



2. Соловьева Я.В. Методы, алгоритмы и комплекс программ аппроксимативного корреляционно-спектрального анализа в ортогональном базисе Бесселя: дис. ...канд. тех. наук: 05.13.18: защищена 27.06.2013: утверждена 21.10.2013. – Самара, 2013. – 116 с.

О.В. Филонин

РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК

(Самарский государственный аэрокосмический университет
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет))

Одним из наиболее перспективных направлений детального исследования планетарных атмосфер является метод, основанный на решении обратных задач радоновского типа, с помощью радио и лазерного (лидарного) зондирования атмосферного слоя. Наиболее перспективным, на наш взгляд, для этой цели является способ радио-, оптической томографии с помощью автоматических спутниковых группировок. Суть его заключается в том, что с помощью основного средства доставки (ОСД) на орбиту данной планеты транспортируется семейство малых спутников с массами порядка $(10 \div 100)$ кг, в зависимости от содержания исследований, точности реконструкции и пр. Каждый такой спутник, содержит: миниатюрный гироскоп, многопроцессорный блок для текущих вычислений орбитальных данных и параметров реконструкций, модуль связи, лазерный дальномер, устройство для импульсного лазерного зондирования атмосферного слоя, приёмно-передающий СВЧ-блок для радиозондирования, ионные или плазменные микродвигатели ориентации и другие модули, в зависимости от особенностей конкретных типа решаемых задач. Как правило, ОСД располагается на стационарной орбите, поэтому группы малых исследовательских спутников, размещаемых на заданной орбите, целесообразно размещать на промежуточных средствах доставки (ПСД). ПСД стартуют с ОСД на заданную орбиту, и с них производится запуск малых спутников на исследовательскую орбиту, с учётом геометрии их распределения см. рис. 1 а).

Для решения поставленных задач – реконструкция пространственного распределения параметров атмосферы планеты, с помощью методов основанных на обращении Радона, прежде всего, необходимо точно знать конфигурацию орбиты движения каждого спутника и точные значения расстояний между ними. Даже в простейшем случае, *в предположении круговой орбиты* и строго распределённых на равных расстояниях совокупности спутников (рис. 1 а)) получение хордовых данных, например, для задачи радиотомографии ионной компоненты атмосферы задача достаточно сложная. В этом случае зону реконструкции кольцевую зону при двумерной реконструкции целесообразно разбить на пересекающиеся круговые зоны восстановления см. рис. 1 а). Траектория зондирующего сигнала, таким образом, оказывается распределённой в не-



скольких зонах восстановления, при этом геометрия зондирования напоминает геометрию веерного пучка. Следовательно, возникает задача по разделению хордовых данных для данной круговой зоны реконструкции, с другой стороны необходимо в каждой такой зоне свести хордовые данные к ортогональной геометрии проецирования и далее доопределить недостающие данные до заданного формата реконструкции.

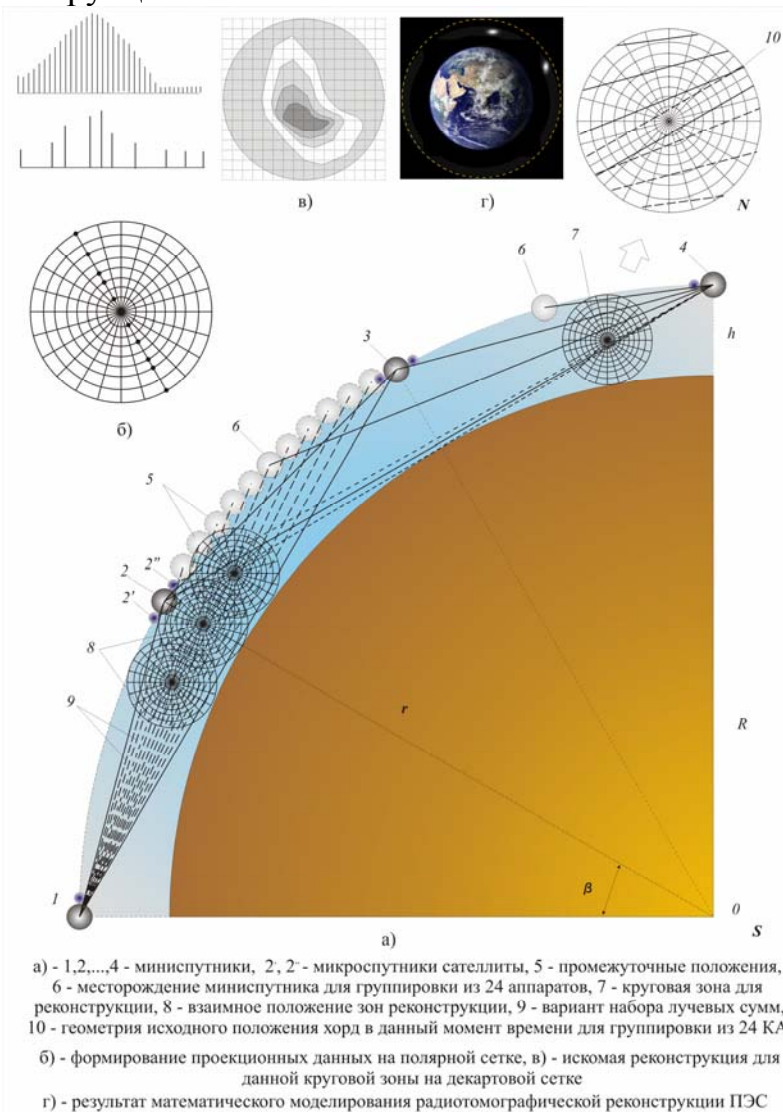


Рис. 1 Геометрия расположения спутниковой группировки

В действительности, реальные орбиты спутников, далеки от круговых. Это объясняется неравномерностью распределения массы планеты относительно её геометрического центра. Поэтому в теории движения искусственных спутников прямо считать, что спутник – материальная точка движется в потенциальном поле планеты, функция потенциала - потенциал притяжения или силовая функция тела K в точке $P(\zeta, \eta, \zeta)$ в общем случае может быть определена с помощью известного выражения:

$$U = f \iiint_T \frac{\tilde{\Theta} d\tau}{\Delta}, \quad (1)$$



где f - постоянная тяготения, $\Delta = \sqrt{(\xi - \xi')^2 + (\eta - \eta')^2 + (\zeta - \zeta')^2}$ - расстояние от точки $P(\xi, \eta, \zeta)$, определяющей местоположение данного спутника до некоторой текущей точки $P'(\xi', \eta', \zeta')$ на поверхности планеты; T - объем, занятый телом планеты K . Для Земли приняты различные формы записи потенциала притяжения, например, стандартная форма, утвержденная комиссией №7 МАС, имеет вид:

$$U = \frac{fM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n P_n(\sin \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n P_{n,m}(\sin \varphi) [C_{n,m} \cos m\lambda + S_{n,m} \sin m\lambda] \right\}. \quad (2)$$

При численном моделировании используется наиболее общая форма записи:

$$U = \frac{fM}{r} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} P_{n,m}(\sin \varphi) [\bar{C}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{S}_{n,m} \sin m\lambda] \right\}, \quad (3)$$

здесь:

$$P_{n,0} = P_n, \quad \bar{C}_{n,0} = \sqrt{\frac{(n-m)!}{2(n-m)!}} \frac{J_n}{\sqrt{2n+1}}, \quad \bar{S}_{n,0} = 0. \quad (4)$$

Заметим, что в современных стандартных представлениях геопотенциала коэффициенты J_n не выделяются.

Дифференциальные уравнения движения частицы в инерциальной прямоугольной системе координат, связанной с центральным телом M , можно представить в виде:

$$\frac{d^2}{dt^2} \bar{x}(t) = -\frac{\partial}{\partial \bar{x}} U, \quad (5)$$

н.у. имеют вид: $\bar{x}_0 = \bar{x}(t_0)$, $\dot{\bar{x}} = \dot{\bar{x}}(t_0)$, где $U(r) = -(\mu/r) - R$. Отметим, что первое слагаемое в U - потенциал, обусловленный притяжением сферической планеты, рассматриваемой как материальная точка, а второе слагаемое представляет собой потенциал возмущающих сил; $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ - вектор положения спутника; t - физическое время; r - модуль вектора положения; $\mu = k^2 M$, k^2 - универсальная гравитационная постоянная; $U = U(t, \bar{x})$, $\partial / \partial \bar{x}$ - градиент.

В качестве возмущающей силы, например для Земли, имеющей потенциал в задачах динамики ИСЗ, рассматривается, как правило, влияние несферической составляющей гравитационного поля Земли. Все же остальные силы, включая влияние Луны и Солнца, положение которых задается либо таблично, либо в виде рядов, полученных вне задачи о движении ИСЗ, относятся к силам, не имеющим потенциала.

Применение метода вариации произвольных постоянных к уравнениям (5) позволяет записать уравнения движения ИСЗ в оскулирующих элементах. Такие уравнения используются при построении как численных, так и аналитических алгоритмов прогнозирования движения. При численном прогнозирова-



нии использование уравнений в оскулирующих элементах обладает тем преимуществом, что невозмущенная часть этих уравнений интегрируется без методических ошибок любым численным методом. Решение уравнений (5) в случае невозмущенного движения имеет вид:

$$\begin{aligned} x_1 &= r\alpha, & \dot{x}_1 &= \sqrt{f(m_0/p)} [\alpha e \sin v + (p\alpha'/r)], \\ x_1 &= r\beta, & \dot{x}_1 &= \sqrt{f(m_0/p)} [\beta e \sin v + (p\beta'/r)], \\ x_1 &= r\gamma, & \dot{x}_1 &= \sqrt{f(m_0/p)} [\gamma e \sin v + (p\gamma'/r)], \\ & & r &= p / (1 + e \cos v), \end{aligned} \quad (6)$$

здесь:

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i, & \alpha' &= \frac{d}{du} \alpha, & \beta &= \cos u \cos \Omega + \sin u \sin \Omega \cos i, & \beta' &= \frac{d}{du} \beta, \\ \gamma &= \sin u \sin i, & \gamma' &= \frac{d}{du} \gamma \end{aligned}$$

Величины $\Omega, i, \omega, p, e, \tau$ это традиционно используемые элементы Кеплеровой орбиты, т.е.: долгота восходящего узла, наклонение орбиты к основной координатной плоскости, долгота перицентра от узла, фокальный параметр орбиты, её эксцентриситет, момент прохождения через перицентр. Параметры α, β, γ представляют собой направляющие косинусы орбитальной системы координат относительно инерциальной системы, используемой в уравнениях (5). Аргумент широты u определяется формулой $u = v + \omega$, истинная аномалия связана

с независимой переменной соотношением: $t - \tau = (p^{3/2} / \sqrt{fm_0}) \int_0^v \frac{d\varphi}{(1 + e \cos \varphi)^2}$.

Элементы кеплеровой орбиты являются в двух последних формулах постоянными и полностью определены начальными условиями системы уравнений (5).

Если к уравнениям возмущенного движения (5) применить метод вариации произвольных постоянных, в предположении, что решение уравнений (5) сохраняет форму (6), то можно получить совокупность уравнений Ньютона–Эйлера. Наличие эксцентриситета в знаменателе ряда членов в уравнениях Ньютона–Эйлера может приводить к потере точности при анализе круговых спутниковых орбит.

Автором разработан пакет прикладных программ (ППП), на основе рассмотренных выше соотношений, позволяющий моделировать поведение группировки миниспутников движущихся почти по круговой орбите для задач томографической диагностики параметров атмосферы планеты. Программное обеспечение, установленное в вычислительных многопроцессорных модулях каждого спутника должно решать две главные задачи:

- «отслеживать» и «корректировать» отклонения ИС от заданной траектории движения по орбите и «следить» за ориентацией в пространстве самого спутника,



– в соответствующие интервалы времени, благоприятные, с точки зрения геометрии расположения орбитальной группировки, производить замеры лучевых данных при лазерном зондировании с последующим их пересчётом в хордовые данные круговых зон реконструкции.

Рис. 1 б) иллюстрирует процедуры доопределения исходных данных в одной проекции для круговой зоны восстановления (см. рис. 1 в)) На рис. 1 г) приведен результат реконструкции при автоматическом выборе оптимальных параметров восстановления (свёрточный алгоритм, формат 512×512 элементов).

Так как предполагается, что каждый миниспутник оборудован каналом обмена цифровыми данными с ближайшими соседями и с ОСД, то в такой системе несложно организовать процессы параллельных вычислений связанных с задачами реконструкции искомым функциональных распределений параметров атмосферы планеты. Именно эта возможность позволяет назвать описанную исследовательскую группировку малых спутников интеллектуальной группировкой, способной самостоятельно решать как задачи навигации, так и задачи реконструкции и передачи информации на основное средство доставки.

Г.Ш. Цициашвили, М.А. Осипова, А.С. Лосев

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ НЕСВЯЗНОСТИ ПЛАНАРНОГО ВЗВЕШЕННОГО ГРАФА С ВЫСОКОНАДЕЖНЫМИ РЕБРАМИ

(ИПМ ДВО РАН, ДВФУ)

Введение

В настоящей работе построен алгоритм вычисления вероятности несвязности для планарного взвешенного графа с высоконадежными ребрами. Ранее такой алгоритм кубической сложности по числу ребер графа был построен в [1] для планарного графа с единичными весами ребер. Основу алгоритма данной работы, как и работы [1], составляет доказательство асимптотического соотношения и получение формул вычисления его параметров. В настоящей работе речь идет о минимальном объеме разреза и о некотором весовом коэффициенте. Расчет асимптотических констант в обоих случаях осуществлялся с использованием перехода к двойственному графу. Основным результатом работы является то, что построенный алгоритм имеет кубическую сложность по числу ребер в графе.

1. Основной результат

Рассмотрим неориентированный связный граф G без петель и кратных ребер с конечным множеством вершин U и ребер W . Пусть каждому ребру графа $w \in W$ соответствует вес $b_w > 0$. Обозначим \mathcal{L} множество разрезов графа, $d(L)$ число ребер (объем) разреза L , D минимальный объем разрезов. Предположим, что ребра графа G отказывают независимо с вероятностями $\bar{p}(w)$, $w \in W$. Для вероят-