

The Research and Implement of ADS-B Response Signal Processing Platform Based on RTL-SDR

Jincheng Yan, Yunfeng Wang*

Department of Computer Science and Technology, Sichuan University, Chengdu Sichuan
Email: yfwang@scu.edu.cn

Received: Mar. 6th, 2019; accepted: Mar. 17th, 2019; published: Mar. 27th, 2019

Abstract

By studying on ADS-B (Automatic dependent surveillance-broadcast) response signal based on the 1090ES data link, this paper implements a ADS-B response signal processing platform with C++ language in Windows environment under the device supports of RTL-SDR and PC. The platform can successfully receive and parse ADS-B response signals, which proves the possibility with software radio ways under low cost.

Keywords

ADS-B, Soft Defined Radio, RTL-SDR, Signal Processing

基于RTL-SDR的ADS-B应答信号处理平台的研究与实现

严金承, 王运锋*

四川大学计算机学院, 四川 成都
Email: yfwang@scu.edu.cn

收稿日期: 2019年3月6日; 录用日期: 2019年3月17日; 发布日期: 2019年3月27日

摘要

通过对1090ES数据链ADS-B (Automatic dependent surveillance-broadcast, 广播式自动相关监视系统) 的应答信号进行研究, 本文在Windows环境下, 基于RTL-SDR和PC的设备支持, 实现了一个基于C++语言的ADS-B应答信号处理平台。该平台能够成功接收并解析ADS-B应答信号, 证明了在低成本软件无线电方式下的可能性。

文章引用: 严金承, 王运锋. 基于 RTL-SDR 的 ADS-B 应答信号处理平台的研究与实现[J]. 图像与信号处理, 2019, 8(2): 29-35. DOI: [10.12677/jisp.2019.82005](https://doi.org/10.12677/jisp.2019.82005)

统)应答信号的研究,使用软件无线电的处理方法,在RTL-SDR及PC硬件设备的支持下,用C++语言在windows平台下实现了基于RTL-SDR的ADS-B应答信号处理平台。该平台能成功接收并解析1090ES数据链ADS-B应答信号,证明了低成本下用软件无线电方法接收并处理ADS-B应答信号的可行性。

关键词

ADS-B, 软件无线电, RTL-SDR, 信号处理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. ADS-B 应答信号处理器现状

目前,结合现代成熟的电子技术,考虑到 ADS-B 应答处理器数据量大,处理速度要求高的情况,不少学者基于 FPGA + DSP 研究了 ADS-B 应答信号的软件无线电处理方案。通过 FPGA 进行预处理,完成报头检测及时序匹配,将通过功率一致性检测、时序测试和 DF 认证的可靠信号异步传送到 DSP,在 DSP 中进行对数据报文的译码和解析工作。论文[1] [2] [3]对这种架构的应答处理器作了深入的研究。这种应答处理器性能较好,实时性强,但造价较贵,本文提出的基于 RTL-SDR 的 ADS-B 应答处理平台也是一种软件无线电处理方法,实现成本极低,利用该处理平台,还能实现论文[4]提出的基于 RTL-SDR 的空中交通监视系统构想。

2. RTL-SDR 技术介绍

RTL-SDR 是一种低成本的小型软件无线电处理平台,由 R820T 调谐器和 R2832U 芯片组成。它可接收 25 MHz 至 1.75 GHz 范围内的射频信号,支持的最大采样率为 2.8 MHz。通过模拟电路,RTL-SDR 把射频信号降到中频,然后经过模数转换,用数字信号处理的方式将中频信号搬到基带,这实际上是一种超外差式数字中频接收机[5] [6]。为进一步降低后续软件部分对信号的处理压力,减少处理信号量,RTL-SDR 对基带信号进行数字抽取,使其采样频率降低在 2.8 MHz 以下,从 USB 输出 8 位基带 IQ 信号,对于该基带信号,可以使用编写软件的方法在 PC 中对其进行处理,RTL-SDR 的结构如图 1。

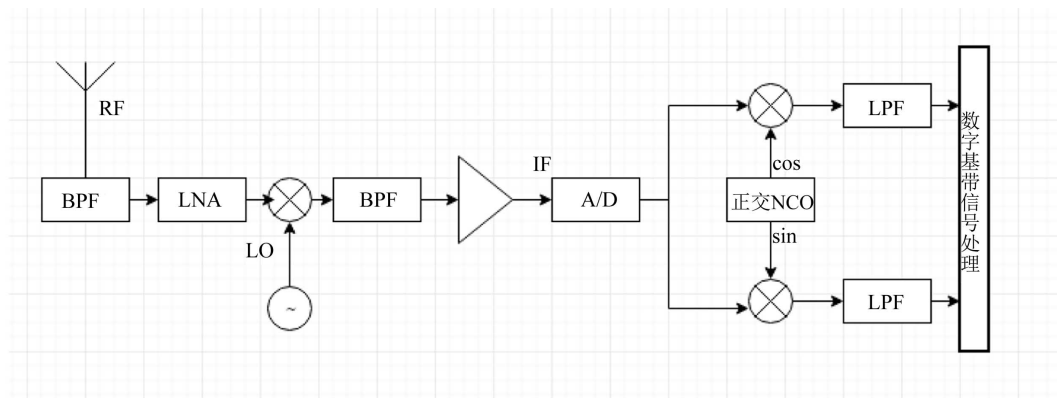


Figure 1. The structure of RTL-SDR

图 1. RTL-SDR 结构

3. 基于 RTL-SDR 的 ADS-B 应答信号处理程序设计

RTL-SDR 输出的 IQ 两路信号共 16 bit, 即一个样本点为 2B。利用开源的 RTL-SDR 驱动提供的 API 初始化 RTL-SDR 设备, 设定采样率为 2 MHz, 数据缓存块大小为 256 KB, 则输入一个完整的数据块需要 64 ms, 采用异步读取的方式, 使程序在 64 ms 内完成对数据块的处理, 可保证信号处理的实时性, 具体的程序设计如图 2。

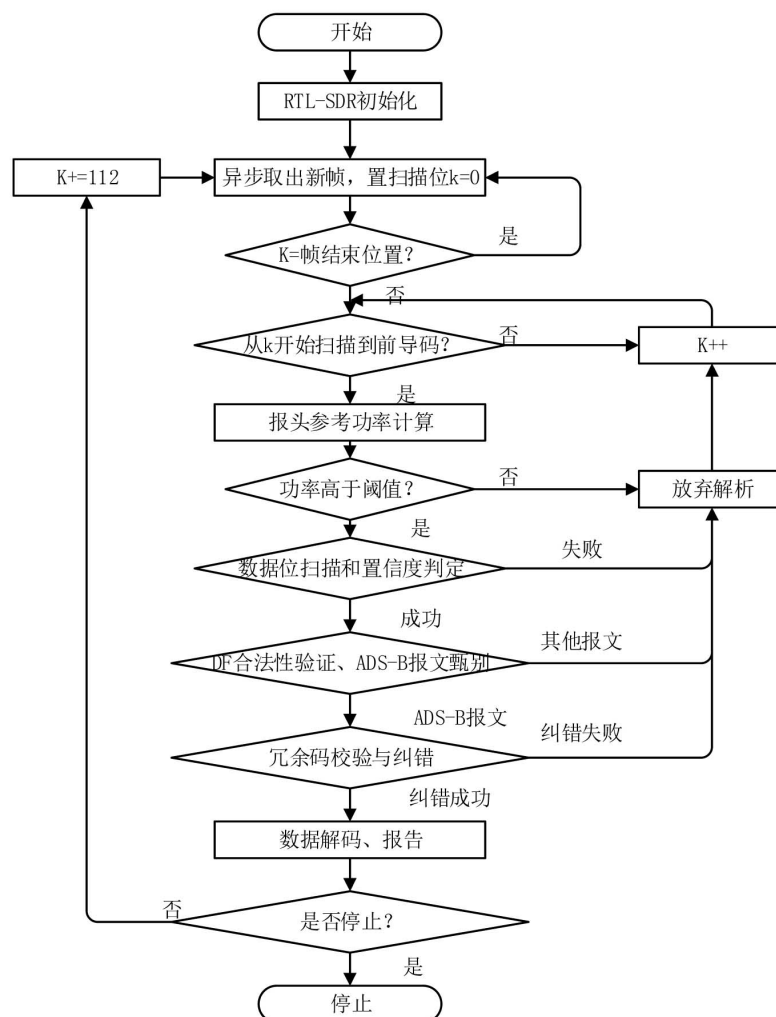


Figure 2. Design of ADS-B response signal processing program based on RTL-SDR
图 2. 基于 RTL-SDR 的 ADS-B 应答信号处理程序设计

3.1. 前导码检测

前导码检测是 1090ES 数据链 ADS-B 应答信号处理的重要算法, 由于对数据部分的纠错和解码需花费较长的时间, 故要保证检测到的前导码的可靠性。该算法的输入为 RTL-SDR 传来的基带数据, 输出包括信号到达时间与参考功率。文献[7] [8] [9]给出的前导码检测算法有九个环节, 包括视频信号预处理、有效脉冲位置和上下沿提取、报头脉冲检测、参考功率值计算、交叠测试、功率一致性测试、DF 验证、再触发。但是该方法适用于采样率较高的情况, 对于 RTL-SDR 设备, 输出给处理平台的采样率最高为 2.8 MHz, 故需要设计适于该情况下的前导码检测算法。

本文设定 RTL-SDR 输出的 IQ 基带信号采样率为 2 MHz, 对应时钟分辨率为 0.5 μs。利用式(1)计算出第 i 采样点的样本功率 S_i , 作为前导码检测算法的输入, 其中 I_i, Q_i 为第 i 采样点的 IQ 采样值。

$$S_i = \sqrt{I_i^2 + Q_i^2} \quad (1)$$

3.1.1. 前导码脉冲位置检测及开始位置确定

采用脉冲位置的检测方法, 输入的采样序列由 $\{S_i\}$ 表示, 其中 $i=0,1,2,\dots$, 由 2.1 节提到的 S 应答信号格式, 脉冲位置应出现在第 0, 第 2, 第 7, 第 9 采样点。即: 假设当前已遍历到第 k 采样点, 有条件:

$$\begin{aligned} S_k &> S_{k+1}, \\ S_{k+1} &< S_{k+2}, \\ S_{k+2} &> S_{k+3}, \\ S_{k+3} &< S_{k+4}, \\ S_{k+6} &< S_{k+7}, \\ S_{k+7} &> S_{k+8}, \\ S_{k+8} &< S_{k+9}, \\ S_{k+9} &> S_{k+10} \end{aligned} \quad (2)$$

对于前导码中的低功率采样点(第 4、第 5、第 11、第 12、第 13、第 14)应保证其功率不超过某一阈值, 可设为脉冲平均功率的 1/3。即:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= (S_k + S_{k+2} + S_{k+7} + S_{k+9})/4 \\ S_{k+i} &< \frac{\bar{S}}{3}, i=4,5,11,12,13,14 \end{aligned} \quad (3)$$

若同时满足条件(2)、(3), 则可将采样点 k 作为前导码开始位置的候选采样点。

3.1.2. 参考功率计算

由于每个脉冲只包含一个采样点(时钟分辨率为 0.5 μs), 故直接求得脉冲平均功率 $\bar{S} = (S_k + S_{k+2} + S_{k+7} + S_{k+9})/4$ 作为参考功率, 表征接收信号的强度, 若信号强度小于某一阈值 Q , 则视为微弱信号, 不作解码。 Q 的取值可凭经验调节, 但应该大于噪声功率, 小的 Q 值具有高的灵敏检测度, 但易造成虚警, 太大的 Q 值易造成漏警。

3.2. 数据块扫描

3.2.1. 数据位和置信度判定

文献[10]采用了多点振幅采样算法、改进的基线多样点技术等, 对数据位和置信度有较为准确的判定。同样地, 上述方法适用于高采样率, 对于 2 MHz 采样率可直接判断数据位两个码片的相对大小, 则数据位 C_i 、置信度 B_i 由(4)、(5)式计算:

$$C_i = \begin{cases} 1, S_{k+16+2xi} \geq S_{k+16+2xi+1} \\ 0, S_{k+16+2xi} < S_{k+16+2xi+1} \end{cases} \quad (4)$$

$$B_i = \begin{cases} 1, S_{k+16+2xi} \neq S_{k+16+2xi+1} \\ 0, S_{k+16+2xi} = S_{k+16+2xi+1} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $i=0,1,2,\dots,55\cdots,111$, 置信度为 1 时表示置信度高, 0 表示置信度低, 该参数将用于纠错步骤。为减小纠错步骤压力, 采用边扫描边判定的方式, 同时统计低置信度数据位的数量, 若扫描到某一位时低

置信度数量大于门限, 且确认的数据位位数小于 112 位, 则停止扫描, 认为该报文置信度太低不可继续解析, 应从 $k + 1$ 的位置寻找新的前导码。若此时确认的数据位数大于 56 位, 则认为该报文为短格式报文, 短报文格式报文一定不是 ADS-B 报文, 故可抛弃, 否则顺利扫描完 112 个数据位, 利用 DF 来甄别是 ADS-B 报文或 S 模式报文。

3.2.2. DF 合法性验证与 ADS-B 报文甄别

1090ES 数据链的 ADS-B 信号格式如表 1 所示[11], 其中, DF = 17 格式为 S 模式应答机发射的 ADS-B 消息; DF = 18 为非 S 模式应答机发射的 ADS-B 消息或 TIS-B 消息; DF = 19 位军方保留格式, 本程序不作处理, 可直接丢弃。

Table 1. The format of 1090ES data link ADS-B signal

表 1. 1090ES 数据链 ADS-B 信号格式

位(比特)	1~5	6~8	9~32	33~88	89~112
DF = 17	DF = 10,001	CA	AA	ADS-B 消息	PI
字段名字		应答能力	ICAO 地址	ME 字段	
DF = 18	DF = 10,010	CF	AA	ADS-B 消息	PI
字段名字			ICAO 地址	ME 字段	
DF = 19	DF = 100,011	AF = 000	AA	ADS-B 消息	PI
字段名字			ICAO 地址	ME 字段	

在文献[12]的基础上, 本程序改进了甄别算法, 采用边扫描, 边纠正, 边甄别的方法。即扫描到足够甄别的数据位时立即甄别, 若甄别出非 ADS-B 报文, 则丢弃报文, 不作解码, 以加快处理速度, 具体方法如下:

当完成数据位前 5 位的数据位和置信度判定时, 即可进行 DF 合法性验证。若数据位第一位为 0, 且置信度低, 则应该将其纠正为 1, 或者数据位第一位本身为 1, 以确保符合长格式报文的 DF, 否则, 丢弃报文。由 ADS-B 模式应答信号可知, 当 DF = 17/18/19 时, 该报文为可能的 ADS-B 报文。若扫描到的 DF 不等于上述的值, 且数据位第 2 位至第 5 位有低置信度位, 则对置信度低的位取反, 再检查其合法性。若还不合法则停止扫描, 丢弃该报文, 从 $k + 1$ 处重新发现前导码, 否则顺利通过 DF 合法检测, 继续扫描数据块。同样, 当 DF = 18 时, 扫描到第 6 至第 8 位时, 即可根据 CF 甄别 ME 字段是否含有 ADS-B 消息。若 CF = 0, 表示含有。

3.3. 循环冗余校验

S 模式采用 24 位循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)进行检错, 本身不提供纠错功能, 但是基于置信度, CRC 拥有一定的纠错功能。采用蛮力纠错技术和保守纠错技术结合的方式可以最多纠错 12 位数据, 但此时要求出错数据的窗口大小不超过 24 [13]。

3.4. 解码

经过上述处理, 得到 ADS-B 模式应答信号的二进制序列。文献[14] [15]详细描述了 ADS-B 消息提取及 CPR (紧凑位置报告)的解码方法, 本处理程序引用了该方法, 在此不再赘述。

4. 平台实现与处理报告分析

在 Microsoft Visual Studio 2010 集成环境中, 依赖开源的 RTL-SDR 驱动, 利用 C++实现信号处理程序, 部署在 PC 机上, 图 3 展示了接收平台的实际结构。

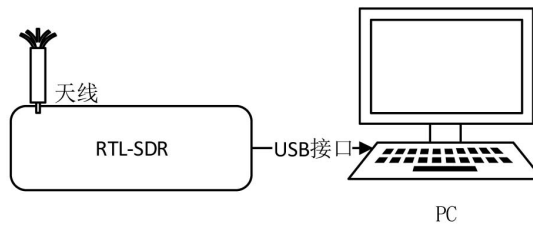


Figure 3. The structure of receive platform
图 3. 接收平台结构

设定 RTL-SDR 中心频率为 1090 MHz, 输出采样率 2 MHz, 射频增益 49.6 db, 利用该平台接收处理 ADS-B 信号的情况如表 2。其中, CRC 正确比例为解析后通过冗余检错纠错的 ADS-B 报文与接收到的所有 ADS-B 报文的比值, ADS-B 报文的接收数量由上述的甄别环节得出。

Table 2. The processing results
表 2. 平台接收处理报告

编号	地点	地点特征	持续时间	CRC 通过率	稳定航迹数量
1	四川大学田径场	开阔地带	15 min	50.48%	13
2	四川大学田径场	开阔地带	30 min	51.36%	20
3	成都市中心街区	建筑密集地	15 min	12.31%	3
4	成都市中心街区	建筑密集地	30 min	10.72%	5
5	双流机场附近	机场开阔地带	15 min	42.43%	34
6	双流机场附近	机场开阔地带	30 min	45.01%	46

实验表明, 在大建筑密集场所, CRC 正确比例陡然降低, 且形成的稳定航迹不多, 这是因为本程序没有过多的考虑多径情形下的报文解析。在机场开阔地带, 由于报文密集, 本程序也没有过多的考虑交叠情形下的报文解析, 导致 CRC 正确比例略有降低。总之, 该平台能够接收并正确处理 ADS-B 报文, 形成稳定航迹, 证明了低成本的软件无线电方法接收处理 ADS-B 应答信号是可行的。

5. 总结

本文详细描述了基于 RTL-SDR 的 ADS-B 信号处理平台的实现, 该平台实现成本极低, 能成功接收处理该应答信号, 可作为相关领域研究的验证系统。1090ES 数据链的 ADS-B 信号处理复杂, 由于 RTL-SDR 提供的采样率有限, 文中给出的算法为了保证解码性能, 没有对多径和交叠情形下报文进行过多的处理, 导致复杂环境下 CRC 正确比例不高。另外天线是影响解码性能的重要因素, 后续还需继续研究改良。

基金项目

四川省科技计划项目资助(2018GZ0070)。

参考文献

- [1] 吴凯峰, 宋东, 刘柏兵, 等. 飞机自动相关监视信号接收系统设计[J]. 传感器与微系统, 2018(9): 105.
- [2] 李耀. S 模式 ADS-B 接收机解码板的研究及实现[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [3] 陈士毅. 模式 S 应答处理中的数据处理的[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- [4] 王伟玮, 涂樵. 基于 ADS-B 和 RTL-SDR 的空中交通监视系统[J]. 微型机与应用, 2016, 35(17): 80-83.

-
- [5] Stewart, R.W. (2015) Software Defined Radio Using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde Glasgow, Scotland.
- [6] 陈祝明. 软件无线电技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [7] 吴杰, 郭建华, 蒋凯, 等. ADS-B 二重交织信号时域分离算法[J]. 通信技术, 2017(10): 2184.
- [8] 张涛, 唐小明, 宋洪良. 一种 ADS-B 报头互相关检测方法[J]. 电讯技术, 2016(2): 156.
- [9] 郑植, 练马林. 模式 S 应答处理中报头检测算法的研究与实现[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 66-70.
- [10] 王菲. 基于 1090MHz ES 数据链 ADS-B 关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [11] 张尉. 空管二次雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [12] 李明洋, 时宏伟. 二次雷达 S 模式应答信号与 ADS-B 信号的甄别研究[J]. 微型机与应用, 2015, 34(20): 67-69.
- [13] 郭焘, 田忠. ADS-B 系统接收处理的关键算法研究与实现[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3): 43-51.
- [14] 张鹏, 何光亮. 1090ES 关键信息解码算法优化及实现[J]. 现代电子技术, 2018(3): 30.
- [15] 王尔申, 翟秋刚, 李玉峰, 等. 应用 Qt 的 ADS-B 报文解析研究与实现[J]. 电光与控制, 2018(4): 69.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-6753, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jisp@hanspub.org