

УДК 004.932

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ ЗЕМЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Егошкин Н.А., к.т.н., в.н.с. НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: foton@rsreu.ru;

Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru;

Макаренков А.А., аспирант НИИ «Фотон» РГРТУ.

FUSION OF HYPERSPECTRAL IMAGES OF THE EARTH, ACQUIRED IN DIFFERENT SPECTRAL RANGES

Egoshkin N.A., Ereemeev V.V., Makarenkov A.A.

Creation of the unified hypercube via fusion of the imagery from separate hyperspectral devices is discussed. Fusion is performed by linear filtering with filter estimation based on the processing images.

Keywords: hyperspectral images, fusion, spatial resolution increasing, image filtering

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, комплексирование, повышение пространственного разрешения, фильтрация изображений.

Введение

Гиперспектральная съемка – это новое перспективное направление дистанционного зондирования Земли. В ее основе лежит принцип расщепления отраженной от поверхности Земли лучистой энергии на десятки и сотни потоков, каждый из которых соответствует очень узкому спектральному диапазону, а в целом, регистрируется серия изображений в узких соприкасающихся диапазонах, так называемый гиперкуб, [1, 2, 3]. В результате расщепления регистрируемого излучения энергия полезного видеосигнала многократно уменьшается. В тоже время актуальным вопросом является повышение спектрального разрешения гиперспектрометра путем увеличения числа спектральных каналов. В разработках гиперспектральной съемочной аппаратуры прослеживается тенденция охватить в одном приборе съемку в спектральном диапазоне 0,4 – 2,5 мкм (видимый, ближний ИК и ИК-диапазоны) [4]. Поэтому в практике построения гиперспектрометров получило развитие решение, когда достаточно широкая спектральная область съемки разбивается на ряд частично перекрывающихся диапазонов. Излучение в каждом из этих диапазонов независимо регистрируется с помощью отдельного оптико-электронного тракта, состоящего из оптического узла, диспергирующего элемента и оптико-электронного преобразователя (ОЭП) [4]. При этом все ОЭП выполняют съемку одного и того же участка земной поверхности, но в различных спектральных диапазонах. По такому принципу, например, построены гиперспектрометры, установленные на КА «Ресурс-П» [5] и КА EarthObserver-1 [6]. В результате съемки подобной аппаратурой формируется несколько гиперкубов (каждый в определенном спектральном диапазоне), которые отличаются радиометрическими и геометрическими параметрами,

Рассматриваются вопросы формирования единого гиперспектрального снимка Земли путем объединения информации, полученной от различных видеотрактов гиперспектральной аппаратуры. Объединение производится на основе линейной фильтрации с оценкой параметров фильтра непосредственно по видеоданным.

рами, а также пространственным разрешением.

Стоит задача объединения этих данных в единый гиперкуб, охватывающий все спектральные диапазоны исходных гиперкубов. В качестве примера на рис. 1 слева приведены два гиперкуба до радиометрического и геометрического совмещения, а справа – результат совмещения. Задача геометрического и радиометрического совмещения исходных гиперкубов достаточно освещена в литературе, например в работах [3, 7, 8]. Поэтому в настоящей статье эти вопросы не рассматриваются.

Мало исследованным вопросом является приведение гиперкубов, полученных от различных ОЭП, к единому пространственному разрешению. При этом ставится задача получения объединенного гиперкуба с максимально возможным разрешением. Предпосылкой к такой постановке вопроса является тот факт, что в наборе исходных гиперкубов есть гиперкуб с наилучшим разрешением и он может быть использован для нахождения параметров корректирующего фильтра. Решение этой задачи представлено в настоящей статье. Заметим, что только после выполнения операций геометрического и радиометрического совмещения и выравнивания пространственного разрешения исходных гиперкубов становится возможным выполнение различных видов обработки данных объединенного гиперкуба [9].

Не снижая общности, далее будем рассматривать случай, когда гиперспектрометр включает два ОЭП. Полученные результаты легко распространяются на случай гиперспектральной съемки более чем двумя ОЭП. Предложенная ниже технология решения поставленной задачи является развитием результатов, полученных в работе [10].

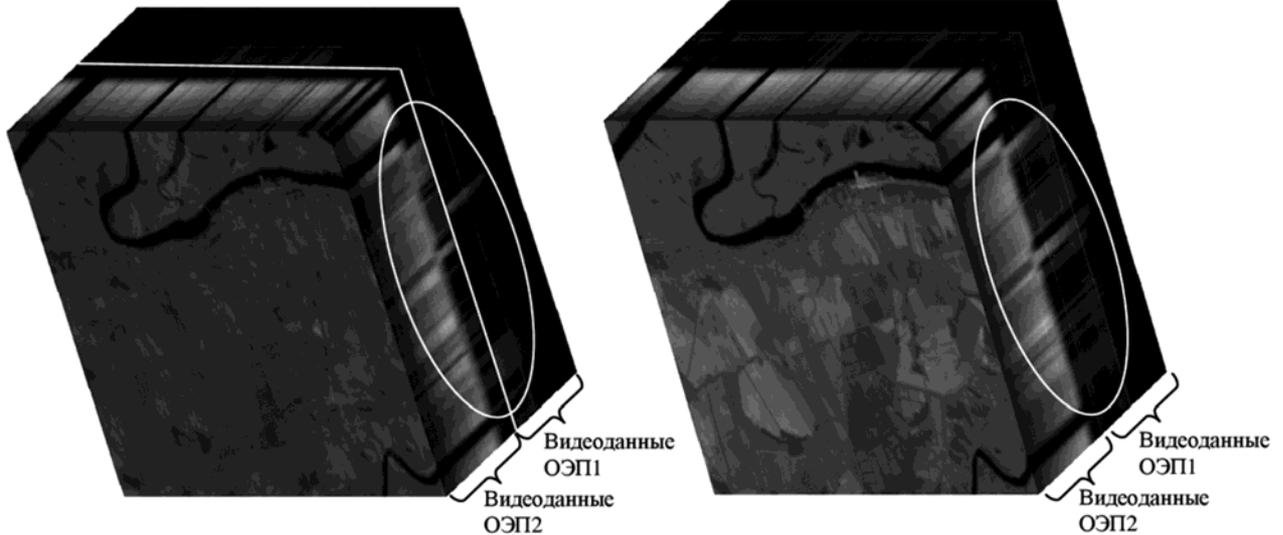


Рис. 1. Формирование единого гиперкуба данных

Формальная постановка задачи

Будем считать, что выполнено радиометрическое и геометрическое совмещение гиперкубов. Рассмотрим два гиперспектральных изображения $A(x, y, \lambda)$, $\lambda \in \Lambda_A$ и $B(x, y, \lambda)$, $\lambda \in \Lambda_B$, сформированных двумя ОЭП со спектральными диапазонами Λ_A и Λ_B . Выберем из этих гиперкубов два изображения $A(x, y)$ и $B(x, y)$, наиболее близкие по длине волны λ (в результате чего переменную λ можно опустить):

$$\begin{aligned} A(x, y) &= S(x, y) \otimes H_A + N_A(x, y), \\ B(x, y) &= S(x, y) \otimes H_B + N_B(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где $S(x, y)$ – истинное изображение подстилающей поверхности; H_A , H_B – функции рассеяния точки видеотрактов; $N_A(x, y)$, $N_B(x, y)$ – независимые случайные процессы (шум) с нулевым средним; \otimes – операция свертки.

Ставится задача коррекции изображений $A(x, y)$ и $B(x, y)$ так, чтобы $A(x, y) \approx B(x, y)$. Например, можно поставить задачу нахождения линейного фильтра F , обеспечивающего для любого S равенство:

$$S(x, y) \otimes H_A \otimes F = S(x, y) \otimes H_B, \quad (2)$$

т.е. изображение A корректируется с использованием F так, чтобы при отсутствии шумов оно совпало с изображением B .

Задача коррекции различий видеотрактов легко решается, если известны H_A и H_B . Однако нахождение H_A и H_B с достаточной точностью является гораздо более трудной задачей, чем нахождение F , поскольку $S(x, y)$ не известно. Поэтому актуально определение F , не требующее определения H_A и H_B . С учетом (1) условие (2) можно записать как

$$A(x, y) \otimes F - B(x, y) = N_A(x, y) \otimes F - N_B(x, y). \quad (3)$$

Поиск фильтра F можно осуществить в простран-

ственной или спектральной областях. Далее приводятся подходы по определению F в обеих постановках.

Спектральный подход

В спектральной области выражение (3) принимает вид

$$\begin{aligned} \hat{A}(\omega, \xi) \hat{F}(\omega, \xi) - \hat{B}(\omega, \xi) &= \\ = \hat{N}_A(\omega, \xi) \hat{F}(\omega, \xi) - \hat{N}_B(\omega, \xi), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\hat{A}(\omega, \xi)$, $\hat{F}(\omega, \xi)$, $\hat{B}(\omega, \xi)$, $\hat{N}_A(\omega, \xi)$, $\hat{N}_B(\omega, \xi)$ – спектры Фурье соответствующих изображений и сигналов. Поэтому

$$\hat{F}(\omega, \xi) = \frac{\hat{B}(\omega, \xi) - \hat{N}_B(\omega, \xi)}{\hat{A}(\omega, \xi) - \hat{N}_A(\omega, \xi)}. \quad (5)$$

Реализация шумовых процессов в (5) не известна. На практике можно оценить $\hat{F}(\omega, \xi)$ как

$$\hat{F}^*(\omega, \xi) = \hat{B}(\omega, \xi) / \hat{A}(\omega, \xi), \quad (6)$$

однако при этом из-за действия шумов возникает ошибка.

Определим относительную погрешность числителя и знаменателя в (6) как

$$\begin{aligned} \varepsilon_A(\omega, \xi) &= \sigma [N_A(\omega, \xi)] / |S(\omega, \xi) H_A(\omega, \xi)|, \\ \varepsilon_B(\omega, \xi) &= \sigma [N_B(\omega, \xi)] / |S(\omega, \xi) H_B(\omega, \xi)|, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sigma[\cdot]$ – СКО, а $|S(\omega, \xi) H_A(\omega, \xi)|$ и $|S(\omega, \xi) H_B(\omega, \xi)|$ – амплитуды «полезных» сигналов $S \otimes H_A$ и $S \otimes H_B$ на частоте (ω, ξ) . Для практического использования (6) необходимо, чтобы $\varepsilon_A(\omega, \xi) \ll 1$ и $\varepsilon_B(\omega, \xi) \ll 1$. При этом вместо $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ допустимо использовать их оценки:

$$\begin{aligned} \varepsilon_A^*(\omega, \xi) &= \sigma^* [N_A(\omega, \xi)] / |A(\omega, \xi)|, \\ \varepsilon_B^*(\omega, \xi) &= \sigma^* [N_B(\omega, \xi)] / |B(\omega, \xi)|, \end{aligned} \quad (8)$$

где оценки СКО шума $\sigma^* [N_A(\omega, \xi)]$ и $\sigma^* [N_B(\omega, \xi)]$ можно найти непосредственно по изображениям A, B как это, например, выполнено в работе [11].

Согласно (7) для достоверной оценки (6) необходимо, чтобы:

а) спектральная плотность изображения подстилающей поверхности $|S(\omega, \xi)|$ на частоте (ω, ξ) была достаточно высокой;

б) модули коэффициентов пропускания $H_A(\omega, \xi)$ и $H_B(\omega, \xi)$ видеотрактов ОЭПов, формирующих изображения А и В на частоте (ω, ξ) , были достаточно высокими.

В частности, если $S(\omega, \xi) = 0$, или $H_A(\omega, \xi) = 0$, или $H_B(\omega, \xi) = 0$, то достоверное определение $\hat{F}(\omega, \xi)$ невозможно.

Для реальных изображений подстилающей поверхности $S(\omega, \xi)$ может иметь сложный и достаточно непредсказуемый вид. Например, изображение городской плановой застройки может иметь хорошо выраженный период, в результате $|S(\omega, \xi)|$ окажется недопустимо малым для всех частот, кроме гармоник основного периода, и как следствие, оценка (6) для большинства частот будет недостоверной. Качественную оценку (6) можно получить только путем съемки специальных высококонтрастных калибровочных изображений с широким, достаточно равномерным спектром, или путем подбора изображений подстилающей поверхности с аналогичными свойствами, исходя из условий $\varepsilon_A^*(\omega, \xi) \ll 1$ и $\varepsilon_B^*(\omega, \xi) \ll 1$ для всех (ω, ξ) .

Таким образом, оценку F можно получить, если доступны несколько реализаций изображений A_i, B_i , соответствующих различным сюжетам S_i . Равенство (4) выполняется для каждой реализации, а математическое ожидание правой части (4) равно нулю, поэтому оптимальная оценка $\hat{F}^*(\omega, \xi)$ определяется из условия

$$\sum_i \left| \hat{A}_i(\omega, \xi) \hat{F}^*(\omega, \xi) - \hat{B}_i(\omega, \xi) \right|^2 = \min. \quad (9)$$

По МНК находим решение (9):

$$\hat{F}^*(\omega, \xi) = \frac{\sum_i \hat{B}_i(\omega, \xi) \overline{\hat{A}_i(\omega, \xi)}}{\sum_i \left| \hat{A}_i(\omega, \xi) \right|^2}, \quad (10)$$

где $\overline{\hat{A}_i(\omega, \xi)}$ – комплексно сопряженное для числа $\hat{A}_i(\omega, \xi)$. Используя (10), можно обобщить выражение (8) для нахождения достоверности определения $\hat{F}^*(\omega, \xi)$:

$$\varepsilon_A^*(\omega, \xi) = \sigma^* [N_A(\omega, \xi)] / \sqrt{\sum_i |A(\omega, \xi)|^2}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_B^*(\omega, \xi) = \sigma^* [N_B(\omega, \xi)] / \sqrt{\sum_i |B(\omega, \xi)|^2}.$$

Пространственный подход

В этом случае задачу поиска F можно сформулировать как

$$A(x, y) \otimes F^* - B(x, y) \rightarrow \min. \quad (12)$$

При этом полагается, что F^* – функция с финитным носителем, которая может быть представлена в виде «окна» размером $N \times N$. Из выражения (12) сформируем систему линейных уравнений для фрагмента $m \times n$ на изображениях А и В:

$$\begin{cases} A(x_1, y_1) \otimes F^* = B(x_1, y_1), \\ \dots \\ A(x_m, y_1) \otimes F^* = B(x_m, y_1), \\ \dots \\ A(x_m, y_n) \otimes F^* = B(x_m, y_n). \end{cases} \quad (13)$$

Решая систему линейных уравнений (13) найдем параметры оконного фильтра F^* , удовлетворяющего условию (12). Для адекватной оценки F^* при наличии шумов необходимо чтобы $m \cdot n \gg N \cdot N$.

Недостаток подобного подхода состоит в том, что он практически применим только для малых N . В тоже время согласно (2) носитель $F^*(x, y)$ существенно зависит от функций рассеяния точки видеотрактов H_A, H_B . И если функция H_A такова, что решение задачи совмещения видеотрактов включает задачу инверсной фильтрации, носитель $F^*(x, y)$ может быть значительным, даже если H_A, H_B имеют достаточно малый носитель. В этом случае более эффективно решение задачи в однородной постановке: будем искать две функции $F^*(x, y), G^*(x, y)$ с достаточно малым носителем из условия

$$\sum_{(x, y)} \left(A(x, y) \otimes F^*(x, y) - B(x, y) \otimes G^*(x, y) \right)^2 = \min. \quad (14)$$

При этом на функции $F^*(x, y), G^*(x, y)$ необходимо наложить ограничения, чтобы избежать тривиальных решений. В качестве ограничения можно использовать условие:

$$\left| \hat{F}^*(\omega, \xi) \right|^2 + \left| \hat{G}^*(\omega, \xi) \right|^2 = 1, \quad (15)$$

где $\omega = \pi i / N, \xi = \pi j / N, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}$.

Такое ограничение гарантирует, что каждая пространственная частота будет учтена при решении (14).

На рис. 2 представлен результат приведения изображения $B(x, y)$, имеющего худшее разрешение, к разрешению изображения $A(x, y)$.

При обработке получен и использован фильтр F^* , имеющий следующий вид:

$$F^* = \begin{pmatrix} -0.156 & 0.149 & -0.014 & -0.081 & 0.023 & 0.079 & -0.118 \\ 0.071 & 0.063 & -0.151 & -0.02 & -0.034 & -0.033 & 0.061 \\ 0.044 & -0.167 & 0.043 & 0.451 & -0.184 & 0.044 & -0.015 \\ -9.8 \times 10^{-3} & -0.323 & 0.378 & 0.834 & -0.159 & 0.181 & -0.089 \\ -6.9 \times 10^{-3} & -0.246 & 0.194 & 0.509 & -0.177 & 0.051 & -0.076 \\ 0.159 & 8.1 \times 10^{-3} & -0.136 & -8.9 \times 10^{-3} & -0.123 & 5.8 \times 10^{-3} & 0.102 \\ -0.202 & 0.186 & -0.086 & -0.062 & 0.044 & 0.055 & -0.101 \end{pmatrix}$$

Графически фильтр F^* представлен на рис. 3.

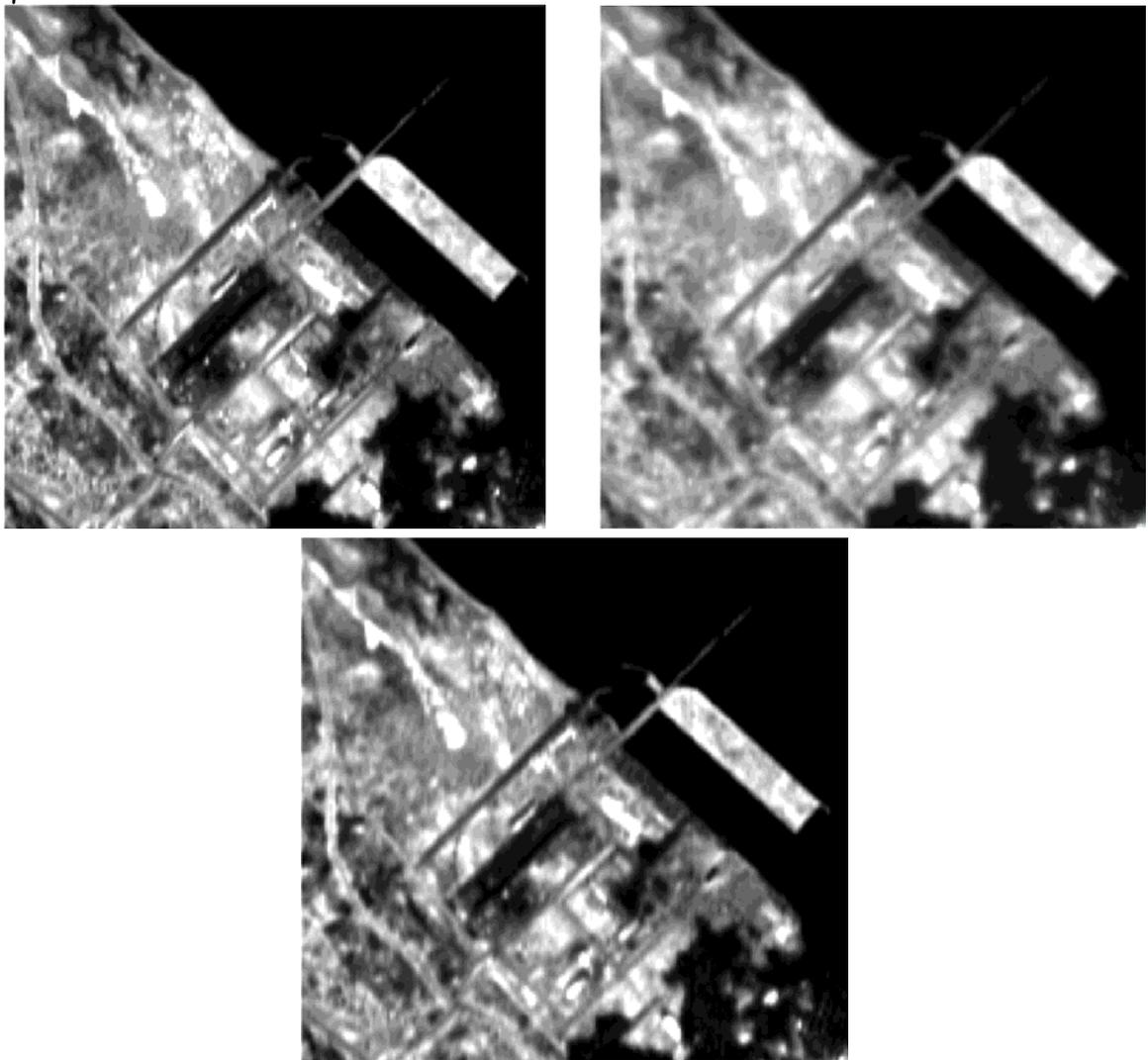


Рис. 2: сверху – изображение $A(x, y)$; в центре – изображение $B(x, y)$, имеющее худшее разрешение; внизу – результат обработки $B(x, y)$ фильтром F^*

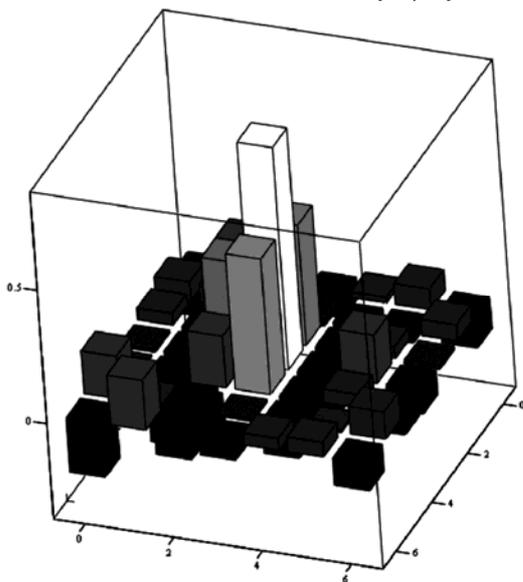


Рис. 3. Графическое представление фильтра F^*

Заключение

Для серии изображений $A(x, y)$ и $B(x, y)$ (на рис. 2 сверху и в центре представлена одна из реализаций) с

использованием подхода, изложенного в работе [11], выполнена достоверная оценка пространственных разрешений исходных изображений и результата их обработки. На достаточно представительном статистическом материале от гиперспектрометра спутника «Ресурс-П» установлено:

1) функции рассеяния точки реальных видеотрактов H_A, H_B позволяют оценить восстанавливающий фильтр F^* с достаточной точностью при размерах «окна» 7×7 ;

2) при относительном различии пространственных разрешений исходных изображений 35% после обработки этот показатель сократился до 14%.

3) фильтрация с помощью F^* дополнительно позволила существенно снизить геометрические рассогласования между исходными изображениями $A(x, y)$ и $B(x, y)$.

Литература

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
2. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Мятлов Г.Н. Повышение информативности материалов

съемки Земли за счет объединения гиперспектральной информации с данными от других съемочных систем // Цифровая обработка сигналов. 2013. №4. С. 37–41.

3. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В.В. Еремеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 460 с.

4. Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Линько В.М., Морозов С.А. Схемные решения оптического тракта изображающих спектрометров // Матер. научн. техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». М: ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», 2013. С. 44–45.

5. Архипов С.А., Ляхов А.Ю., Тарасов А.П. Работы ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования // Матер. научн. техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». М: ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», 2013. С. 25–30.

6. Mark A. Folkman, Jay Pearlman, Lushalan B. Liao, Peter J. Jarecke, «EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration», Proc. SPIE 4151, Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, 40 (February 8, 2001).

7. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 36–40.

8. Архипов С.А., Бутякин Н.А., Ли А.В., Линько В.М., Лузганова М.Ю. Предварительная обработка гиперспектральной видеоинформации ГСА РП // Матер. научн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». М: ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», 2013. С. 132.

9. Ахметов Р.Н., Везенов В.И., Еремеев В.В., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А. Модели формирования и некоторые алгоритмы обработки гиперспектральных изображений // Исследование Земли из космоса. 2014. №1. С. 17–28.

10. Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов. №4. 2010. С. 28 – 32.

11. Еремеев В.В., Князьков П.А., Козлов Е.П., Москвитин А.Э. Технологии анализа и оценки качества космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2010. №3. С. 30–37.

НОВЫЕ КНИГИ

Горбунов Ю.Н., Лобанов Б.С., Куликов Г.В.

Введение в стохастическую радиолокацию: учеб. пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 376 с.

Рассмотрены основы радиолокации, вопросы реализации когерентно-импульсных систем радиолокации и их компонент – цифровых систем обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов систем селекции движущихся целей, обеспечивающих выделение полезных сигналов от целей на фоне коррелированных помех по доплеровским и угловым признакам (пространственным частотам). В отличие от традиционного изложения материала, упор сделан на стохастические методы обработки сигналов и информации.

Для студентов, обучающихся по специальности 210601 – «Радиоэлектронные системы и комплексы», а также других радиотехнических и инфокоммуникационных специальностей.

Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А.

Радиомониторинг: задачи, методы, средства: научн. издание под ред. Рембовского А.М. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 640 с., 4-е изд., с испр.

Рассмотрены типовые задачи, решаемые с помощью средств радиомониторинга в самых различных областях – от управления использованием радиочастотного спектра до контроля радиообстановки при проведении контртеррористических операций. Изложены теоретические и практические вопросы построения и функционирования радиотехнических систем радиомониторинга и технической защиты информации, в том числе автоматизированных стационарных и мобильных систем пеленгования, определения местоположения источников радиоизлучения, измерения параметров сигналов, видов радиоизлучений и утечек информации. Рассмотрены математические методы и программное обеспечение для выявления и анализа радиоизлучений, измерения параметров сигналов и помех, определения положения источников радиосигналов и помех. Представлен анализ особенностей построения современных одноканальных и многоканальных широкополосных цифровых панорамных измерительных радиоприемников и радиопеленгаторов, в том числе и CDMA.

Для специалистов в области радиомониторинга, операторов и руководителей радиоконтрольных служб, а также студентов и аспирантов.

