

С.А. Покотило

СТАБИЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В АТМОСФЕРНО-АДАПТИВНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрено влияние искажающих факторов атмосферно-оптического канала (АОК) на качество изображений, формируемых оптико-электронными системами наблюдения (ОЭСН), и выделены технические параметры ОЭСН, которые могут быть управляемыми. Обобщены и систематизированы данные об изменениях параметров АОК и о соответствующих перестраиваемых параметрах ОЭСН, а также варианты взаимодействия оптического излучения с атмосферным аэрозолем. Даны определения иконического процесса и адаптивной ОЭСН. Показана целесообразность совместного адаптивного управления энергетическими (спектральными) и пространственно-частотными характеристиками ОЭСН. Предложены способ изменения спектрального диапазона работы ОЭСН, основанный на применении клиновидного интерференционного фильтра, и алгоритм идентификационной адаптации ОЭСН, настраиваемой по эталонным поверхностным полям.

Одной из главных задач, которую необходимо решить на пути создания адаптивных оптико-электронных систем наблюдения (ОЭСН), является стабилизация качества изображения при наличии искажающего влияния турбулентности и замутненности атмосферно-оптического канала (АОК), расположенного между зондируемой поверхностью (ЗП) и системой наблюдения [1].

Рассмотрим влияние искажающих факторов, характеризующих АОК, на основные параметры ОЭСН на примере инфракрасной системы (ИКС). Критериальное энергетическое уравнение ИКС имеет вид [2]

$$\gamma_x \gamma_y \Delta T_{\text{пор}} = \frac{k_1}{T^3} \frac{1}{D^*(\lambda) \tau_0} \frac{\pi(V_n h^{-1})^{0.5}}{D_0 \ddot{O} (\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}}} M^{0.5}, \quad (1)$$

где γ_x, γ_y – значения мгновенного угла поля зрения в направлениях сканирования (X) и полета носителя аппаратуры (Y); $\Delta T_{\text{пор}}$ – эквивалентная шуму разность температур ($NETD$ [3]); T – термодинамическая температура ЗП; D_0, \ddot{O} – диаметр входного отверстия объектива и его относительное отверстие; $D^*(\lambda)$ – удельная обнаружительная способность приемника оптического излучения (ПОИ); τ_0 – коэффициент пропускания объектива; $(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}}$ – натуральный логарифм эффективной спектральной полосы пропускания системы [2]; V_n, h – путевая скорость и истинная высота полета носителя; M – количество чувствительных элементов (ЧЭ) ПОИ; $k_1 = \text{const}$.

Минимальная разрешаемая разность температур ($MRTD$) [3]) в одномерном виде

$$\Delta T_{\text{разр}}(\nu) = \frac{k_2 \Delta T_{\text{пор}} S_u(\nu)}{\prod_{i=1}^n |T_{\text{вн}_i}(j \nu)|^2 \prod_{j=1}^m |T_{c_j}(j \nu)|^2 S_{\text{ш}}(\nu)}, \quad (2)$$

где $k_2 = \text{const}$; $S_u(\nu), S_{\text{ш}}(\nu)$ – спектральные плотности сигнала и шума; $T_{\text{вн}_i}(j \nu)$ – оптическая передаточная функция (ОПФ) i -го звена, характеризующего внешние факторы наблюдения; $T_{c_j}(j \nu)$ – ОПФ j -го звена ИКС; ν – пространственная частота в направлении сканирования.

В левой части уравнения (1) находятся параметры, определяющие угловое разрешение и температурную чувствительность системы, а в правой, в частности, – параметры атмосферы, а именно спектральное пропускание $\tau_a(\lambda)$:

$$(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}} = f(M_c(\lambda), \tau_a(\lambda)); \quad (3)$$

$$\tau_a(\lambda) = f(T(h), w, p(h)), \quad (4)$$

где $M_c(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической светимости ЗП; $T(h), p(h)$ – высотные профили температуры и давления воздуха; w – количество осажденной воды.

В формуле (2) случайно изменяемые параметры внешней среды (АОК) сосредоточены в зависимости

$$T_{\text{вн}}(j \nu) = \prod_{i=1}^n T_{\text{вн}i}(j \nu) = T_{\text{т.а}}(j \nu) T_{\text{з.а}}(j \nu) \prod_{i=3}^{n-2} T_{\text{вн}i}(j \nu), \quad (5)$$

где $T_{\text{т.а}}(j \nu), T_{\text{з.а}}(j \nu)$ – ОПФ турбулентной и замутненной атмосферы, которые являются функциями следующих параметров:

$$T_{\text{т.а}}(j \nu) = f(C_n^2(h), \Delta \lambda, h, \beta); \quad (6)$$

$$T_{\text{з.а}}(j \nu) = f(a_p(h), \Delta \lambda, f), \quad (7)$$

где $C_n^2(h), a_p(h)$ – высотные профили структурной постоянной показателя преломления и размера рассеивающих частиц; $\Delta \lambda$ – спектральный диапазон работы ИКС; β – угол визирования; f – фокусное расстояние объектива ОЭСН.

В уравнениях (1), (2) имеются также параметры и характеристики, с помощью которых возможна компенсация влияния параметров АОК на качество формируемого изображения: в (1) это

$D^*(\lambda), D_0, \tau_0(\lambda), \ddot{O}, M$; в (2) это – $\prod_{j=1}^m T_{c_j}(j \nu)$ и $\Delta T_{\text{пор}}$, а также высота полета h и шумовая полоса пропускания системы $\Delta f_{\text{ш}}$, входящая в выражение для $\Delta T_{\text{пор}}$, причем $\Delta T_{\text{пор}} = f(\Delta f_{\text{ш}})^{0.5}$ [3].

Выражения (1)–(7) дают возможность оценить существенное влияние параметров АОК на основные параметры ОЭСН и показывают необходимость адаптивного регулирования параметров и характеристик ОЭСН для получения изображения заданного качества. В табл. 1 обобщены данные об изменениях параметров и характеристик АОК и о соответствующих перестраиваемых параметрах ОЭСН [1,4–10].

Т а б л и ц а 1

Параметр, характеризующий изменяющиеся условия наблюдения атмосферы	Перестраиваемый параметр (способ компенсации влияния) ОЭСН	Цель адаптации
Спектральное пропускание	а) спектральный диапазон работы; б) автоматический выбор оптимальных спектральных зон; в) переход в другой спектральный диапазон	максимизация входного сигнала
Турбулентность Замутненность	а) идентификация параметров и структуры ИП и оптимальное управление ими; б) фильтрация видеосигнала в реальном времени	постоянство разрешающей способности и отношения сигнал-шум

В дальнейшем под иконическим процессом (процессом формирования изображения) будем понимать управляемый случайный процесс, характеризуемый набором пар функций пространственно-спектрально-временных (ПСВ) координат, представляющих его вход и выход и определяющих абстрактные ПСВ процессы. В общем случае иконический процесс (ИП) включает в себя зондируемую поверхность, АОК, параметры движения носителя и ОЭСН. Адаптивной ОЭСН будем называть управляемую иконическую систему, которая формирует изображение ЗП, а также обеспечивает получение текущей информации о состоянии ИП, т.е. идентифицирует его; сравнивает текущее качество функционирования ОЭСН с желаемым (или оптимальным) качеством и на основании этого принимает решение так адаптировать ОЭСН, чтобы качество ее функционирования стремилось к желаемому; осуществляет необходимое изменение своих параметров и структуры, т.е. собственную модификацию.

В табл. 2 систематизированы варианты взаимодействия оптического излучения с атмосферным аэрозолем. Реальная рассеивающая атмосфера не является гомогенной, а представляет собой негладкую среду.

Таблица 2

Признак I. Вид атмосферного аэрозоля		Признак II. Вид оптического излучения		
Содержательная характеристика среды	Номер случая	Полихроматическое		Монохроматическое
		1	2	3
Монодисперсная	1	1.1	1.2	1.3
Квазидисперсная	2	2.1	2.2	2.3
Полидисперсная	3	3.1	3.2	3.3

Можно выделить следующие наиболее характерные случаи взаимодействия фотонов излучения с частицами аэрозоля (см. табл. 2). Полихроматическое излучение взаимодействует 1) с квазимонодисперсной средой (2.1); 2) с полидисперсной средой (3.1) и 3) монохроматическое излучение взаимодействует с полидисперсной средой, состоящей из аэрозолей с размерами $a_p \geq \lambda$ и $a_p \leq \lambda$ (3.2).

В первом случае рассеяние излучения происходит в некотором спектральном диапазоне $\Delta\lambda_p = \lambda_{2p} - \lambda_{1p}$, расположенном внутри всего диапазона излучения $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 (\Delta\lambda_p < \Delta\lambda)$, падающего на границу рассеивающей среды. Во втором случае рассеивается излучение во всем спектральном диапазоне. Если при этом концентрации частиц разных размеров одинаковы, то излучение, очевидно, будет ослабляться нейтрально. Если же концентрации аэрозолей неодинаковы, то излучение будет рассеиваться селективно, а действие АОК будет аналогично действию селективного оптического фильтра. Это – наиболее сложный случай взаимодействия оптического излучения с атмосферным аэрозолем с точки зрения построения ААОЭСН, так как необходимо организовать непрерывный адаптивный выбор оптимальных спектральных диапазонов работы системы, для чего нужно определять спектральные максимумы рассеяния излучения и соответствующие нерабочие спектральные диапазоны. В последнем случае спектральный диапазон работы ААОЭСН необходимо выбирать в диапазонах, расположенных соответственно за пределами $\lambda < a_p$ и $\lambda > a_p$.

Изложенные соображения вызывают необходимость совместного адаптивного управления энергетическими и пространственно-частотными характеристиками (ПЧХ) ОЭСН.

Одним из эффективных способов управления энергетической чувствительностью ОЭСН является применение клиновидных интерференционных фильтров (КИФ), посредством линейного перемещения которых параллельно фокальной плоскости объектива, в зависимости от спектрального пропускания АОК и связанной с ним мощности входного сигнала, выделяют узкие зоны в спектре оптического излучения. Этот способ перехода из одного спектрального диапазона в другой $[(\Delta\lambda)_i \leftrightarrow (\Delta\lambda)_j]$ перспективен для создания <многоцветных> линеек ПОИ, каждый ЧЭ, которых чувствителен в узкой спектральной зоне принимаемого излучения. Получаемое с помощью КИФ спектральное разделение принимаемого полихроматического излучения позволяет не только выбрать нужный спектральный диапазон, но и осуществить «раскраску видеосигнала» по амплитудному, пространственно-частотному и спектральному признакам. Это облегчает дешифрирование получаемых изображений [11]. Теоретической предпосылкой к созданию КИФ является зависимость длины волны падающего на фильтр излучения от величины преломляющего угла [12]:

$$\lambda = \frac{4\pi l (n^2 - \sin^2 \sigma_n)^{0.5}}{2\varphi - \varphi_0}, \quad (8)$$

где l , n – толщина и показатель преломления подложки; 2φ – разность фаз между последовательно интерферирующими лучами; φ_0 – фазовый сдвиг при отражении на полупрозрачном слое.

Из графика зависимости $\lambda(\sigma_n)$ (рис. 1) следует, что максимальная производная этой функции, соответствующая прямолинейному участку AB кривой, составляет $d\lambda/d\sigma_n = 0,08$ мкм·град⁻¹.

Таким образом, при $\sigma_n = 10^\circ$ можно обеспечить ширину спектра $\Delta\lambda = 0,8$ мкм.

ПЧХ иконического процесса складывается из функций передачи модуляции (ФПМ) замутненной $T_{з.а}$ и турбулентной $T_{т.а}$ атмосферы и ОЭСН T_c :

$$T_{и.п}^p(v) = T_{з.а}(v) T_{т.а}(v) T_c(v). \quad (9)$$

Поскольку ФПМ замутненной атмосферы $T_{з.а}(v, a_p, \lambda)$ является функцией размера рассеивающих частиц и длины волны излучения, постольку она также может корректироваться путем управляемого перехода $(\Delta\lambda)_i \xleftrightarrow{u} (\Delta\lambda)_j$, осуществляемого на основании результатов определения текущих значений коэффициента аэрозольного рассеяния [13]. Из этого следует, что принципиально возможно совместное адаптивное управление «энергетикой» и ПЧХ ОЭСН, которое может быть осуществлено за счет применения перестраиваемых оптических фильтров.

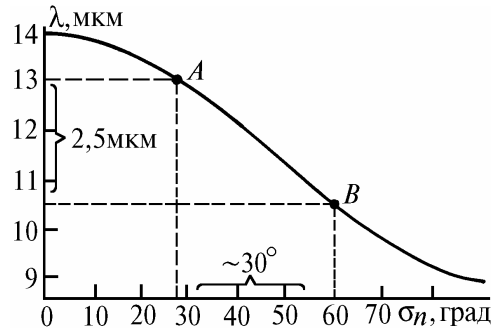


Рис. 1. Зависимость длины волны излучения λ на выходе клиновидного интерференционного фильтра от величины преломляющего угла σ_n ($n = 3, l = 1$ мм)

Компенсация влияния на ПЧХ ОЭСН ФПМ турбулентной атмосферы $T_{т.а}(v, \lambda, C_n^2)$ предполагает измерение параметра турбулентности C_n^2 , а также применение (для когерентных ОЭСН) принципа фазового сопряжения, которое в первом приближении не зависит от длины волны принимаемого излучения, что дает возможность компенсировать возмущения от монохроматических источников [14], или принципа апертурного зондирования [15].

Совместное адаптивное управление общей ОПФ иконического процесса (9) при изменении характеристик АОК может быть эффективно осуществлено на основе идентификации ОПФ (9) при наблюдении эталонных поверхностных полей в районе наблюдения. Задача идентификации иконического процесса состоит в нахождении его оптической передаточной функции на основе анализа эталонного входного сигнала, описываемого случайной функцией $I(x, y, \Delta\lambda, t)$, где x, y – пространственные координаты зондируемой поверхности; $\Delta\lambda$ – спектральный диапазон работы; t – время.

При зондировании эталонного участка поверхности с известной спектральной плотностью $S_s(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1})$ (μ – пространственная частота в направлении полета носителя), цифровая модель которой находится в памяти ЭВМ и получена в идеальных условиях

$$T_{з.а}(v) T_{т.а}(v) = 1, \quad (10)$$

ее текущее значение равно

$$S_T(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1}) = |T_{и.п}^p(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1})|^2 S_s(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1}). \quad (11)$$

Тогда

$$T_{и.п}^p(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1}) = \left| \frac{S_T(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1})}{S_s(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^{-1})} \right|^{0.5}. \quad (12)$$

Формула (12) выражает реальную модель иконического процесса, а его эталонная модель $T_{и.п}^э$ может быть выражена через ОПФ ОЭСН (см. условие (10)). Тогда из сравнения (9) и (12) получим обобщенную ОПФ атмосферно-оптического канала

$$T_{ао.к}(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^1) = \frac{T_{и.п}^p(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^1)}{T_{и.п}^э(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^1)}, \quad (13)$$

где $T_{и.п}^э(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^1) = T_c(v, \mu, (\Delta\lambda)^{-1}, t^1)$.

Математическая модель адаптивной ОЭСН (рис. 2) предполагает наличие устройства адаптации, в котором формируется управляющий сигнал $u = f(a_1, \dots, a_n)$, где a_1, \dots, a_n – параметры иконического процесса и критерия его эффективности, на основании анализа результата

$$u' = [S_T (S_3')^{-1}]^{0,5}, \quad (14)$$

где $S_3' = S_3$ при $T_c(v) = 1$.

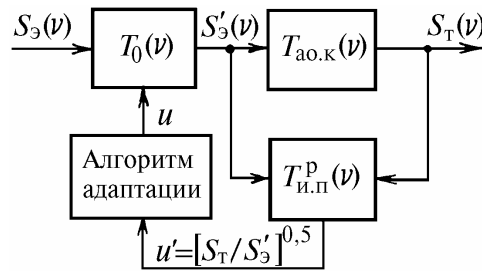


Рис. 2. Структурная схема адаптивной ОЭСН с идентификацией ОПФ АОК по эталонным поверхностным полям

ОЭСН линейны относительно интенсивности (квадрата амплитуды) излучения [2, 3]. Поэтому их ФПМ – действительные функции параметров иконического процесса.

Это является решающей предпосылкой для физической реализации алгоритма (11) – (14). Для структуры адаптивной ОЭСН, показанной на рис. 2, этот алгоритм записывается в виде

$$S_3'(v) = T_c^2(v) S_3(v); \quad (15)$$

$$S_T(v) = S_3'(v) T_{ао.к}^2(v) = T_{ао.к}^2(v) T_c^2(v) S_3(v); \quad (16)$$

$$u' = T_{ао.к}^2(v) T_c^2(v) S_3(v) [T_c^2(v) S_3(v)]^{-1}; \quad u' = T_{ао.к}^2. \quad (17)$$

Из [1, 16] следует, что

$$T_{ао.к} = T_{з.а} T_{т.а} = f(\Delta\lambda, f, h, \beta), \quad (18)$$

где f – фокусное расстояние объектива ОЭСН; h, β – высота над ЗП и угол визирования ОЭСН.

Параметры f, h, β определяют масштаб изображения $m = h \sec \beta (f)^{-1}$. Из (18) следует, что управляющий сигнал функцией параметров иконического процесса

$$u = f(m, \Delta\lambda), \quad (19)$$

посредством изменения которых можно адаптировать ОЭСН таким образом, чтобы достигалось заданное значение P_3 критерия эффективности: $P \geq P_3$. Цель адаптации в этом случае имеет вид

$$\lim_{\substack{m \rightarrow m_3 \\ \Delta\lambda \rightarrow \Delta\lambda_3}} [P_3(m_3, \Delta\lambda_3) - P(m, \Delta\lambda)] = 0, \quad (20)$$

где $m_3, \Delta\lambda_3$ – заданные значения m и $\Delta\lambda$.

В качестве критерия эффективности P в задачах дистанционного зондирования часто используют вероятность правильного распознавания полученных изображений [3].

Таким образом, для стабилизации качества изображения в атмосферно-адаптивных ОЭСН необходимо, основываясь на результатах измерения характеристик АОК, управлять такими техническими параметрами ОЭСН, как спектральный диапазон работы, относительное отверстие объектива и масштаб съемки. Управление температурной чувствительностью ОЭСН позволяет стабилизировать уровень видеосигнала на низких пространственных частотах. В связи с изложенным актуальной является задача поиска способов и средств регулирования перечисленных технических параметров ОЭСН в реальном масштабе времени.

1. Покотило С. А., Ковпак С. Н. Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 12. С. 1274–1279.
2. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение. 1983. 696 с.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
4. Ноеке А. Р. //Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 15th Congr. Rio de Janeiro, 1985. V. 25.
5. Спекер Е. Е. Proc. Soc. Photo. Opt. Instrum. Eng. 1985. N 481.
6. Егоров В. В., Котцов В. А. //Исслед. Земли из космоса. 1987. Т.1.
7. Findlay G. A., Cutten D. R. Appl. Opt. 1989. V. 28. N 23.
8. Edwards T., Browning R., Delderfield J. e. a. //J. Brit. Interplanet. Soc. 1990. V. 43. N 4.
9. Радиоэлектроника за рубежом: Обзоры. М.: НИИЭИРЭ, 1991. Вып. 4 (52). С. 1–11.
10. Вхану В., Нолбен Р. Д. // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst. 1990. V. 26. N 1.
11. Покотило С. А., Снегирев А. Л. // IV Всесоюз. конф. по имитационному моделированию: (Тез. докл.) Пенза, 1991. С. 31.
12. Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 264 с.
13. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М. Орлов, И.В.Самохвалов, Г.М. Креков и др.; Под ред. В.Е.Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
14. Тараненко В. Г., Шанин О. И. Адаптивная оптика. М.: Радио и связь, 1990. 112 с.
15. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
16. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов. радио, 1977. 368 с.

Академия Вооруженных Сил Украины,
Киев,

Поступила в редакцию
7 февраля 1994 г.

S. A. Pokotilo. Stabilization of Image Quality in Atmospheric Adaptive Optoelectronic Systems of Vision.

An influence of distorting factors of the atmospheric optical channel (AOC) on quality of images formed by an optoelectronic vision system (OEVS) as well as some controllable technical parameters are treated in the paper. The data on AOC and corresponding tunable OEVS parameters as well as alterations and variants of optical radiation interaction with atmospheric aerosol are generalized and systematized. Adaptive OEVS and iconic process are defined. Expediency is shown of joint adaptive control of power (spectral) and spatial- frequency characteristics of the OEVS. A method of altering the spectral range of OEVS based on use of interference wedge filter and an algorithm of identification adaptation of OEVS tuned through standard surface fields are proposed.