

∞, ∞

УДК 535.317.1

Л.Ф. Купченко¹, А.С. Рыбьяк¹, Д.П. Пашков²

¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

²Национальная академия обороны Украины, Киев

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПРИ НАЛИЧИИ СИГНАЛА АТМОСФЕРНОЙ ПОМЕХИ

Разработан метод спектральной фильтрации изображения объекта наблюдения при наличии атмосферной помехи с учетом различных вариантов взаимного расположения приемника излучения, объекта и атмосферной дымки. Построена структурная схема оптико-электронной системы повышения контраста изображения объекта при наличии сигнала атмосферной помехи на основе разработанного метода. Приводятся результаты исследования повышения контраста изображения объекта в зависимости от расстояния, проходимого излучением, отраженным от объекта и фона, при наличии атмосферной помехи.

спектральная фильтрация изображений, Евклидово пространство

Введение

Постановка задачи и анализ публикаций. Возможности эффективного оптоэлектронного наблюдения за объектами с помощью оптоэлектронных систем в значительной степени определяются прозрачностью атмосферы, поскольку сигнал от наблюдаемого источника приходит на вход приемного уст-

ройства зачастую с существенными искажениями.

Обычно излучение, содержащее информацию об объекте, проходя через атмосферу, изменяет свою амплитуду и спектральный состав. Наличие в атмосфере большого количества взвешенных частиц (аэрозоль, минеральная и органическая пыль, дымовые частицы и др.) приводит к интенсивному рас-

сеянию света и возникновению своеобразной световой пелены. Рассеянный свет создает атмосферную дымку, которая способствует уменьшению контраста изображения объекта и снижает вероятность его обнаружения.

Для повышения контраста изображения объекта наиболее эффективным является применение спектральной фильтрации. Процесс спектральной фильтрации сигнала при наличии фона заключается в том, что коэффициент пропускания фильтра для спектральных компонент сигнала обеспечивается максимальный, а для спектральных компонент фона минимальный. Если обнаружение объекта осуществляется при наличии атмосферной помехи, то при выборе коэффициента пропускания фильтра необходимо учитывать характер влияния помехи на спектральные характеристики объекта и фона. Характер влияния зависит от взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта.

В работе [1] разработан алгоритм, обеспечивающий адаптацию систем обнаружения к изменению свойств атмосферы в реальном масштабе времени. Оптоэлектронное устройство, построенное на основе этого алгоритма, позволяет обеспечить повышение контраста изображений путем спектральной фильтрации фоновой засветки с минимальным уменьшением оптического сигнала отраженного от объекта. Предполагается, что на начальном этапе обработки сигнала имеется априорная информация о характеристиках фона и объекта, позволяющая вычислить характеристики устройства спектральной фильтрации.

На основе этого алгоритма в работе [2] разработана и исследована математическая модель спектральной фильтрации изображений. Помимо характеристик объекта и фона в математическую модель включен сигнал, имитирующий оптические свойства атмосферы. Его спектральные характеристики отличаются от спектральных свойств объекта и фона, он искажает их спектральные характеристики и уменьшает контрастность изображений в целом.

В работе [3] разработан и исследован алгоритм повышения контраста изображения объекта, наблюдаемого на фоне земной поверхности, при наличии атмосферной помехи. Спектральный состав излучения, рассеянного атмосферной помехой, в этом случае отличается от спектральных характеристик сигнала фона. Разработанный алгоритм позволяет вычислить такую полосу пропускания спектрального фильтра, которая максимально подавляет как сигнал фона, так и сигнал атмосферной помехи, а излучение объекта проходит через нее с минимальными искажениями.

Целью статьи является разработка метода спектральной фильтрации изображений при наличии сигнала атмосферной помехи с учетом различ-

ного взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта наблюдения.

Контраст изображения объекта при различном взаимном расположении приемника излучения, атмосферной помехи и объекта

Рассмотрим два возможных варианта пространственного расположения атмосферной помехи, которые изображены на рис. 1.

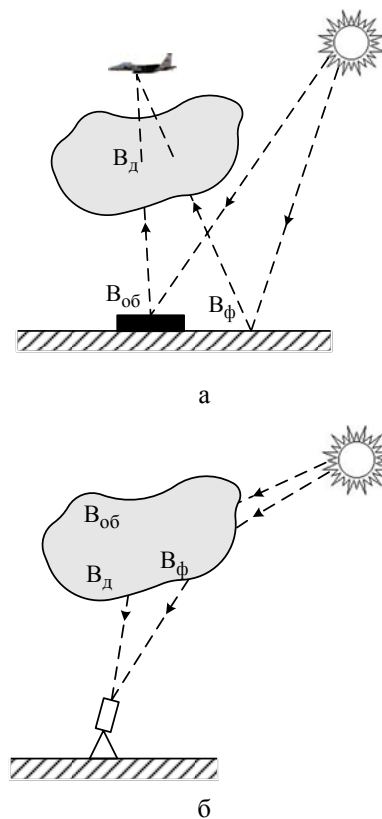


Рис. 1. Варианты взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта наблюдения

Первый вариант, который представленный на рис. 1, а, характеризуется тем, что объект наблюдается на фоне земли, а атмосферная помеха находится на пути распространения отраженного излучения от объекта и фона к приемнику излучения. Анализ взаимного расположения для этой ситуации позволяет сделать следующие выводы: излучение, отраженное от фона, и излучение, рассеянное атмосферной помехой, имеют различные спектральные характеристики, наличие атмосферной помехи приводит к изменению излучения отраженного как от объекта, так и фона.

Для второго варианта, представленного на рис. 1, б, является характерным то, что объект наблюдается на фоне неба. В этом случае излучение, рассеянное атмосферной помехой, является фоновым излучением. Анализ взаимного расположения (рис. 1, б) позволяет сделать следующие выводы:

излучение, отраженное от фона, и излучение, рассеянное атмосферной помехой, имеют одинаковый спектральный состав, при этом наличие атмосферной помехи приводит к изменению излучения, отраженного только от объекта.

Для нахождения контраста изображения наблюдаемого объекта рассмотрим следующую задачу. Пусть объект регистрируется за счет различия яркостей объекта $V_{об}$ и фона $V_{ф}$, т.е. из-за наличия яркостного контраста. При этом истинный (т.е. измеренный в плоскости объекта) контраст этого объекта на данном фоне (при $V_{об} > V_{ф}$) равен [4]

$$K_{и} = \frac{V_{об} - V_{ф}}{V_{об} + V_{ф}}. \quad (1)$$

По мере удаления от объекта истинный контраст начинает уменьшаться из-за изменения яркостей $V_{об}$ и $V_{ф}$. Эти изменения обусловлены двумя причинами:

- во-первых, яркости $V_{об}$ и $V_{ф}$ уменьшаются вследствие ослабления излучения при прохождении им замутненного слоя z от объекта до ОЭС;
- во-вторых, вследствие наличия между объектом и приемником рассеянного излучения слоя атмосферной дымки, яркость которой $V_{д}$ увеличивается с расстоянием.

Изменения яркостей объекта $V_{об}$ и фона $V_{ф}$, возникающие при прохождении излучением слоя атмосферной дымки, приводят к уменьшению видимого контраста (т.е. контраста, наблюдаемого на расстоянии z от объекта). Следовательно, результирующие наблюдаемые яркости объекта $V_{об,н}$ и фона $V_{ф,н}$ с расстояния z будут иметь следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} V_{об,н}(z) &= V_{об} \exp(-\bar{\epsilon}z) + V_{д}(z); \\ V_{ф,н}(z) &= V_{ф} \exp(-\bar{\epsilon}z) + V_{д}(z), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{\epsilon}$ – среднее значение показателя ослабления светового потока в пределах слоя z .

В общем случае яркость слоя дымки по мере увеличения протяженности этого слоя сначала возрастает, но затем рост яркости с увеличением расстояния z замедляется, и при $z \rightarrow \infty$ величина $V_{д}$ стремится к некоторому предельному значению V_{∞} , которое обычно отождествляется с яркостью неба у горизонта. Зависимость яркости дымки от расстояния $V_{д}(z)$ называется световоздушным уравнением [4, 5] и обычно представляется в следующем виде

$$V_{д}(z) = V_{\infty} [1 - \exp(-\bar{\epsilon}z)]. \quad (3)$$

Тогда выражение для контраста изображения объекта, наблюдаемого на расстоянии z , для первого

варианта взаимного расположения принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} K_{н1}(z) &= \frac{V_{об,н}(z) - V_{ф,н}(z)}{V_{об,н}(z) + V_{ф,н}(z)} = \\ &= \frac{V_{об} - V_{ф}}{V_{об} + V_{ф} - 2V_{\infty} [1 - \exp(-\bar{\epsilon}z)]}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение для контраста изображения объекта, наблюдаемого на расстоянии z , для второго варианта взаимного расположения получим путем подстановки в выражение (4) значения $V_{ф} = V_{\infty}$, следовательно

$$K_{н2}(z) = \frac{V_{об} - V_{\infty}}{V_{об} - V_{\infty} [1 - 2 \exp(-\bar{\epsilon}z)]}. \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что второй вариант взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта наблюдения является более упрощенным частным случаем варианта взаимного расположения, представленного на рис. 1, а, когда фоновое излучение и излучение, рассеянное атмосферной помехой имеют одинаковые спектральные и яркостные характеристики.

Спектральная фильтрация при наличии атмосферной помехи

В основу спектральной фильтрации, положены принципы многомерной Евклидовой геометрии. Сведения о спектральной яркости объекта при этом рассматриваются как некие точки в K -мерном Евклидовом пространстве спектральных полос [2].

Рассмотрим спектральную фильтрацию для первого варианта взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта наблюдения. Пусть наблюдается однородный объект на однородном фоне. Для простоты рассмотрим трехмерное Евклидово пространство, которое представлено на рис. 2. Спектр однородного фона $V_{ф}$ в этом пространстве представлен в виде вектора \vec{V} , а вектор \vec{T} соответствует спектральной яркости излучения, отраженного от объекта $V_{об}$. Спектральный состав излучения V_{∞} , рассеянного атмосферной помехой в пространстве между приемным объективом и объектом при $z \rightarrow \infty$, отображается в виде вектора \vec{C} .

Для нахождения векторов наблюдаемой яркости фона и объекта подставим в выражения (2) зависимость $V_{д}(z)$ (3) и представим их в векторной форме

$$\begin{aligned} \vec{V}' &= \vec{V} \exp(-\bar{\epsilon}z) + \vec{C} [1 - \exp(-\bar{\epsilon}z)] = \lambda \vec{V} + (1 - \lambda) \vec{C}; \\ \vec{T}' &= \vec{T} \exp(-\bar{\epsilon}z) + \vec{C} [1 - \exp(-\bar{\epsilon}z)] = \lambda \vec{T} + (1 - \lambda) \vec{C}, \end{aligned} \quad (6)$$

где вектора \vec{V}' и \vec{T}' соответствуют наблюдаемой яркости фона и объекта, $\lambda = \exp(-\bar{\epsilon}z)$, при чем $\lambda \in [0, 1]$, принимая все вещественные значения.

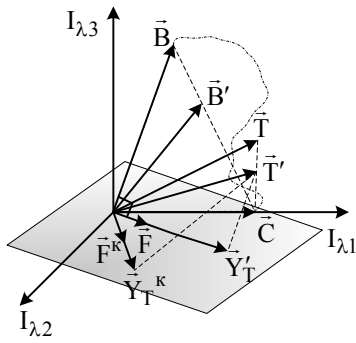


Рис. 2. Векторная диаграмма спектральной фильтрации для первого варианта взаимного расположения

Вектора наблюдаемой яркости фона и объекта \vec{B}' и \vec{T}' являются выпуклой комбинацией векторов фона \vec{B} и дымки \vec{C} , а также векторов объекта \vec{T} и \vec{C} дымки. Это означает, что вектора \vec{B} , \vec{C} и отрезок, соединяющий их вершины, составляет выпуклую оболочку, которую обозначим $\text{conv}(A)$ (аналогично для векторов \vec{T} и \vec{C} – $\text{conv}(D)$). Следовательно, вектор \vec{B}' принадлежит $\text{conv}(A)$ и пробегает все значения, которые находятся на отрезке, соединяющем вершины векторов фона и дымки (аналогично для вектора \vec{T}' и $\text{conv}(D)$).

Для случая трехмерного Евклидова пространства, которое показано на рис. 2, выпуклая оболочка $\text{conv}(A)$ будет представлять собой треугольник, двумя сторонами которого являются векторы \vec{B} и \vec{C} , а третьей стороной является отрезок, соединяющий вершины этих векторов. Выпуклая оболочка $\text{conv}(D)$ представляет собой треугольник, сторонами которого являются вектора \vec{T} , \vec{C} и отрезок, соединяющий их вершины.

Представление наблюдаемых яркостей объекта и фона в виде выпуклой оболочки существенно упрощает понимание процесса спектральной фильтрации изображения объекта при повышении контраста в случае наличия атмосферной помехи, а также позволяет найти сигналы на выходе фильтра для различной толщины слоя атмосферной дымки z .

Из анализа векторного построения следует, что нахождение вектора фильтра \vec{F} , который перпендикулярен вектору \vec{B}' , является нецелесообразным, поскольку в зависимости от условий распространения вектор наблюдаемой яркости фона \vec{B}' будет изменять свое направление (т.е. спектральный состав). Более приемлемым в этой ситуации является нахождение вектора фильтра \vec{F}^k в виде перпендикуляра к выпуклой оболочке $\text{conv}(A)$, причем направление перпендикуляра выбирается в той области пространства, в которой находится вектор \vec{T} .

Для нахождения вектора фильтра \vec{F}^k необходимо выполнить следующие действия:

- 1) определить вектор фильтра \vec{F} на основании априорно известных векторов фона \vec{B} и объекта \vec{T} [2];
- 2) оценить вектор \vec{B}' из данных получаемых в текущий момент времени;
- 3) определить вспомогательный вектор $\vec{D} = \vec{B}' - \vec{\delta}^0 \vec{B}'_B$, где \vec{B}'_B – проекция вектора \vec{B}' на направление вектора фона \vec{B} , $\vec{\delta}^0 = \vec{B} / \sqrt{(\vec{B} \cdot \vec{B})}$ [3].

- 4) определить вектор $\vec{F}^k = \frac{\vec{P}}{\sqrt{(\vec{P} \cdot \vec{P})}}$, где

$\vec{P} = \vec{F} - \vec{\delta}^0 F_D$, $\vec{\delta}^0 = \vec{D} / \sqrt{(\vec{D} \cdot \vec{D})}$ – единичный орт в направлении вектора \vec{D} , а F_D – проекция вектора фильтра \vec{F} на направление вспомогательного вектора \vec{D} [3].

Таким образом, полученный с помощью изложенного выше алгоритма, вектор фильтра \vec{F}^k будет ортогональным выпуклой оболочке векторов фона \vec{B} и атмосферной помехи \vec{C} . Это означает, что проекция вектора \vec{B} или \vec{C} , либо их комбинации на вектор \vec{F}^k будет равняться нулю. При этом на выход устройства спектральной фильтрации будет проходить только излучение, отраженное от объекта. Следовательно, будет осуществляться повышение контраста изображения объекта.

Перейдем теперь к рассмотрению спектральной фильтрации для второго варианта взаимного расположения, представленного на рис. 1б. Пусть наблюдается однородный объект на фоне атмосферной помехи. Тогда в трехмерном Евклидовом пространстве спектральных полос световому потоку, отраженному от объекта $V_{об}$, будет соответствовать вектор \vec{T} (рис. 3). Спектральный состав излучения, рассеянного атмосферной дымкой V_{∞} , которое в данной ситуации является фоном, соответствует вектор \vec{C} .

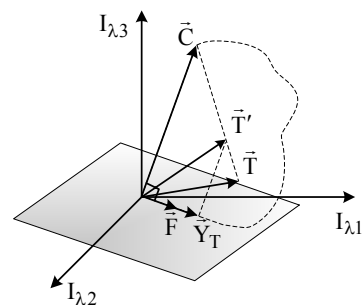


Рис. 3. Векторная диаграмма спектральной фильтрации для второго варианта взаимного расположения

Вектор наблюдаемой яркости объекта в этом случае является выпуклой комбинацией векторов \vec{T} и \vec{C} , т.е.

$$\vec{T}' = \vec{T} \exp(-\vec{\varepsilon}z) + \vec{C}[1 - \exp(-\vec{\varepsilon}z)] = \lambda \vec{T} + (1-\lambda)\vec{C}. \quad (7)$$

Повышения контраста изображения объекта в этом случае будет состоять в нахождении вектора фильтра \vec{F} , который перпендикулярный вектору атмосферной помехи \vec{C} . Необходимо также отметить, что вектор фильтра \vec{F} должен лежать в плоскости, проходящей через векторы \vec{C} и \vec{T} . Это условие позволяет осуществить спектральную фильтрацию с минимальными искажениями излучения объекта. Для нахождения вектора \vec{F} необходимо выполнить следующие действия:

1) оценить из текущих данных вектор атмосферной помехи \vec{C} ;

2) используя априорно известный вектор объекта \vec{T} и оцененный вектор \vec{C} определить вектор

$$\vec{F} = \frac{\vec{Y}_T}{\sqrt{(\vec{Y}_T \cdot \vec{Y}_T)}}, \quad \text{где} \quad \vec{Y}_T = \vec{v}^0 T_F = \vec{T} - \vec{b}^0 T_C,$$

$\vec{b}^0 = \vec{C} / \sqrt{(\vec{C} \cdot \vec{C})}$, \vec{v}^0 – единичный орт, определяющий направление вектора фильтра [2].

Следовательно, путем выбора направления вектора фильтра \vec{F} , перпендикулярного вектору атмосферной помехи \vec{C} , осуществляется повышение контраста изображения объекта с минимальными искажениями на фоне атмосферной помехи.

Метод спектральной фильтрации изображения объекта при наличии сигнала атмосферной помехи

Метод повышения контраста наблюдаемого объекта при наличии сигнала атмосферной помехи включает два этапа. На первом этапе определяется амплитудный и спектральный состав сигнала фона $V_{ф.н.}$. Для этого с использованием устройства пространственной селекции выделяется участок изображения, в котором присутствует сигнал фона, а затем с помощью изображающего спектрометра определяются характеристики сигнала $V_{ф.н.}$.

На втором этапе осуществляется процесс собственно спектральной фильтрации изображения. Он состоит в том, что с помощью соответствующего алгоритма повышения контраста изображения объекта в зависимости от варианта взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта наблюдения формируется такая полоса пропускания спектрального фильтра, входящего в состав изображающего спектрометра, которая максимально подавляет как сигнал фона, так и сигнал атмосферной помехи.

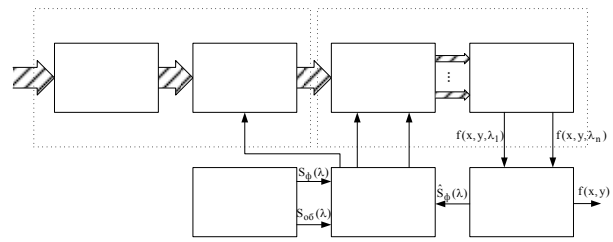


Рис. 4. Структурная схема оптоэлектронной системы повышения контраста наблюдаемого объекта при наличии сигнала атмосферной помехи

Структурная схема оптоэлектронной системы повышения контраста наблюдаемого объекта при наличии сигнала атмосферной помехи изображена на рис. 4. Она состоит из двух основных частей: оптической системы и изображающего спектрометра. Оптическая система включает в себя приемный объектив и пространственный фильтр. Приемный объектив предназначен для формирования интегрального коллимируемого светового потока, который через пространственный фильтр подается на спектральный фильтр. Пространственный фильтр выполняет пространственную селекцию сигнала фона, искаженного атмосферной помехой. Изображающий спектрометр состоит из спектрального фильтра и приемника излучения. Спектральный фильтр осуществляет разделение интегрального светового потока на спектральные каналы. Изображение в каждом спектральном канале $f(x, y, \lambda_i)$ регистрируется с помощью приемника излучения.

Устройство обработки изображений осуществляет формирование выходного изображения $f(x, y)$, и определение спектральных характеристик сигнала фона $S_{ф}(\lambda)$. Управление полосой пропускания спектрального фильтра осуществляется с помощью устройства формирования сигналов. В этом устройстве осуществляется вычисление полосы пропускания спектрального фильтра в зависимости от варианта взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта наблюдения, а также формирование сигналов управления пространственным и спектральным фильтрами. В библиотеке сигналов фона и объекта хранятся спектральные сигналы фона $S_{ф}(\lambda)$ и объекта $S_{об}(\lambda)$.

Разработанная структурная схема оптоэлектронной системы повышения контраста наблюдаемого объекта позволяет реализовать спектральную фильтрацию изображения объекта при наличии сигнала атмосферной помехи для двух вариантов взаимного расположения. При этом работа оптоэлектронной системы повышения контраста для различных вариантов взаимного расположения приемника излучения, атмосферной помехи и объекта будет отличаться принципом действия устройства формирования сигналов.

Результаты моделирования

Математическое моделирование осуществлялось при следующих условиях: изображение фона представляло собою квадрат, включающий 400×400 элементов разрешения, а изображение объекта – квадрат, состоящий из 25×25 элементов, который пространственно совмещался с изображением фона. Спектральные характеристики изображений объекта и фона формировались с использованием трех спектральных компонент [6]. Пространственная структура как объекта, так и фона считалась однородной, и их изображение формировалось при постоянных уровнях яркости. Моделирование сигнала атмосферной помехи осуществлялось при следующих условиях: состояние атмосферы – заметная дымка, что соответствует метеорологической дальности видимости до 10 км [7]; излучение, рассеянного атмосферной дымкой, считалось однородным и равномерным во всем спектральном диапазоне.

Результаты исследования повышения контрастности изображения объекта для двух вариантов взаимного расположения при использовании различных алгоритмов спектральной фильтрации представлены на рис. 5.

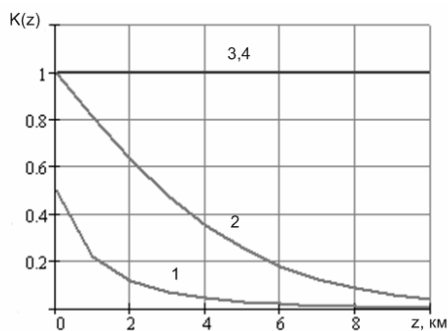


Рис. 5. Зависимости контраста изображения объекта от расстояния, проходимого световым излучением при наличии атмосферной дымки

На графике показаны четыре зависимости контраста изображения объекта от расстояния, проходимого световым излучением при наличии атмосферной дымки для двух вариантов взаимного расположения и различных алгоритмов повышения контраста изображения объекта. Кривая 1 представляет зависимость контраста изображения объекта, наблюдаемого на расстоянии z , для первого и второго варианта взаимного расположения. Зависимость контраста изображения объекта от расстояния после спектральной фильтрации без учета характера влияния сигнала атмосферной помехи для первого варианта взаимного расположения представлена кривой 2. Прямые линии 3, 4 представляют зависимость $K(z)$ на выходе оптоэлектронной системы повышения контраста изображения объекта для первого и второго варианта взаимного расположе-

ния приемника излучения, объекта наблюдения и атмосферной помехи.

Выводы

В настоящей статье рассмотрены достаточно упрощенные случаи, когда излучение фона, объекта и атмосферной дымки является однородным. При этом ослабление светового потока в атмосферной помехе подчиняется закону Бугера.

С увеличением расстояния, проходимого световым излучением при наличии атмосферной дымки, наблюдаемый контраст изображения объекта существенно снижается, при этом скорость убывания контраста зависит от среднего значения показателя ослабления светового потока.

Применение спектральной фильтрации, которая основана на построении вектора фильтра перпендикулярного вектору фона и не учитывает влияние сигнала атмосферной помехи, не позволяет подавить излучение атмосферной дымки. Поэтому возникает необходимость применения метода спектральной фильтрации изображения объекта при наличии сигнала атмосферной помехи, который учитывает характер влияния сигнала атмосферной помехи и позволяет существенно повысить контраст для первого и второго варианта взаимного расположения приемника излучения, объекта и атмосферной дымки.

Направление дальнейших исследований связано с учетом влияния неоднородности фона.

Список литературы

1. *Real-time spectrally efficient target imaging* / P. Shtser, L. Rheaum, S. Mcnamee [Электр. ресурс]. – Режим доступа: www.sbir.gsfc.nasa.gov.
2. Купченко Л.Ф., Ефимова О.В., Рыбьяк А.С. Математическая модель устройства спектральной фильтрации изображений, учитывающая оптические свойства атмосферы // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2007. – Вып. 2 (60). – С. 44-47.
3. Купченко Л. Ф., Рыбьяк А. С., Копылов А. А. Повышение контрастности изображений в системах спектральной фильтрации при наличии сигнала атмосферной помехи // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х. ОНДІ ЗС, 2007. – Вып. 2 (7). – С. 179-185.
4. Карасик В.Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 352 с.
5. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1989. – 346 с.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
7. Бондаренко И. М. Авиационные лазерные и телевизионные системы. Ч 1. – К.: КВВАИУ, 1984. – 303 с.

Поступила в редколлегию 20.09.2007

Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.В. Лемешко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.