

В.Х. Брикенштейн, А.С. Дрофа, А.А. Шувалов, Л.И. Якушкина

ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ АЭРОДРОМА В ТУМАНЕ

Приводятся данные расчета наблюдаемого пилотом изображения ВПП аэродрома при посадке самолета в тумане. Расчеты проведены на основе использования аппарата теории линейных систем для описания переноса изображения через светорассеивающие среды. Результаты расчетов показывают, что дальность видимости ВПП в тумане оказывается более чем в 2 раза больше, чем это следует из используемой до настоящего времени теории видимости, не учитывающей дополнительный вклад рассеянного света от объекта наблюдения в яркость его изображения.

Определение дальности видимости объектов в замутненной атмосфере является важным и актуальным для ряда практических нужд народного хозяйства, в частности — для обеспечения безопасной посадки самолетов в сложных погодных условиях. Существующая до настоящего времени теория видимости в замутненной атмосфере [1–3] не может обеспечить требуемую точность определения дальности видимости наблюдаемых объектов, поскольку она недостаточно точно учитывает влияние рассеивающей среды на перенос оптического изображения. В настоящей статье приводятся результаты расчета дальности видимости взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэродрома, наблюдаемой пилотом при посадке самолета в тумане, полученные на основе использования аппарата теории линейных систем для описания переноса изображения в светорассеивающей среде.

Для анализа видимости ВПП в процессе посадки самолета в условиях тумана необходимо знать картину распределения яркости в изображении, наблюдаемом пилотом с глиссады снижения самолета. Будем считать, что в поле зрения пилота формируется изображение, состоящее из изображения ВПП на фоне поверхности земли, граничащей по линии горизонта с изображением неба. Яркость неба определяется яркостью бесконечно толстого слоя замутненной атмосферы (тумана) за счет рассеяния света от посторонних источников (например, Солнца). Будем считать также, что изображения неба и поверхности земли являются двумя бесконечными полуплоскостями с однородным распределением яркости по обе стороны от линии горизонта. Таким образом, если между наблюдателем и объектом наблюдения рассеивающая среда отсутствует, наблюдатель регистрирует следующее распределение яркости:

$$B_0(\mathbf{r}) = \begin{cases} B_n & \text{для } \mathbf{r} \in s, \\ B_\phi & \text{для } \mathbf{r} \in S, \\ B_n & \text{для } \mathbf{r} \notin s, S, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор точки наблюдения в предметной плоскости; s и S — области, занимаемые ВПП и поверхностью земли; B_n , B_ϕ и B_n — яркости ВПП, фона поверхности земли и неба соответственно. В реальных условиях атмосферы обычно $B_n > B_n > B_\phi$. Определим контраст в изображении ВПП при отсутствии тумана следующим образом:

$$K_0 = (B_n - B_\phi) / B_\phi. \quad (2)$$

Нам необходимо выяснить, как изменится контраст, когда между наблюдателем и объектом наблюдения находится рассеивающая среда. Будем считать, что рассеивающая среда и условия ее освещенности однородны по всему рассматриваемому объему среды. В реальной атмосфере такие допущения могут быть вполне оправданы для дневных условий наблюдения объектов в приземном тумане, когда наблюдатель, находящийся в толще тумана, наблюдает объект на фоне поверхности земли. Влияние неоднородных условий освещенности (в зависимости от высоты Солнца над горизонтом, альбедо подстилающей поверхности, вертикальной стратификации светорассеивающей среды) на характеристики видимости объектов рассмотрено в [3]. Найдем распределение яркости в изображении, наблюдаемом через рассеивающую среду. Будем считать, что оптическая система наблюдения (человеческий глаз) не вносит дополнительных искажений в формируемое ею изображение. Любой самосветящийся или отражающий свет диффузный объект можно рассматривать как совокупность элементарных точечных источников света. В линейной оптической системе изображение такого объекта может быть получено суперпозицией изображений отдельных точечных источников [4, 5]:

$$B(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_0(\mathbf{r}') \cdot A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot d\mathbf{r}', \quad (3)$$

где функции $A(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$, которая носит название функции рассеяния точки (ФРТ), описывает распределение яркости в изображении точечного диффузно светящегося источника единичной мощности, наблюдаемого через рассеивающую среду. Для рассматриваемой нами схемы наблюдения вид ФРТ оказывается зависящим от координаты \mathbf{r}' точечного источника в связи с тем, что линия визирования при наблюдении пилотом ВПП наклонена к наблюдаемой предметной плоскости и оптическая толщина рассеивающей среды оказывается различной для различных участков изображения. Исследование ФРТ на наклонных трассах проводилось в [6].

Для адекватного описания наблюдаемого изображения объекта в замутненной атмосфере в условиях дневной освещенности необходимо учесть также вуалирующую яркость, накладывающуюся на изображение (3) за счет рассеянного в слое между наблюдателем и объектом света от посторонних источников. Из-за вуалирующего эффекта наблюдаемая через слой яркость изображения увеличивается на некоторую величину, определяемую толщиной этого слоя и условиями его освещения [1–3]. Подставляя (1) в (3), для распределения яркости в наблюдаемом изображении с учетом вуалирующей яркости можно получить (см. [7])

$$B(\mathbf{r}) = B_{\Pi} + (B_{\Phi} - B_{\Pi}) \cdot T_{\Phi}(\mathbf{r}) + (B_{\Pi} - B_{\Phi}) \cdot T_{\Pi}(\mathbf{r}), \quad (4)$$

где

$$T_{\Phi}(\mathbf{r}) = \iint_{\mathbf{r}' \in S, S} A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot d\mathbf{r}'; \quad (5)$$

$$T_{\Pi}(\mathbf{r}) = \iint_{\mathbf{r}' \in S} A(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot d\mathbf{r}'. \quad (6)$$

Таким образом, наблюдаемое через рассеивающую среду изображение можно представить в виде трех компонент, каждая из которых характеризует изображение отдельных самосветящихся объектов с яркостями B_{Π} , $B_{\Phi} - B_{\Pi}$, $B_{\Pi} - B_{\Phi}$ соответственно. Функции $T_{\Phi}(\mathbf{r})$ и $T_{\Pi}(\mathbf{r})$ определяют распределение яркости в изображении поверхности земли и ВПП при их единичной яркости. Величины T_{Φ} и T_{Π} учитывают суммарный вклад в изображение ослабляемого рассеивающей средой прямопрошедшего света от объекта и рассеянного в среде света от объекта. Величина этого вклада зависит от угловых размеров и формы наблюдаемого объекта, а также от светорассеивающих свойств среды [7]. Заметим, что если не учитывать вклад рассеянного света в изображение объектов, то $T_{\Phi} = T_{\Pi} = \exp(-\tau)$, где τ — оптическая толщина слоя рассеивающей среды между наблюдателем и объектом. В этом случае формула (4) принимает вид (при $r \in s$):

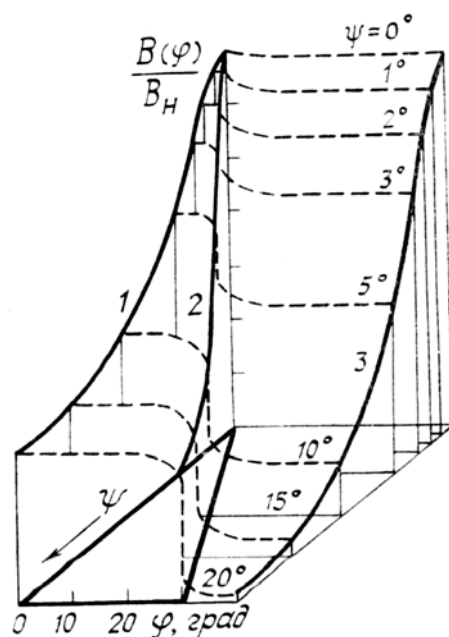
$$B = B_{\Pi} \cdot (1 - \exp(-\tau)) + B_{\Pi} \cdot \exp(-\tau), \quad (7)$$

совпадающий с формулой для ослабления яркости объекта в замутненной атмосфере [2], полученной без учета вклада рассеянного света в изображение.

Для расчетов картины изображения ВПП в тумане учтем геометрическую схему расположения ВПП в поле зрения пилота при наблюдении ее с глиссады самолета. Будем считать, что угол наклона плоскости глиссады по отношению к поверхности земли равен $2^{\circ}40'$ и самолет снижается на ВПП по прямой в точку, удаленную от порога ВПП на расстоянии 300 м. Ширина ВПП принималась равной 50 м. Координаты точки наблюдения на плоскости изображения будем характеризовать углами визирования по двум взаимно перпендикулярным осям, одна из которых (ось ψ) совпадает с осью изображения ВПП, а другая (ось ϕ) — с линией горизонта.

При практической реализации расчетов на ЭВМ интегралов суперпозиции (5) и (6) плоскость изображения разбивалась на отдельные диффузно светящиеся элементы малых угловых размеров, внутри которых оптическая толщина тумана до предметной плоскости приблизительно одинакова. Для каждого из элементов, с учетом угла наклона линии визирования на этот элемент, рассчитывалась яркость света, прошедшего через слой тумана данной оптической толщины, в направлении линии визирования. Яркость изображения ВПП находилась суммированием вклада яркостей от каждого из элементов предметной плоскости. Угловые размеры элементов изображения в форме квадрата были взяты равными $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. Угловые распределения яркости рассеянного света для отдельного элемента оценивались методом Монте-Карло по обращенной схеме, когда точечный мононаправленный источник располагался в месте нахождения наблюдателя, а рассеянный свет от источника регистрировался размещенным в предметной плоскости изотропным приемником с размерами, соответствующими угловым размерам элемента изображения. Расчеты проводились по алгоритму, изложенному в [6, 8], с использованием локальной оценки и метода сопряженных траекторий. Погрешность оценки яркости составляла не более 10%. Для описания светорассеивающих свойств тумана использовалась индикатриса рассеяния света для модельного «Облака С1» [9].

Для уменьшения затрат машинного времени на ЭВМ при расчетах изображения ВПП предварительно был создан банк угловых профилей яркости изображений отдельных элементов в тумане с различной оптической толщиной при различных углах наклона трассы наблюдения. В банке в виде таблиц содержатся профили для необходимого диапазона изменений параметров, реализующегося при расчетах изображения ВПП. Интервал между соседними значениями параметров выбран таким образом, чтобы обеспечивалась достаточно хорошая точность интерполяции данных, записанных в банке, между этими значениями. Всего в банке, хранящемся в памяти ЭВМ, содержится 168 взаимно перпендикулярных угловых профилей изображения. При расчетах изображения ВПП для заданной высоты расположения самолета над землей и заданной величине показателя рассеяния света в тумане σ при выбранном направлении визирования рассчитывается оптическая толщина слоя тумана до каждого из элементов изображения и угол наклона линии визирования на этот элемент. В таблицах банка разыскиваются записи профиля изображения с ближайшими (большими и меньшими) к найденным значениям параметров. По этим профилям методом линейной интерполяции определяется вклад каждого отдельного элемента в яркость изображения ВПП для выбранного направления визирования. Погрешности расчета, связанные с интерполяцией, как показала выборочная проверка, не выходили за рамки погрешностей расчетов методом Монте-Карло. Программа расчетов изображения ВПП реализована на ЭВМ ЕС-1065. Время расчета фрагмента изображения из 50 точек составляло 2–3 мин.



Профили изображения ВПП в тумане

Пример рассчитанного таким образом изображения ВПП, наблюдаемой с высоты 15 м через туман с $\sigma = 10 \text{ км}^{-1}$, приводится на рисунке. Данные расчета получены для контраста $K_0 = 0,6$ и $B_n/B_n = 2$. На графиках приводятся нормированные на B_n поперечные профили изображения ВПП (по одну сторону от оси ВПП) в зависимости от угла визирования φ . Кривые 1 и 2 определяют изменение яркости на оси и на краю изображения ВПП при изменении угла визирования ψ , кривая 3 — изменение яркости изображения поверхности земли. Как видно из рисунка, контраст в изображении ВПП на фоне поверхности земли уменьшается как за счет уменьшения перепада яркостей между ВПП и фоном, так и за счет увеличения яркости фона, обусловленного вуалирующим влиянием рассеянного в тумане света. Определив расстояние до ВПП, при котором наблюдатель не различает перепад яркостей между ВПП и фоном, можно узнать дальность видимости ВПП с данной высоты.

Определим контраст в наблюдаемом через туман изображении ВПП следующим образом:

$$K(\psi) = (B_n(\psi) - B_\phi(\psi)) / B_n(\psi), \quad (8)$$

где $B_n(\psi)$ и $B_\phi(\psi)$ — наблюдаемые яркости в изображении ВПП и поверхности земли при одинаковом угле визирования ψ . Используя (4), для расчета контраста можно получить следующее выражение:

$$K(\psi) = \frac{K_0 \cdot T_n(\psi)}{K_0 \cdot T_n(\psi) + \frac{B_n}{B_n} (1 - T_\phi(\psi)) + (1 - K_0) \cdot T_\phi(\psi)}, \quad (9)$$

где K_0 – истинный, не искаженный рассеивающей средой контраст, определяемый формулой (2). Если не учитывать вклад рассеянного света в формирование изображения и считать $T_\phi = T_n = \exp(-\tau)$, формула для контраста примет следующий вид:

$$K = \frac{K_0}{1 + \frac{B_n}{B_n} (\exp(\tau) - 1)}. \quad (10)$$

Выражение (10) совпадает с формулой для расчета контраста, полученной в [2] при пренебрежении вкладом рассеянного света от наблюдаемого объекта в яркость его изображения. Считая, что пороговые условия видимости ВПП реализуются при условии $K = K_{\text{пор}}$, где $K_{\text{пор}}$ – пороговое значение контраста для человеческого глаза, из уравнений (9) или (10) можно получить величину дальности видимости ВПП, т.е. то расстояние L_s , при котором наблюдаемый контраст в изображении становится равным пороговому и изображение ВПП становится невидимым на фоне поверхности земли. Применительно к условиям наблюдения ВПП из кабины самолета для величины порогового контраста возьмем $K_{\text{пор}} = 0,04$ [2]. Как следует из [2], для бетонных ВПП отношение яркости замутненного неба к яркости ВПП слабо зависит от условий освещенности и для сухой ВПП равно 1,5. Контраст K_0 для реализующихся на практике условия посадки самолетов обычно составляет 0,3–0,6 [2].

Рассмотрим результаты расчета дальности видимости ВПП для приведенных значений фотометрических параметров. При расчетах контраста по (9) в качестве яркости ВПП выберем яркость ВПП на ее оси, считая, что размытие границ наблюдаемого через туман изображения слабо влияет на визуальное восприятие изображения невооруженным человеческим глазом (см. [7]). Данные расчета дальности видимости ВПП в тумане при различных величинах контраста K_0 приводятся в табл. 1.

Некоторая зависимость дальности видимости от высоты самолета над землей объясняется изменением картины изображения ВПП в поле зрения пилота при снижении самолета, поскольку вклад рассеянного света в изображение зависит от формы и угловых размеров наблюдаемого объекта. Отметим, что при выбранной нами в расчетах геометрии траектории посадки самолет пролетает над началом ВПП на высоте $h = 14$ м и, значит, вблизи этой высоты происходят наиболее сильные изменения наблюдаемой пилотом картины изображения.

Таблица 1

Дальность видимости ВПП (в метрах) в тумане с $\sigma = 5 \text{ км}^{-1}$ при различной высоте самолета над землей

K_0	$L_s, \text{ м}$					Формула (10)
	$h, \text{ м}$					
	5	10	15	20	30	
0,30	617	667	700	634	601	343
0,45	763	782	825	759	685	421
0,60	794	831	958	843	771	478

В табл. 1 приводятся также значения L_s , рассчитанные по (10) при неучете влияния рассеянного света на изображение. При этом величина L_s не зависит от высоты самолета над землей. Из табл. 1 видно, что рассчитанные нами величины L_s превышают значения, рассчитанные по формуле (10), почти в 2 раза. Это объясняется различной величиной дополнительного вклада рассеянного в тумане света от ВПП и от поверхности земли в яркость наблюдаемого пилотом изображения. Это различие возрастает с увеличением показателя рассеяния света в тумане, в связи с чем, как это видно из данных табл. 2, увеличивается и отличие рассчитанных нами величин дальности видимости от рассчитанных по формуле (10).

В приведенных выше данных при расчетах контраста за величину яркости ВПП принималась яркость на оси ВПП. Однако, как видно из рисунка, распределение яркости в наблюдаемом через туман изображении ВПП неоднородно: на краях ВПП яркость ее изображения меньше, чем на оси. Для более надежного определения дальности видимости при расчете контраста по формуле (9) за величину яркости ВПП можно взять яркость на краю ВПП (при соответствующем угле визирования ψ). Результаты расчета L_s при таком выборе определения контраста также представлены в табл. 2. Как видно из приведенных данных, величины L_s при этом отличаются, однако это различие (до 15%) незначительно по сравнению с их отличием от результатов расчета с использованием (10), где не учитывается влияние рассеянного света на изображение в рассеивающей среде.

Дальность видимости ВПП (в метрах) с высоты $h = 15$ м при различной прозрачности тумана (верхние строчки — при определении контраста по яркости на оси ВПП, нижние — на краю ВПП)

K_0	L_s по предложенной методике			L_s по формуле (10)		
	$\sigma, \text{км}^{-1}$					
	5	10	20	5	10	20
	700	425	229			
0,30	628	363	193	343	171	86
	825	454	241			
0,45	745	406	227	421	210	105
	958	510	275			
0,60	848	449	240	478	239	119

В заключение отметим, что в данной статье влияние рассеянного света от наблюдаемого объекта на дальность его видимости продемонстрировано на простом в теоретическом отношении случае, когда рассеивающая среда и условия ее освещения однородны по всему пространству. Ясно, однако, что и в неоднородной среде, а также в неоднородных условиях ее освещенности (обусловленных неоднородностью самой среды, влиянием альbedo подстилающей поверхности, высотой Солнца над горизонтом и др.) рассматриваемый фактор также может проявляться существенным образом, и неучет этого фактора при расчетах дальности видимости может привести к сильно заниженным результатам.

1. Duntley S.O., Voileau A.R., Preisendorfer R.W. // JOSA. 1957. V. 47. № 5. P. 499–506.
2. Гаврилов В.А. Видимость в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 324 с.
3. Ruppertsberg G.H., Buell R.H., Schellhase R. // Contrib. Atmosph. Phys. 1985. V. 58. № 1. P. 53–73.
4. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1971. 364 с.
5. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 328 с.
6. Дрофа А.С., Усачев А.Л. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1985. Т. 21. № 6. С. 603–608.
7. Дрофа А.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. № 6. С. 607–613.
8. Дрофа А.С., Усачев А.Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 4. С. 408–414.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 176 с.

Научно-исследовательское объединение «Тайфун», г. Обнинск,
НИИ авиационного оборудования, Московская обл., г. Жуковский-2

Поступила в редакцию
1 октября 1990 г.

V.Kh. Brikenshtein, A.S. Drofa, A.A. Shuvalov, L.I. Yakushkina. **Visibility of an Aerodrome Runway in Fog.**

Using the theory of linear systems for solving the problem on the image transfer in a scattering medium some calculational data in the airport runway image visible through the fog from a descending airplane are presented. The results show that the maximum range of the runway vision in fog is more than twice higher than that predicted by theory, which does not take into account the influence of light scattered within the observed image.