

## ОЦІНКА РЕФРАКЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ ДРУГОГО ПОРЯДКУ В МОДЕЛЯХ ІОНОСФЕРИ ДЛЯ GPS-ЗАСТОСУВАНЬ

© Занімонська А.Є., Прокопов О.В., 2001

**Анализируется погрешность, обусловленная рефракционным разбросом траекторий, а также оценивается вклад рефракционного удлинения траектории сигнала в изменение псевдодальностей в GPS-измерениях. Представлены расчеты этих погрешностей для различных частот и зенитных углов для кодового варианта двухчастотного метода. В расчетах используется сферически-слоистая модель ионосферы.**

**The refractive error caused by straggling of trajectories is analyzed, as well as the contribution of the refractive lengthening of radio path to the changing of pseudorange in GPS measurements is estimated. Calculations for various frequencies and zenith angles for code variant of the two-frequency method are presented. The spherically-stratified model of ionosphere was used.**

Глобальні супутникові радіонавігаційні системи, які використовуються в режимі геодезичних вимірювань, мають унікальні можливості для геодинамічних досліджень, завдяки гнучкій просторовій структурі мереж та високої часової розподільної здатності. Значення похибки вимірювань на рівні сантиметрів у добових циклах та на рівні міліметрів у тижневих циклах, при вимірюваннях відстаней до декількох тисяч кілометрів, дають змогу успішно розв'язувати класичні задачі континентальної геодинаміки.

Результати систематичних досліджень стабільності положення геодезичних пунктів у зоні помірної геодинамічної активності, які були проведені останніми роками в багатьох країнах світу, показують, що існують варіації координат пунктів і відстаней між ними з добовим і півдобовим періодами й амплітудою від 0,5 до 2 см для різних компонентів векторів, які надійно реєструються [1]. Такі варіації занадто великі як для власних рухів пунктів, так і для похибок вимірювань, які оцінюються у рамках моделей, які використовуються в теперішній час, але можливо не враховують яких-небудь істотних факторів. Серед факторів, що визначають парціальні похибки вимірювань відстаней методами GPS, тільки два мають явну добову періодичність. Це – супутникова конфігурація, яка спостерігається, і концентрація електронів в іоносфері. При обробці даних двочастотних приймачів за допомогою сучасних комп'ютерних програм, наприклад, Bernese 4.2, з використанням прецизійних орбіт і поправок супутникових годинників, власний вплив конфігурації мінімізується. Таким чином, імовірним джерелом періодичності, що спостерігається, можуть бути варіації концентрації електронів, що не враховуються сучасними моделями іоносфери. Зокрема, рівняння вимірювань, реалізовані в сучасних двочастотних приймачах, не враховують рефракційний просторовий розкид траекторій поширення радіосигналів з різними несучими частотами.

Відзначимо, що це може призводити до помилок вимірювання псевдовідстаней, які викликають не лише варіації експериментальних даних по координатах та висотах пунктів,

але й до помилок вимірювань при інших варіантах використання GPS. Наприклад, при відтворенні параметрів іоносфери і тропосфери за даними GPS-вимірювань.

У зв'язку з цим, в роботі аналізується рефракційна похибка  $\sigma_{straggl}$ , зумовлена розкидом траєкторій, а також оцінюється внесок рефракційного подовження  $\sigma_{length}$  траєкторії сигналу в зміну псевдовідстаней. Для розрахунку похибок використовується така загальна математична модель, сформульована на базі підходу, викладеного в [2]:

$$\sigma_{straggl} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left[ \Delta D_2 - \Delta D_1 + \Delta S_2 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta S_1 \right],$$

$$\sigma_{length} = \Delta D_1,$$

$$\Delta D_i = \int_{S_i} ds - L,$$

$$\Delta S_i = \begin{cases} \int_{S_i} (n-1) ds & \text{— для фазових вимірювань,} \\ \int_{S_i} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) ds & \text{— для кодових вимірювань,} \end{cases}$$

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}, \quad \omega = 2\pi f, \quad \omega_0^2 = \frac{4\pi e^2 Ne}{m},$$

де  $n$  – коефіцієнт заломлення іоносфери;  $\omega_0$  – плазменна частота;  $f$  – частота радіосигналу;  $e$ ,  $m$  – заряд і маса електрона;  $Ne$  – електронна концентрація;  $\Delta D_i$  – рефракційне подовження траєкторії сигналу з частотою  $f_i$ ;  $\Delta S_i$  – затримка сигналу з частотою  $f_i$ ;  $S_i$  – траєкторія сигналу з частотою  $f_i$ ;  $s$  – променева координата;  $L$  – відстань від приймача до супутника вздовж прямої лінії.

Інтегрування ведеться вздовж променевої траєкторії, форма якої (для випадку сферично-слоїстої іоносфери) визначається рівнянням:

$$\frac{ds}{dr} = \frac{n(r) \cdot r}{\sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \sin^2 z_0}},$$

де  $n_0$  – значення показника заломлення в точці спостереження;  $r_0$  – відстань від центра Землі до приймача;  $z_0$  – видимий зенітний кут.

В розрахунках використовувалася біекспоненціальна модель вертикального профілю електронної концентрації [3]:

$$\frac{Ne}{N_m} = \begin{cases} 0, & z < z_0, \\ \gamma \cdot \left[ \exp\left(-\frac{z-z_0}{h_1}\right) - \exp\left(-\frac{z-z_0}{h_2}\right) \right], & z > z_0, \end{cases}$$

де

$$\gamma^{-1} = \max \left[ \exp\left(-\frac{z-z_0}{h_1}\right) - \exp\left(-\frac{z-z_0}{h_2}\right) \right] = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_2}{h_1-h_2}} - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_1}{h_1-h_2}},$$

тут  $N_m$  – максимальне значення електронної концентрації,  $r_m$  – нижня межа іоносфери.

Параметри  $h_1$  та  $h_2$  задають форму профілю. Чим менше значення цих параметрів, тим менша ширина діючого шару іоносфери.

Похибки  $\sigma_{straggl}$  та  $\sigma_{length}$  були розраховані для різних частот  $f$  та зенітних кутів  $z_0$  для кодового варіанта двочастотного методу. Хоча ці похибки входять в рівняння вимірювання з протилежними знаками, сумарна похибка (залишкова рефракційна похибка двочастотного методу) при великих значеннях електронної концентрації на великих зенітних кутах може виявлятися суттєвою (рис. 1, 2, табл. 1).

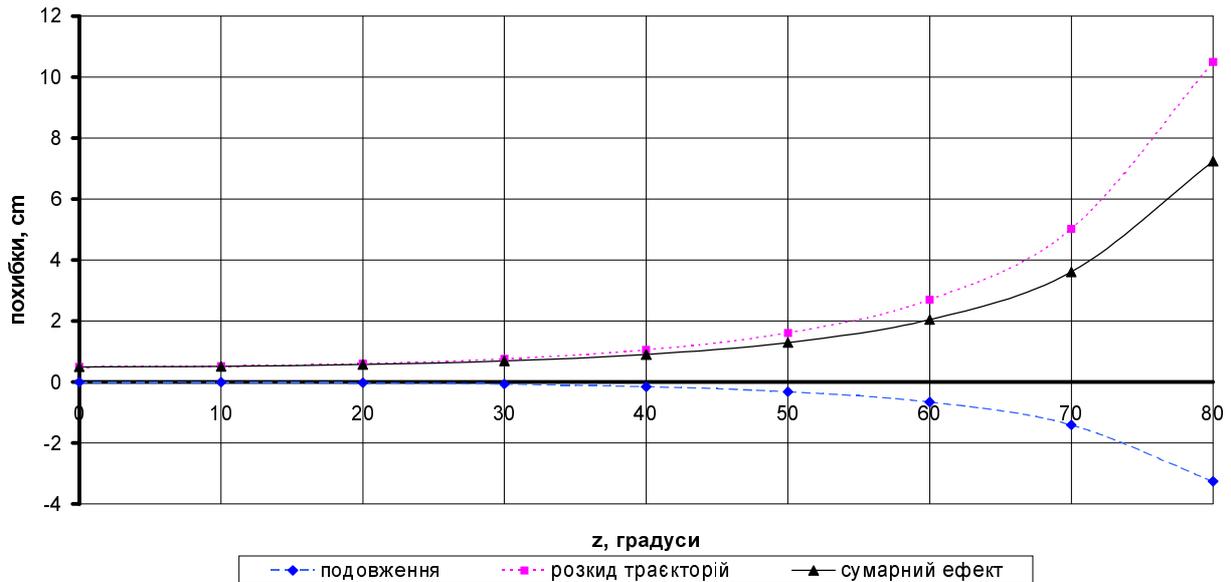


Рис. 1. Рефракційні похибки двочастотного методу  
для  $Nm=5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ ,  $f1=1227,46 \text{ MHz}$ ,  $f2=1575,60 \text{ MHz}$

Таблиця 1

$f1=1227,46$      $f2=1575,60$

$z_0$ , град.	Параметри: $Nm=10^6 \text{ см}^{-3}$ , $h_1=325$ , $h_2=32.5$			Параметри: $Nm=5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , $h_1=400$ , $h_2=40$		
	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см
0	0,00	0,02	0,02	0,00	0,49	0,49
10	0,00	0,02	0,02	-0,01	0,52	0,51
20	0,00	0,02	0,02	-0,03	0,60	0,57
30	0,00	0,03	0,03	-0,07	0,76	0,69
40	-0,01	0,04	0,03	-0,16	1,06	0,90
50	-0,01	0,05	0,04	-0,32	1,61	1,29
60	-0,02	0,09	0,07	-0,66	2,70	2,04
70	-0,05	0,18	0,13	-1,41	5,02	3,61
80	-0,12	0,38	0,26	-3,26	10,50	7,24

Необхідно відзначити, що похибки, наведені на рис. 1, 2, та в табл. 1, 2, зумовлені не лише рефракційними ефектами. Ці похибки враховують також вплив звичайної для геодезичної практики заміни квадратного кореня в формулі для коефіцієнта заломлення іоносфери на лінійну функцію електронної концентрації. Саме тому для напрямку в зеніт отримані відмінні від нуля значення похибки (очевидно, що при  $z_0 = 0$  залишається лише складова похибки двочастотного метода, яка зумовлена заміною  $\sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}$  на  $1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$ ; при  $z_0 > 0$  розраховані значення похибок визначаються спільним впливом вказаної заміни та рефракції).

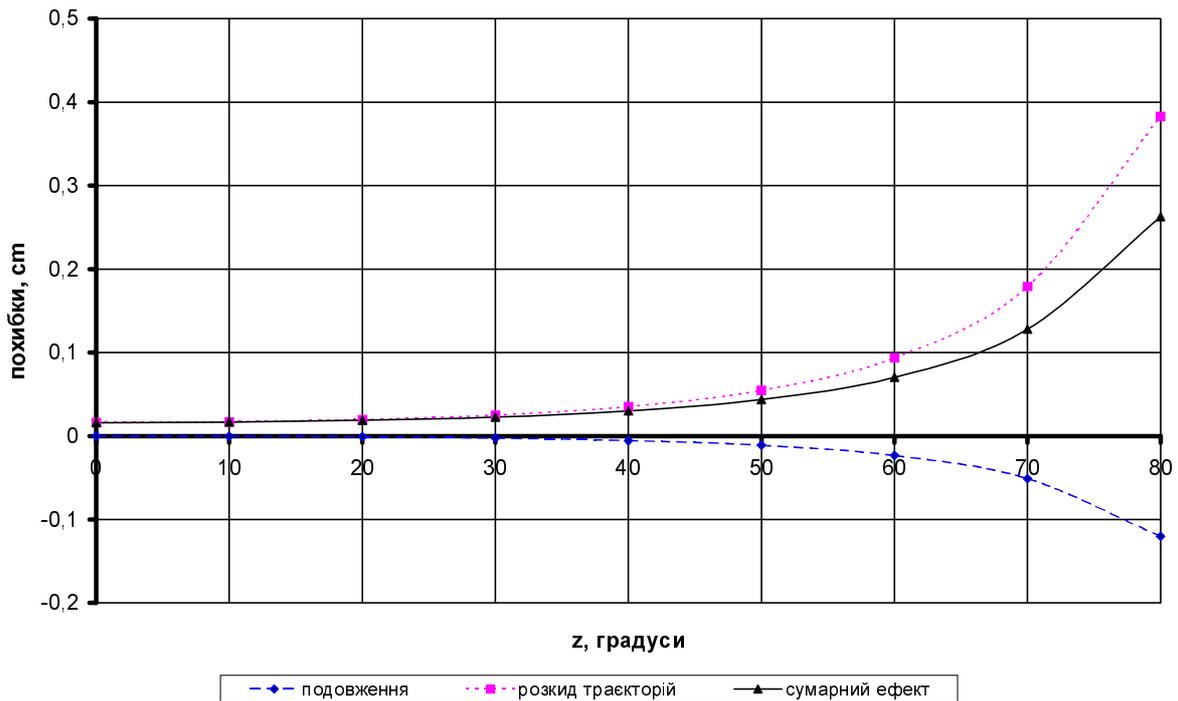


Рис. 2. Рефракційні похибки двочастотного методу для  $Nm=10^6 \text{ см}^{-3}$ ,  $f1=1227,46 \text{ МГц}$ ,  $f2=1575,60 \text{ МГц}$

Таблиця 2

$f1=1561,098$     $f2=1589,742$

$z_0$ , град.	Параметри: $Nm=10^6 \text{ см}^{-3}$ , $h_1=325$ , $h_2=32.5$			Параметри: $Nm=5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , $h_1=400$ , $h_2=40$		
	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см
1	2	3	4	5	6	7
0	0,00	0,01	0,01	0,00	0,30	0,30
10	0,00	0,01	0,01	0,00	0,31	0,31
20	0,00	0,01	0,01	-0,01	0,36	0,35
30	0,00	0,01	0,01	-0,03	0,45	0,42
40	0,00	0,02	0,02	-0,06	0,61	0,55

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
50	0,00	0,03	0,03	-0,12	0,91	0,78
60	-0,01	0,05	0,04	-0,25	1,49	1,24
70	-0,02	0,10	0,08	-0,54	2,73	2,19
80	-0,05	0,21	0,16	-1,25	5,64	4,39

$$f1=1256,244 \quad f2=1561,098$$

$z_0$ , град.	Параметри: $Nm=10^6 \text{ cm}^{-3}$ , $h_1=325$ , $h_2=32.5$			Параметри: $Nm=5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ , $h_1=400$ , $h_2=40$		
	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см
0	0,00	0,02	0,02	0,00	0,48	0,48
10	0,00	0,02	0,02	-0,01	0,50	0,50
20	0,00	0,02	0,02	-0,03	0,58	0,56
30	0,00	0,02	0,02	-0,06	0,73	0,67
40	0,00	0,03	0,03	-0,14	1,02	0,88
50	-0,01	0,05	0,04	-0,29	1,55	1,26
60	-0,02	0,09	0,07	-0,60	2,59	1,99
70	-0,05	0,17	0,12	-1,28	4,80	3,51
80	-0,11	0,36	0,25	-2,97	10,01	7,04

$$f1=1256,244 \quad f2=1589,742$$

$z_0$ , град.	Параметри: $Nm=10^6 \text{ cm}^{-3}$ , $h_1=325$ , $h_2=32.5$			Параметри: $Nm=5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ , $h_1=400$ , $h_2=40$		
	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см	Подовження, см	Рефракційний розкид, см	Сумарний ефект, см
0	0,00	0,02	0,02	0,00	0,46	0,46
10	0,00	0,02	0,02	-0,01	0,49	0,48
20	0,00	0,02	0,02	-0,03	0,56	0,54
30	0,00	0,02	0,02	-0,06	0,71	0,65
40	0,00	0,03	0,03	-0,14	0,99	0,85
50	-0,01	0,05	0,04	-0,29	1,50	1,21
60	-0,02	0,09	0,07	-0,60	2,52	1,92
70	-0,05	0,17	0,12	-1,28	4,67	3,39
80	-0,11	0,36	0,25	-2,97	9,76	6,79

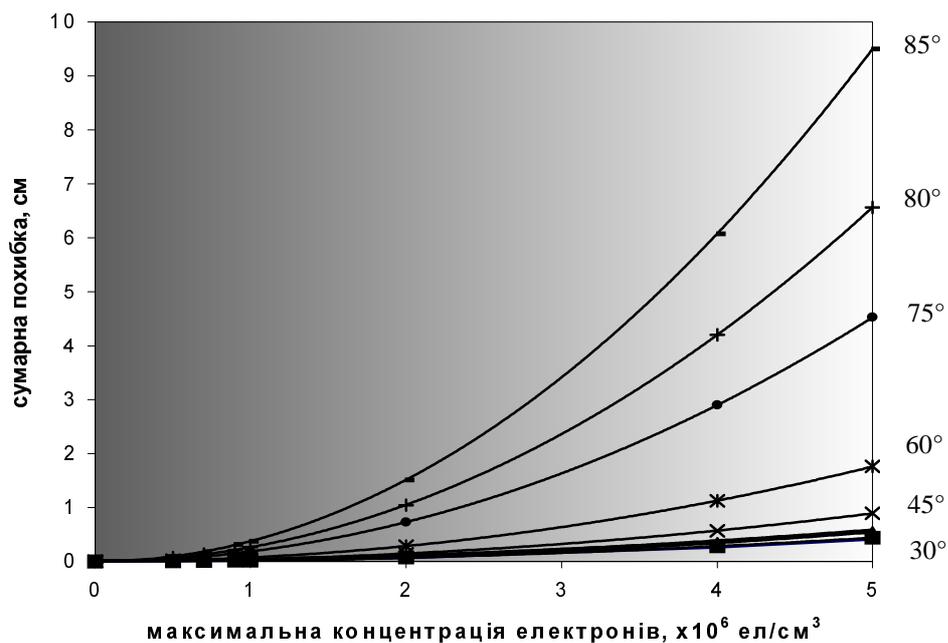


Рис. 3. Залежність сумарної похибки від концентрації електронів на різних зенітних кутах

Як і очікувалося, рефракційні ефекти другого порядку в моделях іоносфери виявилися пропорційними квадрату електронної концентрації. На рис. 3 показані криві, які ілюструють цей висновок. Відтінками сірого на графіку умовно позначені зони, які можуть відповідати денній та нічній іоносфері. Отже, приймаючи до уваги періодичну зміну (добовий хід) максимуму електронної концентрації, можна цілком обґрунтовано припустити, що виявлені в багатьох експериментах періодичні варіації координат геодезичних пунктів пов'язані з залишковими рефракційними похибками двочастотного методу. Для перевірки даного припущення слід провести розрахунки залишкових похибок фазового варіанта двочастотного методу з використанням розглянутої в цій роботі моделі та кількісних даних про параметри іоносфери під час виконання геодезичних вимірювань.

1. Krynsk, J., Zanimonskiy Y., Wielgosz P. *Potentiality of GPS as a Tool for Short Term Geodynamics, Presented at the XXVI General Assembly of European Geophysical Society 2001, Nice, France, 24 – 31 March 2001.* 2. Прокопов А.В., Ремаев Е.В. *Рефракционные ограничения точности двухволновой спутниковой лазерной дальнометрии // Укр. метрол. журнал. – 2000. – Вып. 2. – С. 5 – 9.* 3. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. *Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, – 1983. – 224 с.*