

ОЦЕНИВАНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОСТАТНЫХ ЗОНДОВ, ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМАМИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

**В.В.Альчаков^{*}, Л.А.Краснодубец^{*},
В.С.Мотыжев^{*}**

^{*}Севастопольский национальный
технический университет,
“Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, Стрелецкая балка,
Студгородок
E-mail: va@bios.iuf.net

Предложен подход к решению задачи оценивания траекторных параметров аэростатных зондов, обеспечивающий большую точность получаемых оценок по сравнению с существующей системой.

Введение. При решении задач, связанных с мониторингом окружающей среды, большое внимание уделяется вопросам применения летательных аппаратов легче воздуха (аэростаты, аэроздонды и т.п.). Это объясняется тем, что, несмотря на свою простоту, подобные аппараты позволяют проводить крупномасштабные исследования состояния атмосферы. Особенно эффективным является их использование в качестве подвижных платформ сбора данных, которые, находясь в свободном полете вместе с атмосферными потоками, позволяют формировать массивы данных о текущем состоянии атмосферы.

В связи с этим возникает ряд задач связанных с измерением траекторных параметров таких аппаратов, а также со сбором и обработкой полученных данных.

Использование радиолокационных методов применительно к данной задаче является практически невозможным, ввиду малой отражающей способности подобных объектов.

Поэтому существующий метод определения траекторных параметров аэростатных зондов [1] предполагает использование трассеров – приборов, оснащенных радиомаяками, работающими на частотах систем спутниковой связи, которые помимо передачи данных обеспечивают возможность определения текущих координат местоположения объекта.

При этом ошибка определения координат возрастала с увеличением высоты, что обуславливалось уменьшением зоны, обслуживаемой спутниками системы Cospas-Sarsat, поскольку спутники данной системы предназначены для определения координат объектов, расположенных на поверхности Земли.

В настоящей работе предлагается подход, позволяющий существенно повысить точность оценивания траекторных параметров аэростатных зондов за счет переоснащения существующей системы определения траекторных параметров (ОТП) аэростатных зондов современной системой спутниковой связи ORBCOMM. Космический сегмент данной системы, состоящий из 36 низкоорбитальных спутников, обеспечивает практически непрерывную радиовидимость этих спутников из любой точки земной поверхности [2,3]. Использование системы ORBCOMM позволяет значительно увеличить частоту обсерваций местоположения аэроздонда, что открывает возможность применения современных методов оптимальной фильтрации данных измерений. Кроме этого абонентская аппаратура системы ORBCOMM позволяет производить подключение навигационных приемников GPS глобальной системы позиционирования NAVSTAR-GPS или ГЛОНАСС, что также может в значительной мере уменьшить ошибки при формировании первичных данных измерений параметров движения аэростата, а также сократит время на обработку данных, необходимых для определения координат местоположения объекта.

Концепция системы ОТП. Пусть имеется неуправляемый аэростатный зонд, предназначенный для изучения верхних слоев атмосферы. Для решения задачи мониторинга зонд может быть оснащен в соответствии со структурной схемой представленной на рис. 1.

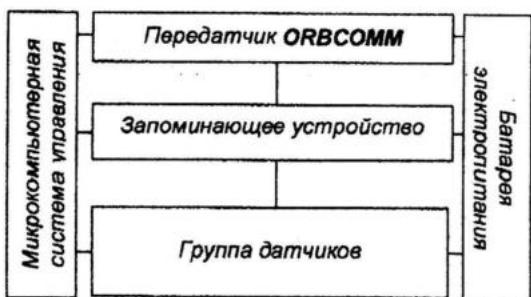


Рисунок 1 – Функциональная структура оснащения зонда

Непосредственно перед запуском аэро-зонда производится активизация подсистемы сбора и передачи данных, которая состоит из группы датчиков и передатчика спутниковой системы связи ORBCOMM.

Микрокомпьютерная система осуществляет управление всеми функциональными блоками аэро-зонда. Кроме этого, с ее помощью осуществляется формирование информационных кадров, в состав которых входят идентификационный номер аэростата и блок измеренных данных от датчиков.

Информационные кадры накапливаются в запоминающем устройстве и при прохождении спутника системы ORBCOMM в зоне радиовидимости аэростатного зонда, происходит передача данных на спутник (рис. 2). В свою очередь, спутник при прохождении над земной станцией передает на нее данные, принятые от аэро-зonda. После этого происходит их отправка по выделенным каналам связи конечным абонентам.



Рисунок 2 – Концепция системы

В центрах обработки информационные кадры заносятся в динамически обновляемую базу данных. Впоследствии информация из базы данных может быть использована для различных исследовательских це-

лей, а также для отслеживания местоположения аэростатного зонда на всей протяженности его полета, включая приземление.

Возможность реализации рассматриваемой системы ОТП была проверена методом имитационного моделирования на основе разработанной математической модели.

Математическая модель процесса измерения траекторных параметров. Введем следующие обозначения для траекторных параметров аэростатного зонда:

- φ – географическая широта места;
- λ – географическая долгота места;
- z – высота над уровнем моря;
- v – модуль вектора скорости полета.

С учетом введенных обозначений вектор состояния системы, характеризующий пространственное движение объекта в момент времени t_k , может быть представлен в виде

$$X_k = [\varphi_k \ v_{\varphi_k} \ \lambda_k \ v_{\lambda_k} \ z_k \ v_z]^T. \quad (1)$$

Применив разложение в ряд Тейлора для функций широты φ , долготы λ и высоты z , в качестве приближенной модели траектории будем использовать следующие соотношения

$$\begin{aligned} \varphi(t_k) &= \varphi(t_{k-1}) + \frac{\varphi'(t_{k-1})}{1!} \Delta t_k, \\ \lambda(t_k) &= \lambda(t_{k-1}) + \frac{\lambda'(t_{k-1})}{1!} \Delta t_k, \\ z(t_k) &= z(t_{k-1}) + \frac{z'(t_{k-1})}{1!} \Delta t_k, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta t_k = t_k - t_{k-1} = T$.

В этом случае модель процесса измерений может быть представлена в векторно-матричной форме в виде разностного уравнения состояния

$$X_k = AX_{k-1} + U_k \quad (3)$$

и уравнения измерения

$$Y_k = HX_k + W_k, \quad (4)$$

где X_k – вектор состояния;

A – матрица состояния;

U_k – вектор случайных возмущений;

H – матрица связи между наблюдаемыми и оцениваемыми параметрами;

W_k – вектор ошибок измерений.

Структура матриц и векторов, входящих в уравнения (3) и (4) имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$Y_k = \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \lambda_k \\ z_k \end{bmatrix}, U_k = \begin{bmatrix} u_{\varphi_k} \\ 0 \\ u_{\lambda_k} \\ 0 \\ u_{z_k} \\ 0 \end{bmatrix}, W_k = \begin{bmatrix} w_{\varphi_k} \\ w_{\lambda_k} \\ w_{z_k} \end{bmatrix}.$$

Поскольку физические возмущения, действующие на аэрозонд, и ошибки определения координат местоположения объекта могут рассматриваться как статистически независимые случайные процессы, то компоненты векторов U_k и V_k , характеризующие ошибки возмущения и измерения соответственно, могут быть описаны как независимые дискретные белые шумы с нулевым средним.

Модель процесса измерения траекторных параметров в виде уравнений (3) и (4) может быть использована при построении дискретного алгоритма оптимальной фильтрации Калмана для вычисления оценок траекторных параметров.

Алгоритм оптимального оценивания. В соответствии с [3,4] алгоритм оптимального дискретного фильтра Калмана может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k|k-1} &= G\hat{X}_{k-1}, \quad G = e^{AT}, \\ P_{k|k-1} &= GP_{k-1}G^T + F_{k-1}Q_{k-1}F_{k-1}^T, \\ K_k &= P_{k|k-1}H^T[H P_{k|k-1} H^T + R_k]^{-1}, \quad (5) \\ \hat{X}_k &= \hat{X}_{k|k-1} + K[Y_k - \hat{Y}_k], \\ P_k &= P_{k|k-1} - K_k H P_{k|k-1}, \end{aligned}$$

где \hat{X}_k – оценка вектора состояния; G – переходная матрица; A – матрица состояния; T – период дискретизации; F_k – мат-

рица влияния; Q_k и R_k – матрицы интенсивностей шумов возмущений и измерений; P_k – ковариационная матрица; K_k – матричный коэффициент усиления фильтра.

Для построения алгоритма оптимального оценивания система (5) должна быть дополнена уравнениями (3) и (4).

Таким образом, совокупность уравнений (3)-(5) представляет собой рекуррентный алгоритм оценивания траекторных параметров аэростатного зонда. Предложенный подход может быть использован для обработки данных, поступающих от радиомаяков аэрозонда, которые настроены на частоту спутниковой системы связи ORBCOMM.

Результаты имитационного моделирования процесса ОТП. Работоспособность предложенного алгоритма исследована методом имитационного моделирования. Для этой цели было разработано специализированное программное обеспечение, которое позволяет реализовать модель движения центра масс аэростатного зонда, модель подсистемы измерения координат объекта с учетом случайных возмущений и инструментальных ошибок оборудования, а также сам алгоритм оценивания. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и рис. 4. Сплошная кривая на графиках соответствует оценке координат аэростатного зонда, полученной с помощью применения рассмотренного алгоритма ОТП, а символом «•» отмечены данные обсерваций, полученные измерительной системой аэрозонда. При моделировании ошибка определения координат местоположения объекта принималась равной 2000м.

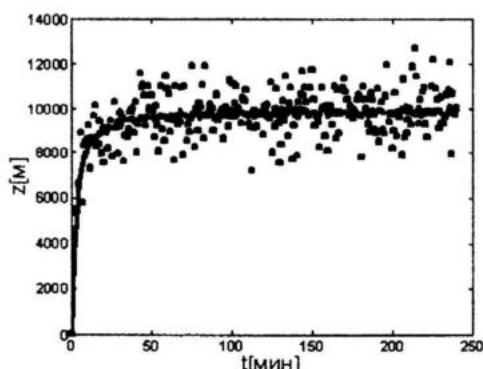


Рисунок 3 – Зависимость высоты аэростатного зонда от времени
(Система связи ORBCOMM + ОТП)

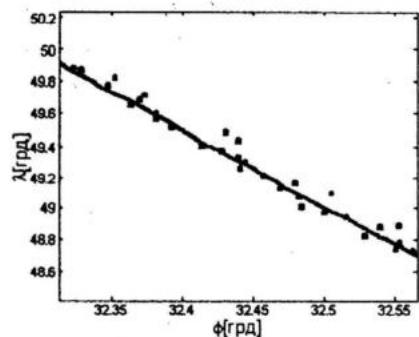


Рисунок 4 – Зависимость широты и долготы аэростатного зонда от времени
(Система связи ORBCOMM + ОТП)

Точность получаемых оценок траекторных координат можно увеличить за счет дополнительного оснащения абонентской аппаратуры системы ORBCOMM приемником глобальной системы позиционирования GPS. В этом случае точность определения координат подсистемой измерений зонда возрастет до 50м. Результаты моделирования системы ОТП аэрозонда, оснащенного приемником GPS, приведены на рис. 5 и рис. 6.

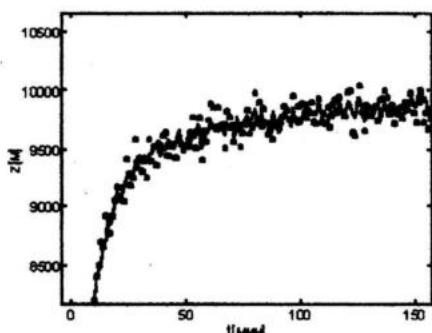


Рисунок 5 – Зависимость широты и долготы аэростатного зонда от времени
(Система связи ORBCOMM + GPS + ОТП)

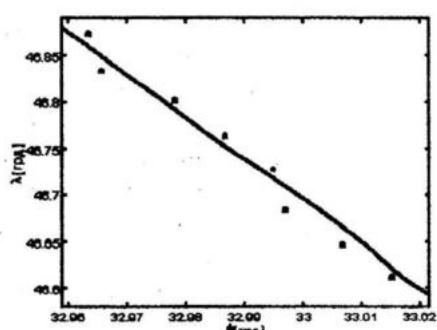


Рисунок 6 – Зависимость широты и долготы аэростатного зонда от времени
(Система связи ORBCOMM + GPS + ОТП)

В таблице 1 представлена среднеквадратическая ошибка (СКО) оценивания траекторных параметров аэрозонда для различных видов технического оснащения системы ОТП.

Таблица 1 – СКО оценивания для различных видов систем ОТП

Вид системы	σ_φ [град]	σ_λ [град]	σ_z [м]
ORBCOMM	5.2e-3	5.4e-3	1526
ORBCOMM + ОТП	6.7e-4	7.2e-4	86
ORBCOMM + GPS + ОТП	2.5e-5	2.7e-5	3

Полученные статистические характеристики ошибки оценивания траекторных параметров свидетельствуют о том, что применение космической системы связи ORBCOMM в совокупности с оптимальной фильтрацией данных измерений и использованием глобальной системы позиционирования GPS, позволили значительно увеличить точность получаемых оценок координат аэростатного зонда, по сравнению с существующим прототипом системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мотыжев С.В. Спутниковая дрифтерная технология для изучения океана и атмосферы: Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук: 11.00.08. – М., 1999.
2. World Wide Web Site: <http://www.orbcomm.com/how.htm>
3. World Wide Web Site: <http://www.satellite.srd.mtuci.ru/orbcomm/>
4. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. Коуэна К.Ф.Н., Гранта П.М. – М.: Мир. 1988. – 392 с., ил.
5. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах. – Под ред. Леондеса К.Т. – М.: Мир. 1980.