

УДК 621.391.63; 535.361; 621.373.826

Экспериментальная оценка частотно-контрастных характеристик активно-импульсных телевизионных систем видения в условиях повышенной мутности аэрозольных сред

В.В. Белов¹, Ю.В. Гриднев¹, В.В. Капустин², В.С. Козлов¹,
А.Н. Кудрявцев¹, М.И. Курячий², А.К. Мовчан², Р.Ф. Рахимов¹,
М.В. Панченко¹, В.П. Шмаргунов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 11.05.2018 г.

Обсуждаются результаты лабораторных экспериментов, направленных на исследование влияния рассеивающих и поглощающих сред на качество изображения объектов, наблюдаемых с помощью активно-импульсных телевизионных оптико-электронных систем (ОЭС). Показано, что исследования качества изображений объектов в активно-импульсных системах видения или их частотно-контрастных характеристик можно осуществлять как на прямых, так и на косвенных их измерениях с использованием Фурье-преобразований изображений тест-объектов или производных от функций, определенных в экспериментах. Экспериментально подтверждено ранее сформулированное теоретически утверждение, что для активно-импульсных ОЭС с селекцией помехи обратного рассеяния качество изображений объектов, экранированных мутными средами, может быть почти на порядок выше, чем при работе ОЭС с лазерной подсветкой и постоянно открытым приемником.

Ключевые слова: активно-импульсные телевизионные ОЭС, помеха обратного рассеяния, лабораторные эксперименты, качество изображения объектов, частотно-контрастные характеристики, миры, рассеивающие и поглощающие среды; active pulsed TV OES, backscattered noise signal, laboratory experiments, quality of object imaging, frequency-contrast characteristics, miras, scattering and absorbing media.

Введение

Активно-импульсные телевизионные системы (АИТС) применяются для наблюдения в неблагоприятных условиях видимости с помощью подсветки объектов оптическим (в частности лазерным) излучением [1–6]. Эти условия (туман, аэрозольная дымка, дым, пыль, снегопад и т.д.) значительно ограничивают дальность обнаружения и вероятность распознавания объектов в традиционных системах видеонаблюдения. Основной причиной этого ограничения является помеха обратного рассеивания. Она

возникает из-за рассеяния излучения подсветки на аэрозолях и газовой составляющей среды распространения в направлении наблюдателя, что приводит к значительному снижению контраста изображения и, как следствие, к сложности или невозможности обнаружения и распознавания объектов.

Результаты теоретического исследования процесса формирования изображений в АИТС рассмотрены в работах [4, 5]. В [4, 6] описаны результаты испытаний конкретных вариантов этих систем в атмосфере, в [3, 7] – в лабораторных условиях.

Основные достоинства АИТС – постдетекторное аппаратное подавление помехи обратного рассеивания и значительное ослабление световых помех естественной и искусственной природы. Принцип работы АИТС основан на импульсном под свете пространства объектов и стробировании (открытии) во времени фотоприемного устройства.

В работе [7] отражены результаты экспериментов, выполненных с помощью оптико-электронной системы (ОЭС) «Зонд М+» (создана в ИОА СО РАН)

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yurigi@iao.ru); Вячеслав Валериевич Капустин (vk@tu.tusur.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев (zoxu1@iao.ru); Михаил Иванович Курячий (kur@tu.tusur.ru); Андрей Кириллович Мовчан (mr.movchann@mail.ru); Рустам Фуатович Рахимов (temur@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов.

в лабораторных условиях с контролируемыми (в отличие, например, от [6]) характеристиками модельных рассеивающих сред. Исследовались особенности работы системы в плотном древесном дыме, образующемся в результате пиролиза сосновых брусков (общей массой в 1 кг), и в плотном тумане, создаваемом распылением водно-глицериновой смеси i-fog™ генератором аэрозольных частиц ANTARI-Z800-II.

Эксперименты проводились в Большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН (<http://www.iao.ru>, разд. «Ресурсы») в период с 25.04.2017 по 05.05.2017 г. Краткая характеристика камеры: длина БАК 26 м, внутренний диаметр корпуса 10,25 м, объем 1785 м³. Она снабжена иллюминаторами для ввода в нее и регистрации оптического излучения. Оптико-микрофизическое состояние рассеивающей среды контролировалось на основе обращения поляризационных спектрофелометрических измерений [8, 9] через каждый час в течение всех экспериментов.

Цели, аппаратура и содержание экспериментов

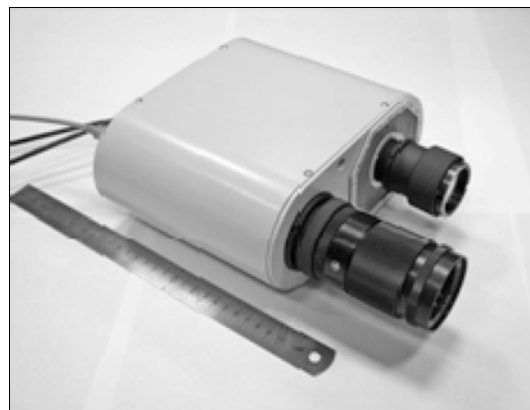
Цели исследований состояли в экспериментальной оценке и сравнении влияния оптических характеристик среды на функцию размытия точки (ФРТ), или функцию размытия перепада яркости (ФРПЯ), или частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) двух систем видения. Под системой видения здесь понимаем (следуя [10, 11]) ОЭС «Зонд М+» или ОЭС «АИ ТИС» (создана в ТУСУРе) вместе с рассеивающей средой и плоскостью объектов с заданными угловыми отражающими или излучающими свойствами.

В состав ОЭС входят: входной объектив, электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с многощелочным фотокатодом (ФК) и микроканальной пластиной (МКП), согласующий объектив, ТВ-датчик (монохромный КМОП сенсор 800 ТВЛ) с повышенной чувствительностью, устройство подсветки, источник питания, блоки управления и ЭВМ со специализированным программным обеспечением. Устройством подсветки является импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), работающий в ближнем ИК-спектре. ЭОП в АИТС выполняет функции быстродействующего оптического затвора и усилителя яркости изображения [12, 13].

На рис. 1 приведены фотографии использованных в экспериментах ОЭС.

Основные технические характеристики ОЭС «АИ ТИС» и ОЭС «Зонд М+» представлены в табл. 1.

В качестве тест-объекта использовались секторные миры и миры типа «шахматное поле». Миры размещались на расстояниях 12, 15, 18, 21, 24 м от иллюминатора, через который в БАК вводилось излучение подсветки от ОЭС. На рис. 2 приведены их исходные изображения.



a



б

Рис. 1. Внешний вид ОЭС «Зонд М+» (*a*) и ОЭС «АИ ТИС» (*б*)

Таблица 1

Характеристики ОЭС «Зонд М+» и ОЭС «АИ ТИС»

Параметр	ОЭС «Зонд М+»	ОЭС «АИ ТИС»
Дальность видения системы, м	До 300	До 180
Угол поля зрения системы, град	8	12
Оптическая мощность подсвета в импульсе, Вт	320	320
Длина волны излучения подсвета, нм	820	842
Частота повторения импульсов подсвета, Гц	0–5200	50–4950
Длительность импульса подсвета, нс	40–120	30–120
Длительность импульсов стробирования ЭОП, нс	30–300	30–120
Регулировка длительности импульсов, нс	Дискретно 10	Плавно ~2
Глубина активной зоны видения, м	10,5–63	9–36
Регулировка тока накачки излучателя	Нет	Есть
Регулировка напряжений ЭОП (ФК и МКП)	Есть	Есть
Контроль формы импульсов на ЭОП	Нет	Есть
Объектив	Юпитер – 37а 3.5/135	Юпитер – 9 2.0/85

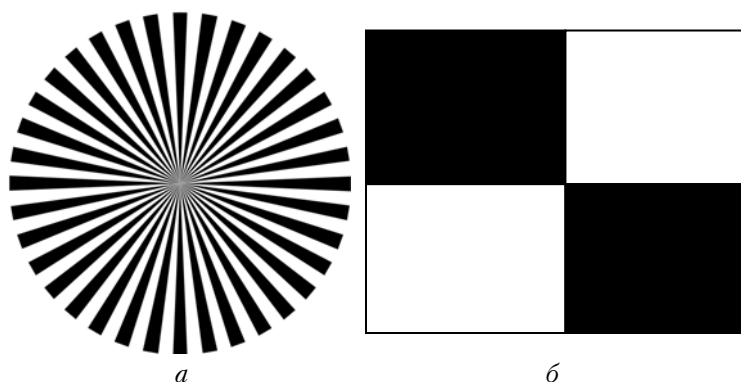


Рис. 2. Исходные идеальные изображения секторной миры (а) и миры «шахматное поле» (б)

Замутнение в камере туманом или дымом продолжалось до момента, когда визуально было невозможно обнаружить миры. В табл. 2 приведены значения коэффициентов аэрозольного ослабления на длине волны 532 нм для двух модельных сред. Счетная концентрация дымовых частиц уменьшалась со временем существенно медленнее, чем счетная концентрация более крупных частиц тумана.

Таблица 2

Коэффициенты аэрозольного ослабления модельных сред на длине волны 532 нм в экспериментах, выполненных в БАК

Время	βε, км ⁻¹ (туман)	βε, км ⁻¹ (дым)	
	4.05.2017 г.	27.04.2017 г.	2.05.2017 г.
13:00	—	56,5	102,1
14:00	294,4	147,7	135,0
15:00	206,6	136,3	116,7
16:00	148,8	126,4	108,9
17:00	115,0	117,0	97,6
18:00	91,4	106,3	83,8
19:00	72,2	—	72,6

Оптическая протяженность трассы наблюдения $\tau = \beta\varepsilon \times L$, где $\beta\varepsilon$ — коэффициент ослабления, L — расстояние от иллюминатора до тест-объекта в камере. Оптическая протяженность трассы наблюдения до миры, удаленной на расстояние $L = 24$ м, в процессе экспериментов уменьшалась в случае тумана от 7,06 до 1,73. За время проведения эксперимента в дымовой среде она уменьшалась с 3,63 до 2,61 (27.04.2017 г.) и с 3,40 до 1,83 (2.05.2017 г.).

Разрешение на видеокамерах АИТС в процессе всего цикла измерений не менялось и составляло 1280×720 элементов. Параметры усиления и экспозиции видеокамеры варьировались в зависимости от условий наблюдения. Запись видеопоследовательностей выполнялась без применения компрессии.

Результаты экспериментов

Поскольку пространственные и частотные линейно-системные характеристики функционально связаны, то ограничимся анализом влияния рассеивающих сред на ЧКХ. Под пространственными характеристиками в данном случае будем понимать ФРТ или ФРПЯ.

В работе [7] подробно описана методика определения ЧКХ на основе изображений секторной миры, которая сводится к следующему.

Шаг 1. Фиксируется усредненное изображение миры без рассеивающей среды при предельно малом уровне ее освещенности.

Шаг 2. Из изображений удаляются аппаратурные помехи.

Шаг 3. Осуществляется оценка контрастов изображения секторов миры по формуле

$$k = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

где k — контраст; I_{\max} и I_{\min} — средние значения яркости изображения по заданному радиусу. Значения интенсивности меньше, чем среднее, относим к темным секторам, а больше, чем среднее, — к светлым. Расчет пространственной частоты в зависимости от радиуса миры r и количества пар секторов n_i осуществляется по формуле

$$\omega_i = n_i / r.$$

Этот способ оценки ЧКХ можно назвать прямым, он не требует обращения к операциям с преобразованиями Фурье или поиска производных от функций, определенных в эксперименте.

В случае мир «шахматное поле» этой процедуры избежать не удастся. На первом этапе работы алгоритма определения линейно-системных характеристик после выделения подходящей области изображения (содержащей перепад яркости) осуществляется поиск границы перепада. Граница находится на основе анализа функции размытия линии в каждой строке рассматриваемой области за счет использования конечно-разностной схемы в интервале $[-1; 1]$. Перед вычислением центроидов линий применяется окно Хемминга. Это улучшает стабильность результатов нахождения границы. На следующем этапе находится угол наклона перепада и осуществляется усреднение интенсивностей по всем линиям с учетом смещения границы и вычисление функции размытия перепада яркости [14]. Затем выполняется расчет первой производной ФРПЯ по координате при помощи разностной схемы $[-1; 0; 1]$. ФРТ вычисляется с помощью свертки ФРПЯ с коэффициентами $[-0,5; 0; 0,5]$.

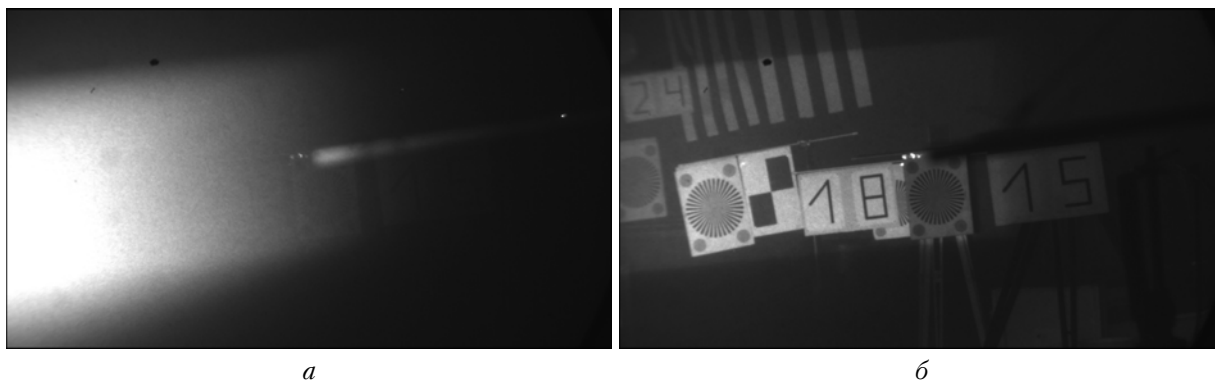


Рис. 3. Изображения тест-объектов при максимальной плотности дыма: без стробирования приемника (а), режим стробирования (подавление помехи обратного рассеяния) (б)

Обсуждаемые ниже результаты относятся к наблюдению миры, удаленной на расстояние $L = 18$ м от иллюминатора, так как качественно все зависимости, полученные для этого расположения миры, будут аналогичны тем, которые получены для других значений L , принимая во внимание однородность рассеивающей среды.

На рис. 3 приведен пример изображений, полученных в экспериментах 2017 г. в условиях максимальной плотности дыма в режиме стробирования приемника и без него.

Рис. 4 иллюстрирует пример ЧКХ, полученных в экспериментах 2017 г. для максимальной плотности дыма и для этих же оптико-геометрических условий, но без стробирования приемника. Аналогичные результаты были получены в [4] при статистическом моделировании процессов формирования изображений методом Монте-Карло в этих двух случаях.

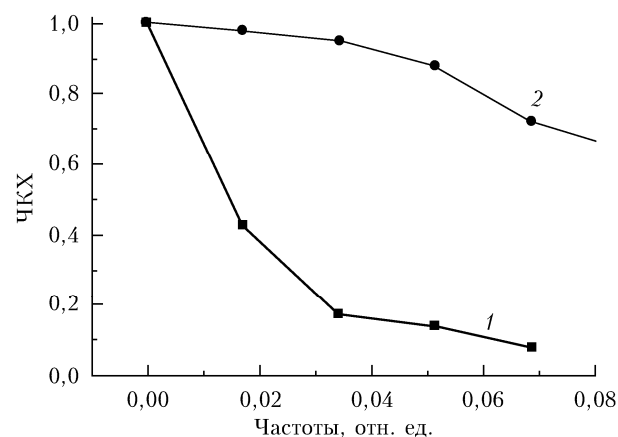


Рис. 4. Частотно-контрастные характеристики, полученные при плотном дыме и постоянно открытом приемнике (1) и приеме с селекцией помехи обратного рассеяния (2)

В табл. 3–6 приведены результаты оценки ЧКХ на уровнях 0,1; 0,3 и 0,5 по изображениям, сформированным ОЭС «Зонд М+» и ОЭС «АИ ТИС» в режиме стробирования для различной плотности двух модельных сред (изменяющейся со временем регистрации изображений). В табл. 4 и 6 приведе-

ны результаты оценки ЧКХ для тех же условий, что и для табл. 3 и 5, но с медианной фильтрацией изображений мир. Медианная фильтрация с апертурой 2×2 применялась для устранения помех ТВ-камеры ОЭС, проявляющихся при низком уровне освещенности [7].

Таблица 3
Результаты оценки ЧКХ в условиях тумана (4.05.2017 г.)

Уровень ЧКХ	Время				
	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
0,5 (Зонд М+)	0,0834	0,0942	0,0947	0,0964	0,0962
0,5 (АИ ТИС)	0,0951	0,0980	0,0949	0,0986	0,1006
0,3 (Зонд М+)	0,1457	0,1398	0,1403	0,1493	0,1470
0,3 (АИ ТИС)	0,1349	0,1491	0,1501	0,1577	0,1601
0,1 (Зонд М+)	0,1821	0,2355	0,2350	0,2415	0,2332
0,1 (АИ ТИС)	0,2377	0,2386	0,2386	0,2469	0,2447

Таблица 4
Результаты оценки ЧКХ в условиях тумана (4.05.2017 г.); медианная фильтрация

Уровень ЧКХ	Время				
	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
0,5 (Зонд М+)	0,0911	0,0925	0,0911	0,0935	0,0921
0,5 (АИ ТИС)	0,0906	0,0939	0,0917	0,0958	0,0972
0,3 (Зонд М+)	0,1440	0,1410	0,1357	0,1402	0,1407
0,3 (АИ ТИС)	0,1233	0,1397	0,1388	0,1454	0,1495
0,1 (Зонд М+)	0,1974	0,2166	0,2190	0,2123	0,2109
0,1 (АИ ТИС)	0,2362	0,2308	0,2222	0,2342	0,2338

Таблица 5
Результаты оценки ЧКХ в условиях дыма (2.05.2017 г.)

Уровень ЧКХ	Время				
	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
0,5 (Зонд М+)	0,1273	0,1229	0,1233	0,1222	0,1214
0,5 (АИ ТИС)	0,1133	0,1129	0,1129	0,1135	0,1198
0,3 (Зонд М+)	0,1559	0,1555	0,1540	0,1550	0,1557
0,3 (АИ ТИС)	0,1480	0,1474	0,1462	0,1495	0,1506
0,1 (Зонд М+)	0,2381	0,2426	0,2564	0,2590	0,2456
0,1 (АИ ТИС)	0,2584	0,2158	0,2501	0,2551	0,2429

Таблица 6

Результаты оценки ЧКХ в условиях дыма
(2.05.2017 г.); медианная фильтрация

Уровень ЧКХ	Время				
	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
0,5 (Зонд М+)	0,1147	0,1146	0,1160	0,1153	0,1142
0,5 (АИ ТИС)	0,1087	0,1098	0,1074	0,1083	0,1124
0,3 (Зонд М+)	0,1487	0,1487	0,1486	0,1505	0,1508
0,3 (АИ ТИС)	0,1445	0,1426	0,1417	0,1450	0,1439
0,1 (Зонд М+)	0,2236	0,2429	0,2362	0,2317	0,2382
0,1 (АИ ТИС)	0,2311	0,2007	0,2065	0,2277	0,2223

Заключение

Из результатов экспериментов, выполненных в 2017 и 2018 гг., следует, что при оценивании влияния оптических характеристик среды на качество изображения конкретных активно-импульсных телевизионных систем можно использовать в качестве тест-объектов как радиальные черно-белые секторные миры, так и черно-белые миры типа «шахматное поле».

При использовании секторных мир удается построить методику измерения ЧКХ систем видения, исключающую необходимость обращения к операциям с преобразованиями Фурье или поиску производных от функций, определенных в эксперименте. В случае мир «шахматное поле» этих процедур избежать не удается.

Частотно-контрастные характеристики, полученные двумя этими способами, близки. Их отличие можно объяснить и тем, что в системах «Зонд М+» и ОЭС «АИ ТИС» используются различные объективы, центральная длина волны излучения решетки полупроводниковых лазеров (см. табл. 1) и неабсолютная идентичность параметров электронно-оптических преобразователей.

Экспериментально подтверждено, что качество изображения ОЭС с селекцией помехи обратного рассеяния почти на порядок выше, чем в случае ОЭС без стробирования, если оптическая протяженность (оптическая толщина) мутных сред не менее 3–6 единиц. Этот результат подтверждает вывод, сделанный в [4] на основе моделирования процесса формирования изображений в ОЭС такого типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 8.9562.2017/8.9) и РФФИ (проект № 16-42-700072).

1. Красик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 478 с.
2. Andersen J.F., Busck J., Heiselberg H. Long distance high accuracy 3-D laser radar and person identification // Proc. SPIE. 2005. V. 5791. P. 9–16.

V.V. Belov, Yu.V. Gridnev, V.V. Kapustin, V.S. Kozlov, A.N. Kudryavtsev, M.I. Kuryachy, A.K. Movchan, R.F. Rakhimov, M.V. Panchenko, V.P. Shmargunov. **Experimental estimation of frequency-contrast characteristics of active pulsed TV OES under conditions of enhanced aerosol medium turbidity.**

Results of laboratory experiments on the study of the influence of scattering and absorbing media on the quality of object imaging with active pulsed TV OES are discussed. It is shown that the quality of object imaging with active pulsed vision system or its frequency-contrast characteristic can be estimated by direct measurements or indirectly using the Fourier transforms of test object images or the derivatives of the functions derived experimentally. Previously formulated theoretical statement that the quality of images of objects screened by turbid media made with active pulsed OES with selection of backscattered noise signals can be almost 10 times better than that for the OES operated with laser side illumination and constantly opened receiver has been confirmed experimentally.

3. David O., Kopeika N.S., Weizer B. Range gated active night vision system for automobiles // Appl. Opt. 2006. V. 45, N 28. P. 7248–7254.
4. Belov V.V. Statistical modeling of imaging process in active night vision systems with gate-light detection // Appl. Phys. 2002. V. 75, N 4–5. P. 571–576.
5. Волков В.Г. Методы модернизации активно-импульсных приборов ночного видения // Приборостроение. Электротехника. Радиотехника. Электроника. 2011. № 4. С. 60–63.
6. Белов В.В., Матвиенко Г.Г., Пак Р.Ю., Шиянов Д.В., Кирпиченко Р.Ю., Курачий М.И., Пустынский И.Н., Шурыгин Ю.А. Активные ТВ-системы видения с селекцией фонов рассеяния // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 25–30.
7. Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Тарасенков М.В. Экспериментальные исследования влияния оптических характеристик среды на качество изображения в ОЭС видения с селекцией помехи обратного рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 285–290; Belov V.V., Abramochkin V.N., Gridnev Yu.V., Kudryavtsev A.N., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Tarasenkov M.V. Experimental study of the influence of optical characteristics of a medium on the image quality in optoelectronic systems with backscattered noise signal selection // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 429–434.
8. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофелометрических измерений в смешанных дымах // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897.
9. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства широзного дыма по данным измерений 4-волновым поляризационным спектрофелометром // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1045–1053.
10. Белов В.В. Метод функций Грина и линейно-системный подход в теории переноса и регистрации оптического излучения // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 8. С. 823–828.
11. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
12. Мищенко Н.И., Пустынский И.Н., Капустин В.В. Методы и средства повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения безопасности объектов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2016. Т. 19, № 3. С. 42–46.
13. Kapustin V.V., Movchan A.K., Kuryachiy M.I. Vision area parameters analysis for active-pulse television-computing systems // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON-2017). 29–30 June, 2017. Astana, Kazakhstan. P. 1–4.
14. Greer P.B., van Doorn T. Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method // Med. Phys. 2000. V. 27, N 9. P. 2048–2059.