

В. А. ДОБРИКОВ, В. А. АВДЕЕВ, Д. А. ГАВРИЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ АВИАЦИОННОГО НОСИТЕЛЯ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Предлагается использование метода относительных измерений по сигналам спутниковых радионавигационных систем для высокоточного координатного обеспечения носителей радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны, что позволит повысить качество синтезированного радиолокационного изображения и оперативно осуществить его привязку к местности.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, радиолокационное изображение, метод относительных измерений.

В настоящее время решение ряда важных военных и народно-хозяйственных задач зависит от наличия достоверной информации, получаемой в результате обзора земной поверхности с помощью различных технических средств, установленных на летательных аппаратах (ЛА). Особое место среди таких средств занимают радиолокационные станции (РЛС) обзора земной поверхности с синтезированной апертурой антенны.

Для получения качественного радиолокационного изображения и улучшения разрешающей способности радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) необходимо точно знать местоположение фазового центра антенны и скорость движения носителя РСА.

Влияние траекторных нестабильностей [1, 2] на характеристики РСА имеет различный характер. Степень влияния зависит от максимального приращения фазы на краях интервала синтезирования. Например, постоянная ошибка по радиальному ускорению, вызывающая квадратичное приращение фазы на интервале синтезирования, приводит к ухудшению разрешающей способности РСА и уменьшению динамического диапазона.

Ошибки измерения радиальной скорости и радиального ускорения, которые учитываются при построении опорной функции, обусловлены ошибками определения координат и скорости носителя [1, 2]. Обобщенно влияние ошибок определения местоположения ЛА на характеристики РСА представлено в таблице, где Δ_1 — ошибка определения координат объекта, Δ_2 — общий сдвиг изображения, Δ_3 — ухудшение разрешения вдоль линии пути, Δ_4 — ухудшение разрешения перпендикулярно линии пути, Δ_5 — смещение изображения по азимуту, Δ_6 — смещение изображения по дальности, Δ_7 — потеря яркости изображения, Δ_8 — увеличение боковых лепестков.

Ошибки определения местоположения ЛА		Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8
Вдоль линии пути	Координаты	+							
	Скорость			+				+	+
	Ускорение			+		+		+	+
По высоте	Координаты	+							
	Скорость		+						
	Ускорение			+	+		+	+	+
Перпендикулярно линии пути	Координаты	+							
	Скорость		+				+		
	Ускорение			+	+			+	+

Анализ требований к точности координатно-временного обеспечения современных РСА авиационного базирования показывает, что для получения высокой разрешающей способно-

сти допустимые погрешности измерения радиального ускорения составляют около 10^{-2} м/с², скорости — 0,03...0,3 м/с, наклонной дальности до цели — 0,01...0,1 м [2].

Штатный пилотажно-навигационный комплекс, построенный, как правило, на базе инерциальной навигационной системы, предназначен для определения местоположения летательного аппарата в географической (или ортодромической) системе координат (СК). Полоса пропускания этой системы выбирается гораздо более узкой, чем полоса траекторных неустойчивостей, что объясняется возможностью измерять лишь низкочастотные отклонения ЛА от заданной траектории полета и таким образом повысить точность навигации.

Для компенсации траекторных неустойчивостей необходимы устройства измерения, которые должны быть широкополосными и иметь малые ошибки на интервале синтеза. Штатный пилотажно-навигационный комплекс не удовлетворяет этим требованиям.

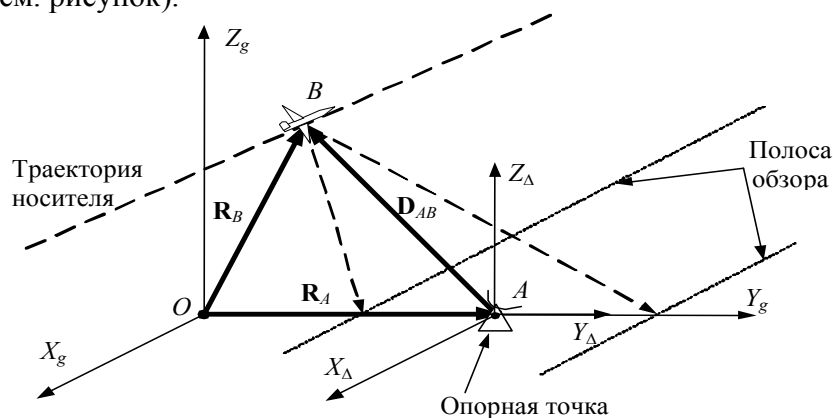
Анализ способов навигации, реализованных в спутниковых радионавигационных системах (СРНС), например относительного режима с использованием фазовых измерений и дифференциального режима, показывает возможность их применения для непосредственного определения координат и скорости носителя РСА [3].

Навигационно-временные определения (т.е. процесс получения проекции координат, проекции вектора скорости и текущего времени в аппаратуре потребителя), основанные на фазовых измерениях, характеризуются высокой точностью. Потенциальная точность оценки задержки по фазе несущей частоты составляет сотые доли периода несущей частоты радиосигнала, т.е. 3—5 мм [4]. Именно такой высокой точностью объясняется значительный интерес к фазовым методам измерения. В настоящее время наиболее активно эти методы используются для решения задач геодезии. Перспективным является их применение и для высокоточной навигации, например для определения пространственной ориентации и автоматизации управления объектами, в частности для автоматизации посадки и стыковки ЛА, а также для обеспечения группового полета кооперируемых ЛА [4].

Выбор метода получения навигационных определений и состава измеряемых навигационных параметров зависит от многих факторов, прежде всего, от требований к тактико-техническим характеристикам конкретных РСА.

В настоящей статье предлагается использование метода относительных фазовых измерений для определения координат и скорости носителя РСА относительно другого объекта с заранее известным местоположением, а также для дальнейшего определения абсолютных координат носителя РСА.

Для реализации предлагаемого способа необходимо наличие двух приемников, один из которых, используемый в качестве базовой станции, устанавливается на земле, другой — на носителе РСА (см. рисунок).



Принятые на базовой станции навигационные сигналы обрабатываются совместно с сигналами аппаратуры потребителя (АП), установленной на носителе РСА. В результате обработки вычисляются векторы относительного положения и скорости, а затем абсолютные

координаты носителя РСА. Определяемый вектор между двумя точками называют вектором базовой линии.

Рассмотрим решение задачи в абсолютной геоцентрической системе координат $(X_g Y_g Z_g)$ (см. рисунок). Пусть A — опорная (известная) точка, B — неизвестная точка, а \mathbf{D}_{AB} — вектор базовой линии. Введем соответствующие геоцентрические векторы положения \mathbf{R}_B , \mathbf{R}_A и представим вектор базовой линии как

$$\mathbf{D}_{AB} = \mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A. \quad (1)$$

Компоненты вектора базовой линии определяются следующим образом:

$$\mathbf{D}_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix},$$

где X_A , Y_A , Z_A и X_B , Y_B , Z_B — геоцентрические координаты точек A и B соответственно.

Определение относительного местоположения объекта (далее — относительное позиционирование) может выполняться по кодовым или фазовым измерениям. Фазовые решения являются более точными. Относительное позиционирование требует одновременных наблюдений и на опорной, и на неизвестной точке.

Будем полагать, что имеются два носителя аппаратуры потребителя, причем один может быть неподвижным (установленным на земле — точка A), а второй — подвижным (установленным на носителе РСА — точка B). Оба комплекта АП выполняют навигационные измерения дальности по фазе несущей и измерения радиальной скорости по доплеровскому сдвигу частоты. Расстояние между подвижным и стационарным комплектами АП может достигать нескольких десятков километров.

Задача относительного позиционирования может быть решена путем апостериорной обработки измерений, при которой могут использоваться апостериорные уточненные эфемериды спутников СРНС, а в ряде случаев и известные с высокой точностью координаты стационарного объекта.

В соответствии с требованиями к точности решения задачи навигационного обеспечения носителя РСА использование относительного режима на основе кодовых измерений представляется неудовлетворительным, так как при этом погрешность определения местоположения РСА составляет единицы метров. Следовательно, для получения решения необходимо применять относительный режим на основе использования фазовых измерений на несущей частоте. Достижимая при этом погрешность составляет не более метра, без разрешения фазовых неоднозначностей („плавающее“ решение), и единицы сантиметров, с разрешением фазовых неоднозначностей (фиксированное решение). Такая точность решения навигационной задачи является удовлетворительной для навигационного обеспечения носителя РСА.

Для решения задачи в относительном режиме введем прямоугольную систему координат $(X_\Delta Y_\Delta Z_\Delta)$ (см. рисунок), связанную с неподвижным объектом, оси которой параллельны осям геоцентрической СК и имеют такое же направление, а центр находится в точке расположения стационарного объекта.

В состав вектора оцениваемых параметров при фильтрации измерений должны быть включены:

- координаты X_A , Y_A , Z_A стационарной АП;
- относительные координаты ΔX , ΔY , ΔZ подвижного носителя в СК, связанной с опорной точкой A ;
- проекции вектора относительной скорости V_x , V_y , V_z подвижного носителя на оси системы координат, связанной с точкой A ;

— проекции вектора относительного ускорения $\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z$ подвижного носителя на оси системы координат, связанной с точкой A ;

— отклонения шкал времени и смещения частот генераторов стационарного и подвижного комплектов АП;

— сводные векторы полных циклов фазовых измерений по всем рабочим космическим аппаратам для стационарного и подвижного объектов.

Решающее значение для рассматриваемой задачи высокоточного позиционирования имеет применение методов относительной навигации и разностных измерений. Удовлетворительное решение, на уровне миллиметровой точности, в этом случае можно получить, только разрешив неоднозначности фазовых измерений.

Обработка данных выполняется в три этапа.

На первом этапе применяется стандартный метод наименьших квадратов либо фильтр Калмана. Их использование дает решение, оптимальное по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценивания, однако это решение не обеспечивает целого количества циклов для неопределенностей фазы несущей. Получаемые в составе вектора оцениваемых параметров действительно-значные оценки целого количества циклов для неопределенностей фазы несущей называют „плавающим“ решением.

На втором этапе выполняется разрешение неоднозначностей фазовых измерений с использованием метода наименьших квадратов. В ходе этого этапа получают целочисленные значения неоднозначностей.

На последнем, третьем, этапе решение находят с учетом целочисленных значений неоднозначностей. Здесь также используется метод наименьших квадратов либо фильтр Калмана. Окончательные координаты имеют миллиметровую точность.

Для проверки теоретических положений были проведены наземные эксперименты, в которых использовались два комплекта АП СРНС производства КБ „НАВИС“ (Санкт-Петербург). Один комплект был неподвижен, а второй установлен на автомобиле. Оба комплекта АП выполняли синхронные фазовые и кодовые измерения в режиме „stop and go“. При обработке измерений точность вычисления вектора базовой линии в движении для „плавающего“ решения составила 0,124 м, для фиксированного решения — 0,028 м. В дальнейшем планируется проведение подобного эксперимента на самолете.

Таким образом, использование метода относительных фазовых измерений в СРНС для навигационного обеспечения носителей РСА позволяет вычислять параметры траектории носителя радиолокатора с необходимой точностью. Применение рассмотренного метода не требует дополнения штатного пилотажно-навигационного комплекса специальными измерителями. Для реализации предложенного метода необходимо наличие двух комплектов аппаратуры потребителя СРНС, выполняющих фазовые измерения, причем один из комплектов может быть включен в штатный пилотажно-навигационный комплекс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
2. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
3. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002. 400 с.
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.

Сведения об авторах

- Владимир Анатольевич Добриков*** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: dwa33@mail.ru
- Владимир Алексеевич Авдеев*** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: apex7@rambler.ru
- Денис Александрович Гаврилов*** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: gdanas@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
космической радиолокации
и радионавигации

Поступила в редакцию
12.03.08 г.