

К. С. ГЮНАШЯН, В. В. ИЛЯСОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВЧ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ ДВСД-1200

Разработанные в Ереванском политехническом институте светодальномеры ВСД-600 и ДВСД-1200 построены по компенсационной схеме с внешней модуляцией 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 оценивать 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

$$m_s^2 = S^2 (1 \cdot 10^{-6})^2 + m_\Delta^2 + m_\Pi^2 + m_K^2 + m_{\text{ст}}^2, \quad (1)$$

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_Δ) 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 напряжении на кристалле, равном половине критического, ошибка составляет $3-4 \cdot 10^{-7} \lambda_m$, или около 0,10 мм, где λ_m — длина волны модуляции. Средняя квадратическая ошибка центрирования отражателя и приемопередатчика (m_Π) при использовании шаровых центрирующих устройств равна 0,02 мм. В случае определения постоянной поправки прибора из измерения светодальномером длин эталонных базисов ошибка определения постоянной (m_K) 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. наибольшая из перечисленных ранее. Для оценки ошибки нестабильности постоянной поправки ($m_{\text{ст}}$) следует отметить, что наиболее существенной ее частью является изменение линейных размеров несущих частей оснований приемо-передатчика 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 $m_{\text{ст}} = 0,10$ 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—демо-дьюлятора 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 исследованиях 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 индивидуальности наблюдателя связана со способом индикации и наблюдения 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

$$m_{\Delta} = (0,05 + 0,08 \cdot S_{100}) \text{ мм}, \quad (3)$$

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

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

Предварительной обработкой результатов установлено, что ошибки измерений светодальномером обусловлены в основном случайными факторами. Дальнейшее исследование рядов ошибок выполняли статистическими методами по гистограммам распре-

деления ошибок и графикам 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 $\sigma_{\Delta}^I = 0,45$ и $\sigma_{\Delta}^{II} = 0,44$ мм из рядов по 26 и 29 ошибок соответственно, а для базисов длиной 96 м геосети РАТАН-600 получено $\sigma_{\Delta}^{III} = 0,78$ и $\sigma_{\Delta}^{IV} = 0,87$ 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 $m_s^I = 0,50$ и $m_s^{II} = 0,80$ 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 определении 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.

Нетрудно 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 измеряемых 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 Вьясяля [1]. Необходимость сооружения таких базисов возникает уже сейчас, когда светодальномеры типа ДВСД-1200 приобретают все большее распространение, а их параметры совершенствуются с каждым днем.

Список литературы: 1. Герасименко М. Г., Генике А. А. Метрологическое обеспечение высокоточных дальномеров. — Геодезия и картография, 1982, № 6.
2. Мовсесян Р. А., Мартиросян А. А., Амбарцумян Ф. Б. Высокоточный светодальномер ВСД-600. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1973, вып. 5.
3. Мовсесян Р. А. Высокоточный электрооптический дальномер ДВСД-1200. — Геодезия и картография, 1973, № 9.

Статья поступила в редколлегию 22. 06. 83