

## КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

© 2014

*А.А. Сытник*, кандидат технических наук, профессор, проректор по учебной работе

*А.В. Гончаров*, кандидат технических наук, доцент

*Н.В. Раевский*, кандидат технических наук, доцент

*Черкасский государственный технологический университет, Черкассы (Украина)*

**Ключевые слова:** магнитное поле Земли; азимут; широта; угол падения; смещение нуля; компенсация; матрица данных; матрица поворота; магнитометр; коэффициент шкалы.

**Аннотация:** Реализована полнофункциональная процедура компенсации влияния дестабилизирующих факторов различной природы в процессе определения составляющих магнитного поля Земли с помощью магнитометрических датчиков. Данная процедура включает в себя определение горизонтальных составляющих магнитного поля Земли при помощи магнитометров, а также определение вертикальной составляющей вектора напряженности магнитного поля Земли по значению угла падения.

Определение горизонтальных составляющих магнитного поля Земли подразумевает компенсацию внешних факторов, искажающих картину магнитного поля – Hard Iron Distortion и Soft Iron Distortion. Горизонтальные составляющие магнитного поля Земли после устранения влияния дестабилизирующих факторов используются для определения истинного азимута.

Данные, получаемые от датчиков, в своем составе содержат шумовую составляющую. Наличие шумовой составляющей является негативным фактором, который необходимо устранить. Устранение шумовой составляющей предложено реализовать с помощью процедуры фильтрации данных, поступающих от датчиков в режиме реального времени. Для фильтрации предлагается использование алгоритма классического фильтра Калмана, который позволяет добиться улучшения точностных характеристик компаса и минимизации шума в полезном сигнале.

В работе также представлена задача аналитического определения величины вертикальной составляющей вектора напряженности магнитного поля Земли. Для определения вертикальной составляющей используются угол магнитного падения, углы крена и тангажа, а также данные, полученные с датчиков. Вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля Земли, в свою очередь, используется при расчете истинного азимута для коррекции возможного наклона платформы с чувствительными элементами.

Корректный расчет углов наклона платформы электронного компаса является необходимым критерием для определения истинного азимута.

На данном этапе развития магнитометрических датчиков широкое распространение получили электронные компасы.

Электронные компасы используются в транспортных средствах различного назначения, мобильных устройствах для ориентации в пространстве относительно магнитных полюсов Земли. Последняя информация используется в картографических программах с целью навигации объекта на местности.

Магнитное поле Земли в каждой точке пространства характеризуется вектором напряженности, направление которого определяется в прямоугольной системе координат горизонтальной (определяется двумя составляющими: северной и восточной) и вертикальной составляющими.

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, могут быть использованы для определения положения платформы по отношению к ориентиру – магнитному полюсу Земли.

В случае отсутствия вносимых искажений (идеальный случай) в значения МПЗ при вращении компаса вокруг вертикальной оси на 360 градусов (полный оборот) измеренные значения МПЗ формируют окружность с центром в точке (0,0).

На практике же получение идеальной окружности с центром в точке (0,0) невозможно по причине влияния на результаты измерений составляющих МПЗ внешних дестабилизирующих факторов различной природы.

Влияние дестабилизирующих факторов при измерении составляющих МПЗ с помощью магнитометрических датчиков проявляется таким образом, что форма окружности искажается и приобретает форму эллипса, а центр этой окружности смещается по координатной плоскости. Величина смещения центра окружности определяется уровнем вносимых искажений.

Подобная форма МПЗ Земли, полученная в результате наложения дестабилизирующих факторов на реальные значения МПЗ, не может быть использована для корректного определения текущего положения платформы или объекта в силу того, что погрешность измерений в свою очередь влечет за собой погрешность в расчетах координат.

Для определения истинных значений составляющих МПЗ необходимо реализовать процедуры компенсации дестабилизирующего влияния внешних факторов.

Дестабилизирующие внешние факторы можно охарактеризовать следующим образом [1].

– Hard Iron Distortion – вносимое аддитивное искажение, генерирующее постоянную составляющую, которая накладывается на искомое значение напряженности МПЗ. К появлению данного рода искажений может приводить, например, расположение вблизи магнитометров постоянного магнита звуковой колонки или динамика.

Пока положение магнита и его ориентация будут постоянными относительно датчика, магнитное поле и его смещение будут также постоянны. Идентификация Hard Iron Distortion может быть визуальна произведена по смещению точки начала координат при анализе карты напряженности МПЗ.

– Soft Iron Distortion. В отличие от Hard Iron Distortion, где результатом искажений является суммарное МПЗ и магнитное поле постороннего предмета, искажение Soft Iron Distortion вносится предметами, которые искажают окружающее магнитное поле, но не обязательно генерируют свое. Например, 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 ряд более сложных процедур.

Поэтому целью данной работы является описание процедур компенсации дестабилизирующего влияния внешних факторов различной природы на датчики магнитного поля. К цели работы также относится задача аналитического определения величины вертикальной составляющей вектора напряженности МПЗ.

Вертикальная составляющая вектора напряженности МПЗ, в свою очередь, используется для компенсации углов наклона платформы электронного компаса.

Корректный расчет углов наклона платформы электронного компаса является необходимым критерием для определения истинного азимута.

#### Компенсация Hard Iron Distortion

Процедура устранения аддитивной постоянной составляющей в показаниях магнитометров состоит из нескольких этапов: платформа с датчиками располагается горизонтально; вокруг вертикальной оси совершается несколько полных оборотов; фиксируются максимальные и минимальные значения составляющих для каждой оси магнитометра.

Полученные максимальные и минимальные значения используются для нахождения смещения нуля (*Offset*) [2]:

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

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 обработки «сырых» данных, поступающих от магнитометров:

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

где  $DATA_X$ ,  $DATA_Y$  – «сырые» данные, получаемые от датчиков двухосевого магнитометра HMC1052L (*Honeywell*) [3].

На рис. 1. изображена форма магнитного поля и соответствующие графики изменения его составляющих, полученные в среде MatLAB [4].

Верхний левый график на рис. 1. представляет собой визуализацию магнитного поля с помощью «сырых» составляющих, без компенсации смещений нуля и коэффициента шкалы. Нижний левый график визуализирует магнитное поле с устраненной постоянной составляющей магнитного поля в выходных сигналах датчиков. Оба правых графика на рис. 1 показывают изменения значений составляющих МПЗ с течением времени до калибровки датчика и после его калибровки. Для наглядности визуализации данных на рис. 1 и последующих выбран временной интервал продолжительностью 180 сек. При необходимости величина временного интервала может быть изменена с целью улучшения репрезентативности полученных данных.

Как видно из рисунков, при использовании в построении «сырых» данных наблюдается смещение точки начала координат. Смещение точки начала координат 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 иное воздействие на составляющие магнитного поля, чем Hard Iron Distortion: не вносит аддитивной составляющей, но искажает форму магнитного поля [1].

Явным примером подобного искажения является нижний график на рис. 1. 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*):

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

Координаты точки с максимальной и минимальной магнитудами будут координатами вершин эллипса, и через них и точку начала координат можно провести полуоси. Наличие координат осей эллипса позволяет найти его угол наклона относительно оси ординат:

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

После определения координат вершин эллипса, длин его полуосей и угла наклона, необходимо реализовать процедуру поворота эллипса на найденный угол  $\theta$ .

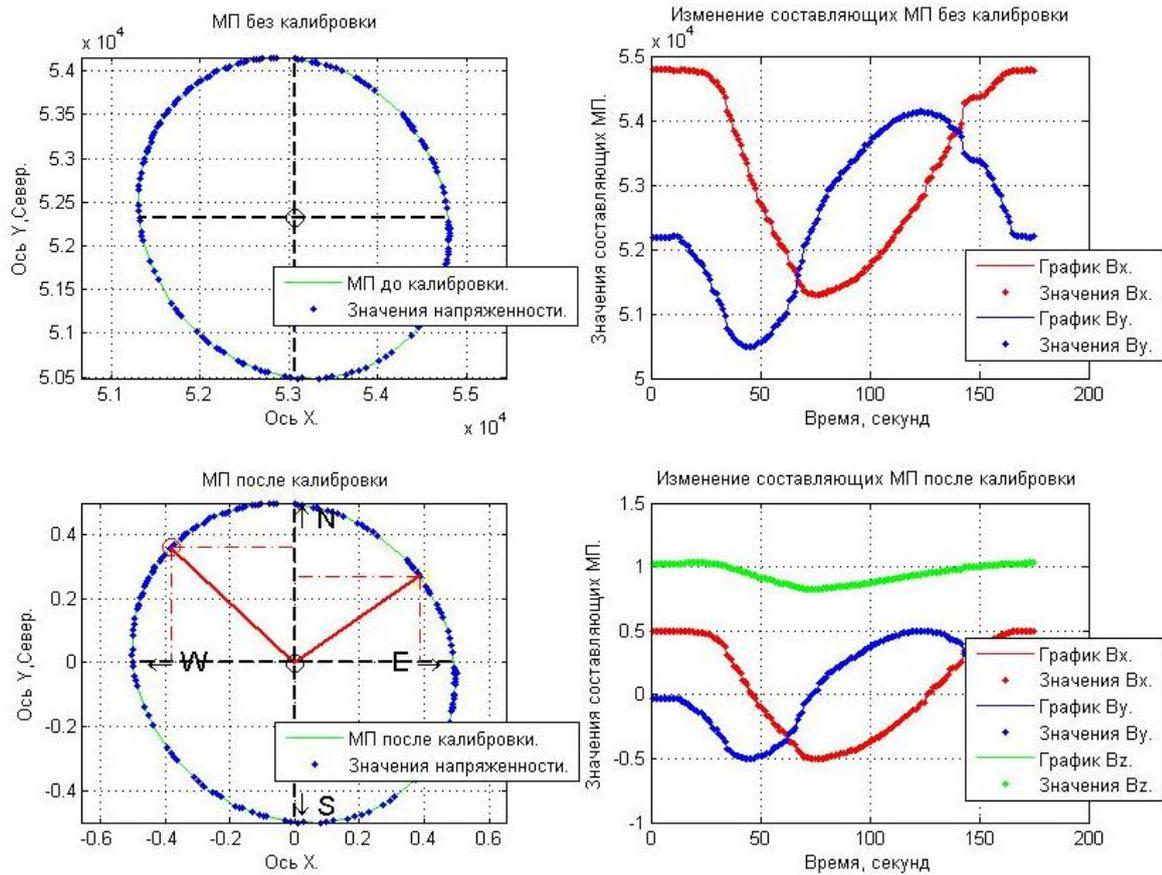


Рис. 1. Магнитное поле и его составляющие до и после компенсации Hard Iron Distortion

Для этого формируется матрица данных ( $\nu$ ) и матрица поворота ( $R$ ), которая повернет эллипс на заданный угол ( $\theta$ ) вокруг вертикальной оси:

$$\nu = \begin{bmatrix} X_{real} \\ Y_{real} \end{bmatrix};$$

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

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

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 наклона платформы с магниточувствительными элементами необходимо введение в систему датчиков наклона. Введение датчиков наклона позволяет реализовать процедуры определения углов крена и тангажа. В качестве датчиков предлагается использование двухосевого акселерометра, который, по сути, является датчиком угла наклона – инклинометром. Определенные с помощью инклинометра углы крена и тангажа используются для коррекции наклона составляющих магнитного поля. Предположим, что магнитометр HMC1052L 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).

После поворота эллипса и ориентации его большой полуоси перпендикулярно к горизонтальной оси необходимо еще раз провести процедуру нормирования данных. Процедура нормирования преобразовывает эллипс в окружность, тем самым устраняя искажения формы магнитного поля Soft Iron Distortion (рис. 2) [4].

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

$$\begin{cases} X_{offset\_turn} = (X_{real\_t\_max} + X_{real\_t\_min})/2, \\ Y_{offset\_turn} = (Y_{real\_t\_max} + Y_{real\_t\_min})/2, \end{cases}$$

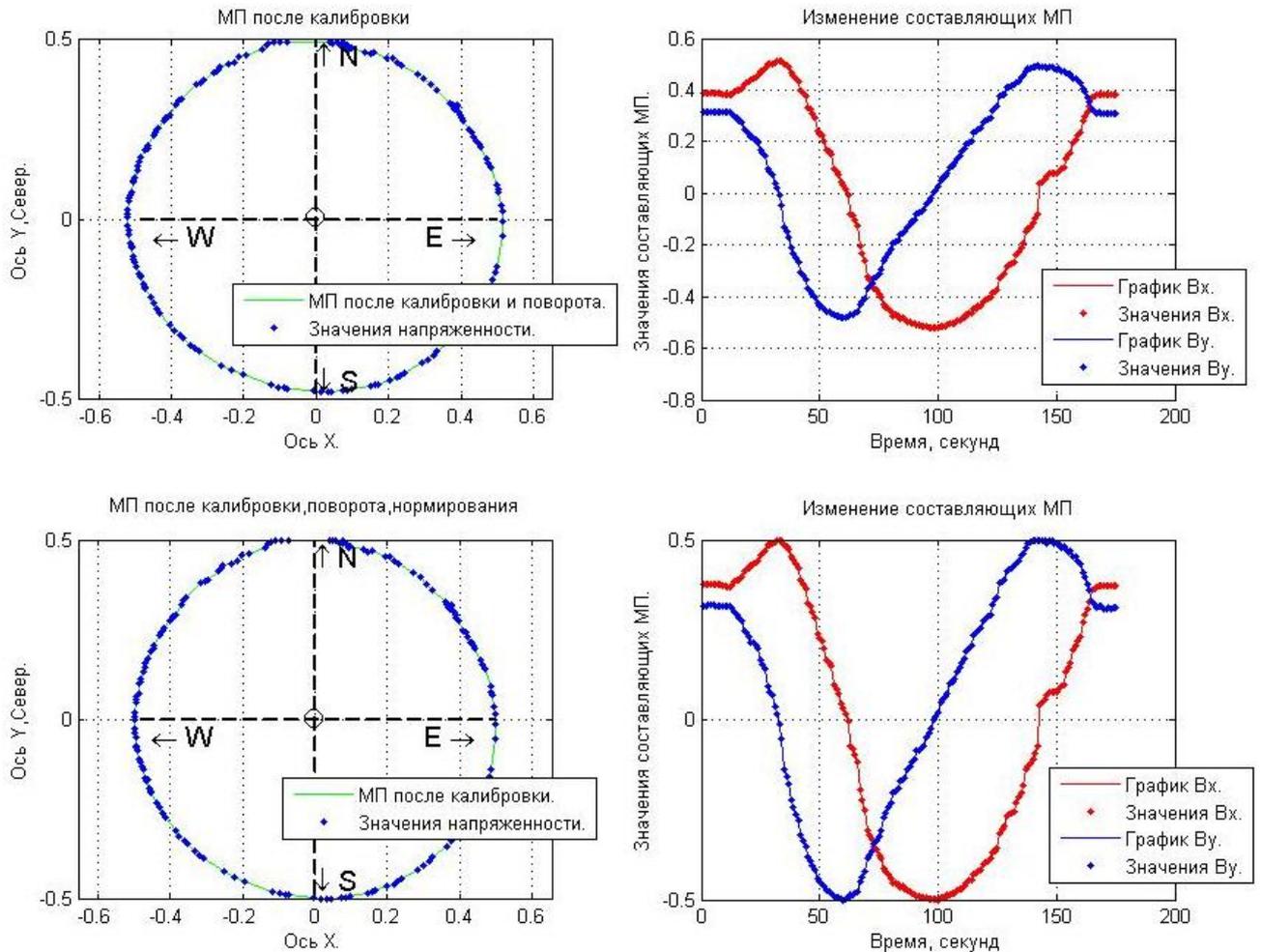


Рис. 2. Поворот эллипса на заданный угол и его нормирование

$$\begin{cases} X_{peaktopeak\_t} = X_{real\_t\_max} - X_{real\_t\_min}, \\ Y_{peaktopeak\_t} = Y_{real\_t\_max} - Y_{real\_t\_min}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{real\_n} = (X_{real\_turn} - X_{offset\_turn}) / X_{peaktopeak\_t}, \\ Y_{real\_n} = (Y_{real\_turn} - Y_{offset\_turn}) / Y_{peaktopeak\_t}. \end{cases}$$

В результате нормирования эллипс эволюционирует в окружность, представленную на нижнем левом графике рис. 2.

Верхний левый график (рис. 2) демонстрирует повернутый на угол  $\theta$  эллипс.

Верхний правый и нижний правый графики, приведенные на рис. 2, показывают изменения значений составляющих МПЗ во времени как до калибровки (правый верхний график), так и после процедур калибровки, нормирования и поворота эллипса (правый нижний график).

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

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

$$\theta_{inv} = -\theta;$$

$$v_{inv} = \begin{bmatrix} X_{real\_n} \\ Y_{real\_n} \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{inv}) & \sin(\theta_{inv}) \\ -\sin(\theta_{inv}) & \cos(\theta_{inv}) \end{bmatrix};$$

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

Результат обратного поворота полученной окружности показан на рис. 3.

Полученные значения  $X_{real\_n}$  и  $Y_{real\_n}$  являются фактическими значениями составляющих МПЗ (проекции на координатные оси).

Для определения угла между двумя векторами используется формула (4), а угол, определяемый с ее помощью, является азимутом [5]:

$$Azimuth = \arctg \left( \frac{X_{real\_n}}{Y_{real\_n}} \right). \quad (4)$$

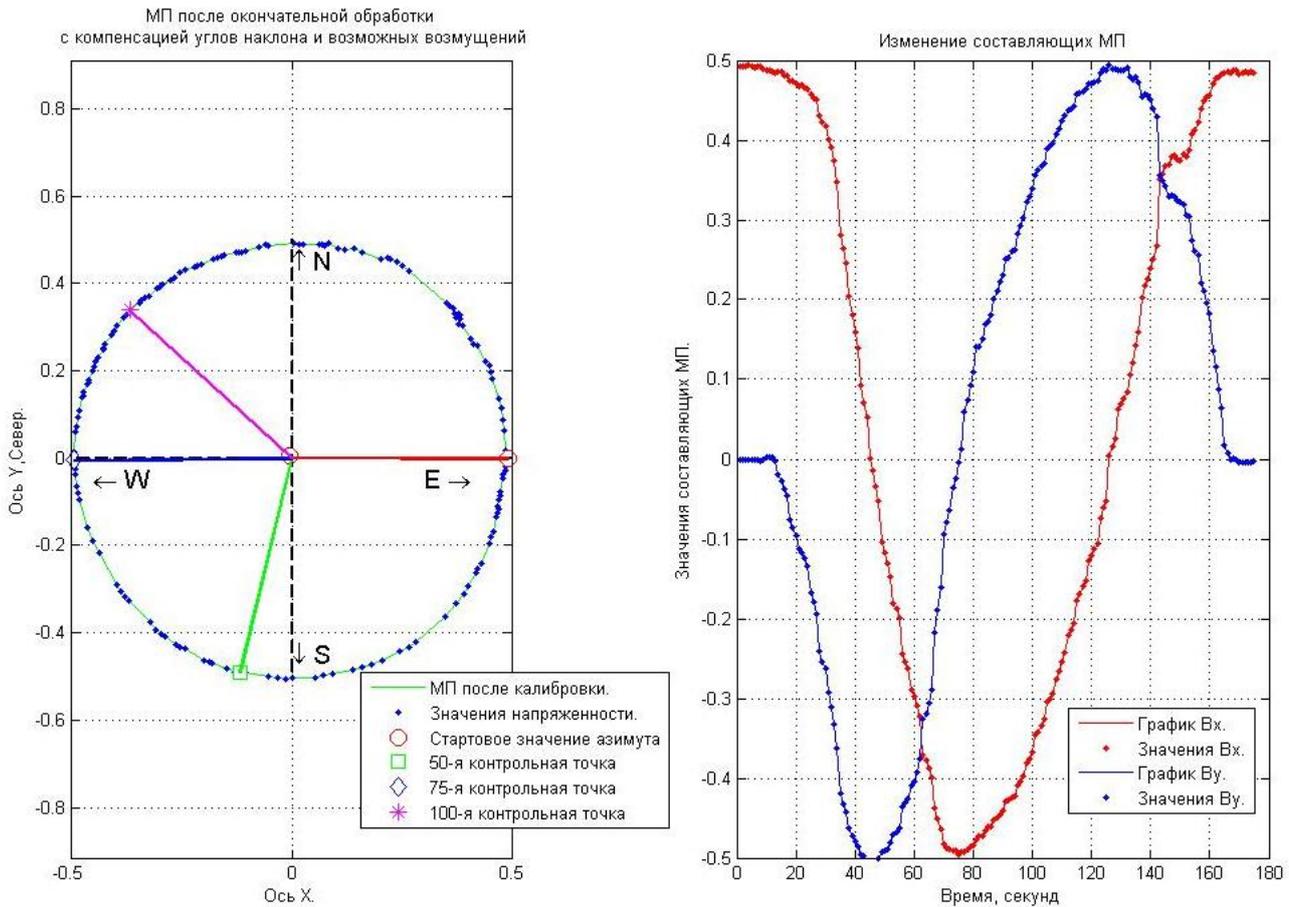


Рис. 3. Картина магнитного поля в заданной точке после устранения Hard Iron Distortion и Soft Iron Distortion

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: «зеленый» угол (50-я точка в наборе данных), «синий» угол (75-я точка в наборе данных), «сиреневый» угол (100-я точка в наборе данных), «красный» угол (1-я точка в наборе данных).

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

Левая и правая часть рис. 4. отображает результаты расчета азимута с помощью приведенной выше методики без учета угла магнитного склонения и с его учетом соответственно. Приведенные графики (рис. 4) изменения азимута во времени дают возможность сопоставить и оценить влияние угла магнитного склонения на значения азимута в процессе обработки данных.

Угол магнитного склонения определяется по актуальным таблицам магнитных склонений.

С целью улучшения точностных характеристик компаса проводилась обработка полученных результатов с использованием алгоритма классического фильтра Калмана. Использованный алгоритм фильтрации идентичен

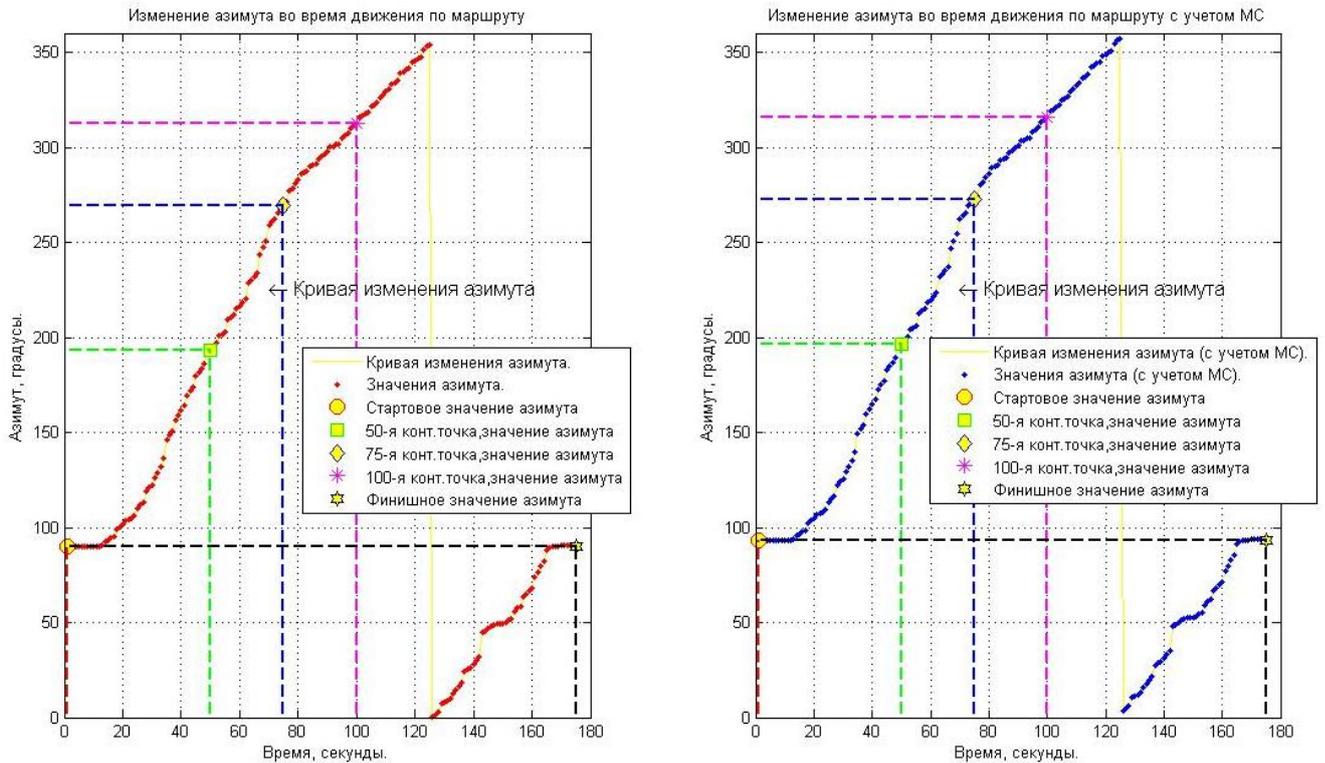


Рис. 4. Изменение азимута при прохождении произвольно заданной траектории

алгоритму, применяемому для обработки выходных сигналов акселерометров.

Структура фильтра и используемые наборы матриц, их структуры также идентичны – меняется только источник данных, а также значение дисперсии, используемое в матрице шума измерений.

Данные, получаемые от датчиков, в своем составе содержат шумовую составляющую. Наличие шумовой составляющей является негативным фактором, который необходимо устранить. Устранение шумовой составляющей предложено реализовать с помощью процедуры фильтрации данных, поступающих от датчиков в режиме реального времени. В качестве фильтра был использован алгоритм калмановского типа, а именно классический фильтр Калмана. Классический фильтр Калмана является каноническим алгоритмом оценки состояния линейной системы, описание которого выходит за рамки данной работы.

**Определение вертикальной составляющей вектора напряженности МПЗ**

Для определения вертикальной составляющей вектора напряженности МПЗ, величина которой используется для компенсации углов наклона платформы электронного компаса, необходимо определить угол магнитного падения (*dip angle*), величина которого зависит от широты местности ( $L$  – широта местности в градусах). Угол падения (УП) в первом приближении определяется с помощью выражения [6; 7]:

$$\lambda = \arctg(2 \cdot \tg(L))$$

Для г. Смела Черкасской области Украины ( $L = 49,2^\circ$ ) УП равен:

$$\lambda = a \tan(2 \cdot \tan(49,2)) \cdot \frac{180}{\pi} = 66,65^\circ$$

Последнее выражение позволяет оценить УП в первом приближении. Используя УП, углы крена (*roll angle*)  $\varphi$  и тангажа (*pitch angle*)  $\theta$ , а также полученные с датчиков данные  $X_{real}$ ,  $Y_{real}$ , определим вертикальную составляющую МПЗ с помощью следующего выражения:

$$Z_{ES} = \frac{\sin(\lambda) + X_{real} \cdot \sin(\theta) - Y_{real} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\theta) \cdot \cos(\varphi)}$$

Исходя из полученных от магнитометра значений составляющих магнитного поля по осям  $X$ ,  $Y$  и аналитически найденных значений вертикальной составляющей по оси  $Z$ , могут быть определены горизонтальные компоненты МПЗ с учетом наклона платформы [6; 7]:

$$\begin{cases} X_{TILT C} = Y_{real} \cdot \cos(\theta) + Y_{real} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) + Z_{ES} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi), \\ Y_{TILT C} = Y_{real} \cdot \cos(\varphi) - Z_{ES} \cdot \sin(\varphi). \end{cases}$$

В результате внесения поправок в исходные данные о горизонтальных компонентах были учтены углы наклона вдоль каждой из горизонтальных осей и компенсировано возникающее искажение картины МПЗ.

Полученные в результате компенсации углов наклона величины не являются конечными для расчета азимута. Для расчета азимута используются значения составляющих магнитного поля, над которыми были осуществлены процедуры алгоритма компенсации Soft Iron Distortion. Поэтому расчет азимута по значениям  $X_{TILT}$  и  $Y_{TILT}$  недопустим и должен осуществляться после компенсации Soft Iron Distortion.

**Расчёт расширенного угла падения (Extended Dip Angle)**

С помощью определенных значений азимута, горизонтальных и вертикальной составляющих вектора напряженности МПЗ, определяется расширенный угол падения – РУП (рис. 5):

$$\lambda_{EXTENDED} = \arctg\left(\frac{X_{real\_n} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) - \cos(\varphi) \cdot tg(Azimuth) - Y_{real} \cdot \cos(\varphi)}{\sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \cdot tg(Azimuth) - \sin(\varphi)}\right) \quad (5)$$

Графики, приведенные на рис. 5, показывают изменение значений РУП с течением времени в результате обработки массива данных реальных измерений.

При использовании выражения (5) для расчета РУП возникают некоторые сложности.

1. Знаменатель выражения (5) может быть равен нулю. Это возможно в том случае, когда оба угла наклона, угол крена и угол тангажа, имеют нулевые значения (платформа расположена строго горизонтально). Если оба угла характеризуются нулевыми значениями величин, имеет место неопределенность вследствие деления на 0.

2. Необходимо иметь информацию об азимуте, определенном в первом приближении.

С целью устранения возможных вышеперечисленных проблем необходимо выполнить следующие действия.

1. Вычислить азимут при нахождении устройства в горизонтальной плоскости без расчета РУП, используя лишь аналитически определяемый по широте местности УП. Информация об азимуте после этого расчета уже будет в наличии для дальнейших расчетов.

2. После вычисления азимута платформу с чувствительными элементами необходимо повернуть вдоль одной из осей, X или Y. В результате угол тангажа уже не будет нулевой, и может быть использован для дальнейших расчетов.

Далее, используя полученные данные об азимуте и углах наклона, реализуется процедура расчета  $\lambda_{EXTENDED}$ .

Массив значений, представляющий собой результат расчета расширенного угла магнитного склонения для каждой точки пройденного пути, используется для уточненного расчета вертикальной составляющей МПЗ [6, 7]:

$$Z_{EXT\_ES} = \frac{\sin(\lambda_{EXTENDED}) + X_{real} \cdot \sin(\theta) - Y_{real} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\theta) \cdot \cos(\varphi)}$$

Используя рассчитанные значения  $Z_{EXT\_ES}$ , реализуется процедура перерасчета углов наклона, которые учитываются при получении рис. 6 [4]:

$$\begin{cases} X_{TILT\ EX} = Y_{real} \cdot \cos(\theta) + Y_{real} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) + \\ + Z_{EXT\_ES} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \\ Y_{TILT\ EX} = Y_{real} \cdot \cos(\varphi) - Z_{EXT\_ES} \cdot \sin(\varphi) \end{cases}$$

В качестве вывода можно отметить, что в работе реализована процедура определения горизонтальных составляющих МПЗ с помощью двухосевого магнитометра. Рассмотренная процедура определения горизонтальных составляющих МПЗ подразумевает компенса

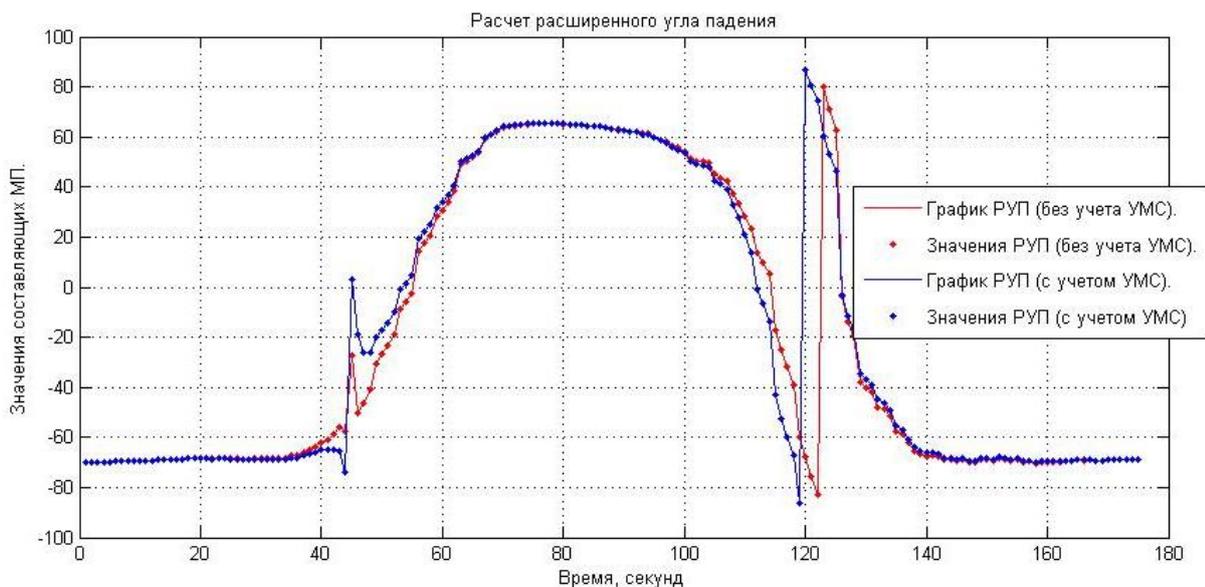


Рис. 5. Расширенный угол падения (Extended Dip Angle, EDA)

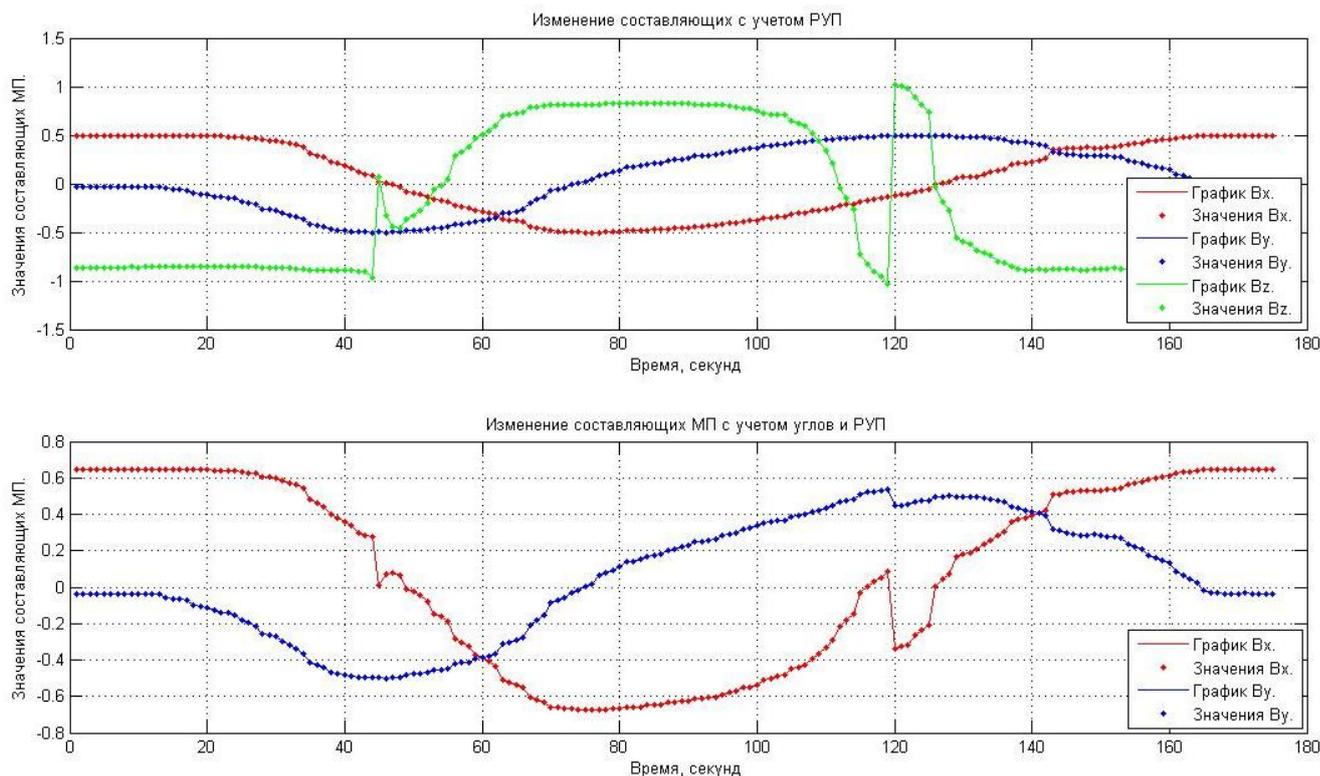


Рис. 6. Составляющие магнитного поля Земли, рассчитанные с учетом РУП

цию внешних факторов, искажающих картину магнитного поля – Hard Iron Distortion и Soft Iron Distortion. Горизонтальные составляющие МПЗ после устранения влияния дестабилизирующих факторов используются для определения истинного азимута. Для минимизации шума в полезном сигнале акселерометра предлагается использование алгоритма фильтрации калмановского типа. Использование алгоритма калмановского типа применительно к выходным данным акселерометра позволяет снизить уровень шумов в 2,5 раза (для случая классического фильтра Калмана).

Графики, приведенные на рис. 6, показывают изменение значений составляющих МПЗ с течением времени в результате обработки массива данных реальных измерений.

Полученные результаты позволяют говорить о погрешности определения азимута не более 3 градусов при использовании фильтрации (рекурсивная оценка с помощью алгоритма Калмана проводится в прямом направлении и режиме реального времени) и не больше 1,8 градусов (в среднем – 1 градус) при сглаживании фильтрованных значений азимута. Под сглаживанием следует понимать использование алгоритма RTS (Rauch–Tung–Striebel). Данный алгоритм реализует рекурсию в обратном относительно рекурсии фильтра Калмана направлении и используется для уточнения полученных данных в режиме постобработки. Оценка погрешностей производилась путем сравнения обработанных данных (как с помощью фильтра Калмана в режиме реального времени, так и с помощью алгоритма RTS в режиме постобработки) с данными, которые не подвергались обработке с помощью упомянутых выше методик.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Konvalin C. Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects // *Sensors*. 2009. Vol. 26. № 12. P. 2–10.
2. Bratland T., Wan Hong. Linear Position Sensing Using Magnetoresistive Sensors // *Honeywell Solid State Electronics Center*. 2002. P. 4–5.
3. Dual Axis Magnetic Sensor HMC1052L. Sensor Products Datasheet. Honeywell Solid State Electronics Center. 2006. URL: [www.datasheetcatalog.org/datasheets2/15/155428\\_1.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/15/155428_1.pdf).
4. Лазарев Ю.Ф. Начала программирования в среде MatLAB. Киев: НТУУ КПИ, 2003. 424 с.
5. Caruso M.J. Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems // *Honeywell Solid State Electronics Center*. 2005. P. 3–4. DOI: 10.4271/970602.
6. Seong Yun Cho, Chan Gook Park. A Calibration Technique for a Two-Axis Magnetic Compass in Telematics Devices // *ETRI Journal*. 2005. Vol. 27. № 3. P. 281–288.
7. Cho S.Y., Park C.G. Tilt compensation algorithm for 2-axis magnetic compass // *Electronic Letters*. 2003. Vol. 39. № 22. P. 1589–1590.

#### REFERENCES

1. Konvalin C. Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects. *Sensors*, 2009, vol. 26, no. 12, pp. 2–10.
2. Bratland T., Wan Hong. Linear Position Sensing Using Magnetoresistive Sensors. *Honeywell Solid State Electronics Center*, 2002, pp. 4–5.
3. Dual Axis Magnetic Sensor HMC1052L. Sensor Products Datasheet. *Honeywell Solid State Electronics Center*, 2006. URL:

- www.datasheetcatalog.org/datasheets2/15/155428\_1.pdf.
4. Lazarev Yu.F. *Nachala programirovaniya v srede MatLAB* [Start programming in MatLAB]. Kiev, KPI, 2003, 424 c.
  5. Caruso M.J. Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems. *Honeywell Solid State Electronics Center*, 2005, pp. 3–4. DOI: 10.4271/970602.
  6. Seong Yun Cho, Chan Gook Park. A Calibration Technique for a Two-Axis Magnetic Compass in Telematics Devices. *ETRI Journal*, 2005, vol. 27, no. 3, pp. 281–288.
  7. Cho S.Y., Park C.G. Tilt compensation algorithm for 2-axis magnetic compass. *Electronic Letters*, 2003, vol. 39, no. 22, pp. 1589–1590.

## COMPENSATION OF DESTABILIZING FACTORS INFLUENCE IN THE PROCESS OF DETERMINATION OF THE EARTH MAGNETIC FIELD COMPONENTS USING THE MAGNETOMETER SENSORS

© 2014

**O.O. Sytnyk**, candidate of technical sciences, Professor, vice-rector for academic affairs

**A.V. Honcharov**, candidate of technical sciences, associate professor

**N.V. Raievskyi**, candidate of technical sciences, associate professor  
*Cherkasy State Technological University, Cherkasy (Ukraine)*

**Keywords:** the Earth magnetic field; azimuth; latitude; dip angle; zero shift; compensation; data matrix; rotation matrix; magnetometer; scale factor.

**Annotation:** The authors implemented the full-functional procedure of compensation of the influence of destabilizing factors of different nature in the process of determination of the Earth magnetic field components using the magnetometer sensors. This procedure includes the identifying of horizontal components of the Earth magnetic field using the magnetometers as well as the determining of vertical components of the Earth magnetic field strength vector by the dip angle value.

Determination of the horizontal components of the Earth magnetic field involves the compensation of external factors distorting the magnetic field pattern – Hard Iron Distortion and Soft Iron Distortion. The horizontal components of the Earth magnetic field after elimination of the destabilizing factors interferences are used for determination of the astronomical azimuth.

The data got from sensors contain a noise component. The presence of the noise component is a negative factor that must be eliminated. The authors suggested eliminating the noise component using the procedure of filtering the data coming from the sensors in real time mode. For filtering it was offered to apply the classical Kalman filter algorithm allows to achieve the improvement of compass accuracy characteristics and minimize the noise in the desired signal.

The article presents the problem of analytical determination of the vertical component value of the Earth magnetic field strength vector. Dip angle, the roll and pitch angles, and the data obtained from the sensors are used for determination of the vertical component. The vertical component of the Earth magnetic field vector, in its turn, is used to calculate the true azimuth for correction of possible inclination of the platform with sensing elements.

The correct calculation of platform angles of electronic compass is a necessary criterion to determine the true azimuth.