

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.04.006

引用格式:王洪,孙清清,李华琼,等.扩充 1090ES 数据链容量的相位调制技术[J].电讯技术,2015,55(4):385-389. [WANG Hong, SUN Qingqing, LI Huaqiong, et al. Techniques to Increase 1090ES Capacity Based on Phase Modulation[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(4):385-389.]

扩充 1090ES 数据链容量的相位调制技术*

王洪^{1,**}, 孙清清¹, 李华琼², 黄忠涛², 何东林²

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731; 2. 中国民航局第二研究所, 成都 610041)

摘要:对广播式自动相关监视(ADS-B)系统的 1090ES 脉位调制信号做脉内调相,可在不增加发射次数、不占用新的频段、不影响现有 ADS-B 系统运行的情况下增加信号的数据传输能力。论证了两种可能采用的 1090ES 数据链扩容方法,说明了选择相位调制实现扩容的原因。讨论了相位调制扩容 1090ES 信号需解决的几项关键技术,包括扩容信号的调制,信号的接收、解调和解码,信号的同步,数据的校验码设计,可行性及安全性评估。针对多发单收的突发通信特点,提出了一种按偏差分区的载波粗同步方法;针对相位突变引起的频谱扩展问题,提出了一种相位线性过渡的解决方法。

关键词:空中交通管制;广播式自动相关监视;相位调制;扩容

中图分类号:TN962 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)04-0385-05

Techniques to Increase 1090ES Capacity Based on Phase Modulation

WANG Hong¹, SUN Qingqing¹, LI Huaqiong², HUANG Zhongtao², HE Donglin²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. The Second Research Institution of CAAC, Chengdu 610041, China)

Abstract: Encoding phase information on 1090 MHz extended squitter (1090ES) pulse position modulation (PPM) signals of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) systems is a promising technical method to increase capacity without extra transmissions, additional frequency band and any influence on current ADS-B systems. Two approaches to increase 1090ES capacity are compared, which explains the reasons to choose phase modulation approach. Several key techniques are indicated in this paper, including phase modulation on PPM, receiving, demodulation and decoding, synchronization, design of error correction code, assessment of feasibility and safety. A carrier synchronization method is proposed for single-input-multiple-output (MIMO) burst communication according to different deviation. Linear transition of phase between adjacent symbols is introduced to restrain spectrum expanding for phase mutation.

Key words: air traffic control (ATC); automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); phase modulation; capacity increase

1 引言

随着空中交通容量的快速增长和新技术的出现,空中交通管制正经历从传统航空交通管制雷达

信标系统到广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) 的变革。在欧美发达国家, ADS-B 得到了广泛应用。美国将

* 收稿日期:2014-12-26;修回日期:2015-02-15 Received date:2014-12-26; Revised date:2015-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61139003);民航科技创新引导基金项目(mhrd20130110)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61139003); The Innovation Guide Foundation of Civil Aviation Science and Technology (mhrd20130110)

** 通讯作者: whtyou@163.com Corresponding author: whtyou@163.com

ADS-B 作为其 NextGen 的重要组成部分,在 2014 年完成了第二个阶段的计划,在全美范围内铺设了 ADS-B 地面设备,全面支持 ADS-B OUT 服务,到 2020 年将增加 ADS-B IN 等功能^[1]。欧洲则计划到 2017 年实现 ADS-B 的全面应用,以满足欧洲空管一体化计划 SESAR(Single European Sky ATM Research)的需求^[2]。《中国民用航空 ADS-B 实施规划》也确定,到 2015 年底,在全国范围内实现 ADS-B 地面设施的布局^[3]。在 ADS-B 逐渐应用的过程中,出现了新的问题和需求。一方面,二次雷达、ADS-B、多点定位系统、空中交通防撞系统和敌我识别器均使用 1090 MHz 频率,导致频谱拥塞^[4]。另一方面,ADS-B 的应用需求不仅包含监视功能,而且发展到导航和通信功能。除广播经度、纬度、高度、速度、识别码和飞行意图等信息外^[5],还期望发送航行情报、交通状况、机场情报通播等上行广播数据和部分机载座舱显示器的下行信息。但是,1090ES(1090 MHz Extended Squitter)信号长度 120 μs ,每次只能传输 112 bit 信息,每秒广播次数不超过 6.2 次^[6],传输能力有限。因此,在 1090 MHz 特殊的频率上扩充容量,不增加 1090ES 信号广播次数的条件下传输更多信息具有十分重要的意义。

2 扩容方法论证

ADS-B 1090ES 数据链扩容的前提是:不改变信号的工作频点;不增加信号带宽;不影响现有 ADS-B 系统的安全运行;甚至不增加额外的机载或地面设备,而仅在原有设备上增加新的功能。

在上述的前提下,扩容的方法选择有限。第一种容易实现的方式是增加广播频率,突破 6.2 次/秒的限制。当广播次数为 6.2 次/秒时,信号长度为 120 μs ,占空比仅 0.074 4%。如果将广播次数提高到 $6.2 \times 4 = 24.8$ 次/秒,新增加的发射信号与原信号依次交替发送不同信息,则可传输额外 3 倍的信息,而占空比为 0.298%。

但是,上述占空比是对一部 ADS-B 发射机计算的结果,实际上,ADS-B 地面接收机作用距离一般在 300 km 以上,如我国九州集团的 ADS-B 地面站作用距离为 350 km,可同时接收到多架飞机的 1090ES 信号^[7]。《中国民用航空 ADS-B 实施规划》中要求 ADS-B 数据站可同时处理 128 路信号、1024 个目标的航迹,德国研制的 Quadrant ADS-B

接收机目标容量大于 1500 个^[8]。仅以 128 个目标为例,按 6.2 次/秒和 24.8 次/秒广播,若 1090ES 信号相互不重叠,占空比分别为 9.5% 和 38.1%。但每架飞机的广播时刻相互独立,无法实现信号的依次轮流广播,信号间相互重叠的概率很大,这种同频干扰容易导致高误码率,甚至接收机的检测、解调和解码失效。并且还有 TCAS、二次雷达应答信号等的 1090 MHz 同频干扰,1090 MHz 频点将十分拥挤。从该频点使用频次的角度,增加广播次数与增加飞机数量效果相同。

为了解决上述矛盾,可以采用一些折衷的方法。一是干扰移除策略(Interference Mitigation Strategies),典型的方法是在地面站使用扇区天线,如六扇区天线,每个天线只接收 60° 范围,从而减少 FRUIT 发生的概率。二是功率控制,限制广播信号的功率大小,降低作用距离,目的也是减少发生 FRUIT 的概率,但这与 ADS-B 广播信号、地面保持监视的原旨相背离,只能适用于一些空-空应用。三是限制扩容的飞机范围,只对有需要的飞机增加广播频率。此外,抗干扰技术也是有效的方法,例如,采用阵列天线,用投影算法或扩展的投影算法,可将混叠的 2~3 个 S 模式信号分离出来^[9]。

第二种扩容的方法是对 1090ES 信号进行相位调制,将增加的信息调制到子脉冲的相位上。S 模式的应答信号^[10]前 8.0 μs 为前导脉冲,后面为脉位调制(Pulse Position Modulation, PPM)的数据块,数据块为 112 bit,每个 bit 周期 1 μs ,包含两个 chip(占位和空位),前一个 chip 高后一个 chip 低为数据“1”,后一个 chip 高前一个 chip 低为数据“0”。ICAO 标准规定的 1090 ES 数据链载频为 1090 MHz,一个 0.5 μs 的子脉冲内约有 545 个载波周期,目前数据链使用的 PPM 调制方式采用连续相位的载波周期,载波相位并没有携带任何数据信息,基于脉冲相位调制的方法可在不增加频点使用和广播次数的前提下提高信息传输容量。因此,本文选择基于脉冲相位调制的方法对 1090ES 数据链进行容量扩充。

常用的相位调制的方式有 BPSK、QPSK、8PSK、16PSK 等。调相的相位越多,可携带的信息就越多:如使用 QPSK 调制方式每个数据位携带 2 bit 的相位信息,则每一帧信号增加了 224 bit 信息,每秒总共传输的信息为 1.388 kbit;如使用 8PSK 调制方式,每个数据位携带 3 bit 的相位信息,则每一帧信号增加了

336 bit 信息,每秒总共传输的信息为 2.083 kbit。但是调相的相位越多,误码率和可靠性也相应下降,因此,调相方式的选择需要在通信性能和传输速率间进行折衷。

3 扩容的关键技术

3.1 扩容 1090ES 信号的调制

扩容信号的调制是一种复合调制方法,第一步是 PPM 调制,对 112 bit 数据做曼切斯特编码,然后进行幅度调制,获得现有的 ADS-B 信号;第二步,对相位调制的信息进行编码(如 8PSK 信号可采用格雷码),然后用于 PPM 信号占位脉冲的脉内调相。前导脉冲和前几位数据脉冲一般不用于数据传输,而作为同步信号和零参考相位。

由于国际民航组织(ICAO)对 1090 MHz 频点的使用有严格限制,信号的 -3 dB 带宽为 2.4 MHz, -6 dB 带宽为 8 MHz,因此相位调制后的频谱展宽也须控制在这个范围内。在没有干扰的情况下,导致脉内调相信号频谱展宽的主要原因是相位突变,主要出现在两个连续占位脉冲的高电平邻接处,即 PPM 数据出现“01”时。因为前一个比特数据为“0”和后一个比特为“1”时,将产生的一个 $1 \mu\text{s}$ 的“宽”脉冲,而码元宽度为 $0.5 \mu\text{s}$,此时相位调制可能造成码元邻接处的相位突变。采用 8PSK 调制时,最大的相位突变是 180° ,如图 1 所示。这种相位突变将导致发射信号的频谱展宽,需要采取适当的措施。

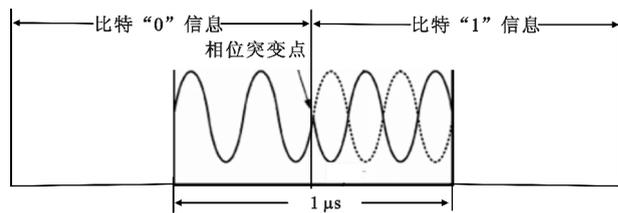


图 1 相位突变示例

Fig. 1 Example of phase change

我们对突变相位采用线性过渡的方法。对 1090 MHz 的载频, $0.5 \mu\text{s}$ 内有 545 个周期,在前一个脉冲的后半段 $0.2 \mu\text{s}$ 和后一个脉冲的前半段 $0.2 \mu\text{s}$ 之间进行相位变化的分段线性过渡。如当相位突变 180° 时,采用 100 个载波周期进行相位过渡,则每个脉冲周期只需要相位过渡 1.8° ,该方法可以很大程度上改善信号的频谱性能。图 2 对比了线性过渡对频谱扩展的改善作用,图中未使用线性过渡的频谱

明显宽于过渡后的频谱。

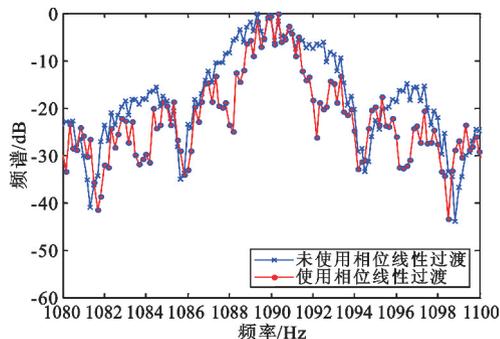


图 2 相位过渡对频谱扩展的改善

Fig. 2 Improvement of phase change on spectrum extension

3.2 扩容 1090ES 信号的接收

1090ES 信号的接收主要完成的内容有:射频部分对信号的放大、滤波和下变频至基带信号,信号的检测,信号的解调和解码。射频部分与现有的接收机类似,但要实现正交下变频。根据前导脉冲的检测和信号长度判决 1090ES 信号的出现,前导脉冲也做了脉内调相,检测针对信号的包络实现。信号的解调和解码则分两部分,从信号包络实现 PPM 信号的解调和解码,而调相信号的解调和解码对 I/Q 两路实现 MPSK 的映射,在解调之前需实现与发射信号的同步。

3.3 扩容 1090ES 信号的同步

ICAO 规定的 1090ES 信号的载频为 1090 ± 1 MHz,且机载信号多普勒频移都可能达到几百甚至几千 Hz,接收端载频的同步必然很大程度上影响信号的解调性能。以 8PSK 调制为例,码元的相位相隔 45° ,偏离 $\pm 22.5^\circ$ 将导致判决错误,占位脉冲宽 $0.5 \mu\text{s}$,计算可知载频偏差不能超过 125 kHz。由于 ADS-B 地面接收机作用面临的 ADS-B 发射机可能达到几十到几百部,发射信号持续时间 $120 \mu\text{s}$,脉内重复频率 $1 \sim 6.2$ Hz,因此,扩容 1090ES 信号是一种特殊的一对多的突发通信,不能采用常规的锁相环实现同步。

由于 1090ES 信号采用固定格式,数据段每 $1 \mu\text{s}$ 内有一个码元,码元的位置可由 PPM 脉冲确定,因此,调相信号的时间同步借助 PPM 的前导脉冲和数据段的占位脉冲来实现。前导脉冲和前几位数据脉冲做导频和相位同步使用,提供零参考相位。

载波同步采用特殊的方法。首先估计信号的载波频率,精度达到 kHz 或 10 kHz 量级即可。将 1090 ± 1 MHz 范围内的频率划分为 16 个区间,每个区间宽

度125 kHz,估计的载波频率落入哪个区间,则按22.5°的整数倍进行相位补偿。在实际使用中可减小125 kHz区间宽度和相应补偿的度数,以防止噪声、干扰和传播等因素的影响。

3.4 扩容1090ES信号的校验

现有的1090ES信号采用CRC冗余编码方式生成24 bit奇偶校验位来保护数据,接收端发现错误后可采用一些纠错技术进行数据校正,纠错方法有“保守”技术和“强力”纠错技术等^[11]。扩容信号增加相位调制后数据信息加长了 $M \times 112$ bit,若继续采用现有的校验方法^[12],校验位长度为 $M \times 24$ bit,编码效率较低,且前几位用作同步,没有携带调制数据,因此,无需也不能再按112 bit长划分和校验数据。对扩充容量的使用将由国际权威组织制定标准,但扩容数据的校验可从整体考虑。

选择何种编码方式应依据1090ES扩容数据链的结构以及1090ES扩容信号比特信息出错的特点。1090ES信号传输信道中的干扰、噪声以及1090ES扩容信号的衰落都会使信号发生比特错误,特别是同信道干扰源的影响。1090ES使用的1090 MHz信道由多个电子系统共享使用,频谱环境日趋拥挤,FRUIT和Garble是主要的干扰形式^[13],需选择对突发错误具有高效纠错能力的编码,如RS码、LDPC码等。RS码原理简单且实现方便,对于短码和中等码的性能较优,但编码效率不够高。LDPC编码接近香农理论极限,利用校验矩阵的稀疏性,可实现高速数据通信,是否适合扩展数据的校验,有待进一步的研究。

3.5 可行性与安全性评估

由于ADS-B已推广应用,使用这种新技术的接收机需兼容PPM信号,对两种信号的接收性能需采用实验和理论分析进行评估。更重要的是,调相1090ES信号是否影响现有PPM信号的正常运行、是否干扰PPM信号、是否降低接收机的性能等还需论证,以确保两种信号共存的安全性。

1090ES对脉冲的时域波形和频谱都有严格的要求,扩容信号的时域波形和频谱特性是否符合相应的标准都需要进行评估验证。对于PPM和PSK混合调制信号的频谱特性已有过一些相关的研究,文献^[14]证明了PPM/BPSK混合调制的频谱特性能够满足D260B规定的1090ES信号标准。随着调相技术的逐渐成熟和样机的研制,还需采用外场实验等方法做进一步的评估,论证该方法的可行性。

4 结束语

ADS-B具有监视、导航和通信功能,增加1090ES信号传输信息的能力对增强ADS-B系统的效能、增加新的应用和业务、降低1090 MHz频点的拥塞有重要的意义。本文论述了几种可能的扩容方法,并对基于相位调制的方法进行了详细的分析,提出了相位调制方法所需解决的几个关键问题,特别是提出了多发单收突发通信的同步方法。该方向的研究仅几年时间,技术尚不成熟,各环节采用哪种技术(如校验方法、数据字段的划分和使用等)也没有定论,新的国际标准也只有在这些技术经过严格的验证后才会形成,但传输能力的提高引起了国际权威民航组织的高度重视,并且该扩容技术可拓展到S模式的其他24种数据链格式,该技术的研究将成为航空电子领域的又一个新热点。

参考文献:

- [1] Arbuckle P D. U. S. activities in ADS-B systems implementation [C]//Proceedings of 2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communication - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri, Italy: IEEE, 2011: 41-46.
- [2] Rekkas C. ADS-B and WAM deployment in Europe [C]//Proceedings of 2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communication Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri, Italy: IEEE, 2011: 41-46.
- [3] 中国民用航空局. 中国民用航空ADS-B实施规划 [M]. 北京:中国民用航空局,2012.
Civil Aviation Administration of China. Implementary plan of civil aviation surveillance technology of China [M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2010. (in Chinese)
- [4] 王洪. 1030/1090 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 1030/1090 MHz [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(1): 105-109. (in Chinese)
- [5] RTCA DO-260B, 1090 Minimum Operational Performance Standard for ADS-B and TIS-B [S].
- [6] ASP TSG WP 5-18, ATC Overlay Data Link [S].
- [7] 四川九洲电器集团有限责任公司. ADS-B(1090ES)地面站 [EB/OL]. 2014-09-18 [2014-12-20]. <http://www.jiuzhou.com.cn>.
- [8] Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd. The ADS-B (1090ES) ground station [EB/OL]. 2014-09-18 [2014-12-20]. <http://www.jiuzhou.com.cn>. (in Chinese)
- [8] COMSOFT. ADS-B and Multilateration Solution [EB/OL]. [2014-12-20]. <http://www.comsoft.de>.

- [9] Petrochilos N, Galati G. Separation of SSR Signals by Array Processing in Multilateration Systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 965-982.
- [10] ICAO. Manual on the secondary surveillance radar system [M]. Washington DC: ICAO, 2004.
- [11] 郑士毅. 模式 S 应答处理中的数据处理[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
ZHENG Shiyi. The data processing in mode S replies processing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [12] Gertz J L. Fundamentals of Mode S Parity Coding [R]. Washington: Lincoln Laboratory, 1984: 2-3.
- [13] Xiao Youan, Luo Chunling. The comparative analysis of LD-PC and RS code [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Xianing, China: IEEE, 2011: 4510-4513.
- [14] WANG Shang, ZHANG Yan. Phase Modulated Waveforms for Transponder-Based Radar Sensing: Signal Optimization and Experiments [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1733-1753.

作者简介:



王洪(1974—),男,四川人,2007年于电子科技大学获博士学位,现为副教授,主要研究方向为雷达信号处理、ADS-B、多点定位、数字接收机和高速实时信号处理;

WANG Hong was born in Sichuan Province, in 1974. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1974. He is now an associate professor. His

research interests include radar signal processing, ADS-B, multilateration, digital receivers and high speed and real-time signal processing.

Email: whtoyou@163.com

孙清清(1990—),男,福建宁德人,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理、高速实时信号处理;

SUN Qingqing was born in Ningde, Fujian Province, in 1990. He is now a graduate student. His research interests include radar signal processing and high speed and real-time signal processing.

Email: qingqingsunmail@163.com

李华琼(1963—),女,四川成都人,高级工程师,主要研究方向为 ADS-B、空管机场新技术研发等;

LI Huaqiong was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1963. She is now a senior engineer. Her research interests include ADS-B and ATC airport new technology.

Email: lhqmail80@163.com

黄忠涛(1978—),男,硕士,工程师,主要研究方向为雷达测试技术、嵌入式系统、视频仿真技术、场面监视系统等;

HUANG Zhongtao was born in 1978. He is now an engineer with the M. S. degree. His research interests include radar test, embedded system, video simulation and surface surveillance system.

Email: cathzt@163.com

何东林(1976—),男,黑龙江佳木斯人,硕士,工程师,主要研究方向为多点定位、智能控制系统及空中交通管理。

HE Donglin was born in Jiamusi, Heilongjiang Province, in 1976. He is now an engineer with the M. S. degree. His research concerns multilateration, intelligent control system and air traffic management.

Email: donglin-he@126.com