

## Электронные системы

УДК 621.3.082.78

А.Н. Лысенко, д-р техн. наук., И.Ю. Штурма

### Электронный магнитный компас на базе магниторезистивных датчиков и микроконтроллера серии MSC1200 фирмы Texas Instruments

Рассмотрены особенности реализации портативного электронного магнитного компаса с компенсацией наклона прибора относительно горизонтальной плоскости. Разработан макет измерительной системы такого компаса, проведены его испытания.

**Specificities of portable electronic magnetic compass with compensation of tilts from horizontal plane implementation considered. Prototype of measurement system of such compass developed and tested.**

**Ключевые слова:** компас, магнитометр, аксилерометр, магниторезистивный датчик, азимут

#### Введение

Электронные компасы широко применяются в геодезии и системах навигации как в качестве самостоятельных приборов, так и в составе более сложных систем (например, интегрированных навигационных систем на базе глобальной системы позиционирования – GPS). Преимущество электронных компасов перед традиционными заключается в отсутствии подвижных частей и, как следствие, высокой вибро- и ударопрочности, низкой инерционности, а также простоте интеграции с другим электронным оборудованием. В настоящее время в качестве чувствительного элемента миниатюрных электронных компасов наибольшее распространение получили датчики на основе анизотропного магниторезистивного эффекта (АМР) [1] в тонких ферромагнитных пленках. Это обусловлено сочетанием в них преимуществ микроминиатюризации при более высокой чувствительности по сравнению с микроэлектронными магниточувствительными преобразователями других типов, например, датчиками Холла или магнитоиндуктивными датчиками.

Целью работы является разработка портативного электронного магнитного компаса для применения в геодезии. Одним из основных требований, предъявляемых к разработке, является отсутствие необходимости в горизонтальной установке прибора, т. е. корректное определение азимута при наличии наклонов относительно горизонта.

#### Анализ метода измерения азимута

Расчет значения азимута основан на использовании метода, приведенного в работе [2]. Однако, прежде чем перейти к его рассмотрению, следует привести некоторые сведения о магнитном поле Земли (МПЗ), которое может быть представлено в виде магнитного диполя (рис. 1) [3].

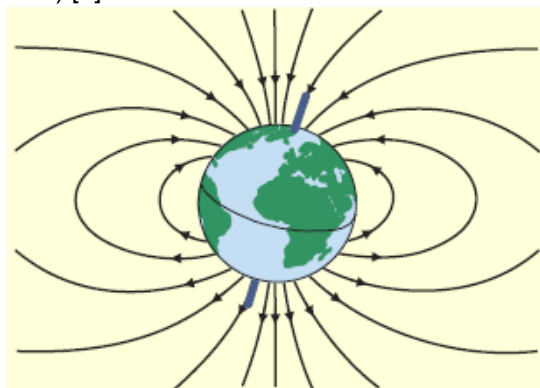


Рис. 1. Магнитный диполь

Напряженность МПЗ составляет примерно 30...50 А/м, поэтому измерение азимута требует высокой чувствительности используемых датчиков. Вектор напряженности МПЗ направлен к земле в Северном полушарии, от нее – в Южном и параллельно земной поверхности – на экваторе. Угол между вектором напряженности МПЗ и горизонтальной плоскостью, называемый углом магнитного склонения, в пределах территории Украины составляет 62...68°. Проекция этого вектора на горизонтальную плоскость, относительно которой происходит определение азимута, направлена на северный магнитный полюс Земли. Магнитные полюсы Земли не совпадают с географическими полюсами, определяемыми осью вращения. Угол между направлениями на истинный и магнитный северные полюсы называется магнитным склонением. Величина этого угла зависит от географического местоположения и может быть добавлена в виде поправки к конечному результату измерения азимута. Азимут, определяемый относительно магнитного полюса, также называется магнитным.

Введем прямоугольную систему координат  $XYZ$ , неподвижно связанную с Землей таким образом, что ось  $X$  лежит в плоскости магнитного меридиана и плоскости горизонта, направлена на северный магнитный полюс, ось  $Z$  направлена вниз, вдоль действия силы земного притяжения, а ось  $Y$  дополняет систему координат до правой (рис. 2). Вторая система координат  $X_C Y_C Z_C$  связана с компасом таким образом, что ось  $X_C$  направлена вдоль продольной оси прибора, ось  $Y_C$  – вдоль поперечной, а ось  $Z_C$  – перпендикулярна плоскости прибора.

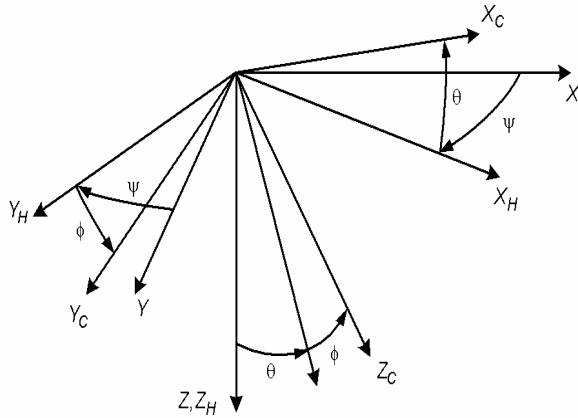


Рис. 2. Системы координат

При помощи магниточувствительных датчиков измеряются проекции напряженности магнитного поля на оси  $X_C Y_C Z_C$ , а при помощи акселерометров – проекции ускорения свободного падения на оси  $X_C$  и  $Y_C$ .

Введем также третью систему координат  $X_H Y_H Z_H$ , такую, что оси  $X_H$  и  $Y_H$  лежат в плоскости горизонта и  $X_H$  соответствует проекции на горизонтальную плоскость продольной оси компаса  $X_C$ .

Обозначим угол поворота вокруг оси  $Z$ , соответствующий искомому магнитному азимуту, как  $\psi$ , углы крена и тангажа – как  $\phi$  и  $\theta$ .

Переход от координат в системе  $XYZ$  к координатам в системе  $X_H Y_H Z_H$  осуществляется при помощи матрицы направляющих косинусов:

$$\begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix} = \mathbf{C}_\psi \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Переход от координат в системе  $X_H Y_H Z_H$  к координатам в системе  $X_C Y_C Z_C$  осуществляется путем последовательных поворотов в соответствии с углами тангажа и крена:

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \mathbf{C}_\phi \mathbf{C}_\theta \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Координаты вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{T}$  в системе координат  $XYZ$  определяются как:

$$[T_x \ T_y \ T_z]^T = [|\mathbf{T}| \cos I \ 0 \ -|\mathbf{T}| \sin I]^T,$$

где  $I$  – угол магнитного наклонения.

После их подстановки в выражение (1), можно выразить магнитный азимут:

$$\psi = \arctg \frac{-T_y^H}{T_x^H}. \quad (3)$$

Координаты вектора  $\mathbf{T}$  в системе  $X_H Y_H Z_H$  получаются из измеренных значений  $T_x^C, T_y^C, T_z^C$  путем их умножения на матрицу, образованную транспонированием матрицы направляющих косинусов, входящей в выражение (2):

$$T_x^H = T_x^C \cos \theta + T_y^C \sin \phi \sin \theta + T_z^C \cos \phi \sin \theta; \quad (4)$$

$$T_y^H = T_y^C \cos \phi - T_z^C \sin \phi. \quad (5)$$

Чтобы выразить значения углов  $\phi$  и  $\theta$ , подставим в выражение (1) координаты нормированного ускорения свободного падения:

$$\begin{bmatrix} G_x^C \\ G_y^C \\ G_z^C \end{bmatrix} = \mathbf{C}_\phi \mathbf{C}_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Из равенства (6) при помощи основного тригонометрического тождества выразим значения функций синус и косинус углов  $\theta$  и  $\phi$ :

$$\sin \theta = -G_x^C; \quad (7)$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - (G_x^C)^2}; \quad (8)$$

$$\sin \phi = \frac{G_y^C}{\cos \theta} = \frac{G_y^C}{\sqrt{1 - (G_x^C)^2}}; \quad (9)$$

$$\cos \phi = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{\frac{1 - (G_x^C)^2 - (G_y^C)^2}{1 - (G_x^C)^2}}. \quad (10)$$

Так как для определения азимута, согласно равенству (3), используется отношение  $T_y^H$  к  $T_x^H$ , выражения (4) и (5) для упрощения можно умножить на  $\cos \theta$ . После подстановки в выражения (4), (5) равенств (7)–(10) и умножения на  $\cos \theta$  получим две вспомогательные величины:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_x = T_x^C \left( 1 - (G_x^C)^2 \right) - T_y^C G_x^C G_y^C - \\ - T_z^C G_x^C \sqrt{1 - (G_x^C)^2 - (G_y^C)^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathcal{F}_y = T_y^C \sqrt{1 - (G_x^C)^2 - (G_y^C)^2} - T_z^C G_y^C. \quad (12)$$

Квадрант, которому принадлежит магнитный азимут, определяется по знакам  $\mathcal{F}_x$  и  $\mathcal{F}_y$ . Тогда, выражение для нахождения азимута имеет вид:

$$\psi = \begin{cases} \pi - \arctg(\mathcal{F}_y / \mathcal{F}_x), & \mathcal{F}_x < 0; \\ -\arctg(\mathcal{F}_y / \mathcal{F}_x), & \mathcal{F}_x > 0, \mathcal{F}_y \leq 0; \\ 2\pi - \arctg(\mathcal{F}_y / \mathcal{F}_x), & \mathcal{F}_x > 0, \mathcal{F}_y > 0; \\ \pi/2, & \mathcal{F}_x = 0, \mathcal{F}_y < 0; \\ 3\pi/2, & \mathcal{F}_x = 0, \mathcal{F}_y > 0. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, для определения азимута необходимы три датчика магнитного поля и два акселерометра, АЦП и вычислительное устройство, выполняющее расчет по формулам (11)–(13).

### Практическая реализация макета измерительной системы

Для испытания измерительной системы компаса был разработан и изготовлен макет измерительной системы электронного магнитного компаса, внешний вид которого приведен на рис. 3. В качестве датчиков магнитного поля выбраны магниторезистивные датчики HMC1002 (оси  $X_C, Y_C$ ) и HMC1001 (ось  $Z_C$ ) фирмы Honeywell, которые характеризуются высокой чувствительностью. Для определения наклонов использован двухосевой акселерометр MMA6270QT фирмы Freescale Semiconductor. Согласно рекомендациям производителя [4] для корректной работы указанных выше магниторезистивных датчиков производится периодическая подача кратковременных импульсов перемagnetизирования.

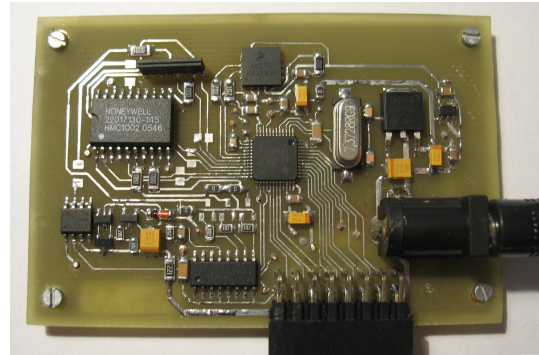


Рис. 3. Внешний вид макета

Для измерения выходных сигналов датчиков и их последующей предварительной цифровой обработки (фильтрации методом скользящего среднего) в устройстве используется прецизионная система сбора данных MSC1200 фирмы Texas Instruments, представляющая собой объединенные на одном кристалле 24-разрядный  $\Delta$ - $\Sigma$  АЦП и микроконтроллерное ядро с архитектурой 8051. Такое решение позволяет уменьшить потребляемую мощность и габариты устройства, а также упростить трассировку печатной платы.

Макет устройства реализует только измерительные функции, все последующие расчеты по формулам (11)–(13) производятся на персональном компьютере в среде LabVIEW (рис. 4).

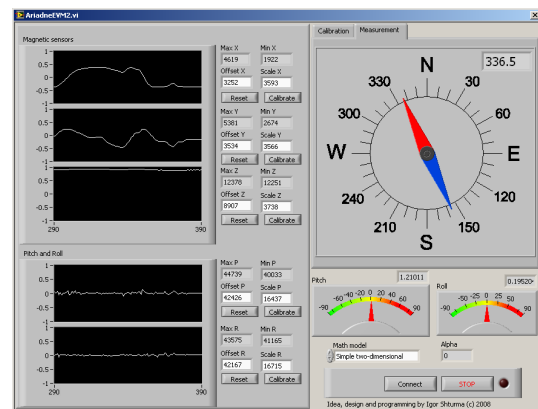


Рис. 4. Интерфейс виртуального электронного магнитного компаса в среде LabVIEW

### Калибровка и испытание макета

Процедура калибровки магнитного компаса усложняется тем, что элементы конструкции, используемой для ориентации прибора в пространстве должны полностью состоять из немагнитных материалов. Кроме того, сама процедура должна проводиться в магнитно чистом окружении. Из-за отсутствия необходимого оборудования калибровка макета производилась вручную путем наблюдения на экране персонального компьютера графика выходного сигнала калибруемого датчика в реальном режиме времени и поиска ориента-

ций, при которых сигнал принимает максимальное и минимальное значения.

Калибровка акселерометров производилась при помощи медленного вращения макета, жестко закрепленного на вертикальном барабане. При этом выходные сигналы датчиков также проходят через максимальное и минимальное значения.

По результатам калибровки для каждого из измерительных каналов определены значение смещения  $K_0$  и коэффициент масштабирования  $K_s$ :

$$K_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}; K_s = \frac{2}{x_{\max} - x_{\min}}.$$

После калибровки сигналы, снимаемые с датчиков, нормируются в диапазоне  $[-1;1]$  следующим образом:

$$x' = (x - K_0)K_s.$$

Для проведения испытаний макет был закреплен на прямоугольном основании, боковые грани которого использовались в качестве опорных плоскостей для ориентации макета в четырех направлениях с шагом  $90^\circ$ . Из-за отсутствия точного эталонного компаса погрешности измерялись относительно ориентации прибора, при которой результат измерения азимута равнялся  $0^\circ$ . Результаты испытаний приведены в таблице.

**Таблица. Абсолютная погрешность измерения азимута (градусы)**

$\psi$ , град	$\phi = 0^\circ$ , $\theta = 0^\circ$	$\phi = 0^\circ$ , $\theta = 15^\circ$	$\phi = 15^\circ$ , $\theta = 0^\circ$	$\phi = 15^\circ$ , $\theta = 15^\circ$
0	—	0,6	-5,0	1,0
90	0,0	2,0	-5,2	2,8
180	-1,3	-1,0	3,3	-3,4
270	-0,5	-1,1	3,8	-3,9

## Выводы

Используемый метод измерения азимута и выбранная элементная база позволяют создать портативный электронный магнитный компас, не требующий горизонтальной установки и учитывающий наклоны относительно горизонта при определении азимута. Испытания созданного макета полностью подтверждают работоспособность устройства.

Предметом дальнейших работ в данном направлении является разработка процедуры калибровки, не требующей поиска особых ориентаций прибора в пространстве, а также повышение точности измерений и создание законченного портативного устройства с автономной индикацией и батарейным питанием.

## Литература

1. *Васильева Н.П., Касаткин С.И., Муравьев А.М.* Тонкопленочные магниторезистивные датчики магнитного поля и области их применения // Датчики и системы. – 1999. – № 1. – С. 29–36.
2. *Magnetic Compass with Tilt Compensation: Application Note AN2272.* – Cypress Semiconductor Corporation. – <http://www.cypress.com/?docID=2215>.
3. *Бузыканов С.* Применение магниторезистивных датчиков в системах навигации // Chip News. – 2004. – № 5. – С. 60–62.
4. *Set/Reset function for magnetic sensors: Application Note 213.* – Honeywell International Inc. – <http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/an213.pdf>.