

Р. М. ТАРТАЧИНСКИЙ

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МОМЕНТОВ МИНИМАЛЬНЫХ РЕФРАКЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ УГЛОВ В СЕТЯХ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Повышение точности угловых измерений в государственных сетях триангуляции, полигонометрии и сетях местного значения — одна из основных задач улучшения качества сетей. Этот вопрос комплексный и требует разрешения многих проблем.

Среди атмосферных влияний наиболее существенной погрешностью является боковая рефракция, так как ее влияние имеет систематический характер и может заметно исказить результаты измерения углов. Исследования земной рефракции показали, что боковая рефракция имеет явно выраженный суточный ход, а изменение знака этого хода совпадает с наступлением периода изомермии атмосферы. Поэтому определение этого момента в периоды измерений — первая задача борьбы с влиянием рефракции.

В результате выполненных исследований в настоящее время выделены следующие методы определения моментов изотермии: по колебаниям изображений визирных целей; по вертикальному градиенту температуры, определяемому по вертикальной разности температуры у места стояния инструмента; по значению радиационного баланса, измеряемого на высоте инструмента; по отклонению измеренного зенитного расстояния от его теоретического значения.

Каждый из указанных методов, проверенный экспериментально в различных климатических и физико-географических районах страны, дает положительные результаты.

Зная момент наступления изотермии, можно так строить программу наблюдений углов, чтобы в значительной степени ослабить влияние рефракции. Первой такой программой является программа симметричных наблюдений углов, относительно моментов «нулевых рефракций», предложенная А. Л. Островским [3] и экспериментально проверенная [4, 5]. Результаты эксперимента положительные. Вторая — программа редуцирования измеренных значений углов на момент нулевых рефракций, предложенная Н. В. Яковлевым [7].

Как в первой, так и во второй программе моменты «нулевых рефракций» и моменты наступления изотермии совпадают; моменты изотермии определяются надежно по одному из вышеперечисленных методов; измерение рефракции подчиняется линейному закону.

При этих условиях как от первой, так и от второй программы можно ожидать почти полного исключения влияния рефракции. На самом деле определение изотермии по колебаниям визирных целей в значительной степени носит субъективный характер из-за целого ряда причин: опытность наблюдателя, неодновременность затухания колебаний по всем направлениям. Определение времени наступления изотермии по вертикальному градиенту температуры и радиационному балансу отображает реальную картину только в локальной области — у места стояния инструмента и не дает полного представления о стратификации атмосферы на всем протяжении визирного луча. Этот недостаток устранен в методе определения моментов нулевых рефракций, определяемых по отклонению измеренных зенитных расстояний от их теоретических значений [6]. Однако данный метод требует измерения зенитного расстояния и, что самое главное, знания отметок наблюдаемых пунктов.

При азимутальных определениях, измерении углов в ходах полигонометрии и специальных сетях триангуляции, где отметки пунктов можно получить заранее, эти недостатки не снижают достоинств метода.

Исследования по повышению точности тригонометрического нивелирования [1], выполняемого в периоды видимости, позволяют без дополнительных затрат определять моменты «минимальных искажений» как горизонтальных углов, так и измеряемых зенитных расстояний.

Сущность метода состоит в следующем. Пусть на каком-то пункте A в течение видимости поочередно производились измерения горизонтального угла между направлениями B и C и зенитных расстояний по направлениям AB и AC . В итоге получено m значений горизонтального угла и n значений зенитных расстояний по каждому направлению. Наиболее вероятными значениями горизонтального угла и зенитных расстояний будут те, которые выполнены в моменты минимальных рефракционных искажений.

Коэффициент вертикальной рефракции χ выражается зависимостью [2]

$$\chi = 668,7 \frac{B}{T^2} (0,0342 + a + \gamma) - 14,8 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

или

$$\chi = 2R\delta'' z / S\rho'', \quad (2)$$

где B — атмосферное давление; T — абсолютная температура; e — упругость водяных паров; a — нормальный градиент температуры; γ — аномальный вертикальный градиент температуры; S — длина линии визирования; R — средний радиус Земли; δz — угол частной вертикальной рефракции.

На основании (1) и (2) можно записать

$$\frac{61,7748}{S} \delta z'' = 668,7 \frac{B}{T^2} (0,0342 + a + \gamma) - 14,8 \frac{e}{T^2}. \quad (3)$$

По многочисленным исследованиям последний член выражения (3) мал и для практических целей не имеет существенного значения. Решая (3) относительно δz , получаем

$$\delta z = 10,82 \frac{BS}{T^2} (0,0342 + a + \gamma). \quad (4)$$

Зависимость между измеренным (z_n) и теоретическим (z_T) зенитными расстояниями выражаем соотношением

$$z_T = z_n + \delta z,$$

или

$$z_T = z_n + \delta_B + \delta_T, \quad (5)$$

где δ_B — составляющая вертикальной рефракции, обусловленная барическим градиентом; δ_T — составляющая вертикальной рефракции, обусловленная вертикальным градиентом температуры воздуха.

При этом

$$\delta_B = 0,370 \frac{BS}{T^2}, \quad \delta_T = 10,82 \frac{BS}{T^2} (a + \gamma). \quad (6)$$

Разность двух зенитных расстояний будет

$$z_{T_2} - z_{T_1} = z_{n_2} - z_{n_1} + \delta_{B_2} - \delta_{B_1} + \delta_{T_2} - \delta_{T_1}.$$

Подставляя в (7) значение (6), получаем

$$\Delta z_T = \Delta z_n + 0,370 \left(\frac{B_2 S_2}{T_2^2} - \frac{B_1 S_1}{T_1^2} \right) - 10,82 \cdot 0,0065 \left(\frac{B_2 S_2}{T_2^2} - \frac{B_1 S_1}{T_1^2} \right) + \\ + 10,82 \left(\frac{B_2 S_2}{T_2^2} \gamma_2 - \frac{B_1 S_1}{T_1^2} \gamma_1 \right). \quad (7)$$

В периоды спокойных изображений принимаем

$$B_2 \approx B_1 = B, \quad T_2 \approx T_1 = T, \quad \gamma_2 \approx \gamma_1 = 0. \quad (8)$$

Тогда

$$\Delta z_T = \Delta z_n + 0,370 \frac{B}{T^2} (S_2 - S_1) - 0,070 \frac{B}{T^2} (S_2 - S_1). \quad (9)$$

Полагая $B = 750$ мм и $T = 290^\circ$, запишем

$$\Delta z_T = \Delta z_n + 0,002 (S_2 - S_1), \quad (10)$$

т. е. разность двух измеренных зенитных расстояний в период спокойных изображений стремится к разности теоретических значений этих зенитных расстояний при $S_2 \rightarrow S_1$.

Второй член формулы (10) имеет ощутимое значение при разности расстояний около 1000 м, что практически не имеет места в малых сетях триангуляции и в большинстве случаев будет выполняться в больших одноклассных сетях.

Из этой же формулы следует, что минимальные рефракционные искажения наблюдаются тогда, когда разность двух измеренных зенитных расстояний минимальна. Измеренные в этот период горизонтальные углы и зенитные расстояния не содержат в себе заметных рефракционных искажений.

Для проверки изложенного использованы результаты одностороннего геодезического нивелирования при малых расстояниях между пунктами, приведенные в [2]. По этим материалам определяли разности между измеренными зенитными расстояниями (табл. 1).

Анализируя данные табл. 1, замечаем, что практически по всем направлениям минимальные разности измеренных зенитных расстояний наступают одновременно. Утром они наступают в конце хорошей видимости, а вечером — в начале хорошей видимости. Различия между минимальными разностями и смежными довольно ощутимы и происходят очень быстро. Минимальные утренние и вечерние значения разностей хорошо согласуются.

Аналогично были вычислены разности всех других зенитных расстояний за 28 июня в остальные дни измерений. Используя теоретические зенитные расстояния по каждому направлению, сравним минимальные средние разности зенитных расстояний (см. табл. 1) с вычисленными теоретическими разностями. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2, из которой следует, что сравниваемые разности очень хорошо согласуются между собой. Отметим, что точность измерения зенитных расстояний по данным

Разность измеренных зенитных расстояний
(ДНИИГАиК, 28 июня 1951 г.)

Время наблюдения	Кол.	4в-К	4н-К	3в-К	3н-К	2в-К	2н-К	1в-К	1н-К
5 ⁰⁷	4,5	49,2	16,3	7,4	-18,1	9,2	-3,4	27,9	42,2
5 ⁴⁴	4,5	47,5	15,7	7,5	-18,2	4,5	-4,9	17,9	32,5
6 ¹⁶	4,5	40,0	8,6	2,5	-23,3	0,2	-7,7	14,7	29,6
6 ⁴⁸	4,5	41,7	10,0	-0,2	-23,2	-5,5	-11,8	9,5	22,3
8 ⁴⁶	3	32,3	2,7	-7,0	-30,2	-11,1	-13,1	1,7	13,6
9 ²⁰	2	38,4	4,8	-2,7	-25,8	-5,8	-7,6	5,3	20,9
10 ³⁰	2	37,3	7,7	-2,4	-24,5	-7,6	-7,3	1,6	16,7
10 ⁵⁸	2	34,1	3,7	-2,9	-26,8	-8,5	-9,7	-2,1	13,8
11 ²²	2	35,5	6,7	- ,8	-22,5	-7,8	-8,9	-0,1	16,3
13 ⁰³	2	35,1	3,6	-1,9	-28,1	-7,2	-10,5	-1,2	14,9
13 ³³	2	36,0	5,2	-4,1	-27,8	-11,9	-11,3	-1,6	12,7
14 ⁰¹	2	37,5	8,0	0,5	-24,5	-6,2	-8,3	-1,8	14,1
15 ³⁴	3	37,2	3,6	-0,9	-24,4	-5,8	-9,1	2,6	16,5
15 ⁵⁸	3	38,5	8,2	0,3	-23,0	-3,7	-7,2	5,7	18,5
16 ²⁰	3	36,1	3,0	-3,2	-29,0	-8,9	-11,4	1,7	15,5
17 ⁴²	4	39,8	6,3	-0,7	-26,2	-5,8	-11,9	4,5	18,4
18 ⁰⁴	4,5	38,2	5,8	1,0	-25,2	-1,2	-8,9	9,8	21,1
18 ²⁵	4,5	38,3	10,1	0,3	-25,8	-4,2	-12,6	8,4	20,5
19 ⁴⁶	4,5	45,3	10,4	4,9	-22,2	2,1	-8,4	18,7	29,5
20 ⁰⁸	4,5	45,7	10,6	-4,5	-29,7	-0,1	-11,6	21,7	32,1
20 ⁵⁶	3,0	58,5	20,7	17,5	-21,6	9,3	-10,6	20,8	53,7

Таблица 2

Сопоставление разностей
теоретических и измеренных зенитных расстояний

Обозначение направления	ΔZ теоретическое	ΔZ измеренное	Разность	Обозначение направления	ΔZ теоретическое	ΔZ измеренное	Разность
К—4в	08'37,7"	08'34,2"	+3,5"	4н—2н	25'35,8"	25'40,0"	-4,2"
К—4н	12 02,6	12 02,8	-0,2	4н—1в	20 58,1	20 58,6	-0,5
К—3в	19 52,0	19 54,9	-2,9	4н—1н	33 12,6	33 11,5	+1,1
К—3н	24 26,1	24 30,4	-4,3	3в—3н	04 34,1	04 35,5	-1,4
К—2в	30 47,8	30 50,0	-2,2	3в—2в	10 55,8	10 54,5	+1,3
К—2н	37 38,4	37 47,5	-9,1	3в—2н	17 46,4	17 48,6	-2,2
К—1в	33 00,7	33 01,7	-1,0	3в—1в	13 08,7	13 07,3	+1,4
К—1н	44 15,2	44 14,6	+0,6	3в—1н	25 23,2	25 20,4	+2,8
4в—4н	03 24,9	03 27,4	-2,5	3н—2в	06 21,7	06 19,6	+2,1
4в—3в	11 14,3	11 18,8	-4,5	3н—2н	13 12,3	13 12,8	-0,5
4в—3н	15 48,4	15 54,6	-6,2	3н—1в	08 34,6	08 31,7	+2,9
4в—2в	22 10,1	22 13,6	-3,5	3н—1н	20 49,1	20 45,0	+4,1
4в—2н	29 00,7	29 07,4	-6,7	2в—2н	06 50,6	06 53,8	-3,2
4в—1в	24 23,0	24 26,2	-3,2	2в—1в	02 12,9	02 12,7	+0,2
4в—1н	36 37,5	36 39,6	-2,1	2в—1н	14 27,4	14 23,5	+3,9
4н—3в	07 49,4	07 51,4	-2,0	2н—1в	04 37,7	04 38,8	-1,1
4н—3н	12 23,5	12 27,2	-3,7	2н—1н	07 36,8	07 28,4	+8,4
4н—2в	18 45,2	18 46,2	-1,0	1в—1н	12 14,5	12 11,6	+3,9

[2] находится в пределах 1,4—2,5". Преобладание отрицательного знака в разностях свидетельствует об остаточном значении составляющей вертикальную рефракцию, обусловленной барическим градиентом. В табл. 2 неясны значения разностей, образованные с направлением 2 н, хотя, например, по разностям направлений К — 2 н и для других дней имеем 46,9, 48,1, 58,6, 53,3, 45,1, 49,6 при теоретической разности 38,4.

Рассмотрим теперь возможность использования времени наступления минимальных разностей измеренных зенитных расстояний для определения моментов минимальных искажений горизонтальных углов. С этой целью воспользуемся экспериментальными данными [6]. Благодаря наличию в них теоретических зенит-

ных расстояний, измеренных зенитных расстояний, горизонтальных углов и времени измерения нами найдены Δz_t , Δz_n , а по ним вычислены моменты минимальных рефракционных искажений горизонтальных углов. В соответствии с этим утреннее время наступления минимальных искажений: 6.56, 7.16, 7.17, 7.08; вечернее — 19.28, 18.52, 19.34. На основании приведенных данных все измеренные горизонтальные углы разделены на три группы, найдены средние значения углов в каждой группе и выполнена оценка точности измерения. Результаты измерений приведены в табл. 3.

Ход углов от инверсии к нормальному распределению указывает на наличие в измерениях боковой рефракции, а среднее значение из β_n и β_0 почти точно соответствует значению углов, измеренных при минимальных рефракционных искажениях.

Таким образом, предложенный метод позволяет без дополнительных затрат определять в периоды видимости моменты минимальных искажений горизонтальных углов и зенитных расстояний, а по результатам измерений в эти периоды получать наиболее вероятные угловые данные или строить программу измерений относительно этих моментов. Измерение зенитных расстояний в периоды спокойных изображений, как это предлагается в [1], значительно повышает качество тригонометрического нивелирования, а использование тех же измеренных зенитных расстояний для определения моментов минимальных искажений позволит повысить качество угловых измерений в сетях триангуляции.

Список литературы: 1. Джуман Б. М. К вопросу о выгоднейшем времени измерения зенитных расстояний в геодезическом нивелировании. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1965, вып. 1. 2. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — Тр. ЦНИИГАиК, 1955, вып. 102. 3. Островский А. Л. О суточном ходе угловых невязок треугольников, вызванном боковой рефракцией. — Научн. зап.

Таблица 3
Средние значения углов в группах

Инверсия		Минимальные искажения		Нормальное распределение	
β_n	n	β_0	n	β_n	n
56,02'	22	56,41"	7	56,84"	21
$m = \pm 1,47$		$m = \pm 0,89$		$m = \pm 1,66$	
$M = \pm 0,31$		$M = \pm 0,31$		$M = \pm 0,36$	

ЛПИ. Сер. геодезическая, 1962, вып. 82, № 7. 4. *Островский А. Л.* К вопросу программы угловых измерений при свето- и радиодальномерной полигонометрии. — Инженерная геодезия, 1964, № 1. 5. *Островский А. Л., Тартачинский Р. М.* Опыт применения программы угловых измерений, симметричной относительно моментов изотермии воздушных масс, в южном степном районе. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1965, вып. 3. 6. *Островский А. Л.* Геодезический метод построения симметричной программы наблюдения горизонтальных углов. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1967, вып. 6. 7. *Яковлев Н. В.* К теории и практике учета суточного хода рефракции при угловых измерениях и азимутальных определениях в геодезических сетях. — Геодезия и картография, 1967, № 8.

Статья поступила в редколлегию 14.12.83