

Б. М. ДЖУМАН, канд. техн. наук
Львовский политехнический институт

РЕДУЦИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕННЫХ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ НА ПЕРИОДЫ СПОКОЙНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ВЕРТИКАЛЬНЫМ КОЛЕБАНИЯМ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИЗИРНЫХ ЦЕЛЕЙ

Высокая точность тригонометрического нивелирования может быть достигнута при измерении зенитных расстояний в периоды спокойных изображений, т. е. при нейтральной термической стратификации в приземном слое воздуха [1]. Однако эти периоды, особенно в равнинных районах, где лучи визирования проходят низко над подстилающей поверхностью, могут быть незначительны. Это, естественно, сужает возможности применения данного метода.

Чтобы расширить продолжительность наблюдений в периоды спокойных изображений путем введения редукций в зенитные расстояния с использованием измеренных амплитуд колебаний изображений визирных целей в вертикальной плоскости, в августе 1973 г. на геодезическом полигоне Львовского политехнического института были выполнены экспериментальные наблюдения.

На пункте Б измеряли зенитные расстояния инструментом ОТ-02М с переносного штатива, температуру на двух высотах, скорость ветра, давление и максимальные амплитуды вертикальных колебаний изображений.

Температуру измеряли психрометром Асмана на высотах 1,5 и 5,0 м над подстилающей поверхностью, а давление и скорость ветра соответственно anerоидом и ручным анемометром

на высоте инструмента. Колебания изображений определяли тем же инструментом ОТ-02М с помощью вертикальной шкалы, нарезанной в плоскости центра сетки нитей. Причем отсчеты максимума и минимума колебаний верха визирной цели производили поочередно в течение одной минуты и в дальнейшем при обработке использовали максимальные колебания изображений.

Высоты инструментов и визирных целей измеряли стальной рулеткой с точностью 0,5 см. Зенитные расстояния и колебания изображений определяли по восьми направлениям. Визирными целями на точках 1, 2, 3 и 5 служили самодельные марки высотой до 2 м, а на пунктах триангуляции 4, Я, А и 6 — визирные цилиндры геодезических знаков. Расстояния от пункта Б до визирных целей колебались от 0,6 до 5,5 км.

Таблица 1

Эквивалентные высоты и длины линий с пункта Б

Показатель	Направление							
	1	2	3	4	5	Я	А	6
$h_{\text{э}}, \text{ м}$	5,0	2,5	9,0	11,1	9,1	29,0	34,5	18,0
$S, \text{ км}$	1,9	0,6	1,1	2,0	2,5	5,5	4,0	2,7

Визирные лучи по направлениям 1, 2, 3, 4, Я и 5 проходили над посевами и пашней, а по направлениям А и 6 — над сельскохозяйственными угодьями, населенным пунктом и озером. Эквивалентные высоты прохождения визирных лучей колебались от 2,5 до 35 м. Все измерения были выполнены в светлое время суток; в каждый четный час (по два приема наблюдений) и в периоды спокойных изображений (по два-три приема).

Абсолютные высоты пунктов и марок получены методом геометрического нивелирования 2 кл. Длины сторон измерены РДГВ по программе измерения базисных сторон 3 кл. Эквивалентные высоты вычислены для линий Б-1, Б-2, Б-3, Б-4 и Б-5 по материалам технического нивелирования, а для остальных линий — по картам. Эквивалентные высоты и длины линий приведены в табл. 1.

Рассмотрим зависимость амплитуды колебаний изображений от разности температур, измеренных на двух высотах. Для этого сначала выведем зависимость амплитуды от вертикального градиента температуры.

Интегральный коэффициент рефракции k запишем в следующем виде:

$$k = \frac{2}{S^2} \int_0^S \kappa(t) (S - l) dl, \quad (1)$$

где $\kappa(t)$ — точечный коэффициент рефракции (случайная функция времени).

Теперь, следуя работе [3], имеем

$$k = k_n + \frac{668,7 P}{T^2} \cdot \frac{c(t)}{h_s}. \quad (2)$$

Здесь k_n — коэффициент рефракции для нейтральной температурной стратификации в приземном слое, равный $+0,15$ [2]; $c(t)$ — аномальный градиент температуры на высоте 1 м над подстилающей поверхностью.

Вследствие флуктуаций аномального градиента температуры коэффициент рефракции в определенном промежутке t принимает экстремальные значения (в нашем случае $t=1$ мин). Тогда на основании формулы (2) получаем

$$k - \bar{k} = \frac{668,7 P}{T^2} \cdot \frac{c - \bar{c}}{h_s}, \quad (3)$$

где k — максимальное значение коэффициента рефракции за время t ; $\bar{k}$ — среднее значение коэффициента рефракции.

Выражая в формуле (3) коэффициенты рефракции через частные углы рефракции (соответственно ρ и $\bar{\rho}$), получаем максимальную полуамплитуду a колебаний изображений за отрезок времени t

$$a = \rho - \bar{\rho} = \frac{668,7 P}{T^2} \cdot \frac{\rho'' S}{2R_s} \cdot \frac{c - \bar{c}}{h_s}. \quad (4)$$

Как видим, амплитуда колебаний изображений зависит от флуктуаций аномального градиента температуры, длины S и эквивалентной высоты h_s визирного луча.

Для исследования этой зависимости по экспериментальным результатам восьми дней наблюдений были сгруппированы амплитуды колебаний изображений отдельно для каждого направления по интервалам разности температур через $0,1-0,2^\circ$. В обработку были взяты измерения только для неустойчивой температурной стратификации.

Из табл. 2 следует, что амплитуды колебаний изображений увеличиваются для всех линий нивелирования при увеличении градиента температуры. Кроме того, замечена их зависимость от длины линии и высоты визирного луча, что довольно хорошо согласуется с формулой (4).

Рассмотрим вопрос редуцирования измеренных зенитных расстояний при неустойчивой стратификации на периоды нейтральной стратификации (спокойных изображений). Заменяя в формуле (2) коэффициенты рефракции частными углами рефракции, получаем

$$\rho - \rho_n = \frac{668,7 P}{T^2} \cdot \frac{\rho'' S}{2R_s} \cdot \frac{c}{h_s}. \quad (5)$$

Подставляя теперь значение $\bar{c}$ из формулы (4) в (5) и заменяя $\rho - \rho_n = \bar{z} - z_n$, находим

$$z_n - \bar{z} = a - \frac{668,7 P}{T^2} \cdot \frac{\rho'' S}{2R_3} \cdot \frac{c}{h_3}, \quad (6)$$

где z — зенитные расстояния.

Из формулы (6) следует, что для редуцирования зенитных расстояний на периоды нейтральной стратификации нужно знать максимальную полуамплитуду колебаний изображений a и максимальный аномальный градиент температуры c .

Таблица 2

Зависимость амплитуды колебаний a от разности температур Δt , °C

Δt	Направление							
	1	2	3	4	Я	5	А	6
—0,1	6,2"	3,8"	2,4"	3,0"	3,5"	5,6"	3,2"	4,0"
—0,2	10,1	6,4	4,7	5,2	3,4	7,1	2,6	5,8
—0,3	14,0	9,0	7,0	7,4	3,3	8,6	2,1	7,6
—0,4	16,2	11,2	8,2	7,9	3,6	10,8	3,1	8,9
—0,6	19,3	13,7	10,6	9,6	4,5	14,3	3,8	11,1
—0,8	21,6	14,5	12,1	11,4	—	16,0	—	12,3
Среднее	14,6	9,8	7,5	7,4	3,7	10,4	3,0	8,3

Чтобы оценить второй член в правой части формулы (6) Πc , были вычислены значения z_n с помощью высот пунктов из геометрического нивелирования 2 кл. по формуле одностороннего геодезического нивелирования при $k_n = 0,15$, а также измеренные значения z при соприкосновении горизонтальной нити инструмента с серединой колеблющегося верхнего среза визирной цепи и измеренные значения a .

Таблица 3

Значения второго члена правой части формулы (6) Πc

Время, ч	Направление							
	1	2	3	4	Я	5	А	6
12	—0,7"	+2,1"	+0,7"	+1,2"	—0,3"	+0,2"	+1,2"	—1,1"
14	+2,6	+2,1	—1,3	—2,8	—0,5	—0,2	—1,2	0,0
16	+0,1	+0,1	—2,8	+0,3	+0,1	+1,9	—0,9	+0,5

Значения величины второго члена правой части формулы (6) приведены для всех линий нивелирования в табл. 3. В обработку взяты измерения, полученные из восьми приемов для 12, 14 и 16 ч местного времени. Из табл. 3 видно, что значения Πc по величине и знаку имеют случайный характер. Причем среднее квадратическое отклонение $m = \pm 1,8''$. Как показано многими авторами, такая величина близка к погрешностям соб-

ственно измерений зенитных расстояний. Поэтому можно считать, что средняя величина аномального градиента по лучу визирования s близка к нулю.

Полученный нами эффект дает возможность редуцировать зенитные расстояния, измеренные при неустойчивой стратификации, на период спокойных изображений. Для этого, пренебрегая вторым членом правой части формулы (6), записываем

$$z_n = \bar{z} + a. \quad (7)$$

Значит, редуцированное на периоды спокойных изображений зенитное расстояние равно зенитному расстоянию $\bar{z}$, измеренному обычным способом, плюс максимальная полуамплитуда колебаний изображений.

Таблица 4

Измеренные и редуцированные зенитные расстояния

Время, ч	Направление							
	1	2	3	4	Я	5	А	6
Измеренные $\bar{z}$								
	89°43'	92°14'	90°09'	89°11'	89°07'	89°57'	88°45'	88°30'
12	32,5"	40,0"	53,9"	21,5"	13,0"	32,0"	26,8"	24,7"
14	32,0	39,7	53,2	21,0	15,0	33,6	23,8	27,8
16	33,7	37,0	52,5	22,2	16,4	34,8	22,0	26,7
Редуцированные z_n								
12	23,0	32,0	50,0	17,5	09,5	26,6	21,4	20,4
14	22,9	32,1	49,1	15,9	09,5	26,2	19,0	21,5
16	26,0	31,0	49,5	17,9	12,3	28,3	19,3	22,0
Периоды спокойных изображе- ний	25,9	29,9	52,3	18,7	12,0	26,4	20,2	21,5

Следовательно, при неустойчивой термической стратификации атмосфера как бы стремится к состоянию безразличного равновесия. Поэтому измерению зенитных расстояний посредством визирования на верх максимальных флуктуаций визирных целей примерно соответствует $k_n = 0,15$, а частота их колебания для длин сторон до 5 км обычно не превышает 30 с по времени.

Необходимо также отметить, что в периоды устойчивой стратификации этот эффект может появляться только в определенных условиях вследствие замедленных турбулентных движений, зависящих в основном от скорости ветра.

Таким образом, измерения зенитных расстояний предлагаемым методом необходимо выполнять только в периоды неустойчивой и нейтральной стратификации, т. е. начиная со времени окончания периода спокойных изображений утром и заканчивая при установлении спокойных изображений в вечернюю видимость.

Для проверки предлагаемого метода по экспериментальным данным были составлены средние значения из восьми приемов измеренных и редуцированных расстояний по всем направлениям для 12, 14 и 16 ч и для периода спокойных изображений. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, величины z значительно отличаются от z_n . Однако редуцированные зенитные расстояния близки к измеренным в периоды спокойных изображений. Причем расхождения редуцированных z_n для различного времени дня не превышают $3''$, что вполне соответствует точности собственно измерений зенитных расстояний.

Следовательно, метод редуцирования измеренных зенитных расстояний на периоды спокойных изображений позволяет исключать погрешности рефракционного происхождения.

Список литературы: 1. Джуман Б. М. О точности измерения зенитных расстояний в периоды спокойных изображений при ветре. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1966, вып. 4. 2. Джуман Б. М. Определение вертикального градиента температуры геодезическим методом при нейтральной стратификации в приземном слое воздуха. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1974, вып. 20. 3. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1955, вып. 102.

Работа поступила 26 мая 1977 года. Рекомендована кафедрой прикладной геодезии Львовского политехнического института.