

И. А. БАГМУТ, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОГО БЛОКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Розглянуто слабпов'язану схему комплексування та корекції інформації в інтегрованій інерціально-спутникової навігаційної системи. Виконано аналіз впливу аномалії сили тяжіння на точність оцінювання інструментальних погрешностей інерціального блоку навігаційної системи.

Ключові слова: інтегрована навігаційна система, аномалія сили тяжіння, інструментальні погрешності інерціального блоку.

Рассмотрена слабосвязанная схема комплексирования и коррекции информации в интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системе. Выполнен анализ влияния аномалии силы тяжести на точность оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока навигационной системы.

Ключевые слова: интегрированная навигационная система, аномалия силы тяжести, инструментальные погрешности инерциального блока.

The weakly-bound complexion and correction information scheme in an integrated inertial-satellite navigation system has considered. The analysis of the influence of gravity anomalies on the accuracy of estimating the instrumental errors of the inertial block navigation system has performed.

Keywords: integrated navigation system, gravity anomalies, instrumental errors of the inertial block.

Введение. Интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИИСНС) сегодня являются одними из наиболее перспективных систем, позволяющих определять координаты, вектор скорости и другие параметры движения воздушных летательных аппаратов (ВЛА) [1]. Такие системы, как правило, основаны на комплексировании измерений поступающих от бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и спутниковых навигационных систем (СНС).

Одним из центральных элементов программно-математического обеспечения ИИСНС является алгоритм оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока (ИБ) навигационной системы, который, как правило, реализуют на основе фильтра Калмана (ФК) [2]. Точность оценивания погрешностей ИБ определяет величину ошибок вычисления навигационной системой параметров движения ВЛА в условиях отсутствия спутниковых сигналов. Поэтому проведение анализа влияния различных условий функционирования ИИСНС на точность оценивания инструментальных погрешностей ее инерциального блока является актуальной задачей.

На точность оценивания инструментальных погрешностей ИБ влияет множество факторов. В частности, в работах [3, 4] рассматривается соответственно влияние настройки фильтра Калмана и маневров, выполняемых ВЛА. Совокупное влияние указанных факторов анализируется в [5]. В то же время, практически отсутствуют научные публикации, посвященные влиянию аномалии силы тяжести на точность оценивания инструментальных погрешностей инерциальных датчиков навигационных систем.

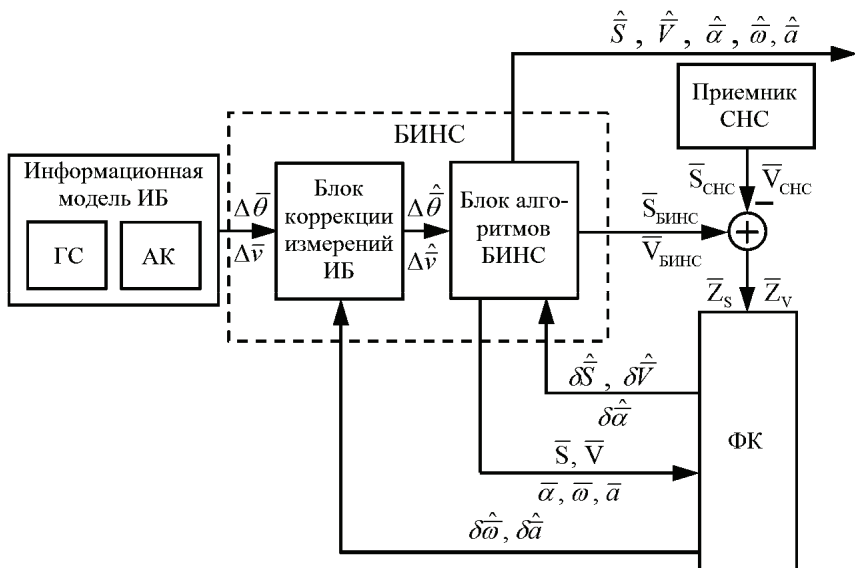
Постановка задачи и ее аналитическое решение. Целью данной работы является проведение анализа влияния аномалии силы тяжести на точность оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока ИИСНС.

Рассмотрим слабосвязанную [6] схему комплексирования и коррекции информации в ИИСНС (см. рисунок).

Приведенная схема является слабосвязанной, с обратной связью по оценкам инструментальных погрешностей и ошибкам навигационных параметров формируемых БИНС. В качестве блока формирования управляющих (корректирующих) сигналов используется фильтр Калмана.

Вектор состояния фильтра содержит ошибки навигационных параметров ВЛА, а также оценки инструментальных погрешностей инерциального блока, подлежащих коррекции.

Рассмотрим функционирование схемы комплексирования и коррекции информации. Информационная модель ИБ генерирует приращения векторов угла кажущегося поворота $\Delta\bar{\theta}$ и кажущейся скорости $\Delta\bar{v}$ ВЛА в проекциях на оси связанной с ним системы координат за такт работы системы. После коррекции с учетом текущих оценок погрешностей гироскопов и акселерометров, скорректированные значения приращений угла кажущегося поворота $\Delta\hat{\theta}$ и кажущейся скорости $\Delta\hat{v}$ поступают на вход блока алгоритмов БИНС, где решается задача инерциальной навигации. Результатом решения данной задачи являются координаты $\bar{S}_{БИНС}$ и скорости $\bar{V}_{БИНС}$ ВЛА, а также угловые параметры его ориентации $\bar{\alpha}$. Разности между инерциальными и спутниковыми данными в виде векторов \bar{Z}_S и \bar{Z}_V поступают на фильтр Калмана в качестве вектора измерений. Также входными данными для ФК являются динамические параметры ВЛА $\bar{\omega}$ и \bar{a} , и вектор его параметров ориентации $\bar{\alpha}$. Результатом фильтрации являются оценки ошибок определения навигационных параметров инерциальной системой, а также оценки инструментальных погрешностей инерциального блока. Вычисленные ФК оценки ошибок поступают в блок коррекции измерений и блок алгоритмов БИНС коррекции текущих измерений инерциальных датчиков и вычисленных в БИНС навигационных параметров ВЛА. Скорректированные координаты \hat{S} , скорости \hat{V} , угловые параметры ориентации $\hat{\alpha}$ подвижного ВЛА, а также его динамические параметры $\hat{\omega}$, \hat{a} являются выходными данными ИИСНС.



Структурная схема комплексирования и коррекции информации в ИИСНС: ГС – гироскопы; АК – акселерометры; $\Delta\bar{\theta}$ – приращение вектора угла кажущегося поворота; $\Delta\bar{v}$ – приращение вектора кажущейся скорости; \bar{S} , \bar{V} , $\bar{\alpha}$ – навигационные параметры ВЛА, соответственно вектор координат, вектор скорости и вектор параметров ориентации; $\bar{\omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости ВЛА; \bar{a} – вектор кажущегося ускорения ВЛА; $\Delta\hat{\omega}$ – вектор оценок инструментальных погрешностей ГС; $\Delta\hat{a}$ – вектор оценок инструментальных погрешностей АК

При определении значения вектора скорости ВЛА \hat{V} в блоке алгоритмов БИНС, используется информация о векторе ускорения силы тяжести Земли \bar{g} , вычисленного для текущего местоположения объекта. Известно [7], что в общем случае фактические значения ускорения силы тяжести, измеренные в различных точках Земли, отличаются от теоретических. Такие различия называются аномалиями силы тяжести. Очевидно, что неточное значение вектора \bar{g} , приведет к дополнительным ошибкам оценивания инструментальных погрешностей инерциальных датчиков.

Рассмотрим влияние аномалии силы тяжести на ошибки оценивания инструментальных погрешностей ИБ. На основе анализа научной литературы [8-10], можно выделить следующие аномалии силы тяжести:

- 1) гравитационные аномалии на поверхности Земли;
- 2) аномалия Буге.

Гравитационные аномалии на Земле обусловлены рядом факторов: рельефом окружающей местности, характером плотностных неоднородностей в

верхних слоях Земли под точкой наблюдения и др. В большинстве случаев значение данных аномалий не превышает 100 мГал, что эквивалентно 10^{-3} м/с², а среднеквадратическая вариация по Земле составляет величину около 20 мГал ($2 \cdot 10^{-4}$ м/с²).

В гравиметрии [8] нормальное значение ускорения силы тяжести (то есть без учета аномалий) определяется на основе формулы Гельмерта-Кассиниса:

$$g_0 = g_{Э0} + (1 + 0.005317 \cdot \sin^2 \varphi + 0.000007 \cdot \sin^2 2\varphi),$$

где g_0 – ускорение силы тяжести на земном эллипсоиде, мГал; $g_{Э0}$ – ускорение силы тяжести на экваторе эллипсоида Земли, мГал.

Аномалия Буге обусловлена изменением гравитационного поля Земли с изменением высоты над уровнем моря, и учитывает влияние промежуточного слоя между точкой наблюдения силы тяжести и уровнем моря, считая этот слой плоскопараллельным:

$$\Delta g_B = g - g_0 + \Delta g_B + \Delta g_{ПС},$$

где Δg_B – аномалия Буге, мГал; g – фактическое значение ускорения силы тяжести, мГал; $\Delta g_B = 0.3086 \cdot h$ – поправка, учитывающая изменение гравитационного поля Земли с изменением высоты «в воздухе», то есть при отсутствии (горных) пород, между уровнем моря и точкой наблюдения, мГал; h – высота места, м; $\Delta g_{ПС} = -0.1119 \cdot h$ – поправка, учитывающая влияние промежуточного слоя между точкой наблюдения силы тяжести и уровнем моря, мГал.

В блоке алгоритмов БИНС при вычислении ускорения силы тяжести используется вычисленная фактическая высота места объекта. Поэтому влияние поправки Δg_B на ошибку определения ускорения силы тяжести и ошибки оценивания инструментальных погрешностей акселерометров будет практически отсутствовать и им можно пренебречь.

Средняя высота суши Земли над уровнем моря составляет 875 м. Таким образом абсолютное среднее значение поправки $\Delta g_{ПС}$ находится на уровне $9 \cdot 10^{-4}$ м/с².

Учитывая вышесказанное можно сделать вывод, что в большинстве случаев, совокупная ошибка определения ускорения силы тяжести Земли в блоке алгоритмов БИНС по абсолютному значению не превысит 10^{-3} м/с².

Компьютерное моделирование функционирования ИИСНС (см. рисунок) показало, что такая ошибка приведет к ошибке оценивания смещения нуля вертикального акселерометра на уровне 10^{-3} м/с² и ошибкам оценивания смещения нуля горизонтальных АК на уровне 10^{-4} м/с². При использовании датчиков средней и низкой точности, такой уровень ошибок является приемлемым. На ошибки оценивания остальных инструментальных погрешностей ИБ такая неточность в определении ускорения силы тяжести практически не влияет.

Выводы. Выполнен анализ влияния аномалии силы тяжести на точность оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока в ИИСНС. Показано, что данная аномалия существенно влияет на точность оценивания смещения нуля АК высокой точности. В случае использования акселерометров низкой и средней точности влиянием аномалии силы тяжести можно пренебречь. Полученные результаты можно использовать при проектировании инерциальных и интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем.

Список литературы: 1. Кушельман В. Я. Будущее точной навигации – за интегрированными системами / В. Я. Кушельман, А. А. Фомичев // АвиаСоюз. – 2005, июнь-июль, №3(5). – С. 50-53. 2. Степанов О. А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации / О. А. Степанов // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 1 (36). – С. 23-45. 3. Успенский В. Б. Настройка фильтра Калмана в задаче комплексирования информации в интегрированной навигационной системе / В. Б. Успенский, А. Д. Асютин // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2010. – № 67. – С. 51-57. 4. Багмут И. А. Наблюдаемость инструментальных погрешностей инерциального блока в интегрированной навигационной системе / И. А. Багмут // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2009. – № 23. – С. 3-14. 5. Багмут И. А. Разработка требований к инструментальным погрешностям инерциального блока интегрированной навигационной системы / И. А. Багмут, В. Б. Успенский // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2011. – № 52. – С. 22-28. 6. Степанов О. А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации / О. А. Степанов // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 1 (36). – С. 23-45. 7. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации / П. В. Бромберг. – М.: Наука, 1979. – 296 с. 8. Огородова Л. В. Гравиметрия / Л. В. Огородова, Б. П. Шимбирев, А. П. Юзефович. – М.: Недра, 1978. – 325 с. 9. Поклад Г. Г. Геодезия: учеб. пособ. для ВУЗов / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. – М.: Академический Проект, 2007. – 592 с. 10. Яковлев Н. В. Высшая геодезия: учеб. для ВУЗов / Н. В. Яковлев. – М.: Недра, 1989. – 445 с.

Поступила в редколлегию 21.12.2012.