

广播式自动相关监视系统研究与实现

张 玥, 李 珣, 李彦斌, 冯 智

(西安工程大学 电子信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance — Broadcast, ADS-B) 系统是通用航空监视的必备设备, 先前 ADS-B 技术长期被国外垄断, 设备价格昂贵且与我国现有的技术体系存在兼容问题, 为此设计了一套基于 FPGA 的小型 ADS-B 系统; 系统能够在 FPGA 中实现信号预处理、数据传输等功能, 上位机完成数据解算并实时显示解算结果, 通过外场试验对系统数据解算结果和精度进行分析与评价; 试验结果表明, 试验系统数据处理速度快、具有较少的错误解算率和较高的集成度, 符合 ADS-B 接收设备指标要求, 能够大幅降低通航成本。

关键词: ADS-B 系统; 广播; 数据解算; 信号处理

Research and Implementation of Automatic Dependent Surveillance — Broadcast System

Zhang Yue, Li Xun, Li Yanbin, Feng Zhi

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Automatic Dependent Surveillance — Broadcast (ADS-B) system is the necessary equipment for General Aviation Surveillance. The ADS-B technology has long been monopolized abroad. The equipment is very expensive and it has some compatible problem with the current technology system. Therefore a small integrated ADS-B system based on FPGA was designed in this paper. Signal pre-processing and data transmission were implemented in FPGA, and data decoding and displaying were done by personal computer in real time. The effectiveness and precision of the data decoding results were analyzed and evaluated by certain relevant tests, and shows that the system has a fast data processing speed, a high decoding accuracy and high integration, which satisfies the specification of receiving equipment and can greatly reduce the cost of navigation for general aviation.

Keywords: ADS-B system; broadcast; data decoding; signal processing

0 引言

ADS-B 系统是基于卫星定位和地/空、空/空数据链的航空运行监视设备^[1], 是通航监视的必备设备^[2-5]。对空中交通管制和安全保障起着重要作用, 是下一代航空运输系统通信协议的重要组成部分^[6-9]。作为现代空中交通管制的核心设备, 它对每年约 20 亿乘客的安全发挥着重要的保护作用^[10]。

我国民航将一次雷达和二次雷达作为地空监视的主要手段, 但并未覆盖全国范围, 尤其是西南地区和青藏高原地区^[11-12]。与一次雷达、二次雷达相比, ADS-B 系统监视能力强, 精度误差小^[13], 造价便宜, 结构简单, 这尤其体现在安装、运行和维护方面。一般一个 ADS-B 地面站的成本是雷达站的十分之一到五分之一, 能够实现小投资, 大范围的监视^[14]。

先前 ADS-B 技术长期被国外垄断, 设备价格昂贵且与我国现有的技术体系存在兼容问题^[15]。近些年我国对 ADS-B 技术进行了大量的研究, 现已研制出几种 ADS-B

发射和接收设备, 但大都还在试验阶段且技术尚不成熟, 解码算法、误差分析和精度提高算法仍在不断研究中^[16-19]。针对上述问题, 本文在分析 ADS-B 技术工作原理的基础上, 从减小体积、提高系统集成度、降低功耗和提高数据解算精度的角度出发, 设计一套基于 1090 MHz 数据链的 ADS-B 接收系统, 实现接收范围广, 解算精度高, 体积小, 造价低的目标。

1 ADS-B 系统工作原理

ADS-B 系统使用机载导航系统, 得到空域内飞机身份、速度、经纬度、高度等信息, 通过机载电子设备自动向空域内广播, 通常每 0.5 s 广播一次。ADS-B 广播信号采用 1090 MHz 的 S 模式信号, 消息数据格式采用脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 编码。信号由前导脉冲和数据脉冲组成, 其格式如图 1 所示: 前导脉冲总长为 8 μs , 包含 4 个脉冲, 起始时间分别为 0 μs 、1.0 μs 、3.5 μs 、4.5 μs , 每个脉冲持续的时间约为 0.5 \pm 0.05 μs , 当第四个脉冲结束 3.0 μs 后, 开始传输数据脉冲。

数据脉冲采用 112 位长报文格式, 112 个 1.0 μs 间隔被分派给每个 ADS-B 消息。如表 1 所示。

消息的前 5 个 bit 位是下行数据链格式 (Download Format, DF) 字段, 用于判断该条消息是否为 1090ES 数据链

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-07-16。

基金项目: 陕西省基础科学研究计划项目 (2016JQ5106)。

作者简介: 张 玥 (1990 -), 女, 河南三门峡人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事机载防撞系统及图像处理等方向的研究。

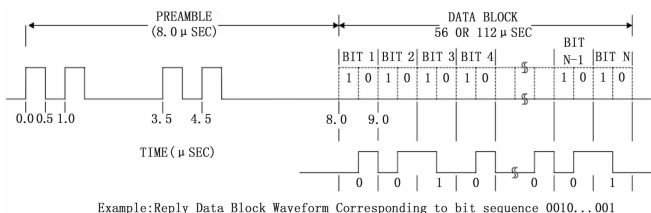


图 1 ADS-B 数据格式

表 1 ADS-B 消息内容

Bit	1-5	6-8	9-32	33-88	89-112
DF=17 字	DF 字段	CA 字段	AA 字段	ME 字段	PI 字段
段名称	[5]	[3]	[24]	[56]	[24]

信息。“CA” 字段用于报告基于 S 模式应答机的 ADS-B 发射能力 (本文只讨论 DF = 17, CA = 101 的消息格式)。“AA” 字段包含发射装置的地址, 每架飞机都有唯一的 ICAO 离散地址。“ME” 字段携带了 ADS-B 消息中大量数据, 包含了飞机空中位置、速度、身份等编码信息, 其中“ME” 字段的前 5 个 bit TYPE 字段决定了“ME” 字段剩余部分传送的消息类型, 如表 2 所示。“PI” 字段包含了 24 个 bit 奇偶校验位。

表 2 TYPE 字段含义对照表

TYPE	1-4	5-8	9-18\20-22	19	23-28/30	29	31
消息含义	飞机身份	地面位置	空中位置	空中速度	其他	目标状况	飞行状况

2 系统硬件电路组成

ADS-B 接收系统由 1090 MHz 接收电路、基于 FPGA 的控制电路以及上位机显示界面组成。系统整体设计方案如图 2 所示。

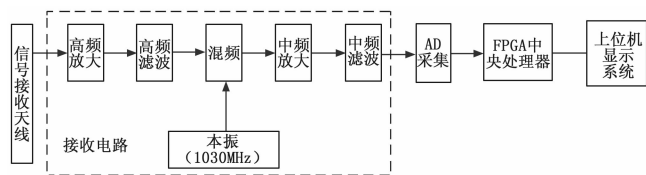


图 2 ADS-B 系统整体设计方案

1090 MHz 接收电路接收经过周围空域内飞机所发射出的信号并对接收信号进行滤波、放大、混频等一系列处理, 得到控制电路能够直接采集的中频信号。控制电路完成数据采集及信号预处理, 然后 PPM 解码得到 112 位基带信号并传至上位机。上位机进行数据解算并实时显示解算结果。

3 软件实现

ADS-B 系统软件实现可分为信号预处理、数据传输、数据解算、解算结果显示四部分。其中信号预处理包含数据采集、PPM 解码、CRC 校验三个模块, 该部分在 FPGA 中完成。数据解算包含飞机身份解算、速度信息解算、位

置信息解算三个模块, 该部分在上位机中实现。系统软件实现流程如图 3 所示。

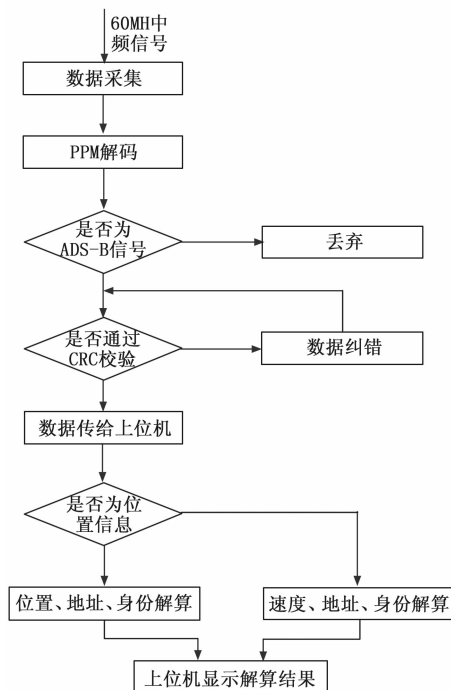


图 3 ADS-B 系统软件实现流程

3.1 信号预处理

3.1.1 数据采集

当接收机采用大于最高频率 2 倍以上的采样率对射频或中频信号进行采样时, 干扰信号会通过采样产生频谱混叠, 使得带外信号频谱混叠到有用信号频段内, 这将导致原始信号还原失真。当对信号进行欠采样时, 相当于对该信号与采样频率及各次谐波进行混频, 采样后的频谱被搬移到各个 Nyquist 区, 只要保证采样信号的带宽不大于 Nyquist 区的一半, 就不会发生有效信号的频谱混叠。为了避免出现混叠现象, 采样频率应满足式 (1), 同时也要保证采样频率大于 $2B$ 。

$$\frac{2f_c + B}{m + 1} \leq f_s \leq \frac{2f_c - B}{m} \quad (1)$$

式中, f_c, B, f_s, m 为信号中心频率、信号带宽、采样频率、重复周期。ADS-B 接收系统的中频信号为 60 MHz, 带宽为 2 MHz, 经计算确定系统采样频率为 50 MHz。

对信号进行欠采样, 减少了抽样点数目和后续数据处理工作量, 大大减轻了 FPGA 芯片对信号处理的负担, 同时降低了整个通信系统对 AD 器件和 FPGA 芯片的性能要求^[21], 使得实际系统采用普通芯片就能满足需求。

3.1.2 PPM 解码

由于接收到的 1090 MHz 信号会包括 A 模式、C 模式、A/C 模式等信号, 因此需要对接收到的信号进行前导脉冲识别检测, 若是 S 模式信号, 则继续处理信号; 若不是, 则丢弃。根据报头信息的特点以及 DO-260A^[22] 技术协议,

对信号报头的识别包括有效脉冲的位置及脉冲持续的时间两部分,即主要判断在 $0\ \mu\text{s}$ 、 $1.0\ \mu\text{s}$ 、 $3.5\ \mu\text{s}$ 、 $4.0\ \mu\text{s}$ 处是否有脉冲出现且每一个脉冲持续的时间(一般大于 $0.3\ \mu\text{s}$)。利用状态机的方式设计 Verilog 程序,循环检测前导脉冲直到符合信号格式再对后续的信号部分进行处理,否则丢弃。

根据 PPM 编码原理,前 $0.5\ \mu\text{s}$ 为高电平,后 $0.5\ \mu\text{s}$ 为低电平则为“1”位,反之为“0”位,所以通过判断信号的上升沿和下降沿就能够判断出 112 位数据位的值。首先需要程序判断定位到第一个数据位的上升沿(下降沿)的位置。在定位到第一个数据位的上升沿(下降沿)初始位置之后,记录采样数据 data_buf ,然后与间隔 5 个 clk 后的输入数据 data_in 进行比较,若 $\text{data_in} - \text{data_buf} > \delta$ 则表示上升沿,为数据“0”位;若 $\text{data_buf} - \text{data_in} > \delta$ 则为数据“1”位;若 $\text{data_in} > \text{data_buf}$ 且 $\text{data_in} - \text{data_buf} < \delta$ 则设置为低置信度“0”;若 $\text{data_in} < \text{data_buf}$ 且 $\text{data_buf} - \text{data_in} < \delta$ 则设置为低置信度“1”;其中, δ 表示根据前导脉冲功率所设定的阈值。然后间隔 43 个 clk 定位到下一个采样点,重复该过程直到数据检测完成。

3.1.3 CRC 校验及纠错

对采样数据 PPM 解码后,需要通过 CRC 校验来验证解码是否准确。ADS-B 系统采用 CRC-24 循环冗余校验码,生成的多项式为:

$$G(x) = x^{24} + x^{23} + x^{22} + x^{21} + x^{20} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^3 + 1 \quad (2)$$

CRC 校验过程为:112 位数据从第一个开始不为 0 的数据位与 25 位生成多项式的系数进行按位异或运算,将得到的余数与 112 位数据的下一个数据位继续按位异或运算,重复上述过程直到 112 位数据中为 1 的最高位数小于 25 为止。如果得到的余数等于 0,则表示正确接收数据,否则表示数据传输过程出现误码,此时余数为错误样图。当出现错误时,将错误样图与校验子进行对比,找到错误数据位然后进行纠错即可。

3.2 数据传输

ADS-B 数据传输的最大速率为 $1\ \text{M/s}$,不能直接通过串口传输给上位机。为了解决数据传输速率匹配问题,本文设计采用 FIFO 存储器,将接收到的数据先通过 FIFO 缓存,然后经 UART 传给上位机。以 180 海里每秒 100 架飞机,每架飞机每秒广播 2 次计算,则实际每秒接收数据 22400 字节,因此设计大小为 2014 words 的 FIFO 存储器能够满足系统需求。

3.3 数据解算

3.3.1 飞机身份信息解算

在 ADS-B 消息中,“AA”字段位于消息格式第 9-32 位,表示发射装置的地址编码。如当接收信号前 32 位数据为“10001101_011111000_00000000_11010111”时,表示

DF=17 的 ADS-B 消息,解算可得飞机的 ICAO 离散地址为“7800D7”,国籍为中国。

飞机的身份信息由 8 个字符表示,每个字符由 6 个 bit 数据共同决定。当 6 个 bit 位的值为“1~26”时对应的字母为“A~Z”;当 6 个 bit 位值为“48~57”时,根据 ASCII 码对应数字为“0~9”;当 6 个 bit 位值不在这个范围内时,不解算。

3.3.2 飞机位置信息解算

S 模式信号高度信息有两种编码方式,一种是与 C 模式高度编码方式相同,另外一种是以 25 英尺增量方式编码^[23]。可根据“ME”字段第 16 bit 位“D1”确定是何种编码方式。若 $D1=1$,则以 25 英尺增量方式编码。对应的解码算法为:去掉数据位的第 48 位,将剩下的 11 位数据组成二进制,真实的高度为英尺。若 $D1=0$,则编码方式与 C 模式相同。对应的解码算法为:去掉最高位 $D2$,将 7 位格雷码转换为二进制数,然后乘以 500 英尺增量,根据相乘结果的尾数加上相应的增量即可。

在 ADS-B 位置消息中,经纬度编码采用 CPR 编码方式。CPR 坐标系统从赤道向两极、从本初子午线向东把地球分成多个经纬度区域。在空中位置字段中第 54-88 位为经纬度编码数据。第 54 位为奇偶编码位,为“0”时表示偶编码,为“1”时表示奇编码。纬度编码方式如下:

将地球纬度划分为 $4 \times NZ$ 个区域, $NZ=15$,各区域大小均匀。区域大小计算如式如(3)所示:

$$Dlat_i = \frac{360^\circ}{4 \times NZ - i} \quad (3)$$

式(3)中: $i=0$ 表示偶编码方式; $i=1$ 表示奇编码方式。将 $NZ=15$ 代入计算得 $Dlat_0 = 6^\circ$, $Dlat_1 = 6.10169^\circ$ 。把输入的纬度($-90^\circ \sim +90^\circ$)转化成(bins)代码($0 \sim 131071$),如公式(4)所示:

$$YZ_i = \text{floor}\left(2^{N_b} \cdot \frac{\text{MOD}(\text{lat}, Dlat_i)}{Dlat_i} + \frac{1}{2}\right) \quad (4)$$

式(4)中 $2^{N_b}=131072$ 。由于上式为取整运算,块的纬度中线绝大部分情况下不等于输入的纬度值,因此利用还原块(bins)的纬度中心线,式(5)为其计算公式。

$$Rlat_i = Dlat_i \left(\frac{YZ_i}{2^{N_b}} + \text{floor}\left(\frac{\text{lat}}{Dlat_i}\right) \right) \quad (5)$$

经度编码方式与纬度编码方式相同,在此不做过多叙述。根据经纬度消息的 CPR 编码方式,可逆向求解得到空中飞机经纬度坐标。

3.3.3 空中速度信息解算

对空中速度解算包括东西方向和南北方向速度的解算,以及两个方向的合成速度,方向值表示飞机偏离正北方向的角度。如当东西向编码为“0000_1001_011”,南北向编码为“0000_1111_101”,经计算可得东西速度为 $75\ \text{kts/h}$,南北速度为 $125\ \text{kts/h}$ 。利用勾股定理计算可得合成速度为 $145.77\ \text{kts/h}$,偏离正北方向 30.96° 。

3.4 上位机显示

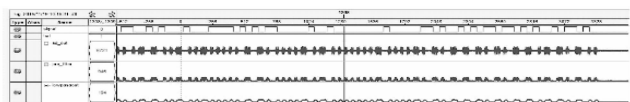
在完成 ADS-B 数据解算后,需要通过上位机界面实

时显示解算结果。在 Visual C++ 6.0 环境下, 使用 CListCtrl 控件对接收到的每帧数据进行实时显示。考虑到每架飞机都有唯一固定的 ICAO 地址, 因此在显示时可将每架飞机的位置、速度和身份信息整合在一起显示。先在 CListCtrl 控件的“地址”栏查询现有的 ICAO 地址, 若存在, 则改变对应行的数据, 否则在 CListCtrl 控件的末尾添加一条新记录。使用该方法可使同一架飞机的所有信息在上位机界面上只用一行显示即可, 符合视觉习惯。

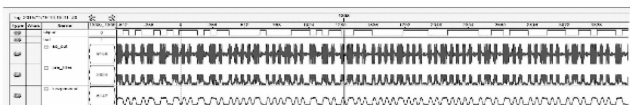
4 系统试验分析

ADS-B 信号会受到地面反射或其他方位飞机发出的信号干扰, 同时也会受到同频段其他航空管制信号的干扰, 这些都会影响接收信号的识别与处理, 因此为了全面评价 ADS-B 接收系统性能, 需要通过外场试验来验证系统的性能以及实时处理效果。

将硬件系统搭建完成后, 利用 Quartus 自带的逻辑分析仪 SigantapII 观察信号处理过程中各个模块输出的信号, 同时观察上位机显示界面。如图 4 所示, ad_out 为 AD 采集输出的数据, signal 为 PPM 解码结果, 从仿真结果可以看出 AD 能够实时采集数据, 且 PPM 解码也有输出。如图 5 所示, 上位机界面能够实时显示周围空域内经过的飞机信息, 包括经度、纬度、速度等。



(a) 仿真结果一



(b) 仿真结果二

图 4 FPGA 实时仿真结果

地址	国籍	消息类型	飞机身份	经度	纬度	高度	速度	方向	系统时间
78044E	中国	空中心	100 8089955	34.0580511	106.975	350 018	123.463	17.38.50	
780479	中国	空中心	100 0663801	34.4841109	94.625	187 043	358.775	17.39.14	
780488	中国	空中心	100 3079118	34.8046278	20475	351 001	344.974	17.38.56	
7804E1	中国	空中心	100 1060297	35.4029307	29100	507 001	48.039	17.39.14	
780669	中国	空中心	100 1934936	36.1446377	21090	387 072	108.319	17.39.24	
7806C9	中国	空中心	100 0786105	33.6088426	27600	396 994	298.474	17.39.24	
780700	中国	空中心	100 0072445	33.8994106	23000	510 045	106.516	17.39.26	
7807A4	中国	空中心	100 0734687	35.0370566	90100	398 218	214.478	17.39.21	
780820	中国	空中心	100 9499215	33.4475866	34100	381 701	219.191	17.38.54	
78088F	中国	空中心	100 0257497	34.1349666	90100	276 407	205.44	17.39.21	
78087C	中国	空中心	100 8613596	36.2004217	27600	549 889	38.7249	17.39.06	
780840	中国	空中心	100 8613595	35.9219979	20075	549 889	38.7249	17.39.01	
7808A1	中国	空中心	100 4114695	36.3089040	32100	385 996	205.636	17.39.21	
7808F3	中国	空中心	100 238401	34.1394562	32125	406 297	215.695	17.39.21	
7807B9	中国	空中心	100 7397033	34.8378987	1975	364	292.62	17.39.14	
7809C0	中国	空中心	100 8041656	34.4846492	2200	145 344	229.185	17.39.17	
7809B3	中国	空中心	100 0269216	35.3823072	21000	286 721	259.624	17.39.15	
780A05	中国	空中心	100 4955435	34.3873824	8625	288 721	259.624	17.39.15	
7808B1	中国	空中心	100 48131018	35.0274037	20400	482 626	28.8753	17.38.45	
78088F	中国	空中心	100 6978722	33.7289046	38075	435 791	197.77	17.38.47	
7809C5	中国	空中心	100 7809568	34.4865947	1700	149 402	227.894	17.39.22	
7809C2	中国	空中心	100 7081119	34.3887981	4675	222 876	229.008	17.39.16	
7809C5	中国	空中心	100 803856	34.4071774	27100	464 294	1.79651	17.39.02	
780C08	中国	空中心	100 7680244	34.4584319	1475	146 659	229.594	17.37.05	
7809C5	中国	空中心	100 76982	34.4681897	1450	144 499	229.360	17.39.02	
7809DA	中国	空中心	100 1694267	35.1057587	27600	390 946	334.377	18.38.14	
7809D6	中国	空中心	100 7527692	34.4221344	2225	170 742	229.562	17.39.02	
7809C2	中国	空中心	100 8078114	34.3476284	7000	217 478	29.6694	17.38.21	
78084F	中国	飞机身份	110 1354851	36.0659452	33075	509 009	36.5322	17.38.51	

图 5 上位机显示界面

虽然上位机能够实时显示解算结果, 但解算结果的准确性并未得到验证, 因此需要将实时数据解算结果与英国进口的 SBS-3 型 ADS-B 接收设备数据解算结果进对比。试验结果对比如下:

通过分析大量的试验数据可得, 飞机的身份、高度信息解算没有偏差, 这是由于飞机身份信息与飞机的飞行状态、系统的更新率、灵敏度没有直接关系; 飞机在平飞过

表 3 位置、地址、身份解算结果

序号	解算设备	飞机地址	飞机身份	高度/英尺	纬度/°	经度/°
1	试验	7807A4	CXA8273	30100	34.1909	109.11890
	SBS-3	7807A4	CXA8273	30100	34.191	109.118
2	试验	780CDA	CES2779	27600	34.3960	108.89734
	SBS-3	780CDA	CES2779	27600	34.396	108.895
3	试验	7808F3	CSC8886	32125	34.36101	108.43122
	SBS-3	7808F3	CSC8886	32125	34.361	108.431
4	试验	780CDA	CES2779	27575	34.4067	108.84676
	SBS-3	780CDA	CES2779	27575	34.407	108.847
5	试验	7808F3	CSC8886	32125	34.3524	108.42367
	SBS-3	7808F3	CSC8886	32125	34.352	108.423
6	试验	780B81	CES5299	33100	34.3976	108.77271
	SBS-3	780B81	CES5299	33100	34.397	108.772
7	试验	7806CE	GCR7502	6175	34.4106	109.07333
	SBS-3	7806CE	GCR7502	6175	34.411	109.073
8	试验	7807A4	CXA8239	30100	34.2247	109.01296
	SBS-3	7807A4	CXA8239	30100	34.225	109.011
9	试验	79A014	CES2398	10850	34.1891	109.24249
	SBS-3	79A014	CES2398	10850	34.189	109.242
10	试验	780CDA	CES27779	27575	34.4241	108.76829
	SBS-3	780CDA	CES27779	27575	34.425	108.766
11	试验	7809C0	CES2368	6825	34.4172	109.03095
	SBS-3	7809C0	CES2368	6825	34.417	109.031
12	试验	7807A4	CXA8273	30100	34.3908	108.82131
	SBS-3	7807A4	CXA8273	30100	34.391	108.821
13	试验	780C6E	GCR7502	3950	34.5482	108.96670
	SBS-3	780C6E	GCR7502	3950	34.549	108.967
14	试验	780C6E	GCR7502	3725	34.5593	108.94535
	SBS-3	780C6E	GCR7502	3725	34.559	108.945
15	试验	780CDA	CES2779	27600	34.7529	108.42609
	SBS-3	780CDA	CES2779	27600	34.752	108.426
16	试验	79A014	CES2398	5700	34.4146	108.97785
	SBS-3	79A014	CES2398	5700	34.415	108.978
17	试验	780DCE	CHH7880	8950	34.1564	108.81526
	SBS-3	780DCE	CHH7880	8950	34.157	108.816
18	试验	79A014	CES2398	5700	34.5233	109.08485
	SBS-3	79A014	CES2398	5700	34.523	109.085
19	试验	780DCE	CHH7880	7675	34.3139	108.91525
	SBS-3	780DCE	CHH7880	7675	34.313	108.915
20	试验	780700	OKA288T	23000	33.8994	109.00724
	SBS-3	780700	OKA288T	23000	33.899	109.007
21	试验	78044B	ZH9298	18675	34.0598	108.58869
	SBS-3	78044B	ZH9298	18675	34.060	108.589
22	试验	780AD5	CES2955	9825	34.3874	108.45554
	SBS-3	780AD5	CES2955	9825	34.387	108.455
23	试验	780959	CSC8899	27600	34.4005	108.74719
	SBS-3	780959	CSC8899	27600	34.399	108.748
24	试验	780356	CCA4112	25600	34.1737	108.52272
	SBS-3	780356	CCA4112	25600	34.178	108.524
25	试验	780701	OKA2823	1650	34.4449	108.78382
	SBS-3	780701	OKA2823	1675	34.445	108.784

续表

序号	解算设备	飞机地址	飞机身份	高度/英尺	纬度/°	经度/°
26	试验	780356	CCA4112	25600	34.1596	108.51824
	SBS-3	780356	CCA4112	25600	34.159	108.518
27	试验	780892	CDG4797	30075	34.2266	109.00903
	SBS-3	780892	CDG4797	30075	34.226	109.011
28	试验	7807A8	CSZ9243	1475	34.4033	108.72665
	SBS-3	7807A8	CSZ9243	1475	34.403	108.727
29	试验	780827	CXA8269	5025	34.2006	108.66760
	SBS-3	780827	CXA8269	5025	34.201	108.667
30	试验	7809A7	CCD8925	4150	34.4818	108.83527
	SBS-3	7809A7	CCD8925	4150	34.482	108.835
31	试验	7807A8	CSZ9243	1375	34.4073	108.73208
	SBS-3	7807A8	CSZ9243	1375	34.407	108.732
32	试验	780E07	CSN3793	5250	34.2474	108.79306
	SBS-3	780E07	CSN3793	5250	34.247	108.795
33	试验	7802CB	CQH8640	31100	34.4604	108.89185
	SBS-3	7802CB	CQH8640	31100	34.462	108.892
34	试验	7800E1	CHH7838	3075	34.3520	108.65596
	SBS-3	7800E1	CHH7838	3075	34.352	108.656
35	试验	780C05	CES2185	29075	34.2700	108.75761
	SBS-3	780C05	CES2185	29075	34.268	108.759
36	试验	78005B	EU2742	6725	34.2575	108.85416
	SBS-3	78005B	EU2742	6725	34.258	108.854
37	试验	7BB12F	CHH7852	5275	34.2522	108.70005
	SBS-3	7BB12F	CHH7852	5275	34.252	108.700
38	试验	78005B	EU2742	5425	34.2324	108.67894
	SBS-3	78005B	EU2742	5425	34.232	108.679
39	试验	780C6D	GCR7663	22550	33.8840	108.98941
	SBS-3	780C6D	GCR7663	22550	33.884	108.988
40	试验	78088E	CZ3654	32100	34.3223	108.56997
	SBS-3	78088E	CZ3654	32100	34.322	108.570
41	试验	780CE9	CSC8893	37100	34.3105	108.86717
	SBS-3	780CE9	CSC8893	37100	34.311	108.867
42	试验	780C6D	GCR7663	22575	33.8828	108.99491
	SBS-3	780C6D	GCR7663	22575	33.883	108.996
43	试验	7803B6	ZH9512	3200	34.4051	108.72929
	SBS-3	7803B6	ZH9512	3200	34.405	108.729
44	试验	7802F0	CSN6956	30100	34.2364	108.97653
	SBS-3	7802F0	CSN6956	30100	34.237	108.977

表 4 速度、地址、身份解算结果

序号	解算设备	飞机地址	飞机身份	速度(海里/小时)	偏离正北方向/°
1	试验	7804F1	CXA8460	401.241	62.2215
	SBS-3	7804F1	CXA8460	401.2	63.2
2	试验	7807A4	CXA8273	364.725	291.218
	SBS-3	7807A4	CXA8273	364.7	291.2
3	试验	7809C0	CES2368	240.352	356.9
	SBS-3	7809C0	CES2368	240.4	356.9

续表

序号	解算设备	飞机地址	飞机身份	速度(海里/小时)	偏离正北方向/°
4	试验	7807A4	CXA8273	364.585	290.722
	SBS-3	7807A4	CXA8273	364.6	290.7
5	试验	7807A4	CXA8273	364.585	290.722
	SBS-3	7807A4	CXA8273	364.6	290.7
6	试验	780B81	CES5299	480.91	30.3508
	SBS-3	780B81	CES5299	480.9	30.4
7	试验	79A014	CES2398	277.186	315.0
	SBS-3	79A014	CES2398	277.2	315.0
8	试验	7807A4	CXA8273	364.585	290.722
	SBS-3	7807A4	CXA8273	364.6	290.7
9	试验	780CDA	CES2779	375.48	284.813
	SBS-3	780CDA	CES2779	375.5	284.8
10	试验	780B81	CES5299	480.91	30.3508
	SBS-3	780B81	CES5299	480.9	30.4
11	试验	780B81	CES5299	480.91	30.3508
	SBS-3	780B81	CES5299	480.9	30.4
12	试验	7807A4	CXA8273	364.94	290.868
	SBS-3	7807A4	CXA8273	364.9	290.9
13	试验	780B81	CES5299	480.91	30.3508
	SBS-3	780B81	CES5299	480.9	30.4
14	试验	780CDA	CES2779	388.398	305.04
	SBS-3	780CDA	CES2779	388.4	305.0
15	试验	780B81	CES5299	481.416	30.4535
	SBS-3	780B81	CES5299	481.4	30.5
16	试验	79A014	CES2398	228.484	316.596
	SBS-3	79A014	CES2398	228.5	316.6
17	试验	780700	OKA288T	373.129	184.458
	SBS-3	780700	OKA288T	373.1	184.5
18	试验	7809C0	CES2368	172.627	313.122
	SBS-3	7809C0	CES2368	172.6	313.1
19	试验	7809C0	CES2368	175.208	252.392
	SBS-3	7809C0	CES2368	175.2	252.4
20	试验	780DCE	CHH7880	274.612	27.3115
	SBS-3	780DCE	CHH7880	274.6	27.3
21	试验	780BDF	CHH7111	442.115	197.779
	SBS-3	780BDF	CHH7111	442.1	197.8
22	试验	780AD5	CES2955	288.721	259.625
	SBS-3	780AD5	CES2955	288.7	259.6
23	试验	780356	CCA4112	445.567	194.691
	SBS-3	780356	CCA4112	445.6	194.7
24	试验	780701	OKA2823	174.774	50.5722
	SBS-3	780701	OKA2823	174.8	50.6
25	试验	780DBB	GCR6503	184.621	226.536
	SBS-3	780DBB	GCR6503	184.6	226.5
26	试验	780106	CES2330	132.008	49.9166
	SBS-3	780106	CES2330	132.0	49.9
27	试验	780DBB	GCR6503	187.417	226.081
	SBS-3	780DBB	GCR6503	187.4	226.1
28	试验	7809A7	CCD8925	199.251	49.2739
	SBS-3	7809A7	CCD8925	199.3	49.3

续表

序号	解算设备	飞机地址	飞机身份	速度(海里/小时)	偏离正北方向/ $^{\circ}$
29	试验	7807A8	CSZ9243	146.0	48.8879
	SBS-3	7807A8	CSZ9243	146.0	48.9
30	试验	7807A8	CSZ9243	145.248	48.6285
	SBS-3	7807A8	CSZ9243	145.2	48.6
31	试验	780E07	CSN3793	220.077	292.72
	SBS-3	780E07	CSN3793	220.1	292.7
32	试验	7803F4	CCA1406	456.885	31.3939
	SBS-3	7803F4	CCA1406	456.9	31.4
33	试验	780C05	CES2185	451.708	154.002
	SBS-3	780C05	CES2185	415.7	154.0
34	试验	780669	CES2108	302.275	203.597
	SBS-3	780669	CES2108	302.3	203.6
35	试验	7BB12F	CHH7852	178.846	247.306
	SBS-3	7BB12F	CHH7852	178.8	247.3
36	试验	780C05	CES2185	464.785	139.8
	SBS-3	780C05	CES2185	464.8	139.8
37	试验	7806A6	CXA8212	287.587	131.617
	SBS-3	7806A6	CXA8212	287.6	131.6
38	试验	780185	HDA946	192.005	245.704
	SBS-3	780185	HDA946	192.0	245.7
39	试验	7802F0	CSN6956	364.585	290.722
	SBS-3	7802F0	CSN6956	364.6	290.7
40	试验	780CA8	CES2425	430.444	47.8248
	SBS-3	780CA8	CES2425	430.4	47.8
41	试验	780C6D	GCR7663	470.052	104.539
	SBS-3	780C6D	GCR7663	470.1	104.5
42	试验	780781	CCA1408	488.018	35.155
	SBS-3	780781	CCA1408	488.0	35.2
43	试验	780818	CHH7898	175.069	228.937
	SBS-3	780818	CHH7898	175.1	228.9
44	试验	7802F0	CSN6956	364.585	290.722
	SBS-3	7802F0	CSN6956	364.6	290.7

程中, 高度变化很小, 且 S 模式编码方式是以 25 英尺增量方式编码, 因此高度信息解算没有偏差。经纬度解算结果部分会存在 0.002° 以内的偏差, 如第 2、8、10 组数据经度解算结果有 0.002° 的误差; 第 10、13、17 组数据纬度解算结果有 0.001° 误差; 速度解算结果一致, 方向解算结果存在 0.1° 的偏差, 如第 6、10、18 组数据。造成经纬度、速度、方向解算结果与 SBS-3 系统存在微小偏差, 是由于飞机飞行过程中发射 ADS-B 信号的速率快, 两个系统灵敏度和数据刷新率存在差异, 因此两个数据解算结果存在偏差, 但差异很小, 可认为解算结果合理。

在某一时间段内, 以 1 秒为间隔, 选取 628 个时刻, 对两个系统接收到的飞机数目统计, 试验结果如图 6 所示。

从上图可以看出, 试验系统运行初期所接收到飞机的数量没有 SBS-3 系统接收到数目多, 但当系统运行一段时间后(约三分钟)后, 两系统接收数量相同; 四分半钟后,

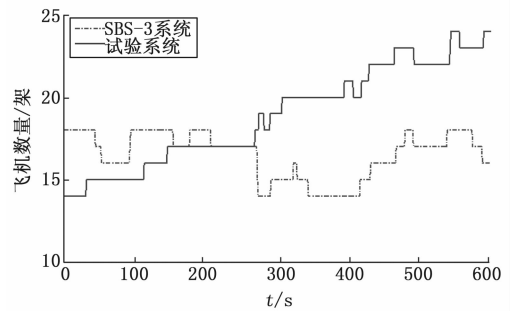


图 6 试验系统接收飞机数量

试验系统所接收到的飞机数量和 SBS-3 系统一样; 随着试验系统稳定运行, 5 分钟之后试验系统接收到的飞机数量大于 SBS-3 系统, 表明本文所设计的试验系统能够接收更微弱的信号, 接收范围更广。

5 结束语

通过系统试验可得, 本文设计的 ADS-B 接收系统接收范围广, 数据处理速度快、精度高, 具有较少的错误解算率和较高的集成度, 符合 ADS-B 接收设备要求。

参考文献:

- [1] 宋大明. ADS-B 在空管中的发展与应用 [J]. 中国民用航空, 2013, 8 (6): 52-53.
- [2] Civil Aviation Administration of China. China's civil aviation ADS-B implementation plan [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2012 (in Chinese).
- [3] Cushley A C, M. N J. Ionospheric tomography using ADS-B signals [J]. Radio Science, 2014, 49 (7): 549-563.
- [4] Duan P, Haag M U D, Farrell J L. Flight Test Results of a Measurement-Based ADS-B System for Separation Assurance [J]. Navigation - Journal of The Institute of Navigation, 2013, 60 (3): 221-234.
- [5] Baraldi Sesso D, Vismari L F, Camargo J B. An approach to assess the safety of ADS-B based unmanned aerial systems [A]. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on [C]. IEEE, 2014: 669-676.
- [6] Reynolds T G, Hansman R G. Conformance monitoring approaches in current and future air traffic control on environments [A]. 21st Digital Avionics Systems Conference [C]. Irvine: IEEE, 2002.
- [7] Romli F I, King J D, Li L, et al. Impact of automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) on traffic alert and collision avoidance system (TCAS) performance [A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit [C]. Hawaii: AIAA, 2008.
- [8] Andrew D. Zeitlin and Michael P. McLaughlin. Safety of Cooperative Collision Avoidance for Unmanned Aircraft [J]. IEEE A&E Systems Magazine, 2007, 4: 9-13.

(下转第 180 页)