

## **Определение координат точек зеркального отражения в многопозиционной радиолокационной системе дистанционного зондирования Земли**

© Д. А. Гаврилов

ВКА им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) могут использоваться не только для координатно-временных определений, но так же в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Рассмотрим случай зеркального отражения (ЗО) от земной поверхности радионавигационного сигнала, который характеризуется равенством углов падения и отражения. При этом начальной задачей при разработке алгоритмов совместной обработки прямого и отраженного сигналов, осуществляемой программными методами, является определение координат точек ЗО. Предлагаемый подход к построению системы ДЗЗ, использующий ГНСС и совместную обработку сигналов прямого распространения и зеркально отраженного от земной поверхности, позволяет получить информацию о подстилающих свойствах поверхности.

**Ключевые слова:** многопозиционная радиолокационная система, дистанционное зондирование Земли, глобальные навигационные спутниковые системы, программная обработка сигналов, зеркальное отражение.

В настоящее время сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) могут использоваться не только для координатно-временных определений, но так же в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1–5].

Рассмотрим многопозиционную радиолокационную систему (МП РЛС), в которой источником зондирующих сигналов являются навигационные космические аппараты (НКА) ГНСС, а приемник расположен на малом космическом аппарате (МКА).

На МКА расположены приемник радионавигационного сигнала ГНСС прямого распространения, антенна которого осуществляет прием сигналов в

верхней полусфере, и приемник сигнала, отраженного от земной поверхности, антенна которого осуществляет прием сигналов в нижней полусфере.

Рассмотрим случай зеркального отражения (ЗО), который характеризуется равенством углов падения и отражения. При этом условии «верхняя» антенна МП РЛС обеспечивает прием сигналов с правой круговой поляризацией, а «нижняя» антенна — прием сигналов с левой круговой поляризацией, так как при ЗО происходит изменение поляризации сигнала на противоположную.

При обработке сигналов целесообразно применить технологию программной обработки [2–3], которая обеспечивает широкие возможности по использованию новых, перспективных алгоритмов обработки как существующих сигналов ГНСС, так и планируемых к использованию.

При предлагаемом подходе к построению системы ДЗЗ, использующей ГНСС и совместную обработку сигналов прямого распространения и зеркально отраженного от земной поверхности, возможно получение информации о подстилающих свойствах поверхности [4–5]. При этом начальной задачей при разработке алгоритмов совместной обработки сигналов является формирование исходных данных об области ЗО, а именно — значение координат точки ЗО.

Формирование области ЗО происходит при условии, что среднестатистические размеры шероховатостей не превышают значения  $\lambda/16$  [6], при этом угол падения электромагнитной волны равен углу отражения, а потери энергии при отражении минимальны. В частотных диапазонах ГНСС при длине волны  $\lambda = 0.18 \dots 0.25$  м зеркальное отражение будет наблюдаться при отражении от невзволнованной водной поверхности, поверхности Земли, покрытой снегом, либо льдом, а также объектов промышленной инфраструктуры, например, дорожного покрытия. При увеличении размеров шероховатостей ЗО будет смещаться в область диффузного отражения, что характеризуется потерями в энергии сигнала при отражении, но при определенных допущениях направленный эффект, вызванный равенством углов падения и отражения, останется.

Таким образом, оценивая уровень отраженного от поверхности Земли сигнала, возможно определить свойства подстилающей поверхности, характеризующие шероховатостями и эффективной площадью рассеяния.

Схема формирования области ЗО в рассматриваемой МП РЛС ДЗЗ, использующей сигналы ГНСС, представлена на рис. 1.

При этом необходимо отметить, что, так как и МКА, и группировка НКА постоянно движутся, то и область ЗО будет постоянно смещаться, описывая определенную траекторию на поверхности Земли. Таким образом, зная координаты МКА и НКА, необходимо вычислять координаты точек ЗО.

Далее рассмотрим алгоритм определения точек ЗО для одной пары МКА–НКА. Исходными данными для расчета являются координаты МКА  $x_1, y_1, z_1$  и координаты НКА  $x_2, y_2, z_2$  в геоцентрической системе координат.

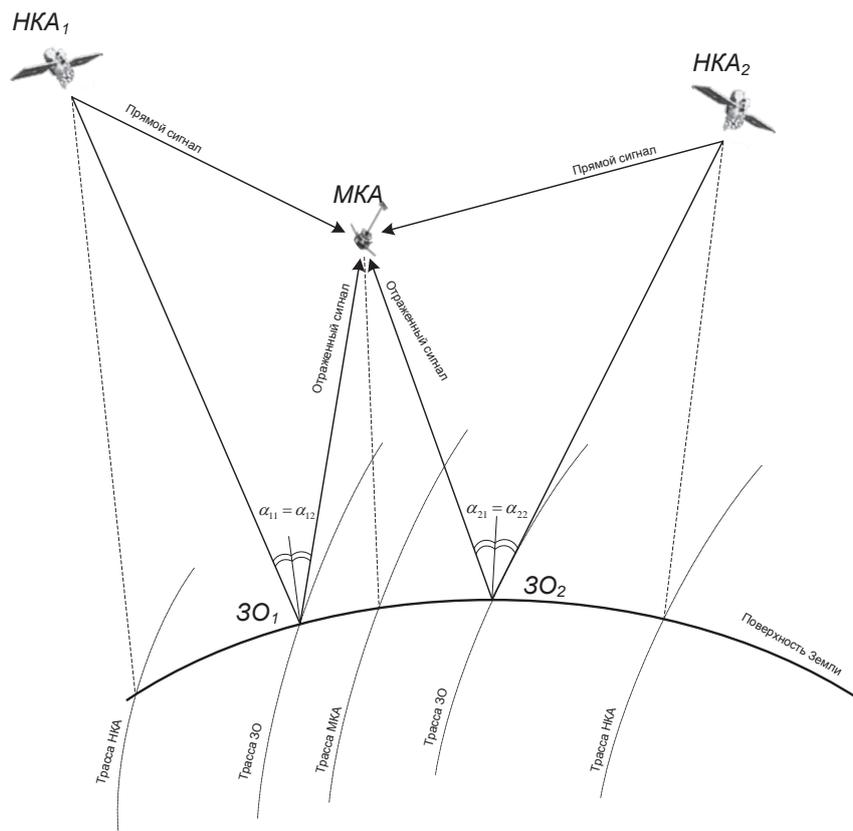


Рис. 1. Схема формирования области ЗО

Требуется определить координаты точки ЗО  $x_0, y_0, z_0$ , при условии, что данная точка лежит на поверхности Земли, а угол падения равен углу отражения  $\alpha_1 = \alpha_2$ .

Условие равенства углов можно заменить условием, что сумма расстояний от НКА до поверхности Земли и от поверхности Земли до МКА является минимальной.

Таким образом, для определения координат точки ЗО необходимо найти минимальное значение функции

$$f(x_0, y_0, z_0) = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} + \dots \\ \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \rightarrow \min$$

при условии

$$\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{a^2} + \frac{z_0^2}{b^2} - 1 = 0,$$

где  $a, b$  — большая и малая полуоси Земного эллипсоида.

Необходимо отметить, что для упрощения вычислений будем считать, что точка ЗО лежит на поверхности Земного эллипсоида. Однако в реальности данную точку следует искать на поверхности геоида. В этом случае последнее выражение будет иметь следующий вид:

$$x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - R_3^2 = 0,$$

где  $R_3$  — радиус Земли в точке ЗО, который возможно вычислить, используя модель Земного геоида.

Задача отыскания экстремума функции при условии, что ее аргументы удовлетворяют некоторым дополнительным ограничениям, является задачей на условный экстремум, которую можно решить методом множителей Лагранжа.

Соответствующая функция Лагранжа будет иметь вид

$$\begin{aligned} L(x_0, y_0, z_0, \lambda) = & \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \dots \\ & + \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \dots \\ & + \lambda \left( \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{a^2} + \frac{z_0^2}{b^2} - 1 \right) = 0, \end{aligned}$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

Таким образом, для нахождения экстремума функции получим систему из 4-х уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_0} = \frac{x_0 - x_1}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} + \frac{x_0 - x_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} + \frac{2\lambda x_0}{a^2} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial y_0} = \frac{y_0 - y_1}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} + \frac{y_0 - y_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} + \frac{2\lambda y_0}{a^2} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial z_0} = \frac{z_0 - z_1}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}} + \frac{z_0 - z_2}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2}} + \frac{2\lambda z_0}{b^2} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{a^2} + \frac{z_0^2}{b^2} - 1 = 0. \end{cases}$$

Полученную систему из 4-х нелинейных уравнений с 4-мя неизвестными  $x_0, y_0, z_0, \lambda$  возможно решить методом наименьших квадратов (итерационным методом Гаусса–Ньютона).

Конечным этапом алгоритма является проверка равенства углов падения и отражения.

Необходимо отметить, что в результате нахождения экстремума получается либо минимум, либо максимум функции  $f(x_0, y_0, z_0)$ , и требуется дополнительная проверка полученного решения.

Для проверки работоспособности алгоритма определения координат точек ЗО было проведено моделирование в среде программирования Matlab.

В качестве МКА выбран «Можаяц-4», а в качестве НКА выбрана ГНСС ГЛОНАСС. Исходными данными для моделирования орбитальной группировки являются файлы в формате TLE, при моделировании движения КА использовалась модель SPG-4. Для определения радиуса Земли в точке ЗО использовалась модель геоида EGM-96.

Результаты моделирования на интервале 20 минут с шагом 1 минута для времени начала 10:45 20.02.2017 года представлены на рис. 2, на котором изображены координаты подспутниковых точек МКА, группировки НКА ГНСС ГЛОНАСС и рассчитанные координаты точек ЗО в геодезической системе координат.

Необходимо отметить, что точки ЗО расположены достаточно близко относительно подспутниковых точек МКА. Используя данное обстоятельство, при нахождении экстремума функции в качестве начального приближения необходимо выбирать подспутниковую точку МКА. При этом условии всегда получается точка минимума.

При моделировании введено ограничение по использованию НКА ГНСС ГЛОНАСС: в обработку приняты только те НКА, которые находятся в верхней полусфере относительно антенны приема прямого сигнала. Таким образом,

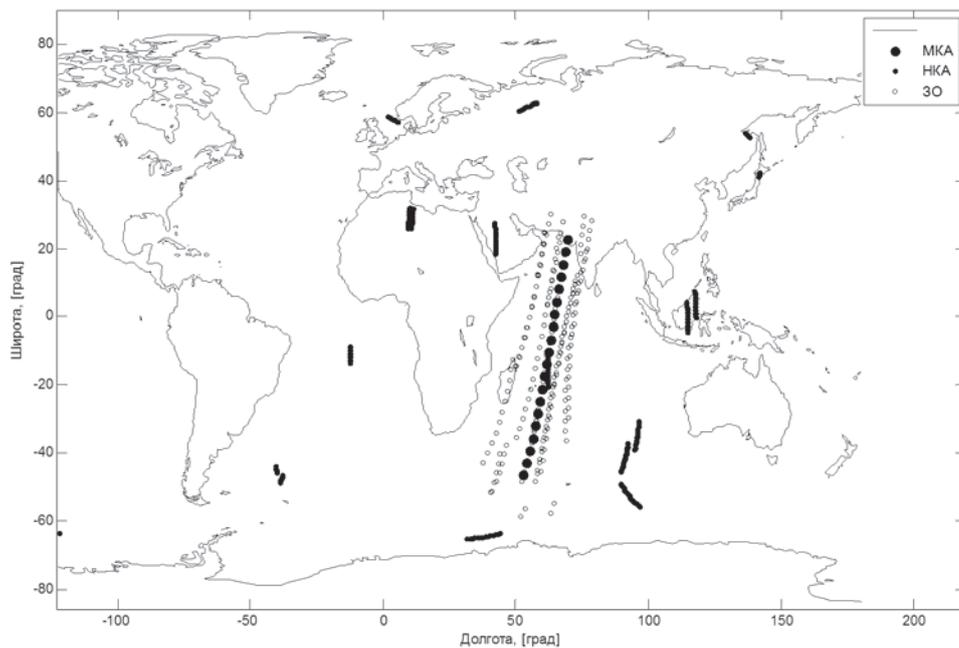


Рис. 2. Результаты моделирования точек зеркального отражения

из 28 НКА ГЛОНАСС получены координаты точек ЗО для 13 НКА. Из рис. 2 видно, что чем больше разнесены подспутниковые точки МКА и НКА, тем дальше расположен трек точки ЗО от трека МКА.

Для дополнительной верификации разработанного алгоритма, полученные результаты решения сравнивались с алгоритмом, реализующим последовательное приближение [7], существенным недостатком которого является большое число итераций (не более 10000 итераций для достижения миллиметровой точности определения координат точки ЗО). В разработанном алгоритме реализуется менее 7 итераций, при этом, миллиметровое приращение к начальным условиям рассчитывается на 5 итерации (рис. 3).

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет получить координаты точки ЗО по известным координатам МКА и НКА при условии нахождения точки ЗО на поверхности Земного эллипсоида (при необходимости — на поверхности геоида).

Используя аналогичный подход при наличии измерений разности дальностей сигналов прямого распространения и отраженного от поверхности Земли также возможно определить координаты точки ЗО. В этом случае возможно определить высоту отражающей поверхности без использования модели геоида.

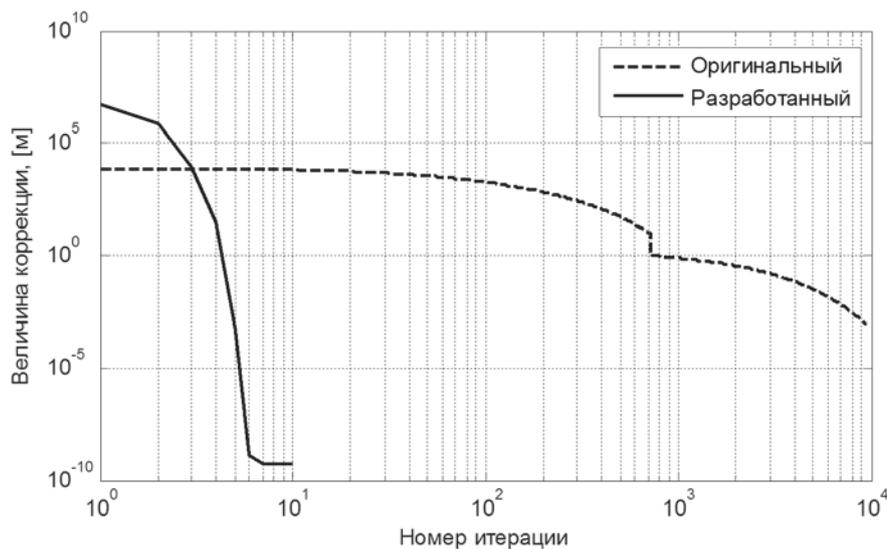


Рис. 3. Скорость сходимости алгоритмов расчета точек ЗО

## Литература

1. Фатеев В. Ф., Сахно И. В. Способ получения радиолокационного изображения земной поверхности при помощи многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны // Патент РФ 2278398, 06.07.2004.

2. Сахно И. В., Ткачев Е. А., Гаврилов Д. А. и др. Результаты экспериментального наблюдения отраженных земной поверхностью сигналов ГЛОНАСС/GPS с использованием технологии программного приема // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2009. — Вып. 20. — С. 367–370.

3. Авдеев В. А., Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А. и др. Комплекс экспериментов по приему отраженных земной поверхностью сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2012. — Вып. 23. С. 306–309.

4. Gleason S. Gebre-Egziabher D. GNSS Applications and Methods. — Artech House, 2009. — 508 p.

5. URL:<http://www.nasa.gov/cygnss> (дата обращения: 05.03.2017).

6. Теоретические основы локации и навигации: учеб. пособие / В. А. Авдеев, В. С. Бахолдин, Д. А. Гаврилов и др. Под ред. И. С. Герасименко и В. Ф. Иванова. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. — Ч. 1: Радиолокационные системы. — 228 с.

7. Gleason S. Towards Sea Ice Remote Sensing with Space Detected GPS Signals: Demonstration of Technical Feasibility and Initial Consistency Check Using Low Resolution Sea Ice Information // Remote Sensing (MDPI Publishing), 2010. — Vol. 2. — P. 2017–2039.

## **Determination of the Coordinates of Specular Points in the Multiposition Radar System for the Earth Remote Sensing**

**D. A. Gavrilov**

Currently, signals of global navigation satellite systems (GNSS) are not only used for coordinate and time determinations, but also for the purpose of the Earth remote sensing (ERS). Let us consider the case of specular reflection (SR) from the terrestrial surface of a radio-navigation signal, which is characterized by the equality of the angles of incidence and reflection. In this case, the initial task in the development of algorithms for joint processing of direct and reflected signals which is realized by software methods is determination of coordinates of SR points. The proposed approach to the construction of a ERS system using GNSS and joint signal processing of direct propagation and the propagation specularly reflected from the Earth's surface, allows us to obtain information about the underlying properties of the surface.

**Keywords:** multiposition radar system, Earth remote sensing, global navigation satellite systems, software-defined processing of signals, specularly reflection.