



Е.Д. Байков, Р.А. Ершов, О.А. Морозов

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЛИНИЙ РАВНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫМ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ ГРУППЫ ИЗ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

(Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Преимущества многопозиционных радиолокационных систем, такие как высокоточное определение пространственного положения объектов, повышенная разрешающая способность и многие другие, связанные с большим количеством единовременно фиксируемой информации об объекте, в значительной степени определили направление развития современной радиолокации. Использование искусственных спутников земли в качестве многопозиционной радиолокационной системы позволяет в полной мере использовать преимущества таких систем.

Одним из наиболее широко применяемых пассивных методов определения местоположения источника радиоизлучения является разностно-дальномерный метод (РДМ). Данный метод основан на одновременной регистрации сигнала от источника радиоизлучения сразу несколькими пунктами системы. Реализация РДМ требует точного знания координат приемных пунктов системы и не предъявляет жестких требований к их временной синхронизации.

Для определения координат источника радиоизлучения (x_M, y_M, z_M) необходимо решить систему нелинейных уравнений. Обычно данная система сводится к задаче глобальной оптимизации вида [2]:

$$(\hat{x}_M, \hat{y}_M, \hat{z}_M) = \arg \min \Phi(x_M, y_M, z_M, \lambda), \quad (1)$$

где $\Phi(\cdot)$ характеризует меру близости функциональной зависимости координат модельных параметров и измеренных λ . Измеряемая разность дальностей:

$$\begin{cases} \Delta R = R_1 - R_2 = c(t_1 - t_2) = c\tau \\ R_1 = \sqrt{(x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2 + (z_1 - z_M)^2} \\ R_2 = \sqrt{(x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2 + (z_2 - z_M)^2} \end{cases}, \quad (2)$$

где t_1, t_2 – время распространения сигнала от источника M к приемникам 1 и 2 соответственно, τ – временная задержка распространения сигнала к приемнику 1 относительно приемника 2. Геометрическое место точек, соответствующих одному значению навигационного параметра $c\tau$, принято называть линией положения. Пересечение двух линий положения указывает на местоположение объекта. Таким образом, для получения оценки местоположения ИРИ на поверхности Земли разностно-дальномерная система должна состоять минимум из трех пунктов приема (ПП), а для оценки местоположения источника в пространстве – минимум из четырех ПП [3].

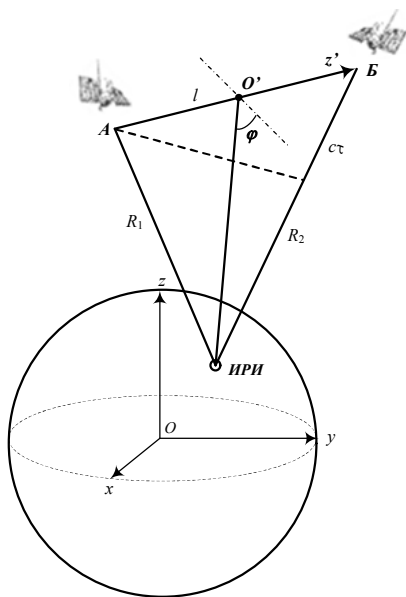


Рис. 1

В случае, когда в зоне видимости имеются два ПП, представляется возможным нахождение линии положения, расположенной на поверхности Земли. При движении ПП будет изменяться линия положения, следовательно, становится возможным определение координат ИРИ. В декартовой инерциальной геоцентрической системе координат (рис. 1) система уравнений для построения линии положения выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} ct = \sqrt{(x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2 + (z_1 - z_M)^2} - \\ - \sqrt{(x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2 + (z_2 - z_M)^2} \\ x_M^2 + y_M^2 + (\alpha z_M)^2 = R^2 \end{cases} \quad (3)$$

где R – экваториальный радиус Земли, α – отношение экваториального и полярного радиусов Земли.

Система (3) может быть решена путем сведения задачи к оптимизации функционала суммы квадратов ошибок (1). На основе системы нелинейных уравнений (3) формируется функционал квадратичной ошибки и для его минимизации может быть использован один из методов многомерной оптимизации, кроме того необходимо решать проблему многоэкстремальности. Данный подход требует значительных вычислительных затрат.

Для построения линии положения в работе предложен следующий алгоритм [4]. Введем систему координат (x', y', z') с началом в центре линии (рис. 1), соединяющей ПП (база). Ось z' направим вдоль линии, соединяющей ПП. Ось y' будет лежать в плоскости АОБ (рис. 1) и перпендикулярно базе, ось x' дополняет систему координат до правой. Для начального приближения предположим, что регистрируемое излучение является плоской волной, принимаемой разнесенной антенной, расположенной в начале координат (x', y', z') . При этом разность хода равна ct . Из этих предположений сформируем направляющий вектор на ИРИ:

$$\mathbf{a} = \{0, \cos\varphi, \sin\varphi\}, \quad (4)$$

где $\sin\varphi = ct / l$, l – длина базы.

Начальное приближение для текущей точки линии положения можно вычислить как точку пересечения прямой, проходящей через начало координат (x', y', z') и имеющей направляющий вектор \mathbf{a} (4) в этой же системе координат, с эллипсоидом Земли.

Однако для точного решения системы (3) необходимо учесть, что излучаемые волны не являются плоскими, следовательно, необходимо корректировать угол φ . Для уточнения предлагается использовать итерационную процедуру. Предположим, что расстояние между началом координат O' и найденной точкой на Земле, на k -й итерации, равно r^k , а расстояние от найденной точки до



ПП – соответственно R_1^k, R_2^k . Тогда направляющий угол уточняется как $\varphi^{k+1} = \varphi^k + \Delta\varphi^k$, где:

$$\Delta\varphi^k = -\left(\alpha - (R_1^k - R_2^k)\right) / r^k. \quad (5)$$

Итерационный процесс (5) может быть остановлен при выполнении условия $\Delta\varphi < \varepsilon$, где ε – задаваемая угловая точность. Данный параметр подбирается исходя из необходимой точности определения местоположения. Остальные точки линии положения можно найти по выше описанной процедуре, при этом повернув систему координат (x', y', z') на некоторый угол вокруг оси z' . Шаг поворота задает расстояние между точками линии положения и является параметром алгоритма.

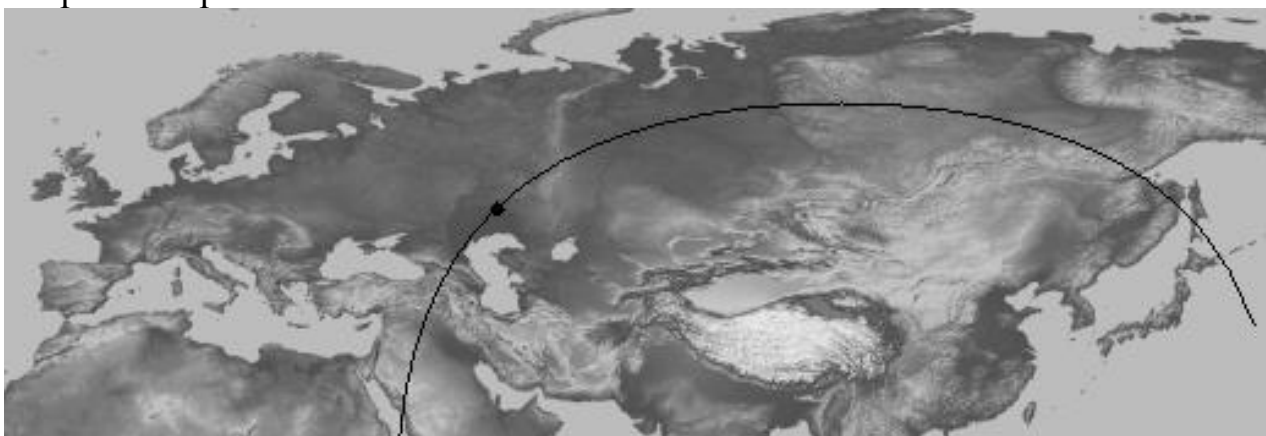


Рис. 2

На основе представленного выше алгоритма был проведен расчет линии положения. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Источник радиоизлучения был расположен в координатах $(50.935948^\circ$ с.ш.; 50.6168105° в.д.). При расчётах моделировалось два спутника. Один находился на геостационарной орбите, другой на орбите типа «Молния».

Литература

1. Ворошилин Е.П., Миронов М.В., Громов В.А. Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов // ТУСУР, №1, часть 2, 2010. – с. 23 - 28.
2. Гринь И.В., Ершов Р.А., Морозов О.А. Вычислительно эффективный алгоритм определения взаимной временной задержки сигналов при больших объемах выборок. // Международная научно-техническая конференция «Перспективные информационные технологии ПИТ-2015». Сборник научных трудов, Т.2, Самара: СГАУ, 2015. – с. 11-14.
3. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М., Ипатов П.В. Радиотехнические системы. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
4. Ершов Р.А., Морозов О.А. Определение местоположения источника радиоизлучения на поверхности земли по данным группы из двух космических аппаратов. // 21-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019». Москва, 2019. –с. 292-296.