

6. Белоконов И. В., Агафонова С. Е. Методика построения каталога идеальных созвездий навигационных спутников применительно к функциональному назначению потребителя // Международная научно-техническая конференция «К. Э. Циолковский – 140 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиозлектроника. Геоинформатика.» : Тез. докл. / Рязанская государственная радиотехническая академия. – Рязань, 1997. – С. 41-43.
7. Белоконов И. В., Агафонова С. Е. Алгоритмы выбора рабочих созвездий навигационных спутников для космических аппаратов наблюдения // Тезисы докладов XXXIII Научных чтений К. Э. Циолковского / ИИЕТ РАН – М., 1998. – С. 72-73.
8. Belokonov I. V., Agafonova S. E. Intelligent Navigational Receivers – Possible Trend in Improving Efficiency and Reliability of Space Operations. 8<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigational Systems, 2001, Abstracts, p.281.

УДК 629.7.05

Белоконов И.В., Боровков В.А.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОТ СПУТНИКОВОГО РАДИОНАВИГАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА В ИНТЕРЕСАХ КОНЕЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Эффективность решения целевой задачи для любого потребителя навигационной информации можно повысить за счет использования его индивидуального критерияльного базиса при создании адаптивного алгоритма планирования и обработки навигационных определений, поступающих от приемника сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС). Рассмотрим эту проблему применительно к космическому аппарату дистанционного зондирования Земли (КАДЗЗ).

В практике разработки и эксплуатации навигационно-баллистического обеспечения (НБО) КАДЗЗ утвердилась традиционная схема снабжения потребителей навигационной информацией, при которой система управления движением (СУД), система управления аппаратурой ДЗЗ, наземный комплекс управления (НКУ) и наземный заказчик информации ДЗЗ используют единую навигационную информацию.

Традиционную схему построения НБО КАДЗЗ при использовании СРНС можно проиллюстрировать рисунком 1. Сигналы от СРНС поступают в приемную аппаратуру спутниковой навигации (АСН), где для текущего момента времени  $t_j$  формируются радионавигационные параметры  $D_i(t_j)$  и  $\dot{D}_i(t_j)$  (дальности и скорости их изменения от КАДЗЗ до опрашиваемых  $m$  навигационных спутников, где  $i=1-m$ ) и определяются параметры движения центра масс (ПДЦМ) КАДЗЗ  $q(t_j)$ , которым соответствует корреляционная матрица ошибок их определения  $K_q(t_j)$ . Далее в бортовом комплексе управления (БКУ) программными средствами производится статистическая обработка векторов  $q(t_1), q(t_2), \dots, q(t_N)$  и соответствующих им корреляционных матриц  $K_q(t_1), \dots, K_q(t_N)$ , накопленных на интервале времени  $t_1 - t_N$ , и определяется уточненный вектор ПДЦМ  $q^*(t_N)$ . Этот вектор, найденный, как правило, с использованием стандартного метода взвешенных наименьших квадратов, используется как для различных бортовых систем КАДЗЗ, так и в центре управления полетом (ЦУП) и наземными потребителями информации ДЗЗ. Как следует из вышесказанного, при этом не учитываются индивидуальные потребности каждого пользователя навигационной информации, в том числе по её точности и периодичности использования.

За последние годы в развитии СРНС и совершенствовании АСН произошел большой скачок, при этом потенциально достижимая точность навигационных определений существенно возросла. Однако, несмотря на это, потребность в дальнейшем повышении качества навигационного обеспечения остается весьма актуальной [1]. Использование стандартных подходов при построении алгоритмов обработки измерений, поступающих от АСН, не позволяет использовать существующие резервы для повышения качества навигационных определений. Это вызывает необходимость совершенствования НБО КАДЗЗ. На рис.2 показан предлагаемый в данной работе подход к решению этой проблемы, основная идея которого состоит в том, что в контуре НБО векторы ПДЦМ, поступающие от АСН, должны подвергаться параллельной обработке с использованием критериев, отражающих индивидуальные интересы потребителей навигационной информации.

Для выделенного набора потребителей навигационной информации целесообразно находить уточненные векторы ПДЦМ по следующим критериям:

- для системы управления движением КАДЗЗ используется традиционный критерий, требующий достижения минимума суммы квадратов ошибок по всем компонентам ПДЦМ, взятым с одинаковыми весами (критерий  $I_1$ ):

$$I_1 = \{\Delta q\}^T \{K_q\}^{-1} \{\Delta q\};$$

- для системы управления аппаратурой ДЗЗ могут быть использованы как критерий, минимизирующий промах в определении положения вдоль орбиты на интервале работы аппаратуры ДЗЗ  $\Delta t$

$$I_2 = \Delta t^2,$$

где  $\Delta t$  - ошибка отклонения вектора оценки от истинного вектора положения КАДЗЗ вдоль орбиты по составляющей  $\tau$  в орбитальной системе координат [2], так и критерий, минимизирующий квадрат ошибки  $\Delta(w/d)$  по скорости компенсации продольного сдвига изображения

$$I_3 = [\Delta(w/d)]^2,$$

где  $d$  - дальность до цели,  $w$  - вектор относительной скорости точки пересечения линии визирования «КАДЗЗ-цель» и поверхности Земли на уровне цели и фокальной плоскости приемника движущегося изображения (фокальная плоскость приемника – плоскость, перпендикулярная линии визирования «КАДЗЗ-цель»);

- для наземного комплекса управления важными для использования являются вышеприведенные критерии  $I_1$  и  $I_2$ ;
- для наземных потребителей информации ДЗЗ необходимо иметь ПДДМ, найденные как по критерию  $I_3$ , так и по критерию, отражающему точность в позиционировании КАДЗЗ

$$I_4 = \{\Delta q_n\}^T \{K_{qn}\}^{-1} \{\Delta q_n\},$$

где индекс «n» обозначает использование только проекций вектора положения КАДЗЗ.

Критерии  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , используемые при обработке навигационной информации, порождают различные навигационные оценки  $q_1^*(t_n), q_2^*(t_n), q_3^*(t_n), q_4^*(t_n)$ . При штатных условиях функционирования АСН и достаточно большом количестве вовлекаемых в обработку векторов ПДДМ найденные уточненные оценки практически совпадают и имеют высокую точность. При нештатных условиях работы АСН и малом числе используемых векторов ПДДМ целесообразно организовать их обработку в бортовом комплексе НБО по каждому критерию отдельно для повышения качества навигации и улучшения характеристик функционирования КАДЗЗ и наземного сегмента.

Покажем обоснованность предлагаемого подхода к организации НБО КАДЗЗ и проанализируем влияние вида используемого критериального базиса на результат обработки векторов ПДДМ, полученных от АСН. Для этого рассмотрим вариант построения алгоритма обработки векторов ПДДМ по критерию, обеспечивающему наилучшее сглаживание обрабатываемых векторов ПДДМ с одновременным обеспечением наилучшего качества функционирования систем КАДЗЗ в прогнозе на последующий интервал полета  $[t_n, t_R]$ . Так как критерий

$I_1$  прямо пропорционален ошибке решения навигационной задачи по радиусу-вектору [3], то в дальнейшем для примера рассмотрим критерий вида

$$I = \sum_{j=1}^N \{ \beta [q(t_j, \hat{q}) - q_j]^T [q(t_j, \hat{q}) - q_j] + \alpha [q_1(q_j, \hat{t}) - q_1^*]^2 \} \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - весовые коэффициенты, отвечающие условию:  $\alpha + \beta = 1$ ;  $\hat{q}^*$  - искомый шестимерный вектор навигационной оценки;  $\hat{t}^*$  - время, на которое ищется навигационная оценка  $\hat{q}^*$ ;  $q_j$  - вектор ПДЦМ, поступивший с АСН на момент времени  $t_j$ ;  $q(t_j, \hat{q})$  - вектор навигационной оценки, пересчитанный с момента времени  $\hat{t}^*$  на момент времени  $t_j$ ;  $q_1(q_j, \hat{t})$  - первая компонента вектора ПДЦМ  $q_j$  (проекция на радиус-вектор в ОСК), спрогнозированного на момент времени  $\hat{t}^*$ ;  $q_1^*$  - первая компонента вектора оценки  $\hat{q}^*$ .

Из условия минимума критерия (1) может быть найден уточненный вектор состояния КАДЗЗ, соответствующий принятому компромиссу между двумя слагаемыми (определяемыми значениями весовых коэффициентов). При этом при  $\alpha=0$  и  $\beta=1$  результаты будут соответствовать решению задачи сглаживания (традиционное решение навигационной задачи в НБО); при  $\alpha=1$  и  $\beta=0$  - решение будет обеспечивать получение наивысшей точности только по радиусу-вектору в прогнозе на момент времени  $\hat{t}^*$ .

Общая запись системы уравнений для определения оптимальной оценки  $\hat{q}^*$  имеет вид

$$\sum_{j=1}^N \{ \beta \Phi_1(t_j, \hat{t}) [\Phi_1(t_j, \hat{t}) \hat{q}^* - q_j] + \alpha [q_1(q_j, \hat{t}) - q_1^*] \} = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N \{ \beta \Phi_s(t_j, \hat{t}) [\Phi_s(t_j, \hat{t}) \hat{q}^* - q_j] \} = 0, \quad s = 2+6 \quad (3)$$

где  $\Phi_s(t_p, t_i)$  -  $s$ -ая строка матрицы частных производных  $\Phi(t_p, t_i)$ , позволяющей пересчитывать вектор состояния  $q$  КАДЗЗ с момента  $t_p$  на момент  $t_i$ .

Из решения системы уравнений (2), (3) следует выражение для оценки  $\hat{q}^*$

$$\hat{q}_1^* = \frac{\sum_{j=1}^N \{ \beta \Phi_1(t_j, \hat{t}^*) q(t_j, \hat{q}) + \alpha \Phi_1(\hat{t}^*, t_j) q(q_j, \hat{t}^*) \} - \beta EA^{-1}C}{\beta \left[ \sum_{j=1}^N F_{11}^{(0)} - EA^{-1}D \right] + \alpha N}, \quad (4)$$

$$\| \hat{q}_2^* \hat{q}_3^* \hat{q}_4^* \hat{q}_5^* \hat{q}_6^* \| = A^{-1} (C - D \hat{q}_1^*), \quad (5)$$

где

$$C = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 \Phi_{2m}(t_j, t^*) \cdot q_m^{(j)} \\ \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 \Phi_{6m}(t_j, t^*) \cdot q_m^{(j)} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 \Phi_{2m}(t_j, t^*) \cdot \Phi_{m1}(t_j, t^*) \\ \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 \Phi_{6m}(t_j, t^*) \cdot \Phi_{m1}(t_j, t^*) \end{pmatrix}$$

$$F_{pl}^{(0)} = \sum_{j=1}^N \Phi_{pm}(t_j, t^*) \Phi_{ml}(t_j, t^*); \quad E = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^N F_{12}^{(0)} & \dots & \sum_{j=1}^N F_{16}^{(0)} \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix};$$

$$A = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^6 \Phi_{2m}(t_j, t^*) \Phi_{m2}(t_j, t^*) & \dots & \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^6 \Phi_{2m}(t_j, t^*) \Phi_{m6}(t_j, t^*) \\ \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^6 \Phi_{6m}(t_j, t^*) \Phi_{m2}(t_j, t^*) & \dots & \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^6 \Phi_{6m}(t_j, t^*) \Phi_{m6}(t_j, t^*) \end{pmatrix}$$

С использованием соотношений (4), (5) выполнено численное моделирование процесс определения уточненной оценки ПДЦМ  $q^*$ . В обработку включались 10 векторов ПДЦМ, полученные последовательно с интервалом в 2 минуты в предположении, что результаты работы АСН описываются как стационарный "белый шум" с заданной интенсивностью, соответствующей стандартной результативности работы системы ГЛОНАСС.

Номинальные (истинные) ПДЦМ КА в гринвичской системе координат на момент времени включения аппаратуры ДЗЗ (1680.0 секунд от момента поступления первого навигационного определения от АСН) имеют следующие значения:  $X = -371.706439$  км,  $Y = 3073.853299$  км,  $Z = 5987.729166$  км,  $V_x = -5.643080$  км/с,  $V_y = 4.376140$  км/с,  $V_z = -2.520853$  км/с и соответствующую типовой орбите КАДЗЗ.

Принималось, что включение аппаратуры ДЗЗ (момент времени  $t^*$ ) осуществляется через 10 минут после момента времени определения уточненной оценки  $t_0$  (момента получения последнего вектора ПДЦМ от АСН). Для прогноза движения КАДЗЗ использовалась стандартная модель движения, включающая 16 гармоник потенциала поля притяжения Земли и учитывающая атмосферу Земли.

Вычисления осуществлялись по одинаковым исходным данным для следующих вариантов значений параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  критерия (2):

1 вариант –  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1$  (стандартный вариант обработки векторов ПДЦМ от АСН – критерий соответствует задаче сглаживания результатов измерений; среднеквадратические отклонения ПДЦМ в результате статистической обработки были получены следующими

$$\sigma_x = 0,0073491 \text{ км}, \sigma_y = 0,0061083 \text{ км}, \sigma_z = 0,0111553 \text{ км},$$

$$\sigma_{v_x} = 0,00002 \text{ км/с}, \sigma_{v_y} = 0,00003 \text{ км/с}, \sigma_{v_z} = 0,00005 \text{ км/с};$$

2 – 5 варианты соответствуют использованию смешанного критерия с различными весовыми коэффициентами –  $\alpha = 0,05$ ,  $\beta = 0,95$ ;  $\alpha = 0,1$ ,  $\beta = 0,9$ ;  $\alpha = 0,15$ ,  $\beta = 0,85$ ;  $\alpha = 0,2$ ,  $\beta = 0,8$ .

Результаты расчетов по определению уточненных оценок ПДЦМ, а также отклонений ПДЦМ от номинальных значений представлены, соответственно, в табл. 1 и 2.

Таблица 1

| N<br>вар. | X, км       | Y, км       | Z, км       | V <sub>x</sub> , км/с | V <sub>y</sub> , км/с | V <sub>z</sub> , км/с |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1         | -371,696187 | 3073,854319 | 5987,750046 | -5,643068             | 4,376154              | -2,520824             |
| 2         | -371,697702 | 3073,854474 | 5987,748582 | -5,643068             | 4,376154              | -2,520827             |
| 3         | -371,699384 | 3073,854647 | 5987,746956 | -5,643069             | 4,376153              | -2,520829             |
| 4         | -371,701265 | 3073,854839 | 5987,745139 | -5,643070             | 4,376153              | -2,520832             |
| 5         | -371,703380 | 3073,855056 | 5987,743095 | -5,643071             | 4,376152              | -2,520836             |

Таблица 2

| N<br>вар. | $\Delta X$ , км | $\Delta Y$ , км | $\Delta Z$ , км | $\Delta V_x$ , км/с | $\Delta V_y$ , км/с | $\Delta V_z$ , км/с |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1         | -0,004252       | -0,001020       | 0,020880        | -0,000013           | -0,000015           | -0,000028           |
| 2         | -0,001515       | -0,000162       | 0,001416        | 0,000000            | 0,000000            | 0,000006            |
| 3         | 0,003197        | -0,000330       | 0,003090        | 0,000001            | 0,000001            | 0,000005            |
| 4         | 0,000826        | -0,001540       | -0,015974       | -0,000011           | -0,000013           | -0,000020           |
| 5         | 0,002942        | -0,001757       | -0,013929       | -0,000010           | -0,000013           | -0,000017           |

Как следует из результатов расчетов, приведенных в табл. 1, при использовании различных вариантов критериев оптимальности происходят небольшие изменения компонент уточненной оценки  $q^*$ . При этом отклонения компонент оценок (табл. 2), найденных для сме-

шанного критерия (варианты 2-5), от оценок, полученных для стандартного критерия, незначительны и располагаются в малой окрестности относительно номинальной орбиты, что подтверждает принципиальную возможность использования любой из полученных оценок.

В табл.3 приведены относительные минимальные значения критериев оптимальности, вычисленные при найденных уточненных оценках ПДЦМ, для рассмотренных вариантов моделирования. Эти результаты позволяют оценить сравнительную эффективность применения полученных оценок с позиции наземного потребителя информации ДЗЗ (а также системы управления аппаратурой ДЗЗ) – потребности этих потребителей отражены во втором слагаемом смешанного критерия).

Таблица 3

| Вариант критерия                          | $\alpha = 0,00$<br>$\beta = 1,00$ | $\alpha = 0,05$<br>$\beta = 0,95$ | $\alpha = 0,10$<br>$\beta = 0,90$ | $\alpha = 0,15$<br>$\beta = 0,85$ | $\alpha = 0,20$<br>$\beta = 0,80$ |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Ошибка сглаживания ПДЦМ                   | 1                                 | 1,5                               | 1,6                               | 1,8                               | 1,85                              |
| Ошибка по радиусу-вектору на момент $t^*$ | 1                                 | 0,9                               | 0,7                               | 0,80                              | 0,85                              |

В табл.3 строке приведены нормированные значения ошибки сглаживания ПДЦМ, полученных от АСН (нормирование производится по отношению к значению ошибки сглаживания, найденной для уточненной оценки ПДЦМ в первом варианте), и нормированные значения ошибки по радиусу-вектору на момент времени включения аппаратуры ДЗЗ (нормируется к ошибке по радиусу-вектору, полученной также для первого варианта). Как следует из приведенных результатов, выбором весовых коэффициентов в выражении критерия (1) можно повлиять на перераспределение ошибок между двумя его составляющими. При этом значение ошибок по радиусу-вектору в момент включения аппаратуры ДЗЗ при  $\alpha = 0,1$ ,  $\beta = 0,9$  минимальны и отличаются от ошибок, получаемых при стандартной обработке на 30%. При этом полученный вектор уточненной оценки может быть использован и другими потребителями навигационной информации

Таким образом, предложенный подход к организации процесса получения навигационной информации в НБО может дать значительное улучшение целевых характеристик зондирования с одновременным усложнением алгоритмического бортового обеспечения и повышением загрузки БЦВМ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эльясберг П.Е. Определение движения по результатам измерений. -М.: Наука, 1976.
2. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. -М.: Наука, 1978г.
3. Инженерный справочник по космической технике/ Под ред. А.В Солодовникова. -М.: Воениздат, 1977г.



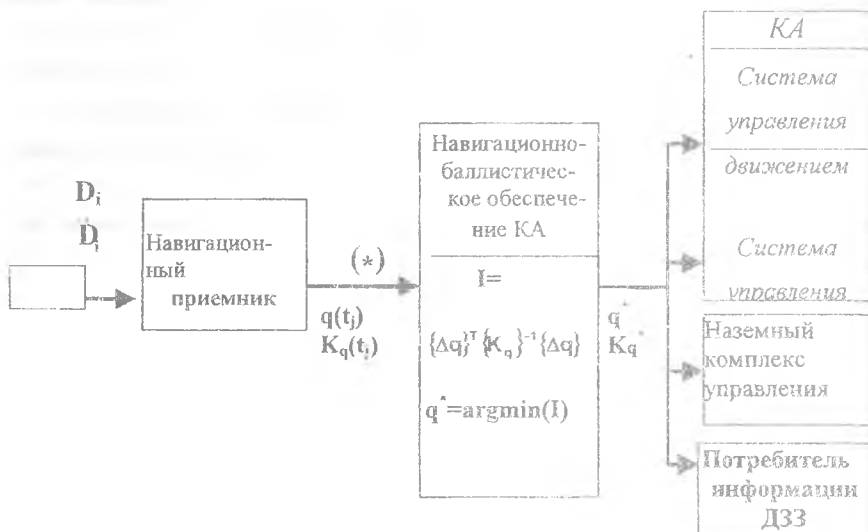


Рис. 1 Традиционная схема НБО КАДЗЗ

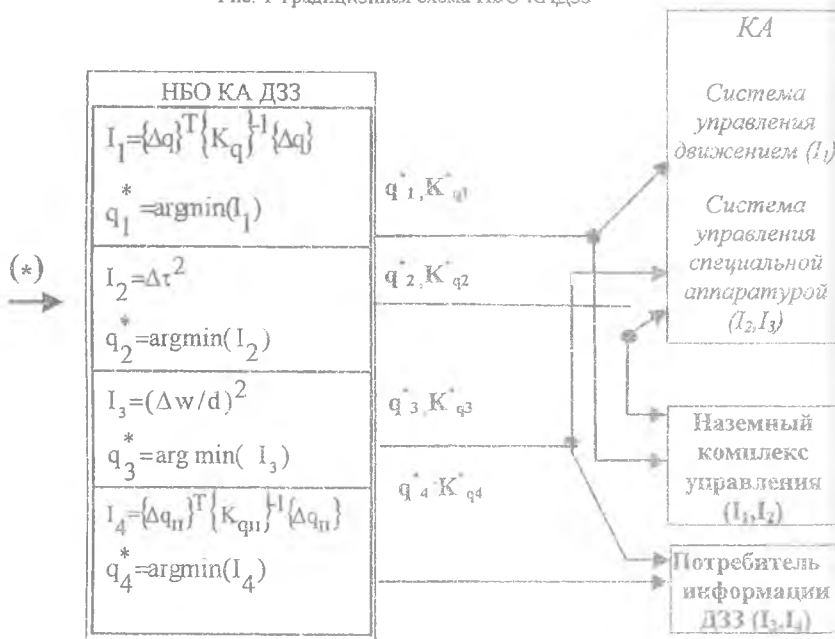


Рис. 2 Предлагаемая схема НБО КАДЗЗ