УДК 62-50

Мотильов К.І., Пасльон В.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРИ НА РАДІОТЕХНІЧНІ МЕТОДИ ВИМІРУ КООРДИНАТ

Як відомо, атмосфера впливає на проходження радіохвиль, послабляючи сигнал і змінюючи напрямок його поширення. При визначенні координат космічного об'єкта за допомогою наземних вимірювальних засобів (радіолокаційні та кінотеодолітні станції) виникають похибки результату з-за проходження радіохвиль через шари атмосфери з різними характеристиками. Дана робота присвячена підвищенню точності визначення координат космічного об'єкта шляхом обліку впливу метеорологічних параметрів атмосфери Землі на поширення радіохвиль.

Ключові слова: *метеорологічні параметри атмосфери, точність координат космічного об'єкта.*

Как известно, атмосфера влияет на прохождение радиоволн, ослабляя сигнал и меняя направление его распространения. При определении координат космического объекта с помощью наземных измерительных средств (радиолокационные и кинотеодолитные станции) возникают погрешности результата из-за прохождения радиоволн через слои атмосферы с различными характеристиками. Данная работа посвящена повышению точности определения координат космического объекта путем учета влияния метеорологических параметров атмосферы Земли на распространение радиоволн.

Ключеввые слова: *метеорологические параметры атмосферы, точность координат технического обьекта.*

As known, Earth atmosphere influences the radio wave passing attenuating a signal and changing the direction of its propagation. Errors appear by definition the spacecraft's coordinates with help of ground-based instruments (radar and cine-theodolite set) because of radio waves' passing through atmospheric layers with different characteristics. Current paper is dedicated to the enhancement of spacecraft's coordinates accuracy definition by accounting Earth atmosphere's meteorological parameters at the radio wave propagation.

Key words: *meteorological parameters of atmosphere, exactness of coordinates of technical object.*

Неоднорідність електричних параметрів земної атмосфери, обумовлена наявністю нейтральних газів, опадів і вільних зарядів, сильно ускладнює процес поширення радіохвиль. Це викликає ряд специфічних ефектів [4]:

- зменшення швидкості поширення хвилі в порівнянні з вакуумом [2];
- скривлення траєкторії хвилі (явище рефракції) [2, 4];
- деполяризація радіохвиль [4];
- поглинання електромагнітної енергії в опадах та іонізованих шарах атмосфери [4];

– перевипромінювання електромагнітної енергії неоднородностями в тропосфері та іоносфері [4];
– випадковими змінами (флуктуаціями) параметрів хвилі, обумовленими турбулентністю атмосферного повітря [2].

Затухання сигналу в атмосфері різко зростає зі зменшенням довжини хвилі та призводить до зниження дальності дії апаратури. Для радіохвиль довших за 10 см затухання незначно мале та їм можна зневажити [1, 2].

Усі ці явища впливають на електронні методи виміру відстані, але ступінь цього впливу різний. Особливо сильний вплив спричиняє тропосфера (12 ± 6 км), де найбільш інтенсивні циркуляції повітряних мас і зміна погоди. Тропосфера являє собою суміш газів, водяної пари й аерозолю (зважених твердих і рідких часток, щільність і склад яких змінюються в часі та просторі). Стан і властивості тропосфери, головним чином, визначаються трьома факторами: тиском повітря, його температурою та вологістю. Усі ці параметри зменшуються зі збільшенням висоти. Внаслідок зниження тиску знижується щільність повітря.

При вимірюванні первинних координат космічних апаратів (КА) найбільш істотними є помилки, викликані явищем рефракції і зменшенням швидкості поширення хвилі порівняно з вакуумом.

У цілому атмосфера являє собою механічну суміш різних газів. До висоти 60-80 км атмосфера знаходиться в перемішаному стані з практично постійним складом. Тут виконуються закони локальної термодинамічної рівноваги. Вище ці закони порушуються. Атмосферний тиск змінюється з висотою непрямолінійно, а по експоненті.

Границі атмосфери зручно розділити відповідно до температури, що змінюється з висотою нелінійно. Температурний графік атмосфери поділяється на 5 сфер (рис. 1) [6].

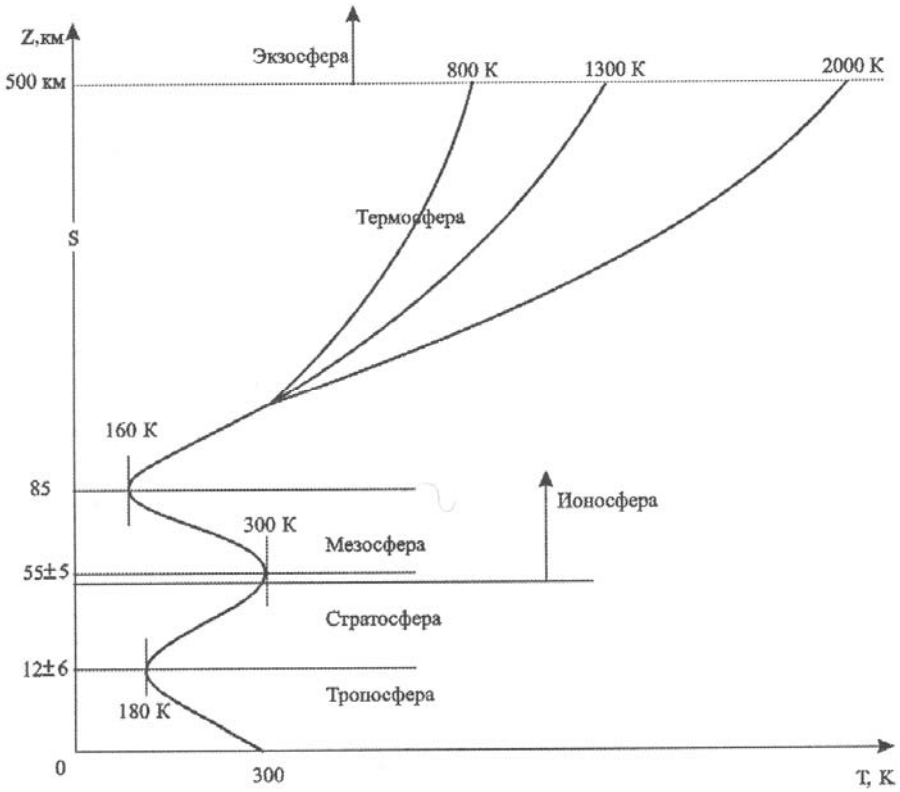

Рис. 1. Розподіл температури в атмосфері Землі по висоті

Як можна побачити на рисунку, температурний графік атмосфери поділяється на 5 сфер:
– тропосфера (12 ± 6 км);
– стратосфера (12 ± 6 км – 55 ± 5 км);
– мезосфера (55 ± 5 км – 85 км);

– термосфера (85 км – 500 км);
– екзосфера (> 500 км).

Варто зазначити, що основна маса атмосфери (99 %) зосереджена до висоти 50 км. Отже, цю висоту можна вважати початком космічного простору.

Поблизу земної поверхні температура знижується зі збільшенням висоти, тому що в цієї області повітря нагрівається від нагрітої Сонцем Землі. Звичайно температура знижується на 5÷6 °С на 1 км. На висотах порядку 15 км починається підвищення температури, досягаючи максимуму (300 К) на висоті 50 ÷ 60 км. Потім температура знову знижується до висоти порядку 85 км і після цього другого мінімуму плавно зростає.

Зростання температури з висотою в області іоносфери обумовлюється тим, що нагрівання повітря тут відбувається безпосередньо через випромінювання Сонця. Максимум у кривої розподіли температури на висотах 50 ÷ 60 км пояснюється присутністю озону на цій висоті. Озон інтенсивно поглинає ультрафіолетове випромінювання Сонця в діапазоні близько 0,2 км і призводить до підвищення температури в цієї частині атмосфери [5].

Щільність атмосфери характеризується числом молекул, що містяться в одному кубічному сантиметрі повітря, і зв'язана з тиском і температурою. Щільність атмосфери на конкретній висоті пропорційна тиску вищого шару атмосфери, тому щільність при постійній температурі розподілена за висотою так само, як атмосферний тиск. У дійсності ж температура і склад повітря міняється з висотою, що призводить до відхилення в розподілі тиску і щільності за висотою [4].

Вологість повітря, яка обумовлена випаром води, характеризується змістом водяної пари в атмосфері. Вона знижується зі зростанням температури та висоти, а також з посиленням пересування повітряних мас. Тиск водяної пари зв'язано складною залежністю зі зміною температури. Однорідність поля тиску порушується разом з однорідністю температурного поля.

Тиск, температура та щільність атмосфери зв'язуються у функціональну залежність статистичним наближенням, що виконується при аналізі середнього стану атмосфери й стану на основі рівнянь статики атмосфери та стану ідеального газу. Для побудови вертикального профілю цих величин досить задати вертикальний розподіл температури й тиску повітря на рівні моря й у будь-якій точці на висоті [6].

На основі такого підходу розроблено стандартну атмосферу, що використовується при проектуванні літальних і космічних апаратів. Цей стандарт встановлює значення найважливіших характеристик атмосфери відповідно до висоти. Такими характеристиками є [6]: температура, тиск, щільність, швидкість звуку, теплопровідність, висота однорідної атмосфери, концентрація, середня швидкість і середня довжина вільного пробігу часток.

Одним із найважливіших параметрів атмосфери, що впливають на поширення в ній електромагнітних хвиль (ЕМХ), є діелектрична проникність ε. Значення метеорологічних елементів (температура T, вологість ω й тиск P), від який залежить діелектрична проникність тропосфери, зазнають просторові й часові зміни. Отже, і величина ε змінюється в просторі й у часі.

Існують як регулярні просторово-часові зміни ε, які обумовлені визначеними закономірностями зміни метеорологічних елементів, так і нерегулярні зміни, викликані виникненням шаруватих утворень у тропосфері й турбулентному русі повітря [4]. Найбільш помітні регулярні зміни ε відбуваються зі зміною висоти h над поверхнею Землі.

Для кількісного опису явищ, що виникають при поширенні ЕМХ у неоднорідній земній атмосфері, необхідно точно знати закономірності просторово-часових змін її електричних характеристик.

Ключовим параметром атмосфери для обчислення скривлення траєкторії ЕМХ є її коефіцієнт заломлення. У тропосфері він не залежить від частоти для хвиль більших 1 см. Хвилі міліметрового діапазону зазнають значних втрат, що враховується шляхом введення комплексної діелектричної проникності повітря.

Замість показника заломлення $n \approx \sqrt{\varepsilon}$ зручно скористатися величиною $N = (n-1) \cdot 10^6$, яка називається індексом заломлення. Індекс заломлення показує, на скільки мільйонних часток показник заломлення більше одиниці [1, 2].

У середньому значення ***N*** змінюється з висотою лінійно, причому для середніх широт градієнт зміни ***N*** з висотою складає [5]:

$$dN/dh = -40 \ \ од/км .$$

Умови, при яких ***N*** змінюється за таким законом, відповідають так званій нормальній тропосфері.

У реальних умовах часто спостерігається нерегулярна зміна метеорологічних параметрів, що призводить до складної залежності ***N*** від висоти. Так, наприклад, на границях хмар спостерігаються різкі стрибки коефіцієнта заломлення через різку зміну температури й вологості повітря всередині хмари. Також у межах хмари спостерігаються значні градієнти індексу заломлення, що досягають 1-3 ***N***-одиниць/м. Найбільші перепади коефіцієнта заломлення на границях хмар (40 ***N***-одиниць та більше) спостерігаються влітку через вплив вологості при доданих температурах [4].

Відмінність коефіцієнта заломлення тропосфери від одиниці та зміна його з висотою істотно впливають на поширення радіохвиль, особливо в діапазоні ультракоротких хвиль (УКХ) [5].

При проходженні хвилі в неоднорідному середовищі (тропосфері та іоносфері Землі) її траєкторія скривлюється. Це явище має назву рефракції.

Вплив рефракції на поширення радіохвиль необхідно враховувати при порівняно протяжних трасах, наприклад при визначенні відстані прямої видимості з урахуванням рефракції.

При визначенні кутових координат космічного об’єкта радіотехнічними методами напрямок приходу відбитої від об’єкта хвилі не збігається з дійсним напрямком на об’єкт внаслідок рефракції. Кут приходу хвилі залежить від стану тропосфери та іоносфери. Визначають регулярні та випадкові зміни цього параметру. Для точного визначення кутових координат космічних об’єктів радіотехнічними методами необхідно вносити поправки на рефракційні помилки. Ці поправки визначаються теоретичним шляхом. При цьому з достатнім ступенем точності можна вважати, що помилки, викликані рефракцією в тропосфері та іоносфері, підсумовуються [3].

Крім того, рефракційне скривлення траєкторії призводить до подовження вимірюваної відстані. Помилки у визначенні відстані до космічного об’єкта вносять як тропосфера, так і іоносфера. Дослідження [3] показують, що помилка у визначенні відстані мало залежить від закону зміни показника заломлення тропосфери й не залежить від робочої частоти. Кількісно помилка складає кілька десятків метрів.

Величина рефракційного подовження прямо залежить від радіуса кривизни траєкторії ЕМХ. Радіус кривизни траєкторії хвилі в тропосфері залежить тільки від швидкості зміни коефіцієнта заломлення з висотою [5], тобто

$$\rho = f\left(\frac{dn}{dh}\right).$$

Для спрощення розрахунків при обліку впливу тропосфери зручно звести поширення хвиль по криволінійній траєкторії до поширення хвиль по прямолінійній траєкторії. Таке спрощення досягається через введення поняття еквівалентного радіуса Землі.

При цьому картину поширення хвиль по криволінійній траєкторії поблизу реальної земної поверхні заміняють картиною поширення хвиль по прямолінійній траєкторії поблизу поверхні Землі зі зміненим радіусом $R_0' = R_{экв}$ (рис. 2) [5].

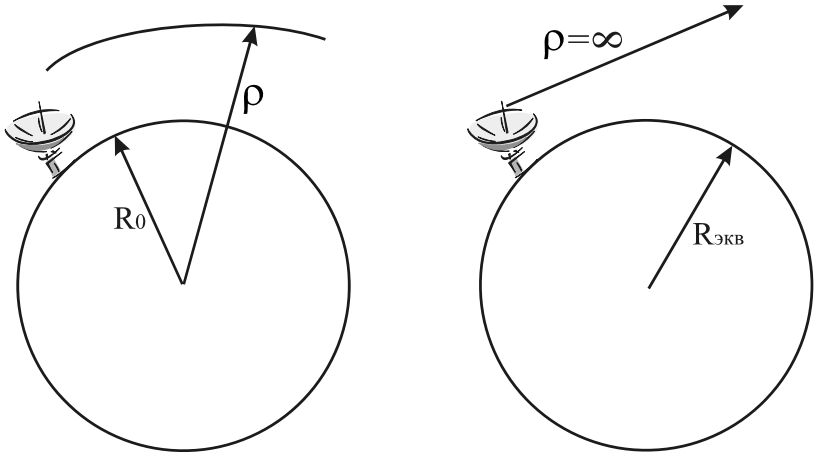

Рис. 2. Види рефракції

Відношення еквівалентного радіуса Землі до дійсного позначають через ***K*** і визначають таким чином [5]:

$$K = \frac{R_{екв}}{R_0} = \frac{dn}{dh}.$$

Якщо ***n*** міняється з висотою лінійно, то К = 4/3. Така рефракція називається нормальною тропосферною рефракцією.

На практиці часто зустрічаються випадки, коли показник заломлення атмосфери змінюється з висотою за законом, відмінному від випадку нормальної атмосферної рефракції.

Зниження показника заломлення з висотою відбувається не плавно: на окремих ділянках зниження ***n*** виявляється більш різким, на інших спостерігається зростання ***n*** з висотою.

Для дальнометрії становить інтерес величина подовження траєкторії ЕМХ, яка обумовлена рефракцією. Таким чином, дійсну відстань можна виразити в такий спосіб [1]:

$$D = D_{ізм} - \Delta D_r,$$

де $D_{ізм}$ – вимірювана відстань;

ΔD_r – величина рефракційного подовження.

Таким чином, облік впливу рефракції зводиться до визначення величини рефракційного подовження ΔD_r. Це подовження залежить від радіуса кривизни траєкторії ЕМХ.

У наближенні сферичної Землі радіус кривизни траєкторії з достатнім сиупенем точності визначається виразом [1]:

$$\rho = \frac{n}{\sin\alpha(\frac{dn}{dh})} = \frac{10^6}{\sin\alpha(\frac{dN}{dh})},$$

де n – показник заломлення середовища, який можна покласти рівним одиниці;

N – індекс заломлення середовища;

α – кут, під яким хвиля входить в атмосферу;

$\frac{dn}{dh}$ – градієнт індексу заломлення.

Звідси випливає, що радіус кривизни залежить не від показника заломлення, а від його градієнта і приблизно дорівнює його зворотній величині. Таким чином, задача про визначення радіуса кривизни траєкторії хвилі зводиться до задачі про визначення градієнта індексу заломлення середовища.

Реальна атмосфера – неоднорідне середовище, в якій значення метеоелементів змінюються від точки до точки. Отже, показник заломлення хвилі буде мінятися вздовж всієї траси. Тому прийнято використовувати середньоінтегральний (середній вздовж траси) показник заломлення. Для визначення середньоінтегрального показника заломлення необхідно знати

розподіл метеоелементів уздовж усієї траси поширення хвилі. Тобто, необхідно вимірювати температуру, тиск і вологість середовища в кожній точці траси (чи в достатньо великій кількості окремих точок). Практично такі виміри неможливі. Це призводить до того, що середньоінтегральний показник заломлення може бути визначений через виміри метеоелементів лише приблизно.

При розгляді моделей атмосфери найбільш спрощеною є лінійна модель, у якій градієнт індексу заломлення постійний і для радіохвиль становить ***– 40N*** од/км [1, 2]. Сталість градієнта означає, що радіус кривизни в будь-якій точці траєкторії однаковий, тобто траєкторія являє собою дугу окружності. Таким чином, при градієнті індексу заломлення ***– 40N*** од/км радіус кривизни траєкторії ЕМХ складе $\rho = 25000\ км$.

При обчисленні величини рефракційного подовження ΔD_r траєкторія хвилі вважається дугою окружності, а при необхідності обліку дійсної форми траєкторії за радіус цієї окружності приймається середній радіус кривизни. Розв'язавши дану задачу методами геометричної оптики, одержуємо вираз для визначення рефракційного подовження траєкторії ЕМХ [1, 2]:

$$\Delta D_r = \frac{D_{ізм}^3}{24\rho^2}.$$

На основі даного виразу можемо оцінити величину подовження траєкторії хвилі при вимірюванні різних відстаней (табл. 1):

Таблиця 1

Величини рефракційного подовження траєкторії ЕМХ

D, км	**Рефракційне подовження траєкторії ΔD_r, м**
300	1,80
400	4,27
600	14,43

При обліку впливу рефракції на кутомірні виміри варто розділяти вертикальну та бічну рефракцію. Мірою рефракції при кутових вимірах є кут ***ρ*** між дотичною ***AB´*** до променя в початковій його точці та хордою ***AB***, що з'єднує кінцеві точки променю (рис. 3). Вертикальною рефракцією називають проекцію кута ***ρ*** на вертикальну площину. Проекція кута ***ρ*** на горизонтальну площину називається бічною рефракцією [7].

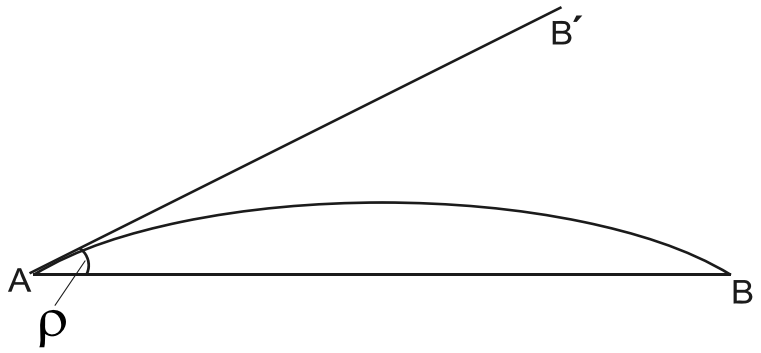

Рис. 3. Кутова рефракція

Різниця між величинами вертикальної і бічної рефракції складає 1-2 порядку. Величину і знак рефракції визначає вектор $\partial n/\partial N$ градієнта показника заломлення середовища в кожній точці. Оскільки зенітні відстані вимірюють у вертикальній площині, а напрямки й азимути – у горизонтальної, вектор градієнта $\partial n/\partial N$ розкладають на дві складові: $\partial n/\partial H$ у вертикальній та $\partial n/\partial x$ у горизонтальній площинах [7].

Таким чином, якщо обчислити значення помилки при середньому значенні кута рефракції $\rho = 10''$, то на відстані в 600 км похибка у визначенні координат космічного апарата складе близько 30 м. При визначенні координат космічних об'єктів на більш високих орбітах (800-1000 км) величина помилки зростає.

Описана вище методика обліку впливу атмосфери на точність радіотехнічних вимірювань справедлива для випадку нормальної рефракції, що має місце при звичайному стані атмосфери, що спостерігається частіше над усе. Розподіл індексу заломлення по висоті, що значно відрізняється від звичайного, називається аномальною рефракцією.

Розпізнати характер рефракції можна за експериментальними даними про розподіл індексу заломлення по висоті. Аномальна рефракція являє собою випадкове явище й не може бути врахована ніякою моделлю атмосфери. Як правило, таке явище виникає на обмежених ділянках і в обмежених висотних інтервалах, за винятком окремих випадків, що зустрічаються у визначених кліматичних зонах [1].

ЛІТЕРАТУРА

1. Большаков В.Д., Деймлих Д., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогеодезические и электрооптические измерения: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 303 с.
2. Воронков Н.Н., Плотников В.С., Калантаров Е.И. Геодезия. Геодезические и фотограмметрические приборы: Справочное пособие. – М.: Недра, 1991. – 429 с.
3. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. – М.: Высш. школа, 1967. – 244 с.
4. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Высш. школа, 1971. – 348 с.
5. Конспект лекций РРЛ. Радиорелейные и спутниковые системы передачи. http://rrl.newmail.ru/lek/contents.htm.
6. Санин Ф.П., Джур Е.А., Санин А.Ф., Хуторный В.В. Космос и технологии: Учебное пособие. – Д.: АРТ-ПРЕСС, 2007. – 456 с.
7. Яковлев Н. В. Высшая геодезия: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1989. – 445 с.

Рецензенти: д.т.н., проф. Бідюк П.І.,
д.т.н., проф. Казарєзов А.Я.

© Мотильов К.І., Пасльон В.В., 2009

Стаття надійшла до редакції 28.08.09