

А. Л. ОСТРОВСКИЙ, М. Б. ПУЗАНОВ

О ТОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МЕТОДА УЧЕТА АТМОСФЕРНЫХ ВЛИЯНИЙ НА СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Реальная атмосфера неоднородна и в каждой ее точке значения температуры T , давления P и влажности e различны. Следовательно, показатель преломления, а значит, и скорость распространения ЭМВ меняется вдоль трассы. При вычислении расстояния необходимо знать рабочую скорость $\bar{v}$ ЭМВ на трассе:

$$\bar{v} = c_0 / \bar{n}, \quad (1)$$

где c_0 — известная с высокой степенью точности скорость ЭМВ в вакууме; $\bar{n}$ — среднеинтегральный показатель преломления воздуха на трассе.

Таким образом, задача определения $\bar{v}$ сводится к отысканию $\bar{n}$. Очевидно, что погрешности определения $\bar{n}$ зависят в основном от различия средней высоты прохождения света над подстилающей поверхностью и средней высоты точек измерения метеопараметров T , P и e .

В СССР и за рубежом при высокоточных светодаальномерных измерениях применяется (см. например [1]) геодезический метод определения $\bar{n}$. В этом методе среднеинтегральный показатель преломления определяется по измеренным зенитным расстояниям и среднеинтегральному коэффициенту рефракции $\bar{k}$. Позже появились модификации геодезического метода. Одна из таких модификаций описана в [2].

Если геодезический метод достаточно изучен, то модернизированный геодезический метод содержит ряд окончательно не решенных вопросов. Это касается выбора наиболее подходящей модели изменения n с высотой и, прежде всего, установление показателя степени, с которой эквивалентная высота распространения луча входит в основные формулы в зависимости от стратификации атмосферы. Немалый интерес представляет так-

же точность модифицированного метода. Настоящая статья посвящена именно этим вопросам.

Рассмотрим вначале узловые формулы метода.

На основании теории рефракции достаточно точно можно записать

$$(d\bar{n}/dh = -\bar{k}/R_3), \quad (2)$$

где $d\bar{n}/dh$ — интегральный вертикальный градиент показателя преломления; R_3 — радиус Земли.

Согласно [3], коэффициент рефракции можно представить формулой

$$\bar{k} = k_n + \frac{\alpha \cdot c}{h}. \quad (3)$$

Как видим, в (3) показатель степени средней эквивалентной высоты h светового луча над подстилающей поверхностью принят равным единице.

В реальной атмосфере в зависимости от стратификации температуры воздуха показатель степени h отличен от единицы.

Исходя из этого, придадим (3) более строгий вид:

$$\bar{k} = k_n + \frac{\alpha \cdot c}{h^b}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4)

$$h^b = \frac{2 \cdot h_{91}^b \cdot h_{92}^b}{h_{91}^b + h_{92}^b}; \quad (5)$$

$$\alpha = 502,4 \cdot P/T^2; \quad (6)$$

$$k_n = 12,259 \cdot P/T^2, \quad (7)$$

где k_n — коэффициент рефракции при равновесной атмосфере; c — аномальная часть градиента температуры на высоте 1 м над подстилающей поверхностью; h_{91} и h_{92} — эквивалентные высоты по линиям 1—2 и 2—1; b — искомый показатель степени эквивалентных высот; P — давление в ГПа; T — абсолютная температура воздуха.

Из (4) определим аномальную часть градиента

$$c = (\bar{k} - k_n) \cdot \frac{h^b}{\alpha}. \quad (8)$$

По метеорологическим данным, измеренным на концах определяемой линии, можно вычислить средний показатель преломления

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2}, \quad (9)$$

который относится к высоте h_0 , равной полусумме высот приемоопередатчика i_1 и отражателя i_2 над подстилающей поверхностью:

$$h_0 = \frac{i_1 + i_2}{2}. \quad (10)$$

Для перехода от n (на высоте h_0) к $\bar{n}$ (на средней высоте светового луча без учета его кривизны h_{cp}) нужно использовать формулу

$$\bar{n} = n + \delta n = n + \Delta n - \Delta n_P, \quad (11)$$

где

$$\Delta n = \int_{h_0}^{h_{cp}} \frac{dn}{dh} \cdot dh. \quad (12)$$

Формулу (12) с учетом (2) и (4) запишем так:

$$\Delta n = -\frac{1}{R_3} \int_{h_0}^{h_{cp}} \left(k_n + \frac{\alpha \cdot c}{h^b} \right) dh. \quad (13)$$

Формула (12) дает суммарное изменение показателя преломления воздуха с переходом от h_0 к h_{cp} , вызываемое изменением давления, температуры и упругости водяных паров с высотой. Однако при определении n уже учтено изменение давления с высотой. При этом принято, что изменение давления в воздушном слое (от P_1 до P_2) происходит линейно. Учтенную составляющую — Δn_P найдем по известной формуле

$$\Delta n_P = 0,38 \cdot \Delta P \cdot 10^{-6}. \quad (14)$$

Запишем (14) в развернутом виде

$$\Delta n_P = 0,38 \frac{P_2 - P_1}{h'} \cdot (h_{cp} - h_0), \quad (15)$$

где h' — превышение между приемоопередатчиком и отражателем. После интегрирования (13) и перехода к десятичным логарифмам имеем

$$\Delta n = -\frac{1}{R_3} \left[k_n (h_{cp} - h_0) + \frac{\alpha \cdot c}{M} (\lg h_{cp} - \lg h_0) \right], \quad (16)$$

где M — модуль перехода, равный 0,43429.

Если светодальномерные измерения уже обработаны, т. е. учтено, что свет распространяется в атмосфере с показателем преломления n , то в уже исправленные линии необходимо ввести дополнительную поправку за переход от n к $\bar{n}$:

$$\Delta S_n = \delta n \cdot S. \quad (17)$$

Такова сущность модернизированного геодезического метода.

Для установления надежного значения показателя степени b эквивалентных высот h , мы воспользовались данными эталонного геодезического полигона [1]. Окончательные длины линий полигона, полученные после уравнивания линейной эталонной сети, приняты за истинные — $S_{ист}$. Известны также длины линий полигона $S_{испр}$ при рабочей скорости света $v=c_0/n$. Сле-

Т а б л и ц а 1

Вычисление поправок ΔS_{π_i} и вероятных длин линий $S_{вер}$

Номер линий	κ	α	$h_{\pi}^{5/6}$ м	c	$\delta N =$ $= \delta n \cdot 10^6$	$S_{испр}$, м	ΔS_{π} , мм	$S_{вер}$, м
III—II	0,179	5,59	124,3	0,956	—0,7	21233,040	—15	21233,025
III—IV	0,212	5,66	62,2	0,769	—0,4	10196,173	—4	10196,169
III—I	0,176	5,66	80,2	0,604	+0,2	15319,045	+3	15319,048
II—IV	0,138	5,64	83,4	0,627	+0,2	11062,057	+2	11062,059
II—I	0,154	5,58	60,3	0,367	—1,6	12617,424	—20	12617,404
VI—V	0,141	5,94	63,3	—0,043	—1,2	13712,197	—16	13712,181
VI—I	0,142	5,75	49,5	0,103	—0,4	8769,901	—4	8769,897
V—IV	0,100	5,56	67,6	—0,462	—3,0	10225,827	—31	10225,796
V—I	0,162	5,68	60,0	—0,058	—0,4	5973,328	—2	5973,326
IV—VII	0,131	5,54	79,7	1,702	—0,2	12173,045	—2	12173,043
IV—I	0,160	5,76	60,7	0,221	—2,5	12383,892	—31	12383,861
VII—I	0,190	5,67	54,4	0,556	—1,0	10940,504	—11	10640,463

довательно, разности ($S_{ист} - S_{испр}$) вызваны в основном отличием n от $\bar{n}$.

Таким образом, в линии $S_{испр}$ нужно ввести поправки ΔS_{π} , вычисленные по (17).

Условно назовем эти линии вероятными, т. е.

$$S_{вер} = S_{испр} + \Delta S_{\pi}. \quad (18)$$

Значения поправки ΔS_{π_i} для каждой линии различны в зависимости от того, какое значение показателя степени b принято в (8).

При вычислениях ΔS_{π_i} степень b имела значения: 2/3, 3/4, 5/6 и 1. В случае $b=5/6$ разности

$$\Delta_i = S_{ист} - S_{вер} \quad (19)$$

минимальны. Выполненный анализ показывает, что для ночных измерений наиболее подходящее значение показателя степени $b=5/6$.

Как известно из метеорологии, вертикальные градиенты температуры воздуха на некоторой высоте h можно найти по формуле

$$dT/dh = c \cdot h^{-2/3}. \quad (20)$$

Как видим, в метеорологии принята степень $b=2/3$, т. е. меньше единицы, что согласуется с нашими результатами.

В табл. 1 показан пример вычисления $\Delta S_{\text{в}}^{\text{в}}$ и $S_{\text{вер}}$, при $b=5/6$.

Оценим точность модернизированного геодезического метода учета атмосферных влияний на светодальномерные измерения.

Таблица 2

Сравнение истинных и вероятных длин линий

Номер линии	$S_{\text{вер}}, \text{ м}$	$S_{\text{ист}}, \text{ м}$	$\Delta, \text{ м}$
III—II	21233,025	21233,033	—0,008
III—IV	10196,169	10196,172	—0,003
III—I	15319,048	15319,046	+0,002
II—IV	11062,059	11062,067	—0,008
II—I	12617,404	12617,414	—0,010
IV—V	13712,181	13712,184	—0,003
V—I	8769,897	8769,903	—0,006
V—IV	10225,796	10225,807	—0,011
V—I	5973,326	5973,332	—0,006
IV—VII	12173,043	12173,033	+0,010
IV—I	12383,861	12383,876	—0,015
VII—I	10940,493	10940,500	—0,007

Оценку можно выполнить путем сравнения $S_{\text{вер}}$ и $S_{\text{ист}}$. Необходимые данные для такого сравнения приведены в табл. 2.

Найдем среднюю и среднюю квадратическую ошибки по формулам

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{[|\Delta|]}{12} = \pm 0,0074 \text{ м}; \quad (21)$$

$$m_{\Delta} = \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{12}} = \pm 0,0078 \text{ м}. \quad (22)$$

Средняя длина линии $S_{\text{ср}} = 12050,5 \text{ м}$.

$$\Delta_{\text{ср}}/S_{\text{ср}} = 1/1630 \text{ 000}; \quad (23)$$

$$m_{\Delta}/S_{\text{ср}} = 1/1540 \text{ 000}. \quad (24)$$

Из оценки точности видим, что модернизированный геодезический метод определения среднеинтегрального показателя преломления ЭМВ обеспечивает точность $0,6—0,8 \cdot 10^{-6}$ при средних высотах светового луча около 321 м. Такие высоты соответствуют горным и предгорным районам. При высотах светового луча 30...50 м, имеющих место во всхолмленных районах, точность метода порядка $1,0...1,5 \cdot 10^{-7}$.

1. Вировец Ю. Б., Наумов Я. В., Островский А. Л. Эталонный геодезический полигон в горном районе // Геодезия и картография. 1971. № 12. С. 13—19. 2. Джуман Б. М., Матящук Н. С., Островский А. Л. Новый метод

учета атмосферных влияний при светодальномерных измерениях // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1979. Вып. 30. С. 61—66. 3. *Пеллинен Л. П., Изотов А. А.* Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования // Тр. ЦНИИГАиК. 1955. Вып. 102. С. 156.

Статья поступила в редколлегию 10.02.89
