

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРИТЕЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

О.А. Волков¹, А.В. Демин², К.В. Константинов¹

¹АО ЛОМО, Санкт-Петербург, Россия,

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассмотрены принципы построения измерителя метеорологической оптической дальности видимости, получено новое соотношение для его определения. Приведена оптическая схема измерителя метеорологической оптической дальности и приведены характеристики нового измерителя.

Ключевые слова: оптическая система, метеорология, трансмиссометр, авиаметеорологическая станция.

Цитирование: Волков, О.А. Оптическая система измерителя метеорологической оптической дальности / О.А. Волков, А.В. Демин, К.В. Константинов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 67-71. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-67-71.

Введение

Современное развитие вычислительной техники и компьютерных технологий позволяет существенно улучшить качественные и количественные параметры и надёжность человеко-машинных комплексов. В этой связи создание новой оптической техники, входящей в систему обеспечения безопасности полётов летательных аппаратов, и, соответственно, уменьшение влияния человеческого фактора в неопределённых ситуациях при принятии конечного решения пилотом является актуальной задачей.

Одним из важных компонентов системы безопасности полётов является метеорологическое оборудование, и в частности обеспечивающее моменты информирования пилота о метеорологической дальности видимости (МДВ) в реальном масштабе времени. МДВ является одной из характеристик прозрачности атмосферы, и она отличается от метеорологической оптической дальности видимости (*MOR*). Различают дневную и ночную *MOR*. Дневная *MOR* зависит от контраста между наблюдаемой взлётно-посадочной полосой (ВПП) и фоном местности и представляет собой наибольшее расстояние, на котором видимый контраст между объектом и фоном равен пороговой контрастности, определяемой соотношением [1, 2, 3]:

$$K = \left| \frac{L_{\Phi} - L_{Об}}{L_{Об}} \right| \text{ или } K = \left| \frac{L_{\Phi} - L_{Об}}{L_{\Phi}} \right|. \quad (1)$$

Ночная *MOR* – это максимальная дальность видимости огней ВПП в текущее время, определяемая их силой света и МДВ на момент наблюдения.

1. Теоретические основы

В соответствии с формулой Кошмидера [1, 2, 3] и Руководящим документом 52.21.680 – 2006 [http://docs.cntd.ru], а также с учётом принятого значения порога контрастной чувствительности глаза, равного $\epsilon = 0,05$, по измеренному коэффициенту пропускания τ для длины пути измерительного луча в атмосфере L расчёт визуальной оптической дальности ($MOR_{Виз}$) осуществляется по следующей формуле Кошмидера:

$$MOR_{Виз} = L(\ln 0,05 / \ln \tau) \approx 3L(|\ln \tau|)^{-1}. \quad (2)$$

При наличии атмосферного помутнения, дымки, неблагоприятных метеорологических условий и в тёмное время суток несамосветящиеся ориентиры визуально не могут быть обнаружены пилотом. Ориентирами ВПП в тёмное время суток являются огни высокой интенсивности (ОВИ), расположенные вдоль ВПП.

Расчёт визуальной оптической дальности видимости ($S_{Виз}$) ОВИ выполняются по формуле Алларда [1, 2, 3]:

$$E = \frac{I \cdot \tau^S}{S^2} = \frac{I \cdot \tau^{\mu S_{Виз}}}{(\mu S_{Виз})^2}, \quad (3)$$

которую можно преобразовать к виду:

$$(S_{Виз})^2 \times \exp\{\mu S_{Виз}\} = I/E_{Гл}, \quad (4)$$

где $E_{Гл}$ – порог световой чувствительности глаза ($E_{Гл} (\lambda \approx 0,5 \text{ мкм}) \approx 1 \times 10^{-9} \text{ эрг/с}$), I – сила света ОВИ (используют 4 ÷ 5 ступеней яркости огней), $S_{Виз}$ – дальность визуальной видимости огней ВПП, μ – показатель ослабления света в атмосфере.

Разложив $\exp\{\mu S_{Виз}\}$ в ряд Тейлора и ограничившись тремя членами ряда, преобразуем (4) к виду:

$$0,5\mu^2 (S_{Виз})^4 + \mu (S_{Виз})^3 + (S_{Виз})^2 \approx I/E_{Гл}. \quad (5)$$

Воспользовавшись «правилом Бомберли», уравнение (5) можно привести к решению уравнения следующего вида [4]:

$$\left. \begin{aligned} (S_{Виз})^2 + \left(\frac{1}{2}a \pm q\right)(S_{Виз}) + (p \pm r) &= 0 \\ \left. \begin{aligned} \frac{1}{4}a^2 + 2p - q^2 &= \frac{2}{\mu^2} \\ ap - 2qr &= 0 \\ p^2 - q^2 &= \left(-\frac{I}{E_{Гл}}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Опуская промежуточные преобразования и исследования корней уравнения (6), получим окончательно

$$\begin{cases} S_{\text{Виз}} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} + \sqrt{\frac{1}{\mu^2} - 4 \left(\frac{I}{E_{\Gamma\text{Л}}} \right)} \right] \\ \mu = \frac{\tau}{B_{S_{\Gamma\text{Л}}}} \end{cases} \quad (7)$$

При выводе формулы (7) было принято следующее допущение: в пределах базы измерения коэффициента пропускания, от значения которой определяется и показатель ослабления, атмосфера однородна, т.е. принимаем, что в пределах базы $\mu = \text{const}$.

Таким образом, для определения $S_{\text{Виз}}$ достаточно измерить коэффициент пропускания атмосферы τ на трассе в пределах измерительной базы B , приводимой к километровой единице длины, что и выполняется на авиаметеорологических станциях для обеспечения безопасности взлёта и посадки воздушных судов [5, 9].

Для определения τ применяются трансмиссометры, которые разделяются на однобазовые и двухбазовые:

- трансмиссометр однобазовый состоит из двух блоков, размещённых на концах измерительной базы: блока излучения на одном конце и фотозлектрического приёмника на другом (трансмиссометр Vaisala LT31);
- в трансмиссометре двухбазовом на одном конце измерительной базы размещается блок приёмоизлучающий, на другом – отражатель и приёмник света [8].

Поскольку все трансмиссометры являются оптико-электронными приборами, то в целях обеспечения соответствия результатов измерения $S_{\text{Виз}}$ в них равенство $E_{\Gamma\text{Л}}$ соответствующему параметру фотоприёмника обеспечивается оптическим фильтром и корректировкой в электронной схеме обработки сигнала с приёмника излучения, а для работы в тёмное время суток учитывается яркость фона на трассе и параметры светосигнальной системы ВПП.

Для повышения достоверности определения $MOR_{\text{Виз}}$ в любых метеорологических условиях и в тёмное время суток в основу программного обеспечения контроллера должно быть положено соотношение (5), а также соотношение, учитывающее значение показателей преломления атмосферы при $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ и при длине волны излучателя ($\lambda_{\text{изл}}$).

2. Функциональная схема и состав измерителя метеорологической оптической дальности

На АО «ЛОМО» разработан и изготавливается двухбазный трансмиссометр нового поколения с диапазоном измерения MOR от 20 м до 10000 м при измерительной базе $B = 35 \text{ м}; 70 \text{ м}; 100 \text{ м}$.

Функциональная схема измерителя MOR представлена на рис. 1.

Измеритель дальности видимости для определения MOR конструктивно выполнен в виде двухбазового трансмиссометра [6] и состоит из блока фотометрического (БФ), который формирует импульсный оптический сигнал светового потока Φ_0 .

Световой поток, ослабленный слоем атмосферы на дистанции L (35, 70, 100) м, поступает на отражательный блок (БО) и попадает на полупрозрачное зеркало. 30% светового потока проходит через полупрозрачное зеркало на фотоприёмник, установленный в БО, 70% светового потока отражаются и, пройдя через объектив БО, слой атмосферы на дистанции L обратно поступает на приёмную систему БФ. БФ осуществляет обработку сигнала, поступившего с фотоприёмников БО, БФ, и рассчитывает коэффициент пропускания τ атмосферы для обоих измерительных баз $L, 2L$, а также производит расчёт MOR для обоих измерительных баз. БФ обеспечивает индикацию измеренных и расчётных значений τ и MOR . Применение двух измерительных баз позволяет расширить диапазон определения MOR с требуемой погрешностью.

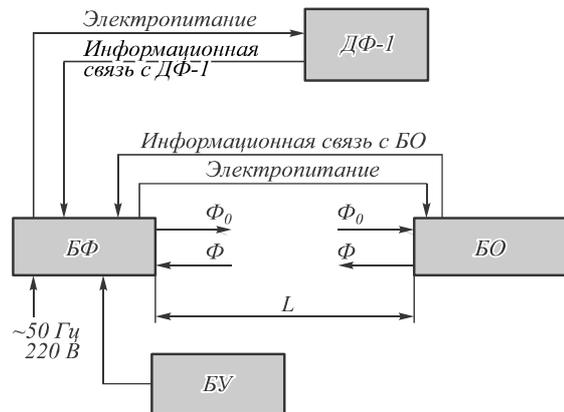


Рис. 1. Функциональная схема измерителя MOR

Датчик яркости фона (ДФ-1) измеряет яркость через непосредственное измерение освещённости в северной части небосвода, прилегающего к горизонту (в пределах 10°), при отсутствии влияния прямых солнечных лучей и огней взлётно-посадочной полосы [7].

Блок управления (БУ) производит автоматизированные вычисления дальности видимости на ВПП. Оператор выбирает тип светосигнальной системы и включает ступень яркости в зависимости от метеорологических условий. Автоматически программа БУ выбирает таблицу пересчёта, соответствующую освещённости (день, пасмурно днём, сумерки, ночь), определяет значение дальности видимости по изменённому значению MOR .

Внешний вид измерителя MOR дальности представлен на рис. 2. Измеритель MOR состоит из следующих составных частей:

- измеритель MOR – ФИ-4;
- блок фотометрический;
- блок отражательный;
- датчик фона ДФ-1, установленный на стойке БФ;
- блок управления – контроллер, определяющий значение MOR и RVR с учётом яркости фона.

Оптическая система измерителя MOR

Принципиальная оптическая схема MOR , представленная на рис. 3, состоит из фотометрического и отражательного блоков, расположенных друг относительно друга на расстоянии $B_{S_{\Gamma\text{Л}}}$ (база трансмиссометра).

Фотометрический блок включает в себя:

- излучающий канал, включающий в себя излучатель (светодиод) 1, расположенный в фокусе объектива 3;
- основной фотоприёмный канал, включающий в себя фотоприёмник с диафрагмой 11, расположенный в фокусе сферического зеркала 9, светофильтр 10;
- канал сравнения, включающий в себя светофильтр 13 и фотоприёмник 14;
- светоделительная пластина 2;
- защитное стекло 4.
- Блок отражательный в составе: защитное стекло 5, объективов 6, 7, в фокальной плоскости объектива установлено вогнутое сферическое зеркало 8 с отверстием по центру, фотоприёмник с диафрагмой 12.



Рис. 2. Внешний вид измерителя: 1 – блок отражательный, 2 – блок фотометрический, 3 – датчик фона, 4 – блок управления с вычислителем

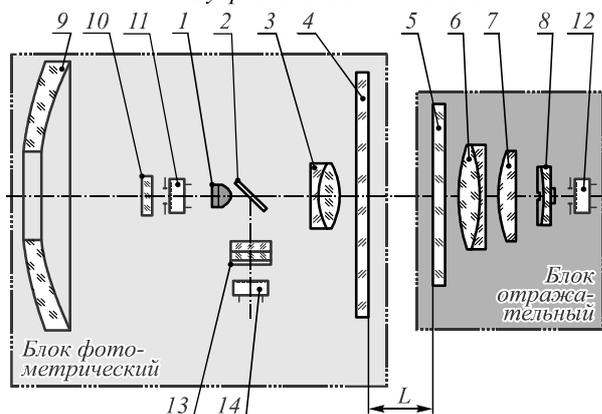


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема двухбазного трансмиссометра, АО «ЛОМО»

Особенностью разработанной схемы является реализация двух методов измерения τ на прямом проходе от излучателя 1 до фотоприёмника с диафрагмой 12 и обратном проходе от излучателя 1 до отражательного блока и до приёмника 14. Такое построение схемы позволяет реализовать метод корреляционной обработки сигналов для случая, когда имеем дело с множеством независимых, подчиняющихся закону Гаусса «раздвоенных сигналов», т.е. когда один и тот

же эхо-сигнал на входе распараллеливается с задержкой одного относительно другого на некоторое время, например, один сигнал проходит через RC-цепочку. Таким образом, коэффициент корреляции Пирсона можно в нашем случае для N эхо-сигналов преобразовать в следующий вид:

$$r_{12;14} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{12;i} - x_{14;i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{12;i} - x_{14;i})^2}}, \tag{8}$$

где $r_{12;14}$ – коэффициент взаимной корреляции; $x_{12;i}$ и $x_{14;i}$ – отсчёты от 12 и 14 фотоприёмников; N – число отсчётов за один цикл измерения. Стабильность $r_{12;14}$ показывает достоверность выполненных измерений. Все процессы и явления стохастические, т.е. носят вероятностный характер, и только определены граничные условия, мы оперируем понятием «стационарность». В этой связи «стабильность $r_{12;14}$ » не означает $r_{12;14} = \text{const}$, а означает стабильность в пределах допуска (в нашем случае допуск на изменение $r_{12;14}$ составляет не более 5%).

Калибровка фотоприёмников выполняется по общепринятой методике при проведении периодических регламентных работ.

Заключение

В результате разработанный измеритель дальности видимости АО «ЛОМО» имеет следующие технические характеристики, приведённые в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики

Диапазон измерения MOR, м при измерительной базе (35,0 ± 0,2), (70,0 ± 0,2), (100,0 ± 0,2) м	от 18 до 10000
Пределы допускаемой относительной погрешности определения MOR	± 15 % в диапазоне измерения МДВ менее 250 м; ± 10 % в диапазоне измерения МДВ свыше 250 до 3000 м; ± 20 % в диапазоне измерения МДВ свыше 3000 до 10000 м
Диапазон измерений светового коэффициента направленного пропускания (СКНП), %	0,1 – 100
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения СКНП при времени осреднения 60 с	± (0,2+0,08τ) % в диапазоне измерения СКНП от 0,1 до 10 %; ± 1,0 % в диапазоне измерения СКНП от 10 до 100 %
Диапазон определения дальности видимости на ВПП	от 50 до 2000 м
Пределы допускаемой относительной погрешности определения дальности видимости на ВПП	± 10 м при дальности видимости на ВПП до 150 м; ± 25 м при дальности видимости на ВПП от 150 до 500 м; ± 10 % при дальности видимости на ВПП более 500 м

Литература

1. **Гаврилов, В.А.** Видимость в атмосфере / В.А. Гаврилов. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 324 с.
2. **Ковалев, В.А.** Видимость в атмосфере и её определение / В.А. Ковалев. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 216 с.
3. **Сафонова, Т.В.** Авиационная метеорология: учебное пособие / Т.В. Сафонова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. – 215 с.
4. **Максютова, Е.А.** Решение алгебраических уравнений 4-й степени в «Универсальной арифметике» Л.Эйлера / Е.А. Максютлова // Наука и мир. – 2014. – № 6(10), Т. 1. – С. 98-101.
5. РД 52.21.680-2006. Руководство по определению дальности видимости на ВПП (RVR). – Москва: Издательский центр АНО «Метеоагентство Росгидромета», 2006. – 98 с.
6. **Волков, О.А.** Измеритель дальности видимости / О.А. Волков, С.А. Денисенко, К.В. Константинов, Р.А. Круглов // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 71-74.
7. **Волков, О.А.** Аэродромный датчик яркости фона / О.А. Волков, А.В. Демин, К.В. Константинов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 878-881. – DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-878-881.
8. **Пат. 2070717 Российская Федерация G 01 J 1/44.** Базисный фотометр / Гончаров Ю.М., Волков О.А., Круглов Р.А., Персин С.М.; правообладатель Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова; заявл. 03.03.1993, опубл. 20.12.1996.
9. Авиационные правила. Часть 170. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс. (АП-170). Том II. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс. – 3 изд. – 2013. – 217 с.
10. Межотраслевая Интернет-система поиска и синтеза физических принципов действия преобразователей энергии [Электронный ресурс] – 2008 – URL: http://scorcher.ru/art/theory/vacuum/spontan_rad.htm (дата обращения 17.02.2017 г.).

Сведения об авторах

Волков Олег Алексеевич, 1941 года рождения, кандидат технических наук, заместитель начальника конструкторского бюро научной астрономии и аэродромного оборудования, АО «ЛОМО», автор 140 изобретений и более 30 статей. E-mail: ovolkov@lomo.sp.ru.

Демин Анатолий Владимирович, 1945 года рождения, в 1969 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО). Доктор технических наук, профессор. С 2009 года является заведующим кафедрой оптико-цифровых систем и технологий (базовая кафедра на АО «ЛОМО»). Специалист в области математического моделирования оптико-цифровых систем и комплексов. E-mail: dav_60@mail.ru.

Константинов Константин Владимирович, 1981 года рождения, кандидат технических наук, начальник оптико-электронного отделения конструкторского бюро научной астрономии и аэродромного оборудования, АО «ЛОМО», автор 8 изобретений и 5 статей. E-mail: const_cv@mail.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 9 апреля 2017 г. Окончательный вариант – 20 ноября 2017.

AN OPTICAL SYSTEM OF A SENSOR FOR MEASURING THE METEOROLOGICAL OPTICAL RANGE

O.A. Volkov¹, A.V. Demin², K.V. Konstantinov¹

¹JSC "LOMO", Saint-Petersburg, Russia,

²St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Principles of constructing an optical sensor for measuring a meteorological visibility range are considered. A new relationship for the visibility range determination is obtained. An optical scheme of the meteorological visibility range sensor is described and characteristics of the new sensor are presented.

Keywords: optical system, meteorology, measurement, visibility, transmissometer, aeronautical meteorological station.

Citation: Volkov OA, Demin AV, Konstantinov KV. An optical system of a sensor for measuring the meteorological optical range. Computer Optics 2018; 42(1): 67-71. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-67-71.

References

- [1] Gavrilov VA. Visibility in the atmosphere [In Russian]. Leningrad: "Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo" Publisher; 1966.
- [2] Kovalev VA. Visibility in the atmosphere and its definition [In Russian]. Leningrad: "Gidrometioizdat" Publisher; 1988.
- [3] Safonova TV. Aeronautical meteorology. Manual [In Russian]. Ulyanovsk: "UVAU GA" Publisher; 2005.
- [4] Maxutova EA. Solution of the algebraic equations of the 4th degree in "General arithmetic" of L. Euler. Science and World 2014; 6(1): 98-101.
- [5] RD 52.21.680-2006. Guide to determine the range of visibility on the runway (RVR) [In Russian]. Moscow: "ANO Meteoagenstvo Rosgidrometa" Publishing House; 2006.
- [6] Volkov OA, Denisenko SA, Konstantinov KV, Kruglov RA. Visibility-range meter. J Opt Techn 2009; 76(10): 647-650. DOI: 10.1364/JOT.76.000647.

-
- | | |
|--|--|
| <p>[7] Volkov OA, Demin AV, Konstantinov KV. Airfield sensor of the background brightness [In Russian]. <i>Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy: Priborostroenie</i> 2015; 58(11): 878-881. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-878-881.</p> <p>[8] Goncharov UM, Volkov OA, Kruglov RA, Persin CM. Basic photometer [In Russian]. Pat RF of Invent N 2070717 of December 20, 1996.</p> | <p>[9] Aviation Regulations. Part 170. Vol. II. Certification requirements for aerodrome and air-route equipment. 2013.</p> <p>[10] An Inter-branch online system for searching for and synthesizing the physical principles of energy converter operation. Source: http://scorcher.ru/art/theory/vacuum/spontan_rad.htm.</p> |
|--|--|
-

Author's information

Oleg Alekseevich Volkov (b.1941), is a candidate of Technical Sciences, deputy head of Sense Astronomy and Airfield Equipment department (JSC "LOMO"). Author of 140 inventions and more then 30 articles.

E-mail: oavolkov@lomo.sp.ru.

Anatoliy Vladimirovich Demin (b. 1945), graduated from Leningrad Institute of Accurate Mechanics and Optics in 1969. Doctor of Technical Sciences, Professor. Since 2009 is the head of Optical Digital Systems and Technology department (basic department at JSC "LOMO"). Specialist in the field of mathematical modeling of opto-digital systems and complexes. E-mail: dav_60@mail.ru.

Konstantin Vladimirovich Konstantinov, (b.1981), is a candidate of Technical Sciences, a header of the Opto-electronic Office of Sense Astronomy and Airfield Equipment department (JSC "LOMO"). Author of 8 inventions and 5 articles. E-mail: const_cv@mail.ru.

Received April 9, 2017. The final version – November 20, 2017.
