

4. *Рак Ю.П.* Малі друкарські системи: прогнозування, аналіз, синтез. К., 1999.
5. *Мельник Р.А.* Алгоритми ієрархічного моделювання площинної та просторової топології НВІС. Львів, 1999.
6. *Dinets` R.* Topology analysis algorithms of electromechanical schemes. /Наукові праці конференції "Комп'ютерні технології друкарства: алгоритми, сигнали, системи "ДРУКОТЕХН-96": Львів, 16-18 жовтня 1996, Львів, 1996, с.92-93.
7. *Казимира І.Я.* Підвищення ефективності алгоритмів схемотехнічного проектування радіоелектронних засобів // Вісн. ДУ "Львівська політехніка" № 307. Львів, 1996. С.34-39.

УДК 681.513

АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ КОРЕКЦІЇ КВАЗИРЕГУЛЯРНОЇ КОМПОНЕНТИ ІОНОСФЕРНОГО ВПЛИВУ НА ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНІ ДАНІ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ РАДІОХВИЛЬ

© Г. Досиєв, В. Кошовий

Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка НАН України

Запропоновано адаптивний алгоритм оцінки та корекції іоносферного впливу на результати вимірювань за допомогою наземних декаметрових радіо-інтерферометрів. Проведено попередні дослідження ефективності алгоритму на основі обробки даних спільних спостережень за допомогою радіотелескопів УРАН-3 та УРАН-2.

An adaptive algorithm of evaluation and reduction of the ionospheric influence on decametric ground-base interferometry had been elaborated. Preliminary research of the algorithm efficiency was conducted using data of the common observations of radio telescopes URAN-3 and URAN-2.

Вступ

З розвитком радіоастрономічних спостережень кутова роздільна здатність інтерферометричних систем досягла значень, які обмежуються лише впливом середовища розповсюдження космічного радіовипромінювання. В декаметровому радіодіапазоні ці обмеження зумовлені впливом суттєво неоднорідної іоносферної плазми. У той же час дані саме декаметрової радіоастрономії значною мірою визначають інтерпретаційні моделі досліджуваних астрофізичних процесів.

У зв'язку з цим важливою подією стало введення в дію в 1996 році в Україні унікального інструменту для радіоастрономічних спостережень в декаметровому діапазоні хвиль – радіоінтерферометра з наддовгою базою (РНДБ) УРАН. Склад та архітектура створеної системи визначають її високі технічні та метрологічні характеристики [1]. Максимальна реалізація можливостей РНДБ УРАН значною мірою визначається ефективністю подолання заважаючого впливу іоносфери на інтерферометричні дані у відповідних процедурах обробки. До таких процедур слід віднести емпіричне калібрування, адаптивне та самокалібрування, адаптивну фільтрацію вимірюваної функції видимості (ФВ) на основі статистичних моделей флуктуації її фазової компоненти, калібрування на основі даних моніторингу середовища розповсюдження. Ефективність кожного з методів та процедур, що їх реалізують, залежить від діапазону частот спостережень, радіояскравості та кутової протяжності досліджуваних космічних джерел, архітектури інтерферометричної системи та інших факторів. Тому жоден із запропонованих на сьогодні методів не може вважатись універсальним. В той же час поєднання на різних етапах обробки різних методів адаптивного калібрування даних забезпечить максимальне підвищення точності та достовірності вимірювань.

1. Постановка задачі

1.1. Спільні спостереження радіотелескопів УРАН-2 та УРАН-3

Протягом 29-31 січня 1999 року радіоастрономічні спостереження проводились одночасно двома плечами РНДБ УРАН, один з яких – УРАН-3 розташований поблизу м. Шацьк Волинської області, другий – УРАН-2 – поблизу м. Полтава. Загальну геометрію вимірювань наведено на рис. 1.

Кожен зі згаданих радіотелескопів окрім реєстрації даних для РНДБ-інтерферометрії веде контрольний запис даних по т.зв. модуляційному каналу – інтерферограму з двох половин антенного поля радіотелескопа. Паралельно на телескопах системи УРАН таких записів ведеться чотири – по двох частотах і двох поляризаціях. Приклад такої чотириканальної інтерферограми наведено на рис. 2.

Протягом трьох днів сумісних вимірювань 29-31 січня 1999 року було зареєстровано 15 інтерферограм, кожна з яких відповідає одному зі сканів з ряду – 40, – 20, 0, 20, 40, де номер відповідає затримці середини 20-хвилинного скану відносно кульмінації радіоджерела.

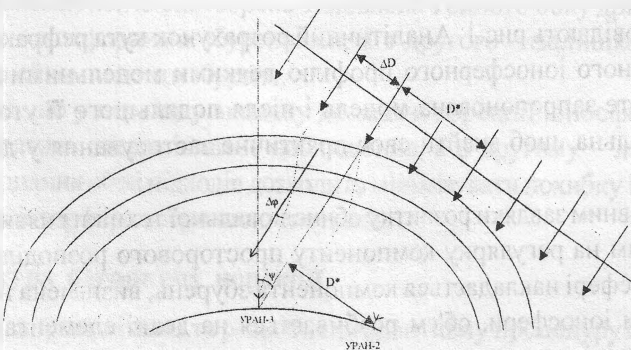


Рис. 1. Геометрія астрономічних спостережень для віддалених компонентів РНДБ УРАН

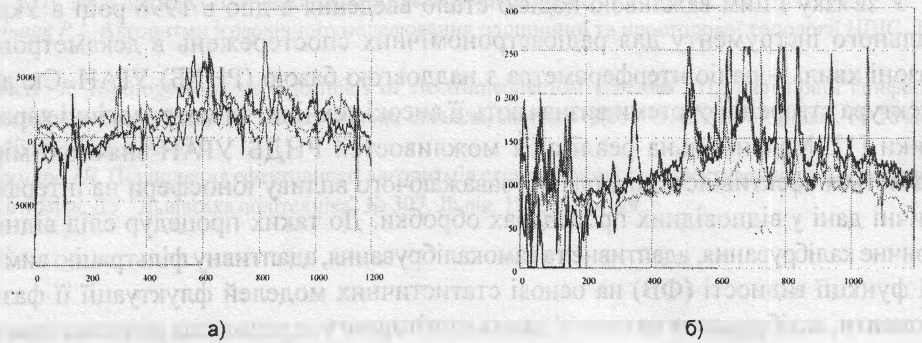


Рис. 2. Приклади інтерферограм на виході модуляційного каналу РТ УРАН-3 (а), та РТ УРАН-2 (б) - для двох частот та двох лінійних поляризацій

Інтерферометрична система РНДБ УРАН з максимальною базою $D/\lambda = 95000$ забезпечує вимірювання модуля та фази ФВ, які потребують додаткового калібрування. Модельна оцінка іоносферних спотворень ФВ та відповідні дані експериментальних досліджень [2] дають для робочої частоти 25-30 МГц похибку порядку 1% від абсолютного значення модуля ФВ та понад 1000% від її фазової компоненти.

Сумісні вимірювання декаметрового радіовипромінювання космічного радіоджерела 3С144 радіотелескопами УРАН-2 (Полтава) та УРАН-3 (Шацьк) дали змогу зробити первинну оцінку заважаючого впливу іоносфери Землі на результати вимірювань.

1.2. Підхід до вирішення проблеми випадкової квазірегулярної іоносферної рефракції

Географічна відстань між елементами інтерферометричної системи D_g відповідає біжучій астрономічній базі інтерферометра D^* , яка в односторонньому випадку становить:

$$D^* \approx D_g \cdot \cos \psi,$$

де ψ – зенітний кут джерела. Вираз можна уточнити через врахування сферичності Землі. Під час проходження космічної радіохвилі крізь неоднорідну іоносферу хвиля зазнає рефракції, регулярна компонента якої може бути модельно оцінена і наведена у вигляді поправки ΔD до геометричної бази D^* :

$$D = D^* + \Delta D,$$

де позначення відповідають рис.1. Аналітичний розрахунок кута рефракції передбачає подання вертикального іоносферного профілю деякими модельними аналітичними функціями [3], проте запропонована модель і після подальшого її уточнення [4] не достатньо універсальна, щоб знайти своє практичне застосування у декаметровому радіодіапазоні.

Більш ефективним завдяки розвитку обчислювальної техніки виявився чисельний підхід, згідно з яким на регулярну компоненту просторового розподілу електронної концентрації в іоносфері накладається компонента збурень, визначена на основі спостережень за станом іоносфери, об'єм розбивається на деякі елементарні ділянки, в межах яких іоносферні параметри приймаються незмінними. Поширення радіохвиль

крізь іоносферу Землі з врахуванням рефракції та інших іоносферних ефектів обчислюється послідовно вздовж відповідної траєкторії поширення для кожної ділянки фронту хвилі, що падає на іоносферу.

Якщо розмірність чисельної тривимірної задачі обчислення іоносферної рефракції прийняти рівним n , а об'єм обчислень для однієї ділянки фронту хвилі в одній ділянці іоносферної траєкторії – m , орієнтовний об'єм обчислень становитиме

$$N = n \cdot n^2 \cdot m.$$

Для інтерферометричної бази порядку 1000 км, ефективної товщини іоносферного шару того ж порядку та роздільної здатності методу ~ 20 км розмірність даної задачі $n = 50$, орієнтовний об'єм обчислень на кожному кроці $m = 30$, оцінка рефракції потребує об'єму обчислень операцій з плаваючою крапкою.

У результаті обчислень отриманий спотворений іоносферою фронт радіохвилі дає змогу оцінити поправку ΔD , необхідну для поточної оцінки реальної інтерферометричної бази D і вірної інтерпретації відгуку радіоінтерферометра (корекції його рефракційної компоненти).

Іоносферний вплив на дані інтерферометричних спостережень може умовно бути розділений на регулярну та випадкову складові. Регулярна компонента відома апіорі і може бути обчислена на основі геометрії вимірювань та даних про регулярну просторово-часову структуру іоносфери в області спостережень. До регулярної можна віднести, наприклад, сферичну компоненту іоносферної рефракції, але в реальних умовах її неможливо оцінити без додаткової інформації про стан іоносфери в момент спостережень – таких параметрів, як товщина іоносферного шару та висота максимуму електронної концентрації (ЕК) в шарі. В іншому випадку похибка в оцінці регулярної компоненти рефракції буде суттєвою.

Отже, завдання оцінки спотворення інтерферометричних даних в іоносфері може бути поділене на дві частини: обчислення регулярної (квазірегулярної) компоненти та оцінка суттєво нерегулярної (випадкової) компоненти спотворення. Такий поділ значною мірою умовний і залежить від часового та просторового розділення доступних досліднику методів корекції даних. Квазірегулярна компонента спотворення зумовлена повільно-змінними крупномасштабними збуреннями електронної концентрації в іоносферній плазмі, що характеризуються значною девіацією значень ЕК в збуреній області і таким чином викликають найбільш суттєві спотворення фазової складової функції видимості [5]. Нерегулярна компонента спотворень зумовлена з одного боку дрібномасштабними короткочасними іоносферними збуреннями, а з другого – залишковими похибками корекції регулярної компоненти збурень.

Це означає, що у першому випадку до задачі корекції іоносферних спотворень може застосовуватись детерміноване наближення, а в другому – лише стохастичне. Оптимальне поєднання обох підходів дозволить мінімізувати похибку вимірювання фази функції видимості інтерферометричною системою.

2. Структура алгоритму корекції

Авторами запропоновано та розроблено адаптивну процедуру оцінки та корекції квазірегулярної компоненти іоносферних спотворень даних інтерферометричних вимірю-

вань в декаметровому діапазоні радіохвиль. Процедура передбачає застосування системи дистанційного радіозондування іоносфери методом, що базується на ефекті об'ємного розсіювання зондуючої хвилі на дрібномасштабних неоднорідностях ЕК в іоносферній плазмі. Цей метод радіозондування дозволяє здійснювати моніторинг стану іоносфери безпосередньо в області радіоастрономічних спостережень, не створюючи при цьому додаткових завад.

Оскільки метод об'ємного розсіювання не дозволяє отримати абсолютні значення вимірюваних іоносферних параметрів, його доповненням служить адаптивна параметрична модель просторового розподілу ЕК в іоносферній плазмі, параметри якої коректуються в процесі дистанційного радіозондування. Як базову запропоновано використовувати напівемпіричну модель *IRI-95*, визнану стандартною *URSI*. Дистанційне радіозондування іоносфери здійснюється методом бістатичної локації, причому як приймальну частину системи зондування використовують обладнання самого радіотелескопа, а як передавальну – наземну радіомовну станцію декаметрового діапазону, що працює у спеціальному режимі.

Блок-схема алгоритму адаптивної процедури оцінки та корекції квазірегулярної компоненти іоносферних спотворень інтерферометричних даних наведена на рис.3.

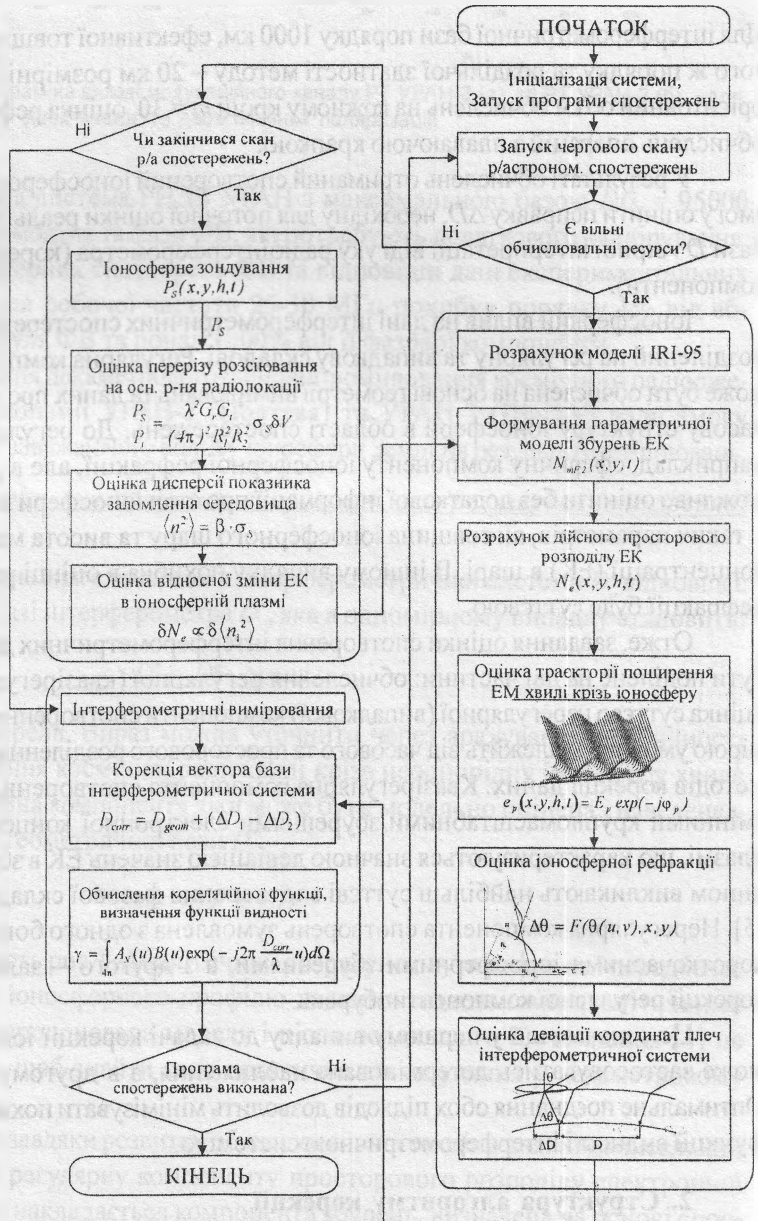


Рис. 3. Алгоритм адаптивної процедури оцінки та корекції квазірегулярної компоненти іоносферних спотворень інтерферометричних даних

Схема управління обладнанням та антенною системою радіотелескопа дозволяє проводити поперемінно астрономічні та іоносферні вимірювання з періодичністю перемикавання до кількох хвилин.

Як вже було зазначено, постійна часу іоносферних неоднорідностей, як найбільшої частки впливу на результати астрономічних спостережень, становить порядок десятків хвилин. Завдяки цьому вдається одночасно спостерігати як космічні радіоджерела, так і середовище, яке спотворює сигнал, що від цих джерел надходить.

Як інформативний параметр результуючих іоносферних спотворень в радіоінтерферометричній системі використовується вектор девіації бази інтерферометра $\Delta D = \Delta D_1 - \Delta D_2$. У результаті при обчисленні функції видимості джерела, яка є основою для відновлення радіозображень космічних радіоджерел, до уваги приймається скоректована база $\mathbf{D}_{\text{корр}} = \mathbf{D}_{\text{геом}} - \Delta \mathbf{D}$ як векторна сума баз, обчислених на підставі конкретної геометрії вимірювань та відповідних складових їх іоносферної девіації внаслідок спотворення фронту радіохвилі, що реєструється радіотелескопами інтерферометричної системи.

У проміжках між інтерферометричними спостереженнями кожен з елементів РНДБ виконує іоносферне зондування, на основі якого будує просторово-часовий розподіл іоносферних параметрів за алгоритмом, відображеним на рис.3. Алгоритм складається з послідовності процедур, кожна з яких реалізує певний етап підготовки іоносферних даних, базуючись на апріорній інформації про умови вимірювань та відповідних модельних допущеннях, що дозволяє перейти від вимірювання відносних просторово-часових змін іоносферних параметрів до абсолютних значень похибок інтерферометричних вимірювань, зумовлених іоносферними збуреннями.

На етапі іоносферного зондування методом бістатичної локації з використанням ефекту об'ємного резонансного розсіювання [6] формується масив даних про залежність потужності розсіювання зондуючого сигналу від просторових координат області розсіювання та від часу спостереження $P_s(x, y, h, t)$.

Цей масив даних є вхідним для процедури модельної оцінки перерізу розсіювання досліджуваної області іоносфери на основі рівняння радіолокації з врахуванням геометрії вимірювальної системи, параметрів приймального та передавального трактів:

$$\frac{P_s}{P_t} = \frac{\lambda^2 G_t G_r}{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2} \sigma_s \delta V.$$

В рамках Борнівського наближення, допустимого як модель механізму об'ємного розсіювання на дрібномасштабних неоднорідностях ЕК, при $k_s \cdot l \ll 1$, де l – радіус кореляції показника заломлення середовища, k_s – компонента хвильового числа в площині розсіювання, для експоненціальної моделі кореляційної функції показника заломлення середовища:

$$\sigma_s \approx \left(\frac{2}{\pi}\right) k^4 l^3 \sin^2 \chi \langle n_1^2 \rangle,$$

тобто, дисперсія показника заломлення для заданої геометрії зондування, робочої частоти та просторового спектру неоднорідностей пропорційна до перерізу розсіювання

середовища. Тому дані про відносну зміну перерізу розсіювання дають змогу оцінити відносну зміну дисперсії показника заломлення.

Експериментальні дослідження [7] свідчать про монотонну залежність між дисперсією показника заломлення в іоносферній плазмі та електронною концентрацією в ній при фіксованому співвідношенні компонент (хімічного складу) плазми. Приймаючи цю залежність у першому наближенні пропорційною, можемо за дисперсією показника заломлення робити оцінку відносної (просторової та часової) зміни електронної концентрації в досліджуваній області іоносфери $\delta N_e \propto \delta \langle n^2 \rangle$.

Отже, за даними дистанційного радіозондування будується просторово-часовий розподіл відносної зміни електронної концентрації в області іоносфери, відповідальній за спотворення інтерферометричних даних. На основі моделі абсолютних значень іоносферних параметрів *IRI-95*, прийнятої *URSI* як стандартна та отриманого експериментальним шляхом розподілу змін цих параметрів будується модель реального просторового розподілу електронної концентрації $N_e(x, y, h, t)$, яка, крім того, проходить певний етап калібрування з метою оцінки чутливості системи зондування до відносних змін ЕК.

Для визначеної таким чином моделі розподілу ЕК в області іоносфери над інтерферометричною системою та заданої геометрії астрономічних спостережень будується числова модель процесу поширення космічних радіохвиль крізь неоднорідну іоносферу з врахуванням рефракції на крупномасштабних неоднорідностях ЕК, групової затримки, фарадеевського повороту площини поляризації та загасання. Розрахована

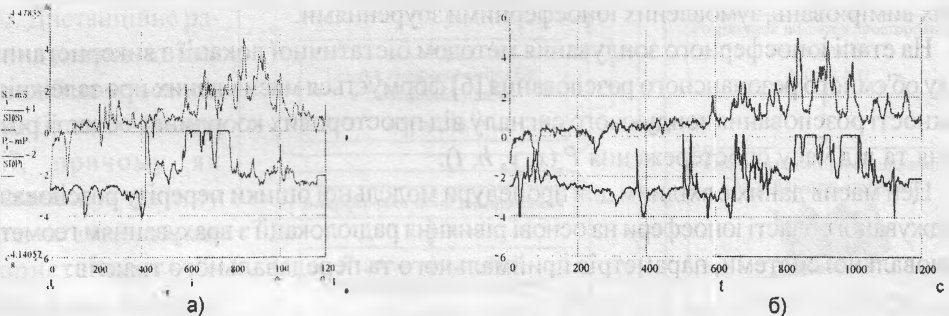


Рис.4. Скан -20 джерела ЗС144. Верхній - дані РТ УРАН-3, нижній - РТ УРАН-2. Співставлення даних без взаємної затримки (а) та з затримкою на 240 с (б). Вимірювання 29 січня 1999 року, робоча частота - 20 МГц, поляризація Б (лінійна, горизонтальна, вздовж осі ПдСх-ПнЗх).

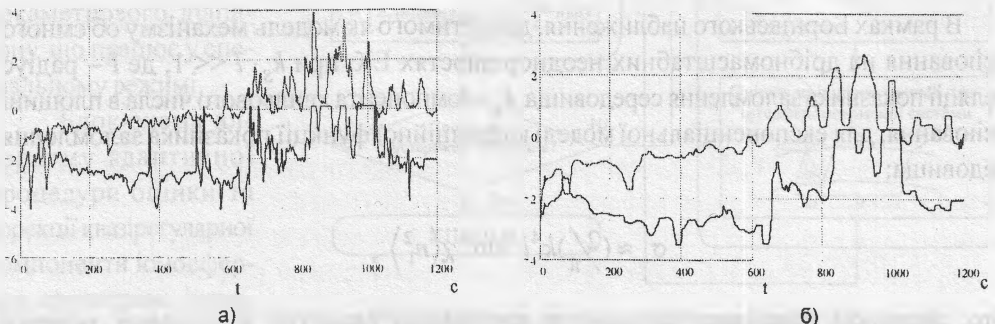


Рис.5. Медіанна фільтрація інтерферограми з постійною усереднення 3 (а) та 31 (б) відлік Скан -20 джерела ЗС144. Верхній - дані РТ УРАН-3, нижній - РТ УРАН-2. Вимірювання 29 січня 1999 року.

таким чином деформація фронту хвилі біля поверхні Землі дає змогу робити оцінку зміщення "видимого" положення кожного з плеч інтерферометричної системи, а отже, згаданої раніше девіації бази інтерферометра $\Delta D = \Delta D_1 - \Delta D_2$.

3. Результати та висновки

Існуюче обладнання радіотелескопів системи УРАН дозволяє реєструвати лише косинусну компоненту інтерференційного відгуку за модуляційним каналом, точність часового калібрування цих каналів становить одиниці секунд, темп реєстрації даних становить 1 відлік за секунду, тому швидкозмінні процеси такий експеримент відслідкувати не дозволяє, проте регулярна сферично-симетрична структура іоносфери та дія потужних іоносферних неоднорідностей з часовим масштабом одиниць і десятків хвилин на такі вимірювання має суттєвий вплив, про що свідчать результати спостережень (рис. 4).

29.01.99	УРАН-3	УРАН-2	30.01.99	УРАН-3	УРАН-2	31.01.99	УРАН-3	УРАН-2
25 МГц	90,241	47,688	25 МГц	105,814	23,380	25 МГц	120,377	37,264
20 МГц	90,465	17,188	20 МГц	22,009	-27,853	20 МГц	105,993	14,347

Як видно з наведених інтерферограм, існує їх часове розузгодження. Додаткова фільтрація даних дозволила додатково виділити повільнозмінну компоненту іоносферних завад. На рис. 5 представлено інтерферограми після фільтрації з різними постійними часу.

Статистика часових розузгоджень інтерферограм різних радіотелескопів, що на однаковій частоті реєструють випромінювання одного і того ж радіоджерела, відображає динаміку повільнозмінних іоносферних процесів з масштабом часу, більшим за 20 хв. У таблиці наведено усереднені зміщення (в секундах) інтерферограм відносно центру скану, отримані як затримка максимуму взаємкореляційної функції між "ідеальною" (модельною) та виміряною інтерферограмою відносно початку координат.

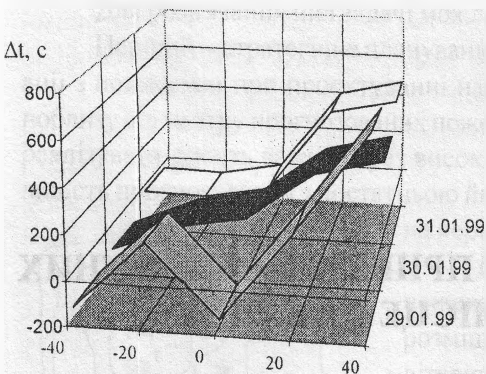


Рис.6. Залежність взаємного часового розузгодження максимумів інтерферограм, отриманих в модуляційних каналах РТ УРАН-2 та УРАН-3, від орієнтації їх ДС (номеру скану), наведена для трьох днів спостережень 29-31.01.99 р.

Спостерігається суттєва систематична похибка орієнтації ДС антенної системи радіотелескопів, причому в УРАН-3 вона в середньому у кілька разів більша, ніж в УРАН-2. Більш детальний розгляд такого зміщення для кожного з інструментів, зокрема, їх взаємна зміна залежно від орієнтації ДС антен телескопів під час спільних інтерферометричних спостережень свідчить про відчутний вплив іоносферної рефракції на результати спостережень (рис. 6.)

Схематично джерело такого розузгодження можна подати так: двічі заломлений (при вході в іоносферний шар та при виході з нього) промінь радіохвилі попадає на антенну систему радіотеле-

скопа під гострішим кутом, ніж за відсутності іоносфери. В процесі руху джерела по небосхилу зі сходу через точку кульмінації на захід з позиції спостерігача, що знаходиться на поверхні Землі, це джерело прискорюється, і біля кульмінації має максимальну кутову швидкість. Після кульмінації видиме положення джерела, навпаки, випереджає його фактичне положення, що і знаходить своє відображення в часовому розузгодженні сканів.

Орієнтація ДС прямо на джерело без врахування ефекту рефракції на іоносферному шарі при значних зенітних кутах (різниця зенітних кутів – у випадку інтерферометричної системи) призводить до неточного наведення і, як наслідок, зниження відношення сигнал/шум на входах приймальних трактів інтерферометричної системи, зменшення ділянок когерентності сигналів, погіршення чутливості радіоінтерферометра загалом. Врахування регулярної компоненти іоносферної рефракції оперативною корекцією положення ДС антенних систем елементів інтерферометричної системи та додаткового калібрування даних за описаною процедурою дозволить зменшити заважаючий вплив іоносфери Землі на результати радіоастрономічних спостережень.

1. *Megn A.V., Braude S.Ya., Rashkovsky S.L., et al. VLBI network URAN and interferometric studies in the decameter waveband // J. of Physics. 1994 P. 813-818.*
2. *Построение изображений в астрономии по функциям когерентности: / Под ред. К. ван Схонвельда. М., 1982.*
3. *Komesaroff M.M. Ionospheric refraction in radio astronomy // Australian J. Phys. 1960. 13. Pp. 153-167.*
4. *Kelder H., T.A.Th.Spoelstra, Effects produced by the ionosphere on radio interferometry. Radio Sci., V.19. No.3, 1984. Pp.779-788*
5. *Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Д. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии: М., 1989.*
6. *Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М., 1981.*
7. *Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М., 1984.*

УДК 681.3:614.842.86

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ЧАСУ ПРИБУТТЯ ПОЖЕЖНИХ АВТОМОБІЛІВ НА МІСЦЕ ВИКЛИКУ

© Т. Рак

Національний університет "Львівська політехніка"

Запропоновано метод оптимізації часу прибуття пожежних автомобілів на місце виклику, який базується на зонному розподілі території та аналітичному визначенні мінімального часу прибуття.