

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЦВЕТНЫХ СНИМКОВ ПО ДАННЫМ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Кузнецов А.Е., д.т.н., профессор, зам. Директора НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: foton@rsreu.ru

Побаруев В.И., к.т.н. доцент, ведущий научный сотрудник НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: foton@rsreu.ru

Светелкин П.Н., к.т.н., старший научный сотрудник НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: foton@rsreu.ru

Ключевые слова: спектрозональные и панхроматические изображения, естественные цвета объектов, комплексирование снимков высокого и низкого разрешения.

Введение

В системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при многозональной съемке, в общем случае, формируются разновременные снимки подстилающей поверхности B_k , в нескольких зонах видимого диапазона спектра, $k = \overline{1, N}$, где N – количество спектральных зон.

Для получения на их основе цветосинтезированных изображений наблюдаемой территории снимки геометрически совмещаются между собой и тем самым формируются необходимые RGB-компоненты [1]. Однако этот подход не полностью решает проблему получения цветных изображений по данным многозональной съемки. Дело в том, что при использовании спектральных диапазонов, характерных для российских систем «Ресурс-ДК» и «Метеор-М» и представленных в таблице, искажаются естественные цвета представления объектов земной поверхности. Причем основные цветовые искажения относятся к фотосинтезирующим растениям (рис. 1, а), которые представляются оранжевыми или красными оттенками. Поскольку восприятие и понимание таких изображений для большинства пользователей затруднено, то возникает задача синтеза RGB-компонент, обеспечивающих получение изображений с близкой к естественной цветовой палитрой.

Таблица 1. Спектральные диапазоны КА «Ресурс-ДК», «Метеор-М», Terra (мкм)

«Ресурс-ДК»	Terra ASTER (первые 3 канала)	«Метеор-М» МСУ-100
0,5–0,6	0,51–0,60	0,535–0,575
0,6–0,7	0,63–0,69	0,63–0,68
0,7–0,8	0,76–0,86	0,76–0,90

Необходимо отметить, что в системах ДЗЗ «Ресурс-П», «Канопус-В» и «БКА» установлена аппаратура, обеспечивающая одновременную спектрозональную и панхроматическую съемку земной поверхности. Поскольку пространственное разрешение панхроматических изображений в несколько раз выше, чем спектрозональных, то возникает вторая задача, связанная с

Рассматриваются алгоритмы формирования спектрозональных компонент, обеспечивающих получение изображений земной поверхности от спутников «Ресурс-ДК» и «Метеор-М» в естественных цветах. Для получения высококачественных цветных изображений высокого пространственного разрешения по данным панхроматической и спектрозональной съемки предложено использовать модифицированный алгоритм гиперсферического раскрашивания.

получением цветных снимков высокой детальности, т.е. синтезом спектрозональных компонент высокого пространственного разрешения (так называемая задача Pan-sharpening).

В настоящей статье рассматриваются алгоритмы решения сформулированных задач, что позволяет в полной мере удовлетворять потребителей данных ДЗЗ цветными снимками земной поверхности.

Анализ алгоритмов получения снимков в естественных цветах

Из таблицы видно, что отечественные КА «Ресурс-ДК» и «Метеор-М» выполняют съемку в зеленом, красном и ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Поскольку отражающая способность фотосинтезирующих растений резко возрастает в ближнем инфракрасном диапазоне (рис. 2), то «окрасить» растения в зеленый цвет можно поменяв второй и третий каналы местами.

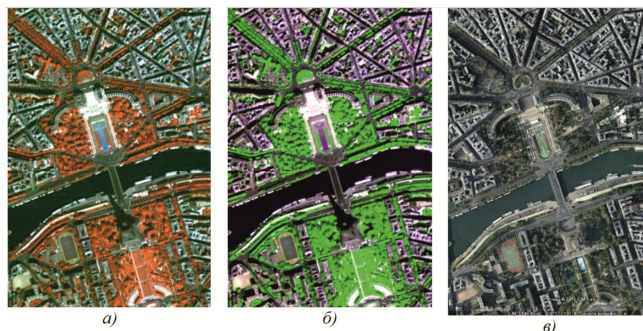


Рис. 1. Пример представления цветосинтезированных изображений: а – исходный снимок от КА «Ресурс-ДК» (спектральные каналы 1, 2, 3); б – снимок от КА «Ресурс-ДК» (спектральные каналы 1, 3, 2); в – аналогичный снимок системы Google Maps

Из рис. 1, б видно, что после выполнения этой операции зелень приобретает неестественно яркий цвет, а цвет городской застройки также становится непривычным для восприятия. Таким образом, для перечислен-

ных в таблице спектральных каналов спутников «Ресурс-ДК» и «Метеор-М» изменение комбинации спектральных каналов не обеспечивает желаемых результатов.

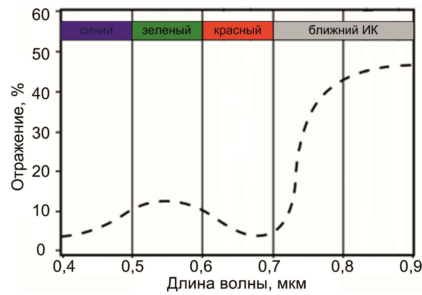


Рис. 2. График отражающей способности фотосинтезирующих растений

В программном продукте ENVI есть возможность представления естественных цветов («True Color») [2]. При этом изображение в натуральных цветах формируется отображением видеоданных красного диапазона (0,6–0,7 мкм) в третий канал цветосинтезированного снимка, видеоданных зеленого диапазона (0,5–0,6 мкм) – во второй канал и синего диапазона (0,4–0,5 мкм) – в первый канал. Инфракрасное изображение формируется отображением видеоданных ближнего ИК диапазона (0,76–0,9 мкм) в третий («красный») канал цветосинтезированного изображения, видеоданных красного диапазона – во второй канал, зеленого диапазона – в первый канал.

Однако в руководстве пользователя к программному продукту обращается внимание, что если видеоданные не сняты в необходимых диапазонах длин волн, то ис-

пользуются ближайшие по длине волны видеоданные. Это может привести к получению изображения в градациях серого, если три канала отображаемого цветного снимка заполняются одинаковыми видеоданными.

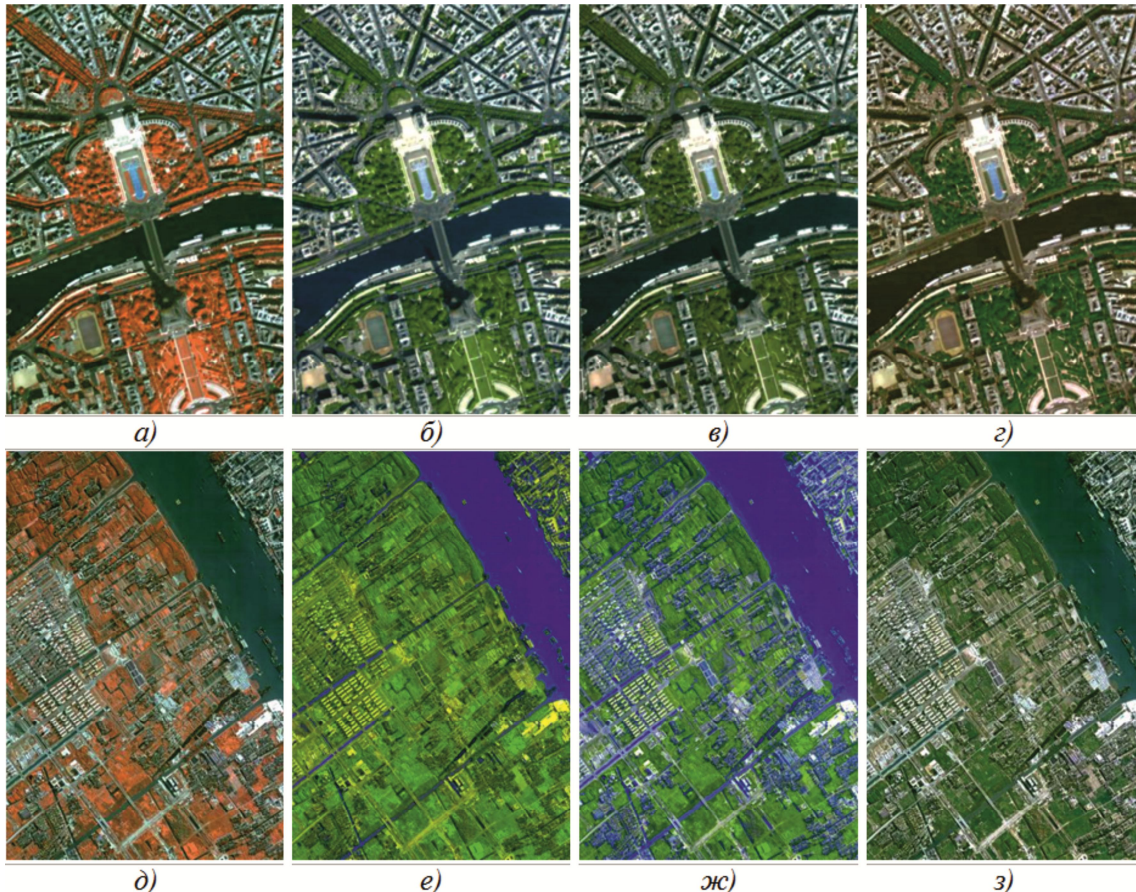
Оператор спутника ДЗЗ WorldView-2 (компания DigitalGlobe) не приводит данных о режиме синтеза результирующих изображений из различных спектральных каналов [3].

В описании сервиса TerraLook [4] указано, что снимки представляются в натуральных цветах с синтезированным синим каналом:

$$D_3 = B_r, D_2 = \frac{2}{3}B_g + \frac{1}{3}B_{ir}, D_1 = \frac{2}{3}B_g - \frac{1}{3}B_{ir}, \quad (1)$$

где D_1, D_2, D_3 – первый, второй и третий каналы цветосинтезированного изображения D . В дальнейшем будем считать, что снимки B_k совмещены между собой с субпиксельной точностью, а также для простоты понимания и определенности индексы $k = \overline{1, N}$ заменяются на $k \in \{b, g, r, ir, p\}$, так как в некоторых формулах важен не порядковый номер снимка, а спектральный диапазон, в котором он снят.

Первые три диапазона съемки аппаратуры ASTER аналогичны каналам съемки КА «Ресурс-ДК», поэтому указанный алгоритм, примененный к снимкам КА «Ресурс-ДК», дает результаты, показанные на рис. 3, б. Здесь можно отметить, что на части снимков цвета получаются неестественными (рис. 3, е). На снимках МСУ-100 КА «Метеор-М» (рис. 3, и) указанный алгоритм дает фиолетовый цвет открытых почв (рис. 3, к).



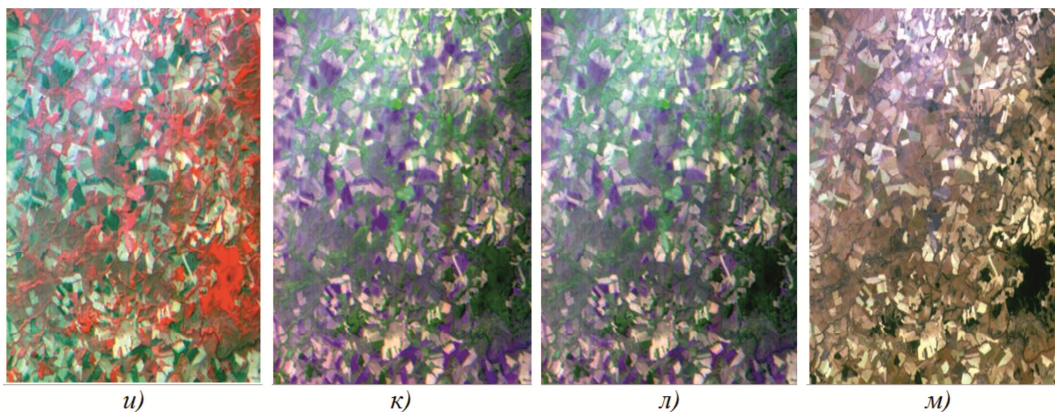


Рис. 3. Примеры синтеза цветных изображений а, д, и – исходные изображения; б, е, κ – снимки, синтезированные по алгоритму TerraLook; в, ж, л – снимки, синтезированные по алгоритму SPOT; з, з, м – цветные изображения, синтезированные по разработанному алгоритму с использованием индекса NDVI

Для снимков SPOT используется аналогичный алгоритм [5], отличающийся коэффициентами:

$$D_3 = B_r, D_2 = \frac{3}{4}B_g + \frac{1}{4}B_{ir}, D_1 = \frac{3}{4}B_g - \frac{1}{4}B_{ir}. \quad (2)$$

Его применение дает результаты, аналогичные результатам алгоритма TerraLook (рис. 3, в, ж, л).

Алгоритмы, примененные в сервисе TerraLook и для спутника SPOT, можно использовать для датчика МСУ-100 (КА «Метеор-М»), если уменьшить составляющие B_{ir} в 1,4 раза, т.е. приблизить ее к спектральному диапазону зарубежных спутников. Пример синтеза изображений по этим алгоритмам показан на рис. 4, из которого следует, что участки открытой почвы выглядят розоватыми. Другим недостатком алгоритмов SPOT и TerraLook в некоторых случаях является окрашивание теней от высотных объектов в синий цвет.

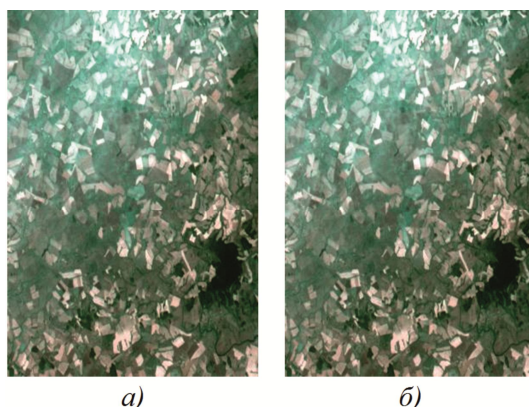


Рис. 4. Пример представления данных МСУ-100 по алгоритмам TerraLook и SPOT: а – снимок, синтезированный по скорректированному алгоритму TerraLook; б – снимок, синтезированный по скорректированному алгоритму SPOT

Алгоритм синтеза цветных изображений на основе вегетационного индекса

Апробация известных алгоритмов показала, что они не подходят для создания цветных изображений в цветах, близких к естественным. Однако из таблицы видно, что на основе яркостей снимков второго и третьего каналов можно вычислить вегетационный индекс, т.е. выделить на снимке зеленые фотосинтезирующие растения. Наиболее распространенный вегетационный индекс NDVI [6] вычисляется по формуле

$$K_{NDVI} = \frac{B_{ir} - B_r}{B_{ir} + B_r}. \quad (3)$$

При этом вегетационный индекс K_{NDVI} принимает значения в диапазоне $[-1; 1]$, а для фотосинтезирующих растений $K_{NDVI} > 0$.

Для вычисления вегетационного индекса нормализуем яркости пикселей, после чего формула (3) примет вид

$$K_{NDVI} = \frac{K_{омн} B_{ir} - B_r}{K_{омн} B_{ir} + B_r}, K_{омн} = \frac{\overline{B_r}}{\overline{B_{ir}}}, \quad (4)$$

где $\overline{B_r}$, $\overline{B_{ir}}$ – средние значения яркостей пикселей изображений красного и ближнего инфракрасного каналов.

Так как для снимков рассматриваемых КА значения вегетационного индекса не превышает 0,3, то введем эмпирическую функцию

$$f_n(B_r, B_{ir}) = \begin{cases} 3K_{NDVI} \overline{B_{ir}}, & K_{NDVI} > 0, \\ 0, & K_{NDVI} \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда яркости пикселей цветосинтезированного изображения D в цветах, близких к натуральным, вычислим по формулам:

$$D_1 = B_g, D_2 = B_r, D_3 = B_{ir} - f_n(B_r, B_{ir}) \quad (6)$$

для режима съемки GRIr,

$$D_1 = B_g, D_2 = B_p - B_{ir}, D_3 = B_{ir} - f_n(B_p, B_{ir}) \quad (7)$$

для режима съемки GPIr и

$$D_1 = B_g, D_2 = B_r, D_3 = B_p - B_r - f_n(B_r, B_p) \quad (8)$$

для режима съемки GRP, где P – обозначение панхроматического снимка B_p .

Полученный на основе формулы (6) цветной снимок представлен на рис. 3 з, из которого следует, что цвет зеленых растений стал более естественным, а цвет городской застройки практически не изменился.

Таким образом, предложенный алгоритм устойчив к флуктуациям спектральных диапазонов и позволяет получать цветные снимки в естественных цветах на основе видеоданных как от КА «Ресурс-ДК» так и «Метеор-М».

Синтез цветных изображений из снимков высокого пространственного разрешения

На действующем КА «Канопус-В» установлены съемочные устройства, выполняющие съемку в панхроматическом диапазоне спектра и в нескольких узких зонах спектра, при этом разрешение спектрозональных снимков в несколько раз ниже, чем панхроматических. Например, многозональная съемочная система (МСС) формирует изображения в спектральных зонах 0,54–0,6 мкм, 0,63–0,69 мкм, 0,69–0,72 мкм, 0,72–0,86 мкм с пространственным разрешением 10,5 м, а панхроматическая съемочная система (ПСС) – в спектральном диапазоне 0,52–0,85 мкм обеспечивает получение изображений с пространственным разрешением 2,3 м. Поэтому главным требованием при комплексировании панхроматических и спектрозональных снимков является сохранение пространственного разрешения синтезируемого цветного снимка и цветовых компонент, характерных для многозонального изображения. В этой связи проанализируем известные алгоритмические решения.

Будем считать, что панхроматический снимок B_p и спектрозональные изображения B_k геометрически совмещены с субпиксельной точностью. Кроме того, компоненты B_k за счет интерполяции преобразованы к масштабу панхроматического снимка. Тогда одним из известных подходов по формированию спектрозональных компонент является модуляционный алгоритм [1], в соответствии с которым искомые составляющие D_k рассчитываются как

$$D_k = \frac{NB_k}{\sum_{k=1}^N B_k} B_p, \quad k, i \notin \{p\}. \quad (9)$$

Экспериментальные исследования показали, что модуляционный алгоритм не приводит к потере пространственного разрешения синтезированного цветного снимка. Однако, как показано на рис. 5, б, цветовая палитра нового изображения отличается от исходного спектрозонального снимка (рис. 5, а). В этой связи

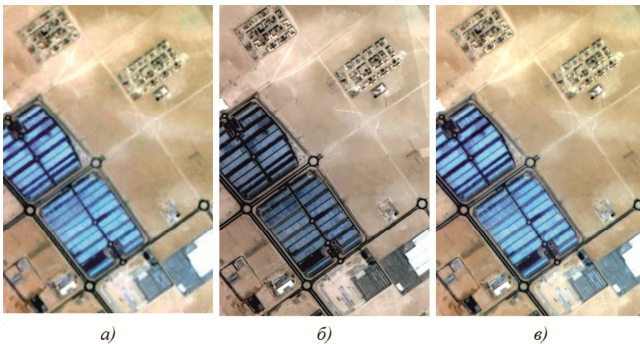


Рис. 5. Примеры синтеза цветных изображений от КА «Канопус-В»: а – изображение от датчика МСС; б – цветное изображение, полученное по модуляционному алгоритму; в – цветное изображение, полученное по алгоритму с использованием гипертетраэдрического цветового пространства

В этой связи проанализируем алгоритм раскраски панхроматического снимка без искажения цветовых составляющих снимка [7]. В указанном алгоритме сначала выполняется преобразование текущего цветового пространства в гипертетраэдрическое цветовое пространство по формулам:

$$I = \sqrt{\sum_{i=1}^N B_i^2}, \quad \phi_k = \arctan \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=k+1}^N B_i^2}}{B_k} \right), \quad k = \overline{1, N-1},$$

$$k, i \notin \{p\}, \quad (10)$$

где ϕ_k – угловые компоненты гипертетраэдрического цветового пространства.

Затем необходимо выровнять яркости панхроматического снимка и интенсивности I . Для этого воспользуемся более простыми соотношениями, чем в первоисточнике:

$$\hat{B}_p^2 = \bar{I}^2 + \frac{\sigma_p}{\sigma_I} (B_p^2 - \bar{B}_p^2), \quad \bar{B}_p^2 = \bar{I}^2 + \frac{\sigma_p}{\sigma_I} (B_p^2 - \bar{B}_p^2),$$

$$I_M = \sqrt{\frac{\hat{B}_p^2}{\bar{B}_p^2}} I^2, \quad (11)$$

где $\hat{B}_p$ – выровненная яркость пикселя панхроматического изображения; B_p – яркость пикселя панхроматического снимка, сглаженного с использованием скользящего окна размером 7×7 пикселей; $\bar{I}^2$, $\bar{B}_p^2$ – средние значения яркости изображений I^2 и B_p^2 соответственно; σ_I , σ_p – среднеквадратические отклонения снимков I^2 и B_p^2 , соответственно; I_M – модифицированное значение интенсивности.

Авторы алгоритма раскрашивания указывают на некоторую потерю разрешения полученного цветосинтезированного изображения по отношению к панхроматическому снимку высокого разрешения. Поэтому для повышения разрешения выполним повышение четкости компоненты I_M по формуле

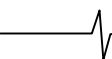
$$\tilde{I}_M = I_M \otimes h_{3 \times 3}, \quad I_M^* = \tilde{I}_M + 1,5(I_M - \tilde{I}_M), \quad (12)$$

где $\otimes$ – операция свертки с маской размытия h размером 3×3 элемента, I_M^* – интенсивность повышенной четкости. Коэффициент «1,5» выбран из расчета исключения появления артефактов.

Далее выполним обратное преобразование в исходное цветовое пространство, но вместо интенсивности I в формулу подставим модифицированную компоненту I_M^* ,

$$D_1 = I_M^* \cos(\phi_1);$$

$$D_k = I_M^* \cos(\phi_k) \prod_{i=1}^{k-1} \sin(\phi_i), \quad k = \overline{2, N-1};$$



$$D_N = I_M^* \prod_{i=1}^{N-1} \sin(\phi_i). \quad (13)$$

Пример работы модифицированного алгоритма гиперсферического раскрашивания показан на рисунке (рис. 5, в), из которого следует, что детальность снимка по сравнению со снимком от МСС стала выше, цвета снимка сохранены. Этот факт подтверждают эксперименты по вычислению линейного разрешения на местности нового спектрального изображения D_k .

Заключение

Таким образом, рассмотренные в статье алгоритмы позволили решить ряд важных практических задач. В-первых, по аналогии с зарубежными космическими системами организовать выдачу выходных информационных продуктов в естественных цветах. Обеспечить наполнение геопортала данных ДЗЗ материалами съемок, адекватно воспринимаемых широким кругом пользователей. Во-вторых, применительно к системе обработки данных КА «Канопус-В» и «БКА» организовать получение нового вида выходной продукции – цветных снимков высокого разрешения с известными спектральными характеристиками.

Литература

1. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям сред-

него и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 36–40.

2. ENVI User's Guide http://geol.hu/data/online_help/The_Available_Bands_List.html

3. http://rnd.cnews.ru/tech/news/top/index_science.shtml?2009/10/21/366622

4. TerraLook: бесплатные космические снимки ASTER, TM, ETM+ <http://gis-lab.info/qa/terralook.html>

5. Interpreting Optical Remote Sensing Images http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/opt_int.htm

6. <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

7. WorldView-2 Pan-Sharpning. C. Padwick, M. Deskevich, F. Pacifici, S. Smallwood. http://www.digitalglobe.com/downloads/WorldView-2_Pan-Sharpning.pdf

FORMING OF COLOR IMAGES COMPONENTS FROM THE DATA OF MULTISPECTRAL IMAGERY

Kuznetsov A.E., Pobaruiev V.I., Svetelkin P.N.

The algorithms of forming multispectral images component the Earth's surface from satellites «Resurs-DK» and the «Meteor-M» in natural colors is given. For obtaining high quality color images with high spatial resolution from panchromatic and multispectral images is proposed to use a modified algorithm hyperspherical colorizing.

НОВЫЕ КНИГИ



Джиган В.И.

Адаптивная фильтрация сигналов: теория и методы

Москва: Техносфера, 2013. – 528 с.

Рассматриваются основные разновидности адаптивных фильтров и их применение в радиотехнических системах и системах связи. Дается представление о математических объектах и методах, используемых в теории адаптивной фильтрации сигналов. Рассматриваются приемы получения вычислительных процедур, сами процедуры и свойства таких алгоритмов адаптивной фильтрации, как алгоритмы Ньютона и наискорейшего спуска, алгоритмы по критерию наименьших квадратов, рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов и их быстрые (вычислительно эффективные) версии; рекурсивные алгоритмы для многоканальных фильтров и их версии для обработки нестационарных сигналов, а также многоканальные алгоритмы аффинных проекций. Дано описание стандартных и нестандартных приложений для моделирования адаптивных фильтров на современных языках программирования MATLAB, LabVIEW и SystemVue, а также реализаций адаптивных фильтров на современных цифровых сигнальных процессорах.

Особенностью книги является изложение теоретических материалов для наиболее общего случая – адаптивных фильтров с ком-

плексными весовыми коэффициентами, наличие разделов по многоканальным адаптивным фильтрам и алгоритмам адаптивной фильтрации нестационарных сигналов.

Книга является первым систематическим изложением теории адаптивной фильтрации на русском языке.

Предназначена для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов радиотехнических и связанных специальностей, изучающих и использующих на практике цифровую обработку сигналов.