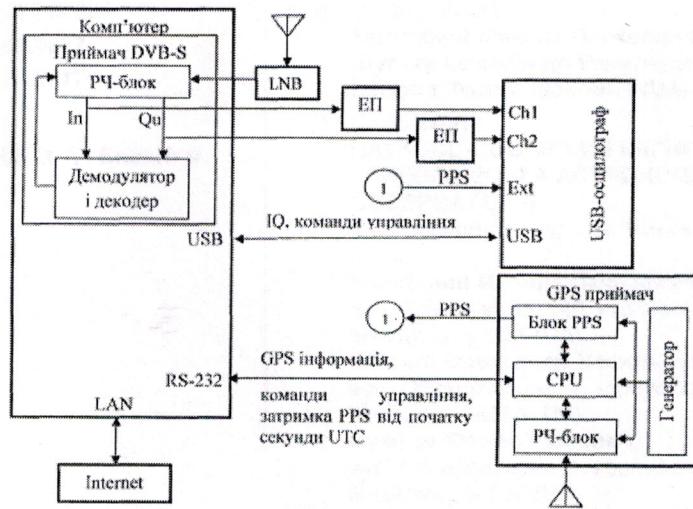
- 35 1. Montenbruck, O., and Gill, E. (2005). Satellite orbits: Models, methods, and applications. Berlin: Springer.
2. A novel ranging method using DVB-S transport stream packets [online]. Available at http://esamultimedia.esa.int/conferences/01_C14/papers/P2.2.pdf.
3. DARTS Operational Concepts of an innovative DVB-S based Satellite Ranging Tool [online]. Available at <http://publications.eas.iis.fraunhofer.de/papers/2004/701/paper.pdf>.
- 40 4. PASSIVE CORRELATION RANGING (PACORA) [online]. Available at <https://artes.esa.int/projects/passive-correlation-ranging-pacora>.
5. A NEW WAY TO TRACK GEOSTATIONARY ORBITING SATELLITES [online]. Available at <https://artes.esa.int/news/new-way-track-geostationary-orbiting-satellites>.
- 45 6. Passive Ranging for Geostationary Satellites: On a Novel System and Operational Benefits [online]. Available at <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2014-1857>.
7. Delivery of HMAM antennas for PaCoRa project in USA at the final stage. HILTRON Communications. September 2015. Newsletter. [online] Available from: <http://www.hiltron.de/media/hiltron/HiltronNewsSeptember2015.pdf>.
- 50 8. Huang Yong, Hu XiaoGong, Zhang XiuZhong, Jiang DongRong, Guo Rui, Wang Hong & Shi ShanBin. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking. // Chinese Science Bulletin. Vol.56, No.26.2011-P. 2765-2772. <http://www.springerlink.com>.
9. Maфie S.L., Jr. Estimating Group Delay and Phase Delay via Direct-Time "Analytic" Cross-Correlation.// IEEE Transaction on Signal Processing. - 1999. Vol. 47, No. 9. - P. 2604-2607.
- 55 10. Cabot R. A note on the application of the Hilbert transform to time delay estimation.// IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing. - 1981. - Vol. 29, No. 3. - P. 607-609.
11. Hilbert transform [online]. Available at <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Hilbert+transform>.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Пасивний кореляційний спосіб визначення положення космічного апарата, при якому на розташованих в зоні покриття контрольованого космічного апарата рознесених у просторі наземних станціях, синхронізованих за допомогою GPS, реєструють сигнали DVB-S, які випромінює космічний апарат, отримані вибірки сигналів каналами зв'язку передають в центр обробки, де за допомогою кореляційного аналізу обчислюють значення різниці в часі прийому станціями сигналів TDOA (Time Difference Of Arrival), випромінюваних космічним апаратом, і
- 10 шляхом порівняння отриманих в результаті кореляційного аналізу TDOA і відомих координат наземних станцій визначають координати космічного апарата і прогнозують його орбітальне положення, який **відрізняється** тим, що для прийому сигналів (In і Qu), що надходять з космічного апарата, в наземних станціях використовують розташовані в приймачах станцій радіочастотні блоки з квадратурними детекторами, виконаними з можливістю виводу прямого (In) і квадратурного сигналів (Qu), прийняті сигнали з виходу радіочастотного блока приймачів подають на зовнішні відносно до приймачів аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), за які використовують двоканальні USB-осцилографи з зовнішнім запуском, на зовнішній запуск осцилографів подають щосекундні синхроімпульси (PPS - Pulse-Per-Second), сформовані GPS-приймачами станцій мережі, забезпечуючи при цьому щосекундно в момент приходу сигналу PPS-запис у внутрішні пам'яті осцилографів вибірок (IQ) сигналів DVB-S з космічного апарата
- 15 заданої тривалості у вигляді цифрових значень амплітуд квадратурних каналів приймачів, вибірки (IQ) з використанням програмного забезпечення щосекундно переміщують із внутрішньої пам'яті осцилографів в комп'ютери станцій, де їх обробляють шляхом перетворення комплексних вибірок в дійсні згідно з наступним виразом: $F(t_i) = A_i \sin(\varphi_i - \varphi_i - 1)$, де A_i і φ_i -
- 20 амплітуда і фаза комплексного сигналу в момент часу t_i , і шляхом нормування вибірок $F_i = F(t_i)$ згідно з наступним виразом: $\hat{F}_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\sigma}$, потім округлюють отримані нормовані значення з точністю, яка відповідає заданому коефіцієнту k_{round} , та перетворюють округлені значення в цілі числа: $g_i = \text{floor}(\hat{F}_i \cdot k_{\text{round}} + 0,5)$, де \bar{F} і σ - середнє та середньоквадратичне відхилення вибірки F_i , а функція floor() дорівнює найбільшому цілому, що не перевищує значення, задане в дужках функції,
- 30 після цього за допомогою Internet коефіцієнт k_{round} передають разом з масивом (g) в центр обробки для відновлення вибірок (\hat{F}), в центрі обробки обчислюють щосекундні значення TDOA ($\Delta\tau_{ij}$), використовуючи наступний вираз $\Delta\tau_{ij} = \left(\frac{n_{xi}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSi} \right) - \left(\frac{n_{oj}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSj} \right) - \Delta\tau_{hij}$, де
- 35 i, j - умовні порядкові номери станцій мережі;
 τ_{PPSi} та τ_{PPSj} - задані початкові затримки від початку секунди UTC (Coordinated Universal Time - всесвітній координований час) синхроімпульсів PPS, які дозволяють розташовувати станції мережі на довільній відстані одна від одної незалежно від тривалості вибірки T_s і які формуються GPS-приймачами станцій;
 $\Delta\tau_{hij}$ - вимірне значення різниці апаратурних затримок станцій;
- 40 k_{sr} - вимірний коефіцієнт пропорційності між діючою частотою дискретизації f_v і номінальною: $f_v = k_{sr} \cdot f_n$,
 n_{xi} - обчислене зміщення максимуму кореляційної функції від початку вибірки, отриманої і-ою станцією,
 n_{oj} - задане зміщення середньої частини вибірки, отриманої j-ою станцією, від її початку, після
- 45 чого порівнюють TDOA з відомими координатами наземних станцій для визначення положення космічного апарата.



Фіг. 1



Фіг. 2