

М. Ф. ЛИСЕВИЧ

ТОЧНОСТЬ РАДИОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ХОЛМИСТОЙ МЕСТНОСТИ

Вопросами точности радиодальномерных измерений на холмистой местности занимались многие авторы [3, 5, 6]. В данной статье излагаются некоторые результаты анализа выполненных 18—19 мая 1972 г.

в холмистом районе Донецкой области круглосуточных экспериментальных измерений длин трех линий, представляющих один треугольник второго класса. Длины линий равнялись 9,9; 7 и 9,2 км. Профиль местности вдоль каждой линии показан на рис. 1. Средняя высота луча по линии 1—2 равнялась 60 м, по линии 1—3 — 55 м и по линии 2—3 — 50 м. Измерения выполнялись через 2 часа в течение суток при ясной погоде и слабом ветре. Температура воздуха в течение суток изменялась от 18°С до 30°С, а влажность от 5 до 10 мм рт. ст. Во всех сериях программа заключалась в измерении каждой из трех линий на

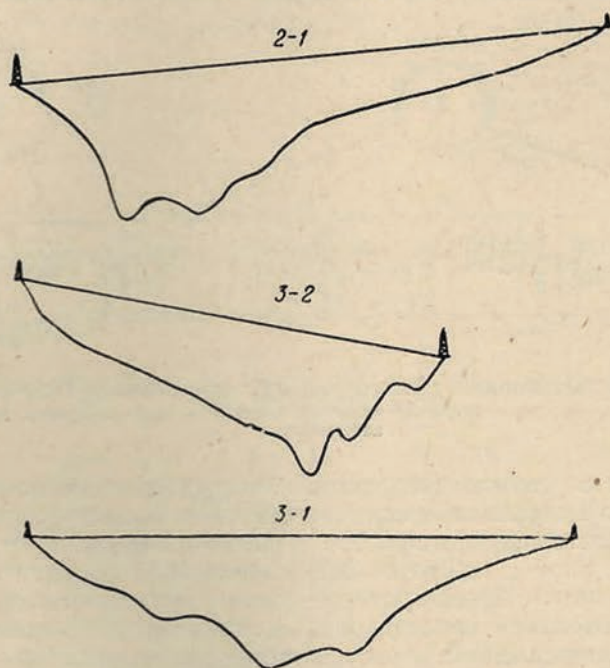


Рис. 1. Профили местности по линиям 2—1, 3—2, 3—1.

12 несущих частотах радиодальномером РДГВ, станции которого были расположены на штативах. Температура и влажность при этом определялись на уровне установки станций (1,5 м над поверхностью земли) с помощью психрометров Ассмана, а давление — с помощью барометров-анероидов. Кроме того, на 26-метровом сигнале в точке 2 на площадках высотой 6 и 24,6 м было закреплено по паре психрометров и в каждой серии дополнительно определялись метеоданные (по средним показаниям каждой пары психрометров). Длины линий $D_{изм}$ для каждой серии наблюдений были вычислены по формуле

$$D_{изм.} = \frac{c\tau}{2(1 + N \cdot 10^{-6})}, \quad (1)$$

где c — скорость распространения радиоволн в вакууме; τ — время распространения радиоволн, N — показатель преломления радиоволн в N -единицах, определяемый по формуле Эссена и Фрума (в несколько преобразованном виде [6])

$$N = \frac{103,49}{t_c + 273,16} p + \left[-\frac{17,23}{t_c + 273,16} + \frac{495822}{(t_c + 273,16)^2} \right] \times \\ \times \left[E' - 0,000662(t_c - t_{ва}) \left(1 + \frac{t_{ва}}{872,8} p \right) \right], \quad (2)$$

где p — давление воздуха в мм. рт. ст., t_c и $t_{вл}$ — температура сухого и влажного термометров в °C, E' — давление насыщенного пара при температуре влажного термометра в мм рт. ст.

Чтобы выяснить, как изменялись значения $D_{изм.}$ в течение суток, для каждой серии наблюдений были вычислены отклонения d_i значений $D_{изм.}$ от среднего значения длины линии $D_{ср.}$

$$d_i = D_{изм.} - D_{ср.} \quad (3)$$

а также среднеквадратические отклонения в течение суток

$$\delta_d = \sqrt{\frac{[d_i^2]}{n-1}}, \quad (4)$$

где n — количество серий.

Полученные значения δ_d для линий 1—2, 2—3 и 1—3 равны $\pm 0,055$ м, $\pm 0,047$ м и $\pm 0,048$ м, а максимальные отклонения d_i соответственно равны $+0,087$ м, $+0,088$ м, $+0,061$ м ночью и $-0,075$ м, $-0,056$ и $-0,058$ м днем (табл. 1).

Таблица 1

Отклонения d_i (в м) значений $D_{изм.}$ от среднего значения в течение суток и разности показателей преломления $R_i = N_{1,5} - N_{24,6}$ (в ед. 6-го знака)

Часы	Линия 1—2 ($D=9,9$ км)		Линия 2—3 ($D=7$ км)		Линия 1—3 ($D=9,2$ км)	
	d_i	R_i	d_i	R_i	d_i	R_i
11	-0,044	+4,4	-0,049	+3,0	-0,063	+3,8
13	-0,075	+6,1	-0,049	+5,6	-0,055	+5,4
15	-0,018	+4,6	-0,056	+4,3	-0,058	+4,8
17	+0,024	-2,2	+0,025	-2,7	+0,040	-2,3
19	+0,054	-2,5	+0,027	-1,8	+0,047	-2,7
21	-0,051	+6,0	-0,032	+4,9	-0,030	+3,9
1	-0,008	+1,9	-0,027	-0,2	+0,036	-0,3
3	+0,020	-2,2	+0,021	-2,1	+0,014	-3,4
5	+0,087	-7,4	+0,088	-5,2	+0,061	-5,6
6	+0,071	-3,6	+0,057	-4,5	+0,048	-4,0
9	-0,061	+3,1	-0,010	+2,3	-0,032	+2,1

Совершенно очевидно, что такие ошибки приведут к ощутимому понижению точности измерения длины линии, поэтому важно знать их природу.

Для анализа воспользуемся вычисленными нами по формуле (2) показателями преломления $N_{24,6}$ по метеоданным, определенным на высоте 24,6 м от поверхности земли. Для каждой серии мы вычислили значения

$$R_i = N_{1,5} - N_{24,6} \quad (5)$$

где $N_{1,5}$ — показатель преломления, полученный по средним значениям метеоданных на концах каждой линии. Значения R_i для каждой линии приводятся в табл. 1.

Для выяснения корреляционной связи колебания d_i в течение суток от разностей R_i для каждой линии в отдельности вычислены коэффициенты корреляции

$$r = \frac{K}{\sigma_d \sigma_R}, \quad (6)$$

где $\sigma_d = \sqrt{[(d_i - d_{ср.})^2]}$, $\sigma_R = \sqrt{[(R_i - R_{ср.})^2]}$,

$$K = [(d_i - d_{ср.})(R_i - R_{ср.})], \quad (7)$$

$$d_{ср.} = \frac{[d_i]}{n}, \quad R_{ср.} = \frac{[R_i]}{n}. \quad (8)$$

Коэффициенты корреляции, вычисленные по формуле (6) и равные 0,95, 0,93 и 0,93 для линий 1—2, 2—3 и 1—3 соответственно, говорят о том, что ошибки d_i в измеренном расстоянии $D_{изм.}$ вызваны, в основном, ошибками в показателе преломления за высоту луча.

В самом деле, в дневное время, с 9 до 15 часов, когда наблюдалось падение показателя преломления с высотой, все длины линий занижены по сравнению со средним значением (табл. 1 и рис. 2). Эти результаты согласуются с выводами А. Л. Островского, полученными из измерений на базе известной длины [5].

Об этом же свидетельствуют некоторые результаты дневных измерений линий полигонометрических ходов 4 класса, проложенных в этом же районе в производственных условиях.

Мы выбрали 12 полигонометрических ходов, при измерении длин сторон которых вся траектория луча располагалась на средней высоте 10—80 м над подстилающей поверхностью. Измерения длины каждой линии были выполнены 3—4 приемами подряд. Сходимость результатов измерений между приемами была достаточно высокой (1:10 0000—1:40 0000), в то же время точность, полученная по невязкам фигур — невысокой (1:25 000—1:65 000). Для выявления линейных ошибок невязки ходов графически были спроектированы на направление замыкающей линии каждого хода и таким образом получены величины продольного сдвига каждого хода. Для всех обработанных ходов, величины продольного сдвига отрицательны и колеблются от 0 до — 32 см (при длине ходов 4—11 км), то есть это подтверждает то, что длины линий в холмистой местности, измеренные радиодальномером в дневное время, имеют, в основном, заниженные значения.

В ночное время, наоборот, измеренные значения длин линий, получены завышенными (табл. 1 и рис. 2). А. Л. Островский еще раньше [5] предположил, что завышение расстояний ночью объясняются инверсией влажности. Измерения метеоданных, выполненные нами на высотах 1,5; 6 и 24,6 м показали, что в данном случае инверсия влажности также имела место. Максимального значения она достигала перед восходом Солнца (разность влажностей на уровнях 1,5 и 24,6 м достигала — 1,8 мм рт. ст.) и исчезала после восхода Солнца.

Если бы имели возможность определить метеоданные на средней высоте луча, мы могли бы повысить точность измерения длин линий в любое время суток. Поскольку такой возможности нет, остановимся на вопросе репрезентативности метеоданных, измеренных на более малых высотах, а именно на высотах 24,6 м и 6 м, на которых измерения выполнялись в каждой серии.

По разностям показателей преломления на высотах 24,6 и 6 м — с одной стороны и на высоте 1,5 м — с другой стороны, то есть

$$\Delta N_{24,6} = N_{1,5} - N_{24,6}, \quad \Delta N_{6,0} = N_{1,5} - N_{6,0}, \quad (9)$$

вычислены поправки в измеренные значения длин линий $D_{изм.}$

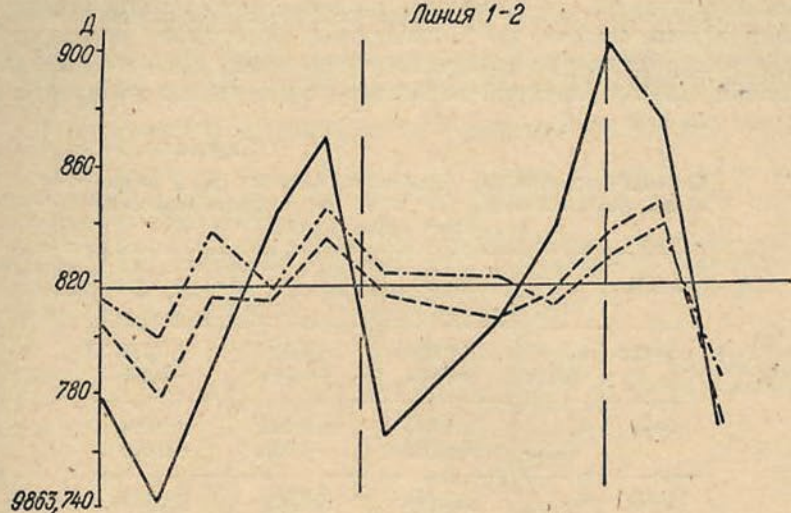
$$\Delta D' = -D_{изм.} \cdot \Delta N_{6,0}, \quad \Delta D'' = -D_{изм.} \cdot \Delta N_{24,6}. \quad (10)$$

Для каждой линии в каждой серии получены новые значения расстояний

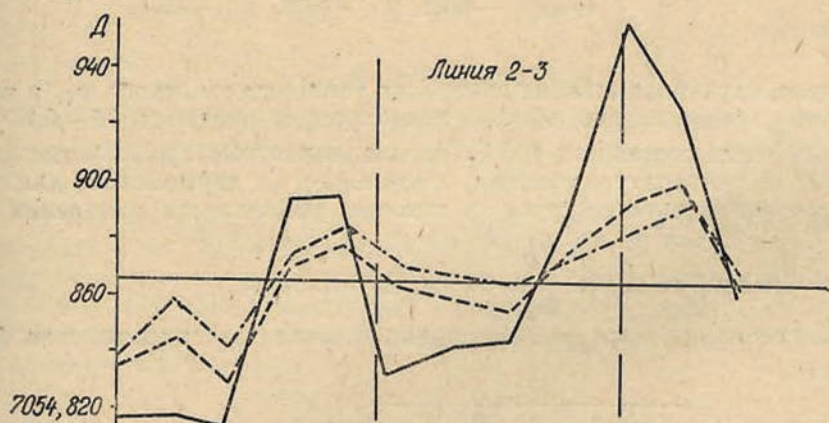
$$D' = D_{изм.} + \Delta D', \quad D'' = D_{изм.} + \Delta D''. \quad (11)$$

Если сравним графики суточного хода значений $D_{изм.}$, D' и D'' (рис. 2), то заметим, что для D' и D'' они значительно сглажены, то есть размах колебаний значений длин намного уменьшен. Об этом также свидетельствуют среднеквадратические δ_d и максимальные d_{max} , отклонения от средних значений в течение суток.

Линия 1-2



Линия 2-3



Линия 3-1

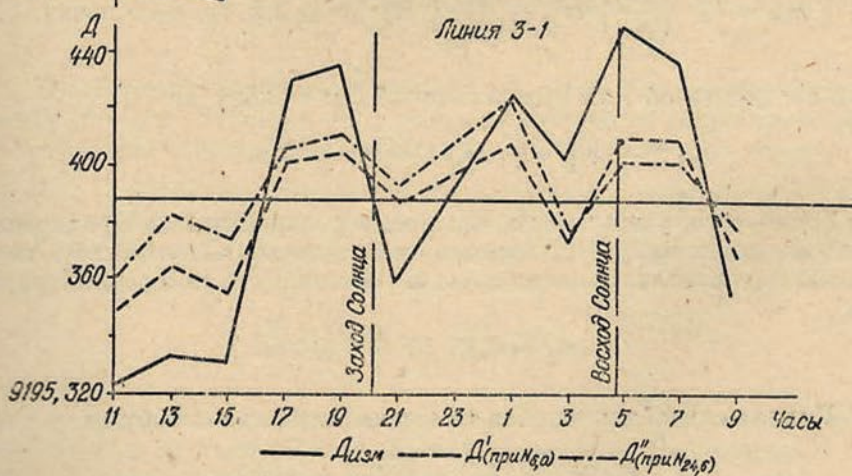


Рис. 2. Графики суточного хода значений $D_{изм}$, D' и D'' .

Таким образом, систематическая ошибка в измеренном расстоянии все-таки будет иметь место, но она уменьшится примерно в 2—3 раза (табл. 2).

Можно показать, что не только в случае, когда метеоданные измерялись на высоте 24,6 м, но и когда они измерялись на высоте 6 м, ошибка в измеренном расстоянии имеет величину того же порядка, что и случайная ошибка, которой неизбежно подвержены измерения. В са-

Таблица 2

Среднеквадратические δ_d и максимальные $d_{\max}$ отклонения значений $D_{изм}$, D' и D'' от среднего значения в течение суток (в м)

Линия		$D_{изм}$	D'	D''
1—2	δ_d $d_{\max}$	$\pm 0,055$ $+0,087$	$\pm 0,022$ $-0,044$	$\pm 0,018$ $-0,038$
2—3	δ_d $d_{\max}$	$\pm 0,047$ $+0,088$	$\pm 0,022$ $-0,036$	$\pm 0,016$ $-0,029$
1—3	δ_d $d_{\max}$	$\pm 0,048$ $-0,063$	$\pm 0,022$ $-0,035$	$\pm 0,018$ $-0,031$

мом деле, случайная ошибка измерения температуры сухого t_c и влажного $t_{вл}$ термометров обычно колеблется в пределах $0,3—0,7^\circ\text{C}$ [4] или в среднем составляет $0,5^\circ\text{C}$. Вычислив частные производные функции (2) по температуре сухого t_c и влажного $t_{вл}$ термометров для средних условий в течение суток, в которые выполнялись измерения ($t = 25^\circ\text{C}$, $e = 8,0$ мм рт. ст., $p = 748$ мм рт. ст.), получим

$$\frac{\partial N}{\partial t_c} = -4,0 \text{ ед. 6-го знака}, \quad \frac{\partial N}{\partial t_{вл}} = +7,4 \text{ ед. 6-го знака}.$$

С учетом $m_{t_c} = m_{t_{вл}} = 0,5$ ошибка в показателе преломления будет равна

$$m_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial t_c}\right)^2 m_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial t_{вл}}\right)^2 m_{t_{вл}}^2} = \pm 4,2 \text{ ед. 6-го знака},$$

что в линии длиной 9 км вызовет случайную ошибку [1]

$$m'_D = -m_N \cdot D = \pm 0,038 \text{ м}.$$

Кроме того, учитывая то, что время распространения радиоволн τ , входящее в формулу (1), определяется с точностью $m_\tau = \pm 0,1$ сек [2], это вызовет дополнительную случайную ошибку в измеренном расстоянии

$$m''_D = 0,15 \cdot 10^9 = 0,015 \text{ м}.$$

Полная случайная ошибка измеренного расстояния будет

$$m_D = \pm \sqrt{m'^2_D + m''^2_D} = \pm 0,040 \text{ м},$$

то есть она будет того же порядка, что и максимальные ошибки в измеренном расстоянии с определением метеоданных на высоте 6 м (табл. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иордан В., Эггерт О., Кнейссл М. Руководство по геодезии, т. 6. М., «Недра», 1971.
2. Кондрашков. Электро-оптические и радиогеодезические измерения. М., «Недра», 1972.
3. Кравцов Н. И. Об изменении показателя преломления при радиогеодезических измерениях в зимний период. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1970, вып. 12.
4. Мозжухин О. А. Метеорология в радиогеодезии. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1968.
5. Островский А. Л. Исследование влияния атмосферы на точность радиодальномерных измерений на всхолмленной местности. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1969, вып. 10.
6. Писаренко В. К. О влиянии метеорологических факторов на результаты радиодальномерных измерений. Сборник работ по астрономии Уральского госуниверситета. — «Уч. записки, № 111. Серия астрономическая». Свердловск, 1970, вып. 7.
7. Тр. ГГО, вып. 40(102). М., Гидрометеиздат, 1953.

Работа поступила в редколлегию 30 ноября 1973 года. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института.
