

В.В. Белов

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ В СИСТЕМАХ ВИДЕНИЯ

Вводится понятие пространственной разрешающей способности систем видения. Получены соотношения, связывающие характеристики помехи бокового подсвета, свойства объекта, рассеивающей среды и оптической системы, позволяющие рассчитать предельную пространственную разрешающую способность системы видения. Рассмотрены физические причины и условия возникновения t -эффекта.

Современный этап развития теории видения можно характеризовать как этап построения гибкой модели процесса формирования изображения в рассеивающих средах [1–3], разработки основ анализа систем видения [4–6], накопления количественной информации о закономерностях влияния мутных сред на характеристики качества изображения [4–10]. Объем этой информации в ряде случаев позволил обобщить некоторые результаты исследований не только на уровне обзорных статей [11], но и монографий [12], тем не менее решение некоторых центральных проблем теории видения нельзя признать удовлетворительным.

Одной из них является проблема влияния на качество изображения детерминированной неоднородности оптических свойств среды вдоль линии визирования. Этот вопрос рассматривался в работах [7, 10–12]. В [10], например, предполагается, что эта зависимость определяется пространственной структурой объекта и может быть немонотонной, в [13] теоретически подтверждается этот вывод для малоразмерных объектов, а в [10] и [14] можно найти иллюстрацию этой закономерности, полученную в лабораторных экспериментах и названную t -эффектом.

Отметим, что ни одна из работ [5–14] фактически не дает ответа на вопросы, имеющие очевидное практическое значение, а именно: может ли t -эффект проявляться при наблюдении объектов любой протяженности, возможно ли его проявление при наблюдении земной поверхности через аэрозольно-газовую атмосферу, каковы условия его возникновения и т.п.

В предлагаемом сообщении предпринимается попытка дать ответы на эти вопросы на основе одного из критериев оценки эффективности оптических систем [15].

Суть t -эффекта, обратившись к иллюстрациям в [10, 14], можно сформулировать следующим образом. При некоторых положениях слоя рассеивающей среды между предметной плоскостью и оптической системой происходит резкое ухудшение качества изображения, проявляющееся в том, что размываются контуры объекта, становится неразрешимой его тонкая пространственная структура. То есть можно предположить, что рассеивающая среда в этом случае наиболее сильно влияет на пространственную разрешающую способность системы видения. В теории оптических систем применяют несколько критериев оценки разрешающей способности системы, например критерий Рэля, Спарроу и т.д.

Построим подобный критерий для системы видения и рассмотрим влияние оптико-геометрических условий наблюдения на качество изображения с этой точки зрения.

Под системой видения S будем понимать систему, образованную оптическим прибором L , формирующим изображение, плоскостью объектов P и рассеивающей средой, экранирующей ее от наблюдателя. Предположим, что S — линейная система, обладающая круговой симметрией; импульсная реакция для центральной изопланатической зоны известна и $\tilde{h}(x, y) = \tilde{h}(r)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, причем $\tilde{h}(x, y) = h_n(x, y) + h(x, y)$, где $h_n(x, y)$ — компонента функции размытия точки (ФРТ), сформированная нерассеянным излучением. Пусть входящая в ее состав оптическая система характеризуется предельным пространственным разрешением по Рэлю r_d^L (или угловым ϕ_d^L), которому в плоскости предметов соответствует элементарная площадка d_L , и пороговой контрастной чувствительностью $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Правильнее было бы связать ε с контрастной чувствительностью анализатора или фиксатора изображения. Но поскольку с помощью критерия Рэля определяют предельную разрешающую способность системы L , то с ней несложно однозначно связать и значение ε . Будем считать, что объект задан распределением яркости $B_0(x, y)$ на однородной плоскости предметов, а его изображение — распределением освещенности $E(x, y)$ в плоскости изображения G или упорядоченным набором N элементарных площадок d_L с размерами, соответствующими предельному пространственному разрешению системы L , для каждой из которых определены освещенности E_j , $j = \overline{1, N}$. Далее, говоря о точках (или элементарных площадках d_L) в плоскостях P и G , будем подразумевать их взаимное сопряжение.

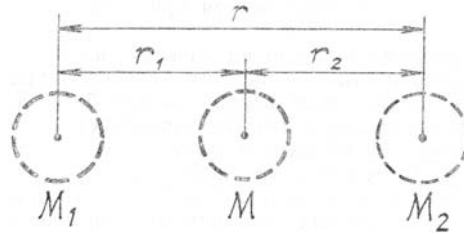


Рис. 1

Введем понятие пространственного разрешения элементов объекта в системе видения. Выберем произвольно любую пару точек M_1, M_2 (рис. 1) объекта, которые разрешимы оптической системой в отсутствие среды, т.е. между точками M_1, M_2 найдется по крайней мере одна точка (M) такая, для которой выполняется условие

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

где $\tilde{E}_{1,2}, \tilde{E}_M$ — освещенность точек в плоскости G , сопряженных точкам $M_{1,2}, M$. Расстояние r , при котором условие (1) превращается в равенство, назовем предельным пространственным разрешением r_d^s . Очевидно, в отсутствие среды при соответствующем подборе ε критерий (1) приведет к тем же предельным значениям $r_d^s(\varphi_d^s)$, что и, например, классический критерий Рэля.

Если наблюдение точек $M_{1,2}$ (или элементарных площадок d_L) осуществляется через рассеивающую среду, а в плоскости объекта расположены еще n точек, то (1) запишется в виде

$$\gamma_{1,2} = \frac{h_n (B_{1,2}^0 - B_M^0) + \sum_{i=1}^n B_i^0 (h(r_{1,2;i}) - h(r_{M;i}))}{h_n (B_{1,2}^0 + B_M^0) + \sum_{i=1}^n B_i^0 (h(r_{1,2;i}) + h(r_{M;i}))} \geq \varepsilon, \quad (2)$$

где B_0 — яркость элементов объекта; $r_{k,l}$ — расстояние от k -й точки ($k = 1, 2, 3$, что соответствует точкам M_1, M_2, M на рис. 1) до окружающих элементов объекта; h_n — нерассеянная компонента ФРТ.

Анализ выражения (2) без упрощающих предположений затруднителен. Сделаем их, основываясь на наиболее общих свойствах ФРТ систем видения, которые рассмотрены в [16].

Изучению импульсных реакций систем видения посвящены серии экспериментальных исследований [8, 9, 16], численных экспериментов методом Монте-Карло [3, 5, 6, 16], приближенные оценки ФРТ в [13]. Можно считать выясненным характер трансформации $h(r)$ при изменении расстояния l между плоскостью предметов и средой, по крайней мере при оптических толщинах $\tau \in 1-15$ [16]. При $l \rightarrow 0$ резко возрастает значение $h(r=0)$. ФРТ «сжимается», при $l \rightarrow \tilde{L}$ $h(0)$ уменьшается и у функции появляется устойчивый участок, где $h(r) \approx \text{const} \approx h(0)$, $r \in [0, r_n]$ (\tilde{L} — максимально возможное для данной схемы наблюдения значение l). Эти выводы иллюстрируют рис. 2, 3.

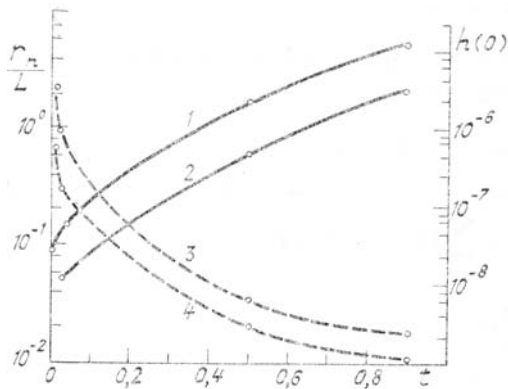


Рис. 2. Влияние параметра t на значения $h(0)$ (кривые 3, 4) и r_n/L (кривые 1, 2). Среда типа дымки H , $\lambda = 0,53$ мкм, $\tau = 1$ (кривые 1, 3), $\tau = 6$ (кривые 2, 4)

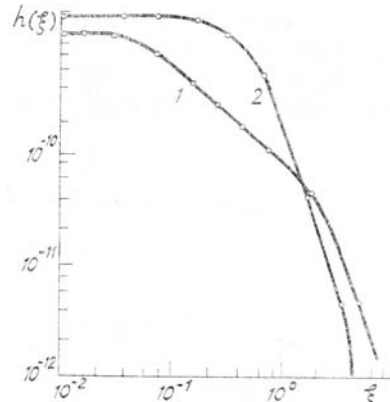


Рис. 3. Пример оценок импульсных реакций $\eta(\xi)$ методом Монте-Карло для $\tau = 3$, $\lambda = 0,53$ мкм, среды типа дымки H при $t = 10^{-4}$ (кривая 1) и $t = 0,9$ (кривая 2)

На рис. 2 приведены зависимость $h(0) = h(0; t)$ для среды типа дымки H , $\tau = 1$ (кривая 3) и $\tau = 6$ (кривая 4) и зависимость $f = r_n / \tilde{L}$ для тех же условий. Здесь $t = l / \tilde{L}$; r_n – ширина ФРТ, определенная из условия

$$\delta = \eta(r_n) / \eta(\infty),$$

где $\eta(R) = 2\pi \int_0^R h(r) r dr$, т.е. r_n соответствует радиусу области бокового подсвета (вокруг точки на-

блюдения), в пределах которой формируется заданная доля $0 \leq \delta \leq 1$ всей энергии этой фоновой компоненты изображения. Приведенные на рис. 2 кривые $f = f(t)$ построены для $\delta = 0,95$ ($\tau = 1$ – кривая 2, $\tau = 6$ – кривая 3). Оси ординат для $h(0)$ приведены в правой, для $f = r_n / L$ – в левой части рис. 2. Влияние параметра l на форму $h(r)$ иллюстрирует рис. 3, где приведены ФРТ $h(\xi)$, $\xi = r / \tilde{L}$, рассчитанные методом Монте-Карло для $\tau = 3$, $t = 10^{-4}$ (кривая 1) и $t = 0,9$ (кривая 2) при $\lambda = 0,53$ мкм и рассеивающей среде типа дымки H .

Одной из простейших моделей ФРТ, точно удовлетворяющих зависимости $h(0)$, r_n от параметра l и приближенно описывающих форму $h(r)$, может быть (напомним, что в данном случае рассматривается $h(r)$, сформированная только рассеянным излучением) линейная модель вида

$$\hat{h}(r) = \begin{cases} h(0) - \alpha r, & 0 \leq r \leq r_n, \\ 0, & r_n < r, \end{cases} \quad (3)$$

где α , например, определяется из условия нормировки ФРТ

$$2\pi \int_0^{r_n} r \hat{h}(r) dr = \eta(\infty). \quad (3.1)$$

С учетом (3) критерий (2) запишется в виде

$$\gamma_m = \frac{h_n (B_{1,2}^n - B_M^0) - \alpha \sum_{i=1}^m B_i^0 (r_{M;i} - r_{1,2;i})}{h_n (B_{1,2}^0 - B_M^0) + 2 \sum_{i=1}^m B_i^0 h(0) - \alpha \sum_{i=1}^m B_i^0 (r_{1,2;i} + r_{M;i})} > \varepsilon, \quad (4)$$

где $m = n - 3$.

Упростим модель объекта, предположив, что B может принимать два значения: 0 и 1.

Перенумеруем элементы объекта, принимая во внимание только те из них, для которых $B_i^0 = 1$. Получим

$$\gamma_n(l) = \frac{h_n - \alpha \sum_{i=1}^n (r_{M;i} - r_{1,2;i})}{h_n + 2nh(0) - \alpha \sum_{i=1}^n (r_{1,2;i} + r_{M;i})} \geq \varepsilon. \quad (5)$$

Пусть $\sum_{i=1}^n r_i = n\bar{r}$, где $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{1,2;i}$. Тогда (5) примет вид

$$\gamma_n(l) = \frac{h_n}{h_n + 2nh(0) - 2\alpha n\bar{r}} \geq \varepsilon$$

или

$$\frac{h_n}{h(0) - \alpha\bar{r}} \geq \frac{2n\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (6)$$

На конкретных примерах рассмотрим, к каким выводам о пространственном разрешении в системах видения приводит критерий (1), если изменение условий наблюдения вызвано вариацией параметра l .

Пример 1. Пусть объект наблюдения неограничен по размерам и характеризуется равномерным по площади распределением элементов с ненулевой яркостью. В этом случае условие (6) перепишем в виде)

$$\rho = h_n / (2h_0 - \alpha r_n) > n\varepsilon / (1 - \varepsilon) \approx \beta r_n^2 \varepsilon / (1 - \varepsilon) = \varepsilon'. \quad (7)$$

Коэффициенту $\beta < 1$ в (7) можно придать смысл средней плотности заполнения единицы площади объекта элементами, для которых $B_i^0 \neq 0$. При $\beta > 1$ можно считать, что яркость точек, окружающих точки $M_{1,2}$, в β раз больше, чем $B_{1,2}^0$. В таблице приведены результаты оценок левых и правых частей неравенства (7) для различных τ , t , β при $\varepsilon = 0,01$ для среды типа дымки H . Характеристики $h(0) = h_0$, h_n и $\alpha(l)$ найдены по результатам моделирования функций $h(r)$ на ЭВМ методом Монте-Карло. Из таблицы следует, что в рассматриваемой ситуации любые пары точек, объекта разрешимы оптической системой с пороговой контрастной чувствительностью анализатора изображения $\varepsilon < 0,01$ независимо от профиля оптических характеристик среды вдоль линии визирования при любых плотностях $\beta \lesssim 1$ заполнения единицы площади объекта элементами ненулевой яркости. Однако контраст между этими точками можно подавить, начиная с некоторых значений $l > l_1$ если яркость B_i^0 излучения «фоновых» элементов превысит яркость наблюдаемых $B_{1,2}^0$. С ростом τ соотношение между интенсивностью нерассеянного и фонового излучения становится иным, и уже при любом l можно найти такое $\beta < 1$, что любая пара точек может стать пространственно неразрешимой. Если (7) использовать для определения предельной пространственной r_d^S или угловой ϕ_d^S разрешающей способности системы видения, то получим, что при $\tau \leq 1$ и $\beta \leq 1$ $r_d^S \approx r_d^L$, $\phi_d^S \approx \phi_d^L$ (в то же время возможно $\phi_d^S \gg 1^\circ$ даже при $\tau \leq 1$, если $\beta > 1$); при $\tau = 3\phi_d^S \geq 8^\circ \gg \phi_d^L$ уже при $\beta \approx 0,3$. В этом примере мы не получили немоной зависимости разрешающей способности от параметра t , но удалось показать, что r_d^S при $l \leq l_1$ для объектов такого типа может существенно превышать r_d^L , так как в этих случаях $r_d^S \approx r_n$. Не исключено, что более строгий учет особенностей функций $h(r)$ при $l \rightarrow 0$ позволит показать, что при $l \rightarrow 0$ $r_d^S \rightarrow r_d^L$, а это и есть причина возникновения t -эффекта.

Т а б л и ц а

τ	β	t			
		10^{-3}	10^{-2}	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,75 \cdot 10^{-1}$
1,0	1	$9,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$
	2	$1,9 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^6$
	5	$4,7 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^7$
	5,5	$5,3 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$
	12	$1,1 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$
	ρ	$1,5 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^7$
3,0	0,1	$1,2 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^5$
	0,2	$2,7 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^6$
	0,3	$3,6 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^6$
	0,8	$9,6 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^6$
	0,99	$1,2 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$6,2 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^6$
	ρ	$2,4 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^6$

Пример 2. Пусть источники подавления контраста между точками M_1 , M_2 сконцентрированы вокруг точки M блоками в виде колец со средними радиусами $r_{n,j-1} \leq \bar{r}_j \leq r_{n,j}$, и в каждом таком блоке-фрагменте объекта содержится m_j источников средней яркости B_i^0 . Тогда условие (5) примет вид

$$\rho(l) = \frac{h_n}{\alpha(l) \left[\sum_{j=1}^{\infty} B_j m_j \Delta_j (2h_0(l)/\alpha(l) - \bar{r}_j) \right]} > \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}, \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta_j = \begin{cases} 1, & r_{n,j-1} \leq \bar{r} \leq r_{n,j}, \\ 0, & r_{n,j} \leq \bar{r}_j; \bar{r}_j < r_{n,j-1}. \end{cases}$$

Из (8) следует, что возможна такая структура объекта, при которой $\rho(l)$ с ростом l изменяется монотонно, периодически принимая значения $\rho(l < \varepsilon/(1 - \varepsilon))$. В частном случае, при ограниченном объекте ($j = 1, 2$) при выполнении условия

$$\frac{[2h_0(l_1) - \bar{r}_1 \alpha(l_1)] - [2h_0(l_2) - \alpha(l_2) \bar{r}_1]}{2h_0(l_2) - \alpha(l_1) \bar{r}_2} \gg \frac{B_2 m_2}{B_1 m_1} \quad (9)$$

(где $B_{1,2}$ — среднее значение яркостей элементов в этих блоках) рост $l > l_1$ может привести к резкому ухудшению пространственного разрешения в системе видения с последующим восстановлением r_d^s до значений, близких к r_d^L , т.е. привести к t -эффекту. При $j > 2$ можно, видимо, подобрать такие геометрические условия наблюдения и такую структуру объектов, когда при дальнейшем росте l t -эффект может повториться.

Пример 3. Рассмотрим влияние условий наблюдения на разрешение элементов простейшего двухточечного объекта, размещенного на абсолютно поглощающей поверхности. При этом еще более упростим модель ФРТ. Пусть

$$\hat{h}(r) = \begin{cases} h(0), & 0 \leq r \leq r_n, \\ 0, & r > r_n \end{cases},$$

где r_n — определено из условия (3.1). Тогда критерий разрешения точек M_1, M_2 примет вид

$$\frac{h_n}{h_0} \geq 2n \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}.$$

При $n = 2$ получаем

$$\frac{h_n}{h_0} \geq 4 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \varepsilon'. \quad (10)$$

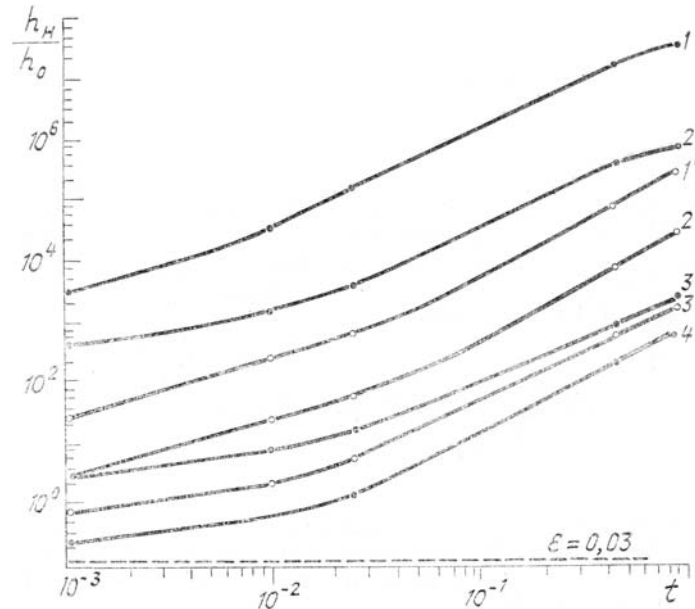


Рис. 4. Зависимость h_n/h_0 от t для сред типа дымки H (кривые 1, 2, 3), для облака $C. 1$ (кривые 1', 2', 3') и тумана (кривая 4); $\lambda = 0,53$ мкм, $\tau = 1$ (кривые 1, 1'), $\tau = 6$ (кривые 2, 2'), $\tau = 12$ (кривые 3, 3', 4)

На рис. 4 приведены значения h_n/h_0 , которые рассчитаны методом Монте-Карло для рассматриваемой схемы наблюдения при модельных средах типа дымки H (кривые 1, 2, 3), облака $C. 1$ (кривые 1', 2', 3'), тумана (кривая 4) и при $\tau \in 1-12$. Штриховой линией показан уровень ε' при

$\varepsilon = 0,03$. Как видим, изменение оптических свойств среды в широких пределах практически не влияет на предельную пространственную разрешающую способность, если влиянием «фоновой» области объекта можно пренебречь.

Можно показать, что и для этой модели, и экспоненциальной вида

$$\hat{h}(r) = \begin{cases} h_0 e^{-ar}, & r_n \geq r \geq 0, \\ 0, & r > r_n \end{cases},$$

которая приводит к критерию $\gamma_n = h_n/h_0 \geq 2ne^{-a\tilde{r}}/(1-\varepsilon)$, где \tilde{r} определяется из условия

$$\sum_{i=1}^n e^{-ar_i} = ne^{-a\tilde{r}}; \quad r_i - \text{расстояние от точек } M_{1,2} \text{ или точки } M \text{ до "фоновых" элементов объекта), суще-}$$

ствуют соотношения, подобные (9), между свойствами объекта (β , n (7), B_p , m_j (8), контрастной пороговой чувствительностью ε анализатора изображения, оптической толщиной рассеивающей среды (h_n) и условиями наблюдения (l), из которых следует, что при наблюдении объектов любых размеров может возникать (при изменении l) ухудшение пространственной разрешающей способности до значений $\phi_d^S > 1^\circ$, приводящее к размытию граничных линий и тонкой пространственной структуры в изображении объекта. Последующий рост l может привести к восстановлению значений r_d^S до уровня r_d^L .

Выводы:

1) предельная пространственная разрешающая способность в системах видения определяется как оптико-геометрическими условиями наблюдения и характеристиками приемника изображения (ϕ_d^L , ε), так и пространственной структурой объекта;

2) t -эффект как результат ухудшения пространственной разрешающей способности в системах видения может возникать при наблюдении как ограниченных, так и неограниченных (немалоразмерных) объектов;

3) t -эффект может проявиться при наблюдении подстилающей поверхности через атмосферу даже при слабом ее замутнении, если структура объекта такова, что выполняются условия (7) или (9);

4) при выполнении условий типа (9) возможно неоднократное повторение t -эффекта по мере возрастания l .

Автор благодарен И.Ю. Макушкиной за предоставленные для анализа результаты моделирования на ЭВМ методом Монте-Карло импульсных реакций систем видения.

1. Золотухин В.Г., Усиков Д.А., Гришин В.А. // Исследования земли из космоса/1980. № 3. С. 58–68.
2. Thomas R. W. L. // Adv. Space Res. 1983. V. 2. № 5. P. 157–166.
3. Белов В.В. // Изв. АН СССР. ФАО. 1982. № 4. С. 435–437.
4. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Лучинин А.Г., Савельев В.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1969. Т. 5. № 7. С. 672–684.
5. Дрофа А.С., Усачев А.Л. // Изв. АН СССР. ФАО. 1980. Т. 16. № 9. С. 933–938.
6. Белов В.В., Зуев В.Е., Креков Г.М. // Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 9. С. 963–969.
7. Бабак Э.В., Беляев А.С., Гитин Ю.Л. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 51. С. 349–352.
8. Волнистова Л.П., Дрофа А.С., Сныков В.П. // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 5. С. 507–511.
9. Волнистова Л.П., Дрофа А.С. // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 1. С. 50–57.
10. Зуев В.Е., Белов В.В., Борисов Б.Д. и др. // ДАН СССР. 1983. Т. 268. С. 321–324.
11. Дрофа А.С., Кацев И.Л. // Метеорология и гидрология. 1981. № 11. С. 101–109.
12. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника. 1985. 328 с.
13. Дрофа А.С. // Изв. АН СССР. ФАО. 1980. Т. 16. № 9. С. 933–938.
14. Будак В.П., Гутуров М.М., Федосов В.П. // Светотехника. 1986. № 11. С. 19–21.
15. Проектирование оптических систем / Пер. с англ.; Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. М.: Мир. 1983. 432 с.
16. Белов В.В., Борисов Б.Д., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы. 1988. № 2. С. 18–24.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
19 февраля 1988 г.

V. V. Belov. Spatial Image Resolution Imposed by a Scattering Medium.

A concept of the image resolution imposed by a scattering medium is introduced. The expressions relating the cross-radiance characteristics, the properties of the object under observation, the scattering medium and optical system parameters are derived and the limiting spatial resolution is calculated. Physical mechanisms responsible for the t -effect and the conditions for its occurrence are discussed.