

文章编号: 2095-4980(2021)01-0038-04

## 广播式自动相关监视信号接收系统设计

查浩然<sup>1</sup>, 张召悦<sup>2</sup>, 林云<sup>1</sup>

(1.哈尔滨工程大学 先进船舶通信与信息技术工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
2.中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要:** 针对低成本、高性能的广播式自动相关监视(ADS-B)系统的设计需求, 研究了ADS-B信号接收技术。基于软件无线电技术, 设计了基于1090ES模式的ADS-B信号软件接收机; 利用廉价的软件无线电平台(RTL-SDR)及Matlab, 对设计进行了验证, 实现对民航航班ADS-B信号的实际接收。相对于传统的ADS-B接收机, 结构简单, 灵活性高, 提高了开发效率。

**关键词:** 广播式自动相关监视; 软件无线电平台(RTL-SDR); 软件无线电

中图分类号: TN914.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019290

## Design of Automatic Dependent Surveillance–Broadcast signal receiving system

ZHA Haoran<sup>1</sup>, ZHANG Zhaoyue<sup>2</sup>, LIN Yun<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Advanced Ship Communication and Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin Helongjiang 150001, China;  
2.College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjing 300300, China)

**Abstract:** Automatic Dependent Surveillance–Broadcast(ADS–B) signal receiver technology is studied for the design requirements of low-cost, high-performance ADS–B system. The ADS–B signal software receiver based on 1090ES mode is designed based on software radio technology. The design is verified with RTL–Software Defined Radio(SDR) and Matlab, realizing the actual reception of ADS–B signal for civil aviation flights. Compared with the traditional ADS–B receiver, it has the advantages of simple structure, high flexibility and high development efficiency.

**Keywords:** Automatic Dependent Surveillance–Broadcast; RTL–Software Defined Radio; software defined radio

广播式自动相关监视(ADS-B)是一种全新的监视技术, 飞行器通过卫星导航确定位置, 并且周期性地广播, 使飞行器能够被追踪。对于空中交通管制(Air Traffic Control, ATC)地面站, ADS-B 未来将替代二次监视雷达。由于不需要地面的询问信号, ADS-B 还可以被其他飞机接收, 用来提高情景感知力以及应用在交通协调系统上。ADS-B 是“自动的”, 因为它不需要飞行员以及额外输入; ADS-B 是“相关的”, 因为它需要来自飞行器导航系统以及其他系统采集的数据。传统的硬件接收机大多采用专用集成电路, 可扩展性差, 算法无法升级, 产品更新换代时间长。随着软件无线电的产生与技术的不断发展, 软件无线电接收机逐步取代传统接收机, 用于多种信号的接收设计。接收机将数字信号处理模块通过软件处理, 最大限度地提高接收机的灵活性。本文设计的 ADS-B 接收机, 确定软件无线电的射频前端结构与数字下变频结构, 对数字下变频参数进行分析, 设计并实现了相应的 ADS-B 消息解析模块。为证明设计的 ADS-B 接收机可行性, 利用廉价的软件无线电平台 RTL-SDR 及 Matlab 上的 DSP 工具箱对设计进行验证, 接收实际的 ADS-B 信号, 验证结果证明了设计的 ADS-B 接收机系统的可行性。

### 1 ADS-B 信号接收模型

1090ES(1 090 MHz 扩展报文数据链)工作频率为 1 090 MHz。信号由 2 部分组成, 见图 1, 分别是 8  $\mu$ s 的前

收稿日期: 2019-08-14; 修回日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(61771154); 中央高校基本科研业务费资助(3072020CF0813)

作者简介: 查浩然(1996-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为软件无线电技术。email:zhahaoran@hrbeu.edu.cn

导报头脉冲和 112 μs 数据信息位脉冲，其中数据位采用脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 编码<sup>[1-2]</sup>。报头处共有 4 个脉冲，脉冲的宽度是 0.5 μs，在实际接收过程中，正负不超过 0.05 μs，4 个脉冲的位置固定，间隔为 1.0 μs, 3.0 μs, 4.5 μs。设计的 ADS-B 接收机分为硬件部分和软件部分，其接收系统架构见图 2。

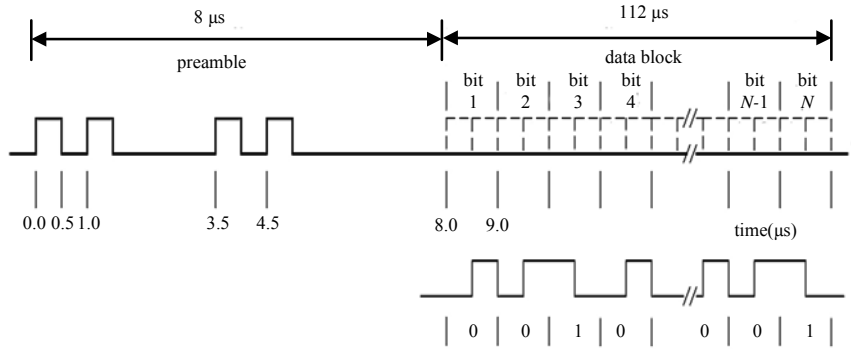


Fig.1 ADS-B signal format  
图 1 ADS-B 信号格式

## 2 硬件方案

### 2.1 接收机射频前端方案

接收机射频前端采用图 3 所示的低复杂度的低中频结构，天线接收到含有 ADS-B 信号的射频信号后，经过低噪放大器对接收的信号进行放大，再通过 RF 镜像滤波器，滤除不必要的镜像信号，然后对信号进行混频<sup>[3-4]</sup>。初始信号为：

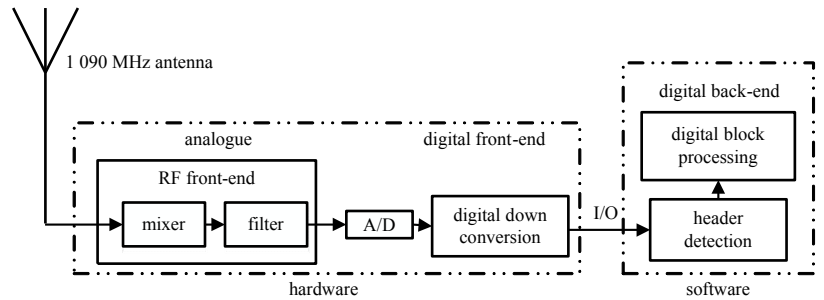


Fig.2 Framework of receiving system  
图 2 接收系统框架

$$e_{\text{adbs}}(t) = s(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_0), \quad s(t) = \sum_m a_m g(t - mT_a) \quad (1)$$

式中： $s(t)$ 为基带码元； $a_m$ 为 ADS-B 基带信号； $T_a$ 为码片持续时间； $g(t)$ 为一定宽度的矩形脉冲； $m$ 为码元数目； $\varphi_0$ 为初始相位； $f_c$ 为射频。压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)产生正弦波的频率为  $f_{i0} = f_c - f_{if}$ ， $f_{if}$ 为中频，射频信号与 VCO 产生的正弦波混频为：

$$e_{\text{adbs,mix}}(t) = s(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) \cos(2\pi f_{i0} t) = \frac{s(t)}{2} \cos\{[2\pi(f_c + f_{i0})t + \varphi_0] + \cos[2\pi(f_c - f_{i0})t + \varphi_0]\} \quad (2)$$

式 中 高 频 分 量 被 IF 低 通 滤 波 器 衰 减，只有中频分量向前传送到下一级：

$$e_{\text{adbs,if}}(t) = \frac{s(t)}{2} \cos(2\pi f_{if} t + \varphi_0) \quad (3)$$

再通过抗混叠滤波器送往 A/D 转换器进行数字化，实现第一次变频。

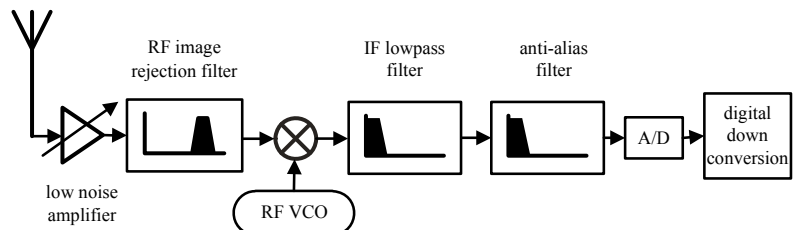


Fig.3 Low-IF RF front-end structure  
图 3 低中频射频前端结构

### 2.2 接收机通道数字前端方案

将中频信号降到基带信号，采样信号分别与数控振荡器产生的两路正交信号相乘，进行正交解调。为减少数据量便于处理和计算，对信号进行多速率接收处理，降低信号采样速率。为防止信号混叠，需对下采样的信号进行滤波，采用多速率处理系统中常用的级联积分梳状滤波器 (Cascaded Integrator Comb, CIC) 以及 FIR 滤波器<sup>[5-7]</sup>。数字下变频结构见图 4。

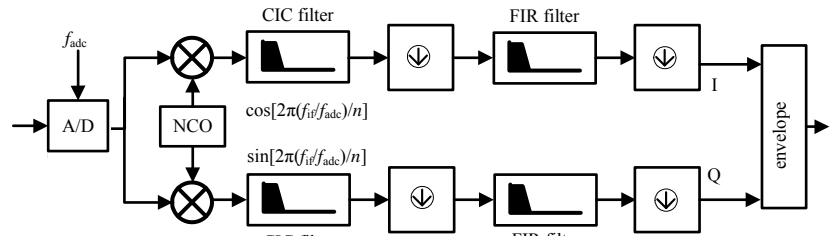


Fig.4 Digital down conversion structure  
图 4 数字下变频结构

对式(3)中  $e_{\text{adbs,if}}(t)$  以  $T_s = \frac{1}{f_{\text{adc}}}$  进行采样，得到采样后的数据为：

$$e_{\text{adbs,if}}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \cos(\omega_c n + \varphi_0) \quad (4)$$

式中  $\omega_c = 2\pi f_{if}/f_{adc}$ 。再将式(4)与数字控制振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)产生的  $\cos(\omega_c n)$  和  $\sin(\omega_c n)$  分别相乘, 得到同向分量和正交分量<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} e_{BI}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \cos(\omega_c n + \varphi_0) \cos(\omega_c n) \\ e_{BQ}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \cos(\omega_c n + \varphi_0) \sin(\omega_c n) \end{cases} \quad (5)$$

I 路和 Q 路再经过抽取滤波得到:  $z_{BI}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \cos(\varphi_0)$ ,  $z_{BQ}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \sin(\varphi_0)$ , 最后:  $a(n) = \sqrt{z_{BI}^2(n) + z_{BQ}^2(n)} = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a)$ , 得到基带码元信号。当由一些原因而造成 NCO 产生的载波与信号的载波之间存在不同时, 即产生偏差时, 同向的 I 路, 正交的 Q 路表示成:

$$z_{BI}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \cos[\Delta\omega(n) + \Delta\varphi(n)], \quad z_{BQ}(n) = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \sin[\Delta\omega(n) + \Delta\varphi(n)] \quad (6)$$

式中:  $\Delta\omega(n)$  和  $\Delta\varphi(n)$  分别表示信号与 NCO 的频偏和相偏,  $\Delta\omega(n) = \omega_c - \omega_{NCO}$ ,  $\Delta\varphi(n) = \varphi_0 - \varphi_{NCO}$ ,  $\omega_{NCO}$  为 NCO 的输出频率,  $\varphi_{NCO}$  为其输出初始相位, 再通过提取得:

$$a(n) = \sqrt{z_{BI}^2(n) + z_{BQ}^2(n)} = \sum_m a_m g(nT_s - mT_a) \quad (7)$$

从式(7)可以得出结论, 用正交解调算法解调 ADS-B 信号时, 可以不要载频严格同步。

### 3 软件处理模块

根据 1090ES ADS-B 信号的标准, ADS-B 接收系统软件处理模块可分为 2 大部分: 报头检测和数据位处理。

#### 3.1 报头检测

本文采取的是基于相关的报头检测算法<sup>[8-9]</sup>, 利用本地已知的报头与信号进行相关计算, 利用相关性找到正确报头所在位置, 设捕捉到的 ADS-B 信号为  $s_1(k)$ , 本地序列为  $s_2(k)$ , 则互相关后:

$$R_{s_1s_2}(\tau) = E[s_1(t)s_2(t-\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_1(t)s_2(t-\tau) dt \quad (8)$$

ADS-B 信号与噪声不相关, 因此  $R_{s_1n}(\tau) = 0$ 。如果互相关输出的值越大, 则信号和本地报头极为相似, 通过找到一定区间内的互相关输出的峰值, 可以找到报头的位置。

#### 3.2 数据位处理

在一个码元中把前码片命名为 chip0, 后码片命名为 chip1, 如果 chip0 为高脉冲, chip1 为低脉冲, 则这个码元为 1; 如果 chip0 为低脉冲, chip1 为高脉冲, 则这个码元为 0。对码片采样后, 采样点设为: chip0\_1, chip0\_2, chip0\_3, chip0\_4, chip0\_5, chip0\_6, chip1\_1, chip1\_2, chip1\_3, chip1\_4, chip1\_5, chip1\_6, 利用统计学思想, 充分利用这 12 个采样点的值, 对码片进行求和运算:

$$\begin{aligned} chip_{s_1} &= chip0_1 + chip0_2 + chip0_3 + chip0_4 + chip0_5 + chip0_6 \\ chip_{s_2} &= chip1_1 + chip1_2 + chip1_3 + chip1_4 + chip1_5 + chip1_6 \end{aligned}$$

比较  $chip_{s_1}$  和  $chip_{s_2}$ :  $T_{judge} = chip_{s_1} - chip_{s_2}$ 。如果  $T_{judge}$  大于 0, 这个码元为 1; 否则, 为 0。

将 112 位数据的前 5 位下行链路格式段(Downlink Format, DF)转换为 10 进制, 判断其是否等于 17, 合格后进行循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)校验, 再利用 CRC 校验码验证接收到的 ADS-B 信号的正确性<sup>[10-12]</sup>。按照 DO260B 标准, 对接收到合法的 ADS-B 信号进行信息位的报文解析<sup>[13]</sup>, 得到飞机的相关信息。

### 4 基于 RTL-SDR 与 Matlab 接收机实现

采用价格低廉的软件无线电 RTL-SDR 作为信号源, RTL-SDR 的型号为 RTL2838UHIDIR, 使用 Matlab 的内部函数 comm.SDRRTL Receiver 设置和接收信号, 测试时间

Aircraft ...	Flight ID	Latitude...	Longitude(°)	Altitude(ft)	Speed(...)	Heading(°)	Vertical Rate(ft/m...
4243B3	NWS2488	45.7251	126.5908	35100	464	67 (NE)	-128
78058A		45.7562	126.3904	1900	176	190 (S)	0
7802B2							
780F75	CSZ9760	45.8044	126.4658	2700	185	230 (SW)	-64
781250	DKH1815	45.7549	126.3948	1925	163	177 (S)	-448
780CA4	CES9688	45.7802	126.4157	2300	187	64 (NE)	-832
78063B	CDG4921	45.7195	126.5722	29100	430	67 (NE)	0
A64CDB	DAL188	45.9504	126.5058	35100	495	71 (E)	0

Fig.5 GUI interface display  
图 5 GUI 界面显示

100 s, Matlab 可视化结果见图 5。图 5 显示了 ICAO 码、飞机 ID、飞机纬度、经度、高度、飞机速度、飞机朝向和飞机垂直速度共 8 种民航飞机信息<sup>[14]</sup>。为验证接收信息的准确性, 利用天津凌智皓越航空科技有限公司的航空云软件, 查询飞机实时动态, 与接收到的飞机信息一致。

## 5 结论

介绍 ADS-B 接收机的具体设计与实现过程, 分析了接收机的相关理论, 并采用软件无线电平台 RTL-SDR 与 Matlab 对设计进行了验证, 实际接收数据表明了接收机的可行性。基于软件无线电的 ADS-B 接收机, 可以灵活地处理接收到的信号, 符合未来信号接收机的发展趋势, 具有广泛的应用前景与工程指导意义。

### 参考文献:

- [1] RTCA. DO-260A, minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B)[S]. 2002.
- [2] RTCA. DO-260B, minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B)[S]. 2006.
- [3] SCHONHOFF T A, GIORDANO A. 信号检测与估计[M]. 关欣, 杨爱萍, 白煜, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012. (SCHONHOFF T A, GIORDANO A. Signal detection and estimation[M]. Translated by GUAN Xin, YANG Aiping, BAI Yu. Beijing: Electronics Industry Press, 2012.)
- [4] 王菲. 基于 1 090 MHz ES 数据链 ADS-B 关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009. (WANG Fei. Research on key technologies of ADS-B based on 1090MHz ES data link[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [5] 张英. 基于阵列天线模型的雷达信号分离算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009. (ZHANG Ying. Research on radar signal separation algorithm based on array antenna model[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [6] 关中锋. 基于软件无线电的多功能射频综合一体化设计[J]. 通信技术, 2014, 47(11): 1333-1337. (GUAN Zhongfeng. Multi-functional integrated radio frequency design based on software radio[J]. Communication Technology, 2014, 47(11): 1333-1337.)
- [7] 刘晓斌. 基于模式 S 的 ADS-B 接收机系统算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011. (LIU Xiaobin. Research on ADS-B receiver system algorithm based on mode S[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [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, 56(2): 156-160. (ZHANG Tao, TANG Xiaoming, SONG Hongliang. A method of ADS-B header cross-correlation detection[J]. Telecommunication Technology, 2016, 56(2): 156-160.)
- [9] 叶永平. 一款基于软件无线电的多模接收机的设计[J]. 杭州电子科技大学学报, 2012, 32(3): 37-40. (YE Yongping. Design of a multimode receiver based on software radio[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2012, 32(3): 37-40.)
- [10] 陈士毅, 李玉柏. 基于置信度判定的循环冗余校验纠错技术[J]. 电讯技术, 2007(2): 3-4. (CHEN Shiyi, LI Yubai. Cyclic redundancy check error correction technology based on confidence level judgment[J]. Telecommunication Technology, 2007(2): 3-4.)
- [11] 郑超, 刘志刚, 王玉章. 基于 1090ES 的 ADS-BOUT 系统的设计与实现[J]. 航空维修与工程, 2010(1): 56-58. (ZHENG Chao, LIU Zhigang, WANG Yuzhang. Design and implementation of ADS-BOUT system based on 1090ES[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2010(1): 56-58.)
- [12] MONTEIRO M, BARRETO A B, KACEM T, et al. Detecting malicious ADS-B transmitters using a low-bandwidth sensor network[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Information Fusion. Washington, DC, USA: IEEE, 2015: 1696-1701.
- [13] ALMINDE L K, CHRISTIANSEN J, LAURSEN K K, et al. GomX-1: a nano-satellite mission to demonstrate improved situational awareness for air traffic control[C]// 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Alminde: [s.n.], 2012: 1-7.
- [14] 陈焱光. 精通 MATLAB GUI 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. (CHEN Yaoguang. Proficient in MATLAB GUI design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.)