Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 4(24). C. 117-126. ISSN 2079-6641

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-117-126

УДК 629.7.054.07

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА ПОСРЕДСТВОМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Д. Б. Литвин[1], И. П. Шепеть[2], А. Я Симоновский[1]

[1] Ставропольский государственный аграрный университет, 355017, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический 12, Россия
[2] Технологический институт сервиса (филиал) ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», 355000, СКФО, г. Ставрополь, проспект Кулакова № 41/1, Россия
E-mail: litvin-372@yandex.ru, ship.1963@mail.ru, simonovchkij@mail.ru

Проведен анализ существующего методического аппарата использования акселерометрических систем в инерциальной навигации, показана его ограниченность. Разработана методика оптимального по минимуму дисперсии ошибок использования функциональной избыточности информации, имеющейся в измерениях распределенных акселерометрических систем.

Ключевые слова: распределенная акселерометрическая система, функциональная избыточность информации, инерциальные навигационные системы

MSC 34H05

ESTIMATION OF MOTION PARAMETERS OF AN OBJECT MANAGED BY A DISTRIBUTED ACCELEROMETRIC SYSTEM

D. B. Litvin[1], I. P. Shepet[2], A. Y. Simonovsky[1]

[1] Stavropol State Agrarian University, 355017, Stavropol, trans. Zootechnical 12, Russia
[2] Technological Institute of Service (branch) FSBEI of HE "Don State Technical University 355000, North-Caucasian Federal District, Stavropol, Kulakov Avenue No. 41/1, Russia
E-mail: litvin-372@yandex.ru, ship.1963@mail.ru, simonovchkij@mail.ru

The analysis of the existing methodological apparatus of the use of accelerometric systems in inertial navigation is Carried out, its limitations are shown. The technique of optimal error dispersion to minimize the use of functional redundancy of information available in the measurements of distributed accelerometric systems is developed.

Key words: distributed accelerometric system, functional redundancy of information, inertial navigation systems

Введение

В настоящее время основное внимание уделяется развитию комплексных, в частности инерциально-спутниковых навигационных систем. Спутниковая навигационная система позволяет обеспечить высокоточную периодическую коррекцию инерциальной системы при высокой помехозащищенности линии связи и практически полном отсутствии ограничений на район коррекции. При этом количество и стоимость оборудования, размещаемого на борту летательного аппарата (ЛА), увеличивается незначительно. Указанные обстоятельства вынуждают при заданном уровне точности инерциальных навигационных систем (ИНС) выдвигать более жесткие требования к их массо-габаритным, стоимостным и энергетическим показателям, поскольку ИНС в этом случае используется, по сути, лишь для хранения навигационной информации в промежутках между спутниковыми коррекциями.

Существующие ИНС на основе механических или лазерных кольцевых гироскопов в малой степени удовлетворяют указанным требованиям по той причине, что они дороги в изготовлении, имеют большие размеры, массу и энергопотребление. Анализ состояния и перспектив развития известных схем построения ИНС, а также датчиков первичной информации входящих в их состав, позволяет сделать вывод о том, что наилучшим образом предъявляемым требованиям удовлетворяют безгироскопные, т.е. чисто акселерометрические ИНС (АИНС).

Между тем, существующий научно-методический аппарат использования АИНС не позволяет в должной мере реализовать их преимущества в силу своей ограниченности.

Постановка задачи и методика ее исследования

Рассмотрим некоторую платформу, которая либо жестко связана с объектом, либо установлена на нем в кардановом подвесе. Свяжем с этой платформой правый ортогональный трехгранник Oxyz (рис.). Расположим на платформе в какой-либо ее точке i три однокомпонентных (или один пространственный, трехкомпонентный) линейных акселерометра. При этом, не нарушая общности рассмотрения, будем полагать, что оси чувствительности указанной тройки акселерометров также образуют правую ортогональную систему координат $ix_iy_iz_i$ одинаково ориентированную с системой Oxyz.

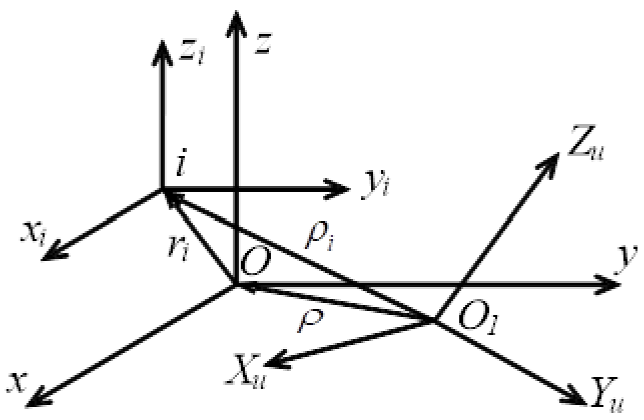

Рисунок. Размещение i-го пространственного акселерометра на объекте

Правой ортогональной системой координат $O_1X_uY_uZ_u$ обозначим инерциальную систему отсчета с началом в центре Земли O_1. Пусть, далее, r_i – радиус-вектор точки i по отношению к точке O, а ρ — радиус-вектор точки O по отношению к центру Земли O_1 . Тогда радиус-вектор точки i по отношению к точке O_1 будет равен

$$\rho_i = \rho + r_i.$$

В этом случае показаниями тройки акселерометров являются проекции основного уравнения инерциальной навигации на оси связанной с платформой системы координат Oxyz:

$$a_i(t) = \frac{d^2\rho_i}{dt^2} - g(\rho_i), \tag{1}$$

где $a_i(t)$ – вектор кажущегося ускорения, измеряемого акселерометрами; $\rho_i(t)$ – радиус-вектор, определяющий координаты местоположения точки i размещения акселерометров в инерциальной системе координат $O_1X_uY_uZ_u$; $g(\rho_i)$ – вектор интенсивности гравитационного поля Земли в i-й точке.

На основании теоремы Кориолиса для ускорения в подвижной системе координат, раскроем абсолютное ускорение i-й точки размещения акселерометров через параметры движения платформы. Тогда выражение (1) запишется в следующем виде [1]:

$$a_i(t) = \ddot{\rho} + \dot{\omega} \times r_i + \omega \times (\omega \times r_i) + 2\omega \times \dot{r}_i + \ddot{r}_i - g(\rho_i), \tag{2}$$

где ω – абсолютная угловая скорость платформы, или системы координат Oxyz, а точкой обозначена операция локального дифференцирования в этой же системе координат Oxyz.

Из выражения (2) видно, что показания акселерометров установленных в i-й точке платформы зависят не только от абсолютного линейного ускорения точки O системы координат Oxyz, связанной с платформой, и вектора $g(\rho_i)$ интенсивности гравитационного поля Земли в i-й точке, но и от параметров углового движения самой платформы в инерциальном пространстве.

Очевидно, что показания другого, j-го пространственного акселерометра (другой тройки однокомпонентных акселерометров) размещаемого в точке j, отличной от i $(r_i \neq r_j)$, будут отличаться от показаний i-го пространственного акселерометра даже при одинаковой ориентации их осей чувствительности по причине неоднородности поля тяготения, вращения трехгранника Oxyz в пространстве, а также из-за нежесткости платформы. Если считать поле тяготения известной функцией точки пространства, то разность показаний акселерометров в точках i и j, вызванную неоднородностью поля тяготения, можно вычислить как функцию координат, определенных инерциальной системой [2].

Таким образом, из сравнения показаний акселерометров в точках i и j в принципе оказывается возможным извлечь информацию об угловом движении платформы (ЛА). Отсюда и следует принципиальная возможность отказа в инерциальных системах от гироскопических чувствительных элементов.

Жестко закрепим на корпусе ЛА или, что все равно, в системе координат Oxyz с ним связанной, в некоторых в общем случае произвольных точках i по линейному трехкомпонентному (пространственному) акселерометру.

Задачей, которую необходимо решить, будем считать задачу определения векторов кажущегося ускорения – a_0 и абсолютной угловой скорости – ω точки O начала координат по измерениям трехкомпонентных линейных акселерометров – a_i.

Для этого приведем векторное уравнение (2) показаний идеального пространственного акселерометра, размещенного в i-й точке системы координат Oxyz, к удобному векторно-матричному виду, заменив операцию векторного произведения двух векторов эквивалентной ей операцией произведения матрицы на вектор [3]:

$$a_i = w_0 + [\varepsilon]\, r_i + [\omega]^2 r_i + 2\,[\omega]\, \dot{r}_i + \ddot{r}_i - g\,(\rho_i)\,, \tag{3}$$

где $\varepsilon = \dot{\omega} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z \end{bmatrix}^T$ – вектор углового ускорения,

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 0 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

– матрица угловых ускорений,

$$[\omega]^2 = \begin{bmatrix} -(\omega_y^2 + \omega_z^2) & \omega_x\omega_y & \omega_x\omega_z \\ \omega_x\omega_y & -(\omega_x^2 + \omega_z^2) & \omega_y\omega_z \\ \omega_x\omega_z & \omega_y\omega_z & -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \tag{5}$$

– матрица квадратов угловых скоростей.

Для жесткой платформы, когда имеют место равенства:

$$\dot{r}_i = \ddot{r}_i = 0, \tag{6}$$

выражение (3) примет вид

$$a_i = w_0 + [\varepsilon]\, r_i + [\omega]^2 r_i - g\,(\rho_i)\,. \tag{7}$$

В равенство (7) входят: a_i - вектор измерения i-го трехкомпонентного акселерометра в Oxyz; $r_i = \begin{bmatrix} r_{ix} & r_{iy} & r_{iz} \end{bmatrix}^T$ – известный радиус-вектор положения i-го акселерометра относительно Oxyz; ε и ω – искомые векторные величины углового ускорения и угловой скорости системы координат Oxyz в инерциальном пространстве; и наконец $g\,(\rho_i)$ – вектор интенсивности гравитационного поля в точке i в проекциях на оси Oxyz.

Элемент $g\,(\rho_i)$, зависящий от координаты i-й точки, представим как сумму

$$g(\rho_i) = g(\rho) + \Delta g_i \tag{8}$$

вектора $g(\rho)$ интенсивности гравитационного поля в точке O – начала системы координат Oxyz, и вектора Δg_i - приращения гравитационного ускорения в точке i по отношению к вектору гравитационного ускорения $g(\rho)$ в точке O.

В дальнейшем изложении будем полагать, что вектор Δg_i, вычисляется как функция известного вектора r_i и параметров ориентации ЛА, т.е. тоже является известным.

На основании выражения (7) запишем

$$A_i = a_0 + [\varepsilon]\, r_i + [\omega]^2 r_i, \tag{9}$$

где

$$A_i = a_i + \Delta g_i \tag{10}$$

– обобщенный вектор измерения идеального пространственного акселерометра размещенного в i-й точке жесткого ЛА;

$$a_0 = w_0 - g(\rho) \tag{11}$$

– вектор кажущегося ускорения точки O, начала системы Oxyz.

В обобщенном измерении (10) уже учтена поправка на отличие вектора интенсивности гравитационного поля в i-й точке от значения этого же вектора в точке O.

Выражение (9) связывает известные векторные величины: A_i – обобщенное измерение пространственного акселерометра и r_i – радиус-вектор размещения его в системе Oxyz, с искомыми параметрами линейного a_0 и углового ε, ω движения ЛА.

Приступим теперь к решению своей главной задачи, к задаче отыскания вектора кажущегося ускорения a_0 и параметров углового движения ε, ω объекта по измерениям распределенной акселерометрической системы (РАС) произвольной конфигурации.

Введем обозначение

$$S = [\varepsilon] + [\omega]^2 \tag{12}$$

– матрица параметров углового движения ЛА.

Тогда показания идеального пространственного акселерометра, размещенного на жесткой платформе, примут вид

$$A_i = a_0 + S \cdot r_i \tag{13}$$

Далее обозначим:

$$S_\Sigma = \left[\begin{array}{ccc} a_0 & \vdots & S \end{array}\right] = \begin{bmatrix} a_{0x} & s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ a_{0y} & s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ a_{0z} & s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \tag{14}$$

– блочная матрица первичных навигационных параметров;

$$R_i = \begin{bmatrix} 1 & r_{ix} & r_{iy} & r_{iz} \end{bmatrix}^T \tag{15}$$

– обобщенный радиус-вектор положения i-го акселерометра в Oxyz.

Тогда выражение (13) примет вид

$$A_i = S_\Sigma \cdot R_i, \tag{16}$$

или в координатной форме записи

$$\begin{bmatrix} A_{ix} \\ A_{iy} \\ A_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{0x} & s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ a_{0y} & s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ a_{0z} & s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ r_{ix} \\ r_{iy} \\ r_{iz} \end{bmatrix}. \tag{17}$$

В векторное равенство (16) входят: A_i – известный обобщенный вектор измерения i-го идеального трехкомпонентного акселерометра, представляющий собой сумму непосредственно измеряемого вектора a_i и вычисляемого вектора Δg_i (см.(9)), R_i – известный обобщенный радиус-вектор положения i-го акселерометра в связанной с объектом системе координат и обобщенная матрица первичных параметров движения объекта – S_{Σ}, подлежащая определению.

Очевидно, что уравнение (16) или (17) непосредственно не разрешимо относительно матрицы S_{Σ}. В самом деле, по обобщенному вектору измерения одного i-го акселерометра A_i размерностью 3х1 невозможно вычислить матрицу S_{Σ} размерностью 3х4. Для этого необходимо использовать несколько измерителей, определенным образом размещенных на ЛА, и представляющих собой единую измерительную систему.

Используя соотношения (17), показания такой системы состоящей из m акселерометров, представим в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} A_{1x} & \cdots & A_{mx} \\ A_{1y} & \cdots & A_{my} \\ A_{1z} & \cdots & A_{mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{0x} & s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ a_{0y} & s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ a_{0z} & s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ r_{1x} & \cdots & r_{mx} \\ r_{1y} & \cdots & r_{my} \\ r_{1z} & \cdots & r_{mz} \end{bmatrix} \tag{18}$$

или в компактной матричной форме:

$$A = S_{\Sigma} \cdot R, \tag{19}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} A_{1x} & \cdots & A_{mx} \\ A_{1y} & \cdots & A_{my} \\ A_{1z} & \cdots & A_{mz} \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ r_{1x} & \cdots & r_{mx} \\ r_{1y} & \cdots & r_{my} \\ r_{1z} & \cdots & r_{mz} \end{bmatrix} \tag{20}$$

– матрицы измерений и конфигурации РАС соответственно.

Искомую обобщенную матрицу S_{Σ} параметров движения ЛА по измерениям РАС A вычислим следующим образом

$$S_{\Sigma} = A \cdot R^{+}, \tag{21}$$

где

$$R^{+} = R^{T} (R \cdot R^{T})^{-1}. \tag{22}$$

При этом необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\det\left(R \cdot R^{T}\right) \neq 0 \tag{23}$$

Для выполнения этого условия в составе РАС необходимо иметь, по меньшей мере, четыре пространственных (трехкомпонентных) акселерометра. Причем эти акселерометры не должны располагаться в одной плоскости.

После определения матрицы S_{Σ} сразу же становится известным вектор a_0 кажущегося ускорения, который представляет собой первый столбец этой матрицы (см. (14)), и матрица первичных параметров углового движения объекта S (см. (12)), размерностью 3х3. Причем информация, содержащаяся в матрице S, является функционально избыточной для определения вектора угловой скорости объекта.

Для рационального использования указанной избыточности предлагается следующая методика.

Принимая во внимание, что матрица углового ускорения $[\varepsilon]$- кососимметрическая (см. (4)), а матрица квадратов угловых скоростей $[\omega]^2$ - симметрическая (см. (5)), выделим их из S следующим образом:

$$[\varepsilon] = \frac{1}{2}\left(S - S^T\right), \quad [\omega]^2 = \frac{1}{2}\left(S + S^T\right). \tag{24}$$

Далее встает непосредственно вопрос об определении по этим матрицам вектора угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$. Последний же, очевидно, может быть вычислен несколькими различными способами.

Первый из них – наиболее универсальный, основан на использовании вектора углового ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}$, который известен, коль скоро известна кососимметрическая матрица $[\varepsilon]$. Этот способ заключается в решении следующего линейного дифференциального уравнения в реальном масштабе времени:

$$\dot{\omega}(t) = \varepsilon(t), \quad \omega(t_0) = \omega_0. \tag{25}$$

Существенным недостатком данного способа, ограничивающим его применение, является непрерывное накопление ошибок интегрирования во времени.

От этого недостатка избавлены другие способы определения вектора угловой скорости основанные на использовании тех или иных элементов матрицы квадратов угловых скоростей $[\omega]^2$. Например, по диагональным элементам матрицы $[\omega]^2$ вектор угловой скорости может быть вычислен следующим образом (см. (5))

$$\begin{bmatrix} |\omega_x| \\ |\omega_y| \\ |\omega_z| \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{k_{22} + k_{33} - k_{11}} \\ \sqrt{k_{11} + k_{33} - k_{22}} \\ \sqrt{k_{11} + k_{22} - k_{33}} \end{bmatrix}, \tag{26}$$

а по внедиагональным элементам $[\omega]^2$ следующим образом

$$\begin{bmatrix} |\omega_x| \\ |\omega_y| \\ |\omega_z| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{k_{12}k_{13}/k_{23}} \\ \sqrt{k_{12}k_{23}/k_{13}} \\ \sqrt{k_{13}k_{23}/k_{12}} \end{bmatrix} \tag{27}$$

где k_{ij} – соответствующие элементы матрицы $[\omega]^2$.

Существуют и другие способы вычисления вектора угловой скорости по элементам матрицы $[\omega]^2$, например, с использованием элементов какой-либо строки или столбца. Однако, как нетрудно убедиться, все способы вычисления вектора угловой скорости по элементам матрицы $[\omega]^2$ позволяют вычислять лишь модули проекций вектора угловой скорости на оси x, y, z. А для определения знака, необходимо одновременно производить вычисления по первому (25) и одному из указанных способов [2].

Суть предлагаемой методики оценивания вектора угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ заключается в том, что наличие функциональной избыточности информации об угловом движении следует рассматривать как наличие нескольких элементарных, не избыточных измерителей одной и той же информации. А задачу оценивания $\boldsymbol{\omega}$ как задачу комплексного использования этих элементарных измерителей.

На основании выражения (19) запишем

$$S^*_\Sigma = A^* R^+ = S_\Sigma + \Delta S_\Sigma, \tag{28}$$

где $\Delta S_{\sum} = \Xi R^{+}$, а Ξ – матрица ошибок измерения РАС размерностью $3 \times m$.

Раздельно для вектора a_0 кажущегося ускорения и матрицы S параметров углового движения, в соответствии с формулой (14), запишем

$$a_0^{*} = A^{*} \cdot R^{+}(:,1) = a_0 + \Delta a_0; \tag{29}$$

где

$$\Delta a_0 = \Xi \cdot R^{+}(:,1), \Delta S = \Xi \cdot R^{+}(:,2:4), \tag{30}$$

$R^{+}(:,1)$ и $R^{+}(:,2:4)$ – соответственно первый столбец размерностью $m \times 1$ и матрица размерностью $m \times 3$, полученные из матрицы R^{+}.

Тогда матрицы $[\varepsilon^{*}]$ и $[\omega^{*}]^2$, найденные по показаниям не идеальной РАС, с использованием выражений (24), примут вид

$$[\varepsilon^{*}] = \frac{1}{2}\left(S^{*} - S^{*T}\right) = [\varepsilon] + \Delta[\varepsilon] \tag{31}$$

$$[\omega^{*}]^2 = \frac{1}{2}\left(S^{*} + S^{*T}\right) = [\omega]^2 + \Delta[\omega]^2 \tag{32}$$

где

$$\Delta[\varepsilon] = \frac{1}{2}\left(\Delta S - \Delta S^{T}\right), \qquad \Delta[\omega]^2 = \frac{1}{2}\left(\Delta S + \Delta S^{T}\right) \tag{33}$$

Для нахождения оптимальной, точнее субоптимальной, оценки вектора угловой скорости $\hat{\omega}$, в смысле минимума дисперсии ошибок оценивания, из матриц (31), (32) используем прием, основанный на принципе перераспределения информации [4].

Известное уравнение

$$\dot{\omega}(t) = \varepsilon(t), \omega(t_0) = \omega_0, \tag{34}$$

будем рассматривать как линейное дифференциальное уравнение движения объекта вида

$$\dot{x} = Fx + Bu + w, \tag{35}$$

где под вектором состояния x будем понимать трехкомпонентный вектор угловой скорости ω

$$x = \omega = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^{T}, \tag{36}$$

а под вектором управления u – вектор углового ускорения ε

$$u = \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z \end{bmatrix}^{T}. \tag{37}$$

При этом, матрица динамики F - нулевая, а матрица управления B – единичная. Тогда на основании выражения (36),

$$w = \Delta\varepsilon, \tag{38}$$

То есть, ошибки измерения вектора углового ускорения $\Delta\varepsilon$ представим как возмущения w, действующие на объект (35).

В этом случае уравнение (36) движения объекта запишем в следующем конкретном виде

$$\dot{\omega} = \varepsilon^{*} = \varepsilon + \Delta\varepsilon. \tag{39}$$

В качестве же нелинейной векторной функции измерений

$$z = h(\omega) + \upsilon \tag{40}$$

для объекта (40) будем рассматривать вектор, состоящий из независимых коэффициентов матрицы $[\omega^*]^2$, которых шесть (см.(5))

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\omega_y^2+\omega_z^2\right) \\ -\left(\omega_x^2+\omega_z^2\right) \\ -\left(\omega_x^2+\omega_y^2\right) \\ \omega_x\omega_y \\ \omega_x\omega_z \\ \omega_y\omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \upsilon_1 \\ \upsilon_2 \\ \upsilon_3 \\ \upsilon_4 \\ \upsilon_5 \\ \upsilon_6 \end{bmatrix}, \tag{41}$$

где компоненты шестимерного вектора υ ошибок измерений определяются соответствующими коэффициентами матрицы $[\Delta\omega]^2$ (см.(34)).

Если ковариационные функции измерительных ошибок используемых в составе РАС акселерометров полагать известными, то, на основании выражений (30) и (34), становятся известными и ковариационные матрицы возмущений Q и ошибок измерений $R_ш$ [5]

$$Q = M\left\{w(t_1)\cdot w^T(t_2)\right\}, \quad R_{\text{ш}} = M\left\{\upsilon(t_1)\cdot\upsilon^T(t_2)\right\}. \tag{42}$$

Тогда задачу комплексного использования всей имеющейся информации об угловом движении объекта, измеряемой посредством неподвижно размещенной на объекте РАС, можно решить с использованием субоптимального фильтра Калмана, который для выражений (40), (42), (43), примет следующий вид [4]:

$$\dot{\omega} = u + P\left(\frac{\partial h}{\partial\hat{\omega}}\right)^T R_{\text{ш}}^{-1}\left[z - h(\hat{\omega})\right], \tag{43}$$

$$\dot{P} = -P\left(\frac{\partial h}{\partial\hat{\omega}}\right)^T R_{\text{ш}}^{-1}\frac{\partial h}{\partial\hat{\omega}}P + Q, \tag{44}$$

где

$$P = M\left\{\Delta\omega(t_1)\cdot\Delta\omega^T(t_2)\right\} \tag{45}$$

– ковариационная матрица ошибок оценивания вектора ω;

$$\frac{\partial h}{\partial\hat{\omega}} = \begin{bmatrix} 0 & -2\hat{\omega}_x & -2\hat{\omega}_x & \hat{\omega}_y & \hat{\omega}_z & 0 \\ -2\hat{\omega}_y & 0 & -2\hat{\omega}_y & \hat{\omega}_x & 0 & \hat{\omega}_z \\ -2\hat{\omega}_z & -2\hat{\omega}_z & 0 & 0 & \hat{\omega}_x & \hat{\omega}_y \end{bmatrix}^T \tag{46}$$

– матрица Якоби функции измерения (42).

Заключение

Приведенная здесь методика оценивания угловой скорости отличается от известных [2, 6-8] тем, что позволяет субоптимальным образом комплексно использовать всю имеющуюся об угловом движении информацию, которая вообще может быть получена от жестко размещенных на объекте пространственных акселерометров.

Таким образом, предложенная в данной работе методика позволяет оптимально, по критерию минимума дисперсии ошибок, использовать функциональную избыточность, имеющуюся в показаниях неподвижно размещенной РАС, для оценивания первичных навигационных параметров объекта.

Список литературы

[1] Березкин Е. Н., *Лекции по теоретической механике в двух частях*, Издательство Московского университета, М., 1986, 314 с. [Berezkin E. N., *Lekcii po teoreticheskoj mekhanike v dvuh chastyah*, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, M., 1986, 314 pp.]

[2] Андреев В. Д., *Теория инерциальной навигации. Автономные системы*, Наука, М., 1966, 579 с. [Andreev V. D., *Teoriya inercial'noj navigacii. Avtonomnye sistemy*, Nauka, M., 1966, 579 pp.]

[3] Лурье Л. И., *Аналитическая механика*, Гл. ред. физ.-мат. лит., М., 1961, 824 с. [Lur'e L. I., *Analiticheskaya mekhanika*, Gl. red. fiz.-mat. lit., M., 1961, 824 pp.]

[4] Красовский А. А., *Справочник по теории автоматического управления*, Наука, М., 1987, 712 с. [Krasovskij A. A., *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya*, Nauka, M., 1987, 712 pp.]

[5] Кочетков Ю. А., *Основы автоматики авиационного оборудования*, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, М., 1975, 446 с. [Kochetkov YU. A., *Osnovy avtomatiki aviacionnogo oborudovaniya*, VVIA im. prof. N.E. ZHukovskogo, M., 1975, 446 pp.]

[6] Боднер В. А., Селезнев В. П., "К теории инерциальных систем без гиростабилизированной платформы", *Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика*, 1961, № 1. [Bodner V. A., Seleznev V. P., "K teorii inercial'nyh sistem bez girostabilizirovannoj platformy", *Izv. AN SSSR. OTN. EHnergetika i avtomatika*, 1961, № 1].

[7] Красовский А. А., "Аналитическая юстировка БИНС акселерометрического типа", *Изв. РАН. Техн. Кибернетика*, 1993, № 6. [Krasovskij A. A., "Analiticheskaya yustirovka BINS akselerometricheskogo tipa", *Izv. RAN. Tekhn. Kibernetika*, 1993, № 6].

[8] Красовский А. А., "Основы теории акселерометрических бесплатформенных инерциальных систем", *Изв. РАН. Техн. Кибернетика*, 1994, № 4. [Krasovskij A. A., "Osnovy teorii akselerometricheskih besplatformennyh inercial'nyh sistem", *Izv. RAN. Tekhn. Kibernetika*, 1994, № 4].

Для цитирования: Литвин Д. Б., Шепеть И. П., Симоновский А. Я. Оценивание параметров движения управляемого объекта посредством распределенной акселерометрической системы // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 4(24). C. 117-126. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-117-126

For citation: Litvin D. B., Shepet I. P., Simonovsky A. Y. Estimation of motion parameters of an object managed by a distributed accelerometric system, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **24**: 4, 117-126. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-117-126

Поступила в редакцию / Original article submitted: 13.07.2018