

В.В. Белов, И.Ю. Макушкина

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ

Рассмотрен критерий пространственного разрешения при наблюдении через атмосферу в условиях внешнего освещения. Для двух объектов достаточно общего вида проанализирована зависимость разрешающей способности системы видения от оптико-геометрических параметров последней. Даются некоторые рекомендации по выбору оптимальных (с точки зрения рассмотренного критерия) условий наблюдения.

Для оценки качества изображения в теории оптических систем широко используются одночисловые характеристики. К ним относится пространственная разрешающая способность (ПРС).

В настоящей статье проведено исследование пространственной разрешающей способности системы видения через атмосферу. Установлены качественные и количественные зависимости ПРС от чувствительности приемника, длины волны, оптической толщины, индикатрисы рассеяния, наличия в атмосфере слоев облачного типа, структуры объекта.

Рассмотрим систему видения, образованную поверхностью Земли, атмосферой и оптическим приемником. На верхнюю границу атмосферы падает поток солнечного излучения в направлении, определяемом зенитным углом θ_0 . Наблюдение производится в надир с высоты L , равной 90 км над поверхностью Земли, которая предполагается ламбертовской. Объект задается распределением альбедо.

Понятие пространственного разрешения элементов объекта вводится в [1] на основе критерия Рэлея следующим образом: выбирается произвольная пара точек M_1 и M_2 , разрешимых оптической системой в отсутствие среды, т.е. между точками M_1 и M_2 найдется по крайней мере одна точка M , для которой выполняется неравенство

$$(\tilde{E}_{1,2} - \tilde{E}_M) / (\tilde{E}_{1,2} + \tilde{E}_M) \geq \delta,$$

где $\tilde{E}_{1,2}$, \tilde{E}_M — освещенность точек, сопряженных точкам M_1 , M_2 , M в плоскости изображения.

Будем предполагать, что объект наблюдения содержит кроме M_1 , M_2 еще m элементов, расположенных относительно M_1 , M_2 произвольным образом. Тогда в терминах [1] в условиях солнечного освещения земной поверхности критерий разрешимости двух точек при наблюдении через атмосферу имеет вид:

$$\gamma_{1,2} = \frac{h_n (a_{1,2}^\lambda E_{1,2}^0 - a_M^\lambda E_M^0) + \sum_{i=1}^m a_i^\lambda E_i^0 (h(r_{1,2;i}) - h(r_{M;i}))}{h_n (a_{1,2}^\lambda E_{1,2}^0 + a_M^\lambda E_M^0) + 2I_d + \sum_{i=1}^m a_i^\lambda E_i^0 (h(r_{1,2;i}) + h(r_{M;i}))} \geq \delta. \quad (1)$$

В (1) использованы следующие обозначения: $r_{k;l}$ — расстояние от k -й точки (индекс $k = 0, 1, 2$ определяет точки M , M_1 , M_2) до окружающих элементов объекта; a_k^λ , a_i^λ — спектральные альбедо точек M , M_1 , M_2 и фоновых компонент; h_n и $h(r_{k;l})$ — нерассеянная и рассеянная составляющие функции размытия точки $\tilde{h}(r)$; I_d — интенсивность солнечной дымки; E_k^0 , E_i^0 — освещенность соответствующих точек. Очевидно, что рассматривать следует только те элементы объекта, для которых $a_j^\lambda \neq 0$ ($j = i, k$).

Будем предполагать, что

$$a_{1,2}^\lambda = A_1^\lambda, \quad a_i^\lambda = A_2^\lambda, \quad E_{1,2}^0 = E_0.$$

Тогда неравенство (1) можно записать в виде

$$\gamma_{1,2} = \frac{\frac{A_1}{A_2} h_n + \sum_{i=1}^n (h(r_{1,2;i}) - h(r_{M;i}))}{\frac{A_1}{A_2} h_n + \frac{2I_d}{A_2 E_0} + \sum_{i=1}^n (h(r_{1,2;i}) + h(r_{M;i}))} \geq \delta. \quad (2)$$

Оценка пространственной разрешающей способности рассматриваемой системы видения в соответствии с критерием (2) производилась на основе моделирования методом Монте-Карло величин E_0 , \tilde{h} , I_d , входящих в (2). Был использован алгоритм локальной оценки в схеме построения сопряженных траекторий [2–4]. Геометрическая схема расчетов приведена на рис. 1. В качестве оптической модели атмосферы при проведении численных экспериментов была выбрана среднениклическая модель континентального аэрозоля [5]. Учет молекулярной составляющей производился на основе данных Макклатчи [6] о коэффициентах рассеяния и ослабления для среднеширотной зимы. Моделировались две ситуации:

- а) безоблачная атмосфера;
- б) присутствует слой сплошной облачности оптической толщины τ на высоте l км над поверхностью Земли.

В первой из них были рассмотрены три длины волны: $\lambda = 0,55; 0,86; 1,53$ мкм. Во втором случае длина волны полагалась равной 0,55 мкм, при этом оптические свойства облачного слоя соответствовали среде типа облако С.1 [7]. Величины τ и l принимали следующие значения: $\tau = 1; 3; 6; 12$; $l = 0,25; 1; 2$ км. Дополнительно были проведены численные эксперименты в условиях, когда поверхность Земли граничит со слоем радиационного тумана [7] оптической толщины $\tau = 3$.

Анализ пространственной разрешающей способности на основе критерия (2) для объектов произвольного вида практически невозможен, поэтому численные значения левой части (2) были получены для двух конкретных примеров:

1) объект наблюдения представляет собой равномерное по площади $S = \pi R_\varepsilon^2$ распределение элементов с ненулевым альбедо A_2 . Здесь R_ε – радиус бокового подсвета [4] по уровню $\varepsilon = 50\%$;

2) источники подавления контраста между точками наблюдения M_1 и M_2 сконцентрированы вокруг точки M блоками в виде колец со средними радиусами \bar{r}_j и в каждом таком блоке содержится m_j источников с ненулевым альбедо A_j . В частном случае $A_j = A_2$ для любого j .

Точки M_1 и M_2 , которым соответствует альбедо A_1 выбраны следующим образом: M_1 имеет координаты $(0, 0, R_1)$ (рис. 1), положение M_2 определяется соотношением

$$h(M_2)/h(0) = 0,95 .$$

Для описания объекта первого типа мы сочли целесообразным использование такой характеристики, как число источников в круге с диаметром d , равным расстоянию между точками M_1 и M_2 . Очевидно, что величина N связана с коэффициентом β , введенным в [1] и имеющим смысл средней плотности заполнения единицы площади объекта элементами ненулевой яркости, следующим равенством:

$$\beta = 4N/\pi d^2.$$

В табл. 1 приведены значения d для ряда рассмотренных условий.

Таблица 1

Значения расстояния d , $\lambda = 0,55$ мкм, облако С. I

τ	1			3			6		
$l, \text{ м}$	250	1000	2000	250	1000	2000	250	1000	2000
$r_{95}, \text{ м}$	1,55	0,95	0,71	2,58	3,65	1,40	2,76	6,27	3,72

Проанализируем поведение γ и неравенства (2) в целом в зависимости от оптико-геометрических параметров схемы наблюдения. Заметим, что увеличение значения левой части (2) всегда можно интерпретировать как потенциальное улучшение пространственной разрешающей способности системы видения: например, какие-либо две точки объекта становятся разрешимыми при худшей чувствительности приемника.

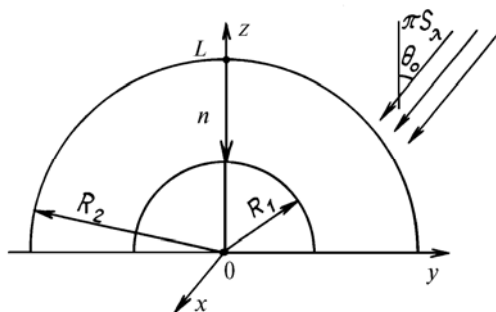


Рис. 1. Геометрическая схема экспериментов. R_1 – радиус Земли; R_2 – внешний радиус атмосферы

Возможность пространственного разрешения с точки зрения критерия (2) обуславливается, с одной стороны, факторами, определяющими функцию размытия, размер области бокового подсвета R_b , величину отношения $I_d/A_2 \cdot E_0$: оптической толщиной атмосферы, соотношением между процессами аэрозольного и молекулярного ослабления, вытянутостью индикатрисы рассеяния и т. д. С другой стороны, выполнение неравенства (2) зависит от характеристик объекта: в данном случае от средней плотности заполнения единицы площади объекта β или от числа колец, окружающих точки наблюдения, и их загруженности источниками подавления контраста: от соотношения между излучательными способностями точек M_1 и M_2 и их окружения, а также от самой излучательной способности окружения. Как следует из табл. 2, в условиях безоблачной атмосферы две произвольные точки рассматриваемых объектов, расстояние между которыми не меньше d , разрешимы оптической системой с чувствительностью не хуже $\delta \approx 0,1$ практически при любых условиях наблюдения. Тем не менее очевидно, что даже при безоблачной атмосфере выполнение неравенства (2) может быть нарушено, и основной причиной этого явится вариация свойств объекта.

Из табл. 2 следует, что преимущественное влияние на γ оказывает отношение A_1/A_2 : например, для уменьшения γ в 1,5–2 раза требуется увеличение средней плотности β или числа колец N_1 на 2–3 порядка, при этом для такого же изменения γ достаточно уменьшить значение A_1/A_2 в 5 раз. Заметим, что как показали расчеты, пространственная разрешающая способность системы видения в случае объекта с кольцевой структурой практически не зависит от того, одинаковы или различаются между собой альбедо колец (по крайней мере для рассмотренных ситуаций).

Таблица 2

Объект с равномерным заполнением									
$A_1/A_2 = 1$									
λ , мкм	$\tilde{N} = 1$			$\tilde{N} = 100$			$\tilde{N} = 100000$		
	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$
0,55	8,84–01	8,80–01	8,14–01	7,20–01	7,18–01	6,73–01	4,27–03	4,26–03	4,27–03
0,86	9,66–01	9,64–01	9,62–01	5,04–01	5,04–01	5,03–01	1,49–03	1,49–03	1,49–03
1,53	9,84–01	9,89–01	9,90–01	8,35–01	8,39–01	8,40–01	6,00–03	6,00–03	6,00–03
$A_1/A_2 = 0,2$									
λ , мкм	$\tilde{N} = 1$			$\tilde{N} = 100$					
	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$			
0,55	4,34–01	4,26–01	3,03–01	2,79–01	2,75–01	2,19–01			
0,86	7,67–01	7,55–01	7,43–01	1,66–01	1,65–01	1,65–01			
1,53	8,66–01	9,09–01	9,19–01	4,86–01	4,99–01	5,02–01			
Объект с кольцевой структурой									
$A_1/A_2 = 1$									
λ , мкм	$\tilde{N}_1 = 10$			$\tilde{N}_1 = 100$					
	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$			
0,55	8,62–01	8,60–01	7,96–01	7,03–01	7,33–01	7,32–01			
0,86	8,84–01	8,83–01	8,81–01	4,84–01	4,84–01	4,83–01			
1,53	9,59–01	9,64–01	9,66–01	7,76–01	7,79–01	7,80–01			
$A_1/A_2 = 0,2$									
λ , мкм	$\tilde{N}_1 = 10$			$\tilde{N}_1 = 100$					
	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$			
0,55	4,10–01	4,02–01	2,93–01	2,66–01	2,63–01	2,11–01			
0,86	5,62–01	5,55–01	5,49–01	1,55–01	1,54–01	1,54–01			
1,53	7,79–01	8,13–01	8,21–01	3,97–01	4,05–01	4,07–01			

Остановимся на некоторых качественных зависимостях. Увеличение λ в рассматриваемом диапазоне длин волн при средних значениях N и N_1 приводит к росту γ , что связано главным образом с уменьшением оптической толщины вертикального столба атмосферы. При больших значениях N и N_1 монотонность спектрального хода γ нарушается, при $\lambda = 0,86$ мкм наблюдается минимум. На наш взгляд, увеличение числа фоновых отражателей усиливает влияние рассеивающих свойств атмосферы (в частности, ее приземного слоя) на разрешающую способность системы видения. Как известно, характеристики системы видения (например, ФРТ, радиус бокового подсвета) существенно зависят от соотношения между процессами аэрозольного и молекулярного ослабления. Хотя совокупная оптическая толщина атмосферы уменьшается с ростом λ в исследуемом диапазоне длин волн, соотношение между молекулярным и аэрозольным ослаблением изменяется немонотонно. Так, величина τ_m/τ_a (τ_m — оптическая толщина молеку-

лярного ослабления. τ_a — аэрозольного) принимает для $\lambda = 0,55; 0,86; 1,53$ мкм значения 0,4; 0,14; 0,67 соответственно. По-видимому, это обстоятельство и вызывает описанное выше поведение γ .

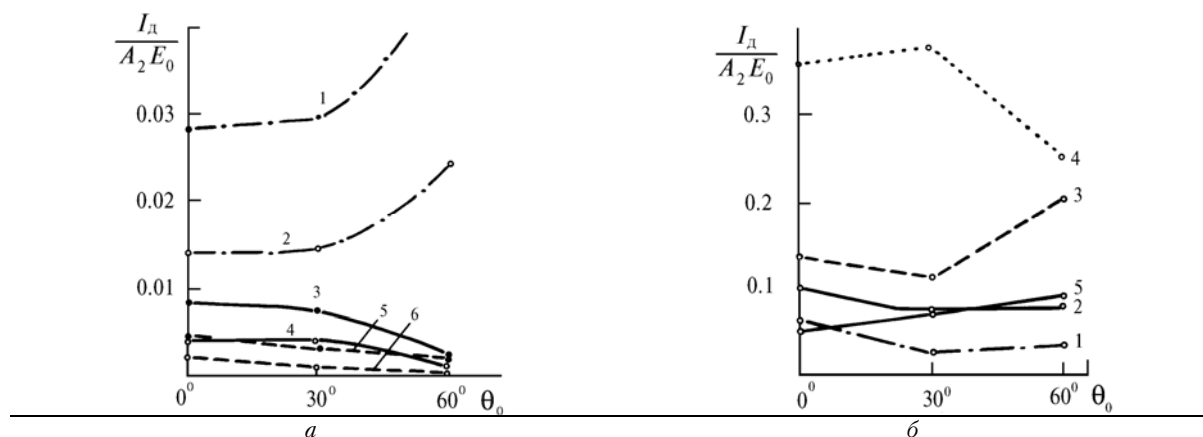


Рис. 2. Зависимость отношения I_d/A_2E_0 от зенитного угла Солнца: светлые кружки — $A_1/A_2 = 1$, точки — $A_1/A_2 = 0,2$. *a* — безоблачная атмосфера; штрихпунктирные кривые — $\lambda = 0,55$; сплошные — $0,86$; штриховые — $1,53$ мкм. *б* — кривые 1–4 — облако С.1, $l = 250$ м; 5 — туман на поверхности Земли; кривая 1 — $\tau = 1$; кривые 2, 5–3; 3–6; 4–12. $\lambda = 0,55$ мкм

Из (2) следует, что степень влияния положения Солнца на пространственное разрешение системы видения определяется величиной отношения I_d/A_2E_0 . Последнее, как видно из рис. 2, *a*, представляет собой для безоблачной атмосферы монотонную функцию зенитного угла θ_0 : возрастающую или убывающую в зависимости от длины волны, что соответствующим образом отражается на поведении $\gamma_{1,2}$ (табл. 2). Заметим, что соотношение качественного вида $\gamma(\theta_0)$ и $I_d/A_2E_0(\theta_0)$ при $\lambda = 0,86$ мкм отличается от аналогичного соотношения для других длин волн. С нашей точки зрения, это также может быть следствием большего (по сравнению с другими λ) вклада аэрозольного ослабления.

Данные табл. 2 свидетельствуют, кроме того, что с увеличением числа фоновых элементов практически исчезает зависимость ПРС от положения Солнца. Появление в атмосфере плотных образований, характеризующееся в первую очередь увеличением суммарной оптической толщины, приводит не только к существенному уменьшению значений γ , но и к изменению некоторых качественных закономерностей. Выполнение критерия (2) в данном случае в гораздо большей степени обуславливается особенностями процессов ослабления и рассеяния излучения в атмосфере. Как показали предыдущие исследования [8], функция размытия точки, размер области бокового подсвета, интенсивность солнечной дымки существенно зависят от таких характеристик слоя повышенной мутности, как оптическая толщина, индикатриса рассеяния, расположение этого слоя на трассе наблюдения. Как показали расчеты, возможность пространственного разрешения при наличии в атмосфере облачного слоя определяется в первую очередь его оптической толщиной. В меньшей степени она связана с индикатрисой рассеяния и высотой нижней границы (в рамках рассмотренных вариаций соответствующих параметров). Из рис. 3, *a, б* видно, что рост оптической толщины, приводящий прежде всего к многократному увеличению интенсивности солнечной дымки, сопровождается резким уменьшением величины $\gamma_{1,2}$. Перемещение слоя сплошной облачности от поверхности Земли приводит к некоторому ухудшению пространственной разрешающей способности системы видения.

При $\tau \approx 12$ пространственное разрешение в рамках критерия (2) возможно, если чувствительность приемника не хуже $\delta \approx 10^{-6} - 10^{-7}$ в зависимости от альбедо.

На рис. 4, *a, б* приведены графики γ для трех положений Солнца и двух значений отношения A_1/A_2 . Обращает на себя внимание экстремальная зависимость левой части неравенства (2) от зенитного угла Солнца, антикоррелирующая, как и в случае безоблачной атмосферы, с зависимостью величины I_d/A_2E_0 от θ_0 (рис. 2, *б*). Сравнение соответствующих кривых, приведенных на рис. 4, 5, показывает, что степень влияния положения Солнца на пространственную разрешающую способность уменьшается с увеличением оптической толщины слоя повышенной мутности.

На основании рис. 3, 4, 5 можно сделать некоторые выводы относительно влияния формы объекта на пространственную разрешающую способность систем видения. Особенности формирования функции размытия точки и области бокового подсвета определяется то обстоятельство, что наибольшие различия между значениями γ для рассматриваемых объектов наблюдаются при расположении слоя повышенной мутности непосредственно у поверхности Земли (рис. 5). Кроме того, видно, что различия между значениями γ увеличиваются с увеличением количества фоновых точек объектов.

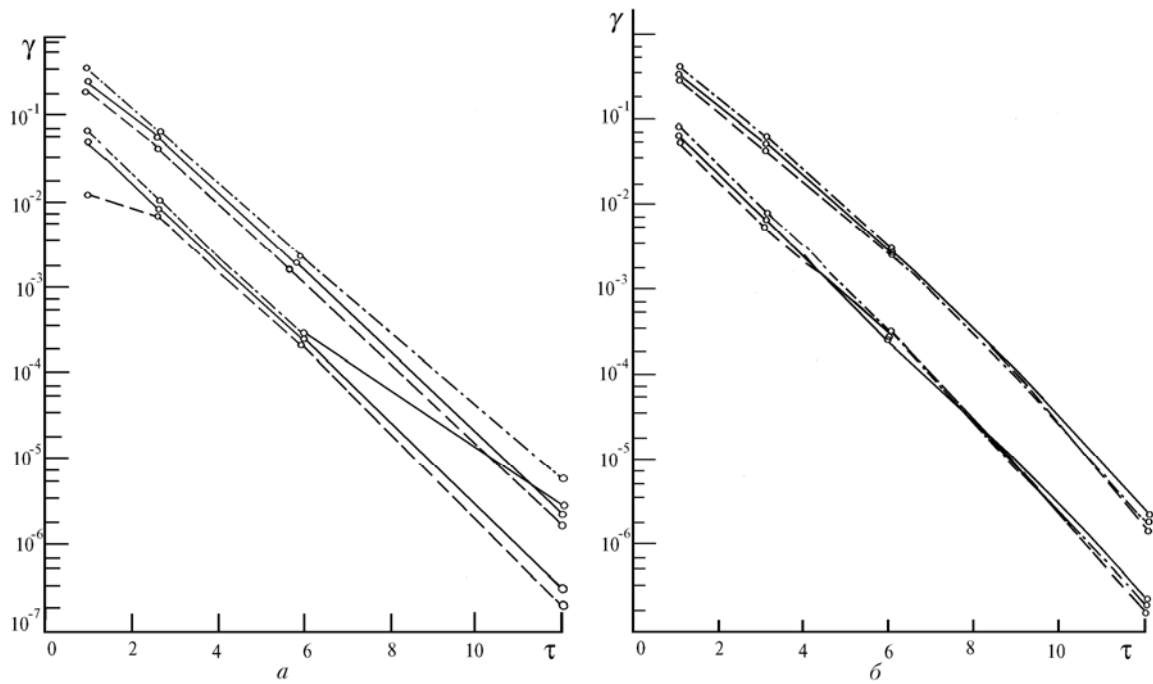


Рис. 3. Зависимость γ от оптической толщины облачного слоя: светлые кружки — $A_1/A_2 = 1$; точки — $A_1/A_2 = 0,2$. Штрихпунктирные кривые — $l = 250$ м; сплошные — 1 км; штриховые — 2 км. a — объект с равномерным заполнением, $\tilde{N} = 1$; b — объект с кольцевой структурой, $N_1 = 10$

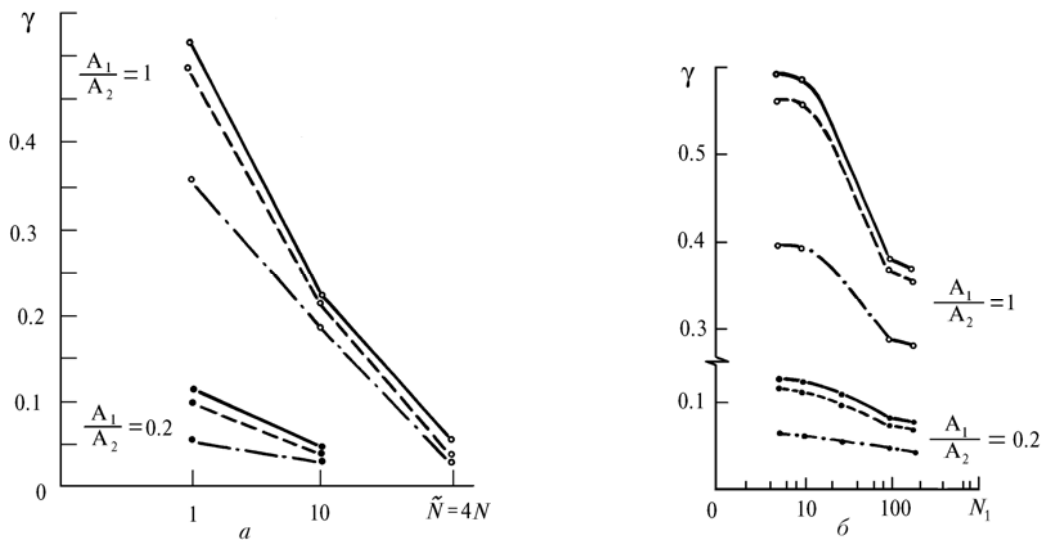


Рис. 4. Зависимость γ от количества фоновых отражателей. Облако С.1 на высоте l ; $\tau = 1$. Штрихпунктирные — $\theta_0 = 0^\circ$; штриховые — $\theta_0 = 30^\circ$; сплошные — $\theta_0 = 60^\circ$; a — объект с равномерным заполнением; $l = 250$ м; b — объект с кольцевой структурой; $l = 1$ км

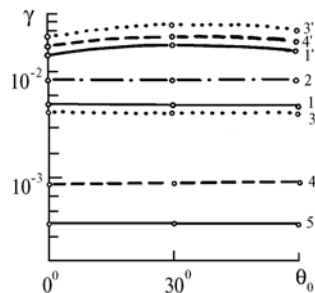


Рис. 5. Зависимость γ от зенитного угла для объектов различной структуры. $A_1/A_2 = 1$; кривые 1–5 — туман на поверхности Земли; 1', 3', 4' — облако С.1 на высоте $l = 250$ м; 1, 1', 2 — объект с равномерным заполнением; кривые 3, 3', 4, 4', 5 — объект с кольцевой структурой; 1, 1' — $N_1 = 10$; 2 — $N_1 = 100$; 3, 3' — $\tilde{N} = 1$; 4, 4' — $\tilde{N} = 10$; 5 — $\tilde{N} = 100$. $\tau_{об} = \tau_r = 3$

Суммируя вышесказанное, можно сделать следующие основные выводы;

1. Пространственное разрешение в системах видения через атмосферу возможно даже при наличии в ней оптически плотных образований, если приемное устройство обладает соответствующей чувствительностью.

2. При наличии в атмосфере слоя облачного типа оптимальным для наблюдения положением Солнца (в рамках критерия (2)) является зенитный угол Солнца $\theta_0 \approx 30^\circ$.

3. Зависимость пространственной разрешающей способности систем видения от структуры объекта при наличии в атмосфере слоя повышенной мутности сильнее всего проявляется в тех случаях, когда этот слой граничит с поверхностью Земли.

1. Белов В. В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 9. С. 17–24.
2. Марчук Г. И. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
3. Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Теория и приложения статистического моделирования. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР. 1988. С. 153–164.
4. Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Перенос изображения в земной атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР. 1988. С. 3–10.
5. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. 294 с.
6. McClatchie R. A., Fenn R. W., Selby J. E. et al. Optical Properties of the Atmosphere (Revised). Report AFCRL-71-0272, AFCRL, Bedford, Mass, 1971, 98 p.
7. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 176 с.
8. Белов В. В., Макушкина И. Ю. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 18–24.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 мая 1992 г.

V. V. Belov, I. Yu. Makushkina. **Spatial Resolution of Systems of Vision through the Atmosphere.**

A criterion of spatial resolution of observations through the atmosphere under conditions of external illumination is considered. Dependence of the spatial resolution of a vision system on its optical and geometric parameters is analyzed for the two quite general objects. Some recommendations on the choice of optional (according to this criterion) conditions for observations are given.