



вань обчислюються від простої та загальної арифметичних середин, то СКП мінімальні, оскільки мінімальні $[VV]$ і $[p_x VV]$. Але, враховуючи зміни функції від кількості вимірювань і наведених СКП, можна припустити, що ці зміни за своєю величиною незначні й говорити про максимум або мінімум функції недоцільно. Тобто стверджувати, що функція правдоподібності має максимальне значення, коли параметр a_1 дорівнює простій або загальній арифметичним серединам, – недоречно. Або тоді доведеться змінити погляд на значення цих величин і вважати, що, наприклад, 0,00001 – це значна зміна.

Література

1. Берс, Л. Математический анализ. Т. 1; пер. с англ. Л.И. Головиной; под ред. И.М. Яглома: учеб. пос. для вузов / Л. Берс. – М.: Высш. шк., 1975. – 519 с.
2. Большаков, В.Д. Городская полигонометрия. Уравнение и основы уравнивания / В.Д. Большаков, Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1979. – 303 с.
3. Большаков, В.Д. Теория ошибок наблюдений: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Д. Большаков. – М.: Недра, 1983. – 223 с.
4. Большаков, В.Д. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений: учеб. пос. для вузов / В.Д. Большаков, Ю.И. Маркузе. – М.: Недра, 1984. – 352 с.
5. Видуев, Н.Г. Вероятностно-статистический анализ погрешностей измерений / Н.Г. Видуев, Г.С. Кондра. – М.: Недра, 1969. – 320 с.
6. Войтенко, С.П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів: навчальний посібник / С.П. Войтенко. – К.: – КНУБА, 2003. – 216 с.
7. Войтенко, С.П. Математична обробка геодезичних вимірів. Метод найменших квадратів: навчальний посібник / С.П. Войтенко. – К.: – КНУБА, 2005. – 236 с.
8. Гайдаев, П.А. Теория математической обработки геодезических измерений / П.А. Гайдаев, В.Д. Большаков. – М.: Недра, 1969. – 400 с.
9. Гаусс, К.Ф. Избранные геодезические сочинения; под общ. ред. С.Г. Судакова Т. 1. Способ наименьших квадратов; под ред., с введен. Г.В. Багратуни / К.Ф. Гаусс. – М.: Изд-во геодез. лит-ры, 1957. – 152 с.
10. Зазуляк, П.М. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань: навчальний посібник / П.М. Зазуляк, В.І. Гавриш, Е.М. Євсєєва, М.Д. Йосипчук. – Л.: Вид-во "Растр-7", 2007. – 408 с.
11. Идельсон, Н.И. Способ наименьших квадратов и теория математической обработки наблюдений / Н.И. Идельсон. – М.: Геодезиздат, 1947. – 359 с.
12. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. – Ленинград: Физматгиз, 1962. – 352 с.
13. Лукьянов, В.Ф. Расчеты точности инженерно-геодезических работ / В.Ф. Лукьянов. – М.: Недра, 1981. – 285 с.
14. Мазмишвили, А.И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов / А.И. Мазмишвили. – М.: Недра, 1978. – 311 с.
15. Папазов, М.Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов / М.Г. Папазов, С.Г. Могильный. – М.: Недра, 1968. – 302 с.
16. Рябчий, В.А. Обгрунтування принципу найменших квадратів / В.А. Рябчий, В.В. Рябчий // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – Вип. I. – С. 104-107.
17. Рябчий, В.А. Теорія похибок вимірювань: навчальний посібник / В.А. Рябчий, В.В. Рябчий. – Дп.: Нац. гірн. ун-т, 2006. – 166 с.
18. Смирнов, Н.В. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии / Н.В. Смирнов, Д.А. Белуги. – М.: Недра, 1969. – 379 с.
19. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 2 / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Изд-во "Наука", 1969. – 800 с.
20. Чеботарев, А.С. Способ наименьших квадратов с основами теории вероятностей: учебн. для геодез. вузов и ф-тов / А.С. Чеботарев. – М.: Геодезиздат, 1958. – 606 с.

Надійшла 08.07.13

* * *

УДК 528.3:551.509

Н. М. Турчин

ОЦІНЮВАННЯ ІНТЕГРОВАНОГО ПОКАЗНИКА ОСАДЖУВАНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА ДАНИМИ GPS-ВИМІРЮВАНЬ ТА РАДІОЗОНДУВАННЯ

Для прогнозирования погоды используется показатель влажной составляющей зенитной тропосферной задержки. На его основе вычисляются значения осадженного водяного пара. В данной статье анализируются значения этого показателя, полученные в процессе обработки данных GPS-наблюдений и радиозондирования атмосферы.

For weather forecasting the wet component of zenith tropospheric delay index is used. The values of precipitation of water vapour based on it are calculating. The analysis of values of this index resulting from the GPS-observation and radiosonde data processing is made.

Постановка проблеми. Дослідження вологості складової зенітної тропосферної затримки в ході

GPS-спостережень бажане для покращення прогнозування погодних і кліматичних явищ.

Інтегрований показник водяної пари IWV (Integrated Water Vapor) в атмосфері виводять із

© Н. М. Турчин, 2013



показника вологості складової зенітної тропосферної затримки. IWV донедавна достатньо точно визначали, застосовуючи надто громіздкі й затратні технології, а саме метод радіозондування, радіометри водяної пари, лідарні системи тощо.

З появою GPS-технології вологу складову стали обчислювати з результатів GPS-вимірювань, отримуючи значення загальної тропосферної затримки. Його приводять до зенітного напрямку, використовуючи функції відображення. Далі за аналітичною моделлю, наприклад Sastamoinen, обчислюють гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки за виміряним значенням приземного атмосферного тиску. За різницею між приведеною до зенітного напрямку загальною тропосферною затримкою, отриманою із GPS-розв'язків, та обчисленою зенітною гідростатичною складовою отримують величину вологості складової тропосферної затримки на заданий момент часу. Потім за цим значенням обчислюють IWV, а далі величину PWV (Precipitable Water Vapor) для визначення вмісту осаджуваної водяної пари в атмосфері. Потрібно з'ясувати, з якою точністю можна отримати величину осаджуваної водяної пари із GPS-спостережень.

Власне на вирішення цього питання і спрямоване наше дослідження.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. В науковій літературі на сьогоднішній день є багато публікацій [1-2, 5-6 та ін.], що стосуються теми вологого складника зенітної тропосферної затримки при визначенні маси осаджуваної водяної пари.

Постановка завдання. Основною метою дослідження є аналіз відомостей про осаджувану водяну пару, отриманих із значень вологості складової зенітної тропосферної затримки в ході GPS-вимірювань на станції SULP (Львів) та із даних радіозондувань атмосфери.

Інтегрований показник водяної пари як загальної маси водяної пари у стовпі повітря перерізом 1 м^2 від поверхні Землі до верхньої межі вологості атмосфери визначають за формулою

$$\text{IWV} = \frac{d_w^z}{10^{-6} \cdot R_w \left[K_2' + \frac{K_3}{T_{\text{сер}}} \right]}, \quad (1)$$

де d_w^z – волога складова зенітної тропосферної затримки; $R_w = 461,525 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – питома газова стала водяної пари; K_1, K_2, K_3 – емпіричні коефіцієнти; $T_{\text{сер}}$ – температура зваженої водяної пари стовпа повітря (середня температура); $K_2' = (K_2 - K_1 \cdot 0,622)$.

Вологу складову обчислюють за формулою

$$d_w = 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} \left[(K_2 - K_1 \cdot 0,622) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right] Z_w^{-1} dh, \quad (2)$$

де H_s, H_a – відповідно висота станції (антени приймача) і висота вологості атмосфери; e – парціальний тиск водяної пари; T – температура за шкалою Кельвіна; Z_w^{-1} – коефіцієнт стискування водяної

пари для переходу від ідеального до неідеального газу; dh – прошарки висоти.

Величина IWV може бути переведена в одиниці довжини, якщо розділити її на густину води: $(\rho(H_2O) = 1 \text{ г/см}^3)$. Тоді вона виражатиметься як висота (в міліметрах) стовпа води перерізом 1 м^2 , отриманої із сконденсованої пари, і це буде маса осаджуваної водяної пари PWV, обчисленої в ході дослідження.

Як видно з формули (1), для визначення IWV необхідно знати значення $T_{\text{сер}}$. Найточніше його можна визначити інтегруванням вертикальних профілів температури і вологості:

$$T_{\text{сер}} = \frac{\int_{h_0}^{h_{\text{max}}} \frac{e}{T} Z_w^{-1} dh}{\int_{h_0}^{h_{\text{max}}} \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} dh}. \quad (3)$$

Для реалізації даної формули мають бути відомі вертикальні профілі парціального тиску e і температури T уздовж межі вологості атмосфери. Очевидно, такий підхід є надто клопітною справою, і для практичних застосувань він нереальний. Тому використовують вираз, що потребує даних лише вимірюваного значення приземної температури T_s :

$$T_{\text{сер}} = a + bT_s, \quad (4)$$

де a і b – коефіцієнти, одержані експериментальним шляхом. Зокрема, у праці [5] наводяться коефіцієнти $a=70,2$ і $b=0,72$, отримані за даними зондування над територією США в діапазоні широт 27° – 65° пн. ш. Для інших регіонів земної кулі ці коефіцієнти мають інші значення. Так, для аерологічної станції Ужгород встановлено коефіцієнти $a=-6,78$, $b=1,04$; для станції Київ $a=55,51$, $b=0,78$ [2]. У праці [4] вказано коефіцієнти для північно-західної частини Росії: $a=65,48$ і $b=0,73$.

Виклад основного матеріалу. Вихідними даними для дослідження IWV були: дані радіозондування на двох основних російських станціях – Центральній аерологічній обсерваторії (Долгопрудний) та Головній геофізичній обсерваторії (Воєйково). Вибір цих станцій обумовлений тим, що це найбільш відомі з науково-технічної точки зору аерологічні станції у Східній Європі. Для опрацювання було обрано по 10 зондувань (на 0 год UTC кожне), що припадали на середні декади січня і липня 2011 року.

Оскільки дані зенітної тропосферної затримки із GPS-спостережень на російських станціях будуть доступні з вересня 2013 року, тому для нашого дослідження використано дані таких спостережень на станції SULP (Львів), а дані радіозондування – на станції ЛЬВІВ. Для опрацювання вибрано 10 дат 2012 року.

У відділі атмосферних досліджень університету штату Вайомінг (США) [7] для кожного зондування по кожній станції вказують величини осаджуваної водяної пари PWV у міліметрах. Їх ми використали у даному дослідженні для порівняння з обчисленою нами осадженою водяною парою.



Оскільки алгоритм обчислення водяної пари у матеріалах радіозондувань в університеті не описано, то після консультацій з працівниками відділу ми прийняли, що

$$PWV = [(s_n + s_v) / 2 \cdot (P_n - P_v)] g, \quad (5)$$

де P_n, P_v – тиск на нижній і верхній межі i -шару; s_n, s_v – масова частка водяної пари на нижній і верхній межі i -шару; g – прискорення вільного падіння, яке становить $9,80616 \text{ м/с}^2$.

Величину s американські дослідники обчислюють за формулою

$$s = \frac{0,622e}{P - 0,378e}.$$

У практичних розрахунках складовою $0,378e$ вони нехтують і для визначення s користуються виразом

$$s = 622 \frac{e}{P}.$$

Парціальний тиск водяної пари e визначають з рівняння

$$e = E \cdot \Delta,$$

де E – тиск насиченої водяної пари; Δ – специфічна поправка.

Тиск пари і поправку вони обчислюють за такими виразами:

$$E = 6,11 \cdot \exp[(17,67\tau) / (\tau + 243,5)];$$

$$\Delta = 1,001 + (P_i - 100) \cdot 0,378 \cdot 10^{-5},$$

де τ – точка роси.

Далі у таблиці наводяться значення водяної пари на обох станціях Львова за 2012 р. на 0^h , отримані в результаті різних підходів.

Значення обчисленої осаджуваної водяної пари по обох станціях

Дата	PWV	$d_{w(GPS)}^z$	PWV _(GPS) (3)	PWV(3)	Δ_{PWV_1}	Δ_{PWV_2}
26.04	17,71	78,6	12,73	18,03	0,32	-4,98
29.06	27,13	153,8	25,17	27,84	0,71	-1,96
05.07	33,62	217,2	33,18	34,21	0,59	-0,44
10.07	33,74	228,2	37,96	34,22	0,48	4,22
24.07	27,00	131,3	21,68	27,24	0,24	-5,32
26.07	42,81	243,7	40,76	43,86	1,05	-2,05
28.07	36,83	207,6	34,39	37,21	0,38	-2,44
02.08	35,25	181,7	30,26	35,55	0,30	-4,99
04.08	33,87	177,5	29,88	34,54	0,67	-3,99
04.10	22,17	154,4	25,04	22,63	0,46	2,87
Середнє	31,01		29,10	31,53	0,52	-1,91

Примітка: PWV – осаджувана водяна пара, обчислена за формулою (5); $d_{w(GPS)}^z$ – волога складова, виведена із GPS-спостережень; PWV_(GPS)(3) – осаджувана водяна пара, отримана за формулою (1), в якій волога складова виведена із GPS-спостережень, а $T_{сер}$ обчислена за формулою (3); PWV(3) – осаджувана водяна пара, отримана за формулою (1), в якій волога складова обчислена з радіозондувань, а $T_{сер}$ обчислена за формулою (3); Δ_{PWV_1} – різниця осаджуваної водяної пари PWV(3) та PWV; Δ_{PWV_2} – різниця осаджуваної водяної пари PWV_(GPS)(3) та PWV.

Якщо величину $T_{сер}$ визначати за формулою (4), то отримаємо розходження в PWV приблизно 0,5 мм.

Як видно з таблиці, величина водяної пари, де волога складова одержана із GPS-спостережень, дещо більша, ніж одержана із радіозондувань. Значення PWV, де $T_{сер}$ обчислена за формулою (3), відображає реальний стан вертикального профілю атмосфери.

Для обчислення величини PWV для станцій Долгопрудний і Воєйково за формулою (1) використано значення вологої складової, отримане за даними радіозондування. Середню температуру $T_{сер}$ обчислено за формулами (3) та (4). Середні різниці значень осаджуваної водяної пари, обчислені за формулами (1) та (5), для станції Долгопрудний для літнього і зимового періоду однакові – 0,1 мм. Для станції Воєйково різниці більші: у липні вони становлять 0,6 мм, у січні – 0,3 мм.

Висновки та рекомендації. Величини осаджуваної водяної пари, отримані за результатами GPS-спостережень, у середньому більші за значення, отримані за даними радіозондувань. Це пояснюється тим, що помилка визначення вологої складової зенітної тропосферної затримки включає також залишкові значення усіх врахованих чи знехтованих помилок, що входять до основного рівняння GPS-спостережень.

Для підвищення точності осаджуваної водяної пари необхідно підвищувати точність встановлення значень середньої температури зваженої водяної пари.

Література

1. Заблоцький, Ф.Д. Особливості формування вологої складової тропосферної затримки в різних регіонах / Ф.Д. Заблоцький // Зб. наук. пр. "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва". – Л.: Ліга-Прес, 2002. – С. 121-127.
2. Каблак, Н.І. Дистанційне зондування водяної пари в атмосфері з допомогою дистанційних супутникових систем / Н.І. Каблак // Міжвід. наук.-техн. зб. "Геодезія, картографія і аерофотознімання". – Л.: – Вид-во Львівської політехніки, 2011. – Вип. 75. – С. 31-35.
3. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии (Физика атмосферы): учебник / Л.Т. Матвеев. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
4. Чукин, В.В. Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами / В.В. Чукин, Е.С. Алдошкина, А.В. Вахнин [и др.] // Уч. зап. РГГМУ. – 2010. – № 12. – С. 51-60.
5. Bevis, M.S. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System / M.S. Bevis, T.A. Businger, C. Herring [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 1992. – Vol. 97, No. D14. – Pp. 15,787-15,801.

Інтернет-джерела

6. Rocken, C. GNSS Meteorology – 1. GPS Observation Equation and Obtaining the Tropospheric Excess Phase. – Реж. доступу: http://www.cosmic.ucar.edu/summer-camp_2005/presentations/rocken_chris_20050526.pdf
7. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sonding.html>

Надійшла 19.08.13