

УДК 535.317.1

Л.Ф. Купченко¹, О.В. Ефимова², А.С. Рыбьяк¹

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

²Харьковская национальная академия городского хозяйства, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТМОСФЕРЫ

Разработана математическая модель устройства спектральной фильтрации изображений, обеспечивающая имитацию оптических свойств атмосферы при однородных характеристиках сигнала и фона. В модели использованы принципы многомерной Евклидовой геометрии, при этом сведения о спектральной яркости объекта рассматриваются как точки в K-мерном пространстве.

спектральная фильтрация изображений, математическое моделирование

Введение

Постановка задачи. Возможности эффективного наблюдения за наземными объектами с помощью авиационных оптоэлектронных систем в значительной степени определяются прозрачностью атмосферы. Наличие молекулярного поглощения оптического излучения, рассеяния Релея и Ми, рассеяния на аэрозолях и атмосферной турбулентности снижают прозрачность атмосферы. Физическая природа этих явлений хорошо изучена, однако все известные алгоритмы повышения контрастности изображений построены на основе конкретной модели атмосферы, которая может существенно отличаться от реальной ситуации в точке наблюдения.

В работе [1] разработан алгоритм, обеспечивающий адаптацию к изменению свойств атмосферы в реальном масштабе времени. При этом предполагалось, что на начальном этапе обработки сигнала имеется априорная информация о характеристиках фона и сигнала, позволяющая вычислить характеристики селективирующего устройства.

Оптоэлектронное устройство, построенное на основе этого алгоритма, должно обеспечить повышение контрастности изображений путем спектральной фильтрации фоновых засветок с минимальным уменьшением оптического сигнала отраженного от объекта. В процессе обработки сигнала производится вычисление корреляции между реальным фоном и данными о фоне, которые учитывались при вычисле-

нии характеристик селективирующего устройства. Если произошло существенное изменение характеристик спектра фона, то осуществляется последующий сбор информации о спектральных характеристиках фона и цикл обработки сигнала продолжается.

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

В процессе исследования математической модели решались две задачи. Во-первых, исследовался процесс фильтрации пространственной модели сигнала с использованием фильтра, характеристики которого вычислялись на основе априорных сведений о спектре цели и фона, а во-вторых, исследовались селективирующие свойства математической модели при различных спектральных характеристиках сигнала имитирующего оптические свойства атмосферы.

Целью настоящей статьи является разработка и исследование математической модели устройства спектральной фильтрации изображений при различных характеристиках сигналов, имитирующих оптические свойства атмосферы.

Основы построения алгоритма спектральной фильтрации изображений и исследование его математической модели

В основу алгоритма положены принципы многомерной Евклидовой геометрии. Сведения о спектральной яркости объекта в этом случае рассматриваются как некие точки в K -мерном Евклидовом пространстве [2], причем каждой спектральной полосе соответствует одна ось, составляющая ортонормированный базис этого пространства. В таком представлении изменение яркости освещения может изменить длину спектрального вектора, но не его направление, которое связано с формой спектра [3]. Увеличение контрастности изображений основано на разнице спектрального состава излучения отраженного объектом и фоном.

В качестве примера рассмотрим векторную диаграмму изображенную на рис. 1, где показано трехмерное пространство, в котором каждая из осей отображает интенсивность света в определенном спектральном диапазоне. Спектр однородного фона в этом пространстве представлен в виде вектора \vec{B} , а вектор \vec{T} отображает интенсивность излучения, отраженного от объекта. Спектральный состав излучения рассеянного атмосферой представляется в виде вектора \vec{C} . Атмосфера искажает излучение, отраженное от фона и объекта, и на вход приемника поступают сигналы, которые представлены векторами \vec{B}' и \vec{T}' .

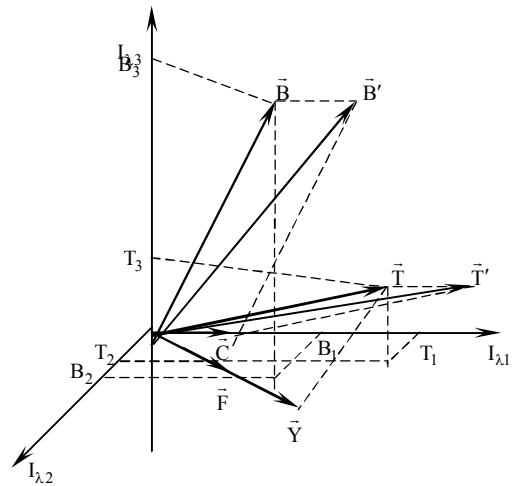


Рис.1. Векторная диаграмма спектральной фильтрации изображений при однородных характеристиках фона и сигнала

Процесс спектральной фильтрации однородных фона и сигнала заключается в том, что коэффициент пропускания фильтра для спектральных компонент сигнала объекта должен быть максимальным, а для спектральных компонент фона минимальным.

В векторном представлении процесс фильтрации компонент однородного фона будет состоять в том, что направление вектора фильтра \vec{F} необходимо расположить в подпространстве, перпендикулярном вектору \vec{B} . Тогда проекция вектора \vec{B} на нормированный вектор \vec{F} (т.е. $|\vec{F}| = 1$) будет равна

$$(\vec{B} \cdot \vec{F}) = 0. \quad (1)$$

Далее, используя информацию о спектральных сигнатурах цели и фона, определим вектор фильтра \vec{F} . Чтобы фильтр обладал максимальным коэффициентом пропускания, его вектор должен лежать в плоскости, проходящей через векторы фона и цели. Данное условие эквивалентно получению максимальной проекции вектора цели на вектор фильтра \vec{F} .

Вектора фона и фильтра ортогональные. Разложив вектор цели \vec{T} на составляющие в системе векторов \vec{B} , и \vec{F} получим [4]:

$$\vec{T} = \vec{\alpha}^0 T_B + \vec{\beta}^0 T_F, \quad (2)$$

где $T_B = (\vec{T} \cdot \vec{\alpha}^0)$ и $T_F = (\vec{T} \cdot \vec{\beta}^0)$ – проекции вектора цели на направление вектора фона \vec{B} и вектора фильтра \vec{F} соответственно, а $\vec{\alpha}^0$ и $\vec{\beta}^0$ – единичные орты, определяющие направления векторов фона и фильтра, $\vec{\alpha}^0 = \vec{B} / \sqrt{(\vec{B} \cdot \vec{B})}$.

Величина проекции вектора цели на направление вектора фильтра \vec{F} определяет, по сути, выходной сигнал фильтра. Тогда при заданных спектральных и амплитудных характеристиках цели и фона вектор выходного сигнала \vec{Y} будет иметь такой вид:

$$\vec{Y} = \vec{\beta}^0 T_F = \vec{T} - \vec{\alpha}^0 T_B. \quad (3)$$

При этом вектор фильтра \vec{F} совпадает с единичным ортом $\vec{\beta}^0$ и определяется из соотношения

$$\vec{F} = \vec{Y} / \sqrt{(\vec{Y} \cdot \vec{Y})}. \quad (4)$$

В многомерном пространстве вектор фильтра будет иметь, по крайней мере, одну отрицательную координату. Это означает, что интенсивность излучения в некотором спектральном интервале имеет отрицательное значение. Подобная ситуация отображена на рис. 2, где показано, что проекции вектора фильтра на спектральные оси имеют как положительную так и отрицательную проекции.

Так как интенсивность светового излучения может иметь, только положительное значение, то для реализации спектральной фильтрации необходимо использовать операцию вычитания изображений, полученных путем пропускания через фильтры \vec{F}^+ и \vec{F}^- , которые формируются при разложении вектора фильтра \vec{F} на два вектора с положительными координатами. При формировании вектора фильтра \vec{F}^+ положим все отрицательные значения координат, отображающих отрицательное значение спектральных составляющих равными нулю. При формировании вектора фильтра \vec{F}^- положим все координаты, имеющие положительные значения, равными нулю, а отрицательные значения со знаком плюс.

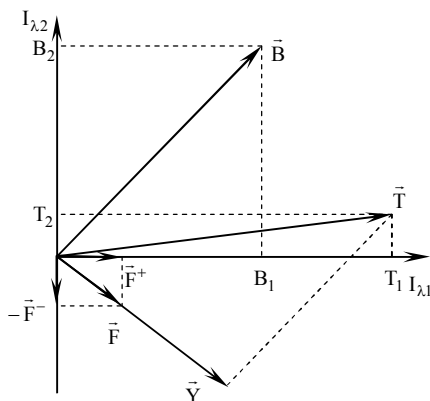


Рис 2. Образование положительных и отрицательных проекций вектора фильтра на спектральные оси

Например, если вектор фильтра имеет вид $\vec{F} = [F_1 \ -F_2 \ -F_3]^T$, то векторы \vec{F}^+ и \vec{F}^- необходимо представить следующим образом:

$$\vec{F}^+ = [F_1 \ 0 \ 0]^T, \quad \vec{F}^- = [0 \ F_2 \ F_3]^T.$$

Тогда процесс спектральной фильтрации должен состоять в том, что принятое оптоэлектронной системой излучение последовательно регистрируется сначала на выходе фильтра с коэффициентом пропускания, величина которого пропорциональна вектору \vec{F}^+ , а затем на выходе фильтра с коэффициентом пропускания \vec{F}^- , после чего производилось вычитание полученных изображений [5].

Процесс спектральной фильтрации, обеспечивающей имитацию оптических свойств атмосферы, состоял в том, что помимо компонент сигнала и фона формировался дополнительный оптический сигнал, спектральные и яркостные характеристики которого отличались от характеристик исходного изображения и воздействие которого искажало спектральные свойства сигнала и фона.

В векторном представлении сигнал, имитирующий оптические свойства атмосферы, представлялся в виде вектора в трехмерном пространстве спектральных полос, величина и положение которого изменялись в процессе исследований, а пространственное положение вектора фильтра сохранялось постоянным. По окончании процесса фильтрации вычислялся контраст изображения цели при различных характеристиках имитирующего сигнала.

Результаты исследования математической модели

Математическая модель исследовалась при следующих условиях: изображение фона представляло собой квадрат, включающий 200×200 элементов разрешения, а изображение цели – квадрат, состоящий из 25×25 элементов, который пространственно совмещался с изображением фона. Спектральные характеристики изображений цели и фона формировались с использованием трех спектральных компонент. Изменяя яркостные характеристики каждого из спектральных каналов, формировалось цветное изображение сигнала и фона в соответствии с условиями решаемой задачи. Пространственная структура как цели, так и фона считались однородными, и их пространственное изображение формировалось при постоянных уровнях яркости.

При исследовании спектральной фильтрации пространственной модели сигнала математической обработке подвергалось изображение, представленное на рис 3, а. На этом изображении фон имел темно-синюю окраску, а цель в виде квадрата – темно-зеленую. Результаты спектральной фильтрации, выполненной в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом, представлены на рис. 3, б. Результирующее изображение является полутоновым изображением, на котором присутствует цель в виде серого квадрата на темном фоне (сигнал фона на выходе фильтра равен нулю), а это соответствует единичному контрасту. Таким образом, полученные изображения подтверждают работоспособность математической модели спектральной фильтрации.



Рис. 3. Результаты спектральной фильтрации: а – исходное; б – результирующее изображения

Результаты исследований математической модели устройства спектральной фильтрации изображений, обеспечивающей имитацию оптических свойств атмосферы, представлены на рис. 4. На графике отображена зависимость контраста изображения цели от интенсивности сигнала, имитирующего оптические свойства атмосферы при различных спектральных характеристиках. При этом контраст цели вычислялся по следующей формуле:

$$K = (I_{\text{Ц}} - I_{\text{Ф}}) / (I_{\text{Ц}} + I_{\text{Ф}}), \quad (5)$$

где $I_{\text{Ц}}$ – среднее значение интенсивности сигнала цели на выходе фильтра, $I_{\text{Ф}}$ – среднее значение интенсивности сигнала фона на выходе фильтра.

Как следует из графика, с увеличением интенсивности сигнала помехи контрастность изображений падает, причем уменьшение тем больше, чем ближе спектральные характеристики помехи к спектральным характеристикам цели.

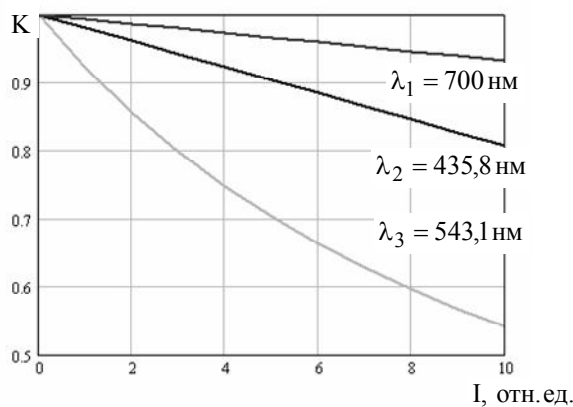


Рис. 4. Зависимость контраста изображения цели от интенсивности сигнала, имитирующего оптические свойства атмосферы при различных его спектральных характеристиках

Выводы

Разработана и исследована математическая модель устройства спектральной фильтрации изображений. Показано, что при известных значениях спектральных характеристик сигнала и фона удается обеспечить единичное значение контрастности изображений. Установлено, что с увеличением интенсивности сигнала помехи, имитирующей оптические свойства атмосферы, контрастность изображений уменьшается, причем уменьшение тем больше, чем ближе спектральные характеристики помехи к спектральным характеристикам цели.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору Доле Г.Н. за полезные советы, предложенные при обсуждении настоящей статьи.

Список литературы

1. Shtser P., Rheaum L., Mcnamee S. *Real-time spectrally efficient target imaging* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.poc.com/emerging/emerging_products/rthi/default.asp.
2. Keshava N. *A survey of spectral unmixing algorithms* // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – V. 14, n. 1. – P. 55-77.
3. Manolakis D., Marden D., Shaw G.A. *Hyperspectral image processing for automatic target detection applications* // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – V. 14, n. 1. – P. 79-113.
4. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. *Матрицы и вычисления*. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

Поступила в редколлегию 9.02.2007

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