

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, аксиалирометр, 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 (AMP) [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].

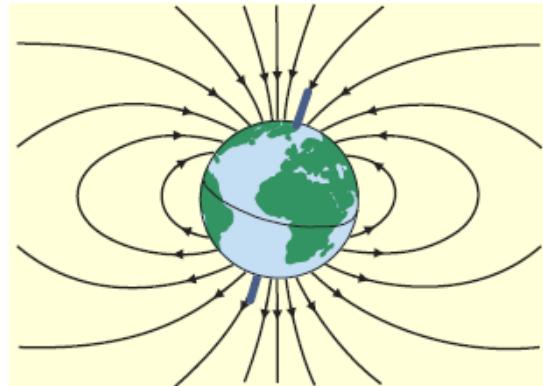


Рис. 1. Магнитный диполь

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 наклонения, 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.

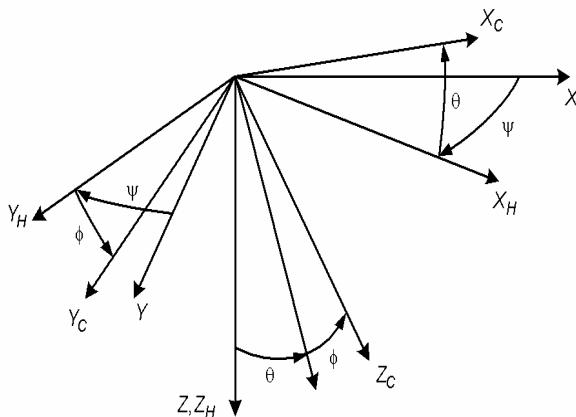


Рис. 2. Системы координат

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 ψ , углы крена и тангенса – как ϕ и θ .

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 тангенса и крена:

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

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

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

где ψ – 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 ϕ и θ , 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 θ и ϕ :

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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 перемагничивания.

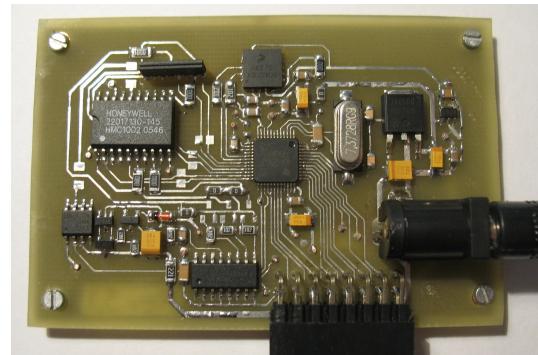


Рис. 3. Внешний вид макета

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 Δ - Σ 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).

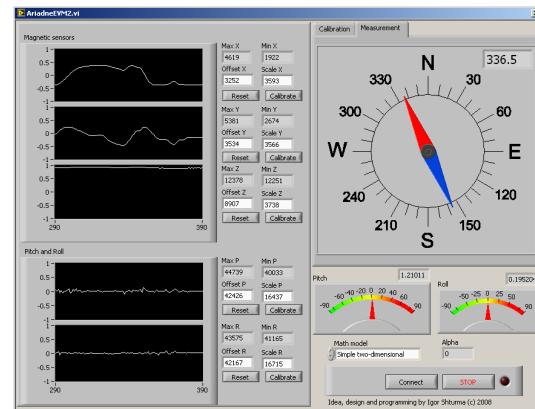


Рис. 4. Интерфейс виртуального электронного магнитного компаса в среде LabVIEW

Калибровка и испытания 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_o и коэффициент масштабирования K_s :

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

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

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

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° . Из-за отсутствия точного эталонного компаса погрешности измерялись относительно ориентации прибора, при которой результат измерения азимута равнялся 0° . Результаты испытаний приведены в таблице.

Таблица. Абсолютная погрешность измерения азимута (градусы)

ψ , 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>.