

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**В.С. Баранова, А.А. Спиридонов, В.Л. Козлов, Д.В. Ушаков,
В.А. Саечников**

*БГУ, Минск, Республика Беларусь
E-mail: vbaranova@bsu.by*

Представлен метод оценки высоты орбиты космического объекта с использованием динамических данных пассивной оптической системы наблюдения и геометрического соотношения между наклонной дальностью и скоростью смещение космического объекта в плоскости кадра.

Ключевые слова: космический объект; оптические измерения; высота орбиты.

Для оптических угловых измерений к классическим подходам решения задачи начального определения орбиты относятся различные аналитические и численные модели итерационного поиска параметра дальности. Наибольшее практическое значение из которых, нашли метод Лапласа, Гаусса, двойной итерации и метод Гудинга, а также их различные модификации [1]. Причем, каждый из этих методов ограничен условиями применимости. Основные ограничения накладываются на угловую и временную разницу между измерениями, а также на области распространения наиболее точного решения: межпланетные или околоземные космические объекты. В настоящее время развивается тенденция поиска универсальных методов начальной оценки орбиты, условия применения которых не будут ограничены ни количеством данных пассивных оптических измерений, ни значениями этих данных. Одним из таких направлений являются различные геометрические приближения.

Известно, что измерения пассивной оптической системой проводятся в топоцентрической экваториальной системе координат связанной с плоскостью местного горизонта. Геометрическое представление орбитального движения космического объекта относительно наземной станции наблюдения изображено на рис. 1. К основным величинам пространственного соотношения между дискретными точками плоскости орбиты космического объекта и плоскостью кадра точки наблюдения на интервале прямой видимости относятся: вектор наклонной дальности $\vec{\rho}$, высота орбиты H , угол между наклонной дальностью и направлением на подспутниковую точку θ , угол видимости φ , орбитальная скорость космического объекта нормальная к радиусу орбиты \vec{v} , проекция орбитальной скорости на плоскость кадра \vec{v}_p , угол места или элевация el , а также радиус Земли R_e .

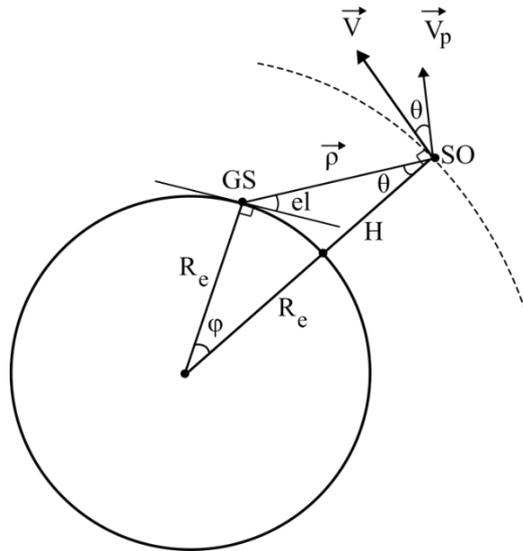


Рис. 1. Геометрия измерений пассивной оптической системой

Конечное нелинейное уравнение для расчета высоты орбиты космического объекта из соотношения наклонной дальности и скорости смещение космического объекта в плоскости кадра представляется как:

$$\frac{(R_e + H)^{3/2}}{\Delta t \sqrt{\mu}} \left[1 - \frac{R_e \sin(el)}{\left((R_e + H)^2 + (R_e \cos(el))^2 \right)^{1/2}} \right] = \frac{f}{\omega \Delta x},$$

где Δt время, за которое космический объект смещается в плоскости кадра на Δx пикселей, ω размер пикселя, f глубина фокуса, μ - гравитационный параметр.

Важно отметить, что именно точность определения глубины фокуса f будет существенно влиять на точность конечных расчетов высоты орбиты космического объекта. Глубина резкости будет изменяться в зависимости от величины наклонной дальности, а именно от того, отдаляется или приближается объект относительно точки наблюдения. Учитывая, что размер пикселя ω - величина постоянная, в дальнейшем глубина фокуса будет характеризоваться общим оптическим коэффициентом вида f / ω .

Для численного расчета высоты орбиты проводились серии измерений пассивной оптической системой наблюдения за низкоорбитальными космическими объектами Белорусского государственного университета [2]. Особенностью системы является использование видео данных и метода согласованной фильтрации для автоматического обнаружения космических объектов [3]. Исходные данные измерения для численного расчета высоты орбиты, согласно конечному нелинейному уравнению, представляют собой значения смещения спутника в плоскости кадра Δx за $\Delta t = 1$ с,

топоцентрические экваториальные координаты прямого восхождения α_i и склонения δ_i для выбранных точек, время измерения выбранных точек в UTC, оптический коэффициент f / ω для каждой точки измерения, а также геодезические координаты наземной станции наблюдения φ, λ . На рис. 2, *а б* представлена графическая зависимость оптического коэффициента f / ω от угла места el для данных угловых измерений спутников ADEOS-2 и AQUA соответственно.

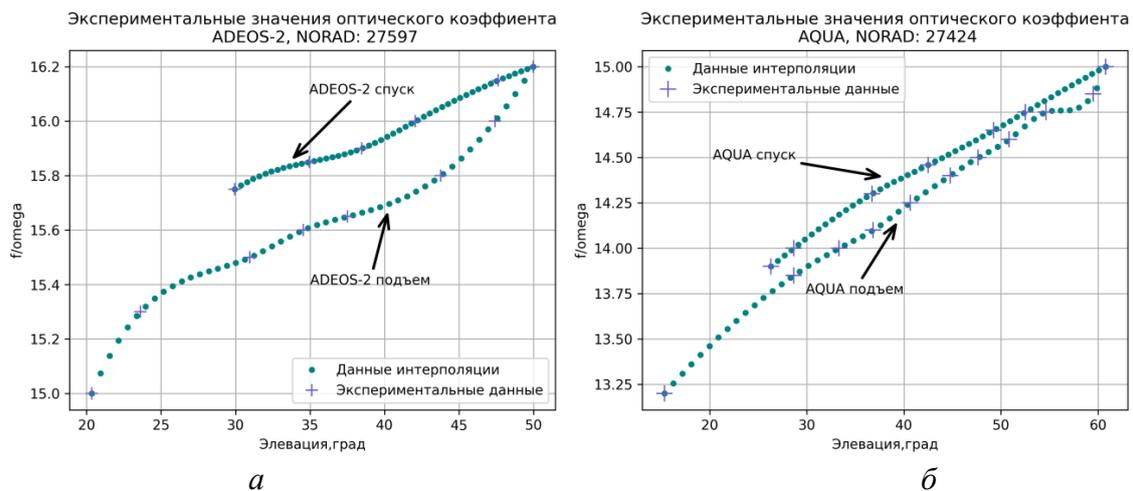


Рис. 2. Зависимость оптического коэффициента f / ω от угла места el

Как видно из графиков (рис. 2, *а б*) значение f / ω определяется величиной наклонной дальности ρ . При минимальном расстоянии между космическим объектом и наземной станцией наблюдения (при максимальном значении el) f / ω достигает своего максимального значения 16,2 для спутника ADEOS-2 и 15,0 для спутника AQUA. Разные значения скорости изменения и сдвига f / ω для ADEOS-2 и AQUA обусловлены разницей в высоте орбиты, которая для ADEOS-2 в среднем составляет $h=805$ км, а для AQUA- $h=704$ км.

Результаты расчета высоты орбиты спутников ADEOS-2 и AQUA согласно данным измерения оптической системы наблюдения и численному решению нелинейного уравнения представлены на рис. 3, *а б*. Анализ результатов показывает, что предложенный метод позволил определить высоту спутников ADEOS-2 и AQUA в пределах их апогейной(кривая с кружками рис. 3, *а б*) и перигейной высоты(кривая с треугольниками рис. 3, *а б*). В частности, ошибка в величине высоты для обоих спутников не превышает 4 км.

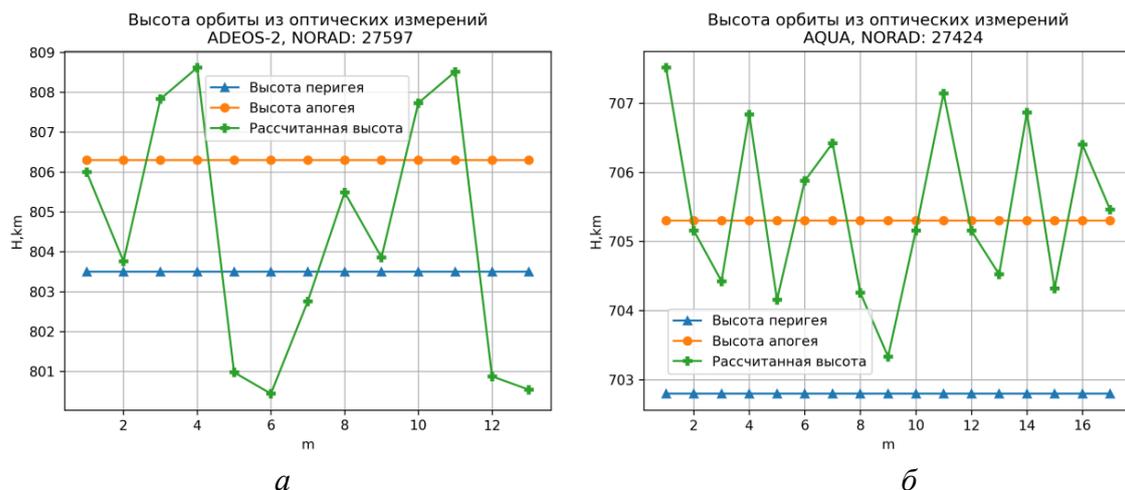


Рис. 3. Результаты расчета высоты орбиты

Как упоминалось ранее, точность определения оптического коэффициента f / ω критически влияет на точность расчета высоты. При точной настройке и автоматической записи глубины фокуса \div до 3-го знака после запятой для каждой точки угловых измерений, возможно уменьшить ошибку до 1 км, что является предметом предстоящих исследований.

В работе представлены результаты расчета высоты орбиты спутников ADEOS-2 и AQUA согласно данным измерения оптической системы наблюдения и численному решению нелинейного уравнения, полученного из геометрического соотношения между наклонной дальностью и скоростью смещение космического объекта в плоскости кадра. Анализ полученных результатов показывает, что предложенный метод позволил определить высоту спутников в пределах их апогейной и перигейной высоты с ошибкой, не превышающей 4 км.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Vallado D. A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications // Microcosm Press, 2013.
2. Baranova V., Spiridonov A., Liashkevich S., Saetchnikov V. Video Data Processing System for Ground-Based Space Optical Surveillance Application // 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), 2023.
3. Baranova V. S., Spiridonov A. A, Cherny V. A., Ushakov D. V., V. A. Saetchnikov. Resident space object detection method based on the connection between Fourier spectrum of the video data difference frame and the linear velocity projection // arXiv, 2024.