

# 广播式自动相关监视设备系统设计

王瑞平, 吴静松

(安阳工学院 计算科学与信息工程学院, 河南 安阳 455000)

**摘要:** 随着多旋翼无人机日益广泛的应用, 其监视能力的薄弱也日渐显露, 增强其自主监视能力是实现无人机自动化的重要手段, 为此, 设计了一套基于 MSP430F4152 的小型广播式自动相关监视设备, 可使多旋翼无人机具有自主监视能力; 首先, 基于现有的广播式自动相关监视技术, 对嵌入式系统进行优化设计, 然后, 设计了以 MSP430F4152 微控制器为主控芯片的硬件部分, 通过 ATGM331C 模块获取位置信息与时间同步信号, 并利用 nRF24L01+ 模块进行无线数据传输, 最终在 J204A 显示屏上显示本机信息与远程数据; 软件部分针对电池驱动的硬件做了优化设计, 参考 UAT 数据链设计了本系统的工作时序, 利用 Asterix Category 021 协议设计了本系统的报文格式, 最后对文中方法进行实验测试, 结果表明了文中系统能实现自主监视, 是一种可行的方法。

**关键词:** 多旋翼无人机; 自主监视; MSP430F4152 微控制器; ATGM331C 模块; 工作时序

## Automatic Dependent Surveillance Broadcast Equipment System Design

Wang Ruiping, Wu Jingsong

(College of Computer Science and Information Engineering, Anyang Institute of Technology,  
Anyang 455000, China)

**Abstract:** with the application of multi rotor UAV is increasingly extensive, its weak monitoring capacity has become evident. Self monitoring ability of multi rotor UAV is not a very important link in computer automation. Therefore, a small radio type MSP430F4152 automatic dependent surveillance equipment, which can make the multi rotor UAV with independent monitoring ability. This paper optimized the existing automatic dependent surveillance broadcast technology of the embedded system. The hardware part takes MSP430F4152 micro controller as main control chip, acquire the position information and time synchronization signal through the ATGM331C module, and wireless data transmission by nRF24L01+ module, and finally display the machine information and remote data in the J204A display. The software part do optimization design of the battery powered hardware, refer to the UAT data link design time sequence of the system, using Asterix Category 021 protocol and design the system message format. The experiment is implemented to test the proposed method in this paper, and the result shows it can achieve automatic monitoring, so it is a feasible method for UAV.

**Keywords:** multi rotor UAV; autonomous Surveillance; MSP430F4152 microcontroller; ATGM331C module; timing

## 0 引言

多旋翼无人直升机在军事和民用领域具有广阔的应用前景, 例如环境监视、情报搜集、高层建筑实时监控、协助和救助、电影拍摄和气象调查等<sup>[1]</sup>。但其监视能力还停留在类似协同监视的水平, 即地面站可以监视其天线收发范围内的多旋翼无人直升机, 而多旋翼无人直升机之间则没有互动<sup>[2]</sup>。多旋翼无人直升机无法得知自身周围的空域情况, 只能由地面站将其可监视范围内的空域情况发送给多旋翼无人直升机。在这样的情况下, 无人机的自动化能力将非常有限。

为了提高无人机的自助监控能力, 本文设计了一套基于 MSP430F4152 的小型广播式自动相关监视设备, 可使多旋翼无人直升机具有自主监视能力。

## 1 广播式自动相关监视技术

### 1.1 广播式自动相关监视 (ADS-B)

广播式自动相关监视 (ADS-B) 系统分为机载设备和地面站设备两部分。机载设备通过全球导航卫星系统 (GNSS) 获得飞机实时的位置信息和三维速度信息, 并从大气数据系统获得飞机的气压高度信息, 供其它飞机和地面用户接收和显示。地面管制单位将接收到的飞机信息输入空管系统, 提供给管制员进行类雷达的管制监视。ADS-B 不仅实现地面对飞机的监视, 同时也可以实现飞机与飞机之间的互相监视, 能增强机场场面的监视能力<sup>[3]</sup>。

### 1.2 ADS-B 数据链

目前有 3 种数据链可满足 ADS-B 对数据通信的要求, 即 1090ES、UAT 和 VDL-4。UAT 数据链成本较低, 上行链路容量大, 是唯一适应所有的 RTCA ADS-B 最低航空系统性能标准的数据链配置。由于 S 模式数据链所具有的特殊性能, 1090ES 已经在 TCAS 和 ADS-B 系统中得到了成功的应用。1090ES 信息数据块是由脉冲位置调制 (PPM) 编码。发射信息包括一个报头和一个数据块, 采用随机的方式接入 1 090 MHz 链路。

收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 国家重大科技专项 (2012ZX04011-012)。

作者简介: 王瑞平 (1976-), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事计算机应用, 软件工程方向的研究。

### 1.3 Asterix Category 021 协议

在 Asterix Category 021 协议里, 最基本的构成是 Data Item (数据项), 它也是数据类 (如 Asterix Category 021) 里最小的信息单位。ADS-B 系统所处理的报文, 从内容上来讲, 是按照一定的顺序排列起来的数据项, 在形式上这样的排列被称为 UAP (用户应用程序框架)。每个数据项都有唯一的项标志号, 有自己的编码规则及结构, 使用数据项需遵从协议中数据项的编码规则。在 UAP 中, 每个数据项有自己的 FRN 序号、长度、使用准则 (也就是数据项的出现条件)<sup>[5]</sup>。

目前民用航空中常用的 ADS-B 方案几乎都不适用于多旋翼无人直升机。因此本文主要参考 UAT 数据链的原理与参数, 并针对电池驱动的嵌入式平台进行优化设计。ADS-B 广播数据分为短信息 (18 字节) 和长信息 (34 字节)<sup>[6]</sup>。

本文主要利用 2.4 GHz 无线数据收发模块和单片机来模仿 UAT ADS-B 信息帧<sup>[7]</sup>结构。

本文主控芯片使用具有可观计算性能的低功耗微控制器 MSP430F4152。通过 GNSS 模块获得位置信息与 UTC 秒同步信号。经过 MCU 计算处理后, 由 nRF24L01+ 无线数据收发模块进行发送与接收。为了方便演示, 使用 J204A 液晶屏模块显示信息。整个系统使用 186 503.7 V 锂电池与 HT7333 电源芯片供电, 由于 GNSS 模块功耗较大, 故单独使用一路 HT7333 供电。系统如图 1 所示。

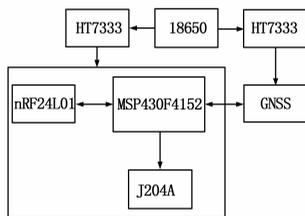


图1 系统框图

## 2 系统硬件设计

### 2.1 主控芯片

本文使用 QFP 封装的 MSP430F4152IPM<sup>[8]</sup>。MSP430 有一个活动模式 (Active Mode) 和 5 个软件选择的低功耗模式 (Low-power Mode)<sup>[9]</sup>。任何中断事件可将单片机从任何低功耗模式中唤醒, 执行中断函数, 之后返回低功耗模式或者保持唤醒回到主程序。

### 2.2 外围设备

本文主要使用的 MSP430F4152 外围设备有 FLL+ (锁频环) 时钟模块、数字 I/O、Timer0\_A3 定时器模块、USCI (通用串行通信界面) 模块、ADC10 模块。MSP430x4xx 系列单片机使用 FLL+ 时钟模块作为系统时钟。锁频环时钟模块支持低系统消耗和超低功耗。FLL+ 模块中的数字锁频环硬件和数字调制器可以把单片机内部数控振荡器 (DCO) 的频率稳定到一个 LFXT1 手表晶振的可编程倍数上。

MSP430F4152 的 FLL+ 模块有 3 个时钟源: LFXT1CLK, VLOCLK 和 DCO。FLL+ 模块可输出 ACLK (辅时钟)、MCLK (主时钟) 和 SMCLK (副时钟)。本系统中使用 32 768 Hz 晶振, MCLK 设置在 8 MHz。

MSP430F4152 有 6 个 8 位 I/O 口和 1 个 7 位 I/O 口。除了通用 I/O 功能, 所有端口都有特殊功能。P1 和 P2 端口的全

部 8 位都可以配置为可选边缘的中断输入。

本文使用 Timer0\_A3 作为时间较长的延时和设定无线模块发射时间。MSP430 的 Timer\_A 定时器是一个 16 位的定时/计数器, 有 3 个或 5 个捕获/比较寄存器。Timer\_A 支持多路捕获/比较, PWM 输出和间隔定时。Timer\_A 也有广泛的中断能力。中断可由计数器溢出或每个捕获/比较寄存器 (CCR) 产生。系统使用 ADC10 模块对空引脚采样电压值作为 rand () 函数随机数种子的一部分。MSP430F4152 的 ADC10 模块支持快速的 10 位模数转换。模块内置一个 10 位的逐次逼近寄存器核心 (SAR)、采样选择控制、参考电压产生器和数据传输控制器 (DTC)。

ADC10 核心由两个寄存器控制, ADC10CTL0 和 ADC10CTL1。当 ADC10ON 位为 1 时, ADC 核心使能。ADC10 的寄存器控制位只能在 ENC 位为 0 时可以修改。任何转换开始前, 都要将 ENC 位置 1。ADC10 模块内置的参考电压有两个可选值, 设置 REFON = 1 使能内部参考电压。当 REF2\_5 V = 1 时, 内部参考电压值为 2.5 V。当 REF2\_5 V = 0 时, 内部参考电压为 1.5 V。

ADC10 模块为低功耗应用设计。当 ADC10 不工作时, 其核心将自动关闭, 并在需要时自动启动。当 ADC 核心关闭时, ADC10 模块不消耗电流。

### 2.3 电源模块设计

本系统使用 18650 3.7 V 锂电池与 HT7333 低压差线性稳压器。HT7333 可以输入 12 V 以下电压, 输出稳定在 3.3 V, 压降仅有 90 mV, 最大输出电流为 250 mA。适用于锂电池驱动的低功耗单片机电路。由于 GNSS 模块功率较大, 故单独使用一路 HT7333 供电, 系统供电模块如图 2 所示。

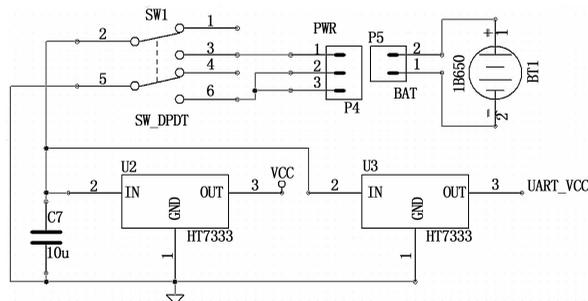


图2 系统供电模块

### 2.4 无线数据传输模块

本系统使用基于 Nordic 公司的 nRF24L01+ 芯片的 2.4 GHz 无线数据收发模块。相比其他常用的无线收发芯片, nRF24L01+ 的 ShockBurst™ 技术可对数据进行自动打包。其中报头、数据包控制段和 CRC 校验均为自动生成填充, 地址和数据载荷为用户设置。利用 ShockBurst™ 技术, 可在不增加代码的情况下大大改善模块间通信性能、降低误码率。

nRF24L01+ 有 TX FIFO 和 RX FIFO 两个数据先入先出缓存 (Data FIFO), 都为三级 32 字节 FIFO。使用时需及时用 FLUSH\_TX 命令和 FLUSH\_RX 命令清理缓存。

当 CSN 为低电平时, nRF24L01+ 的 MOSI 和 MISO 可以输入输出。SCK 的上升沿读取数据, 下降沿位移数据。执行读取操作时, 向 nRF24L01+ 写入读取命令, 同时 nRF24L01+ 返回 STATUS 寄存器值, 之后 nRF24L01+ 根据命令返回相应数据。执行写入操作时, 向 nRF24L01+ 写入命令, 同时

nRF24L01 + 返回 STATUS 寄存器值，之后继续向 nRF24L01+ 写入相应数据。返回和发送到数据格式为从低字节到高字节，每字节先发送高位数据。

本系统中 nRF24L01+ 模块与 MSP430 单片机的电路连接如图 3 所示。

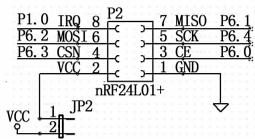


图 3 nRF24L01+ 模块电路连接图

### 2.5 显示模块

本系统使用 J204A 字符型液晶显示屏。J204A 液晶显示屏是 1602 液晶显示屏的扩大版本，可显示 20 列 4 行字符，可显示英文字符、常用符号及一些日文字符，接口与 1602 液晶屏相同。本系统中 J204A 显示模块与 MSP430 单片机的电路连接图如图 4 所示。

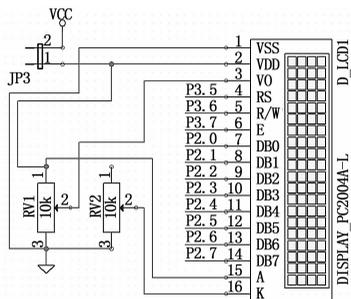


图 4 J204A 显示模块电路连接图

### 2.6 定位模块

本设计使用 ATGM331C BD+GPS 双模定位模块。模块有 UART 串口及 PPS (秒脉冲)。该模块支持 4800-115200 波特率，授时精度为 20 ns，在 3.3 V 下的典型功耗为 200 mW，支持 NMEA0183 协议。本系统中定位模块与 MSP430 单片机的电路连接图如图 5 所示。

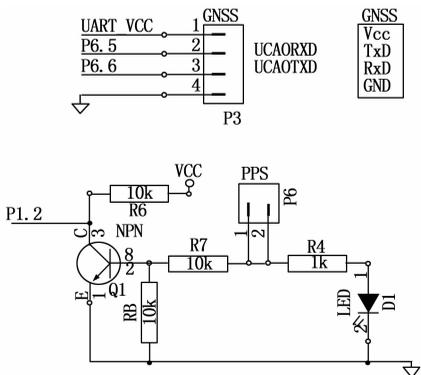


图 5 定位模块电路连接图

本系统中，MSP430F4152 通过 UCA0RXD 和 UCA0TXD 端口接收 ATGM331C 模块的串口数据。ATGM331C 模块的秒脉冲为高电平，通过三极管组建的非门将脉冲信号隔离并转为低电平有效，最终由 MSP430F4152 的 P1.2 接收。

## 3 系统软件设计

### 3.1 时序

本系统参考 UAT 数据量进行设计，因此对时序要求较为严格。以 1 s 为一帧，利用 GNSS 模块进行 UTC 同步，这样可多机同步工作。系统将一帧分为 4 096 个 MSO 时隙，因为单片机定时器使用 32 768 Hz 晶振作为时钟源，所以划分成 4 096 个时隙既接近 UAT 数据链的参数又可以简化程序设计。为避免时序冲突，单片机设置为最高频率 8 MHz 运行，UART 也使用 GNSS 模块支持的最大波特率 (115 200)。nRF24L01+ 支持 10 Mbps 以下 SPI 串口，因此单片机使用 SPI 模块最高速率 8 MHz 运行。

0 s 时，利用 GNSS 的秒脉冲作为 UTC 同步信号。0~188 ms 预留地面站信息。GNSS 的数据会在 10~80 ms 的时间发出。188 ms 后有 6 ms 保护时段，为了克服众多机器间的时间漂移。从 194 ms 开始的 800 ms 为 ADS-B 收发时段，在这个时段系统选择随机的时刻来发送数据，这样可有效避免数据碰撞。时序图如图 6 所示。

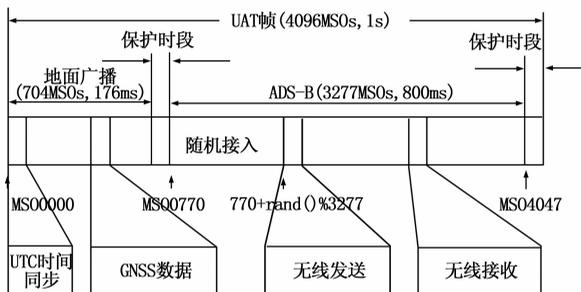


图 6 本系统的时序图

### 3.2 主程序流程图

本系统为电池驱动环境特别优化设计，以最大化电能效率。主程序为中断驱动，在不工作时进入低功耗模式以节省电能；由中断唤醒单片机，根据中断源使单片机进入不同程序，单片机以最高频率运行完程序后进入低功耗模式。系统加电启动后，先进入初始化程序，设定单片机各个外围设备的工作模式，设定各个模块的工作模式，之后开启中断并进入低功耗模式。由中断进入相应功能，系统主程序流程图如图 7 所示。

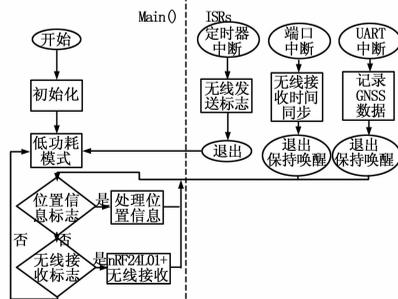


图 7 本系统的主程序流程图

本设计的报文参考 Asterix Category 021 协议，并针对基于单片机的系统优化。报文由 4 个 32 位数据组成，从低到高分别为本机地址、纬度、经度、发送时间。本系统使用 nRF24L01+ 无线收发芯片的 ShockBurst™ 技术传输数据，报文作为 nRF24L01+ 的数据载荷被自动打包到 ShockBurst™ 技术的数据包里。利用 ShockBurst™ 技术，用户无需手动设置报

头和计算校验码。

本机地址为一个 24 位数据。为方便单片机运算, 存储在 32 位整型变量中。为方便调试, 本机地址在初始化阶段使用随机数生成。

NMEA0183 协议中纬度的格式为 ddmm.mm (例如 3 906.144 2, 即 39 度 06.144 2 分), 其中小数点后为可变量度。若小数点后取 4 位, 即最小分度为 0.000 1 分, 其在地表的对应距离约为 0.2 m (设地球半径为 6 378 km)。考虑到普通民用 GNSS 模块的定位精度一般在 2 m 左右, 单片机按整型处理小数点后数值的效率更高, 因此本设计中的纬度值采用小数点后四位数的格式。

Asterix Category 021 协议中 I021/130 项的 WGS-84 坐标是以 2 的补码存储, LSB 为 180/2<sup>23</sup> 度。如果采用这种格式, 则转换数据时需要进行大量浮点数运算, 不适合单片机为主控芯片的系统。系统参考 Asterix Category 021 协议, 将纬度设为十进制表示, LSB 为 0.0001 分, N+/S-。以这种格式处理数据时, 只需要简单的整数运算。转换公式如下:

$$Latitude = (degree \times 60 + minute) \times 10\ 000 \quad (1)$$

同纬度一样, 经度采用十进制表示, LSB 为 0.0001 分, E+/W-, 转换公式为  $Latitude = (degree \times 60 + minute) \times 10\ 000$ 。

根据该公式计算出的值在 [-108 000 000, 108 000 000], 在 32 位整型的范围 [-2 147 483 648, 2 147 483 647] 内。

### 3.3 中断程序设计

本文使用的中断主要有定时器中断、端口中断和串口中断。定时器中断用作延时和设定无线模块发射时刻, 端口中断用作响应 nRF24L01+ 中断请求和响应 UTC 时间同步信号, 串口中断用来收发 GNSS 模块的数据。

系统使用 UART 串口中断。在初始化阶段仅向 GNSS 模块发送设置数据, 初始化之后仅接收 GNSS 模块的数据。当 UART 串口的发送缓存为空时, 会设立串口发送中断。当 UART 串口的接收缓存完整接收到一字节数据时, 会置接收中断。本系统中, 当接收到 ' \$ ' 时, 将接收指针指向串口数据缓存数组的首地址。当接收到 ' \n ' 时, 表示接收完毕, 置串口数据接收完毕标志并保持唤醒, 系统将进入 GNSS 数据处理程序。

### 3.4 GNSS 模块

系统使用 ATGM331C 北斗+GPS 双模定位模块。系统设计中, GNSS 模块的默认波特率为 9 600, 在系统初始化阶段, 单片机使用 9 600 波特率向 GNSS 模块发送设置语句, 设置 GNSS 模块发送的数据和串口波特率, 之后单片机改为使用 115 200 波特率。

NMEA 通讯协议规定的通信界面是异步串行口, 通常使用 RS-422 或者 RS-232 接口, 波特率是 4 800 bps, 8 位数据, 1 位停止位, 无校验无握手。NMEA 通信协议规定所有数据都以语句传输, 只允许使用可打印的 ASCII 字符、CR (回车) 和 LF (换行)。每句以 “ ” 开始, 以 “ <CR><LF> ” 结尾。NMEA 协议中有 3 种语句: 传输语句 (Talker Sentences)、专用语句 (Proprietary Sentences) 和查询语句 (Query Sentences)。常用的语句是传输语句与专用语句。

传送语句的格式如下:

$$tsss,d1,d2,\dots, <CR><LF> \quad (2)$$

“ \$ ” 之后的两个字符 “ tt ” 是传送识别符, “ sss ” 为语句识别符, 随后为以逗号分隔的数据域, 再之后是可选的校验和, 最后为 <CR><LF>。

专用语句以 “ \$ P ” 开始, 之后的 3 个字符为生产厂家设定的标志, 随后是生产厂家规定的的数据。

NMEA 0183 协议定义的语句繁多, 其中常用的有 \$ GPGGA、\$ GPGSA、\$ GPGSV、\$ GPRMC、\$ GPVTG、\$ GPGLL 等。

为了方便观察, 本系统中统一位置信息的显示格式为 NMEA0183 形式, 位置信息取小数点后四位, 并附带本机、远机地址和警告信息。在 J204A 显示屏上的界面如图 8 所示。

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	L	L	L	L	L	L	!	V	d	d	°	m	m	.	m	m	m	m		N/S
1	h	h	m	m	s	s		d	d	d	°	m	m	.	m	m	m	m		E/W
2	R	R	R	R	R	R		!	d	d	°	m	m	.	m	m	m	m		N/S
3	h	h	m	m	s	s		d	d	d	°	m	m	.	m	m	m	m		E/W

图 8 液晶屏界面

(6, 0) 的 “ ! ” 为未同步警告; (7, 0) 的 “ V ” 为数据无效警告; (7, 2) 的 “ ! ” 为未接收到远机的信号。L 为十六进制数显示的本机地址, R 为远机地址, 时间信息为 hhmmss (时分秒) 格式。d 为度, m 为分。

### 3.5 随机数程序

RTCA 的 DO-282B 文件中规定了 ADS-B 时段发送时刻 MSO 的伪随机算法。<sup>[6]</sup> 伪随机数 (R) 利用最近的有效位置数据和上一个伪随机数 (R(m-1)) 产生。令:

$$N(0) = \text{最近的有效纬度的 } 12\text{LSB}$$

$$N(1) = \text{最近的有效经度的 } 12\text{LSB}$$

设当前 UAT 帧序号为 m

$$\text{当 } m = 0 \text{ 时, } R(0) = N(0) \bmod 3\ 200$$

当  $m \geq 1$  时,  $R(m) = \{4001 \cdot R(m-1) + N(m \bmod 2)\} \bmod 3\ 200$  机载设备上电后发送的第一帧数据, 其 MSO 由下式给出:

$$MSO = 752 + R(m)$$

其他全部情况, 发送机应在有限 MSO 范围模式, MSO 由下式给出:

$$MSO = 752 + R^* + R(m) \bmod 800$$

其中  $R^* = R(k) - R(k) \bmod 800$ , k 为进入有限 MSO 范围模式较早之前的一帧。

由于本系统中经纬度信息的格式与 UAT ADS-B 标准中规定的格式不同, 所以本设计无法直接套用 UAT ADS-B 的伪随机算法。

## 4 实例试验

本系统设计在生成本机地址和设定发送时刻使用了简单的随机数程序。常用的快速随机数生成方法有线性同余法和梅森旋转算法。梅森旋转算法需求的硬件资源比较多, 不适用于单片机。线性同余法其算法简单, 产生的随机数比较均匀、具有周期性, 适用于本设计这样对随机性要求不严格且需要均匀性的场合。

本系统采用 C 语言标准库里的 rand () 函数。使用 ADC 对空引脚采样, 采样值与 rand () 产生的数按位异或后赋给 srand () 作为随机数种子。开机初始化时运行一次, 之后每小时第一秒运行一次。本系统中有未同步警告、GNSS 数据无

效警告、未收到无线数据警告。

当 GNSS 数据中数据状态位为“V”时，即表示 GNSS 数据无效，在显示屏上 (7, 0) 的位置显示“V”即数据无效警告；当 GNSS 数据中数据状态为“A”时，即表示 GNSS 数据有效，显示屏上清除“V”警告。每次处理完 GNSS 数据后检查未同步警告标志和未收到无线数据警告标志，若标志为 1 则显示相应的警告，若标志为 0 则清除相应警告，之后警告标志置 1。若接收到无线数据则将未收到无线数据警告标志置 0，否则保持到下一次检查。若 GNSS 有秒脉冲输出，则在端口中断中将未同步警告标志置 0，否则保持到下一次检查。

### 5 结论

多旋翼无人直升机在军事和民用领域具有广阔的应用前景，但其监视能力还停留在类似协同监视的水平，多旋翼无人直升机之间则没有互动。为了解决此问题，本文设计并实现了基于 MSP430F4152、nRF24L01+ 和 ATGM331C 的小型广播式自动相关监视设备，对系统的软硬件均进行了设计，并通过实验证明了该系统可以实现自动定位、广播自身位置信息并接收附近相同设备的广播，具有很强的实用性。

(上接第 2365 页)

动。如图 6 与图 7 所示为对两种步态分别仿真的动画截图，仿真结果证明了新规划的步态对于运动稳定性的提升。

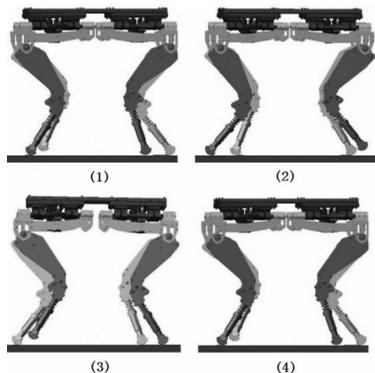


图 6 曲线质心轨迹的静态步态仿真

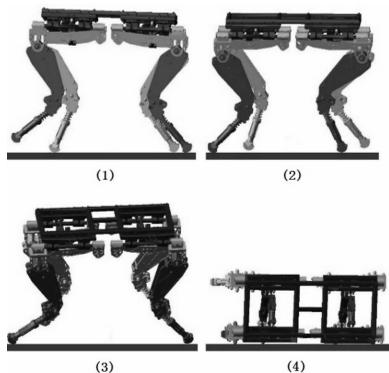


图 7 随动质心的静态步态仿真

### 6 结论

为了得到兼具较高稳定裕度以及运动速度的静态步态，在将固定质心的静态步态与随动质心的静态步态对比之后，归纳

### 参考文献：

[1] 花琦, 王帮峰, 钱小燕. 机场场面移动目标监控终端显示平台设计与实现 [J]. 科学技术与工程, 2013, 20 (35): 9688-9692.

[2] 彭良福, 林云松, 黄勤珍. 基于 SSR 和 ADS-B 混合监视的机载编队防撞系统设计 [J]. 电讯技术, 2012, 52 (5): 609-614.

[3] 张满栋, 杨胜强, 吕明. 基于 MFC 报警监控图形系统设计与实现 [J]. 工程图学学报, 2006 (2): 161-165.

[4] 唐勇, 刘昌忠, 吴宏刚. 基于 Google Earth 的三维航迹监视及六自由度飞行仿真 [J]. 计算机应用, 2009, 29 (12): 3385-3387.

[5] 王飞只. ADS-B 系统机载设备维护之研究 [J]. 科技资讯, 2010 (11): 5-5.

[6] 卢宇, 吴宏刚, 朱盼. A-SMGCS 中的航迹关联设计与实现 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (6): 223-226.

[7] 白松浩, 朱晓辉, 陈志杰. 广播式与合约式自动相关监视的信息转换 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (9): 1658-1660.

[8] 孟军, 马彦恒, 董健, 等. 基于 ADS-B 的便携式空情报测系统技术方案研究 [J]. 计算技术与自动化, 2012, 31 (1): 132-135.

[9] 蔡志浩, 杨丽曼, 王英勋, 等. 无人机全空域飞行影响因素分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (2): 175-179.

出两种步态各自的优缺点并进行相互结合，提出一种曲线质心轨迹的步态方法。为实现在该步态方法的规划，首先，建立单腿关节坐标系及腿部运动学方程，并推导出由足端点坐标为参数的腿部关节夹角变化方程；其次，根据曲线质心轨迹步态的思路，设计出明确的质心运动轨迹以及划分步态周期，并结合逆运动学方程在 MATLAB 中对步态规划得到的足端运动轨迹方程进行计算，得到的四足机器人质心轨迹满足规划的曲线轨迹要求；再次，通过对四足机器人腿部结构尺寸分析，计算出液压缸活塞缸行程位移量与腿部关节夹角变化量之间的关系方程，从而为后续液压控制系统的搭建做准备；最后，对 ADAMS 中的虚拟样机进行运动仿真，仿真效果基本满足规划步态要求。并通过对传统静态步态与在其基础上规划的步态在相同速度下的仿真结果进行对比，判断曲线质心轨迹步态的稳定性得到有效提升。

### 参考文献：

[1] 吉爱红, 戴振东, 周来水. 仿生机器人的研究进展 [J]. 机器人, 2005, 27 (3): 284-288.

[2] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G. Big Dog, the rough-terrain quadruped robot [A]. 17th World Congress, International Federation of Automation Control [C]. Amsterdam, Netherland: Elsevier, 2008: 10822-10825.

[3] Semini C. HyQ-Design and development of a hydraulically actuated quadruped robot [D]. Genova, Italy: Italian Institute of Technology, 2010.

[4] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.

[5] 王立鹏, 王军政, 汪首坤, 等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (1): 39-44.

[6] 徐铁群, 万隆君. 四足步行机器人稳定性步态分析 [J]. 制造业自动化, 2001, 23 (8): 5-7.

[7] 王鹏飞. 四足机器人稳定行走规划及控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.