文章编号: 2095-4980(2018)05-0886-06

高灵敏度星载 ADS-B 信号解调算法

余孙全1,陈利虎*1,李松亭1,李兰民2

(1.国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073; 2.山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264000)

摘 要:为提高星载自动相关广播监视系统(ADS-B)接收机的检测性能,研究了高灵敏度解调算法。利用基于匹配滤波的 ADS-B 信号帧头检测算法对信号准确定时和提取功率信息,该方法构建了特殊的帧头匹配脉冲序列,设计了信号控制状态机以确保在相关峰值最大处定位信号,并联合一部分数据位进行同步。利用多点加权振幅采样法提取比特信息和置信度。最后,采用基于置信度的纠错方法纠正校验错误的报文。板载验证表明,该解调算法能有效提升低信噪比条件下星载 ADS-B 信号的检测概率,最终接收机的灵敏度可达-95 dBm(数据包错误率 5%)。

关键词:自动相关广播监视系统;低轨卫星;帧头检测;匹配滤波 中图分类号:TN95 _______文献标志码:A ______ doi:10.11805/TKYDA201805.0886

High sensitivity detection algorithm for space-based ADS-B

YU Sunquan¹, CHEN Lihu^{*1}, LI Songting¹, LI Lanmin²

(1.College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China; 2.Shandong Institute of Space Electronic Technology, Yantai Shandong 264000, China)

Abstract: In order to detect signal of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B) precisely, an improved detection algorithm is developed in this paper. And a special match filter for ADS-B is proposed, which benefits from the phase coherence of the pulse train from the first ADS-B preamble pulse to the third format bit. State machine is developed to ensure decode signal in correlate peak. The simulation results show that it is able to increase detection probability by this method under low ratio of signal to noise. The sensitivity of receiver using this method is -95 dBm(the packet error rate is 5%).

Keywords: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast; Low Earth Orbit(LEO) satellite; preamble detection; match filter

自动相关广播监视系统(ADS-B)是国际民航组织确定的未来主要空管监视技术。它采用开放式广播方式,周期性地播发目标自身位置、速度等消息。一方面便于空管中心不再单独依靠雷达进行控制监视,另一方面其他航空器也能接收信号,为态势感知和航空安全提供有效的数据支撑。星载 ADS-B 指在卫星上搭载 ADS-B 接收机,利用其高远特性将监控范围扩展到海洋、极地以及偏远地区等传统地基设备无法覆盖的地方,做到全球覆盖。

星载侦收 ADS-B 信号需要高灵敏度接收机。由于 ADS-B 信号采用脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM),开放式信道接入和卫星覆盖面积太大,导致信号冲突,严重降低信号检测概率。目前世界范围内多采用 搭载小卫星发射的方式来开展星载 ADS-B 技术研究。从 2013 年欧空局研制发射了国际首颗搭有 ADS-B 载荷的 卫星 Proba-V,验证了在轨侦收 ADS-B 信号的可行性之后,陆续有数颗搭载 ADS-B 接收机的卫星升空^[1]。其中 比较著名的有丹麦的 GOMX 系列纳卫星^[2],美国的第二代铱星^[3]。国防科技大学微纳卫星工程中心 2015 年 9 月 发射了"天拓三号"卫星,其搭载的 ADS-B 接收机通过低噪设计和压窄带宽,灵敏度达到了-93 dBm^[4]。这是我 国首次进行星载 ADS-B 信号接收试验,主星"吕梁一号"接收系统平均每天可接收全球范围 40 多万条 ADS-B 报文数据^[5]。

ADS-B 信号的解调主要包括 3 个步骤: 帧头检测、比特判决和完整性校验。其中帧头能否被准确检测和功率 信息的准确提取制约了信号检测概率和解调正确率。目前帧头检测方法主要分为脉冲沿法和匹配滤波法 2 种。文

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-04-12 基金项目: 国家重点研发计划项目"广域航空安全监控技术及应用"资助项目(2016YFB0502402) *通信作者: 陈利虎 email:clh2055@163.com 献[6]提出改进的脉冲沿检测法,但该方法中只要前导四脉冲中有一个脉冲被干扰变形,检测就可能失败。文献[7] 提出用前 8 μs 匹配滤波直接检测前导脉冲,但该方法只要参考信号高电平段有足够强的能量信号,相关结果中 就有峰值出现,难以用固定阈值判决峰值的方法检测帧头。文献[8]提出基带归一化的互相关报头检测方法,在 信噪比为 2 dB 的仿真条件下,可达到 99.8%的检测概率,但需要进行噪底估计且对同频干扰敏感。文献[9]提出 利用报文中的下传格式(Downlink Format, DF)位进行检测,相比只用报头四脉冲检测,无误差检测条件下对信 噪比的要求降低了 3 dB,但其只能检测 DF 为 17 的报文。

本文在信号相干解调的帧头检测中,使用了负电平化的报头匹配滤波算法,此算法避免了设定阈值,只需要 寻找最大值即可。通过联合 DF 位前 3 比特联合检测,进一步提高了检测概率;其次,利用多点加权振幅采样法 提取比特信息和置信度;最后,采用基于置信度的纠错方法纠正校验错误的报文。通过这些方法的组合,ADS-B 接收机的灵敏度达到了-95 dBm。

1 系统模型

如图 1 所示,一帧完整的 ADS-B 信号^[10]长度为 120 μs,包括前 8 μs 具有固定位置的四脉冲帧头和紧跟其后的 112 bit 数据块,基带信号采用二进制脉冲位置调制(Binary PPM, BPPM)调制到 1 090 MHz 后发射,信号模型表示为:

$$e_0(t) = s(t)\cos 2\pi f_c t \tag{1}$$

$$s(t) = s_{\text{preamble}}(t) + \sum_{k=16}^{224} A_k p(t - kt_s)$$
⁽²⁾

$$s_{\text{preamble}}(t) = p(t - k_1 t_s), k_1 = 0, 2, 7, 9$$
 (3)

式中: s(t) 为帧头四脉冲信号; p(t) 为脉宽为 0.5 μ s 的脉冲信号; $f_c = 1$ 090 MHz 为载波频率; A_k 等概率取+1 和 -1; $t_s = 0.5 \mu$ s 为半个码元片段的时长。





"天拓三号"搭载的 ADS-B 接收机采用超外差式 结构,一是由于信号频率较高,采用超外差方式将信 号下变频之后,以相对较低的频率制作带通滤波器和 A/D 采样;二是超外差结构可以使放大器增益分配到 各级当中,这样更有利于提升整体接收机性能及稳定 性^[11]。如图 2 所示,中频信号经过 A/D 采样后首先在 FPGA 内部完成数字低通滤波,之后依次进行帧头检 测、数据判决和循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)校验,最后将正确的 112 bit 数据进行存 储,当卫星过顶时下传数据,在地面站提取报文信息。

本文所述接收机采用相干解调的方式以使解调器获得 更大的增益改善,BPPM相干解调时系统的误码率(Bit Error Rate, BER)^[12]为:

$$P_{\text{bppm coherent}} = 0.5 erfc \left(\sqrt{r/2} \right)$$
 (4)

式中r为解调器输入端的信噪比。比特误码率和解包率之间的关系可由式(5)给出。

$$P_{\text{packet}} = \left(1 - P_{\text{BER}}\right)^{n_{\text{symbol}}} \tag{5}$$

式中 *n*_{symbol} =112,为一包数据中比特符号个数。空管行业要求地面接收机的解包率不小于 95%,本文以此来评估接收机灵敏度。由图 3 可知此时信噪比要求不低于 5 dB,因此



需要保证 5 dB 条件下帧头的准确检测。检测概率的提升能大幅降低航空事故的发生率,根据波音公司统计,近 十年国际航空界共发生机毁人亡的民用航空事故 90 余起[13]。 n(t)

帧头检测 2

2.1 帧头脉冲序列构建

2.1.1 匹配滤波器

在噪声背景中检测微弱信号,接收机输出的信噪比越大,越容易发

现目标,信息传输发生错误的概率越小。匹配滤波器就是以输出信噪比最大为准则而设计的最佳线性滤波器。采 用匹配滤波器检测 ADS-B 信号的帧头,在一般做法中,其冲激响应为帧头信号的共轭镜像^[7]:

$$h(t) = cs_{\text{preamble}}(-t)$$

式中 c 为常数。由于匹配滤波器对信号幅度具有适应性,因此 c 的取值是任意的。如图 4 所示,匹配滤波器的输 出信号可表示为:

 $y(t) = [s(t) + n(t)] \otimes h(t)$ (7)式中: ⊗为卷积符号; n(t)为零均值高斯白噪声。则 输出的期望值为:

$$E[y(t)] = E[s(t) + n(t)] = E[s(t)]$$
(8)

文献[6]对匹配滤波方法分析后认为,只要信号 高电平段有足够强的能量信号,相关结果中就有峰 值出现,难以用固定阈值判决峰值的方法检测帧头。 本文发现,由于8 µs 长度的帧头中只有 2 µs 为高电 平,若将低电平设为负值,则可进一步增大相关峰 值与未匹配时的信号值的差。如图 5 所示,若将低 电平设为零值,则相关后的输出结果中出现大量正 峰值。当低电平设为负值以后,最大峰值保持不变, 而相关输出值在绝大多数时保持为负值。当信号匹 配时,只有一个峰值出现,因此能够保证信号的准 确定时,且不用设定固定阈值,只需要寻找最大值 即可。

图 6 为 Matlab 仿真结果对比图。2 次仿真分别 采用了零电平和负电平滤波器系数, 仿真时间第 300 µs 有一帧完整 ADS-B 信号。比较 2 种不同系数 的滤波器输出可以看到,数据位部分经过零电平系 数滤波器输出后,结果出现大量正峰值;而经过负 电平系数滤波器输出后,绝大部分为负值。这是因 为数据位部分的"0"、"1"个数是相等的,而负电 平滤波器的系数的数学期望值为负值。只有完全匹 配时,才会出现较大峰值。

Fig.4 Signal processing model for match filter 图 4 匹配滤波器的信号处理模型

s(t)

h(t)





2.1.2 联合数据位的帧头检测

- 个完整的模式 S 信号分为:DF 位(编码传输表征), CA 位(信号发射能力表征), AA 位(飞机地址位), ME 位(飞机信息位), PI 位(循环校验位)。其中, DF 位表示进行编码的传输描述符, DF 位共有 5 个 Bit 位, 以二进 制的方式表示, ADS-B 信号共有 DF17, DF18, DF19 三种。这 3 种 DF 位的前 3 比特均为"100", 因此, 可以联 合这3比特进行帧头检测。

由于矩形脉冲串信号的能量是单个矩形脉冲信号能量的 M 倍,由匹配滤波器的最大信噪比公式可得^[14]:

$$d_m = \frac{2E}{N_0} = \frac{2ME_1}{N_0} = M\frac{2E_1}{N_0} = Md_1$$
(9)

式中: E1 代表单个矩形脉冲信号的能量: d1 代表子脉冲匹配滤波器输出的最大信噪比, 信噪比的提高得益于相 参积累的作用。利用 3 比特数据位与只用报头四脉冲相比,可以使匹配滤波输出的信噪比提高 7/4 倍。

▶ y(t)

2.1.3 帧头脉冲序列构建

为了提高接收机的灵敏度,通常需要压窄信号带宽,由此带来的频率损失会使得方波信号畸变,对后端信号 解调算法要求较高。本文所述接收机设计中,信号带宽为2 MHz(单边1 MHz),图7 为接收机实际采样得到的 ADS-B 信号波形,可以看到它不再是一个理想的方波形状,而是由于频率损失发生了波形的畸变。记信号幅值 为A,则方波可以看作一组谐波叠加的结果



经过窄带滤波后,信号只保留了主频率分量。由于接收机采用相关匹配滤波时,2个信号的波形越相似,相关峰值越高,因此在构建帧头脉冲序列时,可以将原本的方波帧头序列做适当变形,如图8所示。值得注意的是,由于在 FPGA 内部做相关乘法累加时,会消耗大量乘法器,因此相关系数不宜太大。

在实际工程中,可以通过模拟基带信号的形式构建帧头序列。具体过程为:首先,向接收机输入无干扰或大 信噪比的 ADS-B 模拟信号;其次,通过在线调试软件观察 FPGA 内部的基带采样信号;最后,将采样序列负电 平化构建匹配滤波器。

2.2 信号检测控制状态机

如 2.1 节所述,只要匹配滤波器的输出值大于 0,则认为可能 出现了有用信号。此时开始搜索相关峰的最大值,当峰值达到最 大时开始解码。解码的正确性由 CRC 校验保证。由图 6 可见,匹 配滤波的输出会产生几个峰值,最大峰值应该出现在有用信号后 的第 8 µs 时刻。每当检测到峰值后,将其值进行存储,当后续 120 µs 内出现更大峰值时,重新更新峰值位置和最大峰值。这样 当 2 个信号重叠时,解码的是信号电平最强的一个。图 9 是接收 机内基带解码过程的信号控制状态机,所用采样率为 16 Msps。

3 比特译码

本文所用的译码算法是振幅比较法,因为此时的数字信号已 经能够表征功率值,比较每个脉冲前后 2 个振幅,就可以判定比 特位和置信度的大小。振幅比较法又可以分为中心振幅采样和多 点振幅采样。两者的不同之处在于:中心振幅采样是利用每个 chip 的中心采样点来判断比特位和置信度,而多点振幅采样是充分利 用每个比特周期的所有采样点,利用它们与报头的参考功率值之 间的关系来确定数据位和数据位的置信度。多点振幅采样把每一 个数据位的所有采样值都充分利用起来,利用 10 个采样值的信息 与报头的参考功率值之间的关系来确定数据位和数据位的置信 度,因而容错性能更好。多点振幅采样如图 10 所示,采用文献[10] 的算法进行数据位和置信度的提取。



4 CRC 检错与纠错

ADS-B 信号采用 CRC^[15]。在 ADS-B 的信号中,其 CRC 码设置在数据位中最后的 PI 位,共 24 位,用来储存

验证码。24 位 CRC 校验的最小汉明距离为 6,因此最多能实现 5 位编码的纠错。纠错中与错误比特组合比较的次数与其位数 呈 2 的幂次增长,考虑到计算能力和时间限制,有必要设置比 较位数的上限。由于出错最可能在低置信度比特位,因此优先 从低置信度比特位开始纠错。

如图 11 所示,首先对译码得到的 112 bit 数据做 CRC 校验, 若校验正确,则直接输出;若不正确,提取对应的置信度。当 低置信度位大于 5 时,抛弃该帧数据;否则,对低置信度位取 反后校验。

5 实验结果

使用 Matlab 做蒙特卡洛模拟仿真,比较脉冲沿法和匹配滤 波法的帧头检测正确率。采样率为 8 Msps。由图 12 可见,在 信噪比为 2 dB 时,匹配滤波法的检测正确率比脉冲沿法提升了 约 20%。

图 13 为加了 3 bit 数据位后的联合匹配滤波方法的正确检 测概率,与原始只用前 8 μs 帧头检测的情况相比较,在信噪比 为 0 dB 情况下,检测正确率提升了约 20%。

综合采用匹配滤波法检测帧头、多点振幅法做比特判决和基于置信度的纠错技术后,接收机的灵敏度可在 95%的解包率条件下达到-95 dBm。



6 结论

对信号的高灵敏度解调是制约星载 ADS-B 系统性能的关键。为了对信号准确定时,首先提出了负电平化的 报头匹配滤波算法,并设计了信号状态机,能够精确定时并且避免了预先选取门限值;利用一部分数据位做相参 累积,提升了相关输出的信噪比。其次,利用多点加权振幅采样法提取比特信息和置信度,降低了比特译码过程 的误码率。最后,采用基于置信度的纠错方法纠正校验错误的报文,相比蛮力纠错(即穷举每种可能错误组合)的 方法降低了计算资源开销。仿真和实际板载验证表明,该算法能够有效提升低信噪比情况下 ADS-B 报文的检测 率和解码正确率。

参考文献:

 [1] DELOVSKI T,WERNER K,RAWLIK T,et al. ADS-B over satellite—the world's first ADS-B receiver in space[C]// Small Satellites Systems and Services Symposium. Porto Pedro,Spain:[s.n.], 2014:1-16.



Fig.11 CRC checking flow 图 11 结合置信度判定的 CRC 纠检错流程

- [2] 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.
- [3] GARCIA M A, STAFFORD J, MINNIX J, et al. Aireon space based ADS-B performance model[C]// 2015 Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference(ICNS). Herdon, VA, USA: IEEE, 2015:C2-1-C2-10.
- [4] 陈小前,陈利虎,覃达,等. 高灵敏度星载 ADS-B 信号接收机:ZL2014I0338793.8[P]. 2014-07-16. (CHEN Xiaoqian, CHEN Lihu,QIN Da,et al. High sensitivity receiver for space-based ADS-B:ZL2014I0338793.8[P]. 2014-07-16.)
- [5] 陈利虎,陈小前,赵勇. 星载 ADS-B 接收系统及其应用[J]. 卫星应用, 2016(3):34-40. (CHEN Lihu, CHEN Xiaoqian, ZHAO Yong. Space-based ADS-B receiver system and application[J]. Satellite Application, 2016(3):34-40.)
- [6] WANG H,LIU C Z,WANG X G,et al. Methods to detect mode S preamble[J]. Journal of University of Electronic Science & Technology of China, 2010,39(4):486-489.
- [7] GALATI G,GASBARRA M,PIRACCI E G. Decoding techniques for SSR mode S signals in high traffic environment[C]// 2005 European Radar Conference. Paris,France:IEEE, 2005:383-386.
- [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 Xiao ming, SONG Hongliang. A novel ADS-B preamble detection method based on cross-correlation[J]. Telecommunication Engineering, 2016,56(2):156-160.)
- [9] DELOVSKI T,BREDEMEYER J,WERNER K. ADS-B over satellite coherent detection of weak mode-S signals from Low Earth Orbit[C]// Small Satellites Systems and Services. Toni Delovski:[s.n.], 2016:1-13.
- [10] Minimum operational performance standards for 1090 MHz ES ADS-B and TIS-B:RTCA DO 260-2009[S/OL]. [2018-03-20]. http://www.freestd.us/soft4/4325008.htm.
- [11] 何进. 基于 1090ES 的机载 ADS-B 设备总体设计[J]. 电讯技术, 2011,51(7):25-29. (HE Jin. An overall design scheme for airborne 1090ES ADS-B equipment[J]. Telecommunication Engineering, 2011,51(7):25-29.)
- [12] SINGH J,JAIN V K. Performance analysis of BPPM and M-ary PPM optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. Iete Technical Review, 2008,25(4):146-153.
- [13] 王浩锋. 基于 BP 神经网络的民用航空航段安全风险评估[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(5):612-615.
 (WANG Haofeng. Safety risk assessment model for civil aviation flight phase based on BP neural network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(5):612-615.)
- [14] 罗鹏飞.随机信号分析与处理[M].北京:清华大学出版社, 2006. (LUO Pengfei. Random signal processing[M]. Beijing:Peking University Press, 2006.)
- [15] ZHOU J H,ZHANG C,LIU X B. FPGA implementation of an error detection and correction algorithm in mode S-based ADS-B system[J]. Advanced Materials Research, 2012,403-408:1839-1844.

作者简介:



余孙全(1994-),男,陕西省安康市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为信号处 理.email:yusunquan17@163.com. **陈利虎**(1980-),男,长沙市人,博士,副研 究员,主要研究方向为卫星测控与通信.

李松亭(1985-),男,河南省安阳市人,博士, 讲师,主要研究方向为星载电子载荷.

李兰民(1981-),男,山东省烟台市人,硕士, 主要研究方向为卫星星务处理.