

УДК 528.7+629.78

МЕТОД СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2015 Г. П. Аншаков, Г. Н. Мятлов, В. А. Малиновский

Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

В технологии создания такого информационного продукта как цифровые модели рельефа (ЦМР) местности одним из важнейших звеньев является обеспечение высокой точности модели, для подтверждения которой требуется наличие эталона. В отличие от методического подхода, основанного на получении данных о рельефе местности с помощью оцифрованных топографических карт, для создания эталонной ЦМР предложена методология, обеспечивающая высокую точность решения задачи координатной привязки опорных точек за счёт дифференциальной обработки навигационной информации, полученной двухчастотными приёмниками геодезического класса. Разработана и экспериментально подтверждена методика получения высокоточных сечений рельефа местности, основой которой является жёстко связанный алгоритм комбинирования инерциальных и спутниковых измерений, который обеспечивает высокую точность решений даже при временном отсутствии спутниковых сигналов. В результате полевых и камеральных работ, проведённых в период с 2013 по 2015 гг., обеспечено создание эталонной ЦМР размером около $50 \times 50 \text{ км}^2$, позволившей проводить оценку создаваемых по результатам космической стереосъёмки ЦМР и соответствующую коррекцию программно-методического аппарата обработки данных дистанционного зондирования Земли.

Дистанционное зондирование Земли, цифровая модель рельефа, стереосъёмка, точность цифровой модели рельефа.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-7-16

В настоящее время наиболее значимыми информационными продуктами, создаваемыми на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), становятся цифровые модели рельефа местности. Это связано, прежде всего, с высокой потребностью в таких продуктах на мировом рынке данных ДЗЗ, а также с появлением новых инновационных методов и средств, обеспечивающих реализацию процесса получения, обработки и предоставления потребителям ЦМР.

Наиболее важную роль применение цифровых моделей рельефа местности играет при решении задач картографирования, а также для таких разнообразных приложений, как трёхмерная визуализация, анализ поверхности в целях «прецизионного земледелия», картирование в пределах прямой видимости для размещения станций сотовой связи и прокладки трасс теплоносителей, анализ аварийных ситуаций (так называемого картирования наводнений), навигация.

На точность построения рельефа оказывают влияние многие факторы, такие как пространственное разрешение и геометрическое качество изображений, состояние атмосферы, масштаб карты, точность опорных точек.

Для оценки метрических свойств ортоизображений земной поверхности, получаемых системами дистанционного зондирования Земли, необходима точная координатная привязка опорных точек (определение их геоцентрических (X, Y, Z) или геодезических (B, L, H) координат). Точность привязки должна быть на уровне долей проекции пиксела на земную поверхность, что для современных систем ДЗЗ в абсолютных значениях соответствует уровню 0,25...0,5 метра. Это определяется тем, что величины погрешностей опорных и контрольных точек в плановом положении, в соответствии с требованиями нормативных документов, не должны превышать 0,5 мм в масштабе создаваемого ортоизображения для рав-

нинных и всхолмленных районов и 0,7 мм – для горных.

В то же время для оценки точности создаваемых на основе данных ДЗЗ цифровых моделей рельефа важно иметь данные о высоте рельефа местности. Высота каждой опорной точки должна определяться с точностью не хуже 0,5 м. Для более полного анализа точности создаваемых ЦМР важно иметь возможность получения высокоточных непрерывных профилей рельефа местности заданной территории.

В отличие от методического подхода, основанного на получении данных о рельефе местности с помощью оцифрованных топографических карт [1], для создания эталонной ЦМР применены способы, обеспечивающие высокую точность решения задачи координатной привязки опорных точек за счёт дифференциальной обработки навигационной информации, полученной двухчастотными приёмниками геодезического класса.

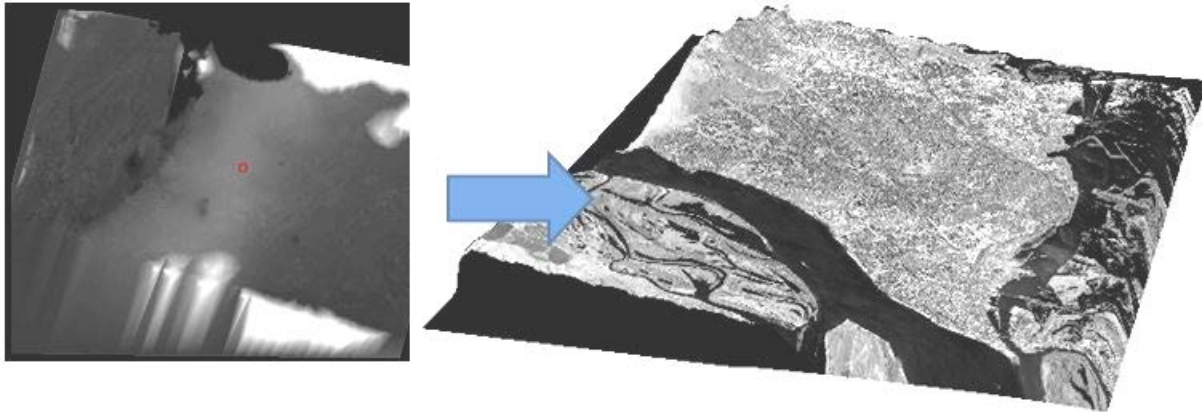
Для получения заданной высокой точности абсолютного позиционирования сети опорных точек используется дифференциальный метод, в котором обработка сигналов основана на одновременных измерениях, сделанных с одними и теми же навигационными спутниками двумя различными приёмниками, расположенными соответственно на базовой и мобильной станции. При этом формируются двойные разностные уравнения, которые устраняют или уменьшают влияние главных источников ошибок, связанных с распространением сигнала.

Для высокоточного определения координат базовой станции применён метод точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning), обеспечивающий возможность позиционирования с точностью до 10-30 см в режиме кинематики и до 1,5-2 см в режиме статики. В этом методе решения базируются на использовании двухчастотного навигационного приёмника геодезического класса и точных эфеме-

рид наблюдаемых спутников, содержащихся в файлах Rapid и Final и доступных соответственно спустя 17 часов и 12 суток через сеть Международной службы навигационных сообщений IGS (International Geodesic System). Оба решения, реализованные в программе GrafNav 8.10 компании Waypoint, используют алгоритмы многопроходного сглаживания при помощи фильтра Калмана и широко применяются при выполнении изыскательских и аэрофотогеодезических работ в Канаде, США и других странах [2,3].

Проведённые в 2014 году полевые и камеральные работы обеспечили получение данных по достаточно большому числу опорных точек (более трёхсот), расположенных на участке местности размером $50 \times 50 \text{ км}^2$, что позволило выполнить целый ряд экспериментальных исследований по оценке точности информационных продуктов, создаваемых на основе данных дистанционного зондирования, получаемых с помощью КА «Ресурс-П». В частности, проведена оценка точности цифровой модели рельефа местности в районе города Самара, а также оценка точности геопривязки ортотрансформированных изображений города Самары и его окрестностей с использованием 26 контрольных точек. При помощи программного комплекса ENVI и стереопары, полученной с КА «Ресурс-П» №1 при углах отклонения от надира $-27,65^\circ$ и $+27,71^\circ$, была построена цифровая модель рельефа (рис. 1) и на её основе промоделировано затопление территории Самарской области при разных уровнях подъёма воды в Саратовском водохранилище.

Для обеспечения возможности обработки данных в программном комплексе ENVI была разработана методика и проведено конвертирование паспорта файлов для каждого снимка стереопары, формируемого штатным комплексом обработки космических снимков с КА «Ресурс-П» №1.



2D-визуализация ЦМР

3D-визуализация ЦМР+снимок

Рис. 1. Визуализация цифровой модели рельефа местности в районе города Самара

При статистической обработке данных, проводимой с целью оценки точности созданной ЦМР, принималась аддитивная модель ошибок, согласно которой разности высот построенной ЦМР и контрольных точек на поверхности Земли (эталонной ЦМР) рассматривались в виде суммы систематической ΔH и случайной δH ошибок [4]:

$$\Delta H = \Delta_H + \delta_H. \quad (1)$$

В качестве основных показателей точности цифровой модели рельефа были приняты следующие параметры:

- среднее значение разности высот, оценка систематической ошибки:

$$\overline{\Delta H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i, \quad (2)$$

где n – число контрольных точек;

- средняя квадратическая ошибка (Root Mean Square Error – RMSE):

$$RMSE_{\Delta H} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}; \quad (3)$$

- средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error – MAE):

$$MAE_{\Delta H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta H_i|; \quad (4)$$

- стандартная среднеквадратическая ошибка (СКО):

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}; \quad (5)$$

- центрированная средняя абсолютная ошибка:

$$\theta_{\Delta H} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |\Delta H_i|}. \quad (6)$$

Результаты оценивания точности ЦМР, созданных с применением от одной до одиннадцати опорных точек, приведены в табл. 1. Для оценивания точности использовалось 26 контрольных точек эталонной ЦМР.

Таблица 1. Результаты оценивания точности ЦМР, построенных с использованием различного количества опорных точек

№	Наименование параметра	Количество опорных точек					
		1	3	5	7	9	11
1	Средняя квадратическая ошибка, м	4,81	3,60	2,65	2,5	2,37	2,42
2	Средняя абсолютная ошибка, м	3,18	2,93	2,13	2,34	2,50	2,28
3	Стандартная среднеквадратическая ошибка, м	4,3	3,74	2,77	2,67	2,74	2,68
4	Центрированная средняя абсолютная ошибка, м	1,58	1,84	1,45	1,46	1,44	1,46

По результатам проведённой оценки точности ЦМР с КА «Ресурс-П» №1 можно сделать вывод, что цифровая модель рельефа удовлетворяет требованиям карт масштаба 1:50000 (средняя абсолютная ошибка составляет не более 3 м). Показано, что для построения ЦМР достаточно наличия пяти опорных точек, так как точность ЦМР при использовании большего количества опорных точек значительно не улучшается (рис. 2).

Для создания тематического продукта более высокого уровня качества (например, карт масштаба 1:25000 и 1:10000) возникла необходимость обеспечения разработчиков программно-методического обеспечения (Рязанский филиал АО «РКЦ «Прогресс» ОКБ «Спектр») качественно новой информацией о эталонной ЦМР, позволяющей оценивать не только точность определения высот отдельных точек, но и судить о точности воспроизведения профилей рельефа местности.

В мировой практике хорошо известны две технологии, позволяющие создать эталонную ЦМР такого уровня качества – аэрофотосъёмка и лидарная съёмка. Пример созданной по результатам аэрофотосъёмки трёхмерной модели местности на отдельный участок территории полигона «Самара» приведён на рис. 3.

Использование этих технологий позволяет получить данные о высоте каждой точки заданной территории за достаточно короткий срок. Однако применимость их в реальных условиях достаточно ограничена: с одной стороны – высокой стоимостью проведения работ, а с другой стороны – организационно-техническими проблемами, связанными с получением разрешительных документов, особенно в случае лидарной съёмки, где из-за наличия достаточно мощного лазерного излучения необходимо дополнительно обеспечивать выполнение требований экологической безопасности.



Рис. 2. Зависимость точности создаваемой ЦМР от количества используемых опорных точек



Рис. 3. Визуализация трёхмерной модели местности, построенной по данным авиационной съёмки (Водинский карьер, Волжский район, Самарская область)

Имеющееся в распоряжении АО «РКЦ «Прогресс» навигационное оборудование и соответствующее программное обеспечение для обработки навигационной информации дали возможность разработать инновационную технологию получения высокоточных сечений рельефа местности, соответствующих дорожной сети на территории полигона и существенно повышающих точность оценки создаваемых по результатам космической стереосъёмки ЦМР. В ходе проведённых работ была разработана и экспериментально подтверждена методика получения таких профилей с использованием технологии SPAN (Synchronized Position, Attitude and Navigation), основой которой является жёстко связанный алгоритм комбинирования инерциальных и спутниковых измерений, который обеспечивает высокую точность решений даже при временном отсутствии спутниковых сигналов. При этом показано, что наличие

только навигационных измерений, без использования данных от прибора инерциальной навигации, не позволяет всегда получить точное решение [5].

Основным достоинством предлагаемой технологии, кроме простоты её реализации, является высокая экономическая эффективность, обусловленная сочетанием относительной дешевизны использования автотранспорта по сравнению с авиационным носителем и высокой производительностью метода, что позволяет рассматривать её в ряде задач как конкурента лидарной самолётной съёмки.

Технически эта технология заключается в проведении синхронных навигационных измерений двумя высокоточными приёмниками геодезического класса, один из которых в течение длительного времени (не менее 8 часов) находится постоянно в одной точке пространства (базовая станция), а второй, совмещённый с системой инерциальной навигации, установлен

на перемещающемся по заданному маршруту автотранспортном средстве (мобильная станция). Последующая совместная обработка полученного большого объема навигационных данных в специализированном программном пакете GrafNav 8.10 компании Waypoint обеспечивает получение не менее 1000 высотных отметок на 1 км пути, что соответствует созданию более 1 миллиона контрольных точек по всей территории полигона «Самара».

При планировании полевых работ основное внимание было уделено обеспечению надёжности и достоверности получаемых результатов.

Маршруты движения были запланированы с учётом следующих факторов:

- проезд мобильной станции в двух направлениях (по разным краям дороги);
- наличие общих участков дороги на нескольких маршрутах;
- прохождение трасс маршрутов по территории полигона «Самара», на котором имеется около 400 опорных точек;
- создание дополнительных контрольных точек (режим «стой и иди»).

Выполненные оценки точности построения высокоточных сечений рельефа местности, основанные на использовании полученной ранее (2013–2014 гг.) сети опорных точек и проведении нескольких независимых измерений, подтвердили точность построенного профиля высот. Среднее значение разностей высот между опорной точкой и точкой полученного цифрового профиля составило 0,18 м.

В ходе проведения экспериментальных работ установлено, что при ограниченном времени съёма навигационных данных с мобильной станции на опорных точках (5...10 минут) заданная точность обеспечивается на расстоянии не более 30 км от базовой станции, что заставило при

постановке экспериментальных работ по получению непрерывных профилей рельефа местности создавать свою базовую станцию для каждого кольцевого маршрута радиусом менее 30 км.

Реализация данной технологии получения высокоточных профилей рельефа местности даёт возможность резко увеличить производительность (с 20 точек в сутки в ранее используемом методе – до сотен тысяч). Плотность получаемых высотных отметок достигает в последнем случае более 400 точек на 1 км² (в ранее используемом методе – 1 точка на 10 км²). Полученные результаты приведены на рис. 4-6. Отработанные технологии получения высокоточных данных о рельефе поверхности Земли дают возможность не только обеспечить имеющийся тестовый полигон огромным количеством контрольных точек, что реализовано в ходе работы, но и при необходимости получить в кратчайшие сроки (5-6 дней полевых работ) аналогичные данные для любого доступного участка земной поверхности, например, для обеспечения точной опорной информацией данных ДЗЗ, поступающих от КА «Ресурс-П» №1 и №2.

На рис. 4 представлен фрагмент маршрута движения мобильной станции, нанесённый на геопривязанный снимок города Самары (район пересечения улиц Демократическая и Георгия Димитрова). На рис. 5 представлен фрагмент маршрута, соответствующий участку дороги по улице Советской Армии от улицы Ново-Садовая до спуска к реке Волга. На рис. 6 показано сравнение высотных профилей этого участка маршрута, построенных по результатам обработки стереопары снимков КА «Ресурс-П» и по данным постобработки навигационных измерений (эталонная ЦМР).



Рис. 4. Детальный фрагмент маршрута движения мобильной станции, нанесённый на геопривязанный снимок города Самары (район пересечения улиц Демократическая и Георгия Димитрова)



Рис. 5. Фрагмент маршрута движения мобильной станции, нанесённый на геопривязанный снимок города Самары (участок по ул. Советской Армии от ул. Ново-Садовой к р. Волге, длина участка – 1790 м)

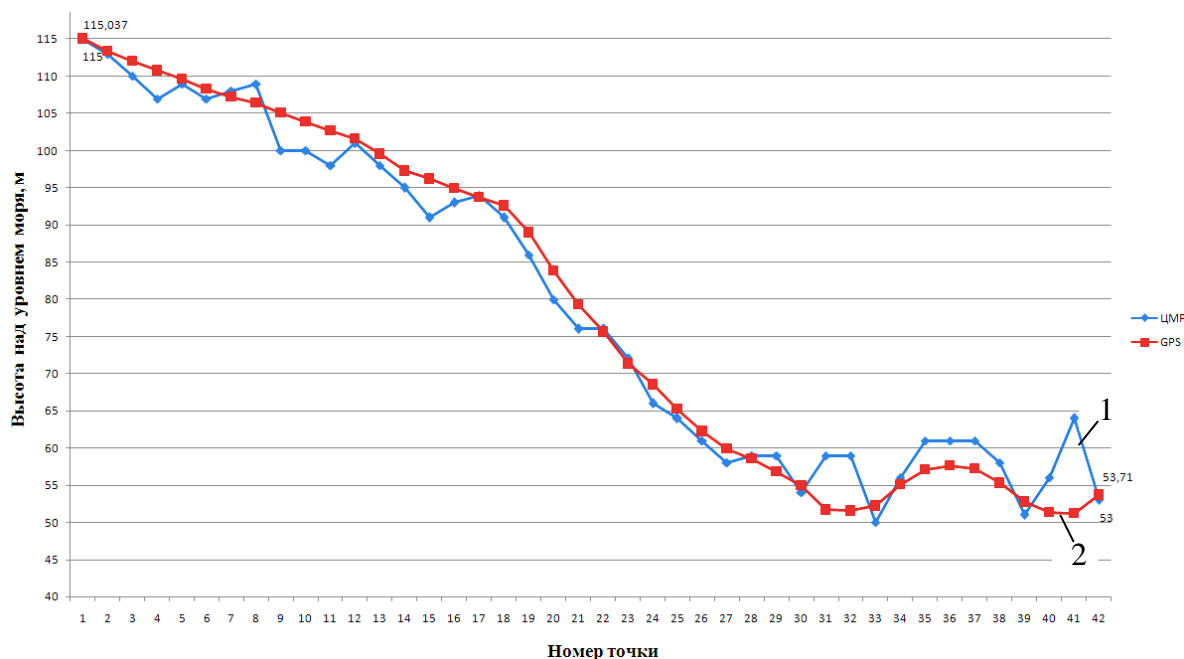


Рис. 6. Сравнение высотных профилей участка маршрута по ул. Советской Армии от ул. Ново-Садовой к р. Волге, построенных по результатам обработки стереопары снимков КА «Ресурс-П» (синий цвет (1)) и по данным постобработки навигационных измерений (эталонная ЦМР – красный цвет (2)).
Значение номера точки по оси абсцисс (с учётом дискретности шага точек 42 м) определяет расстояние от перекрёстка улиц Ново-Садовой и Советской Армии

Созданная в ходе проведённых работ эталонная модель рельефа местности позволяет обеспечить сравнение сотен профилей рельефа местности, аналогичных приведённым на рис. 6, при этом дискретность построения эталонных профилей может достигать долей метра.

Переход при оценке точности ЦМР, создаваемых по космическим стереоснимкам, от десятков контрольных точек, распределённых на дальностях в несколько километров, до сотен тысяч контрольных

точек эталонной модели, выдаваемых с дискретностью менее метра, позволил усовершенствовать программно-методическое обеспечение создания ЦМР и совершить качественный скачок, повысив точность конечного информационного продукта почти в 1,5 раза (с 2,7 до 1,9 м).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ «ОФИ_М» №13-01-12014.

Библиографический список

1. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Пермяков Р.В. Точность цифровых фотограмметрических моделей рельефа // Геодезия и картография. 2015. № 2. С. 39-47.
2. Войтенко А.В., Виноградов А.В., Жигулин А.Ю. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах // Геопрофи. 2010. № 2. С. 27-30.
3. Bisnath S. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future // GPS World. 2009. V. 20, Iss. 4. P. 43-50.
4. Оньков И.В. Оценка точности ЦМР, созданных по стереопарам триплета

КА ТН-1 в программном комплексе ENVI // Геоматика. 2014. № 3. С. 22-28.

5. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы раз-

вития технологий обработки сигналов / под ред. Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе. М.: Техносфера, 2012. 528 с.

Информация об авторах

Аншаков Геннадий Петрович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заместитель генерального конструктора, АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара. E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли.

Мятов Геннадий Николаевич, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора – заместитель начальника отделения, АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара. E-mail: csdb@samspace.ru. Область

научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли.

Малиновский Владимир Андреевич, заместитель начальника отдела, АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара. E-mail: vladmalinovski@gmail.com. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли, методы измерения координат объектов, радиолокационные системы с синтезированной апертурой.

METHOD OF CREATING DIGITAL TERRAIN MODELS AND ITS PRACTICAL APPLICATION AS EXEMPLIFIED BY SAMARA REGION

©2015 G. P. Anshakov, G. N. Myatov, V. A. Malinovskii

JSC «Rocket Space Center «Progress», Samara, Russian Federation

The article shows that high accuracy is one of the most important elements in the technology of creating such information products as a digital elevation model (DEM) of the terrain, so a reference is to be provided to confirm the accuracy. Unlike the methodological approach based on collecting data on the terrain relief using digitized topographic maps, a procedure is proposed to generate a reference DEM. The procedure provides high accuracy in solving the problem of coordinate referencing of control points due to differential processing of the navigation information obtained with the help of dual-frequency receivers of the geodetic class. In the course of work a technique for obtaining precise contour intervals of the terrain based on a rigidly bound algorithm for combining inertial and satellite measurements providing high-precision solutions even in the temporary absence of satellite signals was developed and experimentally validated. As a result of field and office works conducted in 2013-2015, a reference DEM with a size of about $50 \times 50 \text{ km}^2$ was established that made it possible to evaluate the results obtained by DEM space stereo photography and make appropriate corrections in the program and methodical apparatus of Earth remote sensing data processing.

Remote sensing; digital elevation model; stereo photography; DEM accuracy.

References

1. Novakovskii B.A., Prasolova A.I., Permiakov R.V. The accuracy of photogrammetric digital elevation models. *Geodesy and Cartography*. 2015. No.2. P. 39-47. (In Russ.)
2. Vinogradov A.V., Voitenko A.V., Zhigylin A.U. Accuracy Evaluation of the Precise Point Position Technique for Processing Satellite Data Positioning and its Ap-

plication for Inventory Works. *Geoprofi.* 2010. No. 2. P. 27-30. (In Russ.)

3. Bisnath S. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future. *GPS World.* 2009. V. 20, Iss. 4. P. 43-50.

4. On'kov I.V. Accuracy assessment of DEM based on stereo pairs of a triplet KA TH-1 in ENVI software. *Geomatics.* 2014.

No. 3. P. 22-28. (In Russ.)

5. *Metody sputnikovogo i nazemnogo pozitsionirovaniya. Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki signalov* [Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques. A Signal Processing Perspective / ed. by D. Dardari, E. Falletti, M. Luise]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2012. 528 p.

About the authors

Anshakov Gennadiy Petrovich, Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Deputy General Designer, JSC «RSC «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: csdb@samspace.ru. Area of Research: Earth remote sensing, methods of processing remote sensing information.

Myatov Gennadiy Nikolaevich, Candidate of Science (Engineering), Deputy Chief Designer – Deputy Head of Department, JSC «RSC «Progress», Samara, Rus-

sian Federation. E-mail: csdb@samspace.ru. Area of Research: Earth remote sensing, methods of processing remote sensing information.

Malinovskii Vladimir Andreevich, Assistant Chief of Department, JSC «RSC «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: vladmalinovski@gmail.com. Area of Research: Earth remote sensing, methods of processing remote sensing information, measurement of position data, synthetic aperture radars.