

Г.А. Калошин, В.С. Козлов, В.П. Шмаргунов

ЛОКАЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ В СОСТАВЕ ЛАЗЕРНОГО МАЯКА Ч. II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведены результаты синхронных измерений прозрачности модельной среды типа дымового аэрозоля базисным и разработанным локационным измерителями метеорологической дальности видимости, которые совпадают с относительной погрешностью около 20%. Обсуждаются методические вопросы калибровки и погрешности измерения прозрачности локационным измерителем.

В предыдущей статье [1] на основе расчетных данных показана возможность реализации в составе однопозиционной конструкции лазерного маяка локационного измерителя метеорологической дальности видимости, использующего в качестве источника световые пучки маяка. Вместе с тем практическое воплощение локационной методики требует знания калибровочных параметров и оценки погрешности измерения дальности видимости.

В данной статье приведены результаты оценок точностных характеристик и результаты калибровки локационного измерителя видимости, полученные нами в контролируемых модельных условиях при экспериментальных исследованиях макета локационного измерителя метеорологической дальности видимости (S_m) в сопоставлении с данными измерений прозрачности модельной аэрозольной среды базисным методом [2]*.

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макет автономного прибора, обеспечивающего измерения обратного рассеяния в области локационных углов с оптико-геометрическими параметрами, близкими к использованным в расчетах [1], и с возможностью изменения угла схождения оптических осей источника и приемника излучения. Для сравнительных измерений использован базисный измеритель прозрачности, обеспечивающий на трассе длиной до 50 м с достаточной точностью измерения метеорологической дальности видимости S_m в интервале значений 70–1000 м. Оба прибора были размещены в большой аэрозольной камере (БАК) емкостью 1800 м³ (длина 26 м). Оптические измерения S_m в дымах различной плотности, создаваемых внутри камеры, проводились в синхронном режиме. Результаты одновременных измерений позволили оценить возможные погрешности локационного измерителя S_m и выполнить калибровку макета.

Локационный измеритель S_m

Функциональная схема локационного измерителя видимости представлена на рис. 1. Прибор осуществляет измерения по компенсационной схеме, согласно которой в устройстве формируются два световых сигнала: один – основной, пропорциональный рассеянному аэрозолем световому потоку, а второй – опорный, пропорциональный мощности источника излучения. Сигналы сравниваются по разности величины. За счет линейного смещения в опорном канале регулируемого элемента (оптического клиновидного ослабителя) достигается условие равенства основного и опорного сигналов. В итоге требуемая для компенсации величина коэффициента ослабления оптического клина, пропорциональная его линейному смещению, является количественной характеристикой значения метеорологической дальности видимости S_m .

* Отметим, что здесь и далее под термином метеорологическая дальность видимости понимается величина $S_m = 3,9/\varepsilon(0,5)$, где $\varepsilon(0,5)$ – коэффициент ослабления на длине волны 0,5 мкм. При обработке экспериментальных данных, когда измерение прозрачности проводилось на $\lambda = 0,63$ мкм, осуществлялся соответствующий пересчет значений $\varepsilon(0,63)$ на $\varepsilon(0,55)$.

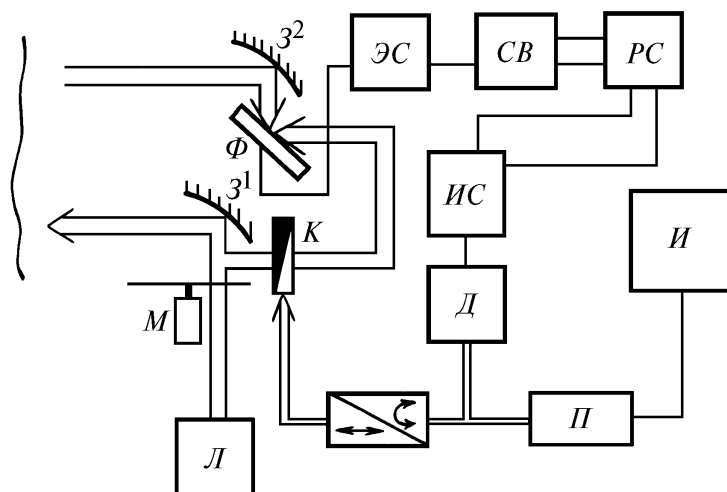


Рис. 1 Функциональная схема локационного измерителя видимости: ЭС – электронная система, СВ – синхронный выключатель, РС – реверсивный счетчик

Действительно, рассеянный в направлении назад сигнал в приближении однократного рассеяния может быть представлен в виде

$$U_p(\pi) = k_1 P_0 / S_m, \quad (1)$$

где P_0 – мощность излучения источника; k_1 – оптико-геометрический параметр. Отметим, что в уравнении (1): а) не учитывается ослабление излучения на трассе измерений, поскольку для рассматриваемого макета прибора, работающего в ближней зоне, расстояние от источника до дальней границы рассеивающего объема невелико и составляет около 10 м; б) величина локационного отношения (нормированной индикатрисы рассеяния назад) входит в оптико-геометрический параметр k_1 ; в) использована приведенная выше связь аэрозольного коэффициента ослабления с метеорологической дальностью видимости.

В свою очередь, величина опорного сигнала

$$U_{он} = k_2 P_0 \exp[-\tau_k(x)], \quad (2)$$

где k_2 – соответствующая аппаратная постоянная; $\tau_k(x)$ – оптическая толщина клина в линейной позиции x .

Из условия компенсации потоков $U_p = U_{он}$ несложно получить

$$\tau_k(x) = \ln S_m(x) - \ln k, \quad (3)$$

где $k = k_1/k_2$.

Таким образом, для клина с линейным по его длине изменением оптической толщи шкалу перемещения можно прокалибровать в единицах $\ln S_m$.

Конструктивно макет прибора выполнен как автономный, в едином влагозащитном корпусе, где размещаются источник оптического излучения, приемник локационного сигнала, блок обработки и индикации, блок электропитания.

Прибор работает следующим образом (см. рис. 1). Лампа накаливания L излучает белый световой поток, который периодически прерывается механическим модулятором M с частотой 5 Гц и в противофазе подается по двум направлениям. Первое – через сферическое зеркало Z_1 с фокусным расстоянием $F = 0,25$ м в аэрозольную рассеивающую среду, второе (опорный канал) – через регулируемый элемент (клиновидный ослабитель K) по световоду поступает на фотоприемник Φ . Рассеянный аэрозолем сигнал через приемное сферическое зеркало Z_2 с фокусным расстоянием $F = 0,25$ м также поступает на фотоприемник Φ , где суммируется в противофазе с опорным сигналом, и далее осуществляется синхронное детектирование в режиме счета фотонов. При достижении определенной разности сигналов исполнительная система $ИС$

включает электродвигатель D , который приводит в движение оптический клиновидный ослабитель K ; при этом оптический клин линейно перемещается, смещая указатель по шкале значений S_m . С двигателем также механически связан электрический датчик положения клина $П$ – реохорд, который вырабатывает аналоговый выходной сигнал, соответствующий определенному положению клина, т.е. определенной величине рассеянного аэрозолеом света. Аналоговый сигнал регистрировался самопишущим прибором типа КСП.

Оптико-геометрические параметры локационного измерителя составляли апертуры источника и приемника $d_{\text{и}} = d_{\text{п}} = 0,16$ м, углы расходимости излучения источника и поля зрения приемника $2\gamma_{\text{и}} = 2\gamma_{\text{п}} = 0,9^\circ$, межосевое расстояние $B = 0,25$ м, угол схождения оптических осей источника и приемника $\varphi = 1,4 - 2,9^\circ$. При этом параметры рассеивающего объема для $\varphi = 1,4^\circ$ составляли: $V_p = 0,1$ м³; $L_1 = 1,8$ м, $L_2 = 9$ м, где L_1 и L_2 – удаление ближней и дальней границ рассеивающего объема соответственно.

Базисный измеритель S_m

Базисный измеритель S_m конструктивно состоит из источника излучения, системы установленных в аэрозольной камере зеркал, позволяющей изменять длину трассы в аэрозоле от 5 до 50 м, приемника ослабленного излучения и регистрирующей аппаратуры. Изменение длины трассы дает возможность выполнять измерения при аэрозольных оптических толщах, обеспечивающих низкие погрешности измерений. В качестве источника используется гелий-неоновый лазер на длине волны 0,63 мкм мощностью 20 мВт, излучение которого поступает в аэрозольную среду, ослабляется на трассе длиной L и регистрируется фотометром. Коллиматор фотометра, состоящий из объектива и установленной в его фокальной плоскости диафрагмы, задает угол поля зрения фотометра $2\gamma_{\text{п}} = 5 \div 10'$. Входящая в состав фотометра система дискретных нейтральных светофильтров позволяет ослабить регистрируемый световой поток до 10^6 раз. В качестве фотоприемника использован фотодиод ФД-24К. Электрический сигнал с фотодиода выделяется на частоте модуляции излучения, усиливается селективным микровольтметром и поступает на цифровой индикатор измерителя. В измерителе S_m предусмотрен непрерывный контроль стабильности излучения ОКГ.

Для оперативной обработки данных и управления работой прибор через интерфейс подключен к ЭВМ типа «Электроника-60», которая обрабатывает информацию, заносит ее в банк данных и выводит результаты измерений на внешнее устройство.

Вычисление S_m осуществляется на основе измерений аэрозольного коэффициента ослабления ε по методу Бугера [2, 3] и последующего его пересчета на S_m :

$$S_m = 3,9 / \varepsilon = 3,9 L / \tau, \quad (4)$$

где $\tau = \varepsilon L = \ln(I_0/I)$ – измеряемая оптическая толщина аэрозольной среды; I_0 и I – интенсивности излучения на входе и выходе из аэрозольной среды соответственно.

Анализ погрешностей измерения S_m базисным и локационным измерителями

Погрешности измерения S_m базисным измерителем можно разделить на две группы:

- 1) методические, обусловленные физическими условиями применимости уравнения Бугера;
- 2) аппаратные (случайные и систематические) погрешности.

Проанализируем влияние каждой из групп погрешностей на точность измерений S_m базисным методом. Известно, что значительный вклад в отклонение от закона Бугера может внести многократное рассеяние света. Величина доли рассеянного света, попадающего в приемник, зависит от τ , $2\gamma_{\text{и}}$, $2\gamma_{\text{п}}$, $d_{\text{и}}$, $d_{\text{п}}$. Известно также [3], что при $2\gamma_{\text{и}} = 2\gamma_{\text{п}} = 10'' - 30'$ эффектами многократного рассеяния при учете рассеянного вперед излучения можно пренебречь до значений оптической толщины $\tau < 18$ для атмосферных аэрозолей различных типов. Следовательно, в нашем случае, при $2\gamma_{\text{и}} = 2\gamma_{\text{п}} = 10'$ вкладом многократного рассеяния можно пренебречь при значениях коэффициента ослабления $\varepsilon < 0,36$ м⁻¹ (при $L = 50$ м), соответствующих значениям $S_m > 10$ м, т.е. практически во всем основном диапазоне S_m в условиях измерений.

Выражение для среднеквадратической случайной относительной погрешности измерений коэффициента ослабления, или S_M , базисным методом имеет следующий вид [2]:

$$\delta = dS_M / S_M = (\sqrt{1 + \exp(2\tau)/\tau}) dI_0 / I_0. \quad (5)$$

Средняя относительная погрешность нестабильности входного сигнала dI_0/I_0 сводилась при измерениях к минимуму за счет непрерывного контроля стабильности излучения источника и чувствительности аппаратуры. Эта погрешность оценивалась экспериментально и в среднем составляла 3%.

На рис. 2 приведена рассчитанная из (5) зависимость относительной погрешности δ от отношения I_0/I , значения которого соответствуют области $\tau < 1$. Отметим, что при измерениях ε с целью уменьшения погрешности задавалась (с помощью системы зеркал) длина трассы, соответствующая значениям $\tau < 1$. На рис. 2 в качестве примера дополнительно приведена шкала значений S_M для $L = 50$ м. Как видно, измерения на такой трассе позволяют определять метеорологическую дальность видимости с погрешностью не более 25% для значений $S_M < 1000$ м. При этом с уменьшением S_M до 200 м ($\tau < 1$) погрешность снижается и составляет менее 9%.

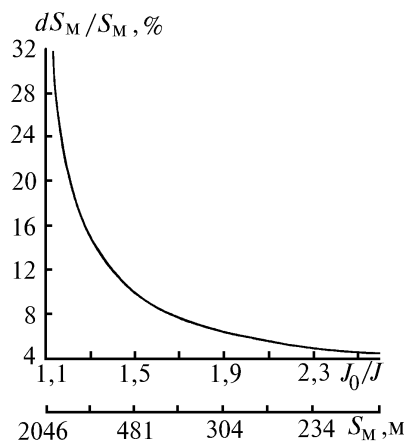


Рис. 2 Относительная среднеквадратическая погрешность измерения S_M базисным измерителем. Шкала S_M дана для $L = 50$ м

Таким образом, базисный измеритель S_M можно использовать для калибровки и оценки погрешности локационного датчика видимости.

Погрешности измерения S_M локационным измерителем могут быть трех типов: аппаратные, погрешности процедуры абсолютной калибровки измерений и методические.

Для оценки аппаратной погрешности, вызванной нестабильностью работы аппаратуры за длительный временной период, были проведены специальные измерения, которые показали, что средняя относительная погрешность составляет 2÷4%. Это достигается использованием в макете компенсационной схемы сравнения регистрируемого сигнала.

Относительная погрешность калибровки прибора фактически определяется погрешностью использования базисного измерителя S_M и оценена выше на уровне 20%. Основными факторами, которые могут приводить к методическим погрешностям, являются возможный вклад многократного рассеянного света в величины регистрируемых оптических сигналов и пространственно-временные вариации оптических характеристик аэрозоля. В целом методическая погрешность локационного измерителя S_M может быть оценена на основе сопоставления результатов измерений с синхронными данными о прозрачности аэрозольной среды, полученными базисным измерителем S_M . Поскольку подобная процедура сопоставления одновременно позволяет прокалибровать в абсолютных единицах S_M шкалу (показания) локационного измерителя, то оценка методической погрешности приведена ниже одновременно с калибровкой.

Калибровка локационного измерителя S_M осуществлялась на основании результатов одновременных измерений прозрачности двумя измерителями в постепенно изменяющейся по

плотности аэрозольной среде типа дымов, которые создавались посредством сжигания в электропечи определенного количества древесины. Изменением количества сжигаемой древесины достигалось изменение начальной плотности задымления воздуха в БАКе. Измерительные циклы начинались через 1÷1,5 ч. после окончания сжигания древесины, когда дым равномерно заполнит весь объем камеры, и могли продолжаться при изменяющейся S_m сутки и более. Выбор такой модельной среды был обусловлен тем, что оптические свойства дымового аэрозоля, возникающего при термическом разложении древесины, близки к оптическим свойствам атмосферной дымки, являющейся, как известно, наиболее характерным типом атмосферно-оптических замутнений.

Из (3) следует, что для локационного измерителя можно определить наклон рабочей характеристики по двум S_m , измеренным базисным измерителем. Действительно, зная величины эхосигнала U_1 и U_2 , соответствующие двум значениям S_{m1} и S_{m2} , полученным базисным измерителем, можно согласно (3) записать

$$\Delta \ln S_m / \Delta \tau = \ln(S_{m2} / S_{m1}) / \ln(U_1 / U_2), \quad (6)$$

где $\Delta \tau$ – соответствующее изменение оптической плотности ослабителя. Отметим, что предварительное фотометрирование клина K (см. рис.1) по длине показало его линейность с относительной погрешностью 3%, т.е. равным перемещениям клина Δx соответствуют равные $\Delta \tau$.

В качестве калибровочных могут быть выбраны два любых значения S_m . Нами, исходя из условий эксперимента, были выбраны средние по десяти отсчетам значения $S_{m1} = 0,25$ км и $S_{m2} = 1,0$ км, которые измерялись базисным измерителем на базе $L = 50$ м. Выбранным значениям S_m соответствовали средние значения эхосигнала $U_1 = 16$ мВ и $U_2 = 3,5$ мВ. Подставляя выбранные S_m и соответствующие им U в (6), получим

$$\Delta \ln S_m / \Delta \tau \approx 1. \quad (7)$$

Такая оценка наклона калибровочной характеристики однозначно свидетельствует о применимости приближения однократного рассеяния, лежащего в основе разработанного макета локационного измерителя с выбранными оптико-геометрическими параметрами в рассмотренном диапазоне S_m . Следовательно, методическую погрешность, обусловленную кратным рассеянием, можно не учитывать для данного локационного измерителя.

Таким образом, относительная среднеквадратическая погрешность измерения S_m для локационного измерителя составляет около 20%. Отметим попутно, что более детальный анализ погрешностей целесообразен для законченного прибора на этапе метрологической аттестации. В нашем случае оценен порядок величины относительной погрешности измерения S_m при сопоставлении с базисным методом.

Из (6) и (7) следует, что

$$\ln S_{m2} = \ln S_{m1} + \ln(U_1 / U_2). \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет рассчитать в данном диапазоне S_m зависимость $\ln S_m(U)$, имея лишь одну калибровочную точку (S_{m1}, U_1).

Из (7) следует, что линейная шкала клина $\tau = f(x)$ является линейной и для $\ln S_m$. Подставляя в (8) предельные значения U , которые составляли $U_{\max} = 82$ мВ и $U_{\min} = 0,24$ мВ, и калибровочную точку ($U_1 = 3,5$ мВ и $S_{m1} = 1$ км), получаем $S_{\min} = 0,042$ км и $S_{\max} = 14,6$ км.

На рис. 3 для одной из реализаций показаны результаты сравнения одновременных измерений S_m локационным и базисным измерителями. Из рис. 3 следует, что данные локационного измерителя S_m с относительной среднеквадратической погрешностью около 20% соответствуют данным базисных измерений. Рис. 3 иллюстрирует слабое влияние многократного рассеяния в рассмотренном диапазоне S_m . Это обстоятельство позволяет распространить предложенную методику калибровки по одной калибровочной точке ($U, \ln S_m$) до $S_m = 14,6$ км с учетом, что $\Delta \tau / \Delta x \approx \text{const}$.

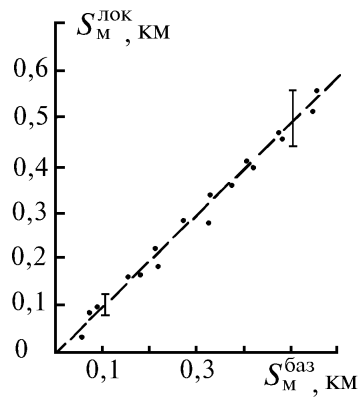


Рис. 3 Результаты одновременных измерений S_M локационным (ось ординат) и базисным (ось абсцисс) измерителями

Заключение

Показана возможность реализации в составе однопозиционной конструкции лазерного маяка локационного измерителя дальности видимости с выбранной оптико-геометрической схемой с суммарной относительной погрешностью измерения S_M около 20%.

1. Калошин Г.А., Козлов В.С., Панченко М.В., Полькин В.В. Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №10. С. 1441–1447.
2. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 216 с.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
г. Томск

Поступила в редакцию
23 февраля 1994 г.

G. A. Kaloshin, V. S. Kozlov, V. P. Shmargunov. **Location Meter as a Part of Laser Beacon for Measuring Meteorological Visibility Range.**

The results of simultaneous measuring of transparency of a model media of fume type by standard meter and a developed location meter of meteorological visibility range are presented in the paper. The relative error of their coinciding is about 20%. The problems of calibration and errors at measuring the transparency by the location meter are also treated.