

ТЕОРІЯ ТУРБУЛЕНТНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ АНОМАЛЬНОЇ РЕФРАКЦІЇ ПРИ СТІЙКІЙ СТРАТИФІКАЦІЇ АТМОСФЕРИ

© Островська О.А., 2004

Рассматриваются аномальные рефракционные влияния на геодезические измерения в условиях динамически турбулентной атмосферы. Изложена теория предложенного флуктуационного метода определения аномальной вертикальной рефракции при устойчивой стратификации атмосферы.

Предполагаемая точность метода в 1.5 раза выше метода рефракционного базиса.

The influences of the anomalous refraction on geodetic measurements in conditions of dynamically turbulent atmosphere are considered. The theory of proposed fluctuation method of the determination anomalous vertical refraction by stable stratification of atmosphere is states. Supposed exactness of the method 1.5 times higher, then in the method of refraction basis.

Сучасний стан проблеми. Постановка задачі. В наш час розроблені методи визначення аномальної вертикальної рефракції за коливаннями фази, тобто за коливаннями візорних цілей при термічній турбулентності атмосфери. Це стало можливо тому, що коливання фази при турбулентності повітря викликані переважно коливаннями вертикальних градієнтів температури, які при термічній турбулентності відбуваються в границях від $\gamma_{an, min} = 0$ до $\gamma_{an, max}$, а середні аномальні градієнти рівні

$$\gamma_{an, sep} = \frac{\gamma_{an, max}}{2}. \quad (1)$$

Так само максимально флюктує аномальна вертикальна рефракція від $\sigma_{mix} = 0$ до σ_{max} . Тому середня аномальна рефракція

$$\delta_{an, sep} = \frac{\sigma_{max}}{2} \quad (2)$$

При стійкій стратифікації та інверсії температури флюктуації γ проходять за іншими, більш складними, не повністю вивченими законами. В результаті сучасна рефрактометрія ще не розробила турбулентних методів визначення та врахування рефракції при інверсії, яка має місце при стійкій стратифікації ввечері, вночі, зранку. Мета цієї статті – ліквідувати певною мірою цей недолік.

Теорія методу. Під час інверсії температури можлива тільки динамічна турбулентність, викликана вітровим режимом. Тільки сила вітру здатна вивести частинки повітря з рівноваги, підняти чи опустити їх. Однак, як тільки дія цієї сили зникає, частинка турбулентно з прискоренням рухається й займає початкове висотне положення. Тому така стратифікація, як відомо, називається стійкою. У відповідності з теорією турбулентності стійка стратифікація характеризується потоком тепла, що йде донизу, до землі, $Q < 0$, масштаб висоти $L^* > 0$, масштаб температури $T_* > 0$, параметр статичної стійкості більший нуля

$$\zeta = \frac{z}{L^*} > 0. \quad (3)$$

Отже, при будь-якій силі вітру у певному прошарку атмосфери будуть мати місце додатні аномальні градієнти температури i , при цьому, хоча й є коливання зображення візорних цілей, відсутні миттєві значення аномальних градієнтів, що дорівнюють нулю, як це буває при термічній турбулентності. При цьому градієнти змінюються, флюктують у межах від $\gamma_{an, min}$ до $\gamma_{an, max}$. Однак при інверсії $\gamma_{an, min} > 0$ хоча й зрозуміло, що

$$\gamma_{an, max} > \gamma_{an, min}.$$

Флюктують також і вертикальні рефракції. Тому для деякого i -го напряму можемо записати

$$\Delta\sigma_{an_i} = 8,132 \frac{P}{T^2} L_i \frac{\Delta\gamma_1}{h_{e_i}}. \quad (4)$$

У (4) $\Delta\sigma_{an_i}$ – вимірювані максимальні розмахи коливань вертикальної рефракції i -го напряму. Аналогічно $\Delta\gamma_1$ – максимальні розмахи коливання градієнтів температури на висоті 1 м на даному пункті; h_{e_i} – еквівалентна висота променя; P , T , L , відповідно тиск, температура, довжина траси.

Для деякого іншого напряму, що виходить із цього ж пункту, що й i -тий напрям, будемо мати

$$\Delta\sigma_{an_{i+1}} = 8,132 \frac{P}{T^2} L_{i+1} \frac{\Delta\gamma_1}{h_{e_{i+1}}}. \quad (5)$$

Введемо позначення постійних параметрів для короткого відрізку часу на даному пункті

$$8,132 \frac{P}{T^2} \Delta\gamma_1 = C - const. \quad (6)$$

Тоді виразам (4) та (5) надамо вигляду

$$\Delta\sigma_{an_i} = C \frac{L_i}{h_{e_i}}. \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{an_{i+1}} = C \frac{L_{i+1}}{h_{e_{i+1}}}. \quad (8)$$

Розділимо (8) на (7). Отримаємо

$$\frac{\Delta\sigma_{an_{i+1}}}{\Delta\sigma_{an_i}} = \frac{C \frac{L_{i+1}}{h_{e_{i+1}}}}{C \frac{L_i}{h_{e_i}}} = \frac{h_{e_i} \cdot L_{i+1}}{h_{e_{i+1}} \cdot L_i}. \quad (9)$$

Розв'яжемо рівняння (9) відносно $h_{e_{i+1}}$. В результаті матимемо

$$h_{e_{i+1}} = \frac{\Delta\sigma_{an_i} \cdot h_{e_i} \cdot L_{i+1}}{\Delta\sigma_{an_{i+1}} \cdot L_i}. \quad (10)$$

Формула (10) дозволяє визначити еквівалентну висоту $h_{e_{i+1}}$ напряму $i+1$ за вимірюваними максимальними розмахами коливань $\Delta\sigma_i$ та $\Delta\sigma_{i+1}$ та за відомими або вимірюваними на карті довжинами L_i та L_{i+1} за умови, що еквівалентна висота напряму i , тобто, h_{e_i} - відома (заздалегідь обчислена).

Надамо (10) узагальненого вигляду. Для цього i -тий напрям із відомим значенням h_{e_i} назовемо базисним і позначимо його h_{e_B} , а будь-який інший напрям назовемо i -тим. Тоді (10) набуде вигляду

$$h_{e_i} = \frac{\Delta\sigma_{an_B} \cdot h_{e_B} \cdot L_i}{\Delta\sigma_{an_i} \cdot L_B}. \quad (11)$$

Формула (11) базується на тому, що під час інверсії розмахи коливань візорних цілей залежні від вітрового режиму. Із збільшенням висоти сила вітру росте. Вітер вирівнює температуру повітря, тобто зменшує градієнти температури і, відповідно, аномальну рефракцію. Це дає можливість за коливаннями зображень візорних цілей визначати еквівалентні висоти. Проте, нас цікавлять не тільки еквівалентні висоти, що є проміжними невідомими, а вертикальна рефракція. Щоб знайти рефракцію деякого напряму, потрібно знати рефракцію базисного напряму. Скористуємося відомою формулою рефракційного базису [1]

$$\delta_{an_i} = \delta_{an_B} \cdot \frac{h_{e_B}}{h_{e_i}} \cdot \frac{L_i}{L_B}. \quad (12)$$

Перетворимо формулу (12) із врахуванням (11). Для цього спочатку перетворимо дріб $\frac{h_{e_B}}{h_{e_i}}$

$$\frac{h_{e_B}}{h_{e_i}} = \frac{h_{e_B}}{\frac{\Delta\sigma_{an_B} \cdot h_{e_B} \cdot L_i}{\Delta\sigma_{an_i} \cdot L_B}} = \frac{h_{e_B} \cdot \Delta\sigma_{an_B} \cdot L_i}{\Delta\sigma_{an_i} \cdot h_{e_B} \cdot L_i} = \frac{\Delta\sigma_{an_B}}{\Delta\sigma_{an_i}} \cdot \frac{L_i}{L_B}.$$

Підставивши нове значення відношення $\frac{h_{e_B}}{h_{e_i}}$ у формулу (12), маємо

$$\delta_{an_i} = \delta_{an_B} \cdot \frac{\Delta\sigma_{an_i}}{\Delta\sigma_{an_B}}. \quad (13)$$

Як видно з формули (13), для визначення аномальної рефракції будь-якого напряму потрібно знати аномальну рефракцію базисного напряму δ_{an_B} і виміряти вертикальні коливання зображень візорної цілі базисного та шуканого напрямів. Оскільки значення коливань зображень візорних цілей потрібно знати в один фізичний момент, то слід виконувати виміри коливань зображень у такій послідовності:

- виміряти (наприклад окулярним мікрометром або за допомогою бісектора сітки ниток труби) коливання базисної візорної цілі (4-6 разів);
- те ж саме, але шуканого напряму (4-6 разів);
- виконати вимірювання зенітних кутів при КЛ та КП шуканого та базисного напрямків, наприклад, двома прийомами;
- повторити виміри коливань шуканого напряму (4-6 разів);
- повторити виміри коливань базисного напряму (4-6 разів).

Перераховані дії слід вважати половиною програми вимірювань. Друга половина ідентична. Тоді середнє значення коливань базисної візорної цілі та візорної цілі шуканого напряму, а також виміри зенітних кутів будуть віднесені в кожній половині програми практично до одного фізичного моменту, оскільки виміри

зенітних кутів виконувались в середині відрізу часу, в якому спочатку і в кінці вимірювались коливання зображення.

Якщо з даного пункту виходить кілька напрямів, то можна рекомендувати паралельно виконувати виміри коливань зображення та зенітних кутів:

- при КЛ, прямий хід, спочатку виконуються виміри коливань зображення і зразу ж зенітних кутів напрямів базисного, першого, другого, ..., i -того;

- при КП, зворотний хід, спочатку виконуються виміри зенітних кутів і зразу ж коливань зображення напрямів: i -того, ..., другого, першого, базисного. При такій послідовності дій знову вимірювання кутів та коливань за усіма напрямами будуть практично в один фізичний момент. Перераховані дії слід вважати одним прийомом. Необхідно виконати 3-4 прийоми.

Введення поправок за рефракцію може бути виконане як при проведенні польових вимірювань, так і під час камерального опрацювання результатів вимірювань.

Якщо виміри ведуться за допомогою теодоліта, оснащеного камерою ПЗЗ, тоді для визначення рефракції за формулою (13) достатньо, щоб комп'ютер видавав на монітор максимальні розмахи коливань зображень (подвійні максимальні амплітуди) – $\Delta\sigma_{an}$.

Залишається вияснити питання визначення аномальної рефракції базисного напряму δ_{an} . Якщо відомий теоретичний кут базисного напряму z_T (відомі висоти кінців базису з геометричного нівелювання) та вимірювано зенітний кут z_a , то вертикальна рефракція знайдеться за відомою формулою

$$\delta_{cep} = z_T - z_a. \quad (14)$$

Далі скористуємося формулою визначення рефракції при інверсії температури, яка включає нормальну (перший член в правій частині) та аномальну частину рефракції (другий член) [1]

$$\delta_{cep} = 0,198 \frac{P}{T^2} L + 8,132 \frac{P}{T^2} \cdot L \cdot \gamma_{an, ek, cep}. \quad (15)$$

Запишемо цю формулу скороцено

$$\delta_{cep_{th}} = \delta_n + \delta_{an}.$$

Розв'яжемо (16) відносно δ_{an} та врахуємо (14). Тоді отримаємо

$$\delta_{an} = \delta_{cep} - \delta_n = (z_T - z_a) - \delta_n.$$

Як бачимо з (17), для визначення аномальної частини рефракції базисного напряму достатньо від різниці z_T та z_a відняти нормальну рефракцію, яка дорівнює першому члену формули (15). Для визначення δ_n достатньо знати тиск P з похибкою до 2 гПа та температуру T з похибкою до 2° К.

Висновки. Відзначимо найважливішу перевагу турбулентного методу визначення рефракції під час динамічної турбулентності перед методом модернізованого рефракційного базису (коли степінь еквівалентної висоти приймається рівною одиниці).

У методі рефракційного базису еквівалентна висота визначається з карти. При цьому враховується тільки геометрія профілю траси і не враховується різномірність підстилаючих поверхонь. Остання, як відомо, вносить суттєві зміни рефракції.

У турбулентному методі, коли еквівалентні висоти визначаються за коливаннями зображень, які несуть інтегральну інформацію про стан повітря на всій довжині траси, автоматично враховується як геометрія профілю траси, так і дія характеру підстилаючої поверхні.

Ця перевага забезпечує підвищення точності турбулентного методу перед методом рефракційного базису приблизно в 1,4-1,5 раза.

Головним недоліком методу є необхідність знати теоретичну зенітну віддалю хоча б в одному напрямі.

Проте:

1). Оскільки для визначення теоретичної зенітної віддалі (кута) не обов'язково виконувати геометричне нівелювання, а достатньо визначити рефракцію під час термічної турбулентності або під час нейтральної стратифікації. Тоді теоретична зенітна віддала знайдеться з виразу

$$z_T = z_a + \delta_{cep}.$$

Нагадаємо: при термічній турбулентності

$$\delta_{cep} = \delta_n - \delta_{an}.$$

- 2). Визначити теоретичну зенітну віддаль (зенітний кут) можна одночасно із запланованим тригонометричним нівелюванням до або після цього;
- 3). На об'єкті робіт практично завжди є пункти, висоти яких визначені з геометричного нівелювання I, II, III, IV класів.

Сказане суттєво зменшує цей недолік.

1. Островский А.Л., Джуман Б.М., Заблоцкий Ф.Д., Кравцов Н.И. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения. М. - Недра, 1990. - 231 с.