

го светового потока, вести измерение разности фаз на промежуточной частоте, использовать оптические калибровочные линии.

Поскольку влияние одних составляющих погрешностей на точность результата измерения зависит от величины измеряемого расстояния, а других — не зависит, целесообразно использовать методику расчета на точность при проектировании геодезического фазового светодальномера, основанную на введении понятия условного измеряемого расстояния $S_{усл}$, при измерении которого влияние всех основных погрешностей примерно одинаково.

§ 12. РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Как уже отмечалось, оптимальным решением при разработке приборов, предназначенных для быстрого, сравнительно грубого (с допустимой погрешностью около 10 см и более) измерения значительных расстояний, является использование импульсных светодальномеров. Например, в современной геодезической практике применяют импульсные светодальномеры для выполнения линейных измерений с поверхности Земли до искусственных спутников Земли (ИСЗ). Величина расстояния, измеренного импульсным светодальномером, определяется следующим обобщенным выражением, аналогичным выражению (50):

$$S = \frac{c}{2n_{гpf}} (N + \Delta_N) + \delta, \quad (65)$$

где f — частота генератора калиброванных временных импульсов, период которой является рабочей мерой; $N=1, 2, 3 \dots$ — целое число периодов частоты генератора калиброванных временных импульсов, определяемое безошибочно и автоматически; $\Delta_N < 1$ — дробная часть периода частоты генератора калиброванных временных импульсов; c — скорость света в вакууме; $n_{гp}$ — групповой показатель преломления атмосферы; δ — постоянная поправка светодальномера.

Продифференцировав формулу (65) и учитывая, что целое число периодов частоты генератора калиброванных временных импульсов определяется безошибочно, что погрешность определения скорости света в вакууме, не превышающая $4 \cdot 10^{-9}$, практически равна нулю и что

$$S \approx \frac{c(N + \Delta_N)}{2n_{гpf}},$$

можно определить погрешность однократного измерения расстояния импульсным светодальномером

$$m_S = \sqrt{S^2 \left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + S^2 \left(\frac{m_{n_{гp}}}{n_{гp}}\right)^2 + \left(\frac{c}{2n_{гpf}}\right)^2 m_{\Delta_N}^2 + m_{\delta}^2}, \quad (66)$$

где $\frac{m_f}{f}$ — погрешность частоты генератора временных калиброванных импульсов (применение современных радиотехнических средств, включая квантовые эталоны частоты, позволяет обеспечить практически любую точность задания и стабилизации частоты); $\frac{m_{гр}}{n_{гр}}$ — погрешность определения группового показателя преломления атмосферы (при измерении импульсным светодальномером расстояний до ИСЗ, когда большую часть пути световой импульс проходит в космическом пространстве, следует учитывать, что влияние этой погрешности пропорционально лишь пути S_a , проходимого световым импульсом в атмосфере); $m_{\Delta N}$ — погрешность определения дробной части периода частоты генератора калиброванных временных импульсов [например, в импульсном светодальномере со счетчиком временных калиброванных импульсов (см. рис. 6) $m_{\Delta N} \approx 0,5$]; m_b — погрешность постоянной поправки светодальномера (помимо этой погрешности, погрешностями пространственного ориентирования являются погрешности центрирования светодальномера и отражателя).

Следует отметить, что в импульсных светодальномерах, помимо пространственного ориентирования, необходимо выполнить условия временного ориентирования. Последнее заключается в обеспечении идентичности измеряемого в приборе временного интервала времени t , затрачиваемому световым импульсом на прохождение двойного измеряемого расстояния.

Поскольку, как правило, погрешности пространственного ориентирования светодальномера и отражателя, а также погрешность определения постоянной поправки светодальномера не превышают $0,1 m_s$, суммарное влияние погрешностей ориентирования определяется в основном влиянием погрешностей, связанных с заданием временного интервала при помощи старт- и стоп-импульсов. Эти погрешности, возникающие вследствие искажений формы и изменений амплитуды принимаемого отраженного импульса, обусловлены турбулентцией атмосферы и асинхронностью траекторий фото- и вторичных электронов в приемнике излучения — ФЭУ. При автоматическом введении соответствующих поправок за форму этих импульсов и при гарантировании определенного значения их амплитуд можно путем фиксации «энергетических» центров импульсов или какими-либо другими способами задать границы временного интервала с погрешностями порядка $0,1$ от длительности τ_n старт- и стоп-импульсов. При измерении импульсным светодальномером максимальных расстояний, когда энергия принимаемого отраженного импульса весьма незначительна, погрешности временного ориентирования из-за расширения отраженного импульса и флуктуации его интенсивности несколько возрастут.

Учитывая влияние погрешностей центрирования и временно-ориентирования, а также формулу (66), погрешность однократного измерения расстояния импульсным светодальномером можно определить зависимостью

$$m_S = \sqrt{S^2 \left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + S_a^2 \left(\frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}}\right)^2 + \left(\frac{c}{2f}\right)^2 m_{\Delta N}^2 + \left(\frac{c}{2f}\right)^2 m_{\tau_n}^2 + m_\delta^2 + m_{\mu}^2}, \quad (67)$$

где S_a — расстояние, проходимое световым импульсом в атмосфере; m_{τ_n} — погрешность задания временного интервала, измеряемого в светодальномере (при гарантировании соответствующих условий $m_{\tau_n} \approx 0,1\tau_n$); τ_n — длительность излучаемого светового импульса; m_{μ} — погрешность центрирования.

Поскольку, как отмечалось выше, при использовании современных методов и технологических средств можно обеспечить пренебрегаемое малое влияние погрешностей частоты генератора временных калиброванных импульсов и пространственного ориентирования, т. е. выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} S \frac{m_f}{f} &\leq 0,1m_S, \\ m_\delta &\leq 0,1m_S, \\ m_{\mu} &\leq 0,1m_S, \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

а при измерении расстояний до ИСЗ, когда $S \gg S_a$, влияние погрешности определения группового показателя преломления атмосферы также пренебрегаемо мало:

$$S_a \frac{m_{n_{rp}}}{n_{rp}} \leq 0,1m_S, \quad (69)$$

то зависимость (67) существенно упрощается:

$$m_S = \frac{c}{2} \sqrt{m_{\tau_n}^2 + \left(\frac{m_{\Delta N}}{f}\right)^2}. \quad (70)$$

При этом, если обеспечивается достаточная энергия принятого отраженного светового импульса, погрешность измерения не зависит от величины измеряемого расстояния.

Зная допустимую погрешность m_S однократного измерения расстояния импульсным светодальномером, а также предполагая, что влияние составляющих погрешностей примерно одинаково, можно определить допустимую погрешность задания временного интервала, измеряемого светодальномером, и допустимую погрешность определения дробной части периода генератора временных калиброванных импульсов

$$m_{\tau_H} = \frac{\sqrt{2} m_S}{c}, \quad m_{\Delta_N} = \frac{\sqrt{2} m_S f}{c}. \quad (71); (72)$$

Когда выбраны методика и технические средства временного ориентирования, тогда известна погрешность задания временного интервала, выраженная в долях длительности τ_H светового импульса, излучаемого светодальномером. Следовательно, зависимость (71) может быть использована для определения допустимой длительности светового импульса.

Когда в качестве источника излучения импульсного светодальномера используют импульсный твердотельный лазер (на рубине или неодиме) с модулятором добротности, то выполнение условия (71) технических трудностей не представляет (длительность импульса может быть уменьшена до нескольких пикосекунд [34]). Следует отметить, что модулятор добротности исключает временную неоднородность составляющих импульсов излучения по сечению излучаемого пучка, так как формирует «усредненный» импульс малой длительности, но энергия кратковременного импульса лазерного излучения соответственно меньше энергии импульса лазерного излучения без модулятора добротности.

Выбрав заранее способ фиксирования измеренного импульсным светодальномером результата и, следовательно, зная погрешность m_{Δ_N} определения дробной части периода частоты f генератора калиброванных временных импульсов, можно по формуле (72) определить значение частоты генератора. При этом окончательное значение частоты генератора выбирают таким образом, чтобы период ее соответствовал стандартным интервалам времени $\left(\frac{1}{f} = 10^{-n} c, \text{ где } n — \text{целое положительное число}\right)$ или десятичному количеству метров.

§ 13. РАСЧЕТ НА ТОЧНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

Современные фазовые геодезические светодальномеры, в которых источник излучения работает в импульсном режиме, называют импульсно-фазовыми или комбинированными. Например, такими источниками излучения являются импульсные газоразрядные лампы и импульсные лазеры, а также светодиоды и полупроводниковые лазеры, в которых для существенного повышения мощности излучаемого светового потока применяют внутреннюю импульсную модуляцию интенсивности. Для измерения времени, затрачиваемого светом на прохождение двойного измеряемого расстояния, косвенным фазовым способом, излучаемые световые импульсы модулируют непрерывным гармоническим сигналом с частотой f по поляризации или интенсивности.