

УДК 621.397

## ОПТИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРЫ

*Сорока Е.З., к.т.н., гл. научный сотрудник ЗАО «МНИТИ» (Московский научно-исследовательский телевизионный институт), e-mail: soroka@mniti.ru;*

*Филатов В.С., к.т.н., ведущий научный сотрудник ЗАО «МНИТИ» (Московский научно-исследовательский телевизионный институт), e-mail: filatov\_vs@mniti.ru.*

## THE OPTICAL MODULATION-TRANSFER FUNCTION OF THE ATMOSPHERE

*Soroka E.Z., Filatov V.S.*

*The quality of images obtained in optical vision and registration systems (in vision, UF and IR ranges) depends not only on these systems parameters' but on the atmospheric image transmission channel parameters. The effects of an atmospheric channel consist of overall optical signal attenuation and background illumination but also in high frequency components attenuation of obtained images that results in image sharpness decrease. For quantitative estimation of the atmosphere effect on image sharpness modulation-transfer function (MTF) of atmospheric channel may be used. In this article we analyzed earlier published experimental data for fog, haze and other phenomena, that produced changes in optical MTF of the atmosphere. We constructed the mathematical expressions and graphs that reflect the growth of attenuation of the high-frequency image components with increase of the common attenuation of an optical signal. This enables the operative MTF estimation of an atmospheric image transfer channel.*

**Key words:** optical vision, atmospheric image, transmission channel, atmosphere effect on image.

**Ключевые слова:** частотно-контрастная характеристика, передача изображения, атмосферный тракт.

**Введение**

Дистанционное телевизионное (или тепловизионное) наблюдение за объектами всегда происходит через слой атмосферы определенной протяженности, который оказывает искажающее воздействие на проходящий световой (или тепловой) поток. Это воздействие обусловлено наличием в атмосфере микро- и макрочастиц газов, жидких и твердых веществ, свойства которых изменяются под действием внешних факторов (температура, ветер, давление и т.п.). Такие взвеси частиц в воздухе приводят к образованию дымов, тумана, дымки и других помеховых явлений.

В общем, атмосфера оказывает двойное действие на оптический сигнал: во-первых, вызывает общее его ослабление, и, во-вторых, приводит к потере четкости изображения (к относительному ослаблению высокочастотных деталей) [1, 2].

Для анализа и учета искажений, возникающих в изображении, наблюдаемом через слой атмосферы определенной протяженности, удобнее всего воспользоваться «радиотехническим» подходом, когда изображение и тракт его передачи описываются двумерными функциями пространственных координат и соответственно спектральными и частотно-контрастными характеристиками изображения и элементов тракта его передачи [3-5].

Измеримой величиной в оптическом диапазоне волн обычно является средний квадрат абсолютного значения сигнала. Поэтому в задачах, подобной рассматриваемым, под оптическим сигналом во многих случаях по-

*Качество изображений, формируемых системами наблюдения (регистрации) оптического (УФ, видимого и ИК) диапазона, зависит не только от характеристик самих этих систем, но и от характеристик атмосферного тракта передачи изображения. Влияние атмосферного тракта приводит не только к общему затуханию оптического сигнала и появлению подсветки из-за рассеивания света, но и к ослаблению высокочастотных составляющих формируемого изображения, т.е. к снижению его четкости. Количественно свойства атмосферы по воздействию на четкость изображения могут быть оценены ее частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ). В статье анализируются известные из литературы экспериментальные данные тумана, дымки и других явлений, вызывающих изменение оптической ЧКХ атмосферы. Получены математические выражения и графики, которые учитывают ослабление высокочастотных составляющих изображения, возрастающее с увеличением общего затухания оптического сигнала. Эти выражения и графики позволяют оперативно оценивать ЧКХ атмосферного тракта передачи изображения.*

нимается именно средний квадрат или интенсивность сигнала, причем выход оптических приемников выражается напряжением, пропорциональным входной интенсивности оптического сигнала.

**Эквивалентная схема оптического тракта**

Эквивалентная схема тракта передачи оптического сигнала в общем случае может быть представлена, как показано на рис. 1.

Входное ИК-изображение рассматривается как функция интенсивности, зависящая от двух пространственных переменных  $x, y$ . Энергетическое ослабление за счет действия толщи атмосферы между объектом и приемником выражается экспоненциальной зависимостью, известной как закон Бугера, согласно которому яркость  $I$  после прохождения рассеивающей среды составляет

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon l), \quad (1)$$

где  $I_0$  – исходная яркость в изображении объекта,  $\varepsilon$  – коэффициент ослабления,  $l$  – толщина (протяженность) среды.

Таким образом, коэффициент ослабления изображения за счет атмосферы составляет

$$k = I / I_0 = \exp(-\varepsilon l), \quad (2)$$

или, в децибелах

$$k_{об} = -10 \varepsilon l g e = M \varepsilon l, \quad (2 \text{ а})$$

где  $M = l g e = 0,434294$ .

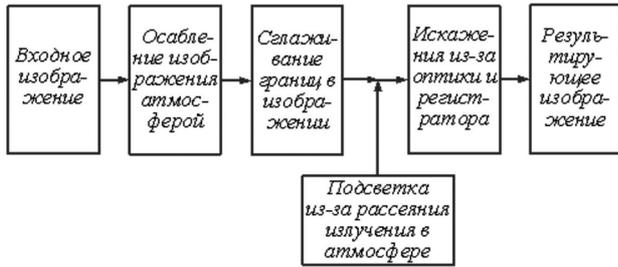


Рис. 1. Общая эквивалентная схема оптического тракта

Сглаживающее воздействие атмосферы на границы (контуры) объектов в изображении удобно описывать с помощью эквивалентных двумерных фильтров пространственных частот с ограниченной полосой пропускания.

В области реальных координат операция фильтрации выражается сверткой функции изображения с импульсной характеристикой фильтра:

$$F_1(x, y) = F(x, y) \cdot G(x, y) = \iint G(x-u, y-v) \cdot F(u, v) \cdot du \cdot dv, \quad (3)$$

где  $F(x, y)$  – исходная функция изображения;  $F_1(x, y)$  – выходная функция изображения;  $G(x, y)$  – двумерная импульсная характеристика эквивалентного фильтра.

В оптике в качестве импульсной характеристики фильтров используется функция рассеяния точки (ФРТ), либо функция рассеяния линии (ФРЛ). При экспериментальных исследованиях для получения ФРТ и ФРЛ применяют точечные и линейные источники света, которые являются техническими реализациями соответственно оптической  $\delta$ -функции и  $\delta$ -линии.

### Теоретические характеристики рассеивающих сред

Практически важным фактором, воздействующим как на видимое, так и на инфракрасное изображение, является атмосферный тракт, который содержит микро- и макрочастицы газов, жидких и твердых веществ, свойства которых изменяются под действием внешних факторов (температура, ветер, давление и т.п.). Присутствующие в воздухе взвеси частиц приводят к образованию дымов, тумана, дымки и других помеховых явлений, которые, в первую очередь, приводят к ослаблению излучений на пути от снимаемых объектов к регистратору (ИК-видеокамере). Но, как явствует из дискретной структуры указанных мешающих факторов, они должны оказывать свое воздействие и на частотно-контрастные характеристики атмосферных оптических трактов [1, 2].

Определим вначале функцию рассеяния точки (ФРТ) для самосветящегося объекта, излучение от которого попадает на приемную систему после прохождения однородного слоя дисперсной среды.

При этом ограничимся случаем больших рассеивающих частиц, когда параметр  $\rho = 2\pi a/\lambda \gg 1$ , где  $a$  – радиус частицы,  $\lambda$  – длина волны. Это выполняется для среднеквадратических диаметров частиц туманов, облаков и дождей в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частях спектра (до длин волн  $\lambda = 15$  мкм).

Как показано в [1, формула 7.25], для определенного класса условий можно получить выражение ФРТ в случае прохождения излучения через однородный слой дисперсной (и кругосимметричной) среды.

В конечном итоге ФРТ получается в виде

$$D(z) = \frac{I_0 e^{-\tau}}{L^2} \cdot \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left[ \frac{\delta(z/\rho)}{z} + \frac{\pi\rho}{4} \cdot \tau \cdot s \cdot \Lambda \cdot \frac{F(z)}{z} \right], \quad (4)$$

где  $I_0$  – сила излучения объекта,  $L$  – удаление объекта,  $\tau = \varepsilon L$ ,  $\varepsilon$  – объемный коэффициент ослабления,  $\tau S = \sigma L$ ,  $\Lambda = \sigma/\varepsilon$ ,  $\sigma$  – объемный коэффициент рассеяния,  $\delta(z/\rho)$  – дельта-функция,  $\rho = 2\pi a/\lambda$ ,

$$F(z) = \left\{ 1 - \frac{\pi z}{2} \cdot [J_0^2(z) + J_1^2(z)] + \frac{\pi}{2} \cdot J_0(z) J_1(z) \frac{\pi}{4z} + J_1^2(z) \right\}. \quad (5)$$

Оптическая передаточная функция (ОПФ) находится с помощью преобразования Фурье от ФРТ. Поскольку ФРТ имеет круговую симметрию, можно воспользоваться преобразованием Ганкеля. После введения переменной интегрирования  $z = \rho r/F$  (где  $F$  – фокусное расстояние приемной системы,  $r$  – радиус-вектор полярных координат), ОПФ получается в виде

$$M_1(x) = \frac{2\pi F^2}{\rho^2} \int_0^{\rho/x} D(z) J_0\left(\frac{xF}{\rho}\right) z dz. \quad (6)$$

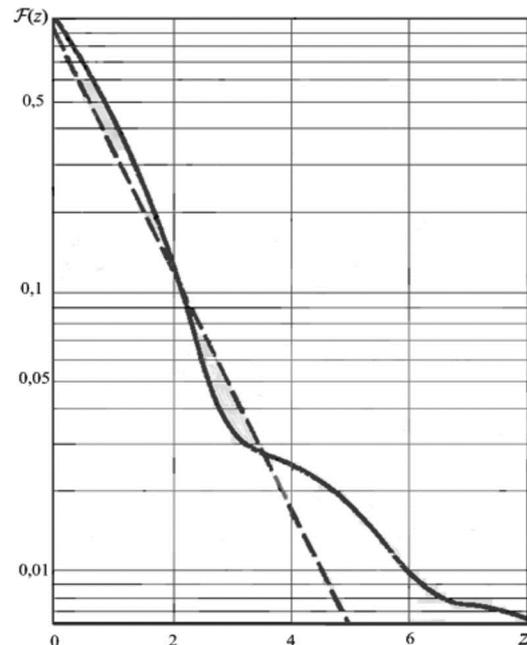


Рис. 2. График  $F(z)$  – переменной части ФРТ (сплошная линия) и его аппроксимация (штриховая прямая) [1]

График переменной части ФРТ, обозначенной  $F(z)$  приведен на рис. 2 (сплошная линия) в полулогарифмическом масштабе.

Подстановка выражения  $D(z)$  преобразует  $M_1(x)$  к двум слагаемым, первое из которых равно  $\rho$  и, следовательно, не зависит от пространственной частоты  $x$ .

Используя введенную экспоненциальную аппроксимацию  $F(z)$ , можно получить (с точностью до множителя, не зависящего от частоты) следующее выражение для переменной части ОПФ:

$$M_1(x) = \int e^{-z} J_0\left(\frac{xF}{\rho} z\right) dz = \frac{1}{\sqrt{b^2 + (xF/\rho)^2}} \quad (7)$$

В результате нормированная ОПФ  $M_1(x)/M_1(0)$  выражается представленной на рис. 3 зависимостью

$$M_1(x) / M_1(0) = (1 + k^2 x^2)^{-1/2}, \quad (8)$$

где  $k = F/\rho$ ,  $x$  – пространственная частота (при параметре  $b = 1$ ).

На рис. 3 показаны также точки, найденные путем численного интегрирования исходной функции  $F(z)$ , которые достаточно хорошо укладываются на аппроксимирующую кривую.

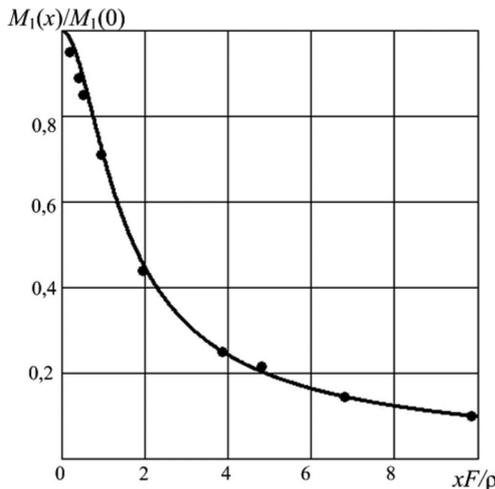


Рис. 3. График теоретической ОПФ дисперсной среды, аппроксимируемый функцией  $[1 + (xF/\rho)^2]^{-1/2}$

Таким образом, в [1] выведена общая теоретическая ОПФ рассеивающей среды, описывающая действие тумана, дымки и других атмосферных факторов.

**Экспериментальное определение ЧКХ рассеивающих сред**

Физические эксперименты по исследованию ОПФ (или ЧКХ – частотно-контрастной характеристики) рассеивающих сред описаны в работах [6] и [7].

Вначале рассмотрим результаты работы [6].

Для проведения экспериментов использовался ангар 35×20×35 м, в котором туман создавался путем испарения воды со скоростью до 1,2 т/час. В качестве тест-объекта использовалась таблица в виде чередующихся черных и белых полос, показанная на рис. 4 (размеры приведены в мм).

Самосветящийся тест-объект был выполнен в виде прозрачной панели с нанесенными на нее черными площадками, которая подсвечивалась сзади лампами

дневного света. Наблюдение (зрительное) велось с расстояния  $l = 17$  м. Частота элементов тест-объекта выражалась в периодах на градус.

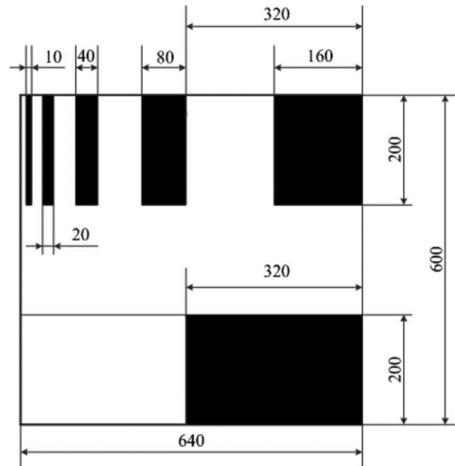


Рис. 4. Тест-объект для измерения ЧКХ тумана [6]

Численные результаты экспериментов, восстановленные из графиков в [6], приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов по определению ЧКХ тумана [6]

$f$ , период/градус	0	0,23	0,4	0,92	2,0	Общий коэфф. передачи $M_0$
Эксперим. № 1	1,0	0,9	0,82	0,7	0,48	$4 \cdot 10^{-1}$
Эксперим. № 2	1,0	0,77	0,63	0,36		$1 \cdot 10^{-1}$
Эксперим. № 3	1,0	0,67	0,37	0,19		$6,7 \cdot 10^{-2}$
Эксперим. № 4	1,0	0,38	0,14	0,06		$1,6 \cdot 10^{-2}$

В графической форме эти результаты представлены на рис. 5. Значения ЧКХ для четырех экспериментов с разной плотностью тумана показаны значками разной формы.

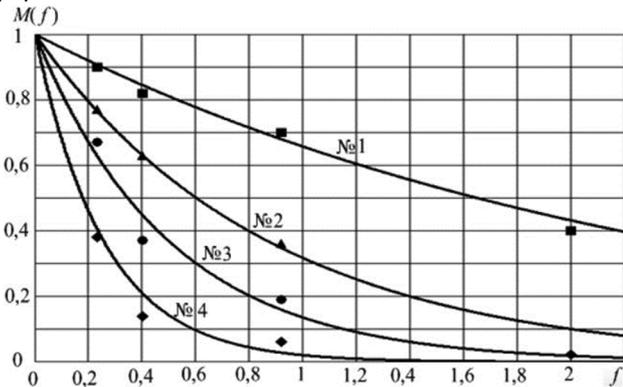


Рис. 5. Частотно-контрастные характеристики тумана; частота измеряется в периодах на градус

На рис. 5 показаны также графики экспоненциальных функций  $M_i(f) = \exp(-\alpha_i f)$ , которые аппроксимируют экспериментальные данные:

$$M_1(f) = \exp(-0,42 f); \quad M_2(f) = \exp(-1,15 f);$$

$$M_3(f) = \exp(-2,0 f); \quad M_4(f) = \exp(-3,9 f).$$

Некоторые дополнительные сведения о свойствах тумана можно получить из сопоставления общих коэффициентов передачи  $M_0$  для четырех экспериментов и

коэффициентов  $\alpha$  в показателях степени аппроксимирующих функций (табл. 2).

Таблица 2. Сопоставление затухания в тумане и крутизны спада ЧКХ

Эксперимент №	Общий коэффициент передачи тумана $M_0$	Коэффициент $\alpha$ для экспонент, аппроксимирующих ЧКХ
1	0,4	0,42
2	0,1	1,15
3	0,067	2,0
4	0,016	3,9

Для наглядности данные из табл. 2 представлены точками на рис. 6.

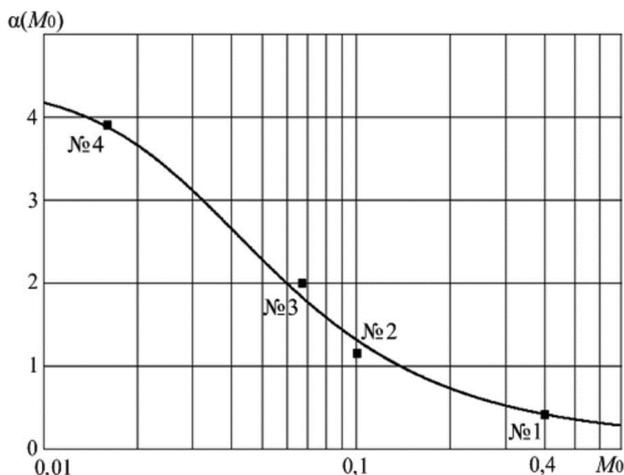


Рис. 6. Зависимость крутизны спада ЧКХ  $\alpha$  от общего коэффициента передачи  $M_0$

Для измеренных значений подобрана аппроксимирующая функция  $\alpha(M_0)$ :

$$\alpha(M_0) = \frac{4,3}{\sqrt{1 + (34M_0)^2}} + 0,1, \quad (9)$$

которая показана здесь в виде графика, иллюстрирующего зависимость скорости спада ЧКХ (выражаемой параметром  $\alpha$ ) от общего коэффициента передачи оптического сигнала  $M_0$ , т.е. фактически от протяженности рассеивающей среды. Формула (9) позволяет оценивать ЧКХ рассеивающих сред в диапазоне коэффициентов передачи оптического сигнала от 0,01 до 0,7.

Теперь рассмотрим результаты работы [7]. Здесь для экспериментального исследования ЧКХ использовались штриховые черно-белые миры, сечения которых показаны на рис. 7 в виде меандров.

Параметры графиков на рис. 7 следующие. Значения

максимальной яркости миры  $\lg B = 2,0$ . «Глубина погружения» в среде с коэффициентом ослабления  $\varepsilon = 1,0$  выражается в относительных единицах – в долях от «предельной оптической глубины обнаружения объекта  $z_0$ », которые составляют 0,2  $z_0$ , 0,4  $z_0$ , 0,6  $z_0$ , 0,8  $z_0$  и 1,0  $z_0$ .

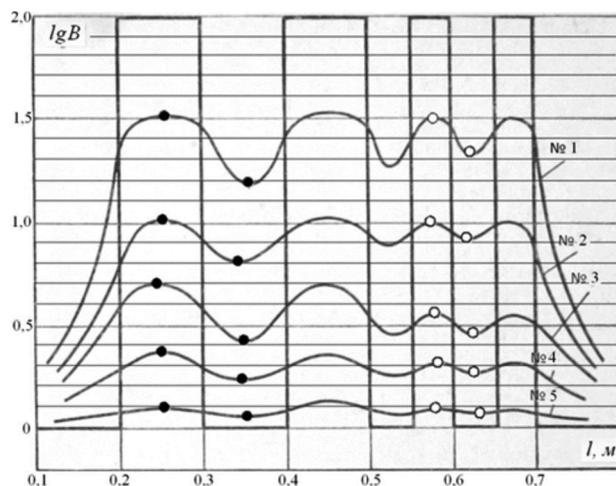


Рис. 7. Графики изменения наблюдаемой яркости штриховой миры для пространственных периодов  $l = 0,2$  и  $0,1$  м (т.е. для частот 5 и 10 период/м) [7]

При оценке ЧКХ рассеивающей среды принимается следующее.

Общий коэффициент передачи оптического сигнала  $M_0$  равен отношению наблюдаемой максимальной яркости миры  $B_{\max}$  к максимальной исходной яркости миры, равной  $B_{\text{исх}} = 100$  условных единиц.

Коэффициент передачи  $M(f)$  для переменной составляющей яркости наблюдаемой миры выражается отношением размаха переменной составляющей, т.е. разности максимальной и минимальной яркостей наблюдаемой миры ( $B_{\max} - B_{\min}$ ) к  $B_{\max}$ .

Яркость постоянной подсветки  $B_{\text{подсвет}}$  вследствие рассеяния света соответствует минимальной яркости наблюдаемой миры  $B_{\min}$  (которая в отсутствие подсветки практически была бы равна «нулевой» яркости).

На рис. 7 кружками отмечены значения яркостей  $B_{\max}$  и  $B_{\min}$ . Черные кружки соответствуют максимумам и минимумам при частоте миры 5 пер./м (периодов на метр), а белые кружки – при частоте 10 пер./м.

В табл. 3 приведены значения яркости и коэффициентов передачи для пяти экспериментов и двух значений пространственной частоты миры – 5 и 10 пер./м, полученные из графиков в [7].

Таблица 3. Данные ЧКХ среды, полученные из графиков рис. 7

График №	Яркости (вычисленные по $\lg B$ на графиках рис.7)				Коэффициенты передачи			$B_{\text{подсвет}}$
	При частоте, пер./м						Общий	
	5		10		5			
	$B_{\max}$	$B_{\min}$	$B_{\max}$	$B_{\min}$	$M(f)$			
1	33,11	15,13	31,62	21,38	0,543	0,324	0,331	15,13
2	10,47	5,13	10,47	8,32	0,510	0,205	0,105	5,13
3	4,79	2,66	3,63	2,82	0,444	0,223	0,048	2,66
4	2,25	1,70	2,09	1,86	0,244	0,110	0,022	1,70
5	1,23	1,12	1,22	1,13	0,089	0,073	0,012	1,12

Принимается, что при частоте мира  $0 \text{ пер./м}$  (постоянная составляющая) опорное значение уровня яркости мира составляет  $\lg B = 2$ , что соответствует  $10^{\lg B} = 100$  условным единицам яркости.

ЧКХ рассеивающей среды  $M(f)$  для пяти экспериментов иллюстрирует рис. 8 (частота  $f$  указана в пер./м).

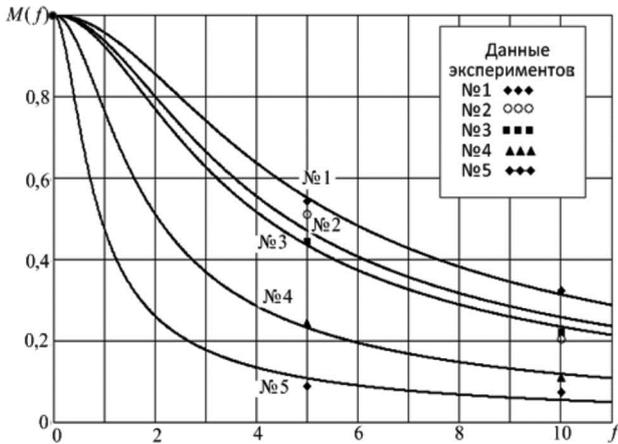


Рис. 8. ЧКХ рассеивающей среды  $M(f)$  по данным табл. 3

Представленные графические данные могут быть аппроксимированы функцией

$$M(f) = (1 + a^2 f^2)^{-1/2}, \tag{10}$$

соответствующую теоретической формуле (8), приведенной в разделе

Для показанных аппроксимирующих функций № 1-5 значения параметра  $a$  составляют:

$a = 0,303; 0,375; 0,415; 0,84; 1,85$ .

Эти графики обеспечивают приемлемую аппроксимацию, за исключением графика № 2, что объясняется особенностями экспериментальных данных, представленных на рис. 7.

Из полученных данных [7] следует, что крутизна спада ЧКХ монотонно увеличивается с уменьшением общего коэффициента передачи  $M_0$ , как было установлено также по результатам работы [6].

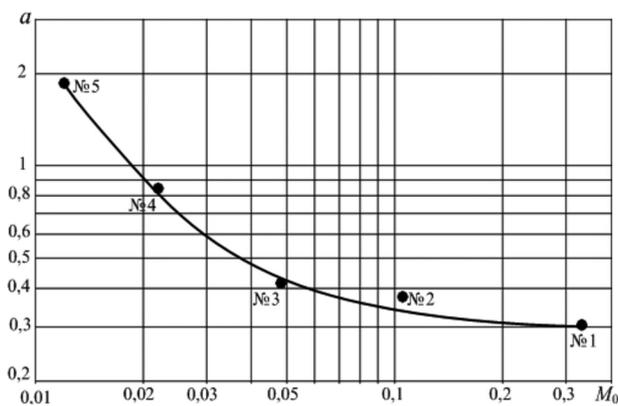


Рис. 9. Зависимость крутизны спада ЧКХ от  $M_0$

На рис. 9 представлена соответствующая эмпирическая зависимость, которая позволяет оперативно оценивать ЧКХ по известному общему коэффициенту передачи  $M_0$ .

В последних столбцах табл. 3 приводятся сведения об общем коэффициенте передачи  $M_0$  и яркости постоянной подсветки  $B_{\text{подсвет}}$ , возникающей вследствие рас-

сеивания излучения в атмосфере. В графическом виде эти сведения представлены на рис. 10.

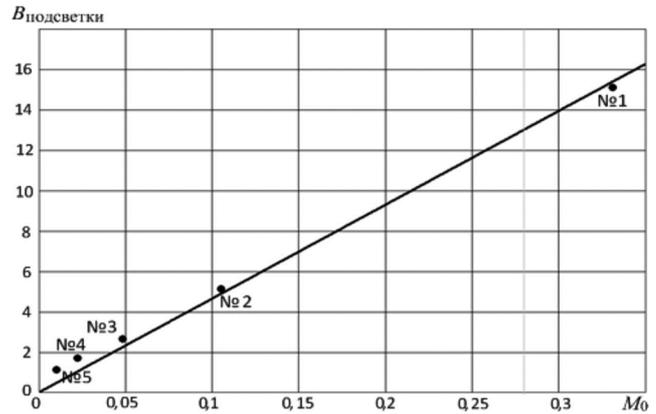


Рис. 10. Зависимость постоянной подсветки от  $M_0$

Здесь прослеживается эмпирическая линейная зависимость  $B_{\text{подсветки}}$  от  $M_0$ , выражаемая формулой  $B_{\text{подсветки}} = 41 M_0$ , которая экспериментально подтверждена до значения общего коэффициента передачи оптического сигнала  $M_0 = 0,33$ .

### Заключение

Туман, дымка и другие атмосферные явления вызывают замутнение атмосферного тракта передачи изображения, в результате чего возникает:

1) энергетическое ослабление интенсивности изображения, выражаемое общим коэффициентом передачи оптического сигнала  $M_0$ , которое приводит к снижению отношения сигнал-шум;

2) постоянная засветка изображения, приблизительно пропорциональная общему коэффициенту передачи оптического сигнала  $M_0$ ; эта засветка приводит к снижению контрастности получаемого изображения;

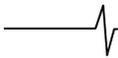
3) снижение четкости изображения, т.е. ослабление высокочастотных составляющих его спектра; это снижение описывается ЧКХ атмосферного тракта, имеющей, в общем, колоколообразный характер и зависящей от общего коэффициента передачи  $M_0$ .

Рассмотрен теоретический подход к определению зависимости ЧКХ атмосферного тракта передачи изображений от различных его характеристик. Проведен анализ известных из литературы экспериментальных характеристик тумана, дымки и других явлений, вызывающих изменение оптической ЧКХ атмосферы, и оценено их влияние на качество формируемого изображения. Экспериментальные данные в целом соответствуют исходным теоретическим положениям.

Получены аппроксимирующие математические выражения и графики, которые позволяют оперативно оценивать ЧКХ атмосферного тракта передачи изображения и учитывать их при решении практических задач моделирования и обработки изображения, наблюдаемого через протяженные слои атмосферы.

### Литература

1. Зуев В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов – М.: Советское радио, 1977. – 368 с. – Гл. 7.



2. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов – Л.: Гидрометеоиздат, 1987.– 255 с. – Гл. 2.

3. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику / Э. О'Нейл – М.: Мир, 1966. – 255 с.

4. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике /А. Папулис. – М.: Мир, 1971. – 495 с. – Гл. 5.

5. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации / В.Л. Левшин – М.:

Советское радио, 1971. – 200 с. – Гл. 1.

6. Naoyoshi Nameda. Fog modulation transfer function and signal lighting / Nameda Naoyoshi – Lighting Research and Technology. – 1992. – Vol. 24, № 2. – Pp. 103-106.

7. Смирнов В.А. Теория и метод решения задач о переносе оптического изображения в рассеянных средах / В.А. Смирнов – Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. – 1965, вып. 6. – С. 109-124.