

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ И СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ GLO-30 И AW3D30

Ушенкин В.А., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., [foton@rsreu.ru](mailto:foton@rsreu.ru)  
Ларюков С.А., м.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, [foton@rsreu.ru](mailto:foton@rsreu.ru)

### INTERFEROMETRIC DSM GLO-30 AND STEREOPHOTOGRAMMETRIC DSM AW3D30 FUSION

*Ushenkin V.A., Laryukov S.A.*

*The work analyzes interferometric and stereophotogrammetric digital surface models GLO-30 and AW3D30. It is noted that GLO-30 has on average higher vertical accuracy, but in urban areas the heights of artificial objects are significantly underestimated. The algorithm of these digital surface models' fusion is proposed. It allows increasing the accuracy of the interferometric digital surface model in urban areas using stereophotogrammetric data. OpenStreetMap digital maps are used to identify urban areas. The results of the proposed algorithm are presented.*

**Key words:** digital surface model, digital terrain model, interferometry, stereophotogrammetry, digital maps.

**Ключевые слова:** цифровая модель местности, цифровая модель рельефа, интерферометрия, стереофотограмметрия, электронные карты.

#### Введение

Высокоточное знание высот земной поверхности (рельефа) и расположенных на ней объектов необходимо во многих областях человеческой деятельности, в том числе в навигации и при обработке аэрокосмических изображений.

В настоящее время в открытом доступе стали доступны две высокоточные глобальные цифровые модели местности (ЦММ), описывающие высоты земной поверхности или расположенных на ней объектов с шагом в одну угловую секунду широты или долготы: AW3D30 и GLO-30.

ЦММ AW3D30 сформирована стереофотограмметрическим методом [1] по данным датчика PRISM японского космического аппарата ALOS (другое название аппарата – Daichi). Среднеквадратичная ошибка абсолютных высот на AW3D30 заявлена равной 5 м [2].

ЦММ GLO-30 сформирована интерферометрическим методом [3–6] по данным немецких космических аппаратов TerraSAR-X и TanDEM-X. Ошибка LE90 абсолютных высот на GLO-30 заявлена равной 4 м [7]. Если считать закон распределения ошибок нормальным, то это соответствует среднеквадратичной ошибке порядка 2,5 м, т.е. примерно в 2 раза меньшей, чем у AW3D30.

Однако особенности радиолокационной интерферометрии (боковой обзор, более высокая проникающая способность радиоволн по сравнению с видимым излучением, проблема развертывания фазы на радиолокационных интерферограммах) привели к тому, что, несмотря на высокую среднюю вертикальную точность, в городских районах высоты большинства искусственных объектов на GLO-30 существенно занижены. Так же, как и более старая глобальная интерферометрическая ЦММ SRTM,

*Анализируются интерферометрическая и стереофотограмметрическая цифровые модели местности GLO-30 и AW3D30. Отмечается, что GLO-30 имеет в среднем более высокую вертикальную точность, однако в городских районах высоты искусственных объектов на ней существенно занижены. Предлагается алгоритм комплексирования цифровых моделей местности, позволяющий повысить точность интерферометрической модели местности в городских районах за счет стереофотограмметрических данных. Для выявления городских районов привлекаются электронные карты OpenStreetMap. Приводятся результаты предложенного алгоритма.*

GLO-30 за счет описанных выше особенностей приближается к цифровой модели рельефа (ЦМР), которая в идеале должна описывать лишь высоты земной поверхности (рельефа), с которой удалены все расположенные на ней объекты.

ЦМР предпочтительны при ортотрансформировании оптических изображений в случаях, когда пространственное разрешение изображения существенно выше, чем у модели высот. При этом здания на полученных ортопланах остаются наклоненными, но координаты углов основания зданий измеряются правильно, а крыша имеет не искаженную форму. По смещению крыши относительно основания можно дополнительно оценить высоту здания. Если же вместо ЦМР будет использоваться ЦММ, то из-за недостаточной детальности границы высотных зданий на ней будут смещены относительно истинного положения, из-за чего на полученных ортопланах крыши зданий могут быть сильно деформированы: отдельные фрагменты крыши будут перенесены к основанию, а оставшиеся фрагменты останутся смещенными относительно основания.

В то же время в других областях, например в навигации, предпочтительны ЦММ. Также их следует применять и при ортотрансформировании аэрокосмических изображений среднего разрешения, когда детальность ЦММ оказывается сопоставима с детальностью изображения.

Поскольку имеющаяся в настоящее время глобальная ЦММ AW3D30 менее точна, чем приближенная к ЦМР GLO-30, актуальна задача их комплексирования [8] с получением ЦММ, на которой высоты рельефа взяты с более точной GLO-30, а высоты наземных объектов – с AW3D30.

### **Получение опорной информации о расположении объектов на земной поверхности**

Отличить высотные объекты, расположенные на земной поверхности, от перепадов высот рельефа – крайне сложная задача. В то же время с развитием картографических сервисов в настоящее время доступна априорная информация о расположении таких объектов. Открытым глобальным картографическим источником данных являются электронные карты OpenStreetMap [9]. В качестве высотных объектов, расположенных на земной поверхности, могут быть приняты следующие объекты электронных карт:

- 1) здания;
- 2) искусственные сооружения:
  - а) резервуары для хранения;
  - б) накопительные баки;
  - в) мосты;
  - г) эстакады;
  - д) развязки дорог;
  - е) башни;
  - ж) вышки;
  - з) мачты;
  - и) столбы;
  - к) дымовые трубы;
  - л) маяки;
  - м) буровые платформы;
  - н) насыпи и т.п.

Каждый из перечисленных объектов описывается в векторном виде как многоугольник, линия или точка. Для использования картографических данных при комплексировании ЦММ необходимо преобразовать их к растровому виду – бинарной маске в растровой сетке широт и долгот, нулевое значение которой соответствует отсутствию наземных объектов в пределах пикселя маски, а единичное значение – наличию хотя бы одного такого объекта.

Сформированная бинарная маска требует дополнительного уточнения. Во-первых, границы объектов на векторных картах и AW3D30 могут совпадать неточно. Во-вторых, на электронные карты могут быть нанесены не все объекты. В-третьих, из-за недостаточно высокой детальности AW3D30 близко расположенные высотные объекты могут слиться на ней в один объект.

Предлагается следующий алгоритм уточнения бинарной маски наземных высотных объектов.

В окрестности каждого нулевого пикселя маски выполняется классификация пикселей на пиксели рельефа и пиксели наземных объектов. К рельефу относятся пиксели с нулевым значением маски, все смежные пиксели которых также нулевые. Остальные пиксели признаются пикселями наземных объектов.

Если во вторую группу попал хотя бы один пиксель окрестности, анализируется количество пикселей в первой группе. Если оно меньше заданного порога, нулевой

пиксель маски заменяется единичным. В противном случае в пределах каждой группы пикселей рассчитываются:

- 1) модуль разности средней высоты на AW3D30 в пределах группы пикселей и высоты на GLO-30, соответствующей анализируемому нулевому пикселю маски;
- 2) модуль средней разности высот на AW3D30 и GLO-30 в пределах группы пикселей.

Также оценивается модуль разности высот на AW3D30 и GLO-30, соответствующих анализируемому нулевому пикселю маски.

Нулевой пиксель маски заменяется единичным, если:

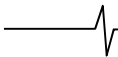
- 1) модуль разности средней высоты на AW3D30 в пределах пикселей рельефа и высоты на GLO-30, соответствующей анализируемому нулевому пикселю маски, превышает выбранный порог;
- 2) модуль разности средней высоты на AW3D30 в пределах пикселей наземных объектов и высоты на GLO-30, соответствующей анализируемому нулевому пикселю маски, меньше модуля разности средней высоты на AW3D30 в пределах пикселей рельефа и высоты на GLO-30, соответствующей анализируемому нулевому пикселю маски;
- 3) модуль разности высот на AW3D30 и GLO-30, соответствующих анализируемому нулевому пикселю маски, превышает модуль средней разности высот на AW3D30 и GLO-30 в пределах пикселей рельефа сильнее, чем на выбранный порог;
- 4) модуль средней разности высот на AW3D30 и GLO-30 в пределах пикселей наземных объектов превышает модуль средней разности высот на AW3D30 и GLO-30 в пределах пикселей рельефа сильнее, чем на выбранный порог.

Указанный процесс коррекции маски выполняется в несколько итераций. Число итераций, размеры окрестности и значения порогов подбираются эмпирическим путем так, чтобы единичные пиксели скорректированной маски покрыли большую часть высотных объектов, представленных в городских районах на AW3D30.

### **Геометрическое совмещение ЦММ AW3D30 и GLO-30**

Комплексируемые ЦММ AW3D30 и GLO-30 представлены на различных растровых сетках. В пределах от 50° ю.ш. до 50° с.ш. шаги пикселей на AW3D30 и GLO-30 одинаковы, но данные GLO-30 смещены на половину пикселя по диагонали относительно AW3D30. В полярных и полярных широтах данные GLO-30 дополнительно прорежены по долготу по сравнению с AW3D30. Таким образом, перед выполнением комплексирования требуется геометрическое совмещение ЦММ AW3D30 и GLO-30.

При совмещении необходимо определить, какая из ЦММ останется в исходной сетке, а какая будет трансформироваться. Поскольку трансформация требует интерполяции высот, этот выбор обусловлен минимизацией искажений, возникающих при интерполяции. От ЦММ GLO-30 при комплексировании берутся данные по рельефу, который в преобладающем большинстве случаев обладает гладким характером. От ЦММ AW3D30 при комплексировании берутся данные по высотным наземным объектам, для которых характерны резкие границы,



в пределах которых из-за нарушения теоремы Котельникова при интерполяции будут наблюдаться артефакты. Следовательно, ЦММ AW3D30 остается в исходной растровой сетке, а ЦММ GLO-30 трансформируется путем уменьшения шага дискретизации в приполярных и полярных областях, а также плоскопараллельного сдвига на половину пикселя по диагонали.

В качестве интерполятора выбран двумерный фильтр Ланцоша размерами 4x4 пикселя:

$$h(y, x) = \frac{\sum_{m=\lfloor y \rfloor - 1}^{\lfloor y \rfloor + 2} \sum_{n=\lfloor x \rfloor - 1}^{\lfloor x \rfloor + 2} h_{mn} \operatorname{sinc}(y - m) \operatorname{sinc} \frac{y - m}{2} \operatorname{sinc}(x - n) \operatorname{sinc} \frac{x - n}{2}}{\sum_{m=\lfloor y \rfloor - 1}^{\lfloor y \rfloor + 2} \sum_{n=\lfloor x \rfloor - 1}^{\lfloor x \rfloor + 2} \operatorname{sinc}(y - m) \operatorname{sinc} \frac{y - m}{2} \operatorname{sinc}(x - n) \operatorname{sinc} \frac{x - n}{2}},$$

где  $(h_{mn})$  – матрица высот,  $h(y, x)$  – интерполированное значение высоты,  $\lfloor x \rfloor$  – функция «пол».

Выбор обусловлен компромиссом между точностью восстановления высоты на гладких участках рельефа и амплитудой выбросов в редких случаях, когда для высот рельефа нарушается теорема Котельникова.

#### Комплексирование ЦММ AW3D30 и GLO-30

При комплексировании ЦММ AW3D30 и GLO-30 участки на GLO-30, соответствующие единичным пикселям  $\omega_{mn}$  сформированной бинарной маски наземных высотных объектов, заполняются данными AW3D30 с обеспечением бесшовной стыковки на границах участков [10].

Стыковка обеспечивается с использованием корректирующей высотной поверхности  $h_{корр}$ , применяемой к значениям высоты на AW3D30. Корректирующая поверхность позволяет компенсировать систематические ошибки высоты, вызванные меньшей точностью AW3D30 по сравнению с GLO-30.

Для нулевых пикселей сформированной бинарной

маски наземных высотных объектов корректирующая поверхность определяется как  $h_{корр mn} = h_{GLO mn} - h_{AW3D mn}$ ,

где  $(h_{GLO mn})$  и  $(h_{AW3D mn})$  – матричное представление ЦММ GLO-30 и AW3D30, приведенных к единой растровой сетке.

В единичных пикселях сформированной бинарной маски наземных высотных объектов значения корректирующей поверхности определяются с помощью интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний:

$$h_{корр mn} = \frac{\sum_k \sum_l h_{корр m+k, n+l} (1 - \omega_{m+k, n+l}) (\sqrt{k^2 + l^2})^{-p}}{\sum_k \sum_l (1 - \omega_{m+k, n+l}) (\sqrt{k^2 + l^2})^{-p} + \varepsilon},$$

где  $0 < \sqrt{k^2 + l^2} \leq D$ ;  $k, l$  – целые;  $D$  и  $p$  – радиус и показатель фильтра обратных расстояний,  $\varepsilon$  – малая величина, используемая для регуляризации.

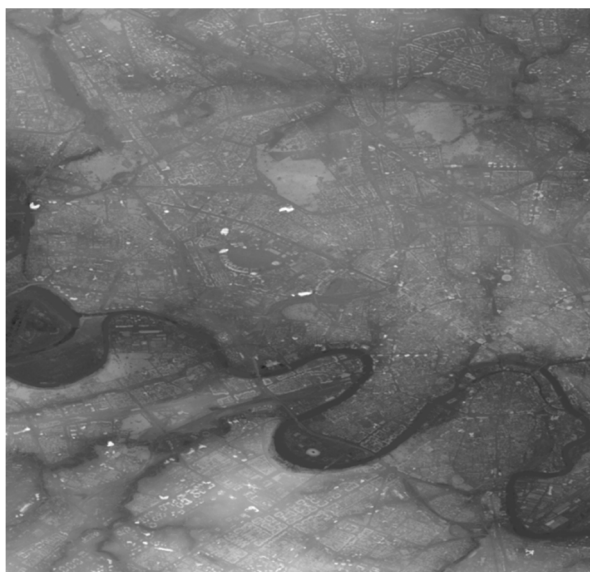
После получения значений  $h_{корр mn}$  во всех пикселях участки на GLO-30, соответствующие единичным значениям  $\omega_{mn}$ , заполняются значениями  $h_{GLO mn} + h_{корр mn}$ .

#### Экспериментальные исследования

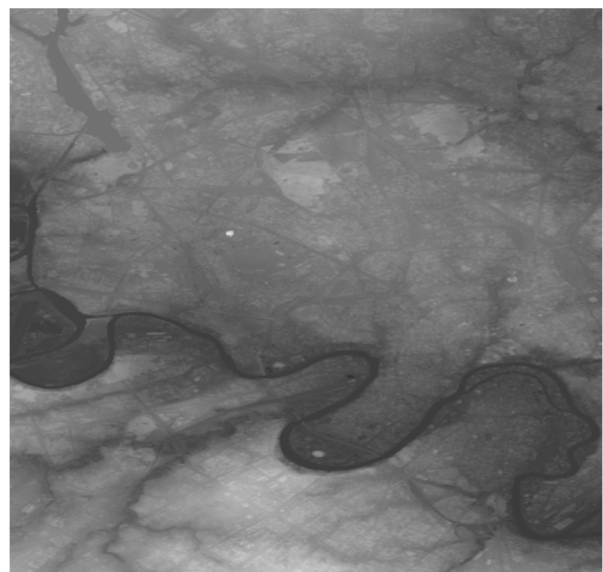
Комплексирование ЦММ AW3D30 и GLO-30 выполнено на всей сетке широт и долгот земного эллипсоида. Примеры исходных данных и результата комплексирования для территории г. Москва приведены на рис. 1. Визуальный анализ результатов показывает, что все наземные высотные объекты успешно перенесены с AW3D30 и GLO-30, при этом за пределами городов на GLO-30 сохранены более точные данные о высоте рельефа.

#### Заключение

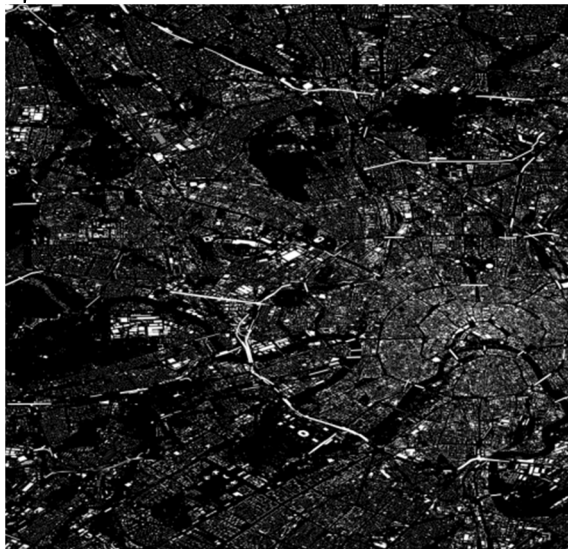
Предложенный алгоритм комплексирования ЦММ AW3D30 и GLO-30 с привлечением электронных карт OpenStreetMap позволяет получить ЦММ, более точную для городских районов, чем GLO-30, и более точную за пределами городов, чем AW3D30.



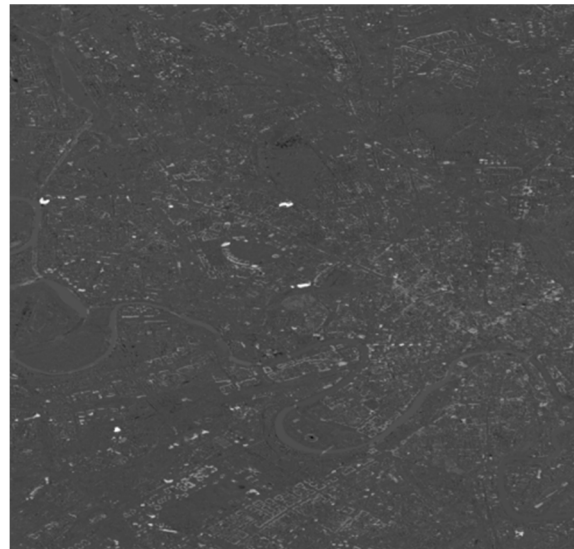
а) исходная ЦММ AW3D30



б) ЦММ GLO-30, совмещенная с AW3D30



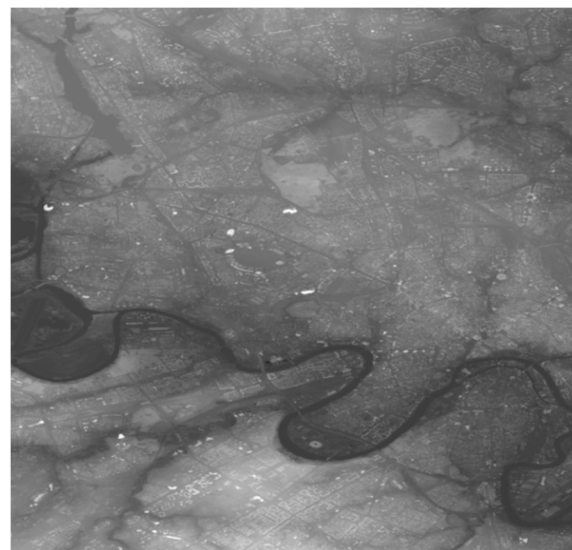
в) бинарная маска, сформированная по данным OpenStreetMap



а) разность совмещенных AW3D30 и GLO-30



д) разность результата комплексирования и GLO-30



е) результат комплексирования

Рис. 1 Комплексирование ЦММ AW3D30 и GLO-30 для территории г. Москва

### Литература

1. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошеонов В.И. Программно-математическое обеспечение системы обработки космических стереоизображений. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 27. С. 17-22. EDN: JWTZBX.
2. Apeh O., Uzodinma V., Ebinne E., Moka E., Onah E. Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa. Journal of Geographic Information System. 2019, vol. 11, pp. 111-123.
3. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 72-79. EDN: TTWDS.
4. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 21-31. EDN: VNYZCT.
5. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 208-219. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-208-219. EDN: WILXZF.
6. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 54-64. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-60-2-54-64. EDN: YSRVDV.
7. Copernicus DEM – Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). URL: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model> (дата обращения 21.03.2024).
8. Москвитин А.Э. Комплексирование видеoinформации от различных систем космического наблюдения земли. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 108-116. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-108-116. EDN: GGAVXC.
9. Экспорт OpenStreetMap – URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Экспорт> (дата обращения 21.03.2024).
10. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексирование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности. Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 13-17. EDN: YPBVIH.