

Таким образом, если нужно получить широту с точностью до $0,03 \dots 0,05''$, следует применить в логарифмическом виде (11) или (15) с $\lg e^e$. Нелогарифмическая формула (11) дает ошибку $< 0,5''$ при $H < 1000$ км и $< 1''$ при $H < 2000$ км. Если требуется точность $0,01''$, то следует применить нелогарифмическую формулу (19). Высоту H при этом желательно вычислять по формуле (9), учитывая в случае необходимости поправку δH , или по формуле

$$H = Z \cos \epsilon B - N(1 - e^2). \quad (20)$$

Список литературы: 1. Андреев М. Преобразование прямоугольных пространственных координат в геодезические. — Геодезия и картография, 1966, № 9. 2. Буткевич А. В., Рабо Т. В. О переходе от пространственных прямоугольных координат к геодезическим без приближений. — Геодезия и картография, 1982, № 5. 3. Буткевич А. В. О переходе от пространственных координат к геодезическим. — Геодезия и картография, 1967, № 6. 4. Изотов А. Д. Преобразование пространственных прямоугольных координат в геодезические. — Геодезия и картография, 1969, № 5. 5. Ланге К. А. Вычисление координат и высот точек по измеренным азимутам нормальных сечений и углам наклона на двух исходных пунктах. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотогеодезия, 1962, вып. 1. 6. Николаев С. П. Связь между различными системами геодезических координат. — Вест. ВИА, 1961, № 174. 7. Пенев П. Трансформация прямоугольных пространственных координат в геодезические с применением замкнутых формул. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотогеодезия, 1980, вып. 3. 8. Пидков К. Две неперпендикулярные формулы за определение на географической широте. № 1. 9. Vosting В. К. Transformation from spatial to geographical coordinates. — Surv. Rev., 1976, v. 23, № 181.

Статья поступила в редакцию 11.05.83

УДК 528.5

К. С. ГИОНАШИН, В. В. ИЛЮСОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИИ СВЧ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ ДВСД-1200

Разработанные в Ереванском политехническом институте светодальномеры ВСД-600 и ДВСД-1200 построены по компенсационной схеме с внешней модульцией оптического излучения с использованием кристаллических модуляторов [2, 3].

Светодальномеры должны обеспечивать выполнение линейных измерений с необходимой точностью. Поэтому расчетное обоснование точности — основное требование к ним, хотя немаловажное значение имеют условия эксплуатации, масса, габариты, способы работы с прибором.

Особо важен тщательный анализ источников ошибок при прецизионном измерении, когда абсолютную ошибку можно оценить долями миллиметра. Ранее не учитываемые в топографических и других дальномерах ошибки могут быть решающими в высокоточном светодальномере.

Анализ источников ошибок светодальномера ДВСД-1200 можно выполнить на основе рабочей формулы для вычисления рас-

стояния, отражающей физические принципы, на которых базируется построение прибора, а также исходя из его конструктивных особенностей [3]. Так, для расстояний до 1 км, в пределах которых ошибки определения метеопараметров и их представительства составляют $\Delta T = 0,5$ К, $\Delta P = 1,3$ ГПа, $\Delta e = 1,3$ ГПа, и полагая, что стабильность масштабной частоты СВЧ-генератора не превышает $5 \cdot 10^{-7}$, квадрат средней квадратической ошибки измеренного расстояния представим в виде

$$m_s^2 = S^2(1 \cdot 10^{-6})^2 + m_u^2 + m_k^2 + m_{\epsilon}^2, \quad (1)$$

где первый член отражает совместное влияние ошибок измерения метеопараметров и их представительства, ошибок масштабной частоты и скорости света и зависит от длины измеряемой линии S . Среднюю квадратическую ошибку домера фазы (m_u) можно рассчитать теоретически, но проще и надежнее определить экспериментально путем исключения или ограничения влияния других факторов. Для ДВСД-1200 при частоте модуляции 1200 МГц и напиржении на кристалле, равном половине критического, ошибка составляет $3 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-4}$ м, или около 0,10 мм, где λ_m — длина волны модуляции. Средняя квадратическая ошибка центрирования отражателя и приемопередатчика (m_k) при использовании шаровых центрирующих устройств равна 0,02 мм. В случае определения постоянной поправки прибора из измерения светодальномером длин эталонных базисов ошибка определения постоянной поправки (m_{ϵ}) будет зависеть как от перечисленных выше ошибок, так и от длины ошибки, с которой известны значения этих базисов. Так, если длина эталонных базисов 50 м, относительная ошибка которых $1 \cdot 10^{-6}$, то средняя квадратическая ошибка постоянной поправки 0,16 мм, т. е. небольшая из перечисленных ранее. Для оценки ошибки нестабильности постоянной поправки (m_{ϵ}) следует отметить, что наиболее существенной ее частью является изменение линейных размеров несущих частей оснований приемопередатчика и отражателя под влиянием температуры. Зная материал, из которого изготовлены основания приемопередатчика и отражателя, учитывая отклонение температуры от принятого значения при определении постоянной поправки $\pm 15^\circ\text{C}$, нетрудно получить $m_{\epsilon} = 0,10$ мм.

Ожидаемую суммарную среднюю квадратическую ошибку измерения расстояния светодальномером ДВСД-1200 можно представить в виде корреляционной зависимости ошибки от длины линии

$$m_s = [0,04 + (0,9 \cdot 10^{-6} \cdot S)]^{1/2}. \quad (2)$$

С некоторым приближением (2) можно представить в виде линейного уравнения регрессии $m_s = (0,20 + 1 \cdot 10^{-6} S)$ мм.

В процессе лабораторных и полевых испытаний светодальномера ДВСД-1200 основное внимание уделяли исследованию характера и закономерности накопления фазовых ошибок, ошибки постоянной поправки и абсолютной ошибки измерения расстояния.

Ошибки измерения фазового домера зависят от способа индикации приемного сигнала, от режима работы модулятора—демодулятора при заданной частоте модуляции, а также включают в себя погрешности из-за нелинейности шкалы оптической линии задержки и погрешности отсчитывания. Кроме того, на фазовую ошибку заметно влияет флюктуация интенсивности несущих как следствие турбулентности атмосферы, приводящей к случайному распределению плотности мощности по сечению светового пучка, что ведет к флюктуации среднего тока на выходе приемника. Ослабление излучения как вследствие поглощения, так и рассеивания снижает энергетический запас прибора, ухудшает качество приема, т. е. ошибка фазы может изменяться в зависимости от длины измеряемого расстояния, иначе — являться функцией плотности принимаемого светового потока.

При исследовании в лабораторных условиях на компараторах эталонные значения перемещений отражателя как в пределах длины волны модуляции с шагом квантования 10 мм, так и в пределах базы компараторов определяли по рабочему жезлу со средней квадратической ошибкой 5 и 20 мкм соответственно. Установлено, что в пределах 30 м средняя квадратическая ошибка определения домера фазы менее 0,1 мм для одной серии измерений из 10 приемов наблюдения минимума сигнала. Однако нелинейность шкалы фазосдвигающего устройства может привести к ошибкам в фазовом домере до 0,15 мм, что стало причиной коренного переустройства оптической линии задержки в дальнейших разработках.

Зависимость измеренного значения фазового домера от индикаторности наблюдателя связана со способом индикации и наблюдением минимума сигнала на экране электронно-лучевой трубки.

Ошибки наблюдателя могут привести к систематическим ошибкам в фазовом домере до 0,12 мм, а ослабить их влияние можно, применяя специальную методику наблюдения минимума при двух разных уровнях сигнала, поместив перед экраном прозрачную маску с координатной сеткой.

На основании результатов исследований установлена корреляционная зависимость средней квадратической ошибки измерения домера фазы от длины измеряемого расстояния, выражающаяся уравнением регрессии

$$m_A = (0,05 \pm 0,08 \cdot S_{100}) \text{ мм}, \quad (3)$$

где S_{100} — длина линии в сотнях метров.

Полевые испытания светодоальномеров были выполнены на базисных линиях, измеренных инвариантными проволоками с относительной средней квадратической ошибкой $1 \cdot 10^{-6}$, определенной по внутренней схожести результатов.

Предварительной обработкой результатов установлено, что ошибки измерений светодоальномером обусловлены в основном случайными факторами. Дальнейшее исследование рядов ошибок выполняли статистическими методами по программам рас-

деления ошибок и графиком нормальной плотности вероятностей, что позволило провести качественную оценку близости теоретического и эмпирического распределений.

Эмпирическое среднее квадратическое отклонение по результатам измерений на базисах Ингури ГЭС (длина базисов 48 и 144 м) составило $\sigma_A^I = 0,45$ и $\sigma_A^{II} = 0,44$ мм из рядов по 26 и 29 ошибок соответственно, а для базисов длиной 96 м геосети РАТАН-600 получено $\sigma_A^{III} = 0,78$ и $\sigma_A^{IV} = 0,87$ мм из рядов по 39 и 72 ошибки.

Абсолютная средняя квадратическая ошибка измерения расстояний одной программой из 10 приемов наблюдения минимума на базисах Ингури ГЭС и РАТАН-600 составила $m_A^I = 0,50$ и $m_A^{II} = 0,80$ мм.

Если ошибки измерений на базисах Ингури ГЭС близки к расчетным, то на РАТАН-600 результаты оказались грубее более чем в два раза. Это объясняется тем, что приборную поправку на втором объекте определяли по измерениям одного из 96-метровых базисов со средней квадратической ошибкой 0,27 мм, подсчитанной по отклонениям, а на первом — по измерениям базы 24-метрового оптико-механического компаратора со средней квадратической ошибкой 0,09 мм, хотя в обоих случаях выполнено по 10 серий из 10 приемов наблюдения минимума, причем средние квадратические ошибки фазового домера оказались в пределах расчетных значений (около 0,15 мм) как при первом, так и при втором определениях приборной поправки.

Следовательно, абсолютная средняя квадратическая ошибка измерения расстояний находится в прямой зависимости от точности и надежности определения приборной поправки, что в свою очередь определяется как длиной эталонного базиса (или базисов) и точностью известных значений этих базисов, так и условиями, в которых осуществляется определение приборной поправки.

Трудно определить максимальные значения эталонных расстояний S_{max} в пределах которых ошибки, пропорциональные длине измеряемой линии, практически не влияли бы на точность определения приборной поправки для ДВСД-1200. Приняв абсолютную ошибку прибора $m_S = 0,3$ мм, потребуем, чтобы ошибки (влияния внешней среды и нестабильности СВЧ-генератора) в сумме не превысили бы $m_S/5$. Тогда, разрешив (1) относительно S , будем иметь $S_{max} = 60$ м. При этом длины эталонных линий должны быть известны со средней квадратической ошибкой не более 0,05 мм.

Очевидно, что для определения приборной поправки, а также метрологической аттестации других параметров во всем диапазоне измеримых расстояний (в пределах 1 км) создание эталонных базисов со столь высокой точностью возможно или на основе лазерных интерференционных измерителей перемещений, или при помощи интерферометров типа Вайсяля [1]. Необходимость сооружения таких базисов возникает уже сейчас, когда светодоальномеры типа ДВСД-1200 приобретают все большее распространение, а их параметры совершенствуются с каждым днем.

- Список литературы:** 1. Герасименко М. Г., Генюке А. А. Метрологическое обеспечение высотоочных дальнометров. — Геодезия и картография, 1982, № 6.
2. Мовсесян Р. А., Мартынов А. А., Андарицкая Ф. Б. Высотоочный светодальномер ВСД-600. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотогизм, 1973, вып. 5.
3. Мовсесян Р. А. Высотоочный электрооптический дальнометр ДВСД-1200. — Геодезия и картография, 1973, № 9.

Статья поступила в редакцию 22.06.83

УДК 528.021.06

П. Д. ДВУЛИТ, П. В. ПАВЛИВ, О. Е. ТОЛУБЯК

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ НЕПОСТОЯНСТВА РАЗНОСТИ ВЫСОТ НУЛЕЙ ШКАЛ ИНВАРНЫХ РЕЕК НА РЕЗУЛЬТАТЫ НИВЕЛИРОВАНИЯ

Известно, что вследствие недостаточной выверки приборов значительное место в накоплении ошибок высокоточного нивелирования занимают погрешности, которые, как правило, не учитываются как при нивелировании, так и при обработке полученных результатов [3].

На основании специального исследования производственного материала было выявлено, что разности основных и дополнительных шкал инварных реек — непостоянные величины и меняются с изменением расстояния от пятки рейки [2].

В то же время действующая инструкция в методике исследования разности высот нулей шкал инварных реек не предусматривает выявления указанного недостатка [1], что значительно затрудняет работы по нивелированию из-за появления больших с одним и тем же знаком или даже недопустимых расхождений между превышениями, полученными по основной шкале и дополнительной шкале, и общим понижением точности получаемых результатов.

С целью иллюстрации вышеказанного рассмотрим страницу из журнала нивелирования II класса (табл. 1). При нивелировании средняя длина визирного луча составляла 30 м, а превышение на станции близко к 2 м. Соответственно отсчеты составляют приблизительно 0,5 и 2,5 м. При этом все разности высот нулей шкал инварных реек имеют один и тот же знак, что говорит о четком проявлении действия рассматриваемого источника.

При подсчете превышений по секции имеем

$$\Sigma h_{cp} = \frac{\Sigma h_0 + \Sigma h_n}{2}, \quad (1)$$

где Σh_{cp} — сумма средних превышений секции; Σh_0 — сумма превышений по основным шкалам секции; Σh_n — сумма превышений по дополнительным шкалам секции.

Значение погрешности $\Sigma \Delta h$, обусловленное непостоянством разности высот нулей шкал на разных интервалах реек, составляется [2]

$$2\Sigma \Delta h = \Sigma h_n - \Sigma h_0. \quad (2)$$

С целью дальнейшей иллюстрации механизма накопления погрешностей, обусловленных действием изучаемого источника, проанализируем участок нивелирного хода общей длиной 800 м, часть которого представлена в табл. 1, и общий перепад высот на котором составляет 29 м, т. е. $\Sigma h_0 = -29,2804$ м, $\Sigma h_n = -29,2754$ м. С учетом (2) имеем $2\Sigma \Delta h = 0,0050$ м = 5,0 мм.

Специальными экспериментами исследованными определенными разности высот нулей шкал реек № 193, 194, примененных для нивелирования указанного выше участка, и реек № 163, 164. Исследования проводили по методике, предложенной действующей инструкцией, но по несколько усовершенствованной программе.

Нивелир закрепили на штативе, ножки которого устанавливали на металлических, забитых в землю, трубах диаметром 2 см и длиной 0,5 м. Этим обеспечили повышенную устойчивость нивелира при выполнении данного исследования. В шести метрах от нивелира (по инструкции в 20—30 м) в землю на разных высотных уровнях (см. рисунок) забили три арматурных стержня длиной 0,8 м с металлической пластиной в верхней части и полусферической головкой диаметром 3 см. Следовательно, отсчеты по шкалам брали на трех различных интервалах примерно через 1 м в пределах от 0,5 до 2,5 м. Рекомендую инструкцией программа не предусматривает подбор мест для костылей на разных уровнях, а это значит, что все три костыля находятся приблизительно на одной высоте и отчитываются по рейке на небольшом ее интервале.

В процессе наблюдений рейки удерживались на стержнях с помощью специально изготовленных рейкодержателей, что обеспечивало неизменность положения реек на стержнях в моменты от-

Таблица 1
Накопление разностей превышений, обусловленных непостоянством разности высот нулей шкал инварных реек

Рейки	Отсчеты по биссектору интервала (1/2 дм)		Доп. шкала		Контроль
	Р	Б	Р	Б	
3	16,1	58	75,4	09	59,251
П	52,2	51	111,5	00	59,249
3-П	-36,1	7	-36,1	09	2
И	-36,093		-36,071		2
3	8,1	57	67,4	09	59,252
П	43,1	30	102,3	78	59,248
3-П	-35,0	+27	-34,9	-69	4
И	-34,973		-34,969		6
3	15,8	04	75,0	57	59,253
П	42,1	35	101,3	87	59,252
3-П	-26,3	-31	-26,3	-30	7
И	-26,331		-26,330		1
3	16,3	15	75,5	65	59,250
П	40,7	03	99,9	49	59,246
3-П	-24,4	+12	-24,4	16	4
И	-24,388		-24,384		11
3	6,7	0	65,9	53	59,253
П	37,9	95	97,2	40	59,245
3-П	-31,2	-95	-31,3	13	8
И	-31,295		-31,287		19