

УДК 621.383.001.66

Адаптивная система компенсации влияния атмосферной дымки для телевизионной системы летательного аппарата

А. Б. Бельский, Б. Н. Сеник, А. Б. Сухачев

ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл., Россия

Дана оценка влияния атмосферной дымки на работу телевизионной системы летательного аппарата. Рассмотрена возможность компенсации влияния атмосферной дымки на применение светофильтров для телевизионных систем с фотоприемником на основе ПЗС-матриц. Предложена адаптивная система компенсации влияния атмосферной дымки.

При наблюдении подстилающей поверхности с борта летательного аппарата на работу телевизионной системы (ТВ-системы) оказывает влияние атмосферная дымка, вызванная рассеиванием света на гидрометеорах, частицах пыли и пр. Она приводит не только к ослаблению потока излучения, поступающего на вход приемника излучения, но и к формированию паразитного потока излучения за счет переотражения света от неоднородностей атмосферы. В результате на вход приемника излучения поступают три независимых потока излучения: от объекта наблюдения, от подстилающей поверхности и от атмосферной дымки.

Модель работы ТВ-системы в условиях воздействия атмосферной дымки представлена на рис. 1.

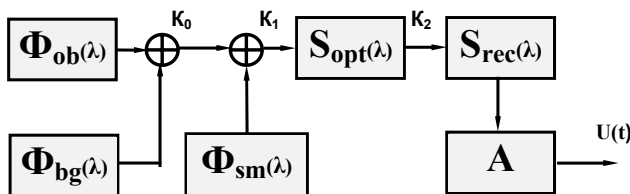


Рис. 1. Модель работы ТВ-системы в условиях воздействия атмосферной дымки

Эффективная величина суммарного потока излучения от объекта на входе оптической системы описывается выражением

$$\Phi_{ef.ob} = \int_0^{\infty} \Phi_{ob}(\lambda) \tau_s(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\tau_s(\lambda)$ — функция спектрального пропускания среды распространения.

Эффективная величина суммарных потоков излучения от фона и от дымки на входе оптической системы описывается выражениями, аналогичными выражению (1), в которых вместо параметра $\Phi_{ob}(\lambda)$ используются параметры $\Phi_{bg}(\lambda)$ и $\Phi_{sm}(\lambda)$, соответственно.

Контраст объекта является характеристикой, определяющей возможность селекции объекта наблюдения на фоне подстилающей поверхности. Этот контраст на фоне последней определяется выражением

$$K_0 = \Delta\Phi_{ef.ob} / (\Delta\Phi_{ef.ob} + \Phi_{ef.bg}), \quad (2)$$

где $\Delta\Phi_{ef.ob} = |\Delta\Phi_{ef.ob} - \Phi_{ef.bg}|$ — превышение эффективного потока, формируемого объектом, над эффективным потоком, формируемым фоном.

При воздействии на вход приемника дополнительного фонового потока от атмосферной дымки доля полезного сигнала от объекта уменьшается, при этом контраст объекта также уменьшается и становится равным

$$K_1 = \Delta\Phi_{ef.ob} / (\Delta\Phi_{ef.ob} + \Phi_{ef.bg} + \Phi_{ef.sm}). \quad (3)$$

Преобразуя (3) с учетом (2), получим выражение для оценки контраста объекта на входе оптической системы с учетом влияния дымки

$$K_1 = K_0 \Delta\Phi_{ef.ob} / (\Delta\Phi_{ef.ob} + K_0 \Phi_{ef.sm}). \quad (4)$$

Эффективная величина суммарного потока излучения, на которую реагирует приемник излучения, описывается выражением

$$\Phi_{1ef} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\Phi_{ob}(\lambda) + \Phi_{bg}(\lambda) + \Phi_{sm}(\lambda)] \tau_s(\lambda) \times \\ \times S_{opt}(\lambda) S_{rec}(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где $\tau_s(\lambda)$ — функция спектрального пропускания среды распространения;

$S_{opt}(\lambda)$ — функция спектрального пропускания оптики;

$S_{rec}(\lambda)$ — спектральная чувствительность приемника излучения;

λ_{\min} — λ_{\max} — рабочий диапазон длин волн оптико-электронной системы.

Контраст объекта с учетом влияния дымки, спектральных характеристик оптической системы и приемника излучения равен

$$K_2 = K_0 \Delta\Phi_{1ef.ob} / (\Delta\Phi_{1ef.ob} + K_0 \Phi_{1ef.sm}). \quad (6)$$

В современных ТВ-системах широкое применение нашли фотоприемники на основе ПЗС-матриц [1—7]. В настоящее время ПЗС-матрицы выпускаются на основе "типовой" технологии CCD и по технологии CMOS. В 1999 г. фирма Sony усовершенствовала микролинзовый массив, концентрирующий свет на фоточувствительных элементах, и начала серийный выпуск ПЗС-матриц по технологии ExwaveHad CCD. В данной работе рассмотрено влияние дымки на работу ТВ-системы с фотоприемником на основе монохромной ПЗС-матрицы на примере четырех типов ПЗС-матриц: M3085, V1205, LZ2364BJ и ICX-259AL. При этом ПЗС-матрица типа LZ2364BJ фирмы Sharp

выполнена по "типовой" технологии CCD; ПЗС-матрицы типа M3085 фирмы Marshall Electronics (США) и V1205 фирмы OmniVision (США) — по технологии CMOS, а ПЗС-матрица типа ICX-259AL фирмы Sony — по технологии ExwaveHad CCD.

Спектральные характеристики ПЗС-матриц LZ2364BJ и ICX-259AL взяты из работы [3] и ориентированы на работу в видимой области спектра.

ПЗС-матрицы M3085 и V1205 имеют спектральную характеристику, "сдвинутую" в ближнюю ИК-область спектра и полученную экспериментально в НТЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" (НТЦ ОАО КМЗ) [4]. Спектральные характеристики ПЗС-матриц приведены на рис. 2.

Зависимость относительной спектральной интенсивности излучения атмосферной дымки от длины волны [2] приведена на рис. 3.

Рис. 2. Спектральные характеристики ПЗС-матриц

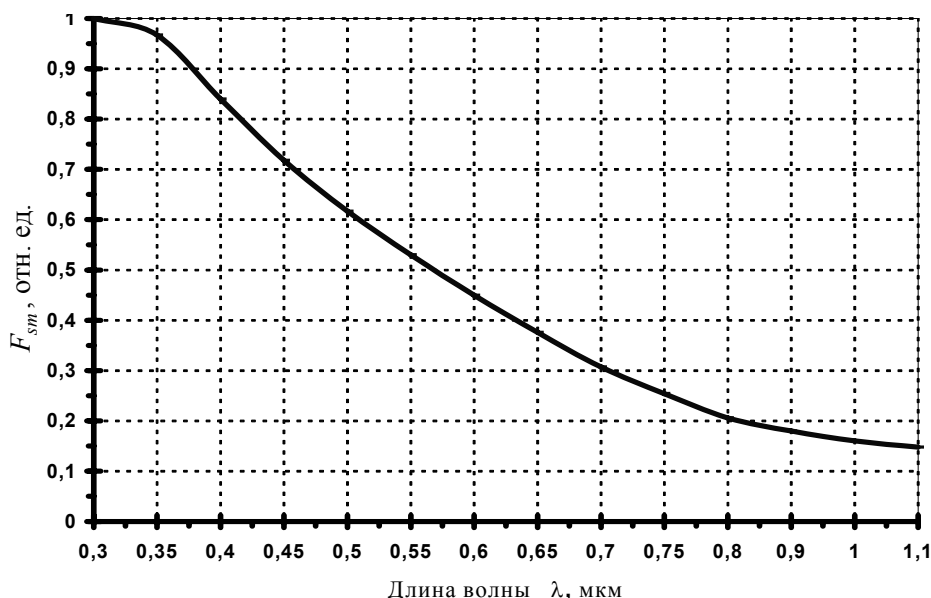
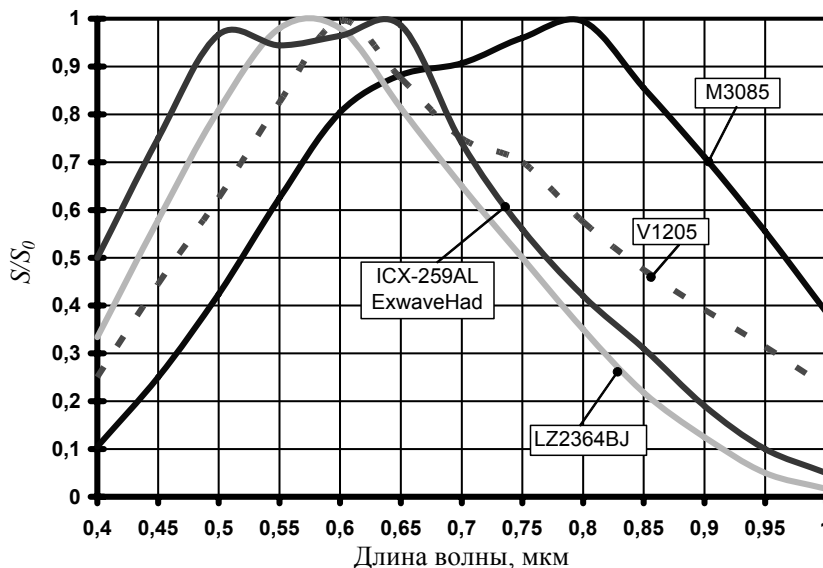


Рис. 3. Зависимость относительной спектральной интенсивности излучения атмосферной дымки от длины волны

Для ослабления влияния атмосферной дымки в оптической системе оптико-электронных приборов используются светофильтры [1, 2]. Для оценки влияния паразитного потока излучения, формируемого атмосферной дымкой, на работу ТВ-системы, на входе которой расположен светофильтр, разработана математическая модель, основанная на использовании выражений (1)—(6) [4]. При разработке математической модели предполагалось, что амплитудно-частотная характеристика светофильтра имеет вид, представленный на рис. 4.

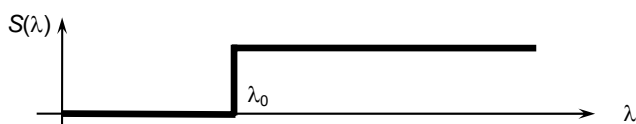


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика светофильтра

Расчетная оценка влияния длины волны среза светофильтра λ_0 , расположенного на входе опти-

ческой системы, на величину контраста объекта, реально воспринимаемого приемником излучения K_2 , и на величину эффективного потока излучения, воспринимаемого фотоприемником, приведены в табл. 1 и на рис. 5. При оценке были приняты следующие допущения: исходный контраст объекта $K_0 = 1,0$, величина затухания в атмосфере $\tau_s(\lambda)$ инвариантна к длине волны.

При использовании светофильтров с различной длиной волны среза одновременно с уменьшением влияния дымки уменьшается и величина эффективного потока излучения, воспринимаемого приемником. Это приводит к уменьшению чувствительности ТВ-системы и увеличению величины минимальной освещенности на местности, при которой обеспечивается заданное качество воспроизведения изображения наблюдаемой сцены.

Результаты расчета изменения нормированной величины эффективного потока излучения, воспринимаемого приемником излучения, в зависимости от длины волны среза светофильтра, приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 1

Изменение контраста объекта K_2 в зависимости от длины волны среза светофильтра

Тип ПЗС-матрицы	Длина волны среза светофильтра, мкм												
	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
M3085	0,765	0,769	0,777	0,787	0,801	0,817	0,832	0,846	0,859	0,870	0,879	0,885	0,890
V1205	0,726	0,735	0,747	0,763	0,782	0,805	0,827	0,844	0,859	0,870	0,879	0,885	0,890
LZ2364BJ	0,684	0,697	0,711	0,730	0,754	0,779	0,804	0,826	0,846	0,860	0,872	0,879	—
ICX-259AL	0,689	0,699	0,717	0,738	0,760	0,783	0,809	0,830	0,848	0,861	0,873	0,880	0,886

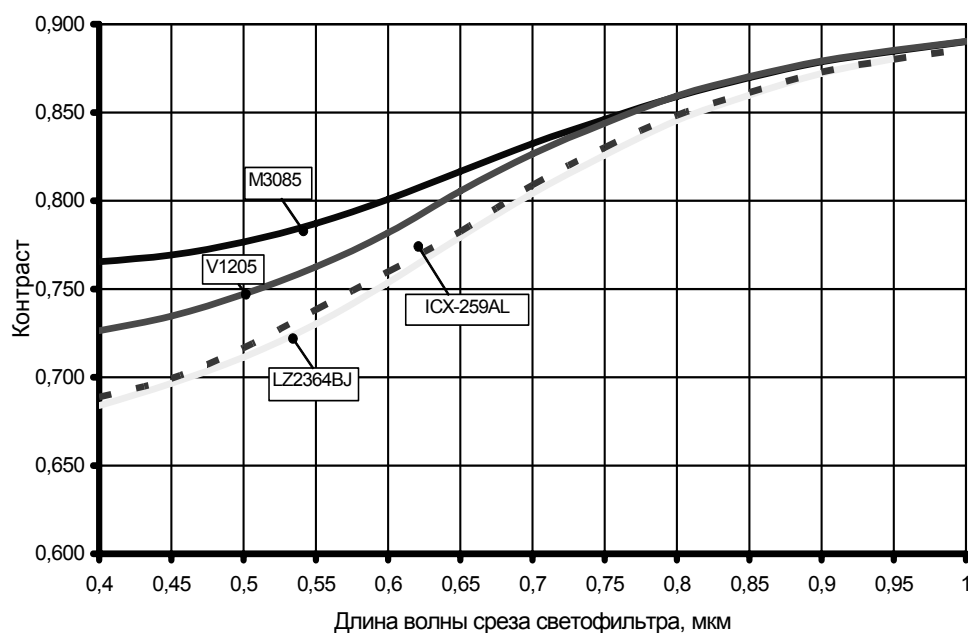


Рис. 5. Изменение контраста объекта в зависимости от длины волны среза светофильтра

Таблица 2

Изменение нормированной величины эффективного потока излучения, воспринимаемого приемником излучения, в зависимости от длины волны среза светофильтра

Тип ПЗС-матрицы	Длина волны среза светофильтра, мкм												
	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
M3085	1,00	0,99	0,96	0,91	0,84	0,75	0,65	0,55	0,44	0,33	0,23	0,15	0,09
V1205	1,00	0,97	0,91	0,83	0,72	0,59	0,48	0,38	0,29	0,22	0,15	0,10	0,06
LZ2364BJ	1,00	0,95	0,86	0,73	0,58	0,43	0,30	0,20	0,12	0,06	0,03	0,01	—
ICX-259AL	1,00	0,95	0,84	0,71	0,59	0,45	0,32	0,22	0,14	0,09	0,05	0,02	0,01

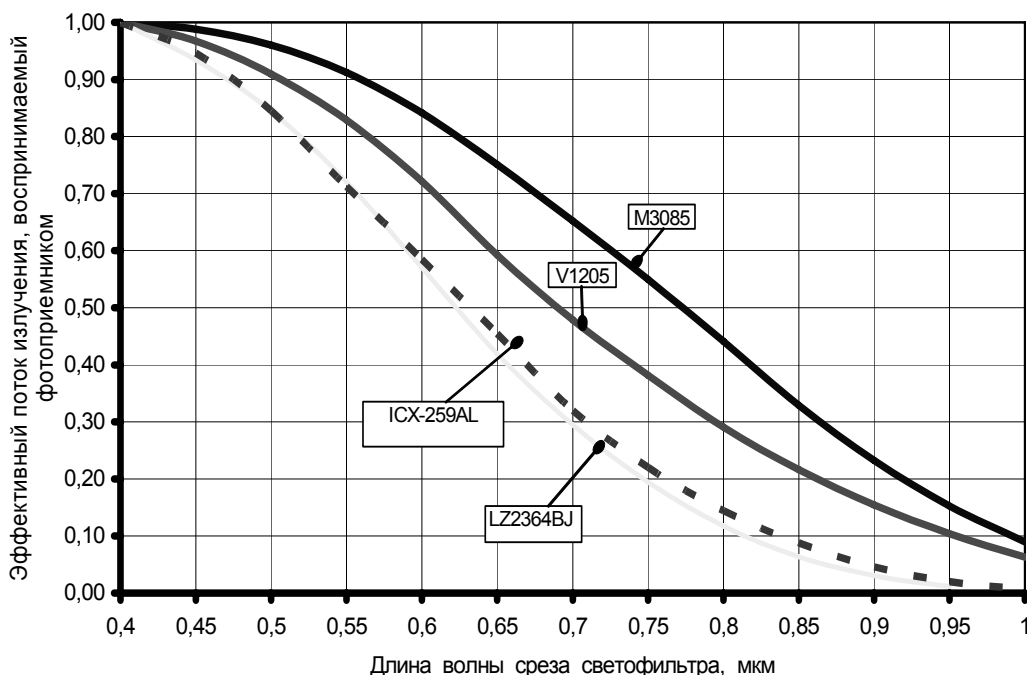


Рис. 6. Изменение нормированной величины эффективного потока излучения, воспринимаемого фотоприемником, в зависимости от длины волны среза светофильтра

Параметры цветного оптического стекла в соответствии с ГОСТ 9411—66, используемого для производства светофильтров, приведены в табл. 3.

Расчетная оценка влияния применения стандартных светофильтров типов ОС12, КС13, КС17 в оптическом канале ТВ-системы приведена в

табл. 4. Здесь K_2 — контраст объекта, реально воспринимаемый приемником излучения с учетом воздействия атмосферной дымки; ΔK_2 — приращение контраста на входе приемника излучения за счет применения светофильтра.

Таблица 3

Длина волны, мкм	Тип стекла												
	ЖС12	ЖС17	ЖС18	ОС12	ОС14	КС10	КС11	КС13	КС14	КС15	КС17	КС19	ИКС5
λ_0	0,56	0,58	0,6	0,65	0,68	0,68	0,68	0,7	0,72	0,72	0,75	0,8	1,1
λ_{let}	0,45	0,49	0,51	0,55	0,58	0,6	0,61	0,63	0,64	0,65	0,67	0,7	0,8

Примечание. λ_{let} — длина волны, при которой оптическая плотность стекла при данной толщине превышает на 0,3 оптическую плотность на длине волны λ_0 (коэффициент пропускания светофильтра τ уменьшается в два раза).

Таблица 4

Тип ПЗС-матрицы	Без светофильтра		ОС12			КС13			КС17		
	Поток	K_2	Поток	K_2	ΔK_2	Поток	K_2	ΔK_2	Поток	K_2	ΔK_2
LZ2364BJ	1,0Ф ₀	0,68	0,43Ф ₀	0,78	0,1	0,3Ф ₀	0,8	0,12	0,2Ф ₀	0,83	0,15
V1205	1,0Ф ₀	0,73	0,59Ф ₀	0,81	0,08	0,48Ф ₀	0,83	0,1	0,38Ф ₀	0,84	0,11
M3085	1,0Ф ₀	0,77	0,75Ф ₀	0,82	0,05	0,65Ф ₀	0,84	0,07	0,55Ф ₀	0,85	0,08
ICX-259AL	1,0Ф ₀	0,69	0,45Ф ₀	0,79	0,11	0,32Ф ₀	0,81	0,13	0,22Ф ₀	0,84	0,16

Расчетные значения выигрыша по приращению контраста объекта ΔK при работе в условиях наличия атмосферной дымки для различных типов фотоприемников на основе ПЗС-матриц и различных типов светофильтров приведены в табл. 5.

Тип светофильтра	Выигрыш по приращению контраста ΔK при работе в условиях наличия атмосферной дымки для различных типов ПЗС-матриц, %			
	LZ236BJ	ICX-259AL	V1205	M3085
Без светофильтра	0	1	5	9
OC12	10	11	13	14
KC13	12	13	15	16
KC17	15	16	16	17

Таблица 5

Как видно из табл. 4 и 5, применение светофильтров обеспечивает повышение контраста объекта в условиях наличия атмосферной дымки. Для наиболее эффективной борьбы с влиянием атмосферной дымки целесообразно использовать светофильтры типов KC13 и KC17. При этом наибольший выигрыш по приращению контраста достигается при применении фотоприемников, выполненных на основе ПЗС-матриц со спектральной характеристикой, расширенной в ближнюю ИК-область спектра (V1205, M3085). Выигрыш по ослаблению потока излучения по сравнению с "типовой" ПЗС-матрицей LZ2364BJ по технологии CCD составляет для этих фотоприемников от 1,5 до 2,7 раза. Однако величина ослабления светового потока для этих фотоприемников за счет применения светофильтров составляет от 45 до 62 %. Минимальная рабочая освещенность на местности при применении объектива с относительным отверстием 1:2,0 составляет порядка 10 лк для ПЗС типа M3085 и порядка 1 лк — для ПЗС типа V1205.

Применение фотоприемников, выполненных на основе ПЗС-матриц с применением ExwaveNad CCD-технологии, позволяет получить выигрыш по контрасту объекта в случае использования светофильтров типов KC13, KC17 от 13 до 17 %. Ослабление светового потока в случае применения светофильтров компенсируется повышенной чувствительностью ПЗС-матриц с применением ExwaveNad CCD-технологии. Поэтому можно прогнозировать возможность работы ТВ-системы с применением объектива с относительным отверстием 1: 2,0, светофильтров типа KC13, KC17 и фотоприемников на основе ПЗС-матриц, выполненных с применением ExwaveNad CCD технологии, в условиях воздействия атмосферной дымки при минимальной освещенности на местности порядка 0,1 лк.

В то же время, как показано в [2], при "низком" положении Солнца над горизонтом интенсивность

спектра солнечного излучения сдвигается в красную область (рис. 7). При этом, как следует из рис. 3, относительная спектральная интенсивность излучения атмосферной дымки уменьшается в четыре—пять раз по сравнению с "высоким" положе-

нием Солнца над горизонтом. Это обстоятельство позволяет предположить, что при малых уровнях освещенности, характерных для "низкого" положения Солнца над горизонтом, введение дополнительных светофильтров в оптический тракт ТВ-системы для компенсации влияния атмосферной дымки нецелесообразно.

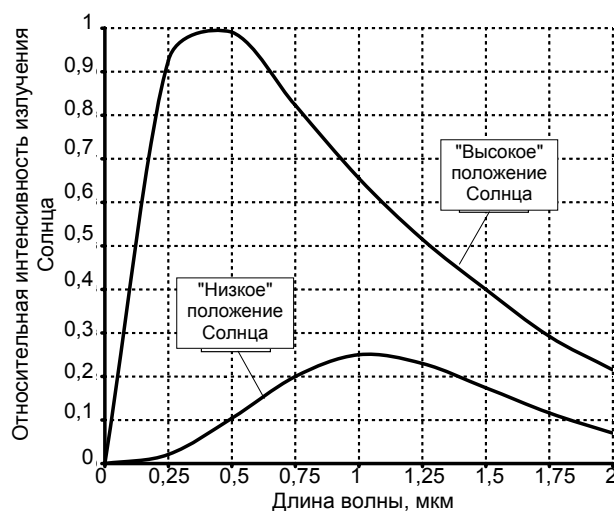


Рис. 7. Зависимость относительной спектральной интенсивности солнечного света от длины волны при "высоком" и "низком" положениях Солнца над горизонтом

Для компенсации влияния атмосферной дымки ТВ-система, расположенная на борту летательного аппарата, должна строиться как адаптивная система, реагирующая на величину освещенности сцены. Адаптивная система компенсации атмосферной дымки (рис. 8) состоит из системы автоматической регулировки экспозиции фотоприемника (поз. 1) и дискретной системы автоматического регулирования (поз. 2), обеспечивающей введение в оптический тракт светофильтра, оптимального с точки зрения компенсации влияния атмосферной дымки.

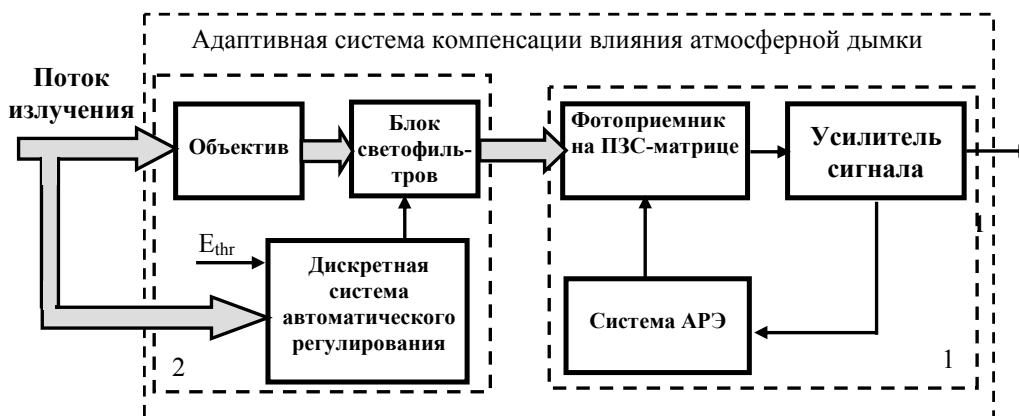


Рис. 8. Функциональная схема адаптивной системы компенсации влияния атмосферной дымки

Дискретная система автоматического регулирования (см. поз. 2) анализирует поток входного излучения, и в случае уменьшения освещенности сцены ниже заданного порогового значения E_{thr} , когда компенсация влияния атмосферной дымки становится нецелесообразной, выводит светофильтр из оптического тракта ТВ-системы, обеспечивая работу последней при минимальной освещенности, определяемой пороговой чувствительностью фотоприемника и светосилой объектива. При значениях освещенности сцены выше значения E_{thr} , дискретная система автоматического регулирования (см. поз. 2) вводит светофильтр в оптический тракт ТВ-системы, обеспечивая компенсацию влияния атмосферной дымки.

Современные фотоприемники на основе ПЗС-матриц с встроенной системой АРЭ за счет изменения времени накопления заряда могут обеспечить адаптацию ТВ-системы к изменению освещенности на объекте примерно в 10^6 раз (120 дБ) за время не более 20 мс, что компенсирует изменение величины потока, падающего на фотоприемник при введении (выведении) светофильтра в оптический тракт ТВ-системы.

Исследования, проведенные в НТЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" [4, 5], показали, что величина порога освещенности, при котором целесообразно осуществлять выведение из оптического тракта ТВ-системы светофильтра, компенсирующего влияние атмосферной дымки (E_{thr}), составляет от 10 до 20 лк для современных фотоприемников на основе ПЗС-матриц, выполненных по ExwaveNad CCD-технологии.

Выводы

Применение в ТВ-системах современных фотоприемников на основе ПЗС-матриц, выполненных с применением ExwaveNad CCD-технологии и адаптивной системы компенсации атмосферной дымки с использованием светофильтров типа КС13, КС17, обеспечивает выигрыш по контрасту объекта наблюдения от 13 до 16 % в условиях нормальной и повышенной освещенности, а также максимальную чувствительность ТВ-системы, определяемую характеристиками фотоприемника и светосилой объектива в условиях пониженной освещенности.

Литература

1. Якушенок Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Логос, 1999. — 479 с.
2. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). — М.: Сов. радио, 1987. С. 368.
3. Волков В. Г. Малогабаритные телевизионные системы: Обзор № 5591. — М.: НТЦ Информтехника, 2000. — 154 с.
4. Науч.-техн. отчет по НИР "Образ"/ НТЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева". — Красногорск, 2001.
5. Науч.-техн. отчет по НИР "Астрахань"/ Там же, 2004.
6. Бельский А. Б., Сенник Б. Н., Сухачев А. Б. Оценка влияния атмосферной дымки на работу телевизионной системы летательного аппарата// Сб. Междунар. академии "Контенант". 2004. № 4. С. 34.
7. Бельский А. Б. Обоснование структуры оптико-электронной визирной системы прицельного-навигационного комплекса перспективного боевого вертолета: Дис... на соискание уч. степени канд. техн. наук. — М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2005.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2006 г.

Adaptive system of atmospheric fog effect compensation for vehicle TV-system

A. B. Belskiy, B. N. Senik, A. B. Sukhachev

The Joint-Stock Company "Krasnogorsky Zavod im. S. A. Zverev", Krasnogorsk, Moscow region, Russia

The evaluation was performed to define the atmospheric fog effect on the vehicle TV-system. The possibility of atmospheric fog compensation using light filters for TV-system with CCD array photo-receiver was observed in this document. Adaptive atmospheric fog compensation system was offered.

УДК 621.383.001.66

Оценка требований к точности стабилизации оптической оси оптико-электронной системы

А. Б. Бельский, А. Б. Сухачев

ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл., Россия

Тактические возможности и уровень эффективности оптико-электронных систем (ОЭС) во многом определяют их работу в реальных условиях окружающей обстановки. Рассмотрена возможность оптимизации функционирования ОЭС, расположенных на подвижных объектах. Получены результаты для оценки значений величины среднего квадратического отклонения для системы стабилизации оптической оси ОЭС в обзорных и обзорно-прицельных комплексах для подвижных наземных и воздушных объектов специальной техники.

Одной из задач оптимизации работы ОЭС, расположенной на подвижном объекте (например летательном аппарате), является обеспечение пространственной стабилизации ее оптической оси.

Сдвиг изображения, возникающий во время накопления сигнала в фотоприемнике ОЭС, представляет собой одну из наиболее существенных причин уменьшения контраста малоразмерных объектов и ухудшения резкости изображения.

Даже при идеальной стабилизации линии визирования смещение изображения возникает в связи с перемещением летательного аппарата за время накопления энергетического потока в фотоприемнике. Известно, что при наличии смещения (сдвига) изображения каждая точка местности воспроизводится отрезком прямой линии, длина которой пропорциональна путевой скорости полета, продолжительности экспонирования и масштабу изображения [1]

$$S = T \sin^2 \beta V_g f H,$$

где S — сдвиг изображения, м;

T — время накопления в фотоприемнике, с;

V_g — путевая скорость, м/с;

f — фокусное расстояние объектива, м;

β — угол наклона оптической оси ОЭС относительно горизонта;

H — высота полета, м.

Влияние сдвига изображения на разрешающую способность фотографической системы [2] описывается соотношением

$$R/R_0 = \{[\sin(\pi R_0 S \eta)/(\pi R_0 S \eta)] \times [\sin(\pi R_0 S (1 - \eta))/(\pi R_0 S (1 - \eta))]\}^{0,36},$$

где R — разрешающая способность при сдвиге изображения;

R_0 — разрешающая способность без сдвига изображения;

S — величина сдвига изображения;

η — КПД затвора фотоаппарата.

Влияние сдвига изображения на разрешающую способность оптико-электронной системы с учетом $\eta = 1,0$ описывается соотношением [1]

$$R/R_0 = \{[\sin(\pi R_0 S)/(\pi R_0 S)]\}^{0,36}, \quad (1)$$

Упрощенная графическая модель для оценки сдвига изображения [2] представлена на рис. 1. Для оценки величины сдвига изображения по фоточувствительной зоне фотоприемника может использоваться выражение [1]