

基于 GNU Radio 的 ADS-B 信号收发系统设计

郝敬堂, 苏志刚, 韩冰, 刘通

(中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300)

摘要: 针对高集成度 ADS-B 系统不易开展创新性研究的问题, 基于软件无线电设计了一套 ADS-B 信号收发系统; 首先以可修改形式实现 ADS-B 报文编码、基带信号生成、前导脉冲检测、信号解调以及 ADS-B 信息解码等自定义 GNU Radio 模块的编写; 然后创建 ADS-B 发射机和接收机流程图, 驱动硬件外设 HackRF 实现 ADS-B 信号的发射与接收; 最后通过实验对各模块功能及数据接口进行测试; 实验结果表明, 该系统设计方案可行, ADS-B 信号格式及报文广播速率符合 Do-260B 标准, 且 ADS-B 接收机接收灵敏度为 -68 dBm, 信号检测率达 89% 。

关键词: 无线通信; 广播式自动相关监视; 软件无线电; 信号生成; 信号处理

Design of ADS-B Signal Transceiver System Based on GNU Radio

Hao Jingtang, Su Zhigang, Han Bing, Liu Tong

(Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In view of the difficulties in conducting innovative researches on highly integrated automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) experimental platform, an ADS-B signal transceiver system was designed based on software defined radio platform. First, self-defined GNU Radio blocks named ADS-B encoder, baseband signal generation, preamble detection, ADS-B demodulator and ADS-B decoder were written in modifiable form. Then flow-graphs of ADS-B transmitter and receiver were created to realize the transmission and reception of ADS-B signal by using HackRF, which is a software defined radio peripheral. Finally, experiments were carried out to test the function and interface of each block. The results show that the design scheme is feasible, ADS-B signal format and message broadcast rate are compliant with the Do-260B standard. The receiver sensitivity is -68 dBm, and signal detection rate reaches 89% .

Keywords: wireless communication; ADS-B; software defined radios; signal generation; signal processing

0 引言

广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) 是一种基于 GNSS 和空空、地空数据链通信的航空器及车辆运行监视技术。ADS-B 发射机周期性向外广播航空器 ICAO 地址、三维位置、速度以及意向等信息。ADS-B 接收机接收并解码 ADS-B 报文后, 将解码结果传输给空管系统实现对航空器监视。2019 年, 中国民航按计划全面启动 ADS-B 管制运行^[1]。然而, ADS-B 存在严重电子欺骗干扰^[2]以及微弱信号较难检测^[3]等问题, 为开展相关研究, 研发一套低成本、易于功能扩展的 ADS-B 收发系统具有重大意义。

目前市面上的无线通信、信号处理设备多采用硬件电路完成, 集成度较高, 成本较大, 不具有开放性。针对此

问题, 国内外众多学者基于软件无线电平台搭建了通用的无线通信及信号处理平台^[4-5], 开展了 GNSS 干扰信号分析^[6]、室内定位^[7]以及无线电频谱数据分析^[8-9]等研究。在 ADS-B 信号处理方面, 文献 [10] 基于 AD9363 和 Xilinx Zynq-7000 SOC 搭建软件无线电平台, 实现了 ADS-B 接收机; 文献 [11-12] 利用通用软件无线电外设 (Universal Software Radio Peripheral, USRP) 实现了 ADS-B 信号的接收及处理; 文献 [13] 搭建了一个 ADS-B 收发仿真系统, 并重点分析了 ADS-B 信号的编码及解码方式。上述研究多针对 ADS-B 信号接收及解码开展研究, 且使用的无线电设备较为昂贵。

基于此, 本文设计了基于软件无线电的 ADS-B 信号收发系统, 该系统依托 GNU Radio, 用 Python 编程实现了 ADS-B 信号收发过程中信号生成、信号收发以及信号处理等核心模块的编写, 进而搭建 ADS-B 发射机和接收机流程图, 利用较为廉价的软件无线电外设 HackRF 实现信号的发射与接收。该系统具有模块化和开放性特点, 通过修改模块代码, 可以方便实现系统功能的完善与扩展。

1 系统结构及原理

ADS-B 系统采用 S 模式数据链, 以 $1\ 090$ MHz 扩展

收稿日期:2020-04-06; 修回日期:2020-05-15。

基金项目:中国民航大学实验技术创新基金项目 (2019CXJJ04)。

作者简介:郝敬堂(1989-),男,河南淇县人,硕士,实验师,主要从事监视数据处理、室内导航方向的研究。

苏志刚(1972-),男,黑龙江尚志人,博士,教授,主要从事信号与信息处理及其在监视与导航领域的应用方向的研究。

电文的形式进行周期性广播。本文设计的 ADS-B 信号收发系统包含 ADS-B 发射机和 ADS-B 接收机两个子系统, 且都由开源的软件无线电开发工具 GNU Radio 及通用软件无线电硬件平台 HackRF 组成。系统总体框架如图 1 所示, ADS-B 收发系统中信号生成及处理都在 GNU Radio 中以软件形式完成, ADS-B 信号的发射及接收由 GNU Radio 控制 HackRF 实现。所设计系统不仅可以接收自己生成的信号, 还可以接收周边航空器发出的真实 ADS-B 信号。

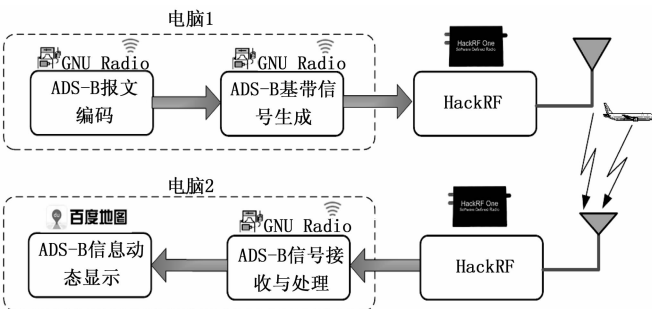


图 1 系统结构框架

1.1 HackRF 工作原理

为有效降低系统成本, 系统硬件部分使用开源的软件无线电外设 HackRF 实现, 其硬件结构图如图 2 所示。HackRF 的工作频率范围为 30 MHz~6 GHz, 最大采样频率为 22 MHz, 采用宽带中频正交采样, 主要完成信号收发、混频以及采样等前端处理, 采用半双工通信方式^[14]。发射和接收过程中的基带数字信号通过 USB2.0 与电脑或手机进行通信。

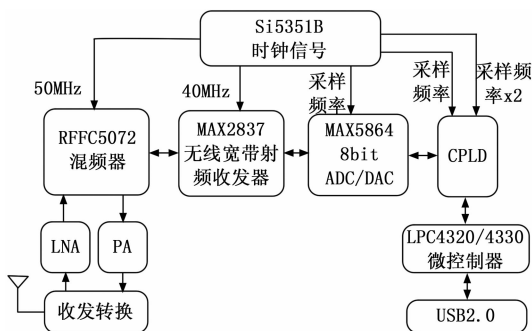


图 2 HackRF 硬件结构图

以发射信号过程为例, 系统软件部分生成 IQ 两路数字基带信号, 经 USB 传输给 HackRF 微控制器 LPC4320, 并由 CPLD 将数据传输给 MAX5864 完成数模转换, 输出的基带模拟信号由 MAX2837 调制到射频 2.3 GHz~2.7 GHz 频段, 然后利用 RF5C5072 混频到指定频率, 经功率放大后发射出去。

利用开源程序可以初始化 HackRF, 设置射频增益、低噪声放大器 (Low Noise Amplifier, LNA) 增益、可变增益放大器 (Variable Gain Amplifier, VGA) 增益, 中心频率以及采样率等参数, 完成与 HackRF 的通信。GNU Radio 将与 HackRF 通信的功能封装为 Osmocom Source/Sink 两

个模块, 除了设置中心频率以及采样率等基本参数外, 通过设置射频增益 (RF Gain)、中频增益 (IF Gain) 和基带增益 (BB Gain) 完成相关增益的设置, 相关增益范围及步长如表 1 所示。

表 1 增益范围/步长

工作模式	射频增益/dB	中频增益/dB	基带增益/dB
接收	0-14/14	0-40/8	0-62/2
发射	0-14/14	0-47/1	-

如表 1 所示, 射频增益为 0 或 14 dB, 用来控制是否开启 14 dBm 放大器。接收数据时, 主要调整 HackRF 中频 (LNA) 增益和基带 (VGA) 增益; 发射数据时, 主要调整 HackRF 中频 (VGA) 增益。

1.2 GNU Radio 工作原理

系统软件部分采用 GNU Radio 开发, GNU Radio 为一款开源的软件无线电平台, 内置有信号采集、信号产生、信道、滤波器、调制解调以及显示仪器等模块, 并支持用户编制具有特定功能的自定义模块。

根据是否更改模块采样速率, 自定义模块分为同步、内插以及抽取 3 种类型, 可以使用 GNU Radio 内部模块 gr_modtool 创建模块模板, 并利用 C++ 或 Python 实现模块功能代码的编写。另外, 也可以直接在内部模块 Python Block 中输入 Python 代码实现特定功能。

如图 3 所示, GNU Radio 以 GRC (GNU Radio Companion) 流图形式, 将单个的模块连接起来, 组成信号处理系统, 且系统至少包含一个信源和一个信宿。每个模块都是一个数据处理线程, GNU Radio 利用其调度机制控制硬件驱动及各模块线程调度, 并利用数据零拷贝缓存机制、消息传递机制以及流标签机制实现数据流的传输与有用数据的标记^[15]。

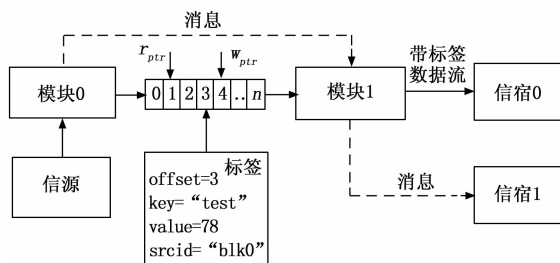


图 3 GNU Radio 流图示例图

如图 3 中所示, 为了实现数据零拷贝缓存, 模块 0 输出端口会绑定一个缓存区, 并通过写指针 w_{ptr} 输出数据, 下游模块 1 通过读指针 r_{ptr} 读取数据, 保证模块间数据高效传输。除了传输数据流外, 模块可以以 GNU Radio 专有多态数据类型 (polymorphic type, PMT) 构建协议数据单元, 并将其作为异步消息在相邻模块间传递传递, 如图 3 中虚线所示。另外, 对于关键信息, 可以通过添加流标签形式进行标记, 如图 3 中, 模块 0 在数据流偏移量为 3 的位置添加了键名为 test 的标签。

根据图 1 所示系统结构框架, ADS-B 收发系统中 HackRF 主要完成数字上下变频、正交采样等前端工作, ADS-B 信号生成及处理等核心功能在 GNU Radio 以自定义模块形式实现, 且为数据处理方便, 本系统自定义的模块皆为同步类型模块。根据 ADS-B 系统信号处理流程, 分别搭建 ADS-B 接收机流图和 ADS-B 发射机流图。为实现与 HackRF 的通信, ADS-B 接收机流图中以 Osmocom Source 模块为信源, ADS-B 发射机流图以 Osmocom Sink 模块为信宿。

2 系统设计与实现

在进行系统设计之前, 需要对 ADS-B 消息格式进行分析, 如图 4 所示为 ADS-B 消息格式, 采用下行格式 (Downlink Format, DF) 17 格式, 前 $8 \mu\text{s}$ 为前导脉冲, 后 $112 \mu\text{s}$ 为数据块, 采用脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM) [16]。

基于 GNU Radio 模块化和开放性的优势, 将 ADS-B 信号处理及信号生成过程中核心功能封装为自定义 GNU Radio 模块。对 ADS-B 信号收发系统中信号生成及处理流程进行细化, 绘制系统完整工作流程如图 5 所示。

如图 5 所示, ADS-B 发射机在 GNU Radio 中时序读取历史航迹数据, 并按消息类型进行报文编码, 然后经 PPM 调制、添加前导脉冲后生成基带信号。ADS-B 接收机在 GNU Radio 中对 HackRF 输出的基带正交信号依次进行前导脉冲检测、PPM 解调以及报文解码等处理。

下面就 ADS-B 发射机及 ADS-B 接收机实现的具体流程及解决的关键难点进行分别描述。

2.1 ADS-B 发射机

如图 5 所示, ADS-B 发射机核心功能可以归类为 ADS-B 报文编码和基带信号生成两个模块, 分别自定义 GNU Radio 模块为 ADS-B Encoder 模块和 Baseband Signal Generator 模块。根据 ADS-B 发射机工作流程搭建 GRC 流图如图 6 所示。

发射机系统具体工作流程如下:

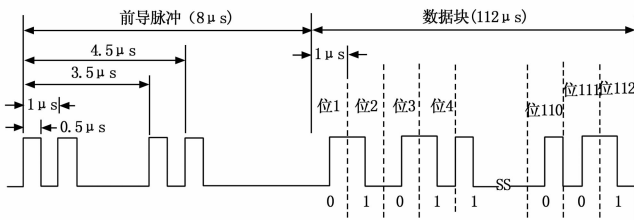


图 4 ADS-B 消息格式

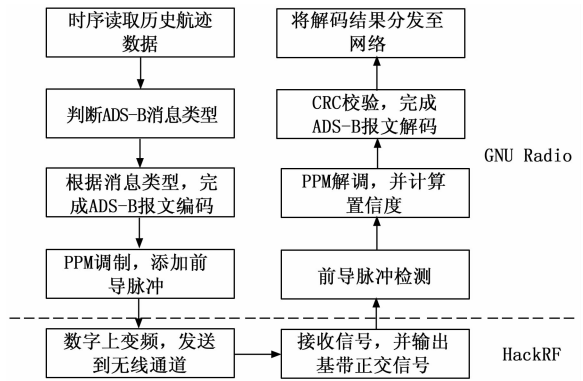


图 5 收发系统工作流程

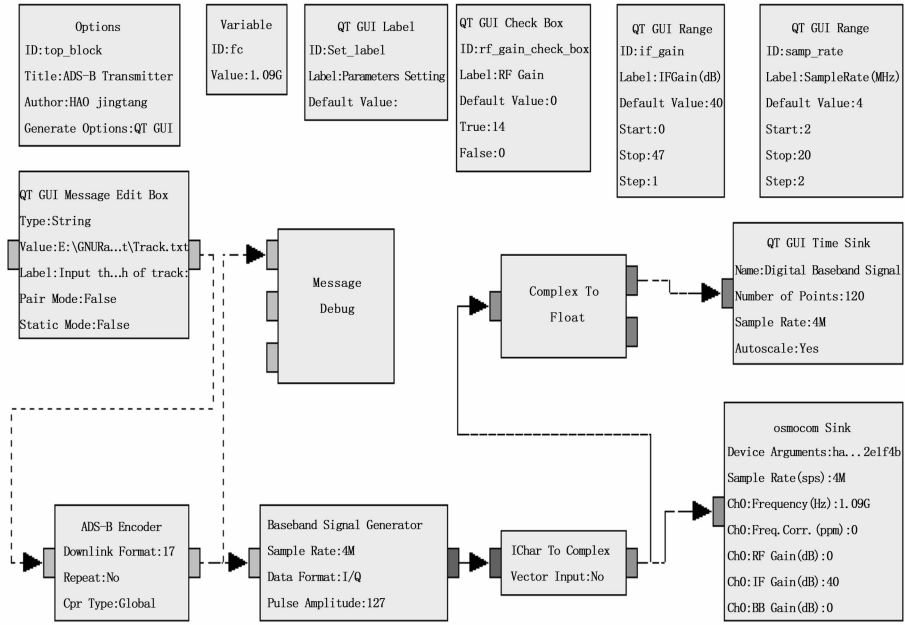


图 6 ADS-B 发射机 GRC 流图

1) 利用 Message Edit Box 模块输入历史真实航迹文件路径, 并将其以消息形式传输给 ADS-B Encoder 模块。

ADS-B 常用消息类型主要包含呼号、空中位置以及空速三类, 历史真实航迹文件以明文形式按行存储三类消息, 存储内容如表 2 所示。从表 2 可以看出, 每一类消息都包含消息类型、时间戳以及航空器 24 比特地址码。呼号类消息包含航空器航班号; 空中位置类消息包含经度、纬度以及高度信息; 空速类消息包含航空器地速、航向以及爬升率。

表 2 历史真实航迹文件内容

类型	时间戳	地址	专有信息		
呼号	9:06:36	780B17	CES5788		
空中位置	9:06:36	781521	经度/(°) 117.43	纬度/(°) 38.88	高度/m 825
空速	9:06:36	780EB5	地速/kts 201.9	航向/(°) 79.6	爬升率/(ft/min) -576

根据 Do-260B 文件《1 090 MHz ADS-B 最低运行性能标准》规定, 呼号消息每 4.8~5.2 s 更新一次; 空中位置及空速消息每 0.4~0.6 s 更新一次。本系统使用的历史航迹数据是利用专业 ADS-B 接收机接收得到, 各类消息更新速率满足要求。

2) ADS-B Encoder 模块逐条读取历史航迹文件, 按照 S 模式 DF17 报文格式完成报文编码及循环冗余校验 (Cyclic Redundancy Check, CRC) 码生成, 并将生成的 112 比特报文通过消息传输给 Baseband Signal Generator 模块。

在进行空中位置报文编码时, 经度纬度信息一般用 24 比特表示, 而由于 ADS-B 信息字长限制, 需要采用压缩位置报告 (compact position reporting, CPR) 进行位置编码。CPR 算法将地球表面按照纬度等分为 30 个高位区, 按经度划分为若干低位区。由于从赤道向两极, 横截圆面积越来越小, 低位区数量与所处纬度有关。航空器在飞行过程中, 相邻两条报文高位区编码一般不发生变化。在利用 CPR 算法编码时, 将航空器处于相同高位区的相邻两条位置报文分别定义为奇编码报文和偶编码报文, 高位区信息平分到两条报文进行编码。通过此压缩编码方式, 经度纬度信息可以通过 17 比特完成编码。

除了实现位置报文的奇偶编码外, 保证各类消息具有正确更新速率也是本系统着重解决的问题之一。假设历史真实航迹文件第 n 行消息时间戳为 $t_n, n = 1, 2, \dots$ 。ADS-B Encoder 模块设定计时器, 得到系统累积运行时间 t_r 。对于第 n 行消息, 若 $t_n - t_1 \leq t_r$, 则将该行对应报文传递出去。

3) Baseband Signal Generator 模块在接收到 ADS-B 报文后, 按照图 4 所示 ADS-B 消息格式, 完成前导脉冲生成及 PPM 调制, 并根据采样率及 MAX5864 芯片数模转换参数, 生成脉冲幅度为 127 的 I/Q 两路数字基带信号, 并将 I/Q 两路基带信号以交错形式转换为串行数据流输出。

对于多航班情况, Baseband Signal Generator 模块在 1 秒内会接收到多条 ADS-B 报文, 在生成 ADS-B 信号时, 为了避免两两之间互相干扰, 给生成的每条 ADS-B 信号前添加 500 μs 的保护间隔, 即根据采样率添加对应数量的 0。另外, 当 Baseband Signal Generator 模块无 ADS-B 报文数据输入时, 则模块输出数据流全为 0。

4) 将 Baseband Signal Generator 模块输出的数据流通过 IChar To Complex 模块转换为复信号后, 通过 Osmocom Sink 模块传入 HackRF 进行上变频, 完成信号的发射。

2.2 ADS-B 接收机

根据如图 5 所示工作流程, ADS-B 接收机核心功能可以分别自定义为 Preamble Detector 模块、ADS-B Demodulator 模块以及 ADS-B Decoder 模块。搭建 ADS-B 接收机 GRC 流图如图 7 所示。

接收机系统具体工作流程如下:

1) 通过 Osmocom Source 模块驱动 HackRF, 完成 I/Q 两路数字基带信号的采集, 并将两路 8 比特符号整数做归一化处理。

如图 7 所示, Osmocom Source 模块主要设置 HackRF 设备序列号、采样率、中心频率以及表 1 所示 3 种增益。所设置增益值应满足表 1 所示范围及步长, 且应根据周边环境, 设定合适的大小。例如, 若基带增益设置太小, 则接收不到 ADS-B 信号, 太大会导致基带噪声过大。

2) 将 Osmocom Source 模块输出的复信号取模平方后, 输入 Preamble Detector 模块进行前导脉冲检测。前导脉冲检测性能直接影响 ADS-B 接收机的性能。

在进行前导脉冲检测时, 本系统首先通过估计噪声基底来设定阈值, 然后根据阈值对采样数据进行判决处理, 对判决后的数据进行一阶差分处理, 得到上升沿和下降沿位置, 在剔除异常值后, 可以得到有效脉冲位置序列。遍历序列内有效脉冲, 以其上升沿为起始, 将其后 8 μs 数据与标准前导脉冲数据进行匹配, 若匹配成功, 则判定此有效脉冲处为一个 ADS-B 信号。为减少运算, 对于匹配成功的有效脉冲, 其后 120 μs 内脉冲不参与匹配运算。

GNU Radio 每个模块都包含一个数据处理线程, 且同步类型模块每个处理周期输出的数据长度为固定值, 设其值为 N 。在进行前导脉冲检测过程中, 如图 8 所示, 上一

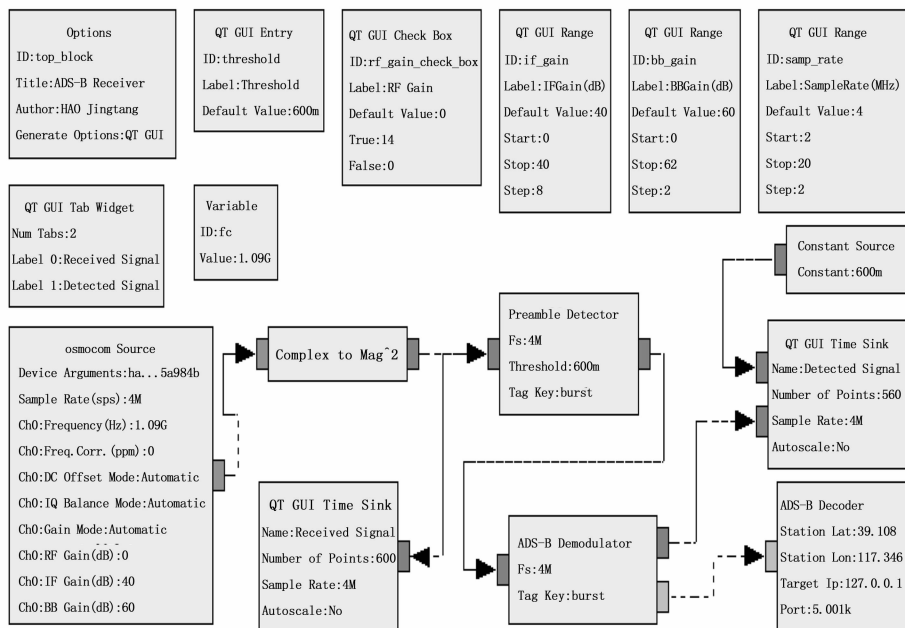


图 7 ADS-B 接收机 GRC 流图

处理周期读取的数据可能包含前导脉冲的局部, 为保证此类前导脉冲不被漏检, 在当前处理周期, Preamble Detector 模块将读指针 r_{ptr} 向回移动 M 个位置, M 为一个标准前导脉冲对应的数据长度。

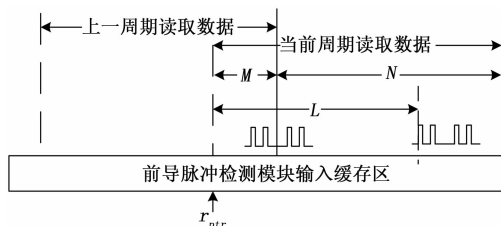


图 8 前导脉冲模块数据读取方式

Preamble Detector 模块在检测出信号的数据流位置处添加键名为 burst 的标签, 且应为标签设置正确的位置偏差值。例如, 对于图 8 检测出的第 2 个前导脉冲, 其处于当前周期读取数据的第 L 位, 若 Preamble Detector 模块已累计运行 k 个处理周期, 则这个前导脉冲在数据流中位置偏差为:

$$offset = kN + L - M \quad (1)$$

3) ADS-B Demodulator 模块遍历数据流中标签信息, 找到 ADS-B 消息数据块起止位置, 完成 PPM 解调, 得到 112 比特报文数据, 并对每一位数据进行置信度分析, 并将报文数据及置信度值通过消息传递给 ADS-B Decoder 模块。对于某 $1 \mu\text{s}$ 数据, 若前 $0.5 \mu\text{s}$ 和后 $0.5 \mu\text{s}$ 信号平均功率分别为 P_1 和 P_0 , 则置信度定义为:

$$C_{bit} = 10 * \lg\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (2)$$

4) ADS-B Decoder 模块接收到 112 比特数据及置信度消息后, 首先进行 CRC 校验, 对于 CRC 校验不通过的报文, 将置信度最低的位取反, 然后进行二次校验。最后对所有校验通过的报文按照 DF17 报文格式进行解码, 并将解码结果以明文形式通过网络分发出去。

3 实验结果及分析

3.1 信号生成及发射实验

为增加 ADS-B 信号生成的真实性, 以 2019 年 10 月 28 日天津机场周边部分航班数据生成历史航迹文件。ADS-B Encoder 模块读取航迹文件, 时序生成编码报文, 并将其以消息形式传递给下个模块。利用 GNU Radio 中 Message Debug 模块打印 ADS-B Encoder 模块传递的某条消息如下:

```
((TargetAddress.7869729)),(141 120 21 33 88 49 149
55 159 73 154 38 48 29))
```

其中, TargetAddress 部分对应航空器地址的十进制形式, 如 7869729 对应地址 0x781521, 后面括号内 141 (0x8D) 等 14 个字节对应 112 比特报文数据, 经专业 DF17 报文解析软件解码, 验证了编码的正确性。

在完成前导脉冲生成及 PPM 调制后, 得到基带信号波形如图 9 所示, 为了显示效果, 图 9 仅展示前导脉冲及 20 μs 左右数据。为验证 PPM 调制正确性, 对数据块前 8 μs 数据进行手动解调, 结果如图 9 所示, 为二进制 10001101, 即 0x8D, 与报文实际一致。

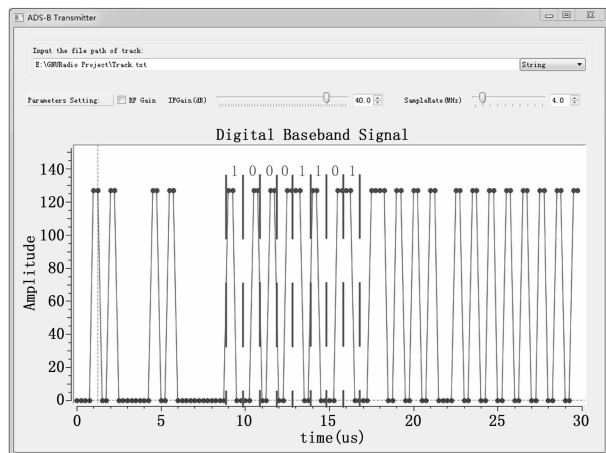


图 9 ADS-B 发射机界面

为了进一步分析 ADS-B 发射机所发射信号波形, 将中心频率设置为 150 MHz, 生成的信号直接输入示波器, 局部观测结果如图 10 所示。

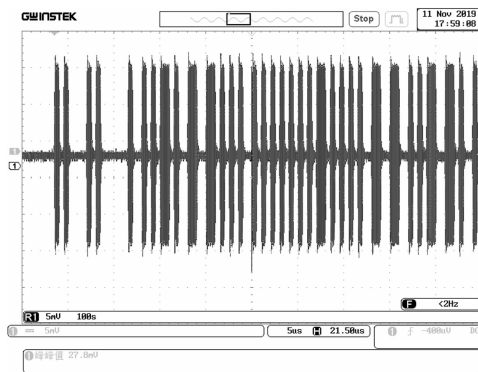


图 10 ADS-B 发射机生成信号

从图 10 可以看出, 生成的 ADS-B 信号格式规范, 符合 Do-260B 标准。本系统 ADS-B 信号最大发射功率为 10 dBm。为了避免对周边环境进行干扰, 当中心频率设置为 1 090 MHz 时, 本系统利用同轴电缆加衰减器的形式将 ADS-B 信号输出到 ADS-B 接收机。

3.2 信号检测与处理实验

ADS-B 接收机利用图 7 所示 GRC 流程图, 依次完成前导脉冲检测、PPM 解调及解码等工作。由于 Preamble Detector 模块为每一个检测到的信号添加了键值为 burst 的标签, QT GUI Time Sink 模块以此标签作为触发条件, 着重显示检测到的 ADS-B 信号波形, 具体如图 11 中 Detected Signal 所示。

ADS-B 信号完成 PPM 解调后, 会得到 112 比特报文

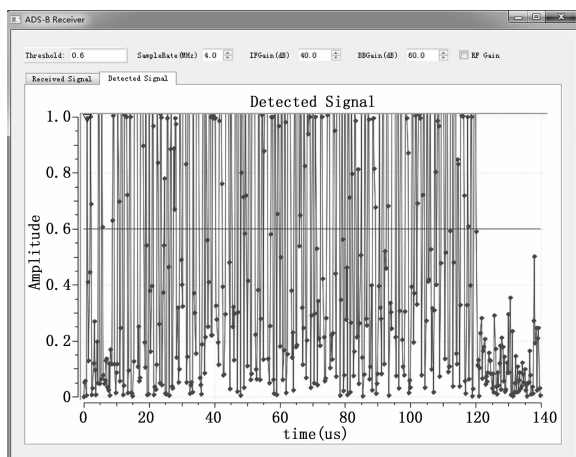


图 11 ADS-B 接收机界面

数据, 且每一位都对应一个置信度值。如图 12 所示为某条报文部分位的置信度分析结果。

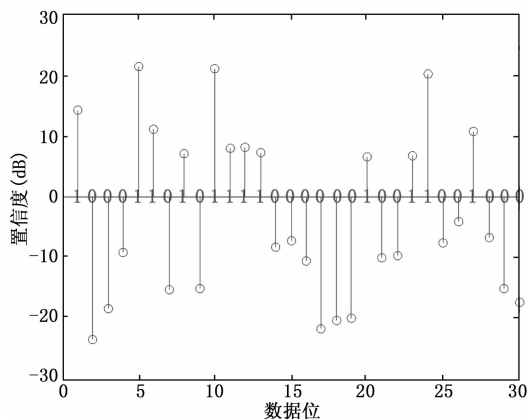


图 12 置信度分析

从图 12 可以看出, 若置信度数值为正, 则该数据位为 1, 反之为 0, 且置信度数值的绝对值越大, 置信度越高。

ADS-B 发射机发射功率大小可以通过调整中频增益实现, 经过测试, ADS-B 接收机接收灵敏度为 -68 dBm。利用 ADS-B 发射机发射 ADS-B 消息共 27 131 条, 当信噪比为 16 dB 时, 经过多次实验, CRC 校验成功的报文数目均值为 24 181, 正确检测率约为 89%。

ADS-B Decoder 模块将解码结果通过网络分发至指定服务器。服务器将接收到的 ADS-B 航迹信息实时整理成 JSON 格式数据, 供百度地图访问并显示, 如图 13 为基于百度地图实时显示的部分航班:

经过对比分析, 图 13 中所示航班信息与历史航迹文件中信息一致, 进一步验证了收发系统的可行性。

4 结束语

为设计廉价、功能易扩展的 ADS-B 收发系统, 本文将 ADS-B 信号收发处理过程中信号生成、前导脉冲检测以及报文编解码等核心功能在 GNU Radio 平台中以自定义



图 13 ADS-B 信息动态显示

模块方式实现, 并根据 ADS-B 信号处理流程搭建信号流程图, 使用 HackRF 实现了 ADS-B 信号的发射与接收。所设计系统不仅方便存储、显示各阶段信号数据, 还可以将解码得到的航班信息传送至百度地图中进行动态显示。系统中核心模块具有开放性, 利于开展创新性项目研究, 例如, 通过更新本系统中前导脉冲检测模块算法, 可以进一步开展 ADS-B 微弱信号检测等方面研究。另外, 由于本系统具有 ADS-B 信号发射功能, 在开展 ADS-B 信号防欺骗、信号到达方向估计等研究时, 可以以本系统作为特定的 ADS-B 信号源, 具有重要的科研价值。

参考文献:

- [1] 冯正霖. 以新发展理念为引领 推进民航高质量发展 [J]. 民航管理, 2019 (1): 6-16.
- [2] Manesh M R, Kaabouch N. Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2017, 19: 16-31.
- [3] 李佳芯, 王伟, 高勇. 一种小波变换下的 ADS-B 信号增强算法 [J]. 电讯技术, 2019, 59 (11): 1312-1318.
- [4] Muslimin J, Asnawi A L, Ismail A F, et al. SDR-based transceiver of digital communication system using USRP and GNU Radio [A]. 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering [C]. Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 449-453.
- [5] 张迪, 韩爽. 基于软件无线电平台的中频信号处理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 220-223.
- [6] 张云, 崔晓伟, 笄腾飞, 等. 基于软件无线电的 GNSS 干扰和多径监测系统 [J]. 电讯技术, 2017, 57 (3): 288-295.
- [7] Xu Weiwei, Wu Jun, Gong Xiaonian, et al. Indoor localization design and implementation based on software defined radio [A]. 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology [C]. Chongqing: IEEE, 2018: 701-705.
- [8] 郭敏, 庄信武, 王向东, 等. 基于软件无线电架构的手持式频谱仪硬件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 296-299.
- [9] 金伟正, 赵小月, 肖云, 等. 基于 GNU Radio 的频谱分析

仪设计 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38 (1): 86-90.

- [10] 周新发, 张开锋. 基于软件无线电的 ADS-B 接收机设计与实现 [J]. 信息化研究, 2019, 45 (6): 67-70.
- [11] Piracci E G, Galati G, Pagnini M. ADS-B signals reception: A software defined radio approach [A]. 2014 IEEE Metrology for Aerospace [C]. Benevento; IEEE, 2014; 543-548.
- [12] Su Xiangjun, Li Jingui, Zeng Jing, et al. SDR reception and analysis of civil aviation ADS-B signals [A]. 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization [C]. Chongqing; IEEE, 2018; 893-896.
- [13] Fauret B L, Tajan R, Ferre G. ADS-B transmitter/receiver simulation to decode real aircraft trajectories with software defined radios [A]. 2019 29th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information En-

gineering [C]. Ruse; IEEE, 2019; 1-6.

- [14] Luo Jun, Chai Senchun, Wang Yu, et al. A maritime radio communication system based on GNU Radio _ HackRF platform and GMSK modulation [A]. 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology [C]. Chongqing; IEEE, 2018; 711-715.
- [15] Oshea T J, Karra K. GNU Radio signal processing models for dynamic multi-user burst modems [J]. arXiv preprint arXiv: 1604.08397, 2016.
- [16] RTCA. DO-260B (2009) Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance - broadcast (ADS-B) and traffic information services - broadcast (TIS-B) [S]. Washington DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2009.

(上接第 259 页)

同难度等级、不同应用场景、不同综合程度的综合应用项目, 提升跨学科的综合应用能力。同时, 学生可自主进行不同模块与核心控制板之间的有效组合, 搭建自己感兴趣的综合应用项目, 提升自主创新设计能力。

基于嵌入式系统 STM32 的“模块化”电子技术综合创新平台在设计完成后, 在湖南铁道职业技术学院的应用电子技术专业、电子信息工程技术专业的 2018 级、2019 级的学生中进行了推广和应用, 学生在《传感器技术应用》、《嵌入式技术应用》等专业课程的学习过程中, 在基于嵌入式系统 STM32 的“模块化”电子技术综合创新平台上按照课程教学计划完成相应的实验实训项目, 也可以在自主该平台上进行拓展性实验实训项目的设计、搭建和验证。通过近 3 年的实施发现, 学生的自主学习能力、专业知识的综合应用能力、创新能力明显提升。学生在专业技能竞赛中屡创佳绩, 在全国电子设计大赛中获得国家一等奖 2 项、省级一等奖 4 项; 在全国职业院校技能竞赛中, 获电子设计与制作赛项全国一等奖 1 项, 在其他赛项的比赛中累计获得省级以上奖励 20 余项。

6 结束语

基于嵌入式系统 STM32 的“模块化”电子技术综合创新实训平台实现了如下创新: 1) 实现了“积木式”功能模块电路设计。通过“积木式”功能模块电路设计使得学生可以通过“搭积木”的方式构建实际的应用项目, 从而提高学生的创新能力和专业复合能力。2) 将“口袋实验室”的理念融入到嵌入式系统 STM32 核心控制板设计, 实现了核心控制板接口与“积木式”功能模块电路接口标准化, 为学生随时随地学习提供方便。3) 将程序进行“模块化”设计。为满足大学教学简洁、易懂、强化实践性的要求, 针对高职学生这一普遍遇到的难题, 我们将“积木式”功能模块对应的程序代码进行统一标准的封装, 实现程序“模块化”。学生在项目实施过程中, 只需要编写主程序, 然后基于应用层流程去调用相应的子程序模块^[1]。

参考文献:

- [1] 崔元梅, 李元熙, 杨国华. 嵌入式实训教学设备的研制与教学改革 [J]. 实验室研究与探索, 2017 (9): 66-69.
- [2] 李彦君. 基于 USB 接口的嵌入式数据存储系统设计 [J]. 科技传播, 2011 (11): 183-185.
- [3] 刘琪. 基于 FPGA 的多路信号源研究与实现 [D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- [4] 仲启秀. 基于 STM32 液压式悬挂犁耕深自动控制装置与系统设计 [J]. 科技通报, 2019 (5): 179-182.
- [5] 曹景胜, 石晶, 王冬霞, 等. 基于 STM32 的车辆工程专业实验用示波器设计 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2019 (2): 27-30.
- [6] 邹小航, 张心怡, 李刚. 基于 STM32 单片机的函数信号发生器 [J]. 电子制作, 2019 (9): 15-17.
- [7] 党方, 魏晋宏. 基于 STM32 无线距离监测系统的设计研究 [J]. 煤炭技术, 2015 (5): 168-170.
- [8] 尹强, 丁圆, 任晓丹, 等. 基于 STM32 的充电机管理单元的设计与应用 [J]. 电子测量技术, 2019 (7): 94-99.
- [9] 谢桂辉, 郑旭初, 赵天明. 基于 STM32 和 FPGA 的远程宽带幅频特性测试系统 [J]. 现代电子技术, 2019 (9): 132-136.
- [10] 颜杰, 秦飞舟, 袁延. 基于 STM32 的智能灭火小车设计 [J]. 电子测试技术, 2019 (7): 89-93.
- [11] 弓志红, 郑雅伟. 高校嵌入式单片机低成本便携实训平台的设计 [J]. 山西电子技术, 2017 (3): 16-19.
- [12] 高同辉, 刘东晓. 智能家居实训平台开发与应用 [J]. 实验技术与管理, 2015 (7): 167-171.
- [13] 谢永超, 杨利, 严俊. 基于嵌入式系统 STM32 的超声波介质传输速度测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019 (12): 20-23.
- [14] 巩攀, 李立伟. 基于 STM32F105 和 LTC6804 的电池管理系统设计 [J]. 制造业自动化, 2020 (2): 4-8.
- [15] 王秋云, 汪文, 徐嘉琦, 等. 基于 STM32 的步进电机驱动控制器设计 [J]. 山西电子技术, 2020 (1): 7-9.
- [16] 聂宵, 徐广平, 房孝俊. 基于 STM32 的高精度温度控制系统设计 [J]. 激光与红外, 2020 (1): 107-110.