

УДК 621.391:531.7.08

Н. В. Раевский¹, Ю. В. Морозов²

¹ООО «КБ «НАВИС-Украина»

ул. Мазура, 14, 20704 Смела, Черкасская область, Украина

²Государственное предприятие «Оризон-Навигация»

ул. Мазура, 24, 20708 Смела, Черкасская область, Украина

Определение горизонтальных составляющих магнитного поля Земли при помощи магнетометров в составе электронного компаса

Реализована процедура определения горизонтальных составляющих магнитного поля Земли при помощи магнетометров. Для определения истинных значений величин необходимо компенсировать влияние дестабилизирующих факторов на чувствительные элементы. Компенсация влияния дестабилизирующих факторов проведена посредством калибровки. Для расчета азимута и определения местоположения объекта в режиме реального времени использованы истинные составляющие магнитного поля.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, азимут, магнетометр, смещение нуля, коэффициент шкалы, компенсация, матрица данных, матрица поворота.

Введение

Определение горизонтальных составляющих магнитного поля Земли (МПЗ) подразумевает получение информации об уровне напряженности магнитного поля в зависимости от ориентации платформы с чувствительными элементами в горизонтальной плоскости. Значения напряженности, определенные с помощью чувствительных элементов, при этом могут быть использованы для определения положения платформы по отношению к ориентиру — магнитному полюсу Земли.

В общем случае, при отсутствии вносимых искажений форма МПЗ в горизонтальной плоскости представляет собой окружность с центром в точке (0,0). Однако получение фактических значений составляющих магнитного поля от датчиков без искажений выходного сигнала невозможно из-за дестабилизирующего влияния внешних факторов. При этом центр окружности смещается из точки начала координат, а сама окружность может трансформироваться в эллипс.

Поэтому подобная форма МПЗ в горизонтальной плоскости не может быть использована для корректного определения местоположения платформы.

© Н. В. Раевский, Ю. В. Морозов

Для определения истинных значений составляющих МПЗ необходимо устранить/скомпенсировать дестабилизирующее влияние внешних факторов.

Проблемами устранения и компенсации дестабилизирующего влияния внешних факторов на чувствительные элементы электронного компаса, используемые для определения горизонтальных (и вертикальной) составляющих МПЗ, занимались многие исследователи и инженеры.

Например, в [1, 2] авторами предложен эффективный алгоритм компенсации погрешностей электронного компаса, выполненного с использованием двухосевого магнетометра. Авторы предложили определять величину напряженности магнитного поля по оси чувствительности Z аналитически, по значению угла падения (dip angle).

Использование недорогих датчиков магнитного поля в составе электронного компаса было рассмотрено в [3, 7]. Автор предлагает совместное использование трехосевого магнетометра для определения составляющих МПЗ и датчика угла наклона — для учета возможного наклона платформы с чувствительными элементами.

Использование двух- и трехосевых датчиков магнитного поля в составе электронного компаса рассмотрено в [4, 5]. При этом, использование датчиков рассмотрено в свете автомобильного применения и возможных искажений магнитного поля, вносимых корпусом автомобиля [4]. Следует отметить, что работа [5] посвящена практическому использованию чувствительных элементов фирмы Philips при проектировании электронного компаса и содержит рекомендации по методикам компенсации внешних воздействий на магнетометры. Данные рекомендации и методики частично применимы и для изделий других производителей.

Поэтому, **целью** данной работы является описание результатов экспериментальных исследований процедур компенсации и/или устранения влияния внешних факторов различной природы на датчики магнитного поля с использованием двухосевого магнетометра в совокупности с датчиком крена и тангажа, необходимых для компенсации возможного угла платформы с чувствительными элементами и корректного определения азимута.

Известно, что дестабилизирующие внешние факторы, вносящие искажения в показания датчиков при определении напряженностей магнитного поля Земли по каждой из осей чувствительности, имеют разную природу происхождения [8].

Hard Iron Distortion — вносимое аддитивное искажение, генерирующее постоянную составляющую, которая накладывается на искомое значение напряженности магнитного поля Земли. Например, к появлению данного рода искажений может приводить наличие вблизи магнетометров постоянного магнита звуковой колонки или динамика. Пока положение магнита и его ориентация будут постоянными относительно датчика, магнитное поле и его смещение будут также постоянны. Hard Iron Distortion может быть легко идентифицировано по смещению точки начала координат при анализе картины напряженности магнитного поля Земли.

Soft Iron Distortion — в отличие от Hard Iron Distortion, где результатом искажений является суммарное магнитное поле Земли и магнитное поле постороннего предмета, искажение Soft Iron Distortion вносится предметами, которые искажают окружающее магнитное поле, но не обязательно генерируют свое. На-

пример, данный вид искажений характерен для никеля и железа и зависит от ориентации искажающего материала относительно датчика. Таким образом, скомпенсировать это искажение устранением вносимой константы не представляется возможным — для этого необходимо реализовать более сложную процедуру.

Компенсация Hard Iron Distortion

Процедура устранения аддитивной постоянной составляющей в показаниях магнетометров состоит из нескольких этапов:

- 1) платформа с датчиками располагается горизонтально;
- 2) вокруг вертикальной оси совершается несколько полных оборотов;
- 3) фиксируются максимальные и минимальные значения составляющих для каждой оси магнетометра.

Полученные максимальные и минимальные значения используются для нахождения смещения нуля (Offset) [7]:

$$\begin{cases} X_{offset} = (X_{max} + X_{min})/2, \\ Y_{offset} = (Y_{max} + Y_{min})/2. \end{cases} \quad (1)$$

Максимальные и минимальные значения используются для нахождения коэффициента шкалы (Scale Factor):

$$\begin{cases} X_{peaktpeak} = X_{max} - X_{min}, \\ Y_{peaktpeak} = Y_{max} - Y_{min}. \end{cases} \quad (2)$$

Рассчитанные значения смещения нуля и коэффициентов шкалы являются калибровочными коэффициентами. Калибровочные коэффициенты используются для компенсации аддитивной составляющей в режиме реального времени данных от магнетометров:

$$\begin{cases} X_{real} = (DATA_X - X_{offset})/X_{peaktpeak}, \\ Y_{real} = (DATA_Y - Y_{offset})/Y_{peaktpeak}, \end{cases} \quad (3)$$

где $DATA_X$, $DATA_Y$ — «сырые» данные, получаемые от датчиков.

На рис. 1 изображена форма магнитного поля и соответствующие графики изменения его составляющих [10].

В качестве датчиков магнитного поля использовался двухосевой магнетометр HMC1052L (Honeywell) [6].

Верхний график на рис. 1 — визуализация магнитного поля с помощью «сырых» составляющих, без компенсации смещений нуля и коэффициента шкалы. Нижний график — визуализация магнитного поля с устраненной постоянной составляющей магнитного поля в выходных сигналах датчиков.

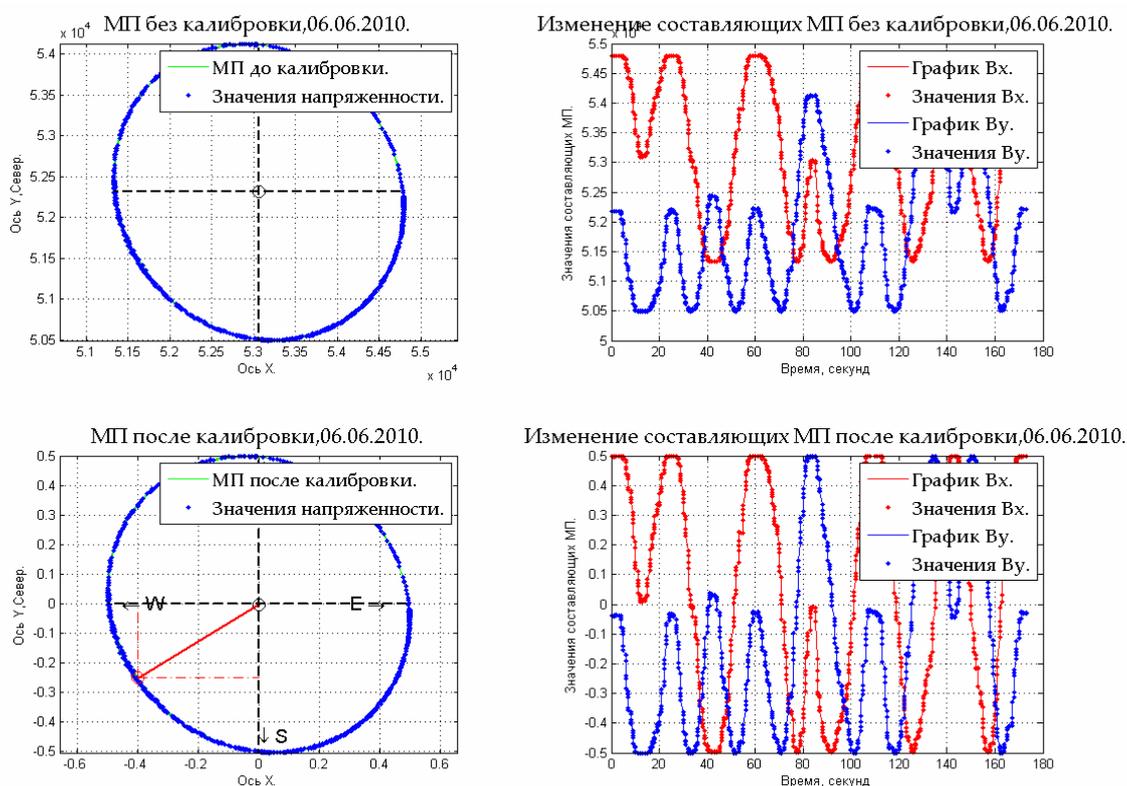


Рис. 1. Магнитное поле и его составляющие до и после компенсации Hard Iron Distortion

Как видно из рисунков, при использовании в построении «сырых» данных наблюдается смещение точки начала координат, что свидетельствует о наличии Hard Iron Distortion. При использовании данных со скомпенсированным смещением нуля и коэффициентом шкалы центр фигуры находится в точке с координатами (0,0), но при этом фигура является наклоненным эллипсом, а не окружностью.

Компенсация Soft Iron Distortion

Как упоминалось выше, Soft Iron Distortion имеет несколько иное воздействие на составляющие магнитного поля, чем Hard Iron Distortion: не вносит аддитивной составляющей, но искажает форму магнитного поля [8].

Явным примером подобного искажения является нижний график на рис. 1, где изображена форма магнитного поля после компенсации Hard Iron Distortion: центр фигуры расположен в точке начала координат, но фигура при этом является эллипсом, а не окружностью. Поэтому, первым этапом в устранении Soft Iron Distortion является нахождение большой и малой полуосей получившегося эллипса.

Для нахождения полуосей эллипса необходимо найти магнитуду каждой из точек в наборе данных. Наибольшее значение магнитуды будет соответствовать вершине большой полуоси эллипса (Major Axis), а минимальное значение — малой полуоси (Minor Axis):

$$r = \sqrt{(X_{real})^2 + (Y_{real})^2}. \quad (4)$$

Координаты точки с максимальной и минимальной магнитудами будут координатами вершин эллипса, и через них и точку начала координат можно провести полуоси. Нижняя фигура рис. 1 показывает процедуру нахождения полуосей эллипса.

Наличие координат осей эллипса позволяет найти его угол наклона относительно оси ординат:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{Y_{real}}{X_{real}}\right). \quad (5)$$

После того как были определены координаты вершин эллипса, длины его полуосей и угол наклона, необходимо реализовать процедуру поворота эллипса на найденный угол θ .

Для этого формируется матрица данных (ν) и матрица поворота (R), которая повернет эллипс на заданный угол (θ) вокруг вертикальной оси:

$$\nu = \begin{bmatrix} X_{real} \\ Y_{real} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\nu_{turn} = R \times \nu = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{real} \\ Y_{real} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В результате проведения математических операций над данными с помощью приведенных формул эллипс должен повернуться на заданный угол, и его большая полуось (Major Axis) должна совпадать с вертикалью, а малая (Minor Axis) — должна быть перпендикулярна ей. Результаты поворота приведены на рис. 2 (верхний график).

При переходе к процедуре компенсации Soft Iron Distortion априори полагается, что все иные возможные внешние влияния (такие как учет наклона платформы или Hard Iron Distortion) уже были устранены и/или скомпенсированы.

Если же наклон платформы или смещение нуля не были учтены, то запрещается переходить к этапу компенсации Soft Iron Distortion.

Для реализации процедуры учета платформы с магниточувствительными элементами необходимо введение в систему датчиков наклона, позволяющих определить углы крена и тангажа. Углы крена и тангажа используются для коррекции наклона составляющих магнитного поля. Предположим, что магнетометр НМС1052L расположен строго горизонтально, и его углы наклона нулевые. При нулевых углах наклона не возникает необходимость использования инклинометра, и можно сразу переходить к процедуре поворота эллипса (рис. 2).

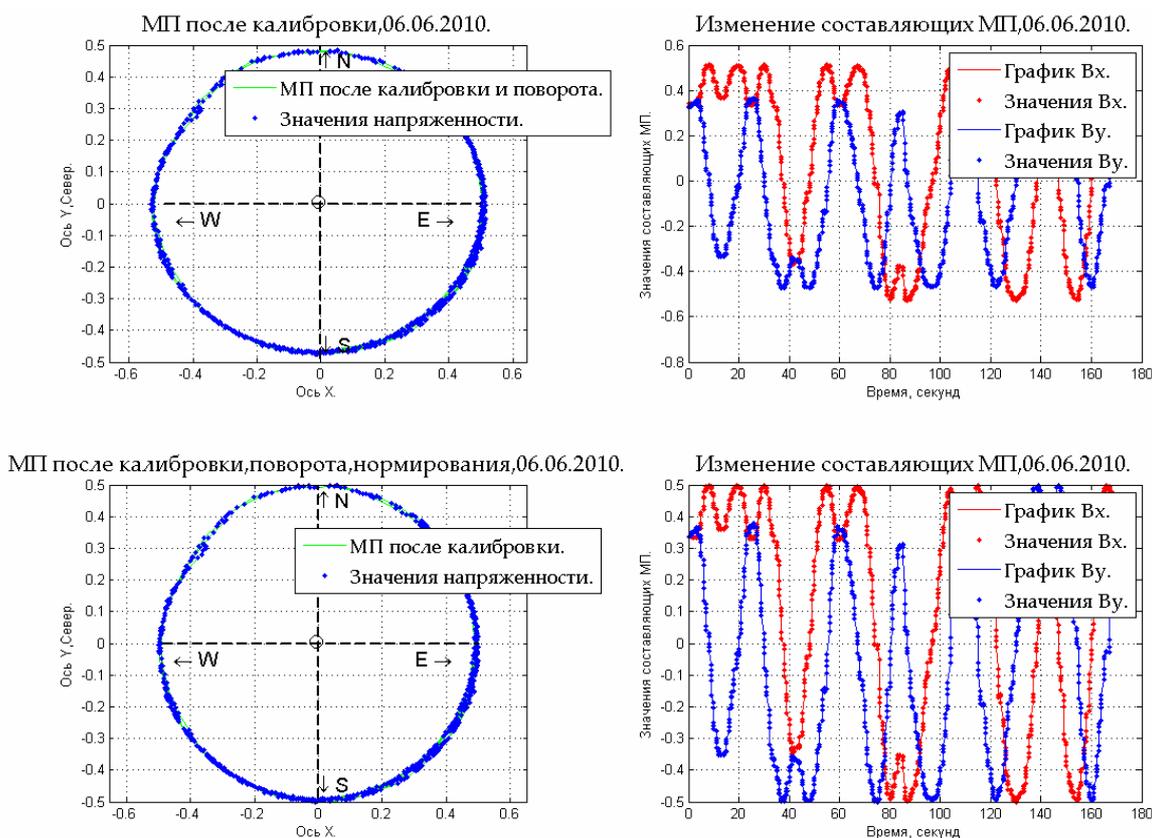


Рис. 2. Поворот эллипса на заданный угол и его нормирование

После поворота эллипса и ориентации его большой полуоси перпендикулярно к горизонтальной оси необходимо еще раз провести процедуру нормирования данных, которая преобразовывает эллипс в окружность, тем самым, устраняя искажения формы магнитного поля Soft Iron Distortion (рис. 2) [10].

Нормирование эллипса осуществляется по следующим формулам (идентичным формулам, используемым при устранении Hard Iron Distortion, (1)–(3)):

$$\begin{cases} X_{offset_turn} = (X_{real_t_max} + X_{real_t_min})/2, \\ Y_{offset_turn} = (Y_{real_t_max} + Y_{real_t_min})/2, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_{peaktpeak_t} = X_{real_t_max} - X_{real_t_min}, \\ Y_{peaktpeak_t} = Y_{real_t_max} - Y_{real_t_min}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} X_{real_n} = (X_{real_turn} - X_{offset_turn})/X_{peaktpeak_t}, \\ Y_{real_n} = (Y_{real_turn} - Y_{offset_turn})/Y_{peaktpeak_t}. \end{cases} \quad (11)$$

В результате нормирования эллипс эволюционирует в окружность. Нижний график на рис. 2 демонстрирует полученную в результате нормирования окружность. Верхний график демонстрирует повернутый на угол θ эллипс.

Полученную окружность необходимо повернуть на угол, обратный углу поворота эллипса. Процедура обратного поворота необходима по той причине, что значения составляющих напряженности магнитного поля Земли должны быть возвращены в исходное положение.

Угол поворота будет равен значению угла поворота эллипса, взятому с отрицательным знаком:

$$\theta_{inv} = -\theta, \quad (12)$$

$$v_{inv} = \begin{bmatrix} X_{real_n} \\ Y_{real_n} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{inv}) & \sin(\theta_{inv}) \\ -\sin(\theta_{inv}) & \cos(\theta_{inv}) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$v_{turn} = R \times v_{inv} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{inv}) & \sin(\theta_{inv}) \\ -\sin(\theta_{inv}) & \cos(\theta_{inv}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{real_n} \\ Y_{real_n} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Результат обратного поворота полученной окружности показан на рис. 3 [10].

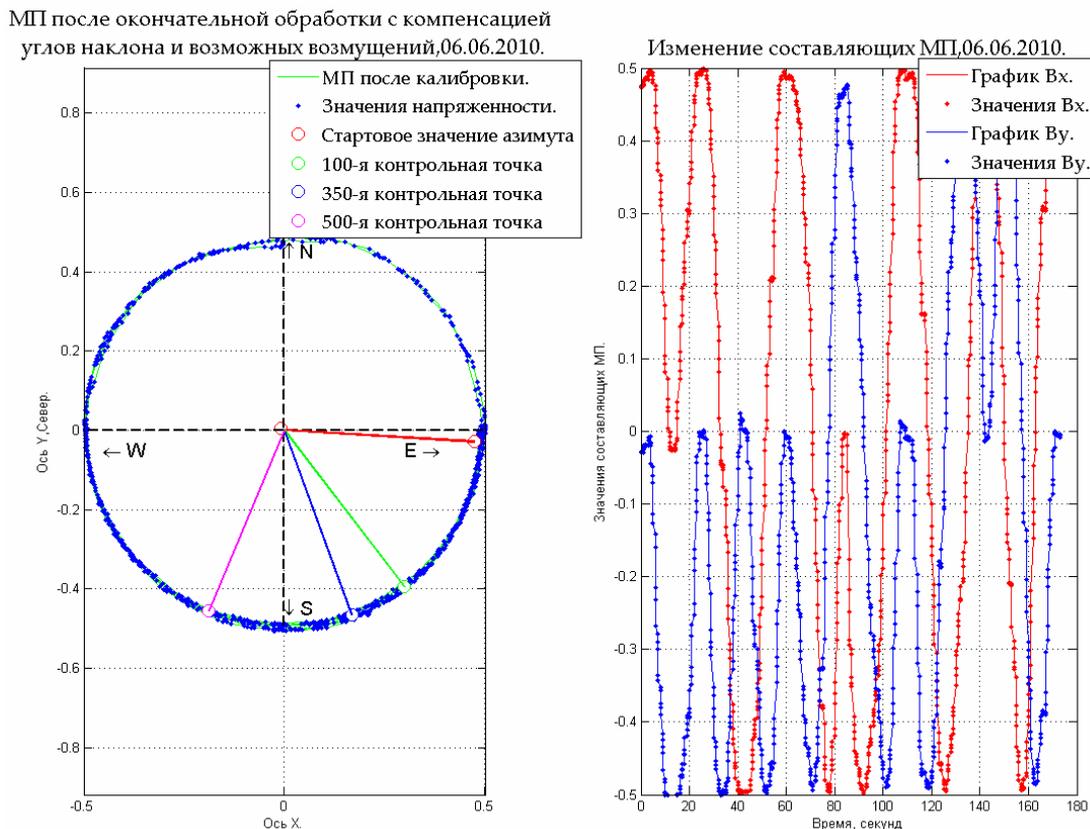


Рис. 3. Обратный поворот окружности, реальная картина магнитного поля в заданной точке после устранения Hard Iron Distortion и Soft Iron Distortion

Полученные значения X_{real_n} и Y_{real_n} являются исходными значениями для расчета азимута [9]:

$$Azimuth = \arctan\left(\frac{X_{real_n}}{Y_{real_n}}\right). \quad (15)$$

Расчет азимута ведется, исходя из следующих условий (учет квадрантов):

- 1) если $Y_{real_n} > 0$ и $X_{real_n} = 0$, то $Azimuth = 0$;
- 2) если $Y_{real_n} > 0$ и $X_{real_n} > 0$, то $Azimuth = \arctan\left(\frac{X_{real_n}}{Y_{real_n}}\right)$;
- 3) если $Y_{real_n} = 0$ и $X_{real_n} > 0$, то $Azimuth = 90$;
- 4) если $Y_{real_n} < 0$ и $X_{real_n} = 0$, то $Azimuth = 180$;
- 5) если $Y_{real_n} = 0$ и $X_{real_n} < 0$, то $Azimuth = 270$;
- 6) если $Y_{real_n} < 0$ и $X_{real_n} > 0$, то $Azimuth = 180 + \arctan\left(\frac{X_{real_n}}{Y_{real_n}}\right)$;
- 7) если $Y_{real_n} < 0$ и $X_{real_n} < 0$, то $Azimuth = 180 + \arctan\left(\frac{X_{real_n}}{Y_{real_n}}\right)$;
- 8) если $Y_{real_n} > 0$ и $X_{real_n} < 0$, то $Azimuth = 360 + \arctan\left(\frac{X_{real_n}}{Y_{real_n}}\right)$.

Для проверки правильности расчета азимута с учетом квадрантов на рис. 3 отображены три произвольных угла:

- «красный» угол (1-я точка в наборе данных) = 93,5114 градусов;
- «зеленый» угол (100-я точка в наборе данных) = 142,7481 градусов;
- «синий» угол (350-я точка в наборе данных) = 160,0940 градусов;
- «сиреневый» угол (500-я точка в наборе данных) = 202,5148 градусов.

На рис. 4 [10] представлена зависимость изменения азимута во времени при обработке набора данных от 06.06.2010 г. и изменения угла поворота компаса во времени (без учета магнитного склонения Земли для данной местности и с учетом магнитного склонения).

Левая часть графика (рис. 4) отображает результаты расчета азимута с помощью приведенной выше методики и без учета угла магнитного склонения. Правая часть графика содержит результаты расчета азимута, с учетом угла магнитного склонения.

Угол магнитного склонения определяется по таблицам магнитных склонений. Так как Северному магнитному полюсу Земли свойственно явление прецессии, его местоположение изменяется во времени, что ведет за собой изменение угла магнитного склонения. Значение угла магнитного склонения было принято равным 3 градусам 24 минутам (восточное, г. Смела, Черкасская область, Украина).

Поэтому, для точного определения азимута необходимо использовать новейшие таблицы углов магнитного склонения, так как устаревшие таблицы будут содержать заведомо некорректные значения углов.

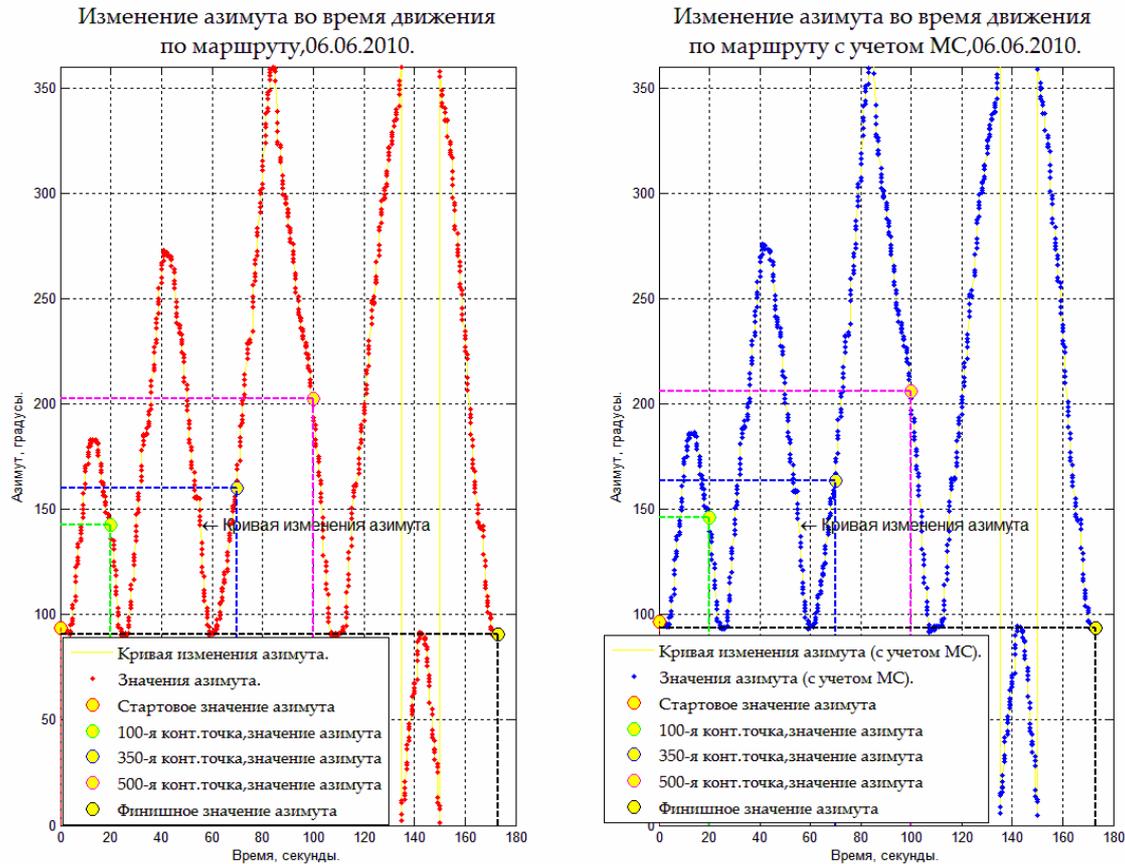


Рис. 4. Изменение азимута при прохождении произвольно заданной траектории

Рассмотренный метод определения горизонтальных составляющих магнитного поля Земли при помощи датчиков магнитного поля в составе электронного компаса предлагается использовать в качестве бюджетного варианта изделия для автомобильного использования. Автомобильное применение подразумевает использование недорогих чувствительных элементов [3, 4].

Первичная компенсация возмущающих воздействий на чувствительные элементы электронного компаса осуществляется только после окончательной установки изделия и подключения его к бортовой сети автомобиля. Таким образом, реализуется процедура начальной выставки готового изделия. При изменении картины магнитного поля в окрестности компаса посредством установки его на другое транспортное средство или при внесении изменений в конструкцию автомобиля с использованием металлических деталей проведение начальной выставки компаса является обязательным. Окончание процедуры начальной выставки и устранение Hard Iron Distortion и Soft Iron Distortion позволяют приступить к штатной эксплуатации изделия.

Дальнейшим развитием предложенной идеи в части определения горизонтальных составляющих магнитного поля Земли является использование чувствительных элементов электронного компаса с улучшенными показателями точности. При этом необходимо учитывать тот факт, что использование более точных

датчиков зачастую влечет за собой увеличение себестоимости изделия, что не всегда актуально в свете автомобильного применения разработанного изделия.

Помимо использования чувствительных элементов с лучшими показателями точности предполагается интегрирование показаний электронного компаса с данными, получаемыми от одной (или нескольких) систем GNSS (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), используя для этого один из алгоритмов калмановского типа [11].

Комплексирование позволяет корректировать показания компаса с помощью сигналов GNSS в режиме реального времени и определять курс и координаты объекта с помощью компаса при отсутствии по какой-либо причине сигналов GNSS или отсутствии подтверждения о целостности системы.

Выводы

1. Реализована процедура определения горизонтальных составляющих магнитного поля Земли с помощью двухосевого магнетометра.

2. Процедура была выбрана на основе проведенного анализа известных методов устранения внешних влияний, а также согласно рекомендациям производителей датчиков магнитного поля. Реализация самой процедуры подразумевает компенсацию и/или устранение внешних факторов, искажающих картину магнитного поля — Hard Iron Distortion и Soft Iron Distortion.

3. Горизонтальные составляющие магнитного поля Земли после устранения влияния дестабилизирующих факторов используются для определения истинного азимута как угла между направлением движения объекта и направлением на Северный магнитный полюс.

4. При определении истинного азимута необходимо учитывать наличие угла магнитного склонения, значение которого определяется таблично и зависит от прецессии Северного магнитного полюса Земли.

5. Для минимизации дисперсии определения азимута при движении объекта возможно использование алгоритма калмановского типа.

6. Инициализация процедуры определения горизонтальных составляющих МПЗ осуществляется только после установки готового изделия в транспортное средство с целью учета возможным возмущений магнитного поля, вызываемых кузовом и двигателем автомобиля.

7. Дальнейшим направлением развития предложенной идеи является использование чувствительных элементов с улучшенными показателями точности с целью уменьшения погрешности электронного компаса.

8. Предполагается комплексирование компаса со спутниковыми системами навигации с помощью алгоритма калмановского типа с целью создания комбинированной навигационной системы.

1. *Cho S.Y.* Tilt Compensation Algorithm for 2-Axis Magnetic Compass / S.Y. Cho, C.G. Park // IEE Electronics Letters. — 2003, October. — Vol. 39, N 22.

2. *Cho S.Y.* A Calibration Technique for a Two-Axis Magnetic Compass in Telematics Devices / S.Y. Cho, C.G. Park // ETRI Journal. — 2005, June. — Vol. 27, N 3.

3. *Caruso M.J.* Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems / Michael J. Caruso. — Honeywell Solid State Electronics Center. — 2004. — P. 1–8
4. *Withanawasam L.S.* Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors: [Sensor Products Datasheet] / Lucky S. Withanawasam, Michael J. Caruso. — Honeywell Solid State Electronics Center. — 2005. — P. 3–11.
5. *Stork Thomas.* Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52. Application Note / Thomas Stork. — Philips Semiconductors Systems Laboratory. — Hamburg (Germany), 2003. — P. 3–18.
6. *Dual Axis Magnetic Sensor HMC1052L.* Sensor Products Datasheet [Электронный ресурс]: Honeywell Solid State Electronics Center. — 2006. — Режим доступа до ресурсу: http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/15/155428_1.pdf
7. *Bratland Tamara.* Linear Position Sensing Using Magnetoresistive Sensors / Tamara Bratland, Hong Wan. — Honeywell Solid State Electronics Center. — 2002. — P. 4–5.
8. *Konvalin Christopher.* Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects / Christopher Konvalin // MEMSense LLC. — 2009. — P. 2–10.
9. *Caruso M.J.* Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems / Michael J. Caruso. — Honeywell Solid State Electronics Center. — 2005. — P. 3–4.
10. *Лазарев Ю.Ф.* Начала программирования в среде MatLAB: [учеб. пособ.] / Юрий Федорович Лазарев. — К.: НТУУ «КПИ», 2003. — 424 с.
11. *Yang Yunchun.* Magnetometer and Differential Carrier Phase GPS-Aided INS for Advanced Vehicle Control / Yunchun Yang, Jay A. Farrell // IEEE Transactions On Robotics and Automation. — 2003, April. — Vol. 19, N 2.

Поступила в редакцию 12.07.2010