

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.02.008

引用格式: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 novel ADS-B preamble detection method based on cross-correlation[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(2):156-160.]

一种 ADS-B 报头互相关检测方法^{*}

张 涛^{**},唐小明,宋洪良

(海军航空工程学院 电子信息工程系,山东 烟台 264001)

摘 要:广播式自动相关监视(ADS-B)报头检测方法的优劣决定着接收机的性能。为了解决脉冲匹配检测方法受脉冲能量影响较大的不足,提出了一种基带归一化的互相关报头检测方法。首先将基带信号根据动态门限进行归一化,然后将其与标准报头作互相关,最后通过相关峰检测来判定信号的存在和到达时间。与主流基于脉冲位置和上升沿的检测方法相比,该方法隐含地利用了脉冲位置、上升沿、下降沿、脉冲宽度、非脉冲区等多个信息用于检测报头,且无需进行下行格式(DF)认证。仿真结果表明:该方法在信噪比大于2 dB时检测性能略优,在信噪比小于2 dB时检测性能与主流检测方法相差1 dB。在实际接收实验中,以该方法为基础的信号接收效果良好,在视距内可以形成稳定连续的航迹,证明了该方法的实用性。

关键词:广播式自动相关监视;S 模式;互相关检测;脉冲沿检测;基带归一化

中图分类号:TN967.5;V243 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)02-0156-05

A Novel ADS-B Preamble Detection Method Based on Cross-correlation

ZHANG Tao,TANG Xiaoming,SONG Hongliang

(Department of Electronic and Information Engineering,Naval Aeronautical and Astronautical University,Yantai 264001,China)

Abstract:The capability of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) preamble detection method directly determines the performance of the receiver. This paper proposes a cross-correlation method for detecting ADS-B preamble based on baseband normalized,which makes up the deficiency of pulse matching method. Firstly,the baseband signal is normalized with dynamic threshold. Secondly,the normalized signal is cross-correlated with standard preamble. Finally,the presence and the arrival time of the signal is determined by cross-correlation peak detection. This method impliedly uses the pulse position, rising edge, falling edge,pulse width and no-pulse zone to detect the preamble and does not need downlink format (DF) certification compared with the conventional detection method. The simulation results show that the detection capability of this method is slightly better than that of the conventional method, but with 1 dB lower than that of the conventional method for detecting the ADS-B preamble when signal-to-noise ratio (SNR) is less than 2 dB. The performance of the ADS-B receiver is good in actual reception experiment. It can get a stable and continuous track when the plane is in sight distance, which indicates the usefulness of this method.

Key words:ADS-B; Mode S; cross-correlation detection; pulse edge detection; baseband normalization

1 引 言

广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) 是一种主动将自身

的位置、速度等信息向外广播的监视技术,被业内普遍认为 是下一代监视技术的核心。目前,国际民航组织推荐的基于 1090ES(1 090 MHz Extended Squit-

^{*} 收稿日期:2015-10-08;修回日期:2016-01-04 Received date:2015-10-08;Revised date:2016-01-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61032001)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61032001)

^{**} 通信作者:radarads@sina.com **Corresponding author:**radarads@sina.com

ter)数据链的 ADS-B 已在全球范围内得到了大规模应用^[1-2]。随着航空器的日益增多,加之二次雷达、空中防撞系统、ADS-B 等多种系统共享 1 090 MHz 频点,使得各种信号异常密集,相互之间的干扰越来越频繁^[3]。ADS-B 的接收采用非合作机制,使用全向天线向外广播,不具有二次雷达的空间滤波功能,亦不具有其利用多个应答凝聚成点迹的特点^[4]。每个 ADS-B 位置报文就包含一个位置信息,报文的丢失即意味着位置点的丢失,无法弥补。从这个意义上说,对 ADS-B 接收机的抗干扰检测能力的要求应比二次雷达更高。报头检测是接收解码的基础,其性能直接决定着接收机的性能,须格外重视。文献[5]利用脉冲位置及上升沿来判断报头的存在及计算信号到达时间,具有较好的检测效果,但未能有效利用报头的下降沿、脉冲宽度及非脉冲部分,以致于在受到某些干扰时检测失败。文献[6]利用匹配滤波的方式检测报头,但该方法受脉冲能量的影响较大,容易出现虚警。本文在分析了基于脉冲匹配的报头检测方法不足的基础上,提出了一种在对信号基带进行归一化后作互相关报头检测的方法,并对该方法的检测性能进行了仿真分析及实验验证。

2 脉冲匹配检测方法

基于 S 模式 ADS-B 报文的格式如图 1 所示。前8 μs 为四脉冲报头,其位置固定,后面紧跟着 112 b 的数据块^[5]。

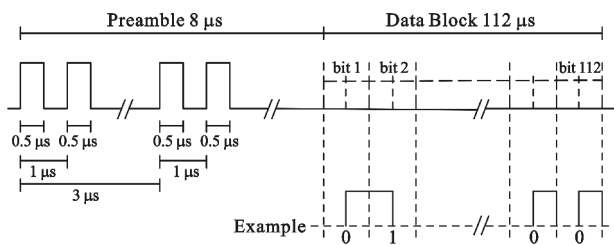


图 1 ADS-B(1090ES)信号格式
Fig. 1 Signal format of ADS-B(1090ES)

对于接收的每个脉冲,用标准脉冲与其相关,即匹配滤波。脉冲相关后呈单峰形状,其峰值点可以作为脉冲的到达时间。文献[6]直接利用前8 μs 进行匹配滤波检测报头,其定义为

$$r_{xy}(m) = E[x_n y_{n-m}^*] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n y_{n-m}^* \quad (1)$$

式中: x_n 为参考序列; N 为序列长度; y_n 为接收的信号序列。文献[7]对此方法进行了分析,认为该方法有明显缺陷,只要接收到的信号有足够高的能量,相关结果就会有峰值出现。由于目标有远有近,发

射功率也有差异,所以即使只有一个单脉冲,只要其信号电平足够,相关结果也能比电平较低的 ADS-B 报头相关结果更强,所以难以用固定阈值来判定相关峰以确定报头的出现。

该方法对于能量较高的 A/C 应答也会有相关峰出现,基本不具有抗 A/C 应答干扰的能力。文献[8]提出了利用阵列天线及信道化技术以降低各种信号相互之间的干扰,但其成本及难度大大提高。对于采用单天线进行全向接收的设备来说,需要寻求其他方法。

文献[5,7,9-10]皆采用基于脉冲位置及上升沿的检测方法,先对每个脉冲单独检测,再对 4 个脉冲进行协同判断,以判定报头的存在。该类方法不失为一种较好的报头检测方法,但验证的过程繁琐,尤其是当数据块前 5 位(表明该报文的格式,Down-link Format,DF)受到干扰导致 DF 验证失败而致使报文丢失。

本文针对上述检测方法的不足,同时汲取其优点,提出基带归一化的互相关报头检测方法。

3 基带归一化的互相关报头检测方法

直接匹配滤波检测方法的不足主要在于没有对信号脉冲电平进行归一化处理,导致相关峰很大程度取决于其信号电平的高低,以至于在高电平脉冲时出现虚警。如果将信号电平先进行归一化处理再做互相关检测将有效地避免这一问题。

另外,互相关检测是从整体上对信号和标准报头的匹配程度进行评估,而不仅仅依靠报头的部分特征(如脉冲位置、上升沿),还包括下降沿、脉冲宽度、非脉冲区等特征。这使得基于基带归一化的互相关报头检测方法相对于基于脉冲位置及上升沿的检测方法更为全面和稳定。这就是本文中所提出的检测方法的思路,如图 2 所示。

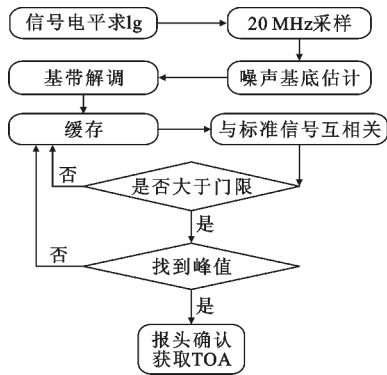


图 2 互相关报头检测流程图
Fig. 2 Preamble correlation detection flow chart

首先对信号电平求取 $\lg$ 值(二次雷达下行链路信号检测的标准做法,参见文献[5],该处理方法有利于脉冲检测),得到20 MHz的数据率;再对噪声基底进行估计,得到脉冲检测门限;对信号电平根据脉冲检测门限作归一化处理;缓存解调后的“0、1”数字序列与标准序列作互相关;判定相关值是否达到门限,并寻找峰值;当相关值满足报头检测条件时,输出报头确认脉冲、同步信号并获取信号到达时间(Time of Arrival, TOA)值。

为了降低突发信号对噪声基底估计的影响,在估计噪声基底时采用循环迭代的方式。每一个循环都进行多批次的抽样,去除抽样值较大的几个批次的的数据后作平均作为该循环的噪声基底估计值,若其小于已估计出的噪声基底,则将噪声基底的值更新至该值。该估计方法保证了在多次循环后噪声基底的估计接近真实的噪声基底。

3.1 基带信号归一化

基带信号归一化具体是指将脉冲存在的地方量化为1,无脉冲量化为0。

基带信号归一化最关键的是量化门限的设定,设定好门限后,当信号电平高于门限即量化为1,低于门限即量化为0。门限取决于噪声基底的大小,故应首先估计出噪声基底。噪声基底是在没有脉冲的地方取足够数量的数据作平均得到。参考国际标准^[5]及文献^[7],将4个脉冲信号电平平均值减去4 dB作为量化门限。

3.2 互相关检测

互相关检测的公式同式(1),不同的是 x_n 的取值仅取1和0这两个值。当接收到一个 ADS-B 信号时,经过和标准序列作互相关处理后将出现一个相关峰,检测出相关峰可以判断信号的存在,检测相关峰的位置可以得到信号的到达时间。

实现过程:信号电平经归一化后进入长度为162的移位寄存器(报头的长度为8 μ s,时钟为20 MHz,可采出160个点,但还需前一个时刻和后一个时刻以判断峰值的情况),如图3所示。

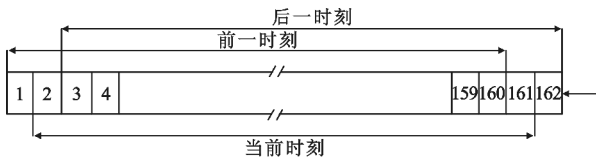


图3 互相关检测取值范围

Fig. 3 The value range of correlation detection

在时钟的驱动下,移位寄存器每移入一个值都计算前一时刻(1~160)、当前时刻(2~161)以及下一时刻(3~162)的相关值,当其满足当前相关值大于检测门限、前一个相关值小于等于当前相关值且当前相关值大于下一个相关值这两个条件时,判定报头存在,并且将此时当作信号的到达时间。第一个条件保证了出现了S模式报头,第二个条件保证了相关峰的唯一性。

合理设置检测门限将直接影响信号检测性能。理论情况下,接收的报头和预存的标准序列的相关值应为160,而接收的非报头部分(ADS-B数据块或A/C应答)和标准序列相关后的最大值为120。考虑到真实信号会受到信道、噪声及干扰等的影响,保证报头检测具有一定容错及抗干扰能力,将检测门限设置为140。设报头长度为 L_p ,基带采样时钟为 F_s ,则检测门限可以通用表示为 $7 \times L_p \times F_s / 8$ 。

判断相关峰,当峰值唯一时,可以取“<、>”“≤、>”“<、≥”或“≤、≥”4种判定规则。但对于峰值不唯一时,仅“≤、>”和“<、≥”组合才能做到既不漏检也不多判。如表1所示,表中“0”表示没有判断出相关峰,“1”表示判断出一个相关峰,其他数字表示判断出相应个数的相关峰,括号中字母表示判断出的相关峰位置。“<、≥”判定法则也有一个不足:在表1中第三种情形下,虽然b(c)点已超过门限但并不是峰值,此时也会在b点判定出相关峰,而“≤、>”规则保证了在峰值的上升期不会误判出峰值,故本文选用“≤、>”组合作为判定规则。

表1 相关峰判断准则对比

Tab. 1 Cross-correlation peak judgement rule comparison				
相关峰	< >	≤ >	< ≥	≤ ≥
	1(b)	1(b)	1(b)	1(b)
	0	1(b)	1(a)	2(ab)
	0	1(c)	1(b)	2(bc)
	0	1(c)	1(a)	3(abc)

4 报头检测性能评估

4.1 报头检测性能仿真

为了验证上述互相关报头检测方法的性能,利用 MATLAB 进行 MonteCarlo 仿真,以检验在不同信

噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 下该方法对信号报头的检测概率。

仿真条件: MonteCarlo 次数 10 000; 噪声类型为加性高斯白噪声 (AWGN); A/D 采样时钟 480 MHz 直接射频采样 (欠采样); 基带数据率 20 MHz; 量化门限为 4 个脉冲电平平均值减去 4 dB; 相关峰门限 140。

实际环境中存在着大量的异步 A/C 应答信号的干扰,文献[7]表明在每秒存在 40 000 次异步干扰时,报头叠加上 0.45 μs 长的 A/C 应答脉冲的个数一般不超过 2 个,其在 20 MHz 数据率下的采样点个数为 18 个,故而在报头受到两个 A/C 脉冲干扰时,相关峰至少为 142 (160 减去 18),超过了相关峰门限,不会出现漏警,所以该方法可以抗两个异步 A/C 脉冲干扰,具有良好的鲁棒性。另外,在实际环境中还存在着数量较多的 S 模式应答信号,若 S 模式应答信号干扰到信号报头,在单天线的情况下目前还没有很好的方法进行处理,所以在本文中只考虑 A/C 应答信号干扰的情况。

在信噪比为 4 时,从基带信号到报头确认的过程如图 4 所示。第一步计算报头脉冲的信号电平,以确定该报文的量化门限;第二步根据量化门限将基带信号量化为“0、1”数字电平,完成归一化;第三步将量化后的采样数组与预存标准序列作互相关,根据相关峰判定法则确认报头存在并提取到达时间。

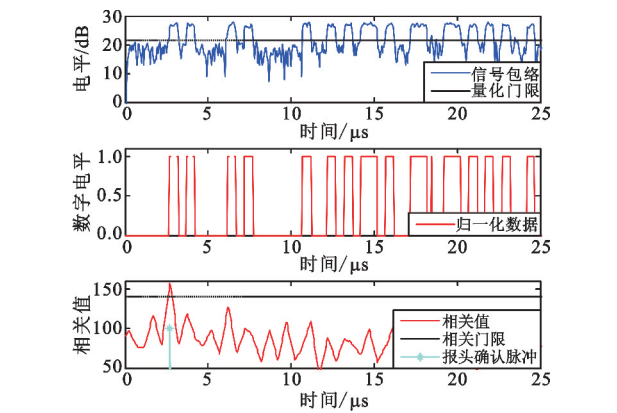


图 4 互相关报头检测仿真

Fig. 4 Preamble correlation detection simulation

判定是否成功检测到报头有两个条件:第一,是否产生了报头确认脉冲;第二,产生确认脉冲的位置是否准确(在 20 MHz 数据率下偏移不超过两个采样点)。以此为依据统计在不同信噪比条件下,该互相关检测方法对信号报头的检测概率和国际标准中推荐的基于脉冲沿的检测方法^[5]的检测概率如图 5 所示。

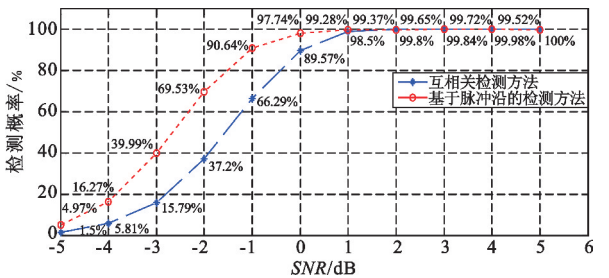


图 5 报头检测方法性能对比

Fig. 5 Performance comparison between different preamble detection methods

仿真结果表明:当信噪比小于 0 dB 时,在相同检测概率下,基于脉冲沿的检测方法比互相关检测方法优 1 dB 左右;当信噪比大于 1 dB 时,互相关检测方法略优于基于脉冲沿的检测方法。

仿真结果分析:

(1) 在信噪比较小时,信号与噪声的差别不大,较多的噪声会被量化错误,导致相关峰在门限以下或者相关峰的位置有较大的偏移而造成检测失败,而基于脉冲沿的方法只需要在 4 个脉冲中成功检测出两个具有合理位置关系的脉冲上升沿就可以认为是检测成功,故而基于脉冲沿的报头检测成功率稍大;

(2) 在信噪比大于 1 dB 时,被错误量化的噪声减少,相关峰基本上都能超过门限,从而得到正确检测,而如果被量化错误的噪声紧靠在脉冲前沿,导致无法正确检测到具有合适位置关系的两个脉冲前沿,则会导致报头检测失败,故而互相关检测方法的检测概率稍高。

值得注意的是,基于脉冲沿的检测方法仅利用脉冲位置及脉冲上升沿的信息检测脉冲存在,容易导致虚警,需要继续确认报头的正确性,这些确认过程将导致检测死区,可能造成对真正报头的漏检;在这一点上,互相关检测方法隐含地利用了脉冲位置、上升沿、下降沿、脉冲宽度等多个信息可直接准确判定报头的出现,基本没有虚警(见图 5,信噪比大于 4 dB 后,报头的正确检测率为 100%),从而增加了在真实环境中的检测概率。

4.2 真实环境中的检测性能

在真实环境中,ADS-B 报头检测将面临同频干扰、信号多径等多个问题。尤其在飞机数量的较多的地区,其受干扰的可能性以及信号混叠的概率也会大大增加。为充分验证该检测方法的实用性,我们选择在航空运输非常繁忙的长三角地区进行接收实验,接收站在绍兴。实验结果显示飞机的航迹十

分连续。

接收采用两套设备:一套自研 ADS-B 接收机和一套国际主流民用 ADS-B 接收机(SBS-3)。两套接收机共用一根全向天线,利用一分二的功分器连接。分别记录接收到并成功解码出的报文,选取同一时段(时长 1 h)记录的数据进行统计分析。自研接收机共解码出 480 337 条报文,SBS-3 接收机共解码出 473 756 条报文。试验结果表明:自研接收机的接收效果略优于 SBS-3 接收机,且在 200 km 范围内,只要信号不被遮挡,且目标处于视距范围内,对目标的监视可以达到至少 1 s 输出一个点,形成非常连续的航迹。

5 结束语

本文提出的基带归一化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;在真实接收条件下,同样也有很好的检测能力(实际接收效果优于 SBS-3),不失为一种简洁可靠且性能优异的报头检测方法。该方法和主流的基于脉冲位置及上升沿的报头检测方法相比互有优势,但在本文中并没有评估两种方法抗同频干扰(包括 A/C/S 应答、ADS-B 等)、多径干扰的能力。下一步将考虑两者的抗干扰能力,并汲取各自的优点,研究具有良好的低信噪比检测性能的抗干扰检测算法。

参考文献:

- [1] 王鲁杰. 中国民航应优先发展 ADS-B 应用技术[J]. 中国民用航空,2006(1):27-30.
WANG Lujie. China should put priority on development of ADS-B technology[J]. China Civil Aviation, 2006(1):27-30. (in Chinese)
- [2] 张军. 现代空中交通管理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
ZHANG Jun. Modern air traffic management[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 王洪. 1 030/1 090 MHz 频谱的共享与干扰问题综述[J]. 电讯技术,2013,53(1):105-109.
WANG Hong. Overview of sharing and interference at 1 030/1 090 MHz[J]. Telecommunication Engineering, 2013,53(1):105-109. (in Chinese)
- [4] 张尉. 二次雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
ZHANG Wei. Secondary radar principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [5] RTCA DO-260B, Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter ADS-B and TIS-B[S].

- [6] HARMAN W, GERTZ J, KAMINSKY A. Techniques for improved reception of 1 090 MHz ADS-B signals[C]//Proceedings of 17th AIAA/IEEE/SAE Digital Avionics Systems Conference. Bellevue, WA: IEEE, 1998: G25/1-G25/9.
- [7] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚, 等. S 模式前导脉冲检测方法[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(4): 486-489.
WANG Hong, LIU Changzhong, WANG Xuegang, et al. Methods to detect Mode S preamble[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(4): 486-489. (in Chinese)
- [8] GALLATI G, GASBARRA M, PIRACCI E G. Decoding techniques for SSR mode S signals in high traffic environment[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Radar Conference. Arlington, Virginia, USA: IEEE, 2005: 383-386.
- [9] 许哲, 康永. 一种改进的 ADS-B 信号前导脉冲检测算法[J]. 电子科技, 2013, 26(6): 134-136.
XU Zhe, KANG Yong. An improved ADS-B signal preamble pulse detection algorithm[J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(6): 134-136. (in Chinese)
- [10] 郑植, 练马林, 张超. 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(6): 66-70.
ZHENG Zhi, LIAN Malin, ZHANG Chao. Research and realization of preamble detection arithmetic in mode S reply processing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(6): 66-70. (in Chinese)

作者简介:



张涛(1986—),男,四川蓬溪人,2011 年于海军航空工程学院获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为信号检测、估计与目标识别、雷达探测技术;

ZHANG Tao was born in Pengxi, Sichuan Province, in 1986. He received the M. S. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2011. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns signal detection, estimation and target recognition and radar detection technology.

Email: radarads@sina.com

唐小明(1974—),男,浙江淳安人,博士,副教授、硕士生导师,主要研究方向为信号检测、估计与目标识别;

TANG Xiaoming was born in Chun'an, Zhejiang Province, in 1974. He is now an associate professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. His research concerns signal detection, estimation and target recognition.

宋洪良(1990—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为雷达探测技术。

SONG Hongliang was born in Shaoxing, Zhejiang Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns radar detection technology.