

磁力计的基本工作原理_WalkAnt_新浪博客(1)

这篇文章实在太好了，忍不住就转了。

此文详细讲解了 磁力计 的基本工作原理、干扰产生的原因以及如何校准、磁力计与倾角传感器如何结合使用等内容。

原文地址：<http://www.dzsc.com/data/html/2010-11-29/87454.html>

(2016-10-15更新，最近WalkAnt私下没事，编了一个磁力计校准的小软件AntMag，可以帮助大家非常好的校准磁力计。网址：http://blog.sina.com.cn/s/blog_402c071e0102wnm4.html)

电子罗盘是一种重要的导航工具，能实时提供移动物体的航向和姿态。随着半导体工艺的进步和手机操作系统的发展，集成了越来越多传感器的智能手机变得功能强大，很多手机上都实现了电子罗盘的功能。而基于电子罗盘的应用（如Android的Skymap）在各个软件平台上也流行起来。

要实现电子罗盘功能，需要一个检测磁场的三轴磁力传感器和一个三轴加速度传感器。随着微机械工艺的成熟，意法半导体推出将三轴磁力计和三轴加速计集成在一个封装里的二合一传感器模块LSM303DLH，方便用户在短时间内设计出成本低、性能高的电子罗盘。本文以LSM303DLH为例讨论该器件的工作原理、技术参数和电子罗盘的实现方法。

1. 地磁场和航向角的背景知识

如图1所示，地球的磁场象一个条形磁体一样由磁南极指向磁北极。在磁极点处磁场和当地的水平面垂直，在赤道磁场和当地的水平面平行，所以在北半球磁场方向倾斜指向地面。用来衡量磁感应强度大小的单位是Tesla或者Gauss（1Tesla=10000Gauss）。随着地理位置的不同，通常地磁场的强度是0.4-0.6Gauss。需要注意的是，磁北极和地理上的北极并不重合，通常他们之间有11度左右的夹角。

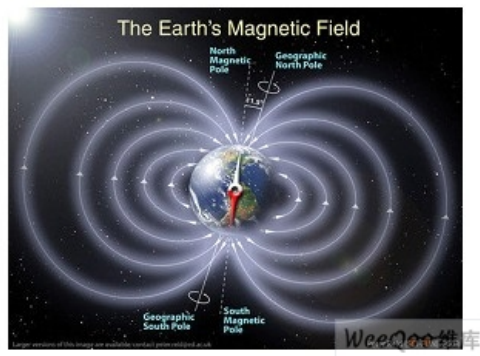
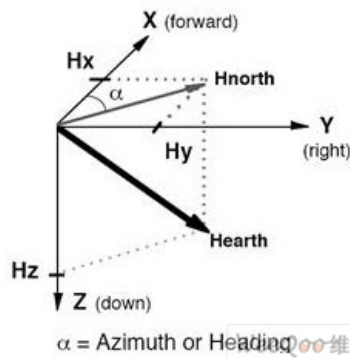


图1 地磁场分布图

地磁场是一个矢量，对于一个固定的地点来说，这个矢量可以被分解为两个与当地水平面平行的分量和一个与当地水平面垂直的分量。如果保持电子罗盘和当地的水平面平行，那么罗盘中磁力计的三个轴就和这三个分量对应起来，如图2所示。



在北半球，地磁场都是倾斜指向地面，即图示Hearth方向。
当传感器水平放置后，就可以分解为三个方向：
X：与地磁南北方向45度夹角
Y：与地磁南北方向45度夹角
Z：与地面平行
X与Y的矢量和总是指向磁北方向的

当罗盘保持水平时，只需要用水平两个轴的数据就能计算出航向角（前提是保持水平）

图2 地磁场矢量分解示意图

实际上对水平方向的两个分量来说，他们的矢量和总是指向磁北的。罗盘中的航向角（Azimuth）就是当前方向和磁北的夹角。由于罗盘保持水平，只需要用磁力计水平方向两轴（通常为X轴和Y轴）的检测数据就可以用式1计算出航向角。当罗盘水平旋转的时候，航向角在0°-360°之间变化。

2. ST集成磁力计和加速计的传感器模块LSM303DLH

2.1 磁力计工作原理

在LSM303DLH中磁力计采用各向异性磁致电阻（Anisotropic Magneto-Resistance）材料来检测空间中磁感应强度的大小。这种具有晶体结构的合金材料对外界的磁场很敏感，磁场的强弱变化会导致AMR自身电阻值发生变化。

在制造过程中，将一个强磁场加在AMR上使其在某一方向上磁化，建立起一个主磁域，与主磁域垂直的轴被称为该AMR的敏感轴，如图3所示。为了使测量结果以线性的方式变化，AMR材料上的金属导线呈45°角倾斜排列，电流从这些导线上流过，如图4所示。由初始的强磁场在AMR材料上建立起来的主磁域和电流的方向有45°的夹角。

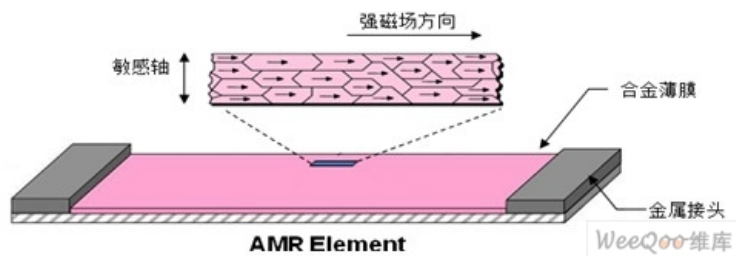


图3 AMR材料示意图

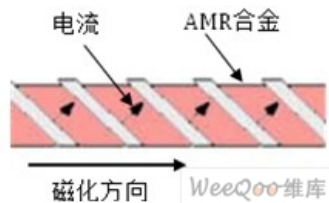


图4 45°角排列的导线

当有外界磁场 H_a 时，AMR上主磁域方向就会发生变化而不再是初始的方向了，那么磁场方向和电流的夹角 θ 也会发生变化，如图5所示。对于AMR材料来说， θ 角的变化会引起AMR自身阻值的变化，并且呈线性关系，如图6所示。

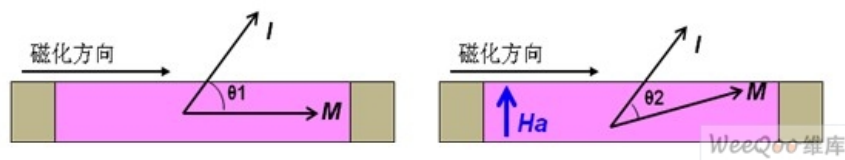


图5 磁场方向和电流方向的夹角

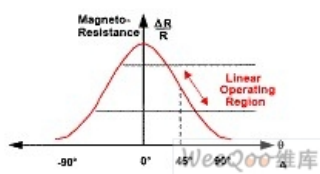


图6 θ -R特性曲线

ST利用惠斯通电桥检测AMR阻值的变化，如图7所示。 $R_1/R_2/R_3/R_4$ 是初始状态相同的AMR电阻，但是 R_1/R_2 和 R_3/R_4 具有相反的磁化特性。当检测到外界磁场的时候， R_1/R_2 阻值增加 ΔR 而 R_3/R_4 减少 ΔR 。这样在没有外界磁场的情况下，电桥的输出为零；而在有外界磁场时电桥的输出为一个微小的电压 ΔV 。

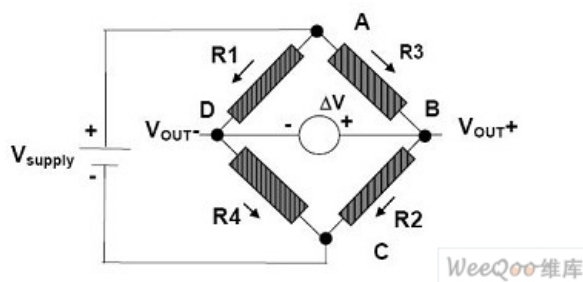


图7 惠斯通电桥

当 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ，在外界磁场的作用下电阻变化为 ΔR 时，电桥输出 ΔV 正比于 ΔR 。这就是磁力计的工作原理。

2.2 置位/复位(Set/Reset)电路

由于受到外界环境的影响，LSM303DLH中AMR上的主磁域方向不会永久保持不变。LSM303DLH内置有置位/复位电路，通过内部的金属线圈周期性的产生电流脉冲，恢复初始的主磁域，如图8所示。需要注意的是，置位脉冲和复位脉冲产生的效果是一样的，只是方向不同而已。

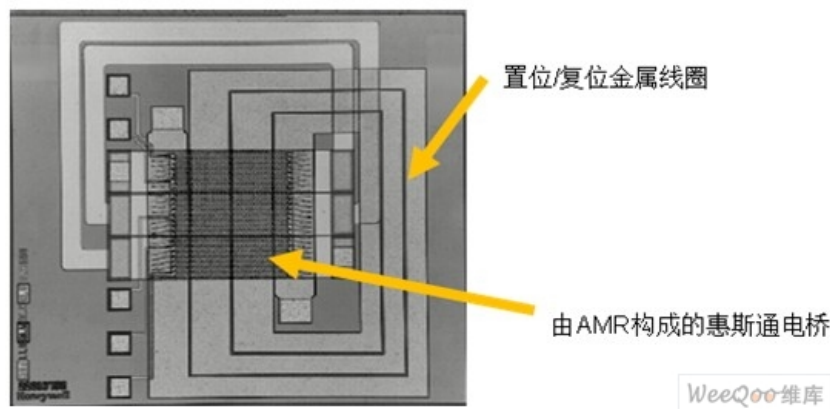


图8 LSM303DLH置位/复位电路

置位/复位电路给LSM303DLH带来很多优点：

- 1) 即使遇到外界强磁场的干扰，在干扰消失后LSM303DLH也能恢复正常工作而不需要用户再次进行校正。
- 2) 即使长时间工作也能保持初始磁化方向实现精确测量，不会因为芯片温度变化或内部噪音增大而影响测量精度。
- 3) 消除由于温漂引起的电桥偏差。

磁力计的可能影响因素：

1. 长时间工作
2. 芯片温度
3. 内部噪音
4. 温漂引起电桥偏差

2.3 LSM303DLH的性能参数

LSM303DLH集成三轴磁力计和三轴加速计，采用数字接口。磁力计的测量范围从1.3 Gauss到8.1 Gauss共分7档，用户可以自由选择。并且在20 Gauss以内的磁场环境下都能够保持一致的测量效果和相同的灵敏度。它的分辨率可以达到8m Gauss并且内部采用12位ADC，以保证对磁场强度的精确测量。和采用霍尔效应原理的磁力计相比，LSM303DLH的功耗低，精度高，线性度好，并且不需要温度补偿。

LSM303DLH具有自动检测功能。当控制寄存器A被置位时，芯片内部的自测电路会产生一个约为地磁场大小的激励信号并输出。用户可以通过输出数据来判断芯片是否正常工作。

作为高集成度的传感器模组，除了磁力计以外LSM303DLH还集成一颗高性能的加速计。加速计同样采用12位ADC，可以达到1mg的测量精度。加速计可运行于低功耗模式，并有睡眠/唤醒功能，可大大降低功耗。同时，加速计还集成了6轴方向检测，两路可编程中断接口。

3. ST电子罗盘方案介绍

一个传统的电子罗盘系统至少需要一个三轴的磁力计以测量磁场数据，一个三轴加速计以测量罗盘倾角，通过信号条和数据采集部分将三维空间中的重力分布和磁场数据传送给处理器。处理器通过磁场数据计算出方位角，通过重力数据进行倾斜补偿。这样处理后输出的方位角不受电子罗盘空间姿态的影响，如图9所示。

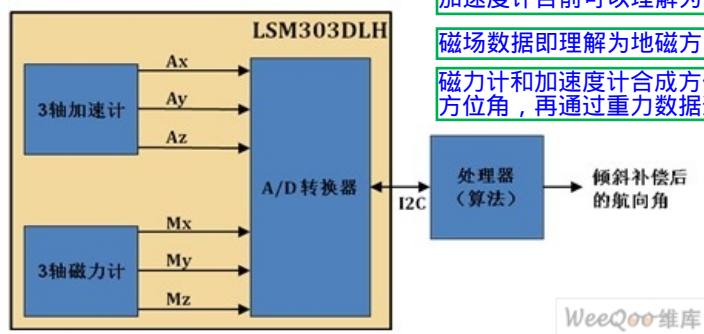


图9 电子罗盘结构示意图

LSM303DLH将上述的加速计、磁力计、A/D转换器及信号条电路集成在一起，仍然通过I2C总线和处理器通信。这样只用一颗芯片就实现了6轴的数据检测和输出，降低了客户的设计难度，减小了PCB板的占用面积，降低了器件成本。

LSM303DLH的典型应用如图10所示。它需要的周边器件很少，连接也很简单，磁力计和加速计各自有一条I2C总线和处理器通信。如果客户的I/O接口电平为1.8V，Vdd_dig_M、Vdd_IO_A和Vdd_I2C_Bus均可接1.8V供电，Vdd使用2.5V以上供电即可；如果客户接口电平为2.6V，除了Vdd_dig_M要求1.8V以外，其他皆可以用2.6V。在上文中提到，LSM303DLH需要置位/复位电路以维持AMR的主磁域。C1和C2为置位/复位电路的外部匹配电容，由于对置位脉冲和复位脉冲有一定的要求，建议用户不要随意修改C1和C2的大小。

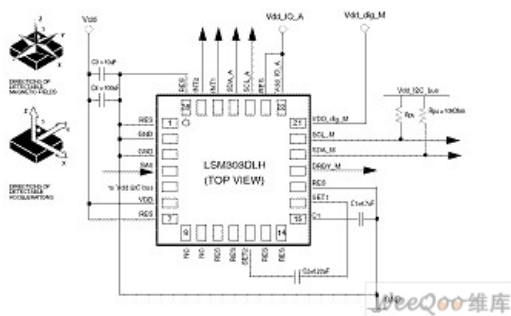


图10 LSM303DLH典型应用电路图

对于便携式设备而言，器件的功耗非常重要，直接影响其待机的时间。LSM303DLH可以分别对磁力计和加速计的供电模式进行控制，使其进入睡眠或低功耗模式。并且用户可自行调整磁力计和加速计的数据更新频率，以调整功耗水平。在磁力计数据更新频率为7.5Hz、加速计数据更新频率为50Hz时，消耗电流典型值为0.83mA。在待机模式时，消耗电流小于3uA。

地磁场一般只有微弱的0.5高斯

4. 铁磁场干扰及校准

电子指南针主要是通过感知地球磁场的存在来计算磁北极的方向。然而由于地球磁场在一般情况下只有微弱的0.5高斯，而一个普通的手机喇叭当相距2厘米时仍会有大约4高斯的磁场，一个手机马达在相距2厘米时会有大约6高斯的磁场，这一特点使得针对电子设备表面地球磁场的测量很容易受到电子设备本身的干扰。

磁场干扰是指由于具有磁性物质或者可以影响局部磁场强度的物质存在，使得磁传感器所放置位置上的地球磁场发生了偏差。如图11所示，在磁传感器的XYZ坐标系中，绿色的圆表示地球磁场矢量绕z轴圆周转动过程中在XY平面内的投影轨迹，再没有外界任何磁场干扰的情况下，此轨迹将会是一个标准的以O(0,0)为中心的圆。当存在外界磁场干扰的情况时，测量得到的磁场强度矢量 α 为该点地球磁场 β 与干扰磁场 γ 的矢量和。记作：

$$\alpha_{\text{测量值}} = \beta_{\text{地球磁场}} + \gamma_{\text{干扰}}$$

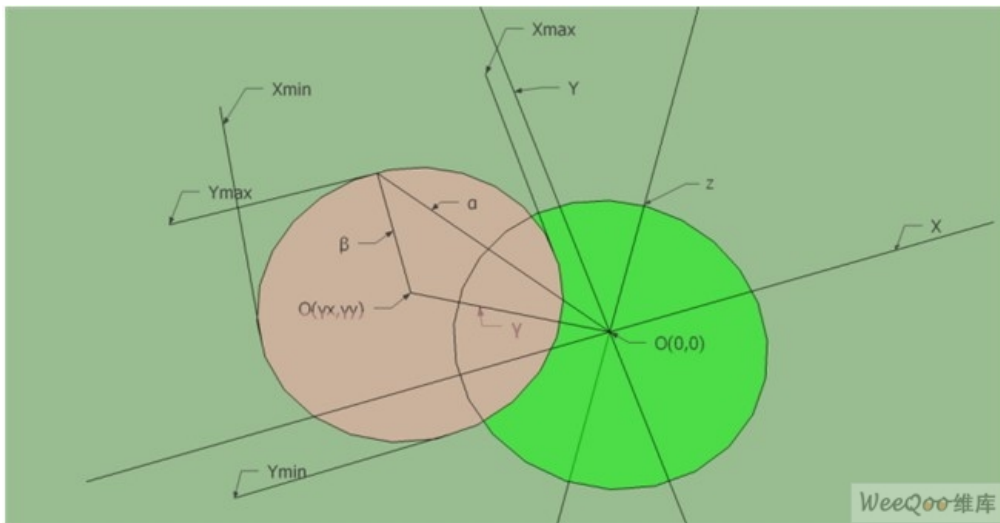


图11 磁传感器XY坐标以及磁力线投影轨迹

一般可以认为，干扰磁场 γ 在该点可以视为一个恒定的矢量。有很多因素可以造成磁场的干扰，如摆放在电路板上的马达和喇叭，还有含有铁镍钴等金属的材料如屏蔽罩，螺丝，电阻，LCD背板以及外壳等等。同样根据安培定律有电流通过的导线也会产生磁场，如图12。

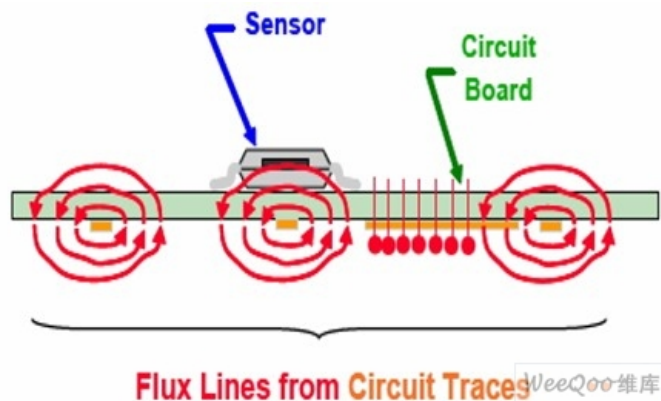


图12 电流对磁场产生的影响

为了校准这些来自电路板的磁场干扰，主要的工作就是通过计算将 γ 求出。

4.1 平面校准方法

针对XY轴的校准，将配备有磁传感器的设备在XY平面内自转，如图11，等价于将地球磁场矢量绕着过点O'(x, y)垂直于XY平面的法线旋转，而红色的圆为磁场矢量在旋转过程中在XY平面内投影的轨迹。这可以找到圆心的位置为 $((X_{\max} + X_{\min})/2, (Y_{\max} + Y_{\min})/2)$ 。同样将设备在XZ平面内旋转可以得到地球磁场在XZ平面上的轨迹圆，这可以求出三维空间中的磁场干扰矢量 $\gamma(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z)$ 。

4.2 立体8字校准方法

一般情况下，当带有传感器的设备在空中各个方向旋转时，测量值组成的空间几何结构实际上是一个圆球，所有的采样点都落在这个球的表面上，如图13所示，这一点同二维平面内投影得到的圆类似。

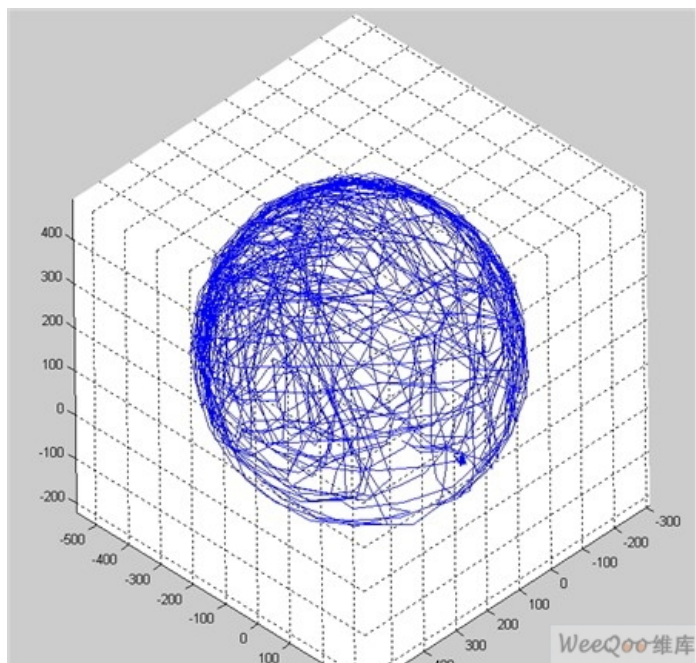


图13 地球磁场空间旋转后在传感器空间坐标内得到球体

这种情况下，可以通过足够的样本点求出圆心 $O(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z)$ ，即固定磁场干扰矢量的大小及方向。公式如下：

$$(x - \gamma_x)^2 + (y - \gamma_y)^2 + (z - \gamma_z)^2 = R^2$$

8字校准法要求用户使用需要校准的设备在空中做8字晃动，原则上尽量多的让设备法线方向指向空间的所有8个象限，如图14所示。

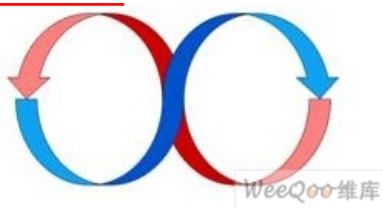


图14 设备的空中8字校准示意图

4.2 十面校准方法

同样，通过以下10面校准方法，也可以达到校准的目的。



图15 10面校准法步骤

如图16所示，经过10面校准方法之后，同样可以采样到以上所述球体表面的部分轨迹，从而推导出球心的位置，即固定磁场干扰矢量的大小及方向。

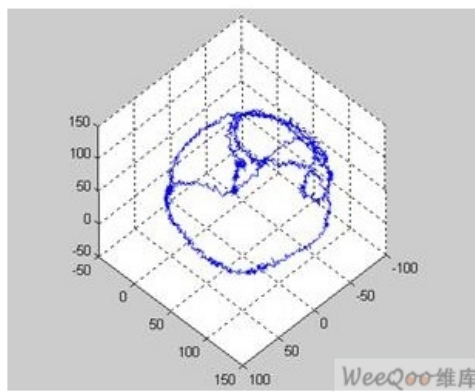


图16 10面校准后的空间轨迹

5. 倾斜补偿及航偏角计算

经过校准后电子指南针在水平面上已经可以正常使用了。但是更多的时候手机并不是保持水平的，通常它和水平面都有一个夹角。这个夹角会影响航向角的精度，需要通过加速度传感器进行倾斜补偿。

对于一个物体在空中的姿态，导航系统里早已有定义，如图17所示，Android中也采用了这个定义。Pitch(Φ)定义为x轴和水平面的夹角，图示方向为正方向；Roll(θ)定义为y轴和水平面的夹角，图示方向为正方向。由Pitch角引起的航向角的误差如图18所示。可以看出，在x轴方向10度的倾斜角就可以引起航向角最大7-8度的误差。

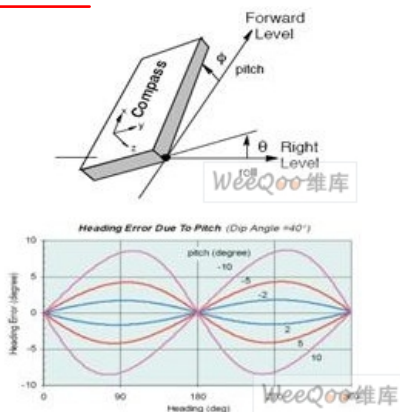


图17Pitch角和Roll角定义 图18 Pitch角引起的航向角误差

手机在空中的倾斜姿态如图19所示，通过3轴加速度传感器检测出三个轴上重力加速度的分量，再通过式2可以计算出Pitch和Roll。

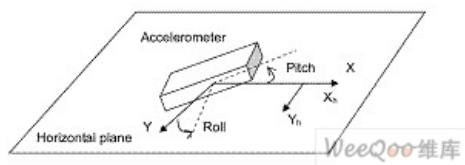


图19 手机在空中的倾斜姿态

$$\theta = \arctg\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right)$$

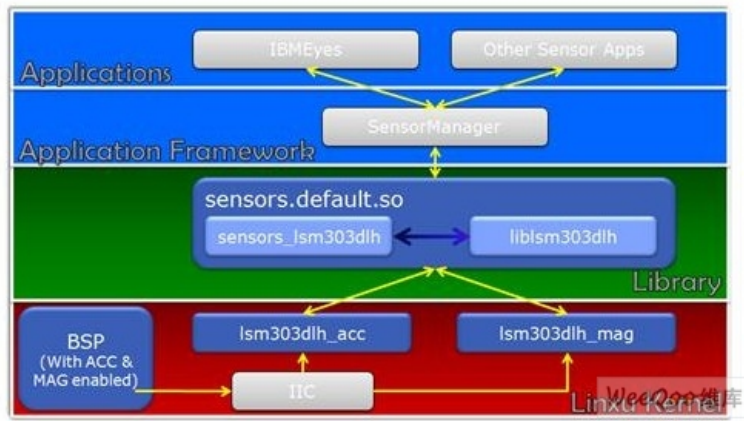
式3可以将磁力计测得的三轴数据（ X_M , Y_M , Z_M ）通过Pitch和Roll转化为式1中计算航向角需要的 H_y 和 H_x 。之后再利用式1计算出航向角。

$$H_y = Y_M \cos(\theta) + X_M \sin(\theta) \sin(\Phi) - Z_M \cos(\Phi) \sin(\theta)$$

$$H_x = X_M \cos(\Phi) + Z_M \sin(\Phi)$$

6. Android平台指南针的实现

在当前流行的android手机中，很多都配备有指南针的功能。为了实现这一功能，只需要配备有ST提供的二合一传感模块LSM303DLH，ST提供整套解决方案。Android中的软件实现可以由以下框图表示：



其中包括:

BSP Reference

Linux Kernel [Driver](#) (LSM303DLH_ACC + LSM303DLH_MAG)

HAL Library (Sensors_lsm303dlh + Liblsm303DLH) for sensors.default.so

经过library的计算，上层的应用可以很轻松的运用由Android定义由Library提供的航偏角信息进行应用程序的编写。