УДК 629.783

DOI: 10.36845/2073-8250-2020-259-4-19-24

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.В. Василевский

ФГОУ ВО МАИ (НИУ), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

Исследуется проблема повышения эффективности аэрокосмического мониторинга при выявлении малозаметных объектов земной поверхности. Предложено представление модели спектрально-зональных изображений на основе пространственно-гармонических составляющих. Приведено описание алгоритма комплексной адаптивной обработки и синтеза единого изображения при выявлении малозаметных объектов местности.

Ключевые слова: аэрокосмический мониторинг, спектральный метод, модель изображений, алгоритм обработки и оценивания

Сведения об авторах: Василевский Валерий Владимирович, к.в.н., доцент, echinops777@rambler.ru

SPECTRAL TECHNIQUE FOR COMPLEX PROCESSING OF AEROSPACE MONITORING MULTISPECTRAL VIDEO DATA

V. V. Vasilevsky

*Moscow Aviation Institute (National Research University)
125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4*

The article studies the problem of increasing the efficiency of aerospace monitoring in identification of low-observable objects on the earth's surface. The model of multispectral images based on spatial harmonic components is proposed. The article describes the algorithm of complex adaptive processing and image synthesis designed to improve identification of low-observable surface objects.

Keywords: aerospace monitoring, spectral technique, image model, processing and estimation algorithm

Data on authors: Vasilevsky Valeriy Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor, echinops777@rambler.ru

Введение. Постановка задачи

Одной из проблем применения аэрокосмических комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в условиях априорной неопределенности характеристик фоно-объектовой обстановки, является обеспечение требуемой достоверности выявления и распознавания малозаметных (малоконтрастных) объектов земной поверхности.

При этом к классу малозаметных объектов местности здесь будем относить объекты, вектор состояния (структуры и координат элементов) которых, является случайной функцией аэрокосмического мониторинга.

Один из подходов к ее решению связан с реализацией технологии комплексной обработки спектрозональных изображений (СИ), получаемых бортовыми фотоприёмными устройствами (ФПУ) соответствующего спектрального диапазона[1].

Типовым сценарием аэрокосмического мониторинга является использование разнотипной аппаратуры наблюдения на борту летательного аппарата (ЛА) аэрокосмического мониторинга, реализующего комплексную обработку видеоинформации ДЗЗ при выявлении объектов контроля.

Известен интерактивный метод комплексирования СИ, при котором параметры обработки СИ и синтеза единого изображения (ЕИ) настраиваются оператором на основе априорной информации и не изменяются по полю кадра, т.е. является неадаптивным. Однако во многих задачах аэрокосмического мониторинга использование данного подхода связано с обеспечением настроек соответствующих параметров при потоковой обработке кадров в режиме реального времени.

Использование яркостного подхода к

построению алгоритма комплексной обработки многозональной видеоинформации аэрокосмического мониторинга для выявления малозаметных объектов местности рассмотрено в работах [2,3].

Вместе с тем определенное снижение возможностей алгоритма комплексной обработки СИ на основе использования яркостного метода связано с наличием определенных ограничений: различием характеристик ФПУ соответствующих спектральных диапазонов излучений; регистрацией различного вида излучений (отраженное или собственное); отличиями в детальности СИ.

В работе исследуются возможности использования спектрального метода комплексной обработки СИ аэрокосмического мониторинга при выявлении малозаметных объектов местности.

Математическая модель спектрозональных изображений

Спектральный метод комплексирования СИ, формирования ЕИ и последующего распознавания объектов предусматривает представление исходных полей распределения яркости изображений в частотную область с использованием ортонормированной системы базисных функций [2,4].

Для построения модели ЕИ используются пространственно-гармонические составляющие (ПГС) $H_{EI}(v_x, v_y)$ для пространственной частоты (v_x, v_y) , которые формируются путем оптимальной, для выбранных критериев заметности объектов, линейной комбинации вектора ПГС СИ $H(v_x, v_y)$ следующим образом:

$$H_{EI}(v_x, v_y) = \xi(v_x, v_y) \cdot A^T \cdot (v_x, v_y) \cdot H(v_x, v_y), \quad (1)$$

где $A(v_x, v_y)$ – вектор весовых коэффициентов ПГС СИ; $\xi(v_x, v_y)$ – нормировочный

коэффициент, определяющий вклад ПГС СИ $H(v_x, v_y)$ в результирующее ЕИ.

Нахождение адаптивных оценок значений весовых коэффициентов ПГС $A(v_x, v_y)$ выполняется с учетом особенностей пространственных спектров объектов и фонов, которые определяют выбор варианта обработки СИ способом «контекстного» и «бесконтекстного» синтеза ЕИ, соответственно [3,5].

При реализации обоих режимов обработки СИ и синтеза ЕИ осуществляется поиск максимального значения отношения $q(v_x, v_y) = W_s / W_p$ энергетического спектра «сигнал-помеха», где под помехой $p(v_x, v_y)$, в случае контекстного синтеза, подразумевается влияние шума датчиков излучений, $p(v_x, v_y) = n(v_x, v_y)$; в случае бесконтекстного синтеза суммарное действие шума датчиков излучений и неравномерного распределения яркости подстилающей поверхности, $p(v_x, v_y) = n(v_x, v_y) + \xi(v_x, v_y)$.

Для построения текущих моделей СИ введем следующие матричные функции: $S_{об}(v_x, v_y) = H_{об}(v_x, v_y) \cdot H_{об}^*(v_x, v_y)$ – математическое ожидание квадрата амплитудного спектра функции изображения при наличии и отсутствии объекта, соответственно; $S_{ф+ш}(v_x, v_y) = H_{ф+ш}(v_x, v_y) \cdot H_{ф+ш}^*(v_x, v_y)$ – математическое ожидание квадрата амплитудного спектра функции изображения при отсутствии объекта и неравномерном распределении яркости подстилающей поверхности. $S_{ш}(v_x, v_y) = H_{ш}(v_x, v_y) \cdot H_{ш}^*(v_x, v_y)$ – математическое ожидание квадрата амплитудного спектра функции изображения при отсутствии объекта и равномерном распределении яркости подстилающей поверхности.

Используемые матричные функции $\|S\|$ – функции спектральной плотности многомерных случайных полей, компоненты которых $S_{ij}(v_x, v_y)$ в общем случае являются комплекснозначными и характеризуются ПГС спектральнозональных изображений местности.

Контекстный синтез

Выражение для вычисления значений оптимального вектора $A(v_x, v_y)$ весовых коэффициентов ПГС СИ имеет вид:

$$A(v_x, v_y) = \frac{C^{-1}(v_x, v_y) U'_{\lambda'_{max}}(v_x, v_y)}{\sqrt{U'_{\lambda'_{max}}(v_x, v_y) \cdot S_{ш}^{-1}(v_x, v_y) \cdot U'_{\lambda'_{max}}(v_x, v_y)}}, \quad (2)$$

где $C(v_x, v_y) = \text{diag}[\sqrt{S_{ш}^{(1,1)}(v_x, v_y)}, \dots, \sqrt{S_{ш}^{(n_x n_y)}(v_x, v_y)}]$; $U'_{\lambda'_{max}}(v_x, v_y)$ – собственный вектор матрицы, соответствующий ее максимальному собственному числу λ'_{max} :

$$S'_{об}(v_x, v_y) = C^{-1}(v_x, v_y) \cdot S_{об}(v_x, v_y) \cdot C^{-1}(v_x, v_y).$$

Скалярная функция $\xi(v_x, v_y)$ при выполнении процедуры пространственной фильтрации может быть определена $\xi(v_x, v_y) = \xi = \text{const}$ из условий нормировки флуктуаций яркости синтезированного ЕИ с учетом динамического диапазона представления яркостей изображения.

Бесконтекстный синтез

Выражение для вычисления значений оптимального вектора $A(v_x, v_y)$ весовых коэффициентов ПГС СИ имеет вид:

$$A(v_x, v_y) = \frac{B(v_x, v_y) \cdot C^{-1}(v_x, v_y) \cdot U_{\lambda_{max}}(v_x, v_y)}{\sqrt{U_{\lambda_{max}}^T(v_x, v_y) \cdot (Re[S_{\phi+u}(v_x, v_y)])^{-1} \cdot U_{\lambda_{max}}(v_x, v_y)}}, \quad (3)$$

где $B(v_x, v_y) = \|V_1(v_x, v_y) \dots V_n(v_x, v_y)\|$ – матрица, столбцами которой выступают векторы $V_i(v_x, v_y)$; $C(v_x, v_y) = diag\{\sqrt{\chi_{\phi+u,1}(v_x, v_y)}, \dots, \sqrt{\chi_{\phi+u,m}(v_x, v_y)}\}$; $V_i(v_x, v_y)$, $\chi_{\phi+u}(v_x, v_y)$ – векторы, являющиеся решениями характеристического уравнения:

$$Re[S_{\phi+u}(v_x, v_y)] \cdot V_i(v_x, v_y) = \chi(v_x, v_y) \cdot V_i(v_x, v_y), \quad (4)$$

$U_{\lambda_{max}}(v_x, v_y)$ – собственный вектор матрицы, соответствующий ее максимальному собственному числу λ_{max} :

$$S'_{ob}(v_x, v_y) = C^{-1}(v_x, v_y) \cdot B^T(v_x, v_y) \cdot Re[S_{ob}(v_x, v_y)] \cdot B(v_x, v_y) \cdot C^{-1}(v_x, v_y).$$

Вычислительный алгоритм синтеза ЕИ

Основу спектрального метода обработки составляет использование двумерных данных наблюдаемого изображения при его последовательной развертке по строке (столбцу) [2,3].

В принятых допущениях и обозначениях алгоритм построения адаптивной оценки параметров наблюдаемого сечения изображения (строки, столбца) содержит следующие процедуры:

1. Вычисляются оценки оптимального вектора $A(v_x, v_y)$ весовых коэффициентов ПГС СИ с учетом распределения яркости подстилающей поверхности $\xi(v_x, v_y)$.

2. Находятся адаптивные минимаксные оценки компонент матрицы спектральной плотности $S_{ob}(v_x, v_y)$ объекта с учетом

уровня априорной информированности о спектральных характеристиках объектов контроля и фона следующим образом [3,5].

При заданной спектральной плотности $S_Z(v_x, v_y)$ входного сигнала $Z(x, y)$ значения компонент матрицы спектральной плотности $S_{ob}(v_x, v_y)$ объекта наземной поверхности в соответствующих спектральных диапазонах:

$$S_{ob}(v_x, v_y) = W(v_x, v_y) \cdot S_Z(v_x, v_y) \cdot W^*(v_x, v_y),$$

где $W(v_x, v_y)$ – вектор оптических передаточных функций ФПУ многоспектральной аппаратуры наблюдения ЛА.

При заданном векторе $W(v_x, v_y)$ оптических передаточных функций многоспектральной аппаратуры наблюдения ЛА:

$$S_{ob}(v_x, v_y) = |W(v_x, v_y)|^2.$$

3. Вычисляются адаптивные оценки матриц $S_{\phi+u}(v_x, v_y)$, $S_u(v_x, v_y)$.

4. Выполняется построение модели ЕИ для пространственной частоты (v_x, v_y) путем оптимальной для имеющегося уровня априорной информированности о спектральных характеристиках объектов контроля и фона, выбранного критерия заметности объектов, путем линейной комбинации вектора ПГС СИ $H(v_x, v_y)$:

$$H_{EI}(v_x, v_y) = \xi(v_x, v_y) \cdot A^T \cdot (v_x, v_y) \cdot H(v_x, v_y).$$

5. Вычисляется яркостный образ $Z_{EI}(x, y)$ модели ЕИ с использованием обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ), выполняется поиск и выявление малозаметного объекта контроля.

На основании представленных моделей многозональных СИ и алгоритма адаптивного синтеза ЕИ спектральным методом разработан программный модуль, интерфейс которого представлен на рис. 1 а.

Компоненты интерфейса позволяют выполнять следующие настройки: количество СИ; вид процедуры синтеза; спектрозональные эталоны выделяемых объектов; нахождение оценок по текущему изображению, эталонному изображению, либо задавать аналитически спектральные плотности полезного сигнала (объекта), фона и шума съемочной аппаратуры; производить сглаживание оценок спектральной плотности; производить коррекцию спектральной плотности на оптическую передаточную функцию, рассчитываемую по задаваемой функции рассеяния точки съемочной аппаратуры.

В процедуре автоматического синтеза соответственные кадры спектрозональных видеофрагментов объединяются при синтезе единого полутонового или псевдоцветного изображения.

Результаты использования спектрально-адаптивного алгоритма обработки многозональных СИ на тестовой модельной задаче контекстного синтеза фрагмента ЕИ и выявления локальных неоднородностей участка местности, показанного во внеш-

ней рамке изображения, представлены на рис. 1 б.

Эффективность процедур комплексирования двух СИ характеризуется выигрышем (увеличением) отношения «сигнал-помеха» синтезированного ЕИ при различных нормированных значениях спектральной плотности $S^{(1,2)}$ текстур СИ.

Из анализа результатов тестирования алгоритма на модельной задаче можно заключить, что заметность (отношение сигнал/шум) объектов местности на синтезированном ЕИ увеличилась в 2...8 раз по сравнению с использованием СИ, вероятность автоматического выявления и распознавания обеспечивается не ниже уровня 0,8–0,9, при фиксированной вероятности «ложной тревоги».

Заключение

Исследована проблема повышения эффективности аэрокосмического мониторинга при вскрытии малозаметных объектов земной поверхности на основе использования спектрального подхода

а)

б)

Рис. 1

Спектральный метод автоматического синтеза ЕИ:

а) прототип интерфейса программного модуля; б) результат контекстного синтеза фрагмента ЕИ, показанного во внешней рамке интерфейса программного модуля

к обработке многозональной видеоинформации и синтезу ЕИ.

Выполненные исследования эффективности метода многозональной обработки изображений показывают возможность повышения эффективности аэрокосмического мониторинга при поиске и вскрытии малозаметных объектов земной поверхности.

Эффективность процедур комплексирования СИ при использовании спектрального метода обработки многозональной видеоинформации характеризуется выигрышем

значений отношения «сигнал-помеха» синтезированного ЕИ при различных нормированных значениях спектральной плотности текстур СИ в 2...8 раз, повышением достоверности распознавания малозаметных объектов контроля.

Применение спектрального метода комплексирования СИ позволяет реализовать автоматизированную обработку и распознавание малозаметных объектов земной поверхности в условиях ограничений для использования яркостного подхода синтеза ЕИ.

Литература

1. Василевский, В.В. Метод многозональной обработки видеоинформации в задачах аэрокосмического мониторинга малозаметных малоразмерных объектов местности / В.В. Василевский, А.Н. Жебелъ // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 1 (248). – С.72-77.
2. Василевский, В.В. Многоспектральная обработка видеоинформации в задачах аэрокосмического мониторинга малозаметных объектов местности / В.В. Василевский, А.Н. Жебелъ // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 4 (251). – С. 4-7.
3. Василевский, В.В. Адаптивное минимаксное оценивание видеоинформации в задачах аэрокосмического мониторинга / В.В. Василевский // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2020. – Выпуск № 1 (256). – Стр. 27-32.
4. Диткин, В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В.А. Диткин, Н.П. Прудников. – М.: Физматгиз, 1974. – 544 с.
5. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация / В.Н. Фомин. – М.: Наука, 1984. – 288 с.

References

1. Vasilevsky V. V. Zhebel A. N. Metod mnogozonal'noy obrabotki videoinformatsii v zadachakh aerokosmicheskogo monitoringa malozametnykh malorazmernykh ob'yektov mestnosti [Multispectral processing technique of video data for the aerospace monitoring of low-observable small-sized objects on the earth's surface]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, no. 1(248), pp. 72-77.
2. Vasilevsky V. V., Zhebel A. S. Mnogospektral'naya obrabotka videoinformatsii v zadachakh aerokosmicheskogo monitoringa malozametnykh ob'yektov mestnosti [Multispectral processing of video-data in aerospace monitoring of low-observable objects]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, no. 4(251), pp. 4-7.
3. Vasilevsky V. V. Adaptivnoye minimaksnoye otsenivaniye videoinformatsii v zadachakh aerokosmicheskogo monitoringa [Adaptive minmax estimation of video data in aerospace monitoring applications]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2020, no. 1(256), pp. 27-32.
4. Ditkin V. A. Prudnikov N. P. Integral'nyye preobrazovaniya i operatsionnoye ischisleniye [Integral transformations and operational calculus], Moscow, Fizmatgiz, 1974, 544 p.
5. Fomin V. N. Rekurrentnoye otsenivaniye i adaptivnaya fil'tratsiya [Recurrent estimation and adaptive filtering]. Moscow, Nauka, 1984, 288 p.