

Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, Б. А. БЛАЖНОВ, А. П. СТЕПАНОВ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЕ

Исследуются алгоритмы и погрешности интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) на основе бескарданного инерциального измерительного модуля (БИИМ) на микромеханических датчиках (ММД) и двух модулей приемной аппаратуры (ПА) спутниковых навигационных систем (СНС) с разнесенными антеннами в целях формирования фазовых измерений спутниковой навигационной системы.

Для совместной обработки данных в ИСОН, построенной по сильносвязанной схеме, используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния системы. Приводятся результаты камеральной обработки данных автомобильных испытаний опытного образца БИИМ на ММД (разработка ЦНИИ «Электроприбор») и модуля ПА СНС с двумя приемниками (разработка РИРВ).

Введение

Одной из проблем на пути создания малогабаритной и недорогой ИСОН для подвижных объектов различного назначения на базе БИИМ, содержащего измерительный блок на ММД (нестабильность дрейфов микромеханических гироскопов в настоящее время составляет 0.01...0.1 град/с), и ПА (приемная аппаратура) СНС является обеспечение требований по точности выработки курса.

Проблему обеспечения требований по курсу в ИСОН с БИИМ низкого уровня точности в последнее время пытаются решить, в частности, за счет создания для подвижных объектов ПА СНС с фазовыми измерениями и разнесенными антеннами.

Известна интегрированная система Seapath 200 [1] норвежской фирмы Seatex AS для морских судов, которая использует мультиантенную ПА СНС с фазовыми измерениями на несущей частоте.

Из отечественных разработок следует выделить аналогичную мультиантенную ПА СНС МРК-32 [2], использующую фазовые измерения (разработка Красноярского государственного технического университета и НИИ радиотехники). В известных схемах построения ИСОН [1–3] используется мультиантенная ПА СНС с фазовыми измерениями, обеспечивающая с определенной дискретностью автономную выработку параметров ориентации объекта. Эта задача, как известно, требует решения проблемы неоднозначности фазовых измерений.

Емельянецв Геннадий Иванович. Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Блажнов Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Степанов Алексей Петрович. Инженер 1 категории ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Известны различные способы решения данной проблемы [4, 6-8]. Все из них требуют одновременного наблюдения и обработки фазовых измерений от группировки навигационных спутников (HC_i), достаточно сложного программного обеспечения и существенной задержки времени.

Совместная обработка данных БИИМ и ПА СНС в рассматриваемых схемах ИСОН производится на уровне параметров ориентации.

Постановка задачи, исходные положения

В данной работе рассматривается структура построения и алгоритмическое обеспечение ИСОН, построенной по сильносвязанной схеме. При этом особое внимание уделяется проблеме повышения точности в решении задачи ориентации объекта (прежде всего по курсу) за счет использования вторых разностей фазовых измерений на разнесенные антенны.

В состав ИСОН входят БИИМ на ММД (разработчик ЦНИИ «Электроприбор») и ПА СНС (разработчик ОАО «РИРВ»). Бескарданный ИИМ (рис. 1) состоит из корпуса, платы чувствительных элементов (ЧЭ), на которой размещены гироскопы (дрейф 0.1, 0.07 град/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$) и акселерометры (погрешности 0.03, 0.02 м/с²/ $\sqrt{\text{Гц}}$) с обеспечивающей электроникой, и платы НС, содержащей контроллер на базе сигнального процессора TMS320F2812, осуществляющий обработку навигационной информации.

Для формирования вторых разностей фазовых измерений ПА СНС содержит две пространственно разнесенные антенны и два подключенных к ним идентичных модуля приемовычислительных (МПВ1 и МПВ2) типа 2К-363-62.

Спецвычислители БИИМ (на базе процессора TMS320F2812) и МПВ1 (на базе процессора TMS320VC5416ZGU) связаны синхронным последовательным интерфейсом (SPI). Алгоритмы реального времени, реализованные в вычислителе БИИМ, позволяют решать задачи ориентации и навигации с частотой 100 Гц при поступлении данных от ПА СНС с частотой до 5 Гц.

Алгоритмы реального времени, реализованные в вычислителях МПВ1 и МПВ2 позволяют решать задачу определения координат, скорости и времени (КСВ–решение) по сигналам СНС с частотой до 5 Гц и формировать при этом «сырые данные» СНС (псевдодальности и скорости изменения псевдодальностей) с частотой до 10 Гц. МПВ формируют также импульсный периодический сигнал «1 Гц». Сигнал «1 Гц» из МПВ1 подается в БИИМ для обеспечения синхронизации информационных потоков.

Для интеграции данных БИИМ и ПА СНС в вычислителе БИИМ реализован алгоритм обобщенного фильтра Калмана, обеспечивающий оценку погрешностей БИИМ для их коррекции в обратной связи. При этом в реальном времени в настоящее время реализован алгоритм совместной обработки данных БИИМ и ПА СНС по составляющим вектора линейной скорости и координатам места, а в камеральном режиме – по первичным навигационным параметрам (дальностям и радиальным скоростям) и вторым разностям фазовых измерений.

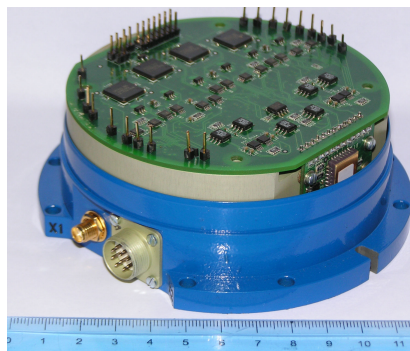


Рис. 1. Бескарданный ИИМ на ММД

Для поддержки работы МПВ1 в реальном времени в него от ИИМ в темпе 100 Гц передаются данные о составляющим вектора линейной скорости и координатах местоположения объекта. Эти данные в вычислителе МПВ1 пересчитываются в радиальные псевдоскорости для всех навигационных спутников (HC_i) СНС, которые используются как целеуказания в следящих измерителях радионавигационных параметров, что позволяет сузить их полосы и повысить помехозащищенность ПА СНС, а также в алгоритме поиска сигналов HC_i , что позволяет сократить время восстановления сопровождения сигналов HC_i после их кратковременного пропадания, вызванного затенением или действием помех.

Для повышения точности ИСОН в выработке параметров ориентации объекта привлекаются вторые разности фазовых измерений от ПА СНС для различных пар HC_i , при этом исключение неоднозначностей фазовых измерений осуществляется с опорой на данные БИИМ.

Алгоритмическое обеспечение задач совместной обработки данных БИИМ и ПА СНС

Формирование разностных измерений для задачи навигации

$$\begin{aligned} z_{\rho_i}(k+1) &= \rho_{i_pr}(k+1) - \rho_{i_z}(k+1), \\ z_{\dot{\rho}_i}(k+1) &= [\nabla \rho_{i_pr}(k+1) - \nabla \rho_{i_z}(k+1)] / Tz, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_{i_pr} и $\nabla \rho_{i_pr} = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{\rho}_{i_pr} dt$ – расчетные значения дальностей и их приращений на интервале Tz измерений для каждого HC_i , полученные по данным БИИМ и эфемеридной информации для HC_i и приведенные к точке расположения опорной антенны ПА СНС, здесь $\dot{\rho}_{i_pr}$ – текущее расчетное значение радиальной скорости для HC_i ; ρ_{i_z} , $\nabla \rho_{i_z}$ – измеренные и откорректированные (с учетом поправок на тропосферную и ионосферную задержки, сдвиг шкал времени HC_i и ПА СНС и привязки к моменту обсервации) в ПА СНС значения дальностей и их приращений на интервале Tz :

$$\begin{aligned} \rho_{i_z}(k+1) &= \rho_{i_m}(k+1) + \delta D + \varepsilon_{\rho_i}, \\ \nabla \rho_{i_z}(k+1) &= \nabla \rho_{i_m}(k+1) + \delta \dot{D} \cdot Tz + \varepsilon_{\nabla \rho_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ_{i_m} , $\nabla \rho_{i_m}$ – истинные значения дальностей и их приращений; δD , $\delta \dot{D}$ – смещения соответственно шкалы времени (в единицах дальности) и частоты опорного генератора (в единицах радиальной скорости) в ПА СНС относительно данных HC_i ; ε_{ρ_i} , $\varepsilon_{\nabla \rho_i}$ – шумы ПА СНС,

Полагая погрешности выходных данных БИИМ малыми, расчетные значения дальностей и их приращений на интервале Tz можно представить в виде ряда и ограничиться линейными членами. Линеаризованные значения разностных измерений (1) могут быть приведены к виду [5]:

$$z_{\rho_i}(k+1) = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \rho_i}{\partial e_j}(k+1) \cdot \Delta e_j - \delta D + v_{\rho_i},$$

$$z_{\dot{\rho}_i}(k+1) = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \dot{\rho}_i}{\partial e_j}(k+1) \cdot \Delta e_j + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \dot{\rho}_i}{\partial \dot{e}_j}(k+1) \cdot \Delta \dot{e}_j - \delta \dot{D} + v_{\dot{\rho}_i}. \quad (3)$$

Здесь для частных производных (их осредненных значений на интервале T_z) имеют место следующие выражения:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial e_j}(k+1) = \frac{\partial \dot{\rho}_i}{\partial \dot{e}_j}(k+1) = -\frac{e_{ji} - e_{j_pr}}{\rho_{i_pr}},$$

$$\frac{\partial \dot{\rho}_i}{\partial e_j}(k+1) = \frac{\dot{\rho}_{i_pr}}{\rho_{i_pr}^2}(e_{ji} - e_{j_pr}) - \frac{1}{\rho_{i_pr}}(\dot{e}_{ji} - \dot{e}_{j_pr}); (j=1,2,3),$$

где e_{ji} и $\dot{e}_{ji}$ ($j=1,2,3$) – значения декартовых координат и составляющих вектора линейной скорости HC_i относительно Земли в проекциях на гринвичские оси (эфемеридная информация, поступающая от ПА СНС); e_{j_pr} , $\dot{e}_{j_pr}$ и $\Delta e_j, \Delta \dot{e}_j$ ($j=1,2,3$) – соответственно приборные значения декартовых координат и составляющих вектора линейной скорости объекта относительно Земли в проекциях на гринвичские оси (поступают от БИИМ) и их погрешности; $v_{\rho_i}, v_{\dot{\rho}_i}$ – шумы измерений, были аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями на частоте $1/T_z$.

Погрешности $\Delta e_j, \Delta \dot{e}_j$, ($j=1,2,3$) БИИМ были представлены через погрешности $\Delta \phi, \Delta \lambda, \Delta h$ выработки географических координат места и погрешности $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_H$ в выработке составляющих вектора относительной линейной скорости объекта в проекциях на географические оси, что соответствующим образом нашло отражение в описании элементов матрицы H_{k+1} измерений.

Для вторых разностей **измеренных значений** фазовых измерений имеем

$$\nabla s_{i,i+1}^{bl(z)} = s_i^{bl(z)} - s_{i+1}^{bl(z)}, \quad (4)$$

где $s_i^{bl(z)}$ – вычисленное по измерениям разности фаз сигнала HC_i на разнесенные антенны значение направляющего косинуса орта $\vec{s}_i$ (задающего направление на HC_i) относительно базы $\vec{b}_1$.

Следует заметить, что формирование вторых разностей фазовых измерений необходимо для исключения влияния расхождения шкал времени опорных генераторов приемников СНС в точках размещения опорной антенны $A_{оп}$ и отнесенной A_1 . С другой стороны, располагая данными о декартовых координатах $[e_{1pr}; e_{2pr}; e_{3pr}]$, параметрах ориентации (матрице ориентации $C_{o,h_pr}(K, \psi, \theta)$) точки размещения на объекте опорной $A_{оп}$ антенны (от БИИМ) и известными эфемеридами $[e_{1i}; e_{2i}; e_{3i}]$ HC_i (от ПА СНС) в гринвичской системе координат, можно рассчитать направляющие косинусы орта $\vec{s}_i$ соответственно в гринвичской, географической и связанной с объектом системах координат

$$\vec{s}_{ie_pr} = \frac{1}{\sqrt{(e_{1i} - e_{1pr})^2 + (e_{2i} - e_{2pr})^2 + (e_{3i} - e_{3pr})^2}} \begin{bmatrix} e_{1i} - e_{1pr} \\ e_{2i} - e_{2pr} \\ e_{3i} - e_{3pr} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\vec{s}_{ih_pr} = C_{e,h_pr} \cdot \vec{s}_{ie_pr}; \quad (6)$$

$$\vec{s}_{io} = (C_{o,h_pr})^T \cdot \vec{s}_{ih_pr}, \quad (7)$$

где $C_{e,h_pr}(\lambda, \varphi)$ – матрица перехода от гринвичского навигационного трехгранника к географическим осям) и сформировать **расчетное значение** направляющего косинуса орта $\vec{s}_i$ относительно базы $\vec{b}_1$

$$s_i^{bl(R)} = (\vec{b}_{1o}^{ort})^T \cdot \vec{s}_{io_pr}. \quad (8)$$

Значения $\vec{b}_{1o}^{ort}$ направляющих косинусов вектора $\vec{b}_1$ в связанных с объектом осях будут равны

$$\vec{b}_{1o}^{ort} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_{A_1} - x_{A_{on}})^2 + (y_{A_1} - y_{A_{on}})^2 + (z_{A_1} - z_{A_{on}})^2}} \begin{bmatrix} x_{A_1} - x_{A_{on}} \\ y_{A_1} - y_{A_{on}} \\ z_{A_1} - z_{A_{on}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $[x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}]^T, [x_{A_{on}}, y_{A_{on}}, z_{A_{on}}]^T$ – декартовы координаты точки расположения антенн A_1, A_{on} относительно ц. м. объекта в связанных осях.

Соответственно для вторых разностей **расчетных значений** фазовых измерений получим

$$\nabla s_{i,i+1}^{bl(R)} = s_i^{bl(R)} - s_{i+1}^{bl(R)}. \quad (10)$$

Сравнивая **расчетные** и **измеренные значения** вторых разностей фазовых измерений, можно сформировать искомые разностные измерения

$$Z_{i,i+1}^{bl} = \nabla s_{i,i+1}^{bl(R)} - \nabla s_{i,i+1}^{bl(z)}, \quad (11)$$

которые содержат с соответствующими весами в основном погрешности решения БИИМ задачи ориентации объекта (погрешности $\Delta C_{o,h_pr}$ матрицы ориентации, однозначно связанные с погрешностями аналитического построения географического сопровождающего трехгранника: α, β, γ , где α – погрешность по курсу; β, γ – погрешности построения вертикали места), погрешности Δb_{1x}^{ort} , Δb_{1z}^{ort} ориентации базы $\vec{b}_1$ относительно связанных с объектом осей, неоднозначности вторых разностей фазовых измерений $(\lambda_{i+1}\eta_{i+1} - \lambda_i\eta_i)/|\vec{b}_1|$, где λ_i – длина волны излучаемого HC_i сигнала; η_i – целое число длин волн – собственно неоднозначность в фазовых измерениях, и шумы измерений.

Полагая начальные погрешности БИИМ по навигационным параметрам и параметрам ориентации объекта в пределах малости (например, по курсу $\sim 5^0$

при использовании магнитных датчиков, по углам качки 3^0), можно допустить линейаризацию измерений (11). При этом вклад погрешностей ИИМ в измерения (11) при сделанных допущениях и длине базы в пределах 2..3 м не будет превышать длины волны излучаемого HC_i сигнала.

Предварительная обработка разностных измерений (11) заключается в исключении исходной неоднозначности фазовых измерений. Так как априори известно, что составляющая измерений, связанная с погрешностями БИИМ, вместе с шумами составляет менее одной длины волны излучаемого HC_i сигнала в значениях приведенного измерения $Z_{i,i+1}^{b1} \cdot |\vec{b}_1|$, то, исключая целое число $(\eta_{i+1} - \eta_i)$ из значения $Z_{i,i+1}^{b1} \cdot |\vec{b}_1| / \lambda_{i+1}$ и оставляя его дробную часть $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1} \cdot |\vec{b}_1| / \lambda_{i+1}$, тем самым исключается из восстановленных измерений $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$ (с учетом сохранения знака $Z_{i,i+1}^{b1}$) неоднозначность фазовых измерений до уровня $\delta\lambda_{i+1}\eta_i / |\vec{b}_1|$, где $\delta\lambda_{i+1} = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ – различие в длине волны излучаемых HC_i сигналов. Остаточная неоднозначность фазовых измерений в пределах одной длины волны включается в число оцениваемых параметров.

Измерения $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$ вместе с разностными измерениями по навигационным параметрам (1) поступают для последующей обработки с использованием алгоритмов фильтра Калмана.

Оценки, выработанные в ФК, поступают в обратную связь для коррекции погрешностей БИИМ в выработке параметров ориентации и навигационных параметров, компенсации погрешностей гироскопов и акселерометров, а также коррекции измерений $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$ в части их остаточной неоднозначности и погрешностей ориентации базы $\vec{b}_1$ относительно связанных с объектом осей.

При разнесении двух антенн ПА СНС в осях объекта номинальные $\vec{b}_{lo_m}^{ort}$ и приборные $\vec{b}_{lo_pr}^{ort}$ значения направляющих косинусов вектора $\vec{b}_1$ в связанных с объектом осях будут равны

$$\vec{b}_{lo_m}^{ort} = \begin{bmatrix} b_{1x_m}^{ort} \\ b_{1y_m}^{ort} \\ b_{1z_m}^{ort} \end{bmatrix}, \quad \vec{b}_{lo_pr}^{ort} = \vec{b}_{lo_m}^{ort} + \Delta\vec{b}_{lo}^{ort}, \quad \Delta\vec{b}_{lo}^{ort} = \begin{bmatrix} \Delta b_{1x}^{ort} \\ \Delta b_{1y}^{ort} \\ \Delta b_{1z}^{ort} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где Δb_{1j}^{ort} , ($j = x, y, z$) – погрешности орта $\vec{b}_{lo_pr}^{ort}$.

При этом значения $b_{1x_pr}^{ort}, b_{1z_pr}^{ort}$ уточнялись по результатам обработки измерений (11), а составляющая $b_{1y_pr}^{ort}$ определялась из условия нормирования орта $\vec{b}_{lo_pr}^{ort}$, т.е. $(b_{1x_pr}^{ort})^2 + (b_{1y_pr}^{ort})^2 + (b_{1z_pr}^{ort})^2 = 1$. В этом случае линейаризованные разностные измерения (11) могут быть представлены в следующем виде:

$$Z_{i,i+1}^{bl} = [B_{12}(s_{iE} - s_{(i+1)E}) - B_{11}(s_{iN} - s_{(i+1)N})] \cdot \alpha + [B_{13}(s_{iN} - s_{(i+1)N}) - B_{12}(s_{iH} - s_{(i+1)H})] \cdot \beta + \\ + [B_{11}(s_{iH} - s_{(i+1)H}) - B_{13}(s_{iE} - s_{(i+1)E})] \cdot \gamma + (s_{ix} - s_{(i+1)x}) \cdot \Delta b_{1x}^{ort} + (s_{iz} - s_{(i+1)z}) \cdot \Delta b_{1z}^{ort} + \\ + \Delta Cf_{(i+1)-i} + v_{zi}, \quad (13)$$

где $B_{1j} (j = 1, 2, 3)$ – элементы вектора-строки $(\vec{b}_{1o_pr}^{ort})^T (C_{o,h_pr})^T$; $s_{ij}, s_{(i+1)j} (j = E, N, H)$ и $s_{ij}, s_{(i+1)j} (j = x, y, z)$ – элементы ортов $\vec{s}_{ih_pr}$, $\vec{s}_{io_pr}$ (направляющие косинусы орта $\vec{s}_i$ HC_i относительно соответственно географических осей и осей объекта), формируемые согласно соотношениям (5), (6), (7); $\Delta Cf_{(i+1)-i} = \delta \lambda_{i+1} \cdot \eta_i / |\vec{b}_1|$ – погрешности, обусловленные остаточной неоднозначностью вторых разностей фазовых измерений для пары спутников HC_{i+1} и HC_i ; v_{zi} – шумы измерений, включающие шумы ПА СНС и составляющие, обусловленные погрешностями знания координат места объекта и эфемеридной информации HC_i .

Расчетная модель погрешностей

При формировании расчетной модели погрешностей ИСОН использовались следующие аппроксимации:

- смещения нулей гироскопов $\Delta \bar{\omega}_i (i = xb, yb, zb)$ и акселерометров $\Delta \bar{a}_i$, изменения систематических составляющих погрешностей масштабных коэффициентов ММГ ΔM_{gi} от запуска к запуску и их изменчивость в пуске были аппроксимированы (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами;
- погрешности $\delta D, \delta \dot{D}$ ПА СНС (смещения соответственно шкалы времени в единицах дальности и частоты опорного генератора в единицах радиальной скорости для опорной антенны в ПА СНС относительно данных HC_i) представлены расчетной моделью $d(\delta D)/dt = \delta \dot{D} + w_1$, $d(\delta \dot{D})/dt = k_2 + w_2$, где коэффициент k_2 , характеризующий дрейф частоты опорного генератора, был аппроксимирован соответствующим винеровским процессом;
- погрешности $\Delta Cf_{(i+1)-i}$, $\Delta b_{1j}^{ort} (j = x, z)$ аппроксимированы также соответствующими винеровскими процессами;
- шумы измерений v_{zi} аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями на частоте формирования измерений.

В этом случае расчетная модель погрешностей ИСОН будет иметь вид:

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1/k} \cdot x_k + \Gamma_{k+1} \cdot w_k, \quad (14) \\ z_{k+1} = H_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1},$$

$$\text{где } x^T = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_H \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \Delta \bar{\omega}_{xb} \quad \Delta \bar{\omega}_{yb} \quad \Delta \bar{\omega}_{zb} \quad \Delta \bar{a}_{xb} \quad \Delta \bar{a}_{yb} \quad \Delta \bar{a}_{zb} \quad \Delta M_{gx} \quad \Delta M_{gy} \quad \Delta M_{gz} \quad \delta D \quad \delta \dot{D} \quad k_2 \quad \Delta b_{1x}^{ort} \quad \Delta b_{1z}^{ort} \quad \Delta Cf_{4_1} \quad \Delta Cf_{5_2} \quad \Delta Cf_{6_3}] \quad (15)$$

– вектор состояния системы.

Здесь α, β, γ – погрешности в решении задачи ориентации; $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_H$ – погрешности в выработке составляющих вектора относительной линейной скорости объекта в проекциях на географические оси; $\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h$ – погрешности выработки географических координат места (по широте, долготе и высоте); $\Phi_{k/k+1}$ – переходная на интервале T_z формирования измерений матрица состояния системы; $\Gamma_{k+1} \equiv \Phi_{k+1} \cdot dT$ – матрица, определяющая влияние вектора входных шумов w_k с ковариациями Q_k ; H_{k+1} – матрица измерений, соответствующая уравнениям (3) и (13); v_{k+1} – шумы измерений с матрицей ковариаций R_k .

Для отбраковки недостоверных измерений использовался безынерционный алгоритм контроля, основанный на анализе невязки разностных измерений, т.е. анализе превышения разностных измерений (учитывая факт включения оценок в обратную связь на каждом шаге обработки измерений) допустимых значений, рассчитываемых по текущим значениям ковариационной матрицы ошибок оценок.

Результаты объектовых испытаний задачи ориентации

При испытаниях ИСОН на автомобиле при его движении в городских условиях имели место частые срывы слежения за HC_i и «сбои» в первичных измерениях ПА СНС, обусловленные наличием радиопомех, маневрированием автомобиля и затенением приемной антенны.

Разностные фазовые (11) и навигационные измерения (1) обрабатывались в камеральном режиме. Исходные данные:

- формирование откорректированных значений (с учетом поправок на тропосферную и ионосферную задержки, с учетом сдвига шкал времени HC_i и ПА СНС) дальностей и приращений дальностей на шаге измерений, а также эфемеридной информации для каждого из 6 наблюдаемых HC_i осуществлялось на частоте 1 Гц с привязкой всех данных к синхроимпульсу от ПА СНС;
- при «скачках» в разностных фазовых измерениях для пары спутников на величину более 0,1 длины волны производился частичный перезапуск фильтра Калмана по погрешности $\Delta C f_{(i+1)-i}$, соответствующей данному измерению;
- отбраковка недостоверных измерений от ПА СНС производилась в соответствии с критерием, учитывающим текущие значения ковариационной матрицы ошибок оценок;
- результаты расчета сравнивались с данными о курсе или путевом угле объекта, полученном от аппаратуры МРК-32;
- длина базы между антеннами составляла 2,5 м;
- запись массива данных БИИМ (текущих значений сигналов ММГ и ММА) производилась на частоте 100 Гц.

Результаты испытаний приведены на рис. 2, 3.

Сравнивая рис. 3, а с рис. 3, б, можно видеть, что наблюдаемые «выбросы» – это погрешности ПА СНС (курса или путевого угла МРК-32).

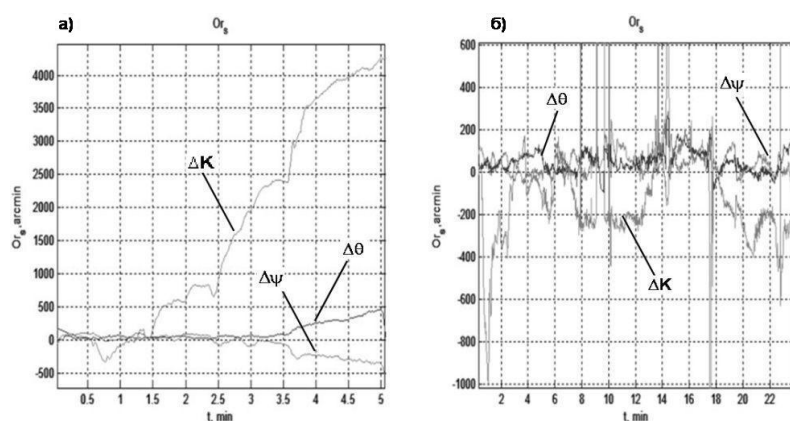


Рис. 2. Погрешности ориентации (угл. мин) без использования фазовых измерений:

 $\Delta \theta$, $\Delta \psi$ – по углам качки, ΔK – по курсу (сравнение с K_{GPS} от МРК-32):

а) без маневрирования объекта по курсу и скорости; б) при маневрировании объекта по курсу

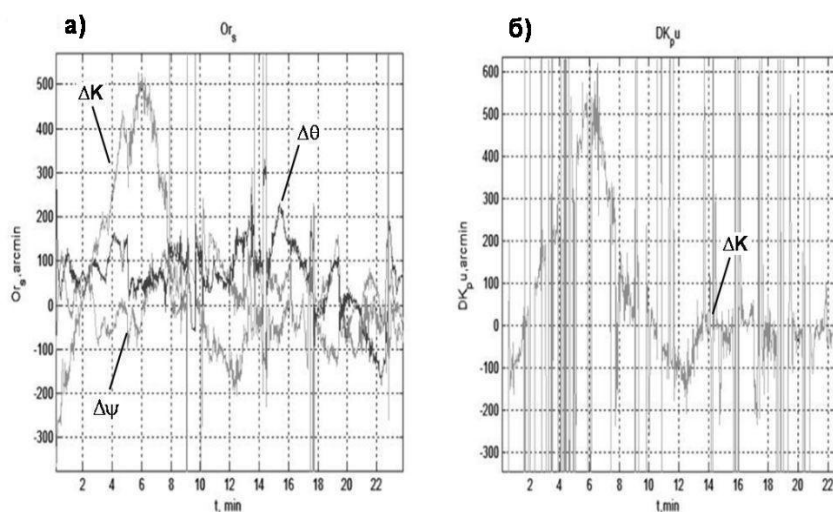


Рис. 3. Погрешности ориентации (угл. мин) с использованием фазовых измерений:

 $\Delta \theta$, $\Delta \psi$ – по углам качки, ΔK – по курсу:а) сравнение с K_{GPS} от МРК-11; б) сравнение со значением путевого угла от ПА СНС

Выводы

1. Результаты решения задачи ориентации объекта в рассматриваемой схеме построения ИСОН подтверждают эффективность данного решения, которое допускает перерывы в поступлении фазовых измерений от ПА СНС и позволяет эффективно обеспечивать отбраковку недостоверных измерений.

2. В условиях маневрирования объекта, приводящего к наличию линейных ускорений в горизонтальной плоскости, погрешность ИСОН по курсу имеет ограниченный характер даже без использования фазовых измерений от ПА.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ОАО «РИРВ» В.М.Жилинскому, А.Н.Короткову, Е.А.Тимофееву и Г.С.Цехановичу за предоставленную для испытаний ПА СНС и помощь в проведении и обработке результатов испытаний.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ. Код проекта 07-08-00699-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Интегрированная** система Seapath 200. Product Manuals – Seapath 200. Precise Heading, Attitude and Position. Seatex AS, Trondheim, Norway, 1998-05-04.
2. **Несенюк, Л.П.** Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с разнесенными антеннами / Л.П.Несенюк [и др.] / Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации.- СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. - С. 222-229.
3. **Рапопорт, Л.Б.** Интегрированная система спутниковой и инерциальной навигации: экспериментальные результаты и применение к управлению мобильными роботами / Л.Б.Рапопорт [и др.] // Гироскопия и навигация.- 2007.- № 1(56).- С. 16-28.
4. **Степанов, О.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем / О.А.Степанов, Д.А.Кошаев // Гироскопия и навигация.- 1999.- № 2(25). - С. 30-55.
5. **Емельянцев, Г.И.** Об особенностях построения интегрированной инерциально-спутниковой системы для объектов, двигающихся в начальный период по баллистической траектории / Г.И.Емельянцев [и др.] // Гироскопия и навигация.- 2009.- № 1(64). - С. 9-21.
6. **Hayward R.C., Gebre-Egziabher D., Powell J.D.** GPS-Based Attitude for Aircraft. Proceedings of 5th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg 1998. State Research Center of Russia "Elektropribor". 1998.- P. 85-94.
7. **Han S., Wong K., Rizos C.** Instantaneous Ambiguity Resolution for Real-Time GPS Attitude Determination. Proceedings of the International symposium on Kinematic systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, June 3-6, KIS97.- 1997.- P. 409-416.
8. **Euler H., Hill C.** Attitude determination Exploiting all Information for Optimal Ambiguity Resolution. Proceedings of The Eighth International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Palm Springs, California, September 12-15, ION-GPS-95. 1995.

Материал поступил 17.09.09