

УДК 531.383.11:531.714.7

ФОРМИРОВАНИЕ ГИРОМАГНИТНОГО КУРСА В МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ КУРСОВЕРТИКАЛИ

*ГАЛКИН Виктор Иванович, к. т. н., с. н. с.,
КУЗИН Евгений Владимирович,
КОНДРАТЬЕВ Александр Владимирович
ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»
E-mail: inbox@aomiea.ru*

В статье рассмотрены способы формирования гиромагнитного курса в микромеханической гировертикали при использовании внешнего магнитного компаса и встроенного в курсовертикаль магнитного датчика. Приведены структурно-функциональные схемы и алгоритмы расчета гиромагнитного курса.

Ключевые слова: микромеханическая курсовертикаль, гиромагнитный курс, магнитный компас, магнитный датчик, девиация.

MAGNETIC HEADING GENERATION IN MICROMECHANICAL ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM

*Victor I. GALKIN, PhD in Engineering,
Evgeny V. KUZIN
Alexander V. KONDRATYEV
'Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC
E-Mail: inbox@aomiea.ru*

The article considers the method of magnetic heading generation in micromechanical vertical gyro using magnetic direction indicator and magnetic sensor integrated into attitude and heading reference system. Structural-functional diagrams and magnetic heading calculation algorithms are given.

Keywords: micromechanical attitude and heading reference system, magnetic heading, magnetic direction indicator, magnetic sensor, deviation.

Введение

В микромеханических курсовертикалях из-за невысокой чувствительности микромеханических гироскопов $(0,01 \div 0,03)^\circ/\text{с}$ определять начальный курсовой угол по составляющим скорости вращения Земли не представляется возможным. Поэтому определять начальный курсовой угол и осуществлять компенсацию дрейфа курсового гироскопа необходимо с помощью внешних источников информации, например, по показаниям магнитного компаса или встроенного магнитного датчика.

В настоящей статье рассматриваются особенности формирования гироманнитного курса в микромеханической курсовертикали.

Структурно-функциональная схема микромеханической курсовертикали с коррекцией от магнитного компаса

В общем виде структурно-функциональная схема представлена на рис. 1.

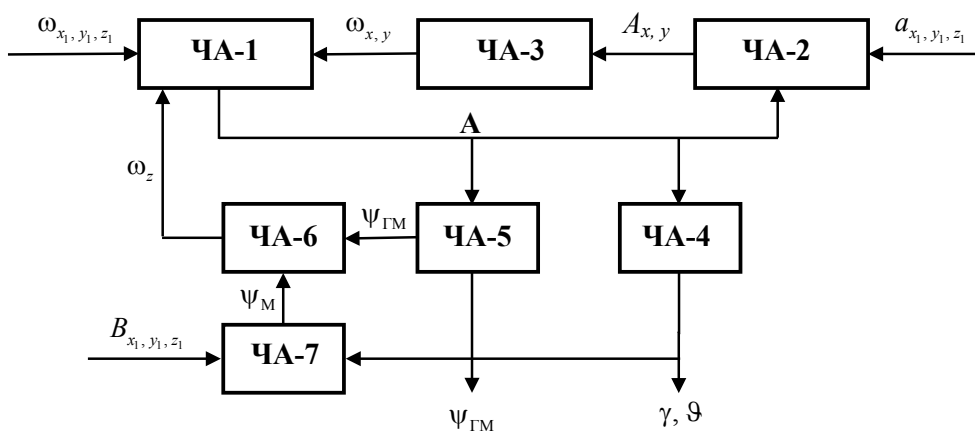


Рис. 1. Структурно-функциональная блок-схема построения микромеханической курсовертикали с радиальной коррекцией и гироманнитным курсом

В представленной схеме в блоке ЧА-1 по показаниям гироскопов (ω_{x_1, y_1, z_1}) формируется матрица направляющих косинусов \mathbf{A} , определяющая угловое положение виртуальной платформы в инерциальной системе координат [1]:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \sin \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \sin \psi \sin \vartheta \sin \psi + \cos \psi \cos \gamma \\ \cos \psi \cos \vartheta & -\cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma - \sin \psi \sin \gamma & \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma - \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \end{vmatrix}. \quad (1)$$

В блоке ЧА4 по показаниям матрицы \mathbf{A} рассчитываются углы тангажа и крена, а в блоке ЧА-5 — значение гиромагнитного курса:

$$\vartheta = \arctg(a_{31} / \tilde{a}_0); \quad \tilde{a} = \arcsin(a_{33} / \tilde{a}_0); \quad (2)$$

$$\Psi_{\text{ГМ}}(n_3) = \arcsin \frac{a_{11}(n_3)}{\tilde{a}_0(n_3)}, \quad (3)$$

где:

$$\tilde{a}_0(n_3) = \sqrt{a_{32}^2(n_3) + a_{33}^2(n_3)}, \quad \tilde{a}_0(n_3) = \sqrt{a_{11}^2(n_3) + a_{21}^2(n_3)}.$$

Радиальная коррекция углового положения виртуальной платформы осуществляется по показаниям акселерометров при полете ЛА без ускорений следующим образом [2]. В блоке ЧА-2 с помощью матрицы \mathbf{A} производится перепроектирование показаний акселерометров из связанных осей a_{x_1, y_1, z_1} на инерциальные $A_{x, y}$:

$$\begin{aligned} \dot{A}_x &= a_{11} a_{x1} + a_{12} a_{y1} + a_{13} a_{z1}; \\ A_y &= a_{21} a_{x1} + a_{22} a_{y1} + a_{23} a_{z1}. \end{aligned} \quad (4)$$

В блоке ЧА-3 линейные ускорения преобразуются в инерциальные угловые скорости, используемые для коррекции положения виртуальной платформы в инерциальной системе координат:

$$\omega_x = -K_1 A_y; \quad \omega_y = K_1 A_x, \quad (5)$$

где: K_1 — коэффициент преобразования линейных ускорений в корректирующие угловые скорости $\omega_{x, y}$.

Корректировка положения виртуальной платформы осуществляется в блоке ЧА-1 путем перемножения текущего кватерниона на корректирующий кватернион.

В блоке ЧА-6 формируется сигнал коррекции углового положения виртуальной платформы по курсу ω_z , а в блоке ЧА-7 рассчитывается магнитный курс ψ_M по показаниям B_{x_1, y_1, z_1} встроенного магнитного датчика.

Формирование гиромагнитного курса может быть осуществлено двумя способами: от внешнего магнитного компаса и от магнитного компаса, встроенного в курсоверталь.

В зависимости от типа используемого магнитного компаса формирование корректирующего сигнала имеет свои особенности.

Формирование гиромагнитного курса при использовании внешнего магнитного компаса

Структурно-функциональная схема блока ЧА-6 формирования гиромагнитного курса от внешнего компаса показана на рис. 2.

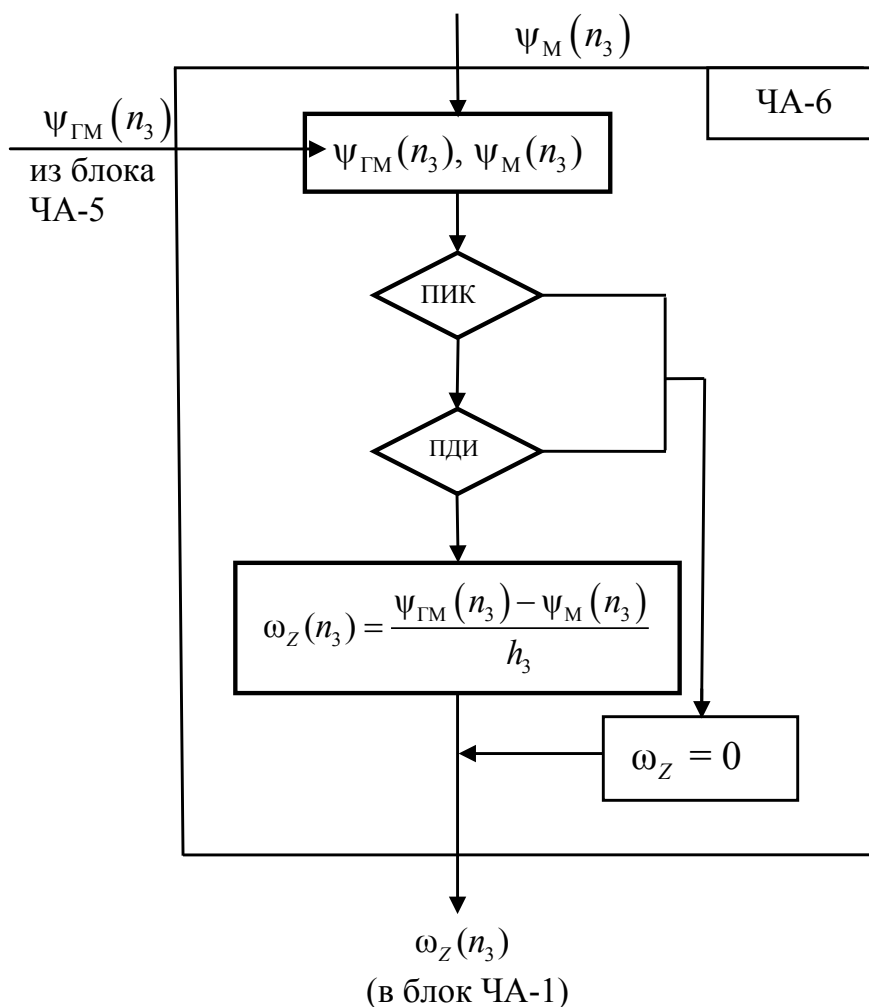


Рис. 2. Структурно-функциональная схема блока ЧА-6 коррекции гиромагнитного курса от внешнего магнитного компаса

Информация от внешнего магнитного компаса ψ_M передается потребителю уже с учетом углового положения ЛА по тангажу и крену и с учетом девиации на конкретном ЛА [3, 4]. Кроме того, в ней содержатся признаки исправности магнитного компаса (ПИК) и достоверности передаваемой информации (ПДИ). Блок ЧА-7 в схеме рис. 1 в этом случае не используется.

При неисправности магнитного компаса или недостоверности передаваемой информации угловая скорость обратной связи приравнивается к нулю.

При исправности магнитного компаса и достоверности передаваемой информации угловая скорость обратной связи $\omega_z(n_3)$ рассчитывается по разности гиромагнитного $\psi_{ГМ}$ и магнитного ψ_M курсов на каждом такте h_3 их измерений (рис. 2). Рассчитанная таким образом угловая скорость передается в блок ЧА-1 (рис. 2), где и производится корректировка углового положения виртуальной платформы путем перемножения соответствующих кватернионов.

Начальное значение гиромагнитного курса $\psi_{ГМ_0}$ устанавливается в процессе выставки курсовертикали.

Формирование гиромагнитного курса при использовании встроенного в курсовертикаль магнитного датчика

Структурно-функциональная схема блока ЧА-7 (рис. 1) представлена на рис. 3 (стр. 7).

В этом случае информация о магнитном курсе ψ_M формируется внутри курсовертикали по показаниям трехосного цифрового магнитометрического датчика [5] (блок ЧА-7, рис. 1). Показания датчика в виде составляющих магнитного поля Земли калибруются — определяются нулевой сигнал и масштабный коэффициент. Кроме того, в составе ЛА определяются и учитываются коэффициенты девиации, вызванные искажением магнитного поля Земли конструктивными и активными элементами ЛА. Влияние углов наклона ЛА на показания магнитных датчиков рассчитывается по показаниям акселерометров курсовертикали.

Функционирование блока ЧА-07 осуществляется следующим образом. По поступающей из датчика температуры информации (Т) из памяти микропроцессора выбираются соответствующие значения нулевых сигналов B_{0_i} , масштабных коэффициентов и углов неортogonalности измерительных осей β_{ij} датчика магнитного поля, определенные в заводских условиях. В субблоке 2 производится корректировка значений индукции магнитного поля B_i , поступающих из датчика магнитного поля Земли:

$$\begin{bmatrix} B_{x_1}^* \\ B_{y_1}^* \\ B_{z_1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x_1} & \beta_{x_1 y_1} & \beta_{x_1 z_1} \\ \beta_{y_1 x_1} & k_{y_1} & \beta_{y_1 z_1} \\ \beta_{z_1 x_1} & \beta_{z_1 y_1} & k_{z_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (B_{x_1} - B_{0_{x_1}}) \\ (B_{y_1} - B_{0_{y_1}}) \\ (B_{z_1} - B_{0_{z_1}}) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

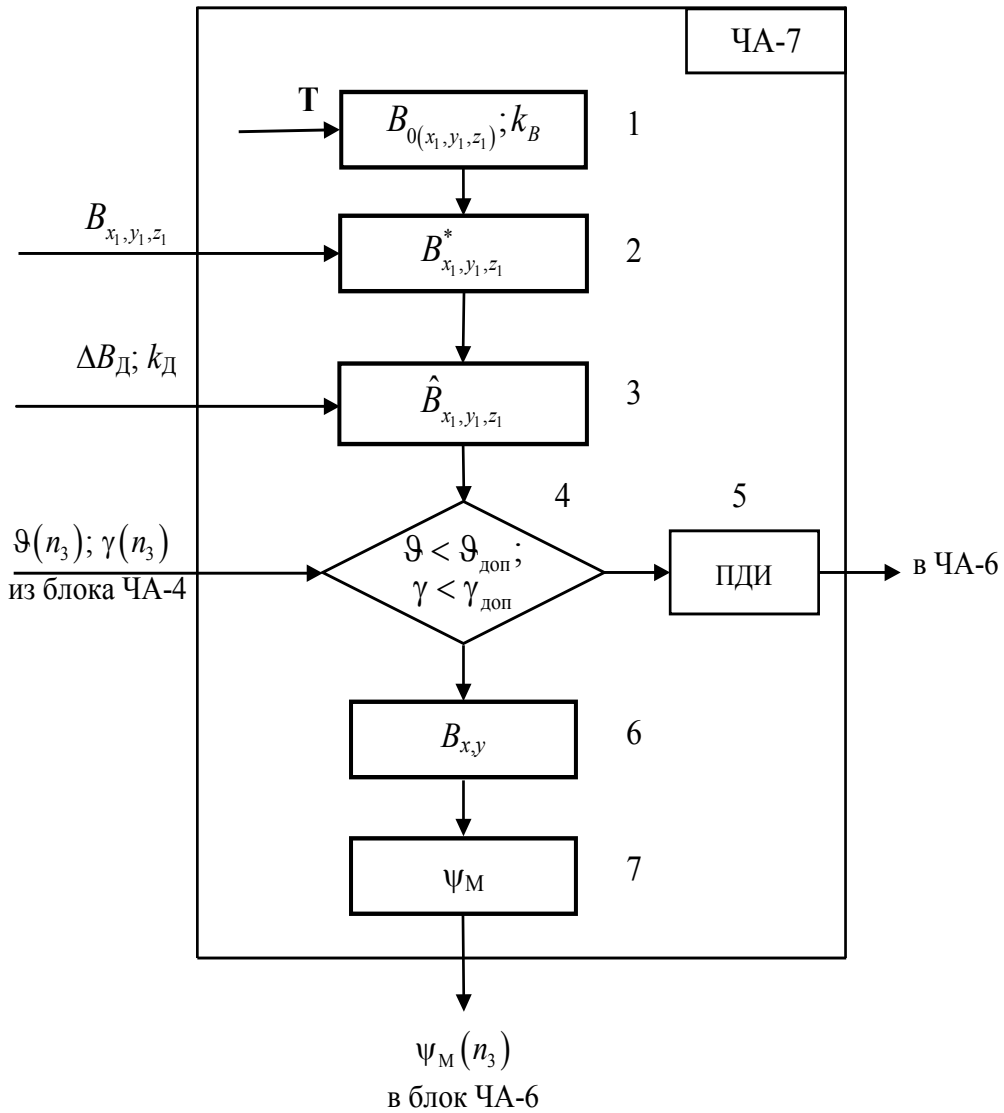


Рис. 3. Структурно-функциональная схема блока ЧА-7

В субблоке 3 производится учет девиации — смещения нулевых сигналов $\Delta B_{Д_i}$, вызванного активными магнитными полями на борту ЛА, и изменением масштабного коэффициента $k_{Д_i}$, вызванного экранирующими магнитное поле Земли ферритовыми элементами конструкции ЛА [6]:

$$\hat{B}_i = \frac{B_i^* - \Delta B_{Д_i}}{k_{Д_i}}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов девиации $\Delta B_{Д_i}$ и $k_{Д_i}$ определяются в процессе калибровки магнитного компаса в составе ЛА по специальным методикам путем поворота магнитного компаса на 360° вокруг вертикальной оси $Y1$ и горизонтальной оси $Z1$.

В субблоке 3 сравниваются углы тангажа ϑ и крена γ , поступающие из блока ЧА-4 об угловом положении магнитного датчика, с допустимыми $\vartheta_{\text{доп}}, \gamma_{\text{доп}}$ для заданной точности измерений поля Земли магнитным датчиком. Если заданное условие не выполняется, то дальнейшие расчеты не производятся, а в блок ЧА-6 передается признак ПДИ = 1 о недостоверности информации, получаемой с магнитного датчика.

Если заданное условие выполняется, то производится перепроектирование составляющих магнитного поля \hat{B}_{x_1, y_1, z_1} из связанных осей на инерциальные $B_{x, y}$ с помощью матрицы A :

$$\begin{aligned} B_x &= a_{11} \hat{B}_{x_1} + a_{12} \hat{B}_{y_1} + a_{13} \hat{B}_{z_1}; \\ B_y &= a_{21} \hat{B}_{x_1} + a_{22} \hat{B}_{y_1} + a_{23} \hat{B}_{z_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассчитанные значения составляющих магнитного поля Земли $B_{x, y}$ передаются в субблок 7, в котором производится вычисление магнитного курса:

$$\psi_{0_M} = \arccos \frac{B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}. \quad (4)$$

Для определения магнитного курса в диапазоне $(0 \div 360)^\circ$ необходимо учитывать знаки при составляющих магнитного поля Земли:

ψ_{0_M} ;

— при $(+B_y, +B_x)$	$\psi_M = \psi_{0_M}$;
— при $(-B_y, +B_x)$	$\psi_M = \pi - \psi_{0_M}$;
— при $(-B_y, -B_x)$	$\psi_M = \pi + \psi_{0_M}$;
— при $(+B_y, -B_x)$	$\psi_M = 2\pi - \psi_{0_M}$.

Рассчитанное значение магнитного курса передается в блок ЧА-6 рис. 1, в котором определяется угловая скорость ω_z , корректирующая в блоке ЧА-1 угловое положение виртуальной платформы по курсу.

Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования гироманнитного курса проводились в составе трехосного измерителя угловых скоростей и линейных ускорений ИПДММ-1, укомплектованного цифровым магнитным компасом НМР3000 (рис. 4). Информационная связь между ними осуществлялась по интерфейсу RS422.



Рис. 4. Трехосный измеритель ИПДММ-1, укомплектованный цифровым магнитным компасом НМР3000

На рис. 5 (стр. 10) показаны графики измерения магнитного поля Земли цифровым датчиком НМС1023 американской фирмы «Honeywell», из которых были определены коэффициенты девиации: смещение нулевого сигнала $\Delta B_d = 339$ нТл и масштабный коэффициент $k_d = 1,0032$.

На рис. 6 (стр. 10) приведены результаты измерения гироманнитного курса микромеханическим ИПДММ-1, укомплектованным магнитным компасом НМР3000 американской фирмы «Honeywell».

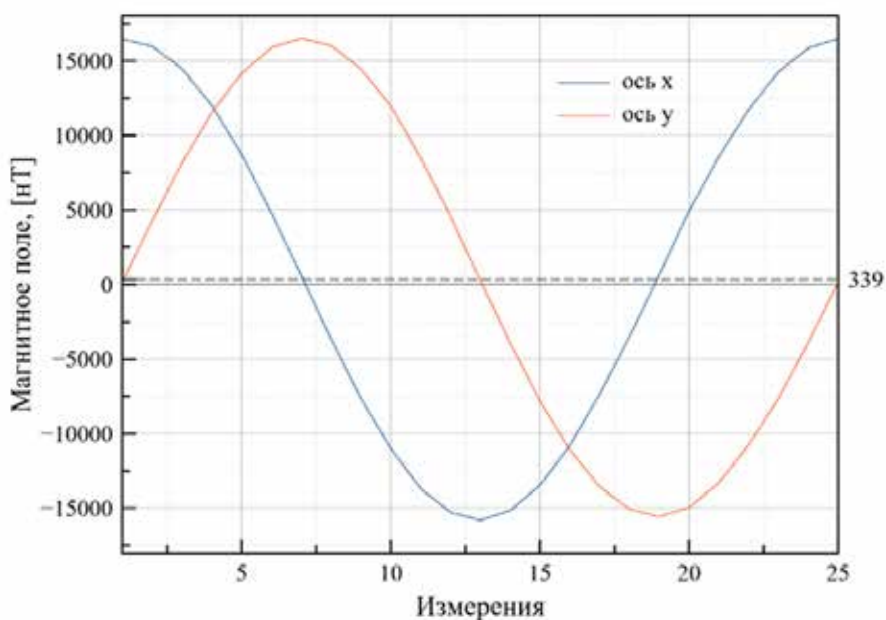


Рис. 5. Графики измерения магнитного поля Земли магнитным датчиком НМС1023

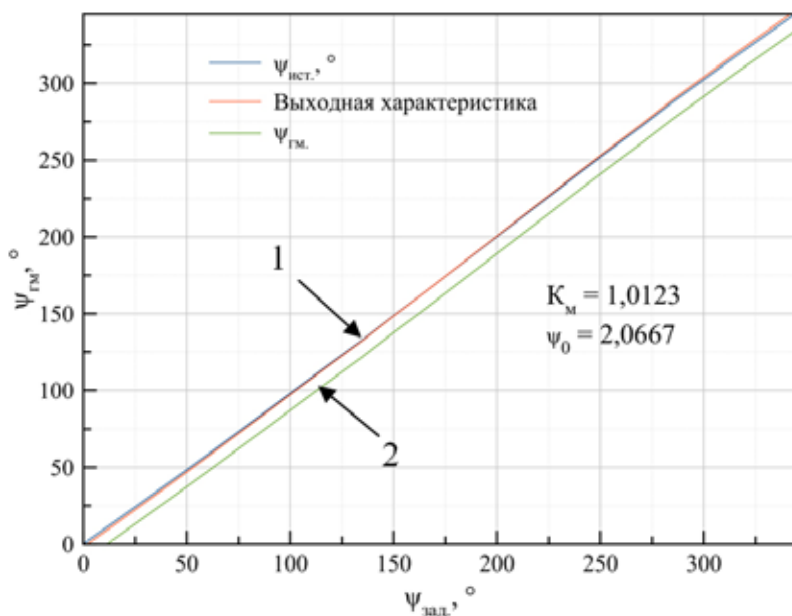


Рис. 6. Графики измерения гиромагнитного курса микромеханическим ИПДММ-1, укомплектованным магнитным компасом НМР3000, где: 1 — график истинного курса после вычитания из гиромагнитного курса магнитного склонения; 2 — график гиромагнитного курса.

Литература

1. *Галкин В. И.* Гироскопические приборы на микромеханических датчиках – Проблемы и пути их решения, LAP LAMBERT Academic Publishing RU, ISBN: 978-620-2-79865-5, 2020 г. – 165 с.
2. *Галкин В. И., Кузин Е. В., Воробьев Д. Н.* Способ управления цифровой платформой в бесплатформенной гировертикали и устройство для его реализации // Патент РФ № 2667320, Бюллетень изобретений № 26, 2018 г.
3. Smart Digital Magnetometer HMR3000. www.honeywell.com
4. Цифровой магнитный компас, республика Беларусь. tsp@tspbел.com
5. 3-axis magnetic sensor HMC1023. www.magneticsensors.com
6. Магнитный компас и система GPS. info@gpsru.com