УДК 528.2/3

С. САВЧУК, А. ХОПТАР

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта alina.a.khoptar@lpnu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕДУРИ СИМУЛЯЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧ GNSS-ТОМОГРАФІЇ ТРОПОСФЕРИ

Вміст та розподіл водяної пари в атмосфері Землі пов'язані з різними погодними умовами і кліматичними процесами, а тому мають важливе значення для розуміння багатьох метеорологічних явищ. На сучасному етапі розвитку та становлення Глобальних навігаційних супутникових систем (англ. Global Navigation Satellite Systems, GNSS) розподіл вмісту водяної пари можна встановити за допомогою даних спостережень методом GNSS-томографії, що, своєю чергою, дає можливість вивчати зміни вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі. У GNSS-томографії тропосфери точну інформацію про розподіл водяної пари отримують за допомогою інтегральних вимірювань, таких як визначення вмісту водяної пари у похилому напрямку (англ. Slant Water Vapor, SWV). Суть задачі GNSS-томографії тропосфери – розв'язання системи рівнянь, кількість яких обмежується кількістю супутників, що беруть участь у спостереженнях. Функціональний зв'язок між спостереженнями та невідомими, тобто шляхи проходження GNSS-сигналів через тропосферу, повинен бути достатньо відомий. Проте сьогодні така інформація відсутня, що призводить до основної проблеми методу GNSS-томографії тропосфери – подолання дефіциту рангу під час інверсії вихідного рівняння. Цю проблему можна вирішити, збільшивши кількість супутникових сигналів у широкому діапазоні положень. **Метою** цієї роботи є максимізація використання GNSS-сигналів під час моделювання томографічного розв'язку на основі симуляції даних. **Методика.** На підставі розробленої нами методики опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом запропоновано алгоритм процедури симуляції додаткових супутників під час томографічного моделювання з метою подолання проблем дефіциту рангу. **Результати.** Наведено результати застосування процедури симуляції даних для вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі результатів опрацювання даних мульти-GNSS спостережень на станції GANP (Попрад, Словаччина) у період з 31.05.2019 р. до 1.06.2019 р. **Наукова новизна та практична значущість.** Вперше запропоновано алгоритм процедури симуляції додаткових супутників з метою подолання проблем дефіциту рангу під час томографічного моделювання.

Ключові слова: симуляція; GNSS; GNSS-томографія; тропосферна затримка; вміст водяної пари.

Вступ

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) дають змогу одночасно спостерігати на небесній сфері кілька джерел радіосигналу, що дає можливість дистанційно зондувати мережею приймачів різні ділянки тропосфери під різними кутами місця проходження GNSS-сигналів. Таке зондування ґрунтується на принципі врахування додаткового шляху радіосигналу від супутника до приймальної антени, спричиненого рефракцією у тропосфері Землі. Цей додатковий шлях називають ще тропосферною затримкою у похилому напрямку (англ. Slant Tropospheric Delay, *STD*) [Kasparik et al., 2017].

Для розв'язування задачі відновлення вертикального профілю індексу рефракції радіохвиль використовують метод розв'язання некоректних обернених задач, що базується на розв'язуванні інтегральних рівнянь.

Задача зводиться до розв'язування інтегрального рівняння

$$STD = 10^{-6} \int_r^s \tilde{N}(s) ds, \quad (1)$$

щодо висотного профілю індексу рефракції $\tilde{N}$. Тут інтеграл беруть вздовж лінії радіосигналу від супутника

(s) до приймача (r). Розв'язування оберненої задачі виду (1) зводиться до розв'язання інтегрального нелінійного рівняння першого роду, що являє собою некоректну задачу. Шукана величина – функція $\tilde{N}(h)$. Модель вимірювань описує типові інтегральні рівняння, в яке невідома функція $\tilde{N}(h)$ входить у вигляді частини підінтегральної функції $\tilde{N}(s)$.

Для оцінювання тропосферної затримки з GNSS-спостережень складають систему рівнянь, що зв'язує необхідні для досліджень параметри (у нашому випадку це тропосферні затримки STD_j) із результатами спостережень j -го супутника. Самі спостереження виконують як мінімум двочастотними приймачами на пунктах, координати яких відомі із високою точністю. Сьогодні це майже стандартна процедура в обчислювальному процесі. До складу цієї процедури входить врахування майже всіх відомих джерел похибок із залученням різномірної апріорної інформації – модельної та експериментальної. Деталі можна знайти в численній літературі з цього питання [Flores et al., 2000; Bender et al., 2011; Xia et al., 2013; Yang et al., 2018].

Як правило, тропосферні затримки, що оцінюються на основі наземних GNSS-спостережень, використовують для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари.

Водяна пара є основним парниковим газом в атмосфері, який відіграє важливу роль майже у всіх процесах зміни клімату. Переміщення в просторі та зміна водяної пари в часі безпосередньо впливають на утворення хмар та опадів, які модулюють гідрологічний цикл та енергетичний баланс Землі. Точні знання про розподіл водяної пари в атмосфері необхідні для оцінювання кліматичних змін, прогнозування погоди та вивчення хімії атмосфери [Bevis et al., 1992; Bramlet, 1998; Flores et al, 2000].

Глобальний вертикальний профіль водяної пари можна отримати із супутникових інфрачервоних та мікрохвильових датчиків [4–8]. Однак жоден метод дистанційного зондування не може повністю задовольнити потреби в числовому прогнозуванні погоди, дослідженнях хімії атмосфери та клімату з погляду вертикальної роздільної здатності, просторового та часового охоплення та точності. Тому використання тропосферних GNSS-затримок як вхідної інформації для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в локальних та регіональних масштабах залишається одним із найактуальніших завдань.

Першим видом вхідної інформації є волога складова тропосферної затримки у похиленому напрямку (англ. Slant Tropospheric Delay, *SWD*), яку можна використати для отримання “вологого” показника заломлення тропосфери [Heublein et al., 2019]. Другим видом вхідної інформації є значення вмісту водяної пари у похиленому напрямку (англ. Slant Water Vapor, *SWV*), яке можна застосувати для реконструкції тривимірного поля густини водяної пари [Song et al., 2006]. Відповідні вихідні параметри цих двох тропосферних величин можуть бути взаємоперетворені за допомогою інформації про середньовагову температуру атмосфери [Yang et al., 2018]. Основною проблемою у такому разі є їх інтегральний характер. Для отримання тривимірної інформації про водяну пару запропоновано методику томографії тропосфери із використанням значення *SWV* [Heublein et al., 2019]. Саме використання як вхідної інформації інтегральних характеристик похилої водяної пари (*SWV*) для експерименту із томографії тропосфери і розглянуто у цьому дослідженні.

Томографічні задачі типу (1), у яких за вимірюваннями лінійних інтегралів для системи променів, які перетинають деяку задану область, потрібно відновити структуру середовища, трапляються у різних галузях науки і техніки. Мабуть, нині уже неможливо вказати ті сфери і види, у яких не намагалися б, принаймні теоретично, застосовувати томографічні методи. Немає сенсу перераховувати тут всі варіанти томографічних підходів, зупинимося коротко лише на найближчих – томографії нижньої частини атмосфери Землі – тропосфери.

Для практичної реалізації томографічного підходу здебільшого використовують дискретизацію тропосфери за вокселями (елементарний об’єм у вигляді паралелепіпеда). Тоді для кожного вокселя постулюється постійний індекс рефракції як невідома величина [Bender et al, 2011].

Схеми томографії за лінійними інтегралами для різних типів електромагнітних хвиль практично не відрізняються одна від одної. Основна вимога зводиться до простого принципу: якомога більше променів повинні перетинати задану область (воксель) у якомога ширшому діапазоні кутів. Здебільшого передбачають використання перетворення Радона [Radon, 1917]. Проте застосувати його у разі невеликої кількості променів нереально на практиці. Звідси вимога – мати якомога більше супутників і приймачів або переміщати їх один щодо одного в широкому діапазоні положень.

Дискретизуючи рівняння (1), отримуємо в аналітичній формі

$$STD_j = 10^{-6} \cdot \sum_i N_i \times DS_{i,j}, \quad (2)$$

де STD_j – похила тропосферна затримка радіосигналу від j -го супутника, розташованого на заданій зенітній відстані z_j та в азимуті A_j ; N_i – індекс рефракції i -го вокселя; $DS_{i,j}$ – довжина шляху радіосигналу в i -му вокселі для j -го супутника (рівняння). У більшості завдань томографії тропосфери траєкторії радіосигналів можна вважати прямими і проблема зводиться до звичайної лінійної томографії за прямими.

Вираз (2) є системою рівнянь, кількість яких лімітується кількістю супутників, що беруть участь у спостереженнях. Розв’язання цієї системи рівнянь – суть оберненої задачі томографії. Для складання системи рівнянь (2) традиційно формують сітку вокселів. В літературі можна знайти багато прикладів побудови такої сітки. Крім того потрібно розрахувати STD_j – вільний член, пов’язаний із результатами GNSS-вимірювань та метеорологічними моделями.

Залежно від сузір’я GNSS-супутників та конкретного розподілу GNSS-приймачів у регіональній мережі, можливо, що багато вокселів не перетинаються жодними променями протягом конкретного періоду. Отже, записане вище рівняння спостереження (2) є великою розрідженою матрицею, яка призведе до дефіциту рангу в разі інверсії рівняння. Для подолання цієї проблеми використовують методи накладання обмежень [Bender, 2011] або метод розкладення матриці за сингулярними числами (англ. Singular Value Decomposition, SVD) [Zhao et al., 2020].

Застосовуючи метод накладання обмежень, можна використати різні вагові функції (для горизонтальних внутрішніх вокселів) [Rohm, Bosy, 2009; Yang et al., 2018] та набори експоненціальних функцій (для взаємозв’язку між вертикальними вокселями) [Elosegui et al., 1998]. Можуть також розглядатися дані із найближчої до зони томографії станції радіозондування як

априорне значення густини водяної пари [Zhao et al., 2018]. Крім того, також можуть бути використані дані спостережень інших методів, таких як сонячні спектрометри, радіометри водяної пари, інтерферометричний радар із синтезованою апертурою (InSAR), системи спостережень за супутниковим сузір'ям для метеорології, іоносфери та клімату (COSMIC) тощо [Chen et al., 2016]. Їх можна розглядати як додатковий тип вхідної інформації у методі томографії, який очікувано приводить до перетинання більшої кількості вокселів і покращення геометричної структури рівняння спостереження (2). Зазначимо також, що супутникові промені, використовувані у традиційному методі томографії, належать до сигналів, що перетинаються із верхнього боку томографічного тіла, тоді як сигнали, що проникають з бічних граней, ігноруються як “непридатна” інформація.

Отже, головну проблему томографічного методу – подолання дефіциту рангу за інверсії вихідного рівняння – можна вирішити, або оптимально розмістивши певну кількість станцій GNSS-спостереження, або збільшивши кількість супутникових сигналів у широкому діапазоні положень.

Мета

Мета цієї роботи – максимізація використання GNSS-сигналів під час моделювання томографічного розв'язку на основі симуляції даних.

Методика

Головною проблемою GNSS-томографії тропосфери, як ми вже зазначали, є відсутність інформації про параметри для тих вокселів, через які не проходять сигнали від реальних супутників, що спричинено несприятливою геометрією наземних GNSS-приймачів та сузір'ям GNSS-супутників. Цей недолік також призводить до дефіциту рангу під час моделювання томографічного спостереження. Щоб подолати це некоректно поставлене завдання, у попередніх дослідженнях на томографічне моделювання накладали деякі обмежувальні умови. Найчастіше використовувані обмеження – це горизонтальне обмеження, вертикальне обмеження та априорне обмеження. Незалежно від типу обмежувальної умови, накладеної на томографічне моделювання, ці різні типи обмежувальної інформації потрібно розглядати як незалежну вхідну інформацію. На наш погляд, такий шлях суб'єктивніший і не може застосовуватися в оперативній метеорології.

Грунтуючись на сучасних дослідженнях у сфері GNSS-метеорології, зокрема власних [Savchuk, Khoptar, 2019; Khoptar, 2020], можна стверджувати, що точність визначення тропосферних затримок на основі мульти-GNSS спостережень перевищує точність тропосферних продуктів, отриманих у результаті опрацювання даних GNSS-спостережень від однієї супутникової навігаційної системи. Результати дослідження показують, що порівняно із системами “GPS” та “ГЛОНАСС” середня кількість ефективних сигналів

для мульти-GNSS збільшується утричі, “Galileo” – у сім, а “BDS” – майже у десять разів. Отримані результати є новинним продуктом для спільноти GNSS, що підвищує точність та достовірність цих спостережень.

Як правило, застосовують два методи опрацювання GNSS-спостережень для отримання параметрів тропосфери: перший – нерізницевий режим (англ. undifferencing), який потребує для оцінювання абсолютного параметра тропосфери лише одного GNSS-приймача, також відомий як абсолютний метод точного позионування (англ. Precise Point Positioning, PPP); другий використовує різницевий підхід (англ. double-differencing, DD), який потребує принаймні двох приймачів, однак дає змогу отримати лише відносний параметр тропосфери.

У нашому дослідженні застосовано перший метод, а GNSS-спостереження опрацьовано за допомогою пакета програмного забезпечення GipsyX [https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/index.php?page=documentation] з такою конфігурацією: частота дискретизації становить 30 с, а кут нахилу 7° вибирають для супутникових променів, щоб ігнорувати вплив їх викривлення. Розрахункові параметри тропосфери (зенітна тропосферна затримка та тропосферні градієнти) оцінюють для інтервалів 5 хв.

Ми розробили методику опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом, яка спирається на використання усіх доступних даних із вибраної GNSS-станції, з метою визначення вмісту водяної пари в тропосфері для вирішення завдань томографії атмосфери. Її суть проілюстровано на рис. 1. Це послідовність кроків, яких необхідно дотримуватися, виконуючи розрахунки, а також усі параметри, що використовують для обчислення значень $s w v$.

Рис. 1. Алгоритм отримання $s w v$ за даними мульти-GNSS спостережень

Fig. 1. Algorithm for obtaining data from multi-GNSS observations

Отже, першим видом вхідної інформації, відповідно до наведеного на рис. 1 алгоритму, є волога складова тропосферної затримки ($s w d$), яку отримують із

зенітних тропосферних затримок (англ. Zenith Tropospheric Delay, ZTD). Їх, своєю чергою, визначають, опрацювавши GNSS-спостереження. Другим видом вхідної інформації є похила водяна пара (s_{wv}), яку, власне, і можна використати для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари.

Значення s_{wv} можна обчислити так [Bar-Sever, 1998]:

$$SWD = m_w(e) \cdot ZWD + ZWD \cdot \text{ctge}(G_N^w \cos a + G_E^w \sin a), \quad (3)$$

де s_{wv} – похила тропосферна затримка, e , a – кут нахилу та азимут довільного GNSS-супутника відповідно, G_N^w – градієнт у північному напрямку, G_E^w – градієнт у східному напрямку, $m_w(e)$ – функція відображення ZWD .

Вибір функції відображення $m_w(e)$ є дуже важливим елементом всієї процедури обчислення s_{wv} . У цьому дослідженні застосовано функцію відображення VMF3 [Böhm et al., 2006], аргументами якої були значення параметрів тропосфери із моделі GPT.

Перехід від вологих тропосферних затримок SWD до вмісту водяної пари, як ми уже зазначали, здійснюється за допомогою інформації про середньовагову температуру T_m (див. рис. 1).

Дотримуючись принципу томографії тропосфери, область томографії дискретизують на певну кількість вокселів, у яких густина водяної пари вважається однаковою протягом певного періоду (моменту спостереження). Рівняння томографічного спостереження окремого сигнального променя, на підставі (2), можемо записати у такому вигляді

$$SWV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p d_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k}, \quad (4)$$

де m , n , p – кількість томографічних вокселів у широтному, довготному та вертикальному напрямках, $d_{i,j,k}$ – відстань у вокселі (i, j, k) , як показано на рис. 2, яку можна обчислити на підставі двох перетинів двох сторін вокселя і променя сигналу, а $x_{i,j,k}$ – густина водяної пари у вокселі (i, j, k) .

Рис. 2. Ілюстрація геометрії GNSS-сигналу (променя), що перетинає дискретизовані вокселі

Fig. 2. Illustration of the geometry of the GNSS signal (beam) intersecting the sampled voxels

Як ми уже зазначали, томографія тропосфери потребує, щоб використовувались ті супутникові промені, що перетинають вокселі в ній; однак багато вокселів сигнальний промінь не перетинає через вплив геометричного розподілу сузір'я GNSS-супутників. Це призводить до проблеми інверсії в томографічній роздільній здатності. З метою подолання проблем дефіциту рангу пропонуємо застосувати процедуру симуляції додаткових супутників та залишити деякі обмеження, що накладають під час томографічного моделювання.

Розглянемо процедуру симуляції. Є модель переходу від ZTD до SWD , є її структура (3), але немає самих значень параметрів, якими ця модель описується. Зате є реальні дані у вигляді параметрів тропосфери (зенітних тропосферних затримок та її градієнтів) на момент спостереження, і особливо важливо, що є аналітична залежність цих параметрів. Отримавши ці параметри зі спостережень, можемо одержати скільки завгодно похилих значень вологої тропосферної затримки SWD і, відповідно, s_{wv} . Це, своєю чергою, істотно збільшить кількість рівнянь типу (4) і сприятиме подоланню проблеми їх інверсії.

Результати

Для застосування процедури симуляції даних ми використовували результати опрацювання даних мульти-GNSS спостережень на станції GANP у період з 31.05.2019 р. до 1.06.2019 р. Дані мульти-GNSS спостережень опрацьовано в програмному пакеті GipsyX версії 1.1 PPP-методом. Для прикладу вибрано результати опрацювання даних мульти-GNSS спостережень на момент часу 00^h 05^m. У табл. 1 наведено вхідні дані для виконання процедури симуляції.

За допомогою параметрів із табл. 1 можна розрахувати яку завгодно кількість значень похилої тропосферної затримки s_{wv} та похилого вмісту водяної пари s_{wv} , задавши параметри, які описують модель переходу від ZTD до SWD , тобто висоти та азимуту супутників.

Таблиця 1

Вхідні дані для симуляції

Table 1

Input data for simulation

Тропосферні параметри		
ZWD , М		0,1111
G_N		-0,00022824
G_E		0,00060482
Метеорологічні параметри		
Із моделі GPT2	P , мбар	934,1
	T , °C	14,6
	e , мбар	10,8
	T , °K	276,5
	a_w	0,000542880
Із моделі VMF3	b_w	0,001446465
	c_w	0,041387480

На рис. 3 схематично зображено процес симуляції даних. На лівій частині показано червоним кольором реальні шляхи проходження сигналів від супутників у шарі тропосфери від висоти 11,5 км до висоти станції на поверхні Землі. На рис. 3, б наведено симульовані сигнали (синім) від віртуальних супутників. Треба зазначити, що підбір даних для процедури симуляції (висот та азимутів супутників) становить окрему задачу, розв'язання якої залежатиме від реальної кількості

супутників, що беруть участь у спостереженні та опрацюванні, а також від накладених на томографічний розв'язок обмежень.

Отже, у цій роботі для збільшення кількості рівнянь томографічних спостережень запропоновано процедуру симуляції за віртуальною висотою та азимутом (сині лінії на рис. 3). За даними GNSS-опрацювання та відповідними метеорологічними моделями визначають необхідні вхідні дані (див. табл. 1).

Рис. 3. Графічна ілюстрація процедури симуляції
Fig. 3. Graphic illustration of the simulation procedure

У процесі використано також вибрану функцію відображення вологої складової тропосферної затримки. Відповідна процедура має такий вигляд:

1. GNSS-станцію вибирають як референцну точку, розглядаючи граничні точки у верхній частині томографічної області як кінцеві точки віртуальних спостережень.
2. Верхня частина томографічної області – ті рамки, у межах яких повинні перебувати висоти та азимути віртуальних GNSS-супутників.
3. Здійснюється реальна сесія мульти-GNSS спостережень, за результатами якої за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення отримують вологу тропосферну затримку та її горизонтальні градієнти у дискретизовані моменти часу, як правило, кожні 5 хв.
4. За часом спостереження та координатами станції визначають метеорологічні параметри, приклад яких наведено у табл. 1.
5. На основі формули (3) обчислюють потрібну кількість даних.

Наукова новизна і практична значущість

Вперше запропоновано алгоритм процедури симуляції додаткових супутників з метою подолання

проблем дефіциту рангу під час томографічного моделювання. Алгоритм реалізовано за результатами опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі. Застосування симуляції додаткових супутників може ефективно доповнити ситуацію томографічного моделювання, в результаті чого цю задачу можна розв'язати за рахунок збільшення кількості супутникових сигналів у широкому діапазоні положень. Отримані результати мають важливе значення для геодезії та метеорології.

Висновки

Для більшості сучасних досліджень GNSS-томографії тропосфери використовують лише ті сигнали від супутників, які проходять через всю томографічну область, тоді як сигнали, що перетинаються із бічних граней томографічного тіла, ігноруються. Така поведінка не лише нехтує цінними спостереженнями, але й зменшує кількість корисних супутникових променів та вокселів, які перетинаються променями. У статті наведено метод подолання дефіциту рангу за інверсії вихідного рівняння томографічного типу, суть якого полягає у проведенні процедури симуляції даних. На основі аналітичної залежності (3) та описаних вхідних даних

запропоновано процедуру симуляції похилих інтегральних значень вмісту водяної пари у тропосфері Землі за віртуальною висотою та азимутотом GNSS-супутника. Кількість таких віртуальних супутників та їх геометричне розташування є апіорною інформацією, характер якої визначається залежно від поставленого завдання.

Література

- Bar-Sever Y. E., Kroger P. M., and Borjesson J. A. (1998). Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a single GPS Receiver. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, Issue B3, pp. 5019–5035.
- Bender, M., Dick, G., Ge, M., Deng, Z., Wicker, J., Kahle, H.-G., Raabe, A., Tetzlaff, G. (2011). Development of a GNSS water vapor tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Adv. Space Res.*, 47, pp. 1704–1720.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res. Atmos.* 97, pp. 15787–15801.
- Bramlet, R. (1978). Reconstruction tomography in diagnostic radiology and nuclear medicine. *Clin. Nucl. Med.* 3, p. 245.
- Chen, Y. Q., Liu, Y. X., Wang, X. Y., Li, P. H. (2016). Assessing the Performance of Troposphere Tomographic Modeling Using MultiSource Water Vapor Data During Hong Kong's Rainy Season from May to October 2013. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, pp. 1–23.
- Elosegui, P., Ruis, A., Davis, J., Runi, G., Keilm, S., Bürki, B., Kruse, L. (1998). An experiment for estimation of the spatial and temporal variations of water vapor using GPS data. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 23 (1), pp. 125–130.
- Flores, A., Ruffini, G., Rius, A. (2000). 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. *Ann. Geophys.*, 18, pp. 223–234.
- Gipsy X Dococumentations, [online] Available at: <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/index.php?page=documentation> [Accessed 01 01 2021].
- Guo, J., Yang, F., Shi, J., Xu, C. (2016). An optimal weighting method of Global Positioning System (GPS) troposphere tomography. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 9, pp. 5880–5887.
- Heublein, M., Alshawaf, F., Erdnüb, B., Xiao Xiang Zhu, Hinz, S. (2019). Compressive sensing reconstruction of 3D wet refractivity based on GNSS and InSAR observations. *Journal of Geodesy*, Vol. 93, pp. 197–217.
- Kacmarik, M., Dousa, J., Dick, G., Zus, F., Brenot, H., Möller, G., Pottiaux, E., Kaplon, J., Hordyniec, P., Václavovic, P., Morel, L. (2017). Inter-technique validation of tropospheric slant total delays. *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 10, pp. 2183–2208.
- Rohm, W., Bosy, J. (2009). Local tomography troposphere model over mountains area. *Atmos. Res.*, Vol. 93, pp. 777–783.
- Savchuk S., Khoptar A. (2019). Analysis of the tropospheric delay estimates in software package – GipsyX based on multi-GNSS observations. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Vyp. I (37), pp. 57–63.
- Song, S., Zhu, W., Ding, J., Peng, J. (2006). 3D water-vapor tomography with Shanghai GPS network to improve forecasted moisture field. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 51(5), pp. 607–614.
- Xia, P., Cai, C., Liu, Z. (2013). GNSS troposphere tomography based on two-step reconstruction using GPS observation and COSMIC profiles. *Ann. Geophys.* 31, pp. 1805–1815.
- Yang, F., Guo, J., Shi, J., Zhou, L., Xu, Y., Chen, M. (2018). A Method to Improve the Distribution of Observations in GNSS Water Vapor Tomography. *Sensors*, 18(8), p. 2526.
- Zhao Q., Yao Y., Yao W., Xia P. (2018). An optimal tropospheric tomography approach with the support of an auxiliary area. *Annales Geophysicae*, 36, pp. 1037–1046.
- Zhao Q., Li Z., Yao W., Yao Y. (2020). An improved ridge estimation (IRE) method for troposphere water vapor tomography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 207, p. 105366.
- Хоптар А. (2020). Відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері землі на основі даних мульти-GNSS спостережень. *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва*, Вип. II (40), С. 41–49.

S. SAVCHUK, A. KHOPTAR

Department of geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail alina.a.khohtar@lpnu.ua

APPLICATION OF DATA SIMULATION PROCEDURE FOR TROPOSPHERE GNSS TOMOGRAPHY TASKS

The content and distribution of water vapor in the Earth's atmosphere are related to various weather conditions and climatic processes, and are therefore important for understanding many meteorological phenomena. At the current stage of development and formation of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), the distribution of water vapor content can be established using

such observations from GNSS tomography, which, in turn, allows to study changes in the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere. In troposphere GNSS tomography, accurate information on the distribution of water vapor is obtained using integrated measurements, such as the water vapor content value in the slant direction (Slant Water Vapor, SWV). The essence of the problem of troposphere GNSS tomography is the solution of equations system, the number of which is limited by the number of satellites involved in observations. In this case, the functional relationship between observations and unknowns, ie the pathways of GNSS signals through the troposphere, must be known in sufficient numbers. However, today there is a problem of lack of such information, which leads to the main problem of the troposphere GNSS-tomography method – overcoming the deficit of rank in the inversion of the original equation. This problem can be solved by increasing the number of satellite signals in a wide range of positions. The **purpose** of this work is to maximize the use of GNSS signals in modeling tomographic solutions based on data simulation. **Method.** Based on the developed method of multi-GNSS observations data processing by the PPP method, an algorithm of the procedure of simulation of additional satellites in tomographic modeling in order to overcome the problems of rank deficit is proposed. **Results.** The results of application of the data simulation procedure for the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere are presented based on the results of processing GNSS observations at the GANP station (Poprad, Slovakia) in the period from 31.05.2019 to 1.06.2019. **Scientific novelty and practical significance.** For the first time, an algorithm for the procedure of additional satellites simulation was proposed in order to overcome the problems of rank deficit in the tomographic modeling.

Key words: simulation; GNSS; GNSS tomography; tropospheric delay; water vapor content.

References

- Bar-Sever Y. E., Kroger P. M., and Borjesson J. A. (1998). Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a single GPS Receiver. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, Is. B3, pp. 5019–5035.
- Bender, M.; Dick, G.; Ge, M.; Deng, Z.; Wicker, J.; Kahle, H.-G.; Raabe, A.; Tetzlaff, G. (2011). Development of a GNSS water vapor tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Adv. Space Res.*, 47, pp. 1704–1720.
- Bevis, M.; Businger, S.; Herring, T. A.; Rocken, C.; Anthes, R. A.; Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 97, pp. 15787–15801.
- Bramlet, R. (1978). Reconstruction tomography in diagnostic radiology and nuclear medicine. *Clin. Nucl. Med.* 3, p. 245.
- Chen, Y. Q., Liu, Y. X., Wang, X. Y., Li, P. H. (2016). Assessing the Performance of Troposphere Tomographic Modeling Using MultiSource Water Vapor Data During Hong Kong's Rainy Season from May to October 2013. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, pp. 1–23.
- Elosegui, P., Ruis, A., Davis, J., Runi, G., Keihm, S., Bürki, B., Kruse, L. (1998). An experiment for estimation of the spatial and temporal variations of water vapor using GPS data. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 23 (1), pp. 125–130.
- Flores, A.; Ruffini, G.; Rius, A. (2000). 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. *Ann. Geophys.*, 18, 223–234.
- GipsyX Docummentations, [online]. Available at: <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/index.php?page=documentation> [Accessed 01 01 2021].
- Guo, J.; Yang, F.; Shi, J.; Xu, C. (2016). An optimal weighting method of Global Positioning System (GPS) troposphere tomography. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 9, pp. 5880–5887.
- Heublein, M., Alshawaf, F., Erdnöß, B., Xiao Xiang Zhu, Hinz, S. (2019). Compressive sensing reconstruction of 3D wet refractivity based on GNSS and InSAR observations. *Journal of Geodesy*, Vol. 93, pp. 197–217.
- Kacmarik, M., Dousa, J., Dick, G., Zus, F., Brenot, H., Möller, G., Pottiaux, E., Kaplon, J., Hordyniec, P., Václavovic, P., Morel, L. (2017). Inter-technique validation of tropospheric slant total delays. *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 10, pp. 2183–2208.
- Rohm, W., Bosy, J. (2009). Local tomography troposphere model over mountains area. *Atmos. Res.*, Vol. 93, pp. 777–783.
- Savchuk S., Khohtar A. (2019). Analysis of the tropospheric delay estimates in software package – GipsyX based on multi-GNSS observations. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Vyp. I (37), pp. 57–63.
- Song, S., Zhu, W., Ding, J., Peng, J. (2006). 3D water-vapor tomography with Shanghai GPS network to improve forecasted moisture field. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 51(5), pp. 607–614.
- Xia, P.; Cai, C.; Liu, Z. (2013). GNSS troposphere tomography based on two-step reconstruction using GPS observation and COSMIC profiles. *Ann. Geophys.*, 31, pp. 1805–1815.
- Yang, F.; Guo, J.; Shi, J.; Zhou, L.; Xu, Y.; Chen, M. (2018). A Method to Improve the Distribution of Observations in GNSS Water Vapor Tomography. *Sensors*, 18(8), p. 2526.
- Zhao Q., Yao Y., Yao W., Xia P. (2018). An optimal tropospheric tomography approach with the support of an auxiliary area. *Annales Geophysicae*, 36, pp. 1037–1046.
- Zhao Q., Li Z., Yao W., Yao Y. (2020). An improved ridge estimation (IRE) method for troposphere water vapor tomography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 207, p. 105366.
- Khohtar A. (2020). Vidnovlennya vertykal'noho profilu vmistu vodyanoyi pary v troposferi zemli na osnovi danykh mul'ty-GNSS sposterezhen'. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Vyp. II (40), pp. 41–49.