

HI221/HI221GW 用户手册

HI221 无线传输模块及接收器, Rev 0.2



HI221/HI221GW 用户手册

简介

特性

板载传感器

数据处理

通讯接口及供电

其他

硬件及尺寸(节点)

硬件参数

性能指标

姿态角输出精度

陀螺仪

加速度计

磁传感器参数

模块数据接口参数(UART)

模块数据接口参数(2.4G RF)

参考系定义

串口通讯协议

数据包格式

出厂默认寄存器

数据帧结构示例

通用AT指令

AT+ID

AT+URFR

AT+INFO

AT+ODR

AT+BAUD

AT+EOUT

AT+RST

AT+TRG

AT+SETPCL

AT+MODE

AT+GYRCTL

AT+GWID

AT+GWCFG

附录B - 四元数-欧拉角转换

四元数基础

四元数与旋转矩阵，欧拉角转换

四元数->旋转矩阵

四元数->欧拉角

欧拉角->四元数

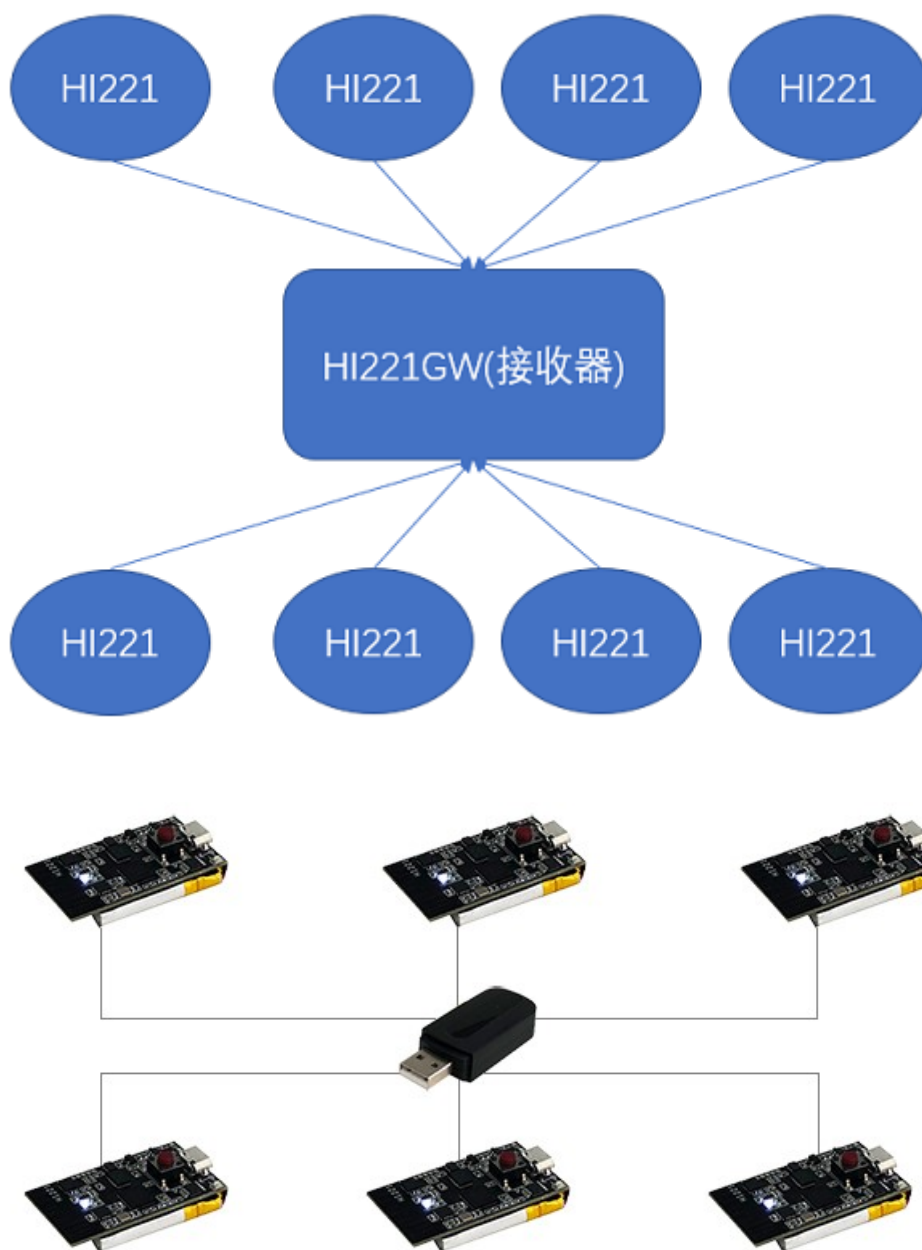
欧拉角->旋转矩阵(n->b)

旋转矩阵(n->b)到欧拉角

附录C - 固件升级与恢复出厂设置

简介

H221/HI221GW是超核电子推出的一款低成本、高性能、小体积、低延时的惯性测量单元（IMU），本产品集成了三轴加速度计、三轴陀螺仪以及一款低功耗微处理器。可输出经过传感器融合算法计算得到的基于当地地理坐标的三维方位数据，包含横滚角、俯仰角以及以相对的航向角。同时也可以输出原始的传感器数据。HI221由HI221GW(接收机)和HI221(姿态模块)组成。一个HI221GW和最多8个HI221模块组成星形网络结构。每个HI221可输出最高达100Hz的实时姿态数据。



特性

板载传感器

- 三轴陀螺仪, 最大量程: $\pm 2000^{\circ}/s$ 输出速率 2000Hz
- 三轴加速度计, 最大量程: $\pm 8g$ 输出速率 125Hz
- 三轴地磁场传感器, 最大量程: 800mG 内部采样率 100Hz

数据处理

- 加速度出厂前经过校准
- 数据融合算法计算并输出地理坐标系下的旋转四元数及欧拉角

通讯接口及供电

- 串口(兼容TTL 可直接与5V 或3.3V 串口设备连接)
- 供电电压： 3.3 (+/- 100 mV)
- 最大峰值功耗： 120mA(RF Tx发射)

其他

- PC端上位机程序，提供实时数据显示，波形，校准及excel 数据记录功能
- 多项模块参数用户可配置

硬件及尺寸(节点)

硬件参数

参数	值
输出数据接口	UART(TTL 1.8V - 3.3V) 或者 2.4RF Radio
工作电压	3.3V (± 100mV)
工作电流	30mA
待机电流	20uA
充电后平均工作时长	8h
温度范围	-20℃ - 85 °C
最大线性加速度	0 - 115 m/s^2
尺寸	20 x 38 x 8.5mm (W x L x H)
板载传感器	三轴加速度计 三轴陀螺仪 三轴地磁场传感器

性能指标

姿态角输出精度

姿态角	典型值	最大值
横滚角\俯仰角 - 静态	0.2°	0.4°
横滚角\俯仰角 - 动态	0.5°	2.0°
航向角	-	-

陀螺仪

参数	值
测量范围	±2000°/s
非线性度	±0.1% (25°最佳)
噪声密度	0.08°/s/ \sqrt{Hz}
采样率	2000Hz

加速度计

参数	值
测量范围	±8G
非线性度	±0.5% (25°最佳)
最大零点偏移	10mG(校准后)
噪声密度	250 $\mu G\sqrt{Hz}$
采样率	400Hz

磁传感器参数

参数	值
测量范围	±8Gauss
非线性度	±0.1%
采样率	100Hz

模块数据接口参数(UART)

参数	值
串口输出波特率	4800/9600/115200/460800可选
帧输出速率	1 - 500Hz

模块数据接口参数(2.4G RF)

参数	值
空中波特率	1Mbps/2Mbps可选
帧输出速率	1- 100Hz
接收器最大连接模块数	8

参考系定义

本产品采用右手(RH, Right-Hand)坐标系。输出的四元数及欧拉角为 传感器坐标系 到 惯性坐标系(世界坐标系) 的旋转。其中欧拉角旋转顺序为 ZYX(先转Z轴，再转Y轴，最后转X轴)旋转顺序，欧拉角具体定义如下：

- 绕 Z 轴方向旋转: 航向角\Yaw\phi(ψ) 范围: -180° - 180°
- 绕 Y 轴方向旋转: 俯仰角\Pitch\theta(θ) 范围: -90°-90°
- 绕 X 轴方向旋转:横滚角\Roll\psi(ϕ)范围: -180°-180°

本产品使用北西天(North-West-Up NWU) 坐标系统，即视为模块的地理坐标系(世界坐标系)定义如下：

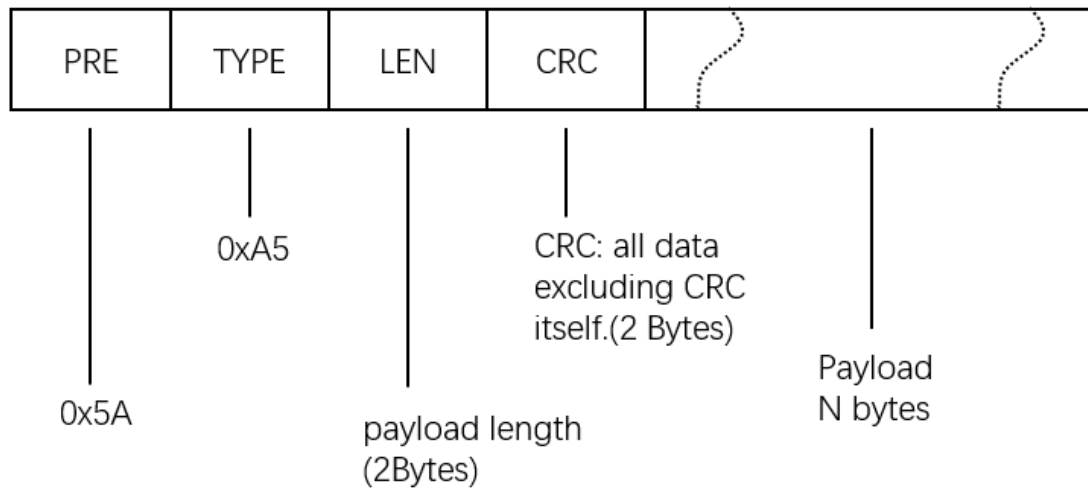
- X轴正方向指向北
- Y轴正方向指向西
- Z轴正方向指向天

当采用 NWU 系时，如果将模块视为飞行器的话。X轴应视为机头方向。当传感器系与惯性系重合时，欧拉角的理想输出为:Pitch = 0°, Roll = 0°, Yaw = 0°

串口通讯协议

数据包格式

模块上电后，模块默认按100Hz(出厂默认输出速率) 输出数据包，数据包格式如下：



其中：

域	值	长度 (字节)	说明
PRE	0x5A	1	固定为0x5A
TYPE	0xA5	1	固定为0xA5 代表数据帧
LEN	1-65535	2	帧中数据域的长度。LSB(低字节在前)，长度表示数据域的长度，不包含PRE,TYPE,LEN,CRC 字段。
CRC	-	2	除CRC 本身外其余所有帧数据的16 位CRC 校验和。LSB(低字节在前)
PAYLOAD	-	1-256	一帧携带的数据

CRC实现函数：

```

1  /*
2     currentCrc: previous crc value, set 0 if it's first section
3     src: source stream data
4     lengthInBytes: length
5  */
6  static void crc16_update(uint16_t *currentCrc, const uint8_t *src, uint32_t
lengthInBytes)
7  {
8     uint32_t crc = *currentCrc;
9     uint32_t j;
10    for (j=0; j < lengthInBytes; ++j)
11    {
12        uint32_t i;
13        uint32_t byte = src[j];
14        crc ^= byte << 8;
15        for (i = 0; i < 8; ++i)
16        {
17            uint32_t temp = crc << 1;
18            if (crc & 0x8000)
19            {
20                temp ^= 0x1021;
21            }
22            crc = temp;
23        }
24    }
25    *currentCrc = crc;

```

- **PAYLOAD(数据域):** PAYLOAD 由若干个寄存器数据组成。每个寄存器数据包含：寄存器地址 (REG_ADDR)和寄存器数据(DATA) 两部分。寄存器地址决定了数据的类型及长度，DATA 为寄存器数据内容。模块支持的寄存器如下：

寄存器地址 (REG_ADDR)	寄存器长度(DATA长度, 单位字节)	名称	单位	支持该数据包的产品
0x90	1	用户ID	无	HI22X
0xA0	6	加速度	0.001G[^G]	HI22X
0xA5	6	线性加速度	0.001G	HI22X
0xB0	6	角速度	0.1°/s	HI22X
0xC0	6	磁场强度	0.001Gauss	HI22X
0xD0	6	欧拉角(整形输出)	度	HI22X
0xD9	12	欧拉角(浮点输出)	度	HI22X
0xD1	16	四元数	N/A	HI22X
0xF0	4	气压	Pa	N/A
0x71	128-256字节可变	无线节点四元数集合	无	HI221GW(接收机)
0x72	48-96字节可变	无线节点欧拉角集合	同0xD0	HI221GW(接收机)
0x75	48-96字节可变	无线节点加速度集合	同0xA0	HI221GW(接收机)
0x78	48-96字节可变	无线节点角速度集合	同0xB0	HI221GW(接收机)
0x61	3	无线数据帧拓展标识	N/A	HI221GW(接收机)

- 0x90 用户ID
- 0xA0 加速度，格式为int16，共三个轴，每个轴占2个字节，X、Y、Z 三轴共6个字节，LSB。传感器输出的原始加速度
- 0xA5 线性加速度，格式为int16，共三个轴，每个轴占2个字节，X、Y、Z 三轴共6个字节，LSB。地理坐标系下去除重力分量的加速度值
- 0xB0 角速度，格式为int16，共三个轴，每个轴占2个字节，X、Y、Z 三轴共6个字节，LSB。传感器输出的角速度
- 0xC0 磁场强度，格式为int16，共三个轴，每个轴占2个字节，X、Y、Z 三轴共6个字节，LSB。传感器输出的磁场强度
- 0xD0 欧拉角整形格式，格式为int16，共三个轴，每个轴占2个字节，顺序为Pitch/Roll/Yaw。LSB。接收到Roll, Pitch 为物理值乘以100后得到的数值，Yaw 为乘以10得到的数值举例：当接收到的Yaw = 100 时，表示航向角为10°
- 0xD9 浮点格式输出的欧拉角。格式为float，共3个值(Pitch/Roll/Yaw)，每个值占4字节(float 型单精度浮点数)，LSB。
- 0xD1 四元数，格式为float，共4个值，顺序为:W X Y Z。每个值占4字节(float)，整个四元数为4个float，共16字节，LSB。
- 0xF0 气压。格式为float。(只针对有气压传感器的产品)
- 0x71 节点四元数集合. 所有节点的四元数，每个节点16字节，从0到最后一个节点顺序排列。每个节点4个浮点数，分别为W X Y Z, 每个数用float 型表示，每个float 4字节。float为LSB

- 0x72)节点欧拉集合.所有节点的欧拉角，每个节点6字节，从0到最后一个节点顺序排列。每个节点欧拉为角整形格式，格式为int16，共三个轴，每个轴占2个字节，顺序为Pitch/Roll/Yaw。LSB。接收到Roll, Pitch 为物理值乘以100后得到的数值，Yaw 为乘以10得到的数值举例：当接收到的Yaw = 100时，表示航向角为10°
- 0x75 节点加速度集合.每个节点6字节，从0到最后一个节点顺序排列。每个节点3个int16_t 型数据。分别为XYZ的加速度。每个int16_t 占2字节，LSB
- 0x78 节点角速度集合.每个节点6字节，从0到最后一个节点顺序排列。每个节点3个int16_t 型数据。分别为XYZ的角速度。每个int16_t 占2字节，LSB
- 0x61
数据帧拓展信息标识，共3个字节:

数据帧拓展信息字节偏移	值	说明
0	-	保留
1	GWID	接收机GWID
2	CNT	此帧包含无线节点数: 1-16

出厂默认寄存器

出厂默认一帧中携带寄存器数据定义如下：

HI226/HI229/HI221节点:

顺序	数据包	说明
1	0x90	用户ID
2	0xA0	加速度
3	0xB0	角速度
4	0xC0	磁场强度
5	0xD0	欧拉角(整形输出)
6	0xF0	气压

HI221接收机:

顺序	寄存器	说明
1	0x71	四元数
2	0x75	加速度

数据帧结构示例

假设输出的数据帧带有A0,B0,D0 寄存器，使用串口助手采样一帧数据如下所示:

5A A5 15 00 A9 8B A0 EA FF D0 03 45 FF B0 00 00 00 00 00 00 D0 87 00 6F 27 F5 FF

其中：

5A A5帧头

15 00帧数据域长度：(0x00<<8) + 0x15 = 21

A9 8B帧CRC校验值: (0x8B<<8) + 0xA9 = 0x8BA9

A0 EA FF D0 03 45 FF 加速度数据包,A0为加速度寄存器地址，三轴加速度为：

AccX = (int16_t)((0xFF<<8)+ 0xEA) = -22 AccY = (int16_t)((0x03<<8)+ 0xD0) = 976 AccZ = (int16_t)((0xFF<<8)+ 0x45) = -187

B0 00 00 00 00 00 00 角速度数据包,B0为角速度寄存器地址，三轴角速度全为0

D0 87 00 6F 27 F5 FF 欧拉角数据包,D0为欧拉角寄存器地址

Pitch= (int16_t)((0x00<<8)+ 0x87) / 100 = 1.35°

$\text{Roll} = (\text{int16_t})((0x27 < 8) + 0x6F) / 100 = 100.95^\circ$

$\text{Yaw} = (\text{int16_t})((0xFF < 8) + 0xF5) / 10 = -1.1^\circ$

计算CRC校验值:

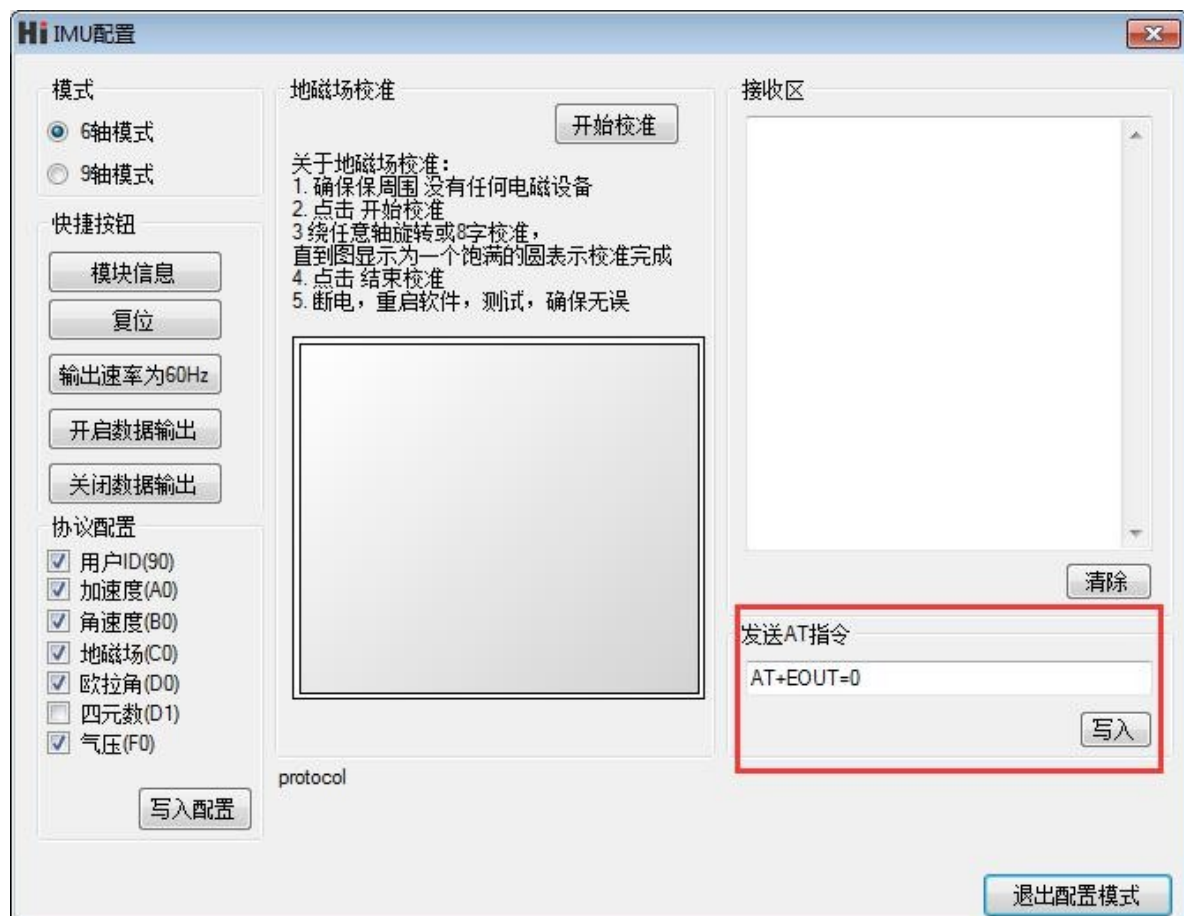
记上面接收到的一帧数据存为C语言uint8_t 数组 buf:

```
1  uint16_t payload_len;
2  uint16_t crc;
3
4  crc = 0;
5  payload_len = buf[2] + (buf[3] << 8);
6
7  /* calculate 5A A5 and LEN filed crc */
8  crc16_update(&crc, buf, 4);
9
10 /* calculate payload crc */
11 crc16_update(&crc, buf + 6, payload_len);
```

最后计算得 CRC值为 0x8BA9, 与帧携带CRC值相同, 帧校验正确。

通用AT指令

模块采用AT指令集配置/查看模块参数。AT指令总以ASCII码AT开头, 后面跟控制字符, 最后以回车换行\r\n结束。可使用串口调试助手进行测试:



通用模块 AT指令如下

指令	功能	掉电保存(Y)	备注	支持该指令的产品
AT+ID	设置模块用户ID	Y	复位/重启后生效	HI22X
AT+URFR	旋转模块传感器坐标系	Y	复位/重启后生效	HI22X
AT+INFO	打印模块信息	N	立即生效	HI22X
AT+ODR	设置模块串口输出帧频率	Y	复位/重启后生效	HI22X
AT+BAUD	设置串口波特率	Y	复位/重启后生效	HI22X
AT+EOUT	数据输出开关	N	立即生效	HI22X
AT+RST	复位模块	N	立即生效	HI22X
AT+TRG	单次输出触发	N	立即生效	HI226/HI229
AT+SETPEL	设置输出数据包	Y	复位/重启后生效	HI22X
AT+MODE	设置模块工作模式	Y	复位/重启后生效	HI229/HI221
AT+GYRCTL	设置陀螺仪限幅滤波器参数	Y	复位/重启后生效	HI22X
AT+GWID	设置无线网关ID	Y	复位/重启后生效	HI221GW(接收机)/HI221节点
AT+GWCFG	设置接收机无线网络属性	Y	复位/重启后生效	HI221GW(接收机)

AT+ID

设置模块用户ID

例 AT+ID=1

AT+URFR

某些情况下传感器需要倾斜垂直安装，这时候需要旋转传感器坐标系，这条指令提供了旋转传感器坐标系的接口：

AT+URFR=C00,C01,C02,C10,C11,C12,C20,C21,C22

其中 C_{nm} 支持浮点数

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_U = \begin{bmatrix} C00 & C01 & C02 \\ C10 & C11 & C12 \\ C20 & C21 & C22 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_B \quad (1)$$

其中 $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_U$ 为旋转后的传感器坐标系下传感器数据， $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_B$ 为旋转前传感器坐标系下传感器数据

下面是几种常用旋转举例：

- 新传感器坐标系为绕原坐标系X轴旋转 90°，输入命令：AT+URFR=1,0,0,0,0,1,0,-1,0

- 新传感器坐标系为 绕原坐标系X轴 旋转-90°，输入命令：AT+URFR=1,0,0,0,0,-1,0,1,0
- 新传感器坐标系为 绕原坐标系X轴 旋转180°，输入命令：AT+URFR=1,0,0,0,-1,0,0,0,-1
- 新传感器坐标系为 绕原坐标系Y轴 旋转 90°，输入命令：AT+URFR= 0,0,-1,0,1,0,1,0,0
- 新传感器坐标系为 绕原坐标系Y轴 旋转-90°，输入命令：AT+URFR= 0,0,1,0,1,0,-1,0,0
- 新传感器坐标系为 绕原坐标系Y轴 旋转180°，输入命令：AT+URFR= -1,0,0,0,1,0,0,0,-1
- 恢复默认值：AT+URFR=1,0,0,0,1,0,0,0,1

AT+INFO

打印模块信息，包括产品型号，版本，固件发布日期等。AT+INFO可以拓展二级指令实现更多信息的查询

INFO二级拓展指令	功能	示例
CAL	显示模块内部校准参数	AT+INFO=CAL
RF	显示无线设备参数	AT+INFO=RF
VER	显示详细版本信息	AT+INFO=VER

AT+ODR

设置模块串口输出速率。掉电保存，复位模块生效

例 设置串口输出速率为100Hz: AT+ODR=100

AT+BAUD

设置串口波特率，可选值：4800/9600/115200/256000/460800`

例 AT+BAUD=115200

!!! note "注意"

- 使用此指令需要特别注意，输入错误波特率后可能会导致无法和模块通讯
- 波特率参数设置好后掉电保存，复位模块生效。上位机的波特率也要做相应修改。
- 升级固件时，需要切换回115200 波特率。

AT+EOUT

串口输出开关

例 打开串口输出 AT+EOUT=1 关闭串口输出 AT+EOUT=0

AT+RST

复位模块

例 AT+RST

AT+TRG

触发模块输出一帧数据，可以配合AT+ODR=0来实现单次触发输出。

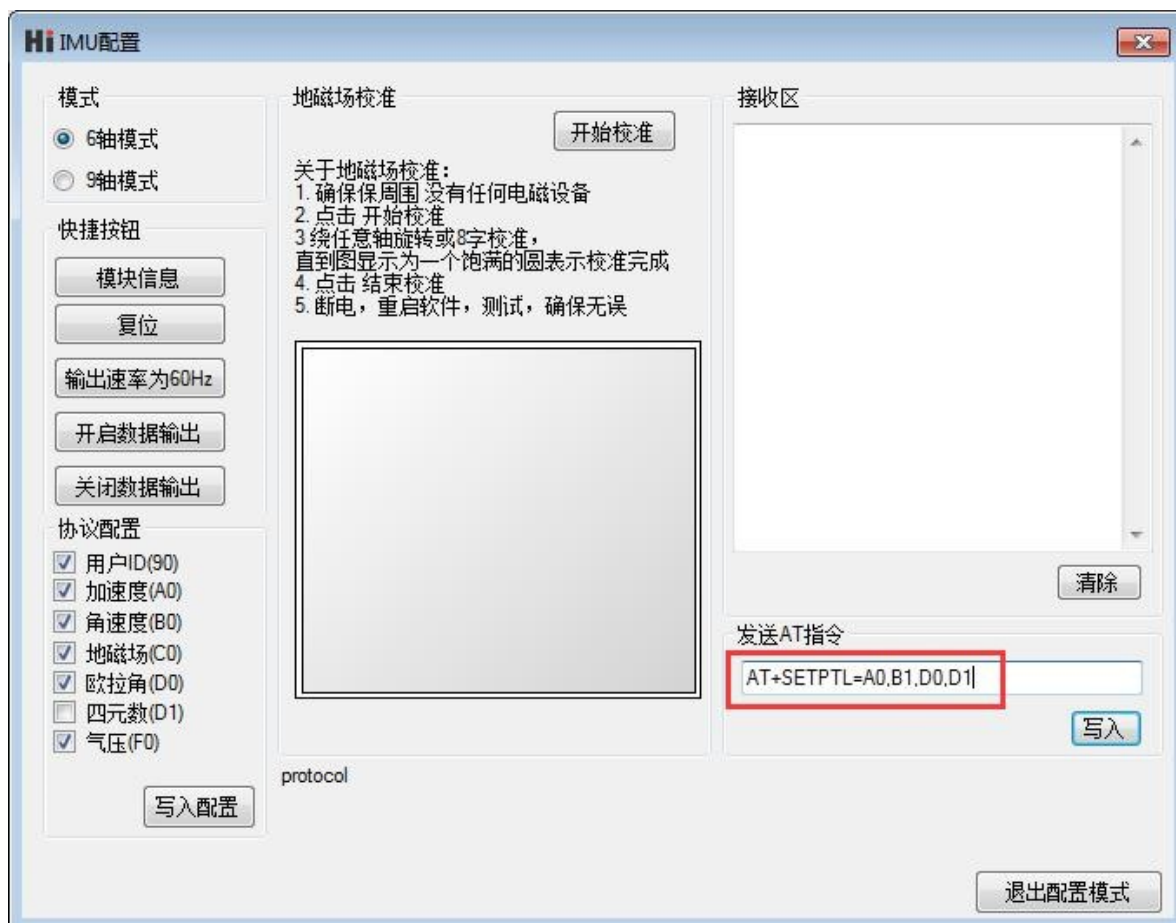
例 AT+TRG

AT+SETPEL

设置输出协议:

模块数据帧中的数据包组成可使用AT指令配置，格式为AT+SETPTL=<ITEM_ID>,<ITEM_ID>... 一帧输出可包含最多8个数据包。

例 配置模块输出加速度, 角速度,整形格式欧拉角和四元数的指令为：AT+SETPTL=A0,B1,D0,D1



AT+MODE

设置模块工作模式

例

- 设置模块工作在6轴模式(无磁校准) AT+MODE=0
- 设置模块工作在9轴模式(地磁场传感器参与航向角校正) AT+MODE=1

AT+GYRCTL

设置陀螺限幅滤波器阈值(出厂默认值1.0)

例

- 设置陀螺限幅滤波器限幅阈值为1.5/s: AT+GYRCTL=LMF, 1.5

陀螺限幅滤波主要为解决陀螺零偏问题, 当模块静止经受机械振动时(比如安装在机器上, 机器人上电待机但不移动时会有电机空载振动), 陀螺航向角会因为Z轴振动而缓慢飘移。当陀螺Z轴小于设定阈值时, 模块则会强制把Z轴数值归0。

限幅滤波可以解决由于陀螺零偏或小范围振动时带来的航向角飘移问题, 但缺点是小于设定阈值的转动会无法检测。一般情况下, 阈值设定范围应在0.1 - 3.5之间。

限幅阈值过高会导致小于阈值的转动角速度无法检测

限幅阈值过低会导致陀螺零偏无法校准, 航向角随时间缓慢飘移。

AT+GWID

可通过AT+GWID指令配置, GWID属性决定了接收器和节点的RF频率, 只有节点的GWID和接收器的GWID相同时, 模块和接收器直接才能通讯。GWID相当于无线网段, 当在同一地点使用多个接收机组成多个星形网络时, 必须保证每个接收器的GWID(网段)不同。

例 将一个接收器设置为GWID=3, 并将3个模块的自身ID设置为0,1,2并连接到这个接收器上:

接收机配置: AT+GWID=3

节点0配置: AT+GWID=3 AT+ID=0

节点1配置： AT+GWID=3 AT+ID=1

节点2配置： AT+GWID=3 AT+ID=2

AT+GWCFG

配置接收机支持的节点数和无线通讯频率。接收机默认支持8个节点，每个节点100Hz通讯频率。通讯频率*节点数收到RF带宽的限制，错误的配置将会导致无法输出数据。推荐的配置如下：

配置选项	通讯频率(Hz,每个节点)	支持的节点数
1(出厂默认)	100	8
2	200	4
3	30	16

例 配置接收机支持的最大节点数为16，每个节点接收频率为30Hz，依次输入：

AT+GWCFG=FRQ,30

AT+GWCFG=CNT,16

附录B - 四元数-欧拉角转换

四元数基础

四元数是一个四维空间上的一点，使用一个实数和三个虚数来代表： $q \in \mathbb{R}^4 = \mathbb{H}$

四元数有如下几种常用的表示方法：

复数表示	向量表示	四元数表示法1	四元数表示法2
$q = q_0 + \mathbf{i}q_1 + \mathbf{j}q_2 + \mathbf{k}q_3$	$q = [q_0, \mathbf{q}] = \left[q_0, \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \right]$	$q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$	$q = [q_w, q_x, q_y, q_z]$

其中：

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \tag{2}$$

$$\mathbf{ij} = \mathbf{k} = -\mathbf{ji}, \quad \mathbf{jk} = \mathbf{i} = -\mathbf{kj}, \quad \mathbf{ki} = \mathbf{j} = -\mathbf{ik} \tag{3}$$

四元数乘法：

$$\mathbf{p} \otimes \mathbf{q} = \begin{bmatrix} p_wq_w - p_xq_x - p_yq_y - p_zq_z \\ p_wq_x + p_xq_w + p_yq_z - p_zq_y \\ p_wq_y - p_xq_z + p_yq_w + p_zq_x \\ p_wq_z + p_xq_y - p_yq_x + p_zq_w \end{bmatrix} \tag{4}$$

一个单位四元数总是可以表示为这种形式： $q_R(\alpha, \mathbf{u}) = [\cos \frac{\alpha}{2}, \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \mathbf{u}]$

其中 α 是旋转角度， $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^3$ 为旋转轴，且 $\|\mathbf{u}\| = 1$.

四元数与旋转矩阵，欧拉角转换

四元数->旋转矩阵

(对应四元数 q_n^b 代表从n系到b系的坐标变换矩阵， q_n^b 也可以理解为从b系到n系的坐标系的变换，前半句说的是"坐标变换"，后半句说的是"坐标系变换"，请注意两者区别。

$$R_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

四元数->欧拉角

旋转矩阵，四元数和欧拉角是表示旋转的三种常用方式，其中另外两种表示形式转换为欧拉角时，必须先指定欧拉角旋转顺序。本产品使用"ZYX"旋转顺序,即先旋转航向角，然后俯仰角，最后横滚角：

转换公式为：

$$\begin{bmatrix} \phi(\text{横滚}) \\ \theta(\text{俯仰}) \\ \psi(\text{航向}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2q_2 q_3 + 2q_0 q_1, q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2) \\ -\text{asin}(2q_1 q_3 - 2q_0 q_2) \\ \text{atan2}(2q_1 q_2 + 2q_0 q_3, q_1^2 + q_0^2 - q_3^2 - q_2^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

欧拉角->四元数

记 $s_\phi = \sin \frac{\phi}{2}$, $c_\phi = \cos \frac{\phi}{2}$,以此类推：

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} c_{\phi/2} c_{\theta/2} c_{\psi/2} + s_{\phi/2} s_{\theta/2} s_{\psi/2} \\ -c_{\phi/2} s_{\theta/2} s_{\psi/2} + c_{\theta/2} c_{\psi/2} s_{\phi/2} \\ c_{\phi/2} c_{\psi/2} s_{\theta/2} + s_{\phi/2} c_{\theta/2} s_{\psi/2} \\ c_{\phi/2} c_{\theta/2} s_{\psi/2} - s_{\phi/2} c_{\psi/2} s_{\theta/2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

欧拉角->旋转矩阵(n->b)

$$R_n^b = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\theta s_\phi \\ c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

旋转矩阵(n->b)到欧拉角

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(r_{23}, r_{33}) \\ -\text{asin}(r_{13}) \\ \text{atan2}(r_{12}, r_{11}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

附录C - 固件升级与恢复出厂设置

本产品支持在线升级固件，请关注超核电子官网www.hipnuc.com 来获取最新固件版本 固件升级步骤：

- 获取最新的固件程序。拓展名为.hex
- 连接模块，打开上位机，将模块和上位机波特率都设置为115200.切换到固件升级窗口
- 点击连接按钮，如出现模块连接信息。则说明升级系统准备就绪，点击文件选择器(...)选择拓展名为xxx.hex 的固件，然后点击开始编程。下载完成后会提示编程完成，此时关闭串口，重新上电，模块升级完成。

