

S模式前导脉冲检测方法

王洪^{1,2}, 刘昌忠¹, 汪学刚², 吴宏刚¹

(1. 中国民用航空局第二研究所 成都 610041; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】研究了A/C Fruit强干扰环境下S模式前导脉冲增强检测技术。分析了前导脉冲检测的依据和作用, 将前导脉冲检测分为初检、有效性确认和参考电平产生3个步骤。在初检中采用前沿检测法和脉冲匹配检测法获得脉冲位置, 对脉冲位置作位置匹配以初步确认前导脉冲的出现, 用S模式数据位特有的脉位调制进行有效性确认, 统计4个子脉冲在2 dB内电平最多的点作为参考电平输出。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词 自动广播相关监视; 混扰; S模式; 多点定位

中图分类号 TN958.96

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.002

Methods to Detect Mode S Preamble

WANG Hong^{1,2}, LIU Chang-zhong¹, WANG Xue-gang², and WU Hong-gang¹

(1. The Second Research Institution of CAAC Chengdu 610041;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Enhanced techniques to declare Mode S preamble pulses in high Mode A/C fruits environment are discussed in this paper. Basis and roles to detected preamble are analyzed first. The improved preamble detection algorithm includes three steps: preamble detection, preamble validation, and reference level generation. Leading edge detection method and pulse matching method are employed to acquire pulse positions, then detect preamble by position matching. The PPM encoding used in the data block is difficult to generate with Mode A/C fruit replies. Counting the sample amplitudes within 2 dB in four sub-pulses, the reference level is the most amplitude. At last, efficiency of algorithms is verified by simulation results.

Key words automatic dependent surveillance-broadcast(ADS-B); fruit; mode S; multilateration

近年来, 欧美发达国家投入巨资研究先进的机场场面活动引导和控制(A-SMGCS)系统, A-SMGCS代表了未来民航空中交通管制的发展趋势。多点定位(MLT)和ADS-B是实现A-SMGCS监视功能的核心技术, 将与现有二次雷达系统协同工作并进一步取代二次雷达系统^[1-5]。S模式是3种系统的主要协议, 但我国现役的二次雷达系统仍主要采用A/C模式, 并将持续较长的时间。A/C模式与S模式信号载频均为1 090 MHz, 对S模式信号形成很强的干扰, MLT和ADS-B系统承受A/C Fruit干扰的能力要求达到上万次/s^[1]。A/C Fruit干扰直接影响S模式的检测和数据解码, 本文研究强干扰环境下S模式的前导脉冲检测技术。前导脉冲检测用于确认S模式信号的出现, 获得信号的到达时间(TOA), 并提供数据解码所需的基本参数。

1 前导脉冲检测的依据

S模式的应答信号如图1所示^[6-8], 前8.0 μs为前

导脉冲, 由位置固定的4个子脉冲组成, 脉宽为0.5 μs, 后56/112 μs为脉位调制(PPM)的数据块。数据块为56 bit或112 bit, 每个bit周期为1 μs, 包含两个chip, 前一个chip为高电平表示而后一个chip为低电平用数据“1”表示, 后一个chip为高电平而前一个chip为低电平用数据“0”表示, 高电平chip为“占位”, 低电平chip为“空位”。脉冲宽度误差为0.05 μs, 上升沿为50~100 ns, 下降沿为50~200 ns。A/C模式信号首尾为框架脉冲, 中间为13位数据脉冲, 有脉冲数据为“1”表示, 否则为“0”, 脉宽为0.45 μs, 周期为1.45 μs, 如图2所示。

前导脉冲检测的作用为:

- (1) 确认是否有S模式信号出现;
- (2) 估计信号的到达时间(TOA估计是MLT系统的关键, 要求达到ns量级);
- (3) 获取信号的参考电平, 根据该电平确定数据解码的动态阈值, 是数据解码的基本依据。

收稿日期: 2008-11-14; 修回日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736045); 自然科学基金面上基金(60672176)

作者简介: 王洪(1974-), 男, 博士后, 主要从事多点定位、数字接收机和高速实时信号处理方面的研究。

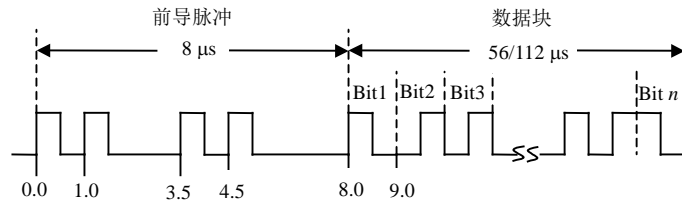


图1 S模式应答信号

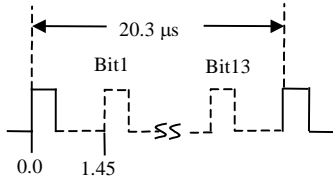


图2 A/C模式应答信号

前导脉冲由4个子脉冲组成,因此首先应从噪声中检测到有效脉冲。根据噪声基底和脉冲有效宽度确定:无达到信号的一段时间窗内的均值作为噪声基底;大于门限的有效时间 $0.3\ \mu\text{s}$ 以上的脉冲则认为有效脉冲。

确定前导脉冲的重要环节是4个有效脉冲的位置匹配,脉冲的位置由脉冲的特征点描述,可以是脉冲的上升沿、下降沿或中点。脉冲中点由上升沿和下降沿计算得到,下降沿可能长达 $200\ \text{ns}$,所以,一般用上升沿描述脉冲出现的位置。判定上升沿的一般方法是延迟比较,结果大于一定阈值则判定为上升沿,阈值的确定与采样率和前沿允许时间有关,参考值为 $48\ \text{dB}/n$, n 为每 μs 的采样点数。按照ICAO规定,S模式前沿为 $50\sim 100\ \text{ns}$,信号 $3\ \text{dB}$ 、带宽为 $2.6\ \text{MHz}$,若采样率为 $10\ \text{MHz}$ (本文针对该采样率讨论),上升沿小于一个采样周期,则前沿位置由跨越上升沿的两个采样点确定。对这样低的采样率,延迟比较可由前向差分替代。位置匹配指4个上升沿位置是否与图1中的位置相符合,考虑到各种因素的影响,允许位置变动一个采样点。

目前常用的检测方法是比前面的采样点幅度大 $6\ \text{dB}$ 以上或比后面的采样点低 $6\ \text{dB}$ 以下的采样点为前沿位置,4个前沿位置中有两个以上与S模式协议匹配,即确认S模式信号的出现,同时允许前沿位置错位 ± 1 个采样点,然后以第一个脉冲的前沿位置为信号达到时间,其电平为参考电平,比参考电平低 $6\ \text{dB}$ 为后续解码的动态阈值。在检测到前导脉冲后,后续一段时间为检测的死区(dead time),如Extended Squitter S模式为 $130\ \mu\text{s}$ 。

在没有干扰的情况下,上述方法简单可行,但是当前导脉冲段受到干扰,尤其是A/C模式的Fruit干扰时,检测的正确率显著降低,后续数据解码也

受到影响,具体问题有:(1) A/C脉冲被误检测为S模式前导脉冲,产生的dead time使后面真实的S模式前导脉冲丢失;(2) A/C脉冲重叠在前导脉冲上,因允许前沿位置变动 ± 1 个采样点,可能导致前导脉冲位置的判定发生1个采样点的偏移,进而影响数据位的解码正确率和解码置信度(数据位1 bit共10个采样点,高电平脉冲仅5个采样点),仿真实验中这种情况时有发生;(3) 第一个脉冲叠加了A/C脉冲,造成参考电平和动态阈值抬高,在数据解码时,低于阈值的有效采样点将被忽略。针对这些问题,讨论改进的S模式前导脉冲检测方法。

2 改进的前导脉冲检测方法

2.1 改进的前沿检测方法^[1]

前沿位置判定和位置匹配是前导脉冲的两个基本环节。目前是以幅度增加 $6\ \text{dB}$ 以上的采样点为脉冲前沿,而噪声信号中就有不少符合该要求的采样点,因此,本文引入噪声基底联合判决。对信号作前向差分,取出大于 $4.8\ \text{dB}$ 的采样点,若该点低于噪声基底,则抛弃。有效脉冲的脉宽至少 $0.3\ \mu\text{s}$,因此,每个脉冲须有3个以上的采样点大于噪声基底,对持续时间不足3个采样点的脉冲同样抛弃。

由于辐射源在 $120\ \mu\text{s}$ 内发射的脉冲串有相对稳定的前后沿等特性,因此要求前沿判定的变动方向固定,要么都往前移动一个采样点,要么都往后移动一个采样点,在位置匹配中减少数据的变动范围。只有A/C模式同时影响4个脉冲前沿时,前沿位置判定才会出错,但A/C模式脉冲间隔为 $1.45\ \mu\text{s}$,与前导脉冲间隔差异较大,发生这种情况的几率很小。若要求4个脉冲前沿点均匹配,只要有一个点受到干扰或误判,就可造成整个信号的漏检,因此只需3点匹配,即认为初检有效。多次的仿真实验证明该方法能将检测正确率提高几个百分点。当然,3点匹配增加了初检的不确定性,该问题通过有效性确认来保证:(1) 前向差分 $+4.8\ \text{dB}$ 阈值判决(上升沿检测);(2) 噪声基底比较;(3) 脉宽限制;(4) 位置匹配,允许单向偏差1个采样点,3点匹配则确认;(5) 有效性确认;(6) 参考电平和动态阈值输出。

2.2 脉冲匹配检测方法

脉冲位置是前导脉冲检测的关键,对脉冲位置的求解可借助相关技术。由于S模式应答信号遵循固定的协议,脉宽均为0.5 μs ,可以用同样的脉冲与信号相关,即匹配滤波,单个脉冲的时域匹配滤波与雷达信号处理中的脉压类似,后者采用的线性调频信号具有矩形频谱形状,其频域脉压即频域相关,因此脉冲相关后也将出现单峰形状,峰值点作为该脉冲的TOA时间。文献[10]指出用前8 μs 匹配滤波直接检测前导脉冲,该方法有明显缺陷。相关的定义为:

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

式中 x_n 为参考序列; N 为长度; y_n 为检测信号实序列。相关就是延迟后的乘加运算,只要参考信号高电平段对应有足够的能量信号,相关结果中就有峰值出现。目标有远有近,S模式应答信号电平有高低,难以用固定阈值判决峰值的方法确认前导脉冲的出现,即使只有一个单脉冲,若其电平足够高,与8 μs 参考信号相关的结果也可能强于电平较低的S模式应答信号在前导脉冲段相关的结果。对整个前导脉冲匹配滤波没有利用4个脉冲特有的位置间隔,在出现A/C脉冲干扰时检测完全失效。

本文将相关用于单个脉冲,只用0.5 μs 宽度的脉冲作匹配滤波,以此确定单个脉冲的位置,再用位置匹配的方法确认前导脉冲的出现。首先用0.5 μs 的参考脉冲与整个信号相关,S模式信号中的子脉冲与参考脉冲相关的结果为三角形,设定阈值判决各子脉冲相关峰的上下边界(由于相关积累了信号能量,用信号的噪声基底作阈值即可),在上下界内的最大值作为脉冲位置。为了抑制孤立噪声点的影响,对大于阈值的点设定宽度限制,若少于两个连续点则抛弃。具体步骤为:

(1) 参考脉冲相关; (2) 阈值判决和噪声点抑制,检测峰值位置; (3) 位置匹配,允许单向偏差1个采样点,3点匹配则确认; (4) 有效性确认; (5) 参考电平和动态阈值输出。

2.3 有效性确认和参考电平产生

S模式信号的特征不仅体现在前导脉冲上,数据块的PPM调制也是其特征之一,S模式的数据为PPM调制,要么在前半周期有脉冲,要么在后半周期有脉冲,与A/C模式差异大,所以用数据位作有效性确认可以增加前导脉冲检测的可靠性,尤其适合于有A/C干扰的情况。文献[1]指出用前5个数据位作有效

性确认,若5位均有效则前导脉冲检测有效。在有A/C干扰的情况下,由于A/C信号时长为20.75 μs ,在干扰前导脉冲的同时容易出现在前5个数据脉冲中,若A/C脉冲出现在数据位的“空位”上,则出现确认失败。本文采用“3+2”确认方法,即用紧随前导脉冲的前3个数据位和最后两位作有效性确认,5位中4位以上有效则检测有效。A/C脉冲的周期为1.45 μs ,脉宽为0.45 μs ,前3个数据中只能干扰一个数据位的确认,前后同时受到干扰的概率很小。有效性确认方法是取数据位两个chip的中点,一个点大于另一个点6 dB且“占位”chip的中点大于噪声基底,则该数据位有效。

参考电平是接收信号的功率估计,按照S模式协议的规定,一次发射的S模式信号的顶部不平坦度不大于2 dB,因此在检测到前导脉冲以后,须输出参考电平作为数据解码的重要依据。现有方法是以第一个脉冲电平作参考电平,在有干扰的环境下不再适用。若干扰重叠在第一个前导脉冲上,参考电平显著变化(尤其是强干扰),输出的动态阈值增加,数据块的“占位”脉冲也可能低于该阈值,使数据解码出错。改进的方法以4个前导子脉冲电平作参考,选择所有有效脉冲上升沿后的两个采样点,然后对每个幅度统计 ± 2 dB内点数,点数最多的采样点作为最终的参考电平,动态阈值比参考电平低6 dB。

3 算法仿真

设采样率为10 MHz(采样率变化时,部分阈值需作调整),脉冲上升沿为30~50 ns,在无干扰情况下仿真,检测10 000次,信噪比为10 dB,两种方法的正确率为100%。

对干扰环境的分析为:设干扰密度为40 000次/s,各A/C Fruit信号相互独立,在1 s内服从均匀分布。首先将干扰简化为40 次/ms,可以计算出S模式112 bit信号上重叠2~12个干扰的概率分别为0.025 2、0.061 5、0.109 6、0.152 0、0.170 7、0.159 7、0.1269、0.086 9、0.051 9、0.027 3、0.012 7,共98.44%,而前导脉冲受到干扰的概率为8/120=6.67%,所以,在前导脉冲段固定叠加1~2个A/C信号比较合理。

因此,干扰的模拟方法为:在前导脉冲段叠加A/C应答信号,信号幅度、载频偏差、相位和数据位随机变化,延迟时间从S模式信号前20 μs 起,在30 μs 内服从均匀分布,在调制后的射频段叠加,再作解调和抽取滤波。信噪比从2~20 dB变化,实验10 000次的结果如图3所示。其中Fruit1表示在前导脉冲段固定叠加一个A/C信号,Fruit2表示在前导脉冲段固

定叠加两个A/C信号,一个干扰时前沿检测方法的正确率约98%,脉冲相关方法约93%,两个干扰时正确率降至约95%和86%。检测方法受信噪比影响的趋势不明显,相关方法的正确率低于前沿检测方法,两种方法的比较如表1所示。图3是前导脉冲叠加了1~2个A/C信号的结果,实际上S模式信号受到A/C干扰且发生在前导脉冲段的事件按一定概率出现,这时的正确率将高于图3的仿真结果。前沿检测方法的可靠性可以通过后沿检测补充,因为S模式脉冲脉宽为0.5 μs,而A/C Fruit信号的脉宽为0.45 μs,受到干扰后,要么前沿变动,要么后沿变动,不会同时受到影响。

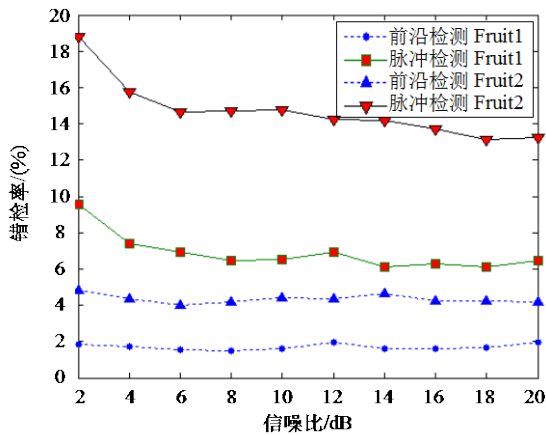


图3 前导脉冲检测的错误率(10 000次检测)

表1 两种方法比较

方法	优点	缺点
改进的前沿检测方法	脉冲边沿位置准确,持续时间短,受到干扰的概率较低。	脉冲被干扰后,边沿位置由干扰信号确定,或者出现两个以上的上升沿或下降沿,受滤波器平滑、过冲、噪声因素等影响,边沿可能展宽。
脉冲匹配方法	对整个脉冲进行匹配,受脉冲边沿影响小。	当A/C脉冲与前导子脉冲重叠或邻接时,若A/C干扰的功率高于S信号,则导致相关峰值平移,位置匹配出现错误。

4 结束语

接收S模式应答信号并正确解码是二次雷达系统、ADS-B系统和MLT系统的基本功能,接收信号的处理包含前导脉冲检测,数据解码和数据校验3个步骤,在高密度A/C Fruit干扰的环境下,目前的方法正确率和可靠性显著下降。前导脉冲检测的关键是准确估计4个子脉冲的脉冲位置,上升沿检测和脉冲匹配都是为了单独估计出子脉冲的达到时间。位置匹配充分利用了前导脉冲的特征,若要求4个位

置精确匹配,只要有一个脉冲被干扰变形,检测就会失败;若放宽位置变动容限,A/C干扰又容易形成错误的前导脉冲判决,实际应用中需要折中考虑。一般在位置匹配中适当放宽约束,利用数据块的有效性确认防止错检。MLT系统的TOA估计精度很高,采样率远大于10 MHz,此时前沿采样点不唯一,对脉冲匹配方法而言,参与运算的点数增加,匹配运算会提高信噪比,有利于脉冲位置的判定。

参 考 文 献

- [1] RTCA. DO-260A: 1090 minimum operational performance standard for ADS-B and TIS-B[S/OL]. [2008-11-14]. <http://www.rtca.org>.
- [2] RTCA. DO-242A: ADS-B minimum aviation system performance standard[S/OL]. [2008-11-14]. <http://www.rtca.org>.
- [3] 吕小平. MDS技术在我国民用航空的应用探讨[J]. 空中交通管理, 2006, (9): 4-11.
LÜ Xiao-ping, Discussions on the application of MDS technology in China civil aviation[J]. Air Traffic Management, 2006, (9): 4-11.
- [4] 包 悦. ADS-B空中监视技术的发展方向[J]. 空中交通管理, 2007, 6: 17-18.
BAO Yue. ADS-B development trends of surveillance technology[J]. Air Traffic Management, 2007, (6): 17-18.
- [5] 方 愔. S模式ADS-B系统[J]. 航空电子技术, 1999, (4): 6-9.
FANG Yin. Mode S ADS-B system [J]. Avionics Technology, 1999, (4): 6-9.
- [6] ICAO. Surveillance radar and collision avoidance systems [S/OL]. [2008-11-14]. <http://www.icao.int>.
- [7] ICAO. Manual on the secondary surveillance radar system[S/OL]. [2008-11-14]. <http://www.icao.int>.
- [8] 王 洪, 刘昌忠, 汪学刚. 二次雷达S模式综述[J]. 电讯技术, 2008, 48(7): 113-118.
WANG Hong, LIU Chang-zhong, WANG Xue-gang. Mode S for secondary surveillance radar (SSR): an introduction and overview[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(7): 113-118
- [9] 钟 琼, 吴援明, 黄成芳. 二次雷达系统干扰等问题的解决方法[J]. 电讯技术, 2005, 45(2): 138-142.
ZHONG Qiong, WU Yuan-ming, HUANG Cheng-fang. Solutions to some problems in a secondary surveillance radar system[J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(2): 138-142.
- [10] GALATI, G, GASBARRA M, PIRACCI E G. Decoding techniques for SSR mode S signals in high traffic environment[C]//The 2005 European Microwave Conference. Rome: [s.n.], 2005.