

四旋翼飞行器航姿参考系统的误差补偿方法研究

杨志永¹, 毕德学¹, 孟强², 王济阳¹

(1. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222; 2. 独山子石化公司 乙烯厂橡胶联合车间, 新疆 克拉玛依 833600)

摘要: 航姿参考系统是四旋翼飞行器姿态控制和惯性测量的关键, 基于 MEMS 的惯性导航系统长期稳定性较差, 陀螺仪传感器和加速度计存在明显的零漂现象, 因此在使用前必须对陀螺仪传感器和加速度计的误差系数进行标定; 论文首先以航姿参考系统的陀螺仪和加速度计实时数据的采集与处理, 并通过对陀螺仪和加速度计的误差产生原理的分析, 提出了陀螺仪和加速度计的新型误差补偿模型, 并推导了基于高斯牛顿法的误差补偿与标定方法, 由此简化了标定过程, 得到了标定结果; 实验结果表明了在不提高成本和降低精度的情况下该基于高斯牛顿法的误差补偿与标定方法的有效性。

关键词: 航姿参考系统; 高斯牛顿法; 误差补偿与标定

Error Compensation and Calibration for Attitude Heading Reference System with Four-rotor Aircraft

Yang Zhiyong¹, Bi Dexue¹, Meng Qiang², Wang Jiyang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. Dushanzi Petrochemical Company, Ethylene&rubber Workshop, Kelamayi 833600, China)

Abstract: Attitude heading reference system (AHRS) is the key part for four-rotor aircraft to its pose control and inertial measurement. The long-term stability of initial navigation system based on MEMS is poor, there exists obvious zero drift phenomenon, so error compensation and calibration of Gyro and Accelerometer must be completed before using it. Based on real time data collection and processing, and error producing analysis, this paper proposes a novel error compensation model for Gyro and Accelerometer, and this new error compensation and parameter calibration method based on Gauss-Newton algorithm is proposed. The method simplifies calibration procedure and obtains calibrated parameter value. Experimental results verify the effectiveness of the proposed method on the condition of no additional cost and accuracy loss.

Keywords: AHRS; Gauss-Newton algorithm; error compensation and calibration

0 引言

航姿参考系统是四旋翼飞行器姿态控制和惯性测量的关键, 它主要由加速度计、陀螺仪和磁力计构成, 各传感器的数据通过控制器的解算之后得到飞行器的姿态角、加速度等信息, 为飞行器的控制逻辑提供重要信息。随着现代科技的不断发展, 特别是机电技术 (MEMS) 的不断进步, 许多高精度机电系统得以广泛应用。由于基于 MEMS 的惯性导航系统具有体积小、重量轻、成本低、不受外界干扰等优点^[1], 近年来在军事及民用领域正得到越来越广泛的关注^[2]。

1 MPU-6000 传感器概述

本文四旋翼飞行器航姿参考系统实验平台采用了占用空间较小的 InvenSense 公司的 MPU-6000, 如图 1 所示。MPU-6000 是全球首例整合性 6 轴运动处理组件, 它整合三轴陀螺仪与三轴加速器于同一硅芯片上, 内建的数字运动感测处理器 (digital motion processor, DMP) 可处理复杂的九轴运动感测融合算法。通过 I²C 接口可以连接额外的数字传感器进行拓展,

如磁力计等, 扩展之后就可以通过其 I²C 或 SPI 接口输出 9 轴信号, 向应用端输出完整的 9 轴融合演算技术^[3]。

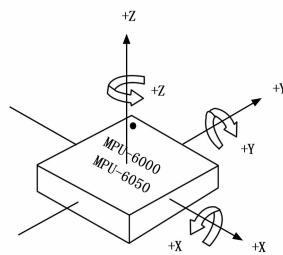


图 1 MPU-6000 模块

2 陀螺仪零点漂移补偿

陀螺仪具有良好的动态响应性能, 但其静态响应性能不足, 根据误差产生机制不同, MPU6000 传感器陀螺仪误差主要有: 零点漂移误差、标度因数误差、安装误差及随机噪声等^[4]。当应用陀螺仪传感器时必须首先对误差进行标定, 以提高测量的精度。

对 MPU6000 三轴陀螺仪传感器输出影响最大的是零点漂移和标度因数误差, 此外, 由于制造工艺的限制, 陀螺仪 3 个敏感轴还不能做到完全正交, 这样就会产生非正交误差, 同时陀螺仪传感器在安装焊接过程中也会引入安装误差, 它和轴间非正交误差作用效果相似, 可按安装误差一并处理。

收稿日期:2015-09-01; 修回日期:2015-10-15。

作者简介: 杨志永 (1987-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统方向的研究。

毕德学 (1969-), 男, 山东济南人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事机器人方向的研究。

综合考虑三轴陀螺仪各种误差, 依据误差补偿原理^[5]可以得到如下公式:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{yx} & k_{zx} \\ k_{xy} & k_{yy} & k_{zy} \\ k_{xz} & k_{yz} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_x \\ \tilde{\omega}_y \\ \tilde{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为陀螺仪的实际测量值, $\tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z$ 为陀螺仪真实值, b_x, b_y, b_z 为陀螺仪的零点漂移, $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 为随机误差, k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} 为标度因子, $k_{ij} (i \neq j)$ 为交叉耦合项。由于随机误差对标定结果影响较小, 在标定时可以忽略其影响。

以上就是对陀螺仪的完全标定, 由于 ATMEGA 芯片有限的内存和计算能力, 并且测试时陀螺仪标度因数和交叉耦合项影响较小, 这里只标记陀螺仪的零值偏移。由于忽略了标度因数和交叉耦合项的影响, 可以大大简化标定方法。

为评估零点漂移的大小, 使陀螺仪保持静止状态, 此时陀螺仪的输出均应为零, 但是受温度变化、电源电压不稳等因素的影响, 静态工作点发生了变化, 产生了零点漂移, 输出结果和期望值并不一致, 此时的误差记为零点漂移误差, MPU6000 传感器陀螺仪漂移一般不超过 0.04 dps。

为更准确地评估陀螺仪的零点漂移, 陀螺仪静止后进行 200 次采样, 将 200 次采样的均值作为零点漂移误差, 当然, 零点漂移误差不能超过 0.04 dps, 为此可以重复以上工作, 找到更好的评估值作为零点漂移误差。

陀螺仪的零点漂移评估流程如图 2 所示。

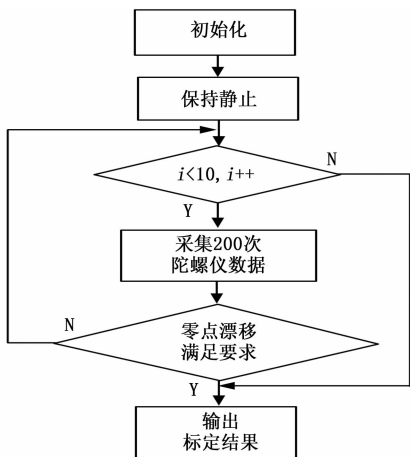


图 2 陀螺仪标定流程

3 基于高斯牛顿法的加速度计误差补偿与标定

基于 MEMS 的惯性导航系统长期稳定性较差, 存在明显的零漂现象, 因此在使用前必须对传感器的误差系数进行标定。国内有很多加速度计方面的研究, 加速度计标定的方法也比较多^[6-7]。

3.1 高斯牛顿法误差补偿与标定原理

一般的标定方法包括静态实验方法和动态实验方法两种。这两种方法或者精度较低, 或者对转台等硬件精度需求较高, 加大的成本投入, 都存在一定的弊端^[8]。为简化加速度计的标定过程, 本文采用了新的高斯牛顿方法进行标定。

假定只考虑零点漂移和由轴间非正交造成的标度因数, 则需标定的 6 个数为 m_i 和 $\delta_i (i = x, y, z, m_i$ 为零点漂移, δ_i 为各轴敏感度。如果 x, y, z 为三轴的输出, 那么加速度 $a = (a_x, a_y, a_z)$

可按下式进行表示:

$$a_x = \frac{x - m_x}{\delta_x}, a_y = \frac{y - m_y}{\delta_y}, a_z = \frac{z - m_z}{\delta_z} \quad (2)$$

如果参数是正确的, 且测量中没有噪声, 那么无论加速度计传感器姿态如何, 上式应满足:

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = G^2 \quad (3)$$

即:

$$\left(\frac{x - m_x}{\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{y - m_y}{\delta_y}\right)^2 + \left(\frac{z - m_z}{\delta_z}\right)^2 = G^2 \quad (4)$$

为便于求导与计算, 将上式两边同除以 G , 并用 $\delta_i (i = x, y, z)$ 代换 $1/\delta_i$, 则上式为:

$$\begin{aligned} (\delta_x/G)^2 (x - m_x)^2 + (\delta_y/G)^2 (y - m_y)^2 + \\ (\delta_z/G)^2 (z - m_z)^2 = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

如果用 x_i, y_i, z_i 表示第 i 次采样的读数, 那么第 i 次的采样误差可以写为:

$$\begin{aligned} \epsilon_i = (\delta_x/G)^2 (x_i - m_x)^2 + \\ (\delta_y/G)^2 (y_i - m_y)^2 + (\delta_z/G)^2 (z_i - m_z)^2 - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

下面的任务就是要找到使所有 ϵ_i 最小的参数值。为便于求解, 对上式取平方, 此时的任务就是使误差平方和最小, 即 $\sum_{i=1}^N \epsilon_i^2$ 尽可能地小。

现在可以正式描述本节所要解决的问题:

给定采样值 (x_i, y_i, z_i) (其中 $i = 1, \dots, N$), 找到合适的参数 $m_x, m_y, m_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z$, 以使罚函数:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N [(\delta_x/G)^2 (x_i - m_x)^2 + \\ (\delta_y/G)^2 (y_i - m_y)^2 + (\delta_z/G)^2 (z_i - m_z)^2 - 1]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

尽可能地小。

这是典型的非线性最小二乘问题, 为便于求解, 通常把非线性最小二乘问题转化为一系列线性最小二乘问题求解, 设 $x^{(k)}$ 是解的第 k 次近似, 在 $x^{(k)}$ 将函数 $\epsilon_i(x)$ 线性化, 这样就把非线性最小二乘问题转化为了线性最小二乘问题^[9]。

在式 (7) 中, 假设

$$\epsilon_i(x) = p_i^T x - b_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

其中: p_i 是 n 维列向量, b_i 为实数, $x = (m_x, m_y, m_z, \delta_x/G, \delta_y/G, \delta_z/G)^T$ 。令

$$A = \begin{bmatrix} p_1^T \\ p_2^T \\ \vdots \\ p_m^T \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

A 为 $m \times n$ 矩阵, b 是 m 维列向量, 则式 (7) 可以写成矩阵乘积形式:

$$\begin{aligned} E(x) = \sum_{i=1}^m \epsilon_i^2(x) = \\ (\epsilon_1(x), \epsilon_2(x), \dots, \epsilon_m(x)) \begin{bmatrix} \epsilon_1(x) \\ \epsilon_2(x) \\ \vdots \\ \epsilon_m(x) \end{bmatrix} = \\ (Ax - b)^T (Ax - b) = x^T A^T A x - 2b^T A x + b^T b \end{aligned} \quad (10)$$

$E(x)$ 的平稳点满足:

$$\nabla E(x) = 2A^T A x - 2A^T b = 0 \quad (11)$$

即:

$$A^T A x = A^T b \quad (12)$$

对于线性问题, A 列满秩, $A^T A$ 为 n 阶对称正定矩阵, 目标函

数 $E(x)$ 的平稳点:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (13)$$

而此处为非线性最小二乘问题, 不能直接按上式计算。

将函数 ϵ_i 在点 $x^{(k)}$ 处进行一阶泰勒展开得:

$$\begin{aligned} \varphi_i(x) &= \epsilon_i(x^{(k)}) + \nabla \epsilon_i(x^{(k)})^T (x - x^{(k)}) = \\ &\nabla \epsilon_i(x^{(k)})^T x - [\nabla \epsilon_i(x^{(k)})^T x^{(k)} - \\ &\epsilon_i(x^{(k)})] \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (14)$$

令

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^m \varphi_i^2(x) \quad (15)$$

用 $\varphi(x)$ 近似 $E(x)$, 用 $\varphi(x)$ 的极小点作为函数 $E(x)$ 的极小点估计, 求解线性最小二乘:

$$\min \varphi(x) \quad (16)$$

记 $A_k, \epsilon^{(k)}, b$ 分别为:

$$\begin{aligned} A_k &= \begin{bmatrix} \nabla \epsilon_1(x^{(k)})^T \\ \vdots \\ \nabla \epsilon_m(x^{(k)})^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon_1(x^{(k)})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \epsilon_1(x^{(k)})}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \epsilon_m(x^{(k)})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \epsilon_m(x^{(k)})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \\ \epsilon^{(k)} &= \begin{bmatrix} \epsilon_1(x^{(k)}) \\ \epsilon_2(x^{(k)}) \\ \vdots \\ \epsilon_m(x^{(k)}) \end{bmatrix} \\ b &= \begin{bmatrix} \nabla \epsilon_1(x^{(k)})^T x^{(k)} - \epsilon_1(x^{(k)}) \\ \vdots \\ \nabla \epsilon_m(x^{(k)})^T x^{(k)} - \epsilon_m(x^{(k)}) \end{bmatrix} = A_k x^{(k)} - \epsilon^{(k)} \end{aligned}$$

则式 (15) 写成:

$$\varphi(x) = (A_k x - b)^T (A_k x - b) \quad (17)$$

将 A_k, b 带入式 (12), 得:

$$A_k^T A_k x = A_k^T (A_k x^{(k)} - \epsilon^{(k)}) \quad (18)$$

整理得:

$$A_k^T A_k (x - x^{(k)}) = -A_k^T \epsilon^{(k)} \quad (19)$$

如果矩阵 A_k 是列满秩的, $A_k^T A_k$ 为对称正定矩阵, 存在逆矩阵 $(A_k^T A_k)^{-1}$, 由式 (19) 可以得到 $\varphi(x)$ 的极小值点:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - (A_k^T A_k)^{-1} A_k^T \epsilon^{(k)} = x^{(k)} + d^{(k)} \quad (20)$$

其中: $x^{(k+1)}$ 为罚函数 $E(x)$ 极小点的第 $k+1$ 次近似。式 (18) 就是高斯牛顿公式。 $d^{(k)}$ 为点 $x^{(k)}$ 处的高斯牛顿方向。为保证迭代之后函数值下降, 求得方向 $d^{(k)}$ 后, 从点 $x^{(k)}$ 起沿这个方向进行一维搜索:

$$\min_{\lambda} E(x^{(k)} + \lambda d^{(k)}) \quad (21)$$

求出步长 λ_k 后, 令 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}$ 作为第 $k+1$ 次近似。通过不断迭代, 直到满足迭代次数或两次迭代差值满足要求, 求得 x 值。

3.2 高斯牛顿法标定加速度计步骤

1) 给定初值 $x^{(1)} = (0, 0, 0, 1/G, 1/G, 1/G)^T$, 允许误差 $\sigma > 0$, 置 $k=1$ 。

2) 计算函数值 $\epsilon_i(x^{(k)}), i=1, 2, \dots, 6$ 得到向量

$$\epsilon^{(k)} = \begin{bmatrix} \epsilon_1(x^{(k)}) \\ \epsilon_2(x^{(k)}) \\ \vdots \\ \epsilon_6(x^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

再计算一阶偏导数

$$a_{ij} = \frac{\partial \epsilon_i(x^{(k)})}{\partial x_j}, i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (23)$$

得到 6×6 阶矩阵:

$$A_k = (a_{ij})_{6 \times 6} \quad (24)$$

3) 解方程组

$$A_k^T A_k d^{(k)} = -A_k^T \epsilon^{(k)} \quad (25)$$

求得牛顿高斯方向 $d^{(k)}$ 。

4) 从点 $x^{(k)}$ 起, 沿 $d^{(k)}$ 进行一维搜索。求得步长 λ_k , 使得

$$F(x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}) = \min_{\lambda} F(x^{(k)} + \lambda d^{(k)}) \quad (26)$$

令 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}$ 。

5) 若 $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| \leq \sigma$ 或满足迭代次数, 停止计算, 求得 $\bar{x} = x^{(k+1)}$; 否则置 $k = k+1$, 返回步骤 (2) 继续计算。

3.3 加速度计标定及实验结果

为标定模型参数 (公式 5), 只需要找到 6 个待定参数: 3 个 m_i 和 3 个 δ_i 。

对于 1 个观察点 (x, y, z) 得到一个含 6 个未知数的方程, 6 个相互独立的观察点得到含 6 个未知数的 6 个方程, 并能确定唯一解。但是由于噪声的存在, 这种方法也不准确。但是可以选择参数值, 使误差尽可能地小。为确定这 6 个数, 至少需要 6 次测量, 假定采用 6 点标定法, 依次测量平放、左 90° 放置、右 90° 放置、前倾 90° 放置、后仰 90° 放置和倒置 6 种位置 (如图 3 所示) 的数据。实验步骤如下:

1) 将加速度计按图 3 中第一张图片 Z 上位置静止放好, 测量获得此时零点的 20 组漂移数据。

2) 按照 1), 顺序按图 3 中的加速度计的位置方式依次放好, 测量获得每种姿态此时零点的 20 组漂移数据。直到六种姿态全部采集。在每个位置加速度计保持静止足够长的时间来收集样本, 尽可能多地读取新数据, 通过采样值求平均的 (实验选 20 个点) 方法减弱传感器在读数据时的噪声影响。

3) 重复 1) 和 210 次以上, 获得足够的零漂数据。其中一组数据如表 1 所示。

4) 实验根据数据, 利用高斯牛顿法, 标定出 6 个参数的值, 如表 1 所示。

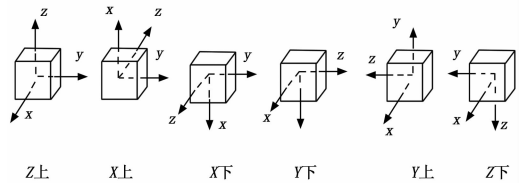


图 3 加速度计的 6 种不同位置

表 1 加速度采样值

采样值	$x/m \cdot s^2$	$y/m \cdot s^2$	$z/m \cdot s^2$
1	-0.145 3	0.135 4	-9.820 4
2	-9.780 4	0.468 2	0.817 2
3	9.753 7	-0.511 1	0.051 8
4	0.302 7	9.822 4	-0.015 2
5	-0.601 5	-9.759 3	-0.582 1
6	0.118 6	-0.143 0	0.420 6

运用高斯牛顿标定方法, 并采用 Matlab 程序进行标定, 标

定结果如表 2 所示。

表 2 标定结果

	m_x	m_y	m_z	$\bar{\delta}_x$	$\bar{\delta}_y$	$\bar{\delta}_z$
标定结果	-0.028 5	0.017 4	-0.003 3	1.001 0	0.999 6	0.998 8

4 结论

本文主要以航姿参考系统的陀螺仪和加速度计数据采集与应用为基础,分析了陀螺仪和加速度计的误差产生原理,针对加速度计的标定提出了新型的高斯牛顿法标定法,简化了标定过程,得到了标定结果。

参考文献:

[1] 陈 剑, 孙金海, 等. 惯性系统中加速度计标定方法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2012, 29 (8): 130.
 [2] 陆 辰, 李荣冰, 刘建业, 等. 微型航姿系统中三轴 MEMS 加速度

计组合误差建模方法 [J]. 测试技术学报, 2011, 25 (1): 29.
 [3] Data Sheet. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Description [EB/OL]. http://www.Invensense.com, 2011, 11.
 [4] 彭孝东, 陈 瑜, 等. MEMS 三轴数字陀螺仪标定方法研究 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (6): 63-64.
 [5] 宋丽君, 秦永元. MEMS 陀螺仪的一种实用标定法 [J]. 压力与声光, 2010, 32 (3): 372-373.
 [6] Syed Z F, Aggarwal P, Goodall C, et al. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18 (7): 1987-1907.
 [7] 张红宇, 叶新生. 一种改进的 IMU 加表标定模型及快速标定方法 [J]. 理论与实践, 2009 (3): 11-13.
 [8] 刘百奇, 房建成. 一种改进的 IMU 无定向动静混合高精度标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2008 (6): 1250-1254.
 [9] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(上接第 266 页)

下位机在接受数据过程中将接收情况向上位机反馈,反馈的格式也是 16 字节的包头,包括本机 ID、端口号、索引号、数据类型等信息,具体格式不再赘述。

3.3 下位机总体实现方案

下位机各功能模块的软件设计大致可以分为两部分:一是初始化配置阶段处理扩展帧;二是正常工作阶段处理命令帧。主程序流程如图 5 所示,各模块硬件初始化后,在主函数中等待包头接收完毕,根据包头来判断本组合包是命令帧还是扩展帧,然后调用相应的模块子程序处理。

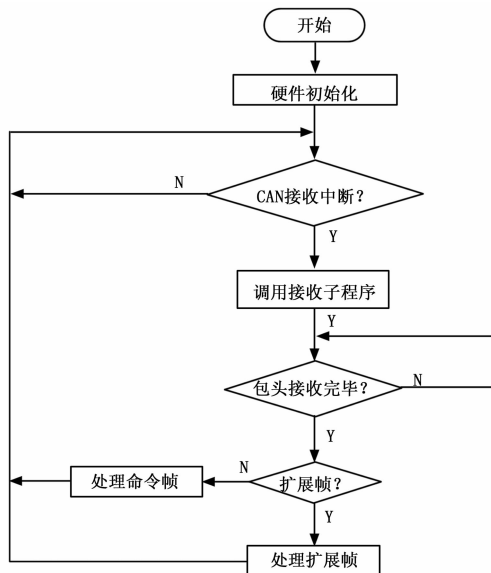


图 5 主程序流程图

4 测试结果与分析

本中控主机系统的工作过程步骤简单,只需配置好各功能模块的参数后即可正常工作。

参数的配置过程中会涉及到大量数据的 CAN 通信,在特定情况下对控制算法和通讯性能进行了检测,结果如表 1 所示。

虽然在通讯过程中有丢包现象出现(干扰或其他原因),

但由于增加了帧数据校验和错误反馈机制,系统能正确识别丢包和错包的情况,确保核心板会重新发送。

表 1 通讯性能测试(丢包测试)

发送包数	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
接收包数	500	1 000	1 500	1 999	2 499	2 999

系统工作时,将影音设备连接到对应的红外端口,通过无线触摸屏控制设备,控制准确无误;通过触摸屏控制影幕升降和投影机开关,控制结果正常;被控的 VGA 矩阵切换器的影音切换迅速准确。

5 结束语

上述设计中的红外部分 Flash 烧写的 sir 格式的红外文件是由 Smartisys 协议对红外信号采用波形描述加参量编码的方法生成的,具体方法是把信号中每组前后相邻的载波段和空闲段看作是一个子信号,即看作一个码元,把只出现过一次的码组定义为头码,把循环出现的码组定义为循环码,从这些码元中提取出载波周期信息、载波段和空闲段的时长信息及信息个数、头码和循环码的码元个数、循环码的循环次数等信息,再把这些信息整合起来就能实现对红外信号的完整描述。

另外软件上,由于各功能模块的分工不同,除解包流程在总体上是一致外,解包后的处理不尽相同。在实际测试过程中,采用 CAN 总线的中控系统的实时性和稳定性取得了明显的效果。该中控系统成本较低,稳定可靠,目前已经正式投入生产。

参考文献:

[1] 杨 旭. 基于中控主机的智能家居控制系统设计与实现 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
 [2] 刘向明, 方建安. CAN 总线网络的实时性研究和改进 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (22): 46-50.
 [3] 曾 维, 罗 粟, 黄 宏, 等. 封装串口数据通信协议的设计 [J]. 微型机与应用, 2014, 33 (18): 56-60.
 [4] 牛跃昕. CAN 总线嵌入式开发: 从入门到实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
 [5] 王桂荣, 钱剑敏. CAN 总线和基于 CAN 总线的高层协议 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11 (5): 391-394.