

РАСЧЁТ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОГО СКЛОНЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ОРТОДОМ

Колузов А. В., капитан, командир 1-го взвода 4 роты (научной), Россия, Анапа, ФГАУ «Военный инновационный Технополис «ЭРА».

Архипов Б. Г., рядовой, оператор 1-го взвода 4 роты (научной), arhipov.era2020@yandex.ru, Россия, Анапа, ФГАУ «Военный инновационный Технополис «ЭРА».

Аннотация.

В работе рассмотрены базовые принципы магнетизма, описываются основные типы помех, искажающих результаты измерения магнитного поля, и приводятся методики их устранения.

Ключевые слова: магнитометр, магнитное склонение, помехи мягкого железа, помехи твёрдого железа, магнитное поле.

Магнитометр представляет собой устройство для измерения интенсивности одной или нескольких составляющих магнитного поля [1]. Магнитное поле Земли в каждой точке пространства характеризуется вектором напряженности T , направление которого определяется тремя составляющими по осям X , Y и Z в прямоугольной системе координат (Рисунок 1). Также магнитное поле Земли можно описать горизонтальной составляющей напряженности H , магнитным склонением D (углом между H и плоскостью географического меридиана) и магнитным наклонением I (углом между T и плоскостью горизонта).

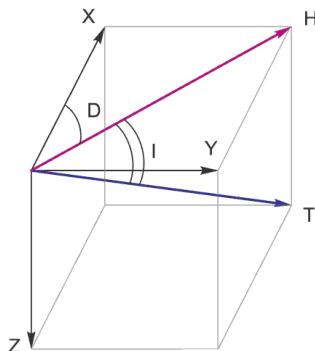


Рисунок 1 – Составляющие магнитного поля Земли.

Основной характеристикой магнитного поля является магнитная индукция B , представляющая собой векторную величину. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением силы, действующей на северный полюс магнита, помещенного в данную точку магнитного поля. Магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля соотношением:

$$B = \mu * \mu_0 * H \quad (1)$$

, где:

μ – магнитная проницаемость среды,

μ_0 – магнитная постоянная.

Исходя из (1), можно утверждать, что B примерно равен H . В итоге, на практике для определения направления вектора магнитного поля Земли измеряют две его составляющие по оси X и оси Y (Рисунок 2), а затем вычисляют угол φ на основании следующих формул:

$$tg\varphi = \frac{H_Y}{H_X} = \frac{H \sin\varphi}{H \cos\varphi} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg(tg\varphi) \quad (3)$$

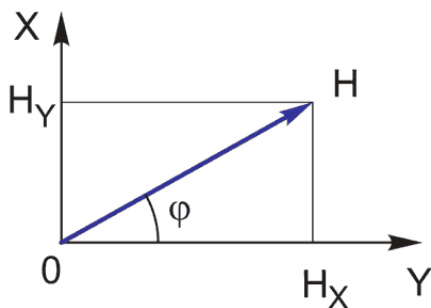


Рисунок 2 - Разложение вектора магнитного поля Земли на составляющие.

В простейшем случае для определения направления относительно магнитного поля Земли при условии горизонтального расположения платформы необходимо считать данные с выходных регистров осей X и Y, а затем вычислить арктангенс угла в соответствии с формулой (3). Но в реальности, особенно в случае применения магнитометров в составе сложных устройств, где присутствуют дополнительные магнитные поля, например, внутри автомобилей, судов и т.п., на датчик действуют помехи, искажающие его показания.

Существуют два типа искажений, действующих на магнитометр (Рисунок 3). Первое называется искажением твердого железа (Hard Iron Distortion). Оно по своей природе является аддитивным, то есть к изначально измеряемому полю добавляется дополнительное, создаваемое постоянным магнитом (например, динамиками звуковых колонок). При неизменной ориентации такого магнита относительно датчика, смещение, вносимое им, будет также неизменно. Ко второму типу относится искажение мягкого железа (Soft Iron Distortion). Оно создается посторонними предметами, искажающими уже имеющееся магнитное поле. Например, предметы, выполненные из пермаллоя, никеля и т.п., не создают своего магнитного поля, но изменяют форму поля, измеряемого датчиком. Компенсация мягкого железа очень актуальна на кораблях, где намагниченные полем Земли части судна при изменении его ориентации относительно магнитного полюса перемагничиваются и вновь вносят искажения в процесс измерения. Таким образом, компенсация мягкого железа представляет собой более сложную задачу.



Рисунок 3 - Виды воздействий на вектора магнитного поля Земли.

Вначале рассмотрим процесс компенсации влияния твердого железа. Следует учесть, что здесь и далее предлагается компенсация в двумерном пространстве. Компенсация в трех измерениях, которая обязательна для воздушных судов, требует использования комплексного математического аппарата, и в данном случае не рассматривается. Ознакомиться с таким методом ликвидации магнитных помех можно в [2].

Чтобы избавиться от искажений, вызываемых источниками типа Hard Iron, нужно изменить полученные от прибора значения на величину смещения.

$$X_{HI} = X - X_{bias} \quad (4)$$

, где:

X_{HI} – калиброванное значение,

X – исходное значение,

X_{bias} – величина смещения.

Для вычисления X_{bias} необходимо определить максимальное и минимальное значение X , после чего воспользоваться следующей формулой:

$$X_{bias} = \frac{(X_{min} - X_{max})}{2} - X_{min} \quad (5)$$

, где:

X_{min} – минимальное значение оси X ,

X_{max} – максимальное значение оси X ,

Аналогичным образом смещение рассчитывается для осей Y и Z .

Чтобы избавиться от искажений, вызываемых источниками типа Soft Iron, нужно умножить полученные от прибора значения на коэффициент масштабирования.

$$X_{SI} = X * X_K \quad (6)$$

, где:

X_{SI} – калиброванное значение,

X – исходное значение,

X_K – коэффициент масштабирования.

Для получения коэффициента масштабирования для всех трёх осей необходимо выявить ось с наибольшей разностью между максимальным и минимальным значением, и затем воспользоваться формулой:

$$X_K = \frac{A_{max} - A_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

, где:

A_{min} – минимальное значение оси с наибольшей разностью между максимальным и минимальным значением,

A_{max} – максимальное значение оси с наибольшей разностью между максимальным и минимальным значением,

X_{min} – минимальное значение оси X,

X_{max} – максимальное значение оси X.

Помимо искажений твёрдого и мягкого железа, ещё одним фактором, искажающим показания магнитометра, является магнитное склонение - угол между направлением на магнитный полюс и географический.

Для того, чтобы магнитометр указывал на географический полюс, нужно учитывать величину магнитного склонения. Эта задача осложняется тем, что в каждой точке планеты этот угол будет разным, кроме того, магнитные полюса Земли находятся в постоянном движении. На рисунках 4 и 5 показаны смещения магнитных полюсов Земли за последние 500 лет.

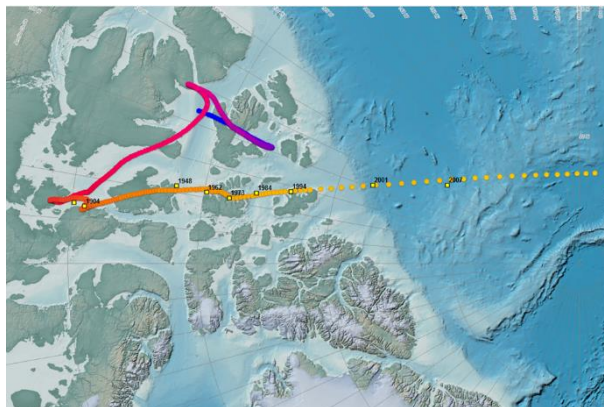


Рисунок 4 - Смещение северного магнитного полюса Земли за последние 500 лет.

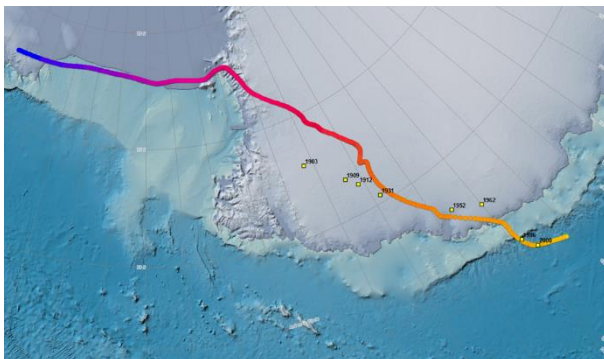


Рисунок 5 - Смещение северного магнитного полюса Земли за последние 500 лет

В таблице 1 приведены координаты, в которых находились северный и южный магнитные полюса Земли в промежутке от 1900 до 2020 года [3]. Данные от 1900 до 2010 года даны с промежутком в 5 лет.

Таблица 1. Координаты полюсов Земли.

Год	Северный магнитный полюс		Южный магнитный полюс	
	Долгота	Широта	Долгота	Широта
1900	70,5°С	96,2°З	71,7°Ю	148,3°В
1905	70,7°С	96,5°З	71,5°Ю	148,5°В
1910	70,8°С	96,7°З	71,2°Ю	148,6°В
1915	71,0°С	97,0°З	70,8°Ю	148,5°В
1920	71,3°С	97,4°З	70,4°Ю	148,2°В
1925	71,8°С	98,0°З	70,0°Ю	147,6°В
1930	72,3°С	98,7°З	69,5°Ю	146,8°В
1935	72,8°С	99,3°З	69,1°Ю	145,8°В
1940	73,3°С	99,9°З	68,6°Ю	144,6°В
1945	73,9°С	100,2°З	68,2°Ю	144,4°В
1950	74,6°С	100,9°З	67,9°Ю	143,5°В
1955	75,2°С	101,4°З	67,2°Ю	141,5°В
1960	75,3°С	101,0°З	66,7°Ю	140,2°В
1965	75,6°С	101,3°З	66,3°Ю	139,5°В
1970	75,9°С	101,0°З	66,0°Ю	139,4°В
1975	76,2°С	100,6°З	65,7°Ю	139,5°В
1980	76,9°С	101,7°З	65,4°Ю	139,3°В
1985	77,4°С	102,6°З	65,1°Ю	139,2°В

1990	78,1°C	103,7°З	64,9°Ю	138,9°В
1995	79,0°C	105,3°З	64,8°Ю	138,7°В
2000	81,0°C	109,6°З	64,7°Ю	138,3°В
2005	83,2°C	118,2°З	64,5°Ю	137,8°В
2010	85,0°C	132,8°З	64,4°Ю	137,3°В
2011	85,4°C	137,4°З	64,4°Ю	137,2°В
2012	85,7°C	142,5°З	64,4°Ю	137,0°В
2013	85,9°C	148,0°З	64,3°Ю	136,9°В
2014	86,1°C	153,9°З	64,3°Ю	136,7°В
2015	86,3°C	160,0°З	64,3°Ю	136,6°В
2016	86,4°C	166,3°З	64,2°Ю	136,4°В
2017	86,5°C	172,6°З	64,2°Ю	136,3°В
2018	86,5°C	178,8°З	64,2°Ю	136,1°В
2019	86,4°C	175,3°В	64,1°Ю	135,9°В
2020	86,4°C	169,8°В	64,1°Ю	135,8°В

Для расчёта угла магнитного склонения нужно рассчитать расстояния между магнитометром и географическим полюсом Земли, магнитометром и магнитным полюсом Земли и расстояние между магнитным и географическим полюсами Земли.

$$\alpha_{MD} = \arccos \frac{S_G^2 + S_M^2 - S_P^2}{2 * S_G * S_M} \quad (8)$$

, где:

α_{MD} – угол магнитного отклонения

S_G – расстояние между магнитометром и географическим полюсом Земли,

S_M – расстояние между магнитометром и магнитным полюсом Земли,

S_P – расстояние между географическим и магнитным полюсами.

Чтобы получить расстояния нужно знать географические координаты точек. Если снабдить магнитометр гироскопом и акселерометром, мы будем знать в какой точке планеты он находится. Координаты географических полюсов Земли постоянны и составляют 90° северной и южной широты соответственно, долготы не имеют, но для последующих расчётов считается 0°. Координаты магнитных полюсов берутся из таблицы.

Угловая разница $\Delta\sigma$ между двумя географическими точками равна:

$$\Delta\sigma = \arctan\left(\frac{\sqrt{[\cos\varphi_2 * \sin\Delta\lambda]^2 + [\cos\varphi_1 * \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 * \cos\varphi_2 * \cos\Delta\lambda]^2}}{\sin\varphi_1 * \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 * \cos\varphi_2 * \cos\Delta\lambda}\right) \quad (9)$$

, где:

φ_1, λ_1 – географические координаты точки 1 (в радианах)

φ_2, λ_2 – географические координаты точки 2 (в радианах)

$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ – разница по долготе между точками 1 и 2

Чтобы получить расстояние S между точками 1 и 2, нужно умножить угловую разницу на радиус Земли (в метрах):

$$S = \Delta\sigma * 6372795 \quad (10)$$

Выводы:

В данной работе приведены базовые принципы магнетизма и основные источники возникновения погрешностей при расчёте показателей магнитного поля, а также наиболее распространённые методы их устранения.

Список литературы

1. Воронов В.В, Григорьев Н.Н., Яловенко А.В. Магнитные компасы. Теория, конструкция и девиационные работы. – СПб.: «Элмор», 2004. – 192 с.
2. Ozyagcilar T. Calibrating an eCompass in the Presence of Hard- and Soft-Iron Interference. – Freescale Semiconductor Application Note, 2015.
3. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>