

УДК 004.942

**Допущения представления формы земли при расчёте оказателя
наблюдаемости в задаче моделирования космических систем
наблюдения**

***Ирешев Д.В.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»*

*Научный консультант: Тригубец В.Н., к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник, НИЦ РКО 4 ЦНИИ МО РФ*

*Научный руководитель: Старчак С.Л., д.т.н., доцент,
профессор отдела № 1 УВЦ ВИ
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Воронин С.В., начальник отдела УВЦ ВИ
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
voroninsv@bmstu.ru*

Актуальность

Приплюснутость в совокупности со сложной формой поверхности Земли приводит к значительным погрешностям при точном расчёте показателей и характеристик работы космических систем наблюдения. На данный момент существуют четыре приближения формы Земли:

1. Геоид
2. Трёхосный эллипсоид
3. Эллипсоид вращения
4. Сфера

Сложные космические системы наблюдения состоят из подсистем. В совокупности приближения и неточности в этих подсистемах приводят к «грубому», не точному результату при моделировании системы полностью. Целесообразно выбрать параметр по которому можно будет судить о качестве модели, таким параметром будет выступать показатель наблюдаемости заданной области. По результатам сравнения названных выше моделей формы Земли, можно сказать какое приближение использовать для решения той или иной поставленной задачи.

Основная часть

Разработка современных сложных систем представляет собой многоэтапный процесс. На каждом этапе возникает множество вопросов, ответы на которые могут быть

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/620782.html>

найжены только в результате достаточно глубокого исследования системы и внимательного изучения качественных и количественных данных, полученных при исследовании. Среди задач, возникающих в связи с исследованием сложных систем, выделяют два основных класса – это задачи анализа, связанные с изучением свойств и поведения системы в зависимости от её структуры и значений параметров, и задачи синтеза, сводящиеся к выбору структуры и значений параметров, исходя из заданных свойств системы. Одним из наиболее распространённых способов изучения различных процессов и явлений, определения показателей, характеризующих свойства системы, помимо натурных экспериментов, является моделирование, многочисленные методы и приёмы которого широко используются в научных исследованиях и инженерной практике. Обычно различают физическое и математическое моделирование. При этом физическое моделирование имеет ограниченную сферу применения и приемлемо, как правило, к отдельным элементам сложных систем. В отличие от физической, математическая модель реальной системы является абстрактным формально описанным объектом с необходимой степенью приближения к действительности, изучение которого возможно математическими методами.

Под математической моделью реальной системы понимают совокупность соотношений (например, формул, уравнений, неравенств, логических условий, операторов и т.д.), определяющих характеристики состояний системы (а через них и выходные сигналы) в зависимости от параметров системы, входных сигналов, начальных условий и времени [1].

Модель сложной системы, к которым относятся и космические системы наблюдения (КСН), как правило, имеет многоуровневую иерархическую структуру [2, 3]. Так в [2] представлена система математических моделей для синтеза КСН, включающая модели: показателей качества (наблюдение заданного района с требуемой периодичностью, обзорность и др.); показателей эффективности (полнота и качество, достоверность информации, оперативность КСН) и стоимости; КА и основных бортовых систем, орбитальной структуры КСН с учётом управления орбитальными параметрами и численностью КА. В моделях учитываются такие реальные свойства КСН, как длительность эксплуатации, эволюция орбитальной структуры под действием внешних возмущений, отказы бортовых систем КА, погрешности выведения и коррекции и другие.

При этом каждому показателю соответствует свой структурный уровень – модель для расчёта показателя, которая имеет также иерархическую структуру. На её верхнем уровне иерархии находится собственно модель показателя, параметры которой

непосредственно влияют на показатель. Эти параметры в свою очередь определяются иерархическими моделями системы, её внешней среды и т.д.

В ряде случаев (на этапах обоснования требований к КСН, в процессе проектирования, при сопоставительном анализе различных вариантов построения КСН) для оценки эффективности показатели целесообразно комплексировать, т.е. представлять некоторым обобщённым (или интегральным) показателем. Так применительно к КСН, описанной в [2], при обзорности близкой к глобальной и использовании сети КА на высоких орбитах (например, высокоэллиптических или геостационарных), такие количественные характеристики свойств системы, обеспечивающих пригодность системы к выполнению своего назначения, как геометрические и географические параметры наблюдаемой области B_{PH} , периодичность её наблюдения $t_{пер}$ и обзорность $S_{об}$, можно свести к комплексному показателю наблюдаемости заданной области на земной поверхности.

Этот показатель является пространственно-временным и характеризует непрерывность и полноту наблюдения заданной области. Для сети КА в КСН он может быть трансформирован в показатель наблюдаемости заданной области с некоторой кратностью n . Основным методом оценки такого показателя является математическое моделирование.

В общем случае комплексный показатель наблюдаемости можно определить следующим образом:

$$P_k^n = P_{\Pi} \cdot P_n^n,$$

где P_{Π} – временной показатель;

P_n^n – пространственный показатель.

Временной показатель P_{Π} характеризует непрерывность наблюдения заданной области на некотором интервале времени, учитывающий потери времени, обусловленные отсутствием функционирующих КА, способных наблюдать заданную область, или наличием у КА конструктивных и технических ограничений по наблюдению этой области (например, засветка аппаратуры наблюдения Солнцем, ограничения системы электропитания по мощности вследствие затенения КА Землёй и т.д.).

Пространственный показатель P_n^n характеризует полноту наблюдения заданной области с учётом её кратности на некотором временном интервале T функционирования КСН. Показатель представляет собой усреднённое по времени отношение площади области, наблюдаемой n КА S_n^n , к общей площади области S_0 :

$$P^n = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{S^n(t)}{S_0} dt$$

При этом в каждый момент времени

$$S^n = \sum_{m=1}^M \Pi_m^n \cdot \Delta S,$$

где ΔS – соответствует элементарной площади в заданной области, сумма которых равна S_0 ;

Π_m^n – бинарный признак n-кратности попадания m-й точки заданной области в зоне обзора аппаратуры наблюдения (АН) в момент времени t:

$$\Pi_m^n = \begin{cases} 1 & \text{для } n = Z_m(t) \\ 0 & \text{для } n \neq Z_m(t) \end{cases},$$

где $Z_m(t)$ – коэффициент кратности попадания m-й точки заданной области в момент времени t с учётом экстремальных условий наблюдения (ЭУН).

В случае наличия ЭУН:

$$Z_m(t) = \sum_{j=1}^N (\Pi_{m_j}(t) - \Pi_{\text{эун}_{m_j}}(t)),$$

где $\Pi_{m_j}(t)$ – признак попадания m-й точки заданной области в зону обзора АН j-го КА в момент времени t с учётом характеристик АН;

$\Pi_{\text{эун}_{m_j}}(t)$ – признак попадания m-й точки заданной области в зону обзора АН j-го КА и в область ЭУН в момент времени t.

Анализируя комплексный показатель наблюдаемости можно сделать вывод, что его временная составляющая будет зависеть от параметров орбитальной структуры КСН и режимов работы АН, определяемых циклограммой КА. Для пространственной составляющей к ним можно ещё отнести угол обзора АН и угол визирования области.

Для получения достоверных оценок показателя наблюдаемости при расчётах следует учитывать деформацию элементов орбиты КА и закон управления структурой КА. Так в [2] учёт возмущающих факторов проводится в модели эволюции сети КА, использующей данные модели внешней среды. В частности, модель внешней среды включает модель гравитационного поля Земли, использование которой позволяет учитывать составляющую деформации орбиты КА вследствие несферичности Земли.

Логично предположить, что для расчёта пространственной составляющей показателя, также следует учитывать несферичность Земли, т.е. включать модель

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

геометрической формы Земли, которая бы позволяла получать адекватные реальным оценки площади области наблюдения в зависимости от её расположения на земной поверхности, а также времени и месте наступления ЭУН.

Точности прогноза ЭУН и оценки площади области зависит, при прочих равных условиях, от точности определения пространственной «геометрии» поверхности Земли; поскольку P_n^n - функция от суммы площадей, следовательно, корректность и точность оценки эффективности КСН, выраженная через показатель наблюдаемости будет зависеть от точности и полноты принимаемой модели земной поверхности.

Реальную поверхность Земли можно описать в цифровой форме. Разделить поверхность Земли на N площадок. Тогда i -ую площадку можно маркировать пространственными координатами X_i, Y_i, Z_i . Размеры каждой элементарной площадки зависят от характера рельефа и точности представления фигуры Земли. Если представить поверхность равновеликими площадками в один гектар, то придётся иметь дело с 51 млрд. элементарных площадок, что вызывает большие трудности при моделировании из-за необходимости работать с большим объёмом данных.

Первым по точности приближения (первое приближение) к форме Земли является геоид (рисунок 1). Поверхность геоида является эквипотенциальной поверхностью сил земного тяготения, состоящих из гравитационной и центробежной сил.

Геоид (уровенная поверхность) – это геометрическая фигура, ограниченная основной поверхностью Земли, то есть поверхностью, совпадающей с поверхностью мирового океана в состоянии полного покоя водных масс и продолженной под материками. Основная уровенная поверхность перпендикулярна силе тяжести, представляющей сумму гравитационной и центробежной сил, и аналитического описания не имеет [5].



Рис. 1. Геоид

Трёхосный эллипсоид (рисунок 2), представляет главные центральные моменты инерции Земли. Квадраты полуосей a_0 , b_0 , c_0 этого эллипсоида – величины, обратные значениям главных центральных моментов инерции Земли A_0 , B_0 , C_0 относительно этих же осей, где $A_0 < B_0 < C_0$.

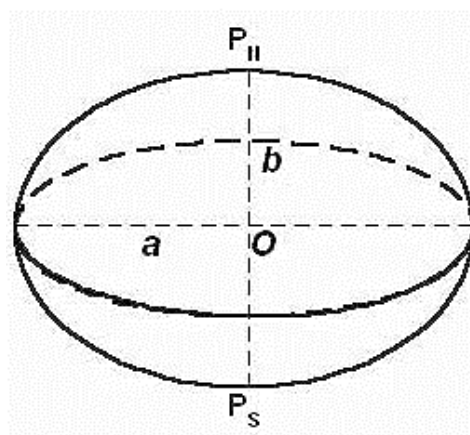


Рис. 2. Трёхосный эллипсоид

Третьим приближением является *эллипсоид вращения*, полностью описывается большой или экваториальной полуосью a и малой полярной полуосью b . (рисунок 3).

Решение геометрических задач на поверхности земного эллипсоида трудоёмко из-за сложного математического аппарата. Поэтому для решения навигационных задач чаще используют *сферу* (рисунок 3), на которую должна быть спроецирована поверхность земного эллипсоида. Проекция должна обеспечивать требуемую точность вычислений и не может быть однозначна для решения разных задач. Основным требованием является получение при проекции сплошного изображения без разрывов и складок, что в свою очередь приводит к искажению изображения отдельных частей проецируемой поверхности за счёт несоответствия длин отрезков и углов их действительным величинам [5]. Разница между геоидом, эллипсоидом и реальной поверхностью Земли показана на рисунке 4.

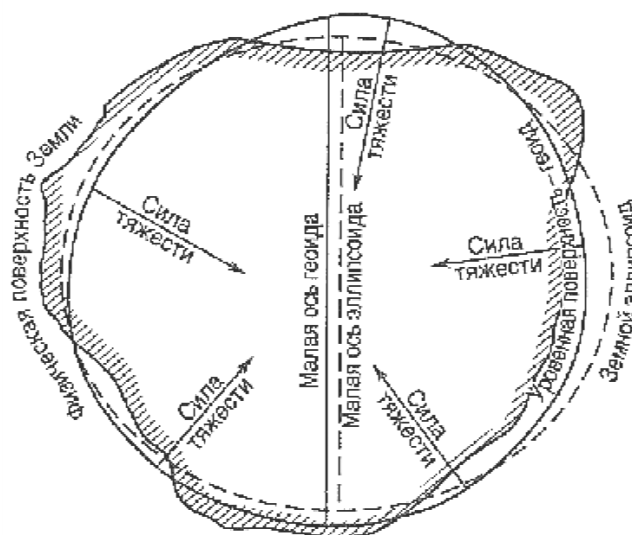


Рис. 4. Сфера

Зачастую страны на своей территории для нужд геодезии используют референц-эллипсоиды. *Референц-эллипсоид* – приближение формы Земли эллипсоидом вращения, используемое для нужд геодезии на некотором участке земной поверхности. В частности в России с 1946 года используется эллипсоид Красовского. В таблице приведены элементы основных земных эллипсоидов принятых в разных странах.

Автор определения	Страна, где опубликованы определения	Год определения	Большая полуось	Сжатие
Бессель	Германия	1841	6 377 397	1 : 299,2
Кларк	Англия	1880	6 378 249	1 : 293,5
Хейфорд	США	1910	6 378 388	1 : 297,0
Красовский	СССР	1940	6 378 245	1 : 298,3

На основании выше сказанного можно сделать вывод, что «идеальным» будет являться сложный вариант представление геоида в виде набора эллипсоидов[6] который следует сравнить с оценками показателя наблюдаемости, полученного при представлении в виде сферы и эллипсоида вращения. Визуальное представление о методе и способе аппроксимации можно получить из рисунка 5.

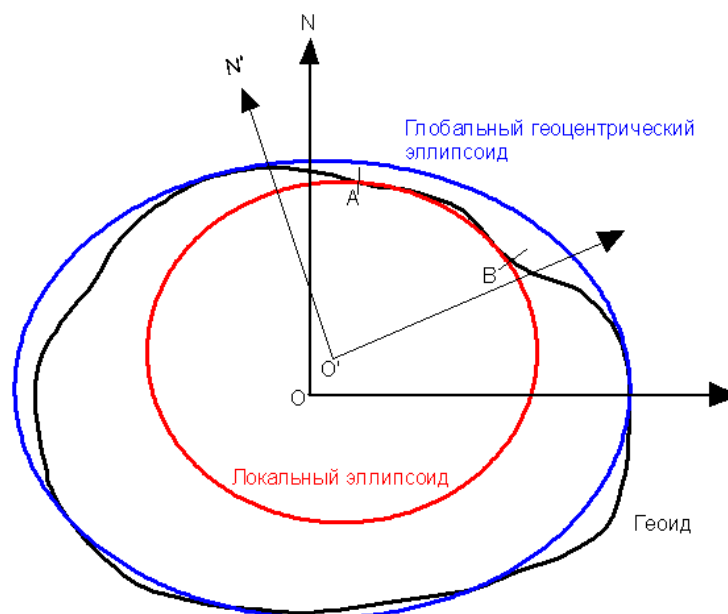


Рис. 5. Геоид в виде набора эллипсоидов

Вывод

В виде меры качества моделирования используется показатель наблюдаемости. Для повышения точности расчёта показателя наблюдаемости было дано обоснование использования эллиптических моделей формы Земли. Поставлена задача для дальнейшего исследования: представление геоида в виде набора эллипсоидов. Что является наиболее математически эффективным способом моделирования в сравнении с описанными.

Список литературы

1. Моделирование сложных систем. / Н.П.Бусленко – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1968.
2. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. – М.: Машиностроение. 1991.
3. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. / Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. – М.: Машиностроение, 1989.
4. Космическая геодезия: Учебник для вузов / В.Н. Баранов, Е.Г. Бойко, И.И. Краснорылов и др. – М.: Недра, 1986.
5. Воздушная навигация и элементы самолётовождения. / В.Я.Мамаев, А.Н.Синяков и др. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2002.
6. Астронет. /В.Е.Жаров// <http://www.astronet.ru>: проект любителей Астрономии России. URL.<http://www.astronet.ru/db/msg/1190817/node25.html> (дата обращения: 02.03.2013).