

Гайдук Анатолий Романович – Южный федеральный университет; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра САУ; профессор.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371694; кафедра робототехники и мехатроники; зав. кафедрой; профессор.

Плаксенко Елена Анатольевна – Таганрогский институт управления и экономики; e-mail: pumkad@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 45; тел.: 88634362583; кафедра математики и информатики; доцент.

Gaiduk Anatoly Romanovich – Southern Federal University; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; professor.

Medvedev Mikhail Yurevich – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of robototekhnik and mekhatronik; head of department; professor.

Plaksienko Elena Anatolievna – Taganrog Institute of Management and Economy; e-mail: pumkad@mail.ru; 45, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634 362583; the department of mathematic and informatics; associate professor.

УДК 535.1:535.2:623.6

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-279-291

Е.Н. Семашкин

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВСЕПОГОДНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается методология определения показателей всепогодности оптических каналов управления и передачи информации в совокупности условий, определяющих прозрачность атмосферы. Рассматривается приземный слой атмосферы до нижней границы облачности. Алгоритм построен на базе экспериментального распределения дальности метеовидимости в функции дефицита влажности атмосферы, полученного Лабораторией атмосферной оптики Главной геофизической обсерватории (г. Ленинград) в 1967 году для четырёх метеопунктов Советского Союза: Воейково (г. Ленинград), Меганом (Крым), Чакви (Батуми, Грузия) и Пицунда (Абхазия). Дефицит влажности определяется температурой и относительной влажностью воздуха, что допускает при его определении использования эмпирических законов распределения «температура – относительная влажность воздуха» для ряда метеопунктов холодного, умеренного и жаркого климатов. Добавление к нему блоков осадков и тумана позволяет получать полный показатель ослабления оптических сигналов атмосферой, вычислять дальность действия канала и частоту работы канала на фиксированной дальности в совокупности условий окружающей среды. Технология определения дальности обнаружения площадных объектов осуществляется на базе теории линейной фильтрации, при которой контрасты от объекта наблюдения, прошедшие через рассеивающую и неоднородную атмосферу, сравниваются с контрастами, разрешаемыми прибором. Ослабление сигналов в атмосфере определялось на основе соотношений Рэлея и теории Ми. Для иллюстрации возможностей методики определены показатели всепогодности трёх наблюдательных приборов с узкими (около 1°) полями зрения: телекамеры (диапазон длин волн $\Delta\lambda=0,5\div0,7$ мкм), тепловизор средневолнового диапазона ($\Delta\lambda=3,7\div4,8$ мкм) и тепловизор длинноволнового диапазона ($\Delta\lambda=7,7\div10$ мкм). Зрительная задача предполагает обнаружение объекта размером 3×3 м, имеющего визуальный контраст 0,2 и температурный контраст $\Delta T=2^\circ$. Наблюдение осуществляется в двух метеопунктах с сильно отличающимися климатическими характеристиками: влажном и холодном Диксоне и жарком и сухом Аиххабаде. В результате моделирования установлено, что в холодном влажном климате телекамера на всех дальностях действия сильно проигрывает тепловизору. Показатели всепогодности тепловизоров в жарком сухом климате на 10÷15 % выше, чем во влажном холодном.

Оптические каналы.

E.N. Semashkin

TECHNIQUE OF ESTIMATION OF ALL-WEATHER CAPABILITY IN OPTICAL CONTROL CHANNELS

The article herein deals with the all-weather factors estimation techniques in optical control and information transfer channels on the basis of the conditions package which determines atmosphere transparency. The analysis herein considers the surface layer up to the cloud base. The algorithm has been elaborated on the basis of meteorological visibility distribution vs atmosphere humidity deficit. The used meteorological visibility distribution data have been received experimentally by the Atmosphere Optics Laboratory working with the General Geophysical Observatory (St. Petersburg) in 1967 fusing from four meteorological points in the former Soviet Union: Voeykovo (St. Petersburg), Meganom (the Crimea), Chakvi (Batumi, Georgia), and Pitsunda (Abkhazia). The humidity deficit depends on air temperature and relative humidity to allow using an empirical distribution law – “temperature – relative humidity”- for its determination applied to cold, moderate and hot climate. Contributed by a package of precipitation and fog data it allows obtaining a complete attenuation index for optical signals atmospheric transmission, predicting operational range and estimating the frequency ratio of the channel for a fixed range operation taking into consideration a package of ambient conditions. The range determination technology for area objects is realized on the basis of the linear filtration theory, which compares object-under-observation contrasts passed through scattering and inhomogeneous atmosphere with the contrasts resolved by the hardware. Atmospheric signal attenuation is determined using the Rayleigh equation and the Mie theory. To illustrate the technique herein, the article offers all-weather factors data received using three types of the hardware with a narrow (about 1°) field of view: a TV camera (wave length range $\Delta\lambda=0.5\div 0.7\ \mu\text{m}$), a medium waves thermal imager ($\Delta\lambda=3.7\div 4.8\ \mu\text{m}$) and a long waves thermal imager ($\Delta\lambda=7.7\div 10\ \mu\text{m}$). The task was to detect a $3\times 3\ \text{m}$ object with a visual contrast 0.2 and temperature contrast $\Delta T=2^\circ$. The data have been received at two meteorological points with quite different climatic characteristics: humid and cold Dixon and hot and dry Ashkhabad. The modeling shows that under cold and humid climate conditions a thermal imager appears to be much superior to a TV camera, and in a hot dry climate the thermal imager all-weather capability is 10÷15 % higher compared to the one obtained under humid cold conditions.

Optical channels.

Введение. Во многих приложениях военной и гражданской областей деятельности человека используются оптические каналы управления и передачи информации. Приведём несколько примеров:

1. Противотанковые комплексы управляются по двум каналам: каналу слежения за целью «прибор наблюдения – цель» и сопряжённому с ним лазерному каналу наведения, «сообщающему» ракете о её местоположении в луче.

2. Ракеты с самонаведением имеют канал «головка самонаведения – цель», который начинает работать после того, как другая оптическая линия, «оператор – цель», а в будущем – «автоматический обнаружитель – цель» обнаружат и сообщат головке координаты цели. Сюда же можно отнести всевозможные системы технического зрения ДПЛА и других роботизированных систем.

3. В гражданской и военной сферах начинают бурно развиваться атмосферные, беспроводные оптические линии связи и передачи больших объёмов информации (длина волны $\lambda=0,8\div 1,54\ \mu\text{м}$). Они имеют русскую аббревиатуру АОЛС (атмосферные оптические линии связи), в то время как за рубежом именуется FSO – free-space optics, оптика свободного пространства, подчёркивая тем самым их независимость от оптического кабеля. Эти системы обладают удивительными свойствами: они позволяют передавать информацию над местами, где кабель проложить нельзя или очень дорого: над железной дорогой, в горах, между высотными домами. Главным свойством таких каналов является их закрытость, невосприимчивость к радиопомехам и невидимость человеческим глазом. Лазерный луч

позволяет передавать большие объёмы информации (до 10 Гбит/с). Наибольшая дальность действия подобных каналов достигнута в космосе – несколько сотен тысяч километров. Рекордным достижением является дальность приёма из космоса с автоматической станции MESSENGER лазерных сигналов с расстояния 24 млн. км! Но то – космос, а на земле это – километры и десятки километров.

Возникает вопрос: почему в системах наведения ракет так полюбили оптику?

В соответствии с критерием Рэля, свободная от аберрации линзовая система даёт угловое разрешение двух точек (рад.) в виде:

$$\Delta \delta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D_{ex}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, м; D_{ex} – диаметр входного зрачка оптической системы, м.

Рассчитаем по этой формуле идеальную разрешающую способность человеческого глаза, телекамеры и тепловизора на расстоянии 10 км (табл. 1).

Таблица 1

Разрешающая способность приборов по критерию Рэля

Наблюдательный прибор	Длина волны, мкм	Диаметр зрачка прибора, мм	Угловое разрешение, $\Delta\delta$, рад.	Пространственное разрешение на 10 км $\Delta\delta \cdot 10^4$, м
Глаз	0,55	3,5	0,000190*	1,90
Телекамера	0,55	50	0,000013	0,13
Тепловизор	4,00	100	0,000048	0,48

*Примечание: реальное разрешение человеческого глаза в полтора раза ниже, составляя одну угловую минуту (0,00029), что даёт линейное разрешение около 3 м.

Из этой таблицы видно, что оптические приборы способны дать самое точное целеуказание и обеспечить прямое попадание в малоразмерную цель (2,5×3,5 м).

Постановка задачи. Если дальность действия подобных каналов в реальной атмосфере – величина переменная, зависящая от погоды, то возникает главный вопрос: как часто на той или иной дальности работают каналы? Поэтому под всепогодностью каналов будем понимать частоту возможности выполнять свои функции на заданной дальности L^* в совокупности условий окружающей среды при N розыгрышах состояний погоды. Для каналов наблюдения это – частота обнаружения на дальности L^* , для лазерных линий – частота выполнения условия работы линии на дальности L^* (зависимость (4) и т.д.):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m n(L \geq L^*)}{N},$$

где $n(L \geq L^*)$ – количество случаев, когда дальность действия канала больше некоторой фиксированной величины L^* ; $N = 8760$ – количество розыгрышей.

Из формулы явствует, что показатель всепогодности канала связан с дальностью действия канала. Интуитивно понятно, что чем меньше дальность до объекта наблюдения, тем выше вероятность того, что мы его увидим при различных прозрачностях атмосферы. Например, на 30 м человек видит практически всегда, по-

тому что в Москве туман бывает 127 часов в году, а вероятность метеовидимости в тумане меньше 30 м составляет 0,02. Т.е., вероятность видимости на 30 м в течение года ориентировочно составляет:

$$P = 1 - \frac{127 \cdot 0,02}{8760} = 0,9997.$$

С увеличением дальности до объекта частота видимости снижается и становится равной нулю при некоторой предельной дальности, которую можно получить при самой высокой прозрачности атмосферы или на пределе возможностей прибора.

Подходы к определению дальности действия приборов сводятся к трём схемам.

В случае наблюдения площадной цели используется теория линейной фильтрации [1, 2], при которой контрасты, воспринимаемые системой «наблюдатель – прибор», имеющей некоторую модуляционно-передаточную функцию (МПФ_{пр.}), сравниваются с контрастами системы «объект – фон», прошедшими через атмосферу с модуляционно-передаточной функцией МПФ_{атм.}.

Пересечение кривых этих контрастов и даёт дальность обнаружения (а если потребуется, то и опознавания и различения, для чего заменяют пространственные частоты, под которыми виден объект, на их более высокие значения, под которыми видны детали объекта), рис. 1.

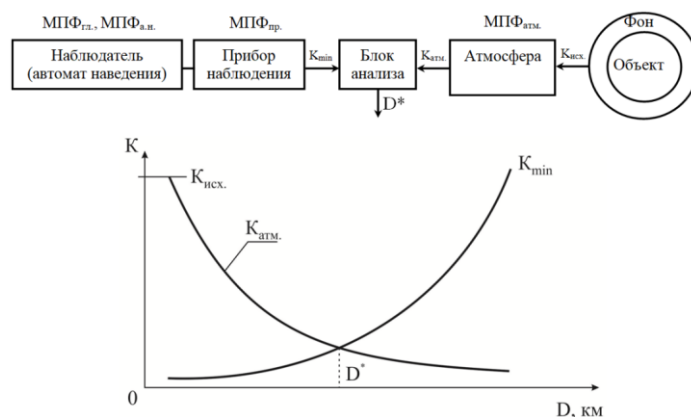


Рис. 1. Схема определения дальности действия наблюдательной системы

На схеме обозначены: МПФ_{гл.} – модуляционно-передаточная функция глаза; МПФ_{а.н.} – модуляционно-передаточная функция автомата наведения; МПФ_{пр.} – модуляционно-передаточная функция прибора; МПФ_{атм.} – модуляционно-передаточная функция атмосферы

МПФ рассеивающей и случайно-неоднородной (турбулентной) атмосферы в малоугловом приближении составит [3]:

$$МПФ_{атм.} = МПФ_{атм.р.} \cdot МПФ_{атм.т.}$$

$$МПФ_{атм.р.} = \exp \left(-\alpha \lambda + \frac{\alpha \lambda}{\sqrt{(2\pi \mu \cdot \nu')^2}} \right);$$

$$МПФ_{атм.т.} = \exp \left(-0,55 \cdot C_n^2 k^2 L \lambda^{5/3} (\nu')^{5/3} \right), \quad (2)$$

где α – показатель ослабления излучения в атмосфере; L – длина трассы наблюдения; μ – параметр формы индикатрисы рассеяния; V' – угловая пространственная частота, мрад.⁻¹; C_n^2 – структурная характеристика показателя преломления воздуха; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны.

При наблюдении прибором с матричным приёмником (телевизор, тепловизор) точечного источника излучения (летательный аппарат на большом удалении) соотношение сигнал/шум в одном из пикселей матрицы составит:

$$n(c/u) = \frac{S_{ист.} \cdot I_{ист.} \cdot D_{ex.}^2 \cdot D^* \cdot \exp(-\alpha L) \cdot \tau_{онм.}}{4 \cdot L^2 \cdot a_{эл.} \cdot \sqrt{\Delta V}}, \quad (3)$$

где $S_{ист.}$ – площадь проекции источника излучения; $I_{ист.}$ – сила излучения 1 м² поверхности источника излучения; $D_{ex.}$ – диаметр входного зрачка прибора; D^* – удельная обнаружительная способность элемента матричного приёмника (см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹); $\tau_{онм.}$ – пропускание оптики; $a_{эл.}$ – размеры пикселя матрицы, см; ΔV – частота обновления информации на матричном элементе, определяющая время его экспозиции.

Условием обнаружения источника будет неравенство:

$$n(c/u) > 3.$$

Лазерные каналы управления, имеющие гауссовское распределение энергии в пучке, будут работать на некоторой дальности L при условии:

$$\frac{4\mu \cdot P \cdot \exp\left(-\frac{4\mu \cdot R^2}{L^2 \cdot \gamma^2}\right) \cdot \exp(-\alpha \cdot L)}{L^2 \cdot \gamma^2 \cdot E_{пор.}} \geq n(c/u), \quad (4)$$

где μ – показатель крутизны гауссоиды (для $\lambda=1,06$ мкм $\mu=1,2$; для $\lambda=10,6$ мкм $\mu=2$); P – мощность излучения лазера, Вт; R – расстояние от приёмника до центра пучка, м; γ – угол расходимости лазерного пучка, рад.; $E_{пор.}$ – пороговая облученность приёмника, Вт/м²; $n(c/u)$ – соотношение сигнал/шум, при котором информация выделяется (в большинстве случаев $n(c/u) = 2 \div 3$).

Показатель ослабления атмосферой α , фигурирующий в зависимостях (2)-(4), может быть представлен в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_{M.} + \alpha_{z.} + \alpha_{aэp.} + \alpha_{m.} + \alpha_{zm.}, \quad (5)$$

где $\alpha_{M.}$ – показатель рассеивания молекулами воздуха (рэлеевское рассеивание); $\alpha_{z.} = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2}$ – показатель газового поглощения сигналов (главным образом это водяной пар и углекислый газ); $\alpha_{aэp.}$ – показатель аэрозольного ослабления; $\alpha_{m.}$ – показатель ослабления туманами; $\alpha_{zm.}$ – показатель ослабления гидрометеорами (дождями, снегопадами).

Формула (5) показывает аддитивный характер учёта показателей ослабления, хотя полный набор из пяти показателей не встречается практически никогда. Постоянно в показателе присутствуют первые три величины, а остальные две добавляются к ним попеременно.

Рассматривая молекулы воздуха как вторичные осцилляторы, Рэлей вывел зависимость для показателя рассеивания в газах:

$$\alpha_m = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2 \cdot (6 + 3\delta)}{3N\lambda^4 \cdot (6 - 7\delta)}, \quad (6)$$

где N – число молекул в единице объёма; $n = 1,00029$ – показатель преломления воздуха; $\delta = 0,035$ – фактор деполяризации рассеянного излучения.

Этой формулой Рэлей первым красиво объяснил человечеству синий цвет чистого неба и красный цвет заходящего солнца.

Полидисперсные показатели ослабления туманами и дождями могут быть определены как:

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot Q(r/\lambda) n_m(r) dr; \\ \alpha_{z.m.} &= \int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot Q(r/\lambda) n_{z.m.}(r) dr, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Q(r/\lambda)$ – фактор эффективности ослабления излучения с длиной волны λ частицей с радиусом r (определяется по теории Ми, а комплексные показатели преломления воды даны в работах В.Е. Зуева [4], [5]); $n_m(r)$, $n_{z.m.}(r)$ – счётная концентрация капель тумана и дождя соответственно, приходящаяся на единицу длины размера частиц. В соответствии с [6], данные концентрации выражаются через дальность метеовидимости в тумане и интенсивность дождя.

Наиболее сложная проблема состоит в учёте поглощения сигналов аэрозолями атмосферы и водяным паром, которые обладают чрезвычайно сильной изменчивостью во времени и пространстве [7–9]. Атмосферные аэрозоли – это частицы, получившиеся путём гетерогенной конденсации водяного пара на твёрдых микроядрах. Ядра размером $0,001 \div 0,01$ мкм заносятся с пустынь и океанов на материки и становятся прародителями частиц дымок, обрастая водой до размеров $0,1 \div 2$ мкм. Но аэрозольные частицы не только растут, но и деградируют при высокой температуре и сухом воздухе. Попеременное и непредсказуемое течение этих процессов делает задачу описания их дисперсного состава трудноразрешимой. Поэтому для описания эволюции показателя аэрозольного ослабления мы обратились к экспериментальной метеорологии, которая [10] на протяжении 30 лет изучала распределения дальности метеовидимости в функции влагосодержания атмосферы для четырёх метеопунктов СССР: Воейково (Ленинград), Меганом (Крым), Батуми (Грузия) и Пицунды (Абхазия). Именно дальность метеовидимости является мерилем аэрозольного ослабления для глаза человека, на этой длине волны водяной пар прозрачен. Она выведена для длины волны $\lambda = 0,55$ мкм, на которой – максимальная контрастная чувствительность глаза (0,02). Поэтому наблюдая большой объект с абсолютным контрастом, равным 1, получаем из закона Бугера:

$$\alpha_{0,55} = \frac{\ln(1/0,02)}{S_M} = \frac{3,912}{S_M}, \quad (8)$$

где S_M – дальность метеовидимости.

Для произвольной длины волны аэрозольное ослабление можно определить как [11]:

$$\alpha_\lambda = \alpha_{0,55} \cdot (h_0 + h_1 \cdot \lambda^{-h_2}), \quad (9)$$

где h_0 , h_1 и h_2 – коэффициенты, зависящие от типа дымки.

Итак, используя график (рис. 2), нам удалось определить линию регрессии для данной группировки точек и границы распределения точек.

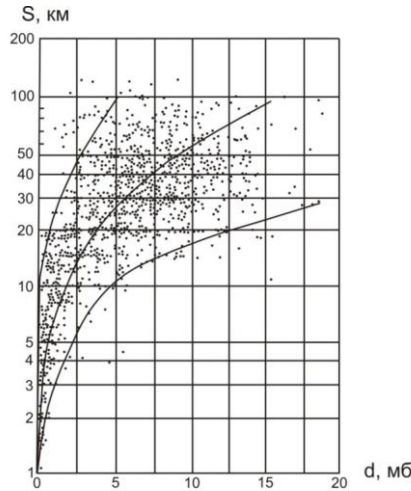


Рис. 2. Зависимость дальности метеовидимости S_M от дефицита влажности d

Дефицит влажности:

$$d = E \cdot (1 - W). \quad (10)$$

W – относительная влажность воздуха в долях единицы.

Упругость насыщенного пара:

$$E = \exp(-0,000311 \cdot t^2 + 0,0758 \cdot t + 1,81), \text{ мб}; \quad (11)$$

$$m_{S_M} = \exp(1,98 \cdot d^{0,31}). \quad (12)$$

Границы:

$$S_M^{\text{г.}} = \begin{cases} \exp(2,71 \cdot \exp(0,1 \cdot d)), & \text{если } d < 5 \text{ мб}; \\ 100, & \text{если } d \geq 5 \text{ мб}; \end{cases} \quad (13)$$

$$S_M^{\text{н.}} = \begin{cases} \exp(d^{0,52}), & \text{если } d < 5 \text{ мб}; \\ \exp(2,24 \cdot d^{0,1}), & \text{если } d \geq 5 \text{ мб}; \end{cases}$$

$$\sigma_{S_M} = \frac{(m_{S_M} - S_M^{\text{н.}})}{3}; \quad (14)$$

$$S_M = m_{S_M} + \sigma_{S_M} \cdot \xi, \quad (15)$$

где ξ – нормально распределённое число.

Из зависимостей видно, что дефицит влажности определяется температурой и относительной влажностью воздуха, совместные законы распределения которых известны в экспериментальной метеорологии для целого ряда метеопунктов [12–18] (табл. 2).

Таблица 2

**Продолжительность сочетаний (часы)
«температура – относительная влажность воздуха» для города Москва**

Температура		Относительная влажность,%																
		16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	91-95	96-100
°С	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
-44,9:-40	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
-39,9:-35	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
-34,9:-30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	7	1	0	0	0	0
-29,9:-25	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	17	13	5	1	0	0
-24,9:-20	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	8	25	38	45	14	2	0
-19,9:-15	6	0	0	0	0	0	0	2	4	8	8	15	33	54	79	47	14	2
-14,9:-10	7	0	0	0	2	3	4	7	9	14	24	36	64	89	132	116	44	9
-9,9:-5	8	0	0	1	3	4	7	11	15	28	30	37	78	107	171	193	113	44
-4,9:-0,1	9	0	0	3	4	8	14	20	23	32	43	72	93	132	187	242	259	122
0,0:4,9	10	0	1	3	5	8	15	22	28	36	54	67	95	127	171	247	309	208
5:9,9	11	0	0	4	8	14	22	29	37	50	56	72	82	106	128	176	179	96
10:14,9	12	0	1	8	17	29	38	18	55	60	72	90	101	126	155	208	206	65
15:19,9	13	0	3	14	26	44	60	66	73	90	97	111	113	124	107	107	95	23
20:24,9	14	1	4	13	29	58	63	79	79	77	63	50	35	22	14	7	0	0
25:29,9	15	2	5	14	26	33	35	23	12	5	2	1	0	2	0	0	0	0
30:34,9	16	1	4	4	6	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Общее количество часов в таблице равно годовому количеству часов 8760. Для розыгрыша этого распределения последовательно берём из таблицы сочетания «t-w» (середины интервалов) столько раз, сколько часов оно продолжается. Так, например, сочетание +2,5 °С и 93 % влажности берём 309 раз и т.д. Затем определяем дефицит влажности и по системе формул (10)-(15) проводим розыгрыш дальности метеовидимости, что позволяет построить закон распределения дальности метеовидимости. Точность построения этих законов проверялась нами в Туле, в КБП, в ходе экспериментальных исследований и показала хорошее согласие (рис. 3). Чуть более высокая кривая для Тулы объясняется её более южным (на 180 км) положением. Среднегодовая температура в Туле почти на 2° выше, чем в Москве.

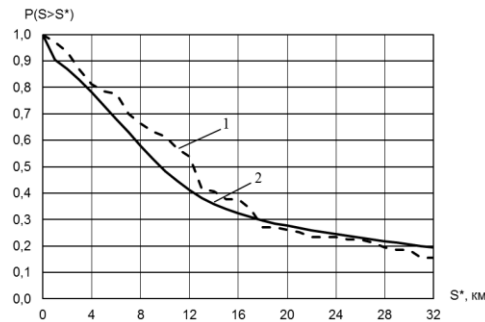


Рис. 3. Кривые распределения метеовидимости: 1 – экспериментальные данные для Тулы; 2 – результаты моделирования для Москвы

В полном виде алгоритм определения показателей ослабления погодных явлений представлен на рис. 4.

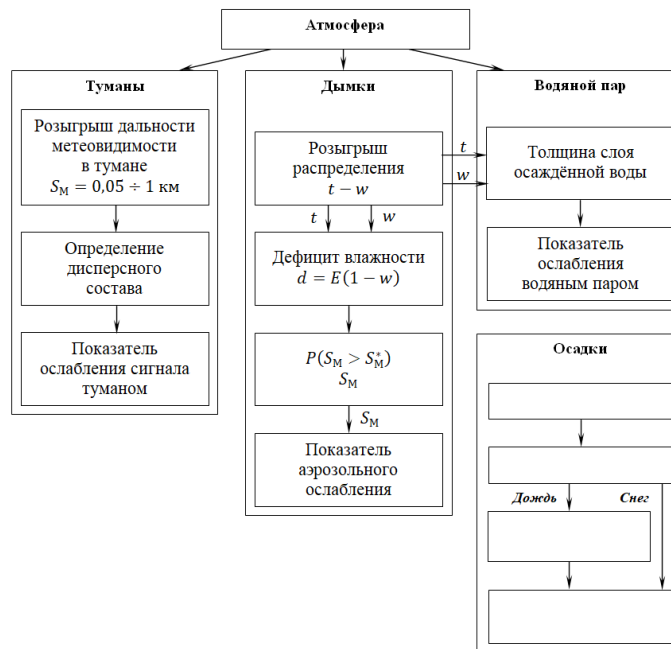


Рис. 4. Алгоритм вычисления оптических показателей погодных явлений

Блок моделирования прозрачности атмосферных дымок – главный в данной программе (рис. 4), ибо он даёт от 70 до 99 % всех оптических состояний атмосферы в зависимости от типа метеопункта. Дополнительные блоки туманов и осадков присоединяются к нему с помощью специальной логики, изложенной в [6]. При этом нормировочными условиями являются количество часов с туманом и суммарное количество выпавших осадков, известных для конкретного метеопункта [19–21].

Результаты исследования. Для демонстрации метода приведём решение одной из практических задач.

Наблюдение ведётся телекамерой и двумя тепловизорами, характеристики которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные характеристики приборов наблюдения

Прибор наблюдения	Диаметр зрачка, мм	Фокусное расстояние, мм	Размерность матрицы, по строке и кадру	Размер пикселя по строке и кадру, мкм	Угловое поле зрения по горизонтали и вертикали, градусы
Телекамера	50	400	1000×1000	4×4	0,6×0,6
Тепловизор «MATIS-AP», $\lambda = 3,7 \div 4,8$ мкм	130	530	640×512	20×20	1,3×0,9
Тепловизор «Condor», $\lambda = 7,7 \div 10$ мкм	200	530	640×512	20×20	1,3×0,9

Цель наблюдения: обнаружить объект размером 3×3 м, имеющий визуальный контраст 0,2 и температурный контраст $\Delta T = 2^\circ$. Это может иметь место при полёте на наблюдателя вертолёт голубого цвета на фоне пасмурного неба, с высокой для вертолёт скорости ~70 м/с (250 км/ч). Результаты представлены на двух рисунках (рис. 5 и 6), с контрастными климатами: Диксон и Ашхабад.

Таблица 4

Характеристики климатов

Метеопункт	Тип климата	Годовая продолжительность туманов, ч	Годовая продолжительность дождей, ч	Годовая продолжительность снегопадов, ч	Среднегодовое количество осадков, мм
Диксон	Влажный холодный -50÷+20°	576	1190	973	367
Ашхабад	Жаркий сухой -20÷+45°	52	174	17	230

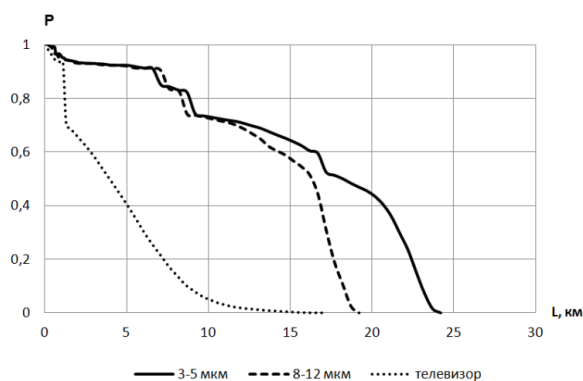


Рис. 5. Всепогодность тепловизоров и телевизора в функции дальности на горизонтальных трассах для холодного арктического морского климата (г. Диксон). Высота цели 3 м

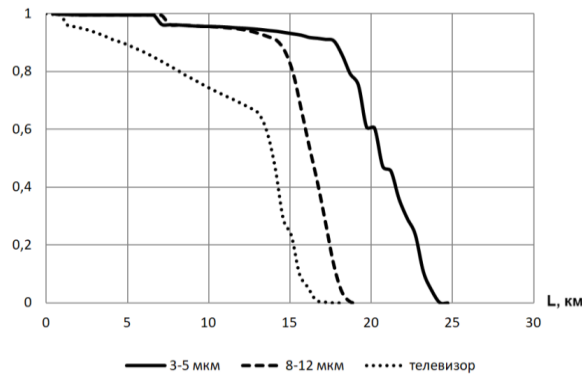


Рис. 6. Всепогодность тепловизоров и телевизора в функции дальности на горизонтальных трассах для сухого субтропического климата (г. Ашхабад). Высота цели 3 м

Выводы. Большое количество часов с туманами и осадками объясняет появление «верхней (7 %) полки» на графике для Диксона. На средних дальностях преимущество тепловизора составляет более 2-х раз. Дальность действия телевизора сильно лимитируется зимними дымками.

В жарком сухом климате телекамера более всепогодна, а тепловизоры до 7 км имеют всепогодность, близкую к 100 %.

До 15 км разница между тепловизорами незначительна, после чего тепловизор 3÷5 мкм начинает превосходить своего оппонента за счёт лучшей модуляционно-передаточной функции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань: Изд-во ФНПЦ НПО ГИПО, 2006.
2. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 245 с.
3. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 352 с.
4. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. – М.: Советское радио, 1966. – 318 с.
5. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. – М.: Советское радио, 1970. – 496 с.
6. Шитунев А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, всесуточность и всепогодность тепловизионных и телевизионных приборов наблюдения: монография. – М.: Машиностроение, 2011. – 218 с.
7. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 254 с.
8. Зуев В.Е., Креков М.Г. Оптические модели атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 256 с.
9. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 224 с.
10. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Труды ГГО. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – Вып. 220.
11. Филиппов В.Л., Мирумянц С.О. Аэрозольное ослабление ИК-радиации в «окнах прозрачности» атмосферы // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1971. – Т. 8, № 7. – С. 818-819.

12. Климаты зарубежной Азии / ред. А.Н. Лебедев. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
13. Климаты Южной Америки / под общ. ред. А.Н. Лебедева, И.Д. Копанева. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 328 с.
14. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. – Введ. 1981-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 140 с.
15. ГОСТ 25870-83. Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. – Введ. 1984-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 160 с.
16. Параметры тропического климата для технических целей / под общ. ред. А.Н. Лебедева, В.Н. Лашкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 516 с.
17. Справочник по климату СССР. Устойчивость и точность климатических характеристик / под ред. О.А. Дроздова, И.Д. Копанева. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Т. 1: Солнечное сияние. Температура воздуха и почвы. – 396 с.
18. Справочник по климату СССР. Устойчивость и точность климатических характеристик / под ред. О.А. Дроздова, И.Д. Копанева. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Т. 2: Влажность воздуха. Атмосферные осадки. Снежный покров. – 344 с.
19. *Забродский Г.М.* Труды Арктического и антарктического института. Вопросы физики облаков и туманов.. – 1962. – Т. 239, вып. 2. – С. 48.
20. *Забродский Г.М.* Труды Всесоюзного научного метеорологического совещания. – 1963. – Т. VI. – С. 102.
21. *Алибегова Ж.Б.* Пространственно-временная структура полей жидких осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 231 с.

REFERENCES

1. *Ivanov V.P., Kurt V.I., Ovsyannikov V.A., Filippov V.L.* Modelirovanie i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov [Modeling and evaluation of modern thermal imaging devices]. Kazan': Izd-vo FNPTs NPO GIPO, 2006.
2. *Kovalev V.A.* Vidimost' v atmosfere i ee opredelenie [Visibility in the atmosphere and its definition]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 245 p.
3. *Karasik V.E., Orlov V.M.* Lazernye sistemy videniya [Laser system vision]. Moscow: Izd-vo MGTU im. Bauman, 2001, 352 p.
4. *Zuev V.E.* Prozhachnost' atmosfery dlya vidimykh i infrakrasnykh luchey [The transparency of the atmosphere for visible and infrared rays]. Moscow: Sovetskoe radio, 1966, 318 p.
5. *Zuev V.E.* Rasprostranenie vidimykh i infrakrasnykh voln v atmosfere [Propagation of visible and infrared waves in the atmosphere]. Moscow: Sovetskoe radio, 1970, 496 p.
6. *Shipunov A.G., Semashkin E.N.* Dal'nost' deystviya, vsesutochnost' i vsepogodnost' televizionnykh i teplovizionnykh priborov nablyudeniya: monografiya [Range, secutest and all-weather capability of television and thermal imaging surveillance devices: monograph]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 218 p.
7. *Zuev V.E., Kabanov M.V.* Optika atmosfernogo aerolya [Optics of atmospheric aerosol.]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 254 p.
8. *Zuev V.E., Krekov M.G.* Opticheskie modeli atmosfery [Optical models of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 256 p.
9. *Kondrat'ev K.Ya., Moskalenko N.I., Pozdnyakov D.V.* Atmosferyy aeroly [Atmospheric aerosol]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 224 p.
10. *Barteneva O.D., Dovgyallo E.N., Polyakova E.A.* Eksperimental'nye issledovaniya opticheskikh svoystv prizemnogo sloya atmosfery [Experimental studies of the optical properties of the atmospheric surface layer], *Trudy GGO* [Proceedings of MGO]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, Issue 220.
11. *Filippov V.L., Mirumyants S.O.* Aeroly'noe oslablenie IK radiatsii v «oknakh prozhachnosti» atmosfery [Aerosol extinction of IR radiation in the "Windows of transparency" of the atmosphere], *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. Physics of atmosphere and ocean], 1971, Vol. 8, No. 7. pp. 818-819.
12. Климаты зарубежных Азий [The climates of foreign Asia], ed. by A.N. Lebedev. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 448 p.
13. Климаты Южных Америк [The climates of South America], ed. by A.N. Lebedev, I.D. Kopyanov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 328 p.

14. GOST 16350-80. Klimat SSSR [State Standard 16350-80. The climate of the USSR]. Moscow: Izd-vo standartov, 1981, 140 p.
15. GOST 25870-83. Makroklimaticheskie rayony zemnogo shara s kholodnym i umerennym klimatom [State Standard 25870-83. Macroclimatic regions of the world with cold and temperate climate]. Moscow: Izd-vo standartov, 1984, 160 p.
16. Parametry tropicheskogo klimata dlya tekhnicheskikh tseley [The parameters in tropical climate for technical purposes], ed. by A.N. Lebedeva, V.N. Lashkova. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 516 p.
17. Spravochnik po klimatu SSSR. Ustoychivost' i tochnost' klimaticheskikh kharakteristik [Handbook on the USSR climate. The stability and accuracy of climatic characteristics], ed. by O.A. Drozdova, I.D. Kopaneva. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. Vol. 1: Solnechnoe siyanie. Temperatura vozdukha i pochvy [Sunshine. The temperature of the air and soil], 396 p.
18. Spravochnik po klimatu SSSR. Ustoychivost' i tochnost' klimaticheskikh kharakteristik [Handbook on the USSR climate. The stability and accuracy of climatic characteristics], ed. by O.A. Drozdova, I.D. Kopaneva. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. Vol. 2: Vlazhnost' vozdukha. Atmosfernye osadki. Snezhnyy pokrov [The humidity of the air. Precipitation. The snow cover], 344 p.
19. *Zabrodskiy G.M.* Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo instituta. Voprosy fiziki oblakov i tumanov [Proceedings of the Arctic and Antarctic Institute. The physics of clouds and mists], 1962, Vol. 239, issue 2, p. 48.
20. *Zabrodskiy G.M.* Trudy Vsesoyuznogo nauchnogo meteorologicheskogo soveshchaniya [All-Union scientific meteorological conference], 1963, Vol. VI, pp. 102.
21. *Alibegova Zh.B.* Prostranstvenno-vremennaya struktura poley zhidkikh osadkov [Temporal and spatial structure of liquid precipitation fields]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 231 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.А. Каляев.

Семашкин Евгений Николаевич – АО «Конструкторское бюро приборостроения имени академика А.Г. Шипунова; e-mail: semashkin.e.n@gmail.com; 300001, г. Тула, ул. Щегловская засека, 59; тел.: 84872469864; д.т.н.; профессор; начальник отдела.

Semashkin Evgeniy Nikolaevich – JSC «KBP named after Academician A.G. Shipunov»; e-mail: semashkin.e.n@gmail.com; 59, Shcheglovskaya zaseka street, Tula, 300001, Russia; phone: 84872469864; dr. of eng. sc.; professor; head of department.