

多点定位中A/C模式混叠信号的时域分离算法

王洪¹, 黄荣顺², 徐自励²

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 中国民用航空局第二研究所 成都 610041)

【摘要】多点定位是空中交通管制的新兴技术,抗干扰技术是多点定位系统走向实用的关键。针对多个目标发射信号的混叠问题,在分析A/C模式混叠信号时域特征和规律的基础上,定义了脉冲重叠度和脉冲描述字,并将混叠信号的分离归结为其子脉冲的分离和归位。再根据混叠子脉冲的脉宽、幅度、相位等特征,提出了混叠子脉冲的分离方法,进而实现了整个A/C模式脉冲串的解混叠。仿真验证了算法的有效性。

关键词 空中交通管制; 混叠; A/C模式; 多点定位; 时域分离

中图分类号 TN967.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.007

Separating Algorithm of A/C Garbles in Time Domain for Multilateration

WANG Hong¹, HUANG Rong-shun², and XU Zi-li²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. The Second Research Institution, Civil Aviation Administration of China Chengdu 610041)

Abstract Multilateration is a new technology in air traffic control. Anti-jamming technology is important for multilateration systems. Signals for different targets will generate garbles which are main jamming in multilateration. This paper analyzes the features and laws of A/C garbles in time domain, defines pulse aliasing degree and pulse description words, and proposes a new algorithm to separate the aliasing pulses in time domain according to pulse width, amplitude and phase. The A/C transponders are separated totally after sub-pulses are cleared. At last, simulations show the efficiency of proposed algorithm.

Key words air traffic control; garble; mode A/C; multilateration; separation in time domain

多点定位是国际民航组织(international civil aviation organization, ICAO)提出的先进的机场场面活动引导和控制(advanced surface movement guidance and control system)工程的核心技术,代表了未来民航空中交通管制的发展趋势之一^[1-2]。欧美发达国家高度重视,美国联邦航空局、欧洲权威民航组织EuroControl和德国EMMA均提出了相应的研制和应用计划,美国Sensis公司、英国Roke Manor Research公司和捷克ERA公司等研制出的多点定位系统已在部分机场试用,我国的几家研究机构也在积极开展研制工作。多点定位分为广域航路监视和机场场面监视两种,定位的信号来自于二次雷达系统中飞机的应答信号或ADS-B广播信号,即1090 MHz的下行信号。系统在地面布局多部接收机,接收到飞机信号后估计出信号的到达时间(time of arrival, TOA),将TOA传送到中心站,解算出飞机位置。

目前,我国的二次雷达使用的应答信号为A/C模式或S模式,而二次雷达的询问信号仍然是采用A/C模式。多部飞机的应答信号和ADS-B广播信号均使用1 090 MHz载频,信号之间相互形成干扰,表现为基带信号的混叠,即编码脉冲串的混叠。文献[3-7]的研究表明,若信号无混叠的概率为95%时,飞机的数量应小于121架;若概率达到99%,则飞机数量下降到24架。但是,如果能够将两个混叠的信号分离开,则达到95%和99%的飞机架次分别增加到2 284架和984架,可见,将混叠信号分离开对提高检测概率的效果非常明显。权威民航组织制定的规范中,要求多点定位系统的检测概率很高,因此,解混叠是多点定位系统达到上述指标的关键技术之一。

二次雷达一般采用单脉冲体制,用和差通道和波束控制技术抑制干扰,但多点定位系统使用全向天线被动接收,没有主动的询问及和差通道信息,

收稿日期: 2012-01-09; 修回日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61079006); 国家自然科学基金重点项目(61139003)

作者简介: 王洪(1974-),男,博士,副教授,主要从事多点定位、雷达信号处理、统计信号处理等方面的研究。

因此传统二次雷达的抗干扰方法^[8-9]不能直接用于多点定位系统。由于信号载频相同, 目标的多普勒频率和载频偏差大都在1 MHz以内, 频域滤波的方法不可行。文献[3-7]提出了基于阵列信号处理的分离方法, 利用目标的方位信息分离信号, 但多点定位主要采用单通道接收, 无法运用阵列信号的处理方法。文献[10]将盲分离算法应用到多点定位系统, 根据不同目标信号的数学特征分量分离信号, 也是针对多通道接收的算法。文献[11-13]将Petrochilos的阵列信号处理拓展到单通道的情况, 对单通道全向天线接收到信号折叠重排, 之后采用阵列信号处理方法, 对信号做特征值分解, 对S模式的分离取得了一定的效果。该方法将S模式信号分解为4 μs一段, 对重叠度高的S模式信号和A/C信号无效。

本文研究单通道接收情况下, 从时域分离混叠脉冲串的新方法, 该方法基于A/C模式混叠脉冲的幅度和相位特征, 提取出脉冲的信息后形成脉冲描述字, 据此分离出混叠的信号。该方法只用于A/C模式的解混叠, 对S模式的混叠不适用。事实上, 我国现有民航飞机使用的应答信号主要为A/C模式信号, 军用飞机使用的信号跟A/C模式为同一系列, 仅在脉冲的位置上有不同的规定, 本文的方法同样适用。

1 A/C模式混叠信号的时域特征

A/C模式的应答信号载频为1 090 MHz, 其基带信号为一系列脉冲串, 如图1所示^[8-9]。A模式有4 096个编码, 可以应答飞机的身份信息, 而C模式应答飞机的气压高度信息。图1中F1、F2为框架脉冲(常用于判定A/C模式信号的出现), 框架间隔20.3 μs, 中间有13个编码脉冲, 脉冲宽度0.45 μs, 脉冲间隔1.45 μs, 编码方法是高电平为1, 低电平为0, 其中X脉冲没有使用, 一般置为低电平。SP1为特殊识别脉冲, 当多架飞机距离接近时, 管制员可要求其中一架飞机发射SP1识别脉冲, 以防止混淆。

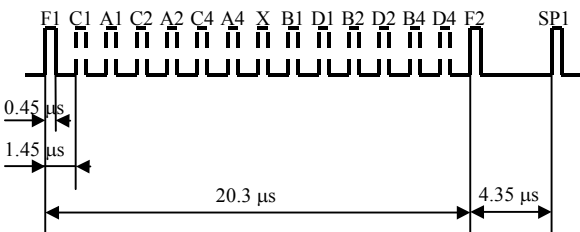


图1 A/C模式应答信号格式

下面分析两个A/C模式信号混叠的特征。对A/C模式信号的处理, 一般依据F1, F2框架脉冲判定出有A/C应信号, 然后从F1脉冲开始, 每隔1.45 μs检测

脉冲上升沿, 从而对每位数据解码。1.45 μs周期内只有数据为“1”时才有0.45 μs的高电平信号, 因此, A/C模式信号的混叠具有以下特点:

1) A/C 信号混叠表现为相应子脉冲的混叠, 将混叠的子脉冲解开则 A/C 信号实现分离;

2) 若重叠段子脉冲数据为“0-0”或“0-1”或“1-1”数据的高电平在间隔的1 μs内, 都能从上升沿的位置上将各脉冲划分到相应的F1、F2框架内; 由于脉冲周期均为1.45 μs, 因此子脉冲的重叠程度取决于整个A/C模式脉冲串的起始位置, 而且后续重叠脉冲的重叠时间近似相等。图2为两个脉冲重叠的示意图, t_2 是重叠的时间, t_1 是重叠的起始时间, 最坏的情况下, 两个脉冲完全重叠。设两个A/C模式脉冲串重叠时第二个脉冲串相对于第一个脉冲串的延迟为 t_d , 则两个脉冲重叠的起始位置为:

$$t_1 = t_d - (t_d \bmod 1.45) \times 1.45 \quad (1)$$

式中, mod表示取模。定义重叠度为:

$$p = \frac{t_2}{0.45} 100\% \quad (2)$$

3) 不计脉宽误差时, t_2 取值为 0~0.45 μs, 重叠度为 0~100%。

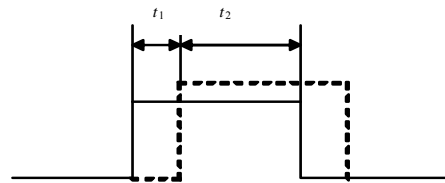


图2 脉冲混叠示意图

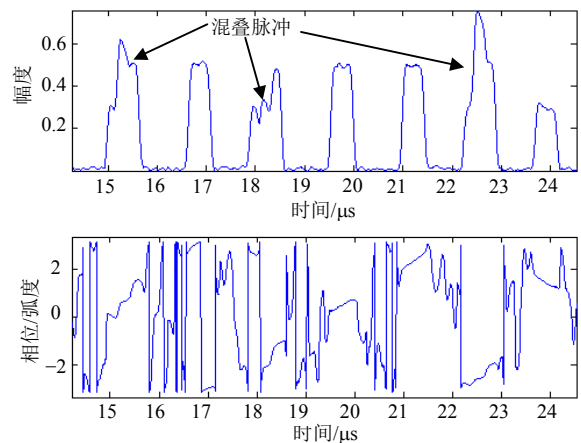


图3 混叠信号的幅度和相位

4) 典型混叠信号如图3所示。从图中可见, 无混叠的脉冲, 幅度平坦, 而混叠脉冲的幅度有大的起伏; 脉冲宽度的变化是混叠脉冲的显著特征; 此外, 无混叠脉冲高电平段对应的相位呈线性变化(如21~21.5 μs段的信号), 变化的斜率取决与两个信号

的载频偏差和多普勒频率；有混叠脉冲的高电平段对应相位有明显波动；各脉冲低电平段对应的相位紊乱，无法利用。混叠脉冲幅度的形状与A/C信号的电平高低、载频偏差、多普勒频率、相位偏差和重叠程度有关，典型形状如图3中15~16 μs ，18-19 μs ，22~23 μs 段的信号所示。同时也可以看到，17 μs 附近相位发生了 2π 的跳变，这是因为相位的周期为 2π 。若两个A/C模式信号的载频偏差为零，多普勒频率也为零，则高电平段对应的相位近似为固定值，只受噪声影响。

2 时域分离算法及仿真

首先讨论A/C信号的检测，A/C模式脉冲的检测采用固定域值和动态域值相结合的方法。根据噪底确定一个初域值，找到持续时间大于0.3 μs 以上的信号才输出有效脉冲，即利用脉宽滤除孤立噪声点。在找到有效脉冲后，计算脉冲顶部电平均值，以均值的-6 dB作为动态域值。动态域值是判决脉冲出现位置和解码的重要依据，以动态域值对信号归一化，进一步作A/C框架检测。A/C框架的检测用于判决A/C信号的出现，第一个F1脉冲利用延迟线或者数字移位寄存器来存储，与没有延时的信号通过一个与门相与，当接收到F2脉冲时，与门信号输出高电平，表明A/C脉冲串的出现。

时域分离的基本思路是首先检测出A/C信号的各个子脉冲，根据脉冲宽度进行分类处理，若出现混叠则脉冲宽度大于0.45 μs ，对发生了重叠的脉冲，根据时频特征分离出原始子脉冲；对未混叠和从混叠脉冲中分离的子脉冲用脉冲描述字定义，最后根据脉冲描述字和框架脉冲的位置将各脉冲归位到对应的A/C框架中，分离出完整的A/C脉冲串。

脉冲描述字是个脉冲参数的集合，包括上升沿和下降沿时间，脉冲的幅度，脉冲类别指无混叠的脉冲还是分离出的子脉冲，即：

脉冲描述字={上升沿，下降沿，幅度均值，脉冲类别}

对重叠度高的脉冲需借助相位信息，如斜率的变化。当脉冲出现 2π 的相位跳变时(如图3中17 μs 附近)，需要作解周期处理。这种跳变发生在 $\pm\pi$ 之间，由于相位的周期为 2π ，只需加或减 2π 作相位补偿即可，然后再根据相位的斜率变化对混叠脉冲作出判定。

对A/C模式混叠信号的分离处理流程如图4所示，步骤如下：

1) 信号检测：判断是否有应答信号，并给出判

断脉冲高低电平的动态阈值；

2) 归一化：根据信号检测的结果对信号幅度作归一化处理；

3) 脉冲的上升沿和下降沿判断：界定单次脉冲的位置；

4) 窄脉冲抑制：去掉超过阈值的噪声信号；

5) 脉冲分类：根据脉冲宽度对脉冲作分类处理，小于0.5 μs 为单脉冲，大于0.6 μs 为可分离的重叠脉冲，0.5~0.6 μs 的脉冲结合幅度和相位特征判定；

6) 相位解周期和重叠脉冲分离：根据前后沿和幅度相位特征，从两个混叠的脉冲中分离出单个子脉冲；

7) 获得各脉冲的描述字；

8) 框架检测：检测A/C信号的出现，同时也涉及信号数量到判断和虚假框架的去除；

9) 信号分离：利用框架检测的结果和脉冲描述字分离混叠信号。

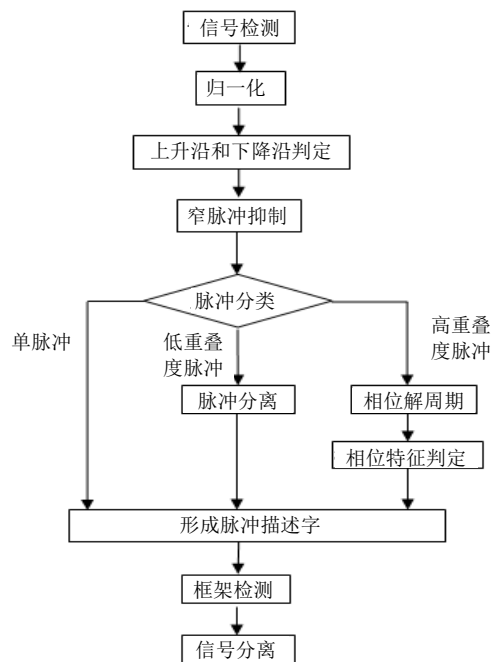


图4 时域解混叠流程

下面对3个信号混叠的情况进行仿真实验，若混叠信号延迟时间是在 $1.45n \pm 0.1 \mu\text{s}$ 以内，时域方法的误码率较高，但两个重叠信号相对延迟大于 $1.45n \pm 0.1 \mu\text{s}$ ，即图2中时间 t_1 大于 $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 时，时域方法能够有效分离出混叠交错的A/C应答信号。仿真条件：采样率100 MHz，滤波器带宽10 MHz，信噪比15 dB，混叠信号相对延迟时间 t_1 在0~1.45 μs 内随机取值，信号幅度各不相同。图5a是3个A/C模式信号混叠在一起的解调信号，图5b~图5d是分离后的

信号, 其中混叠脉冲的幅度取自相邻脉冲的均值。可见, 混叠在一起的信号被已分离出来。

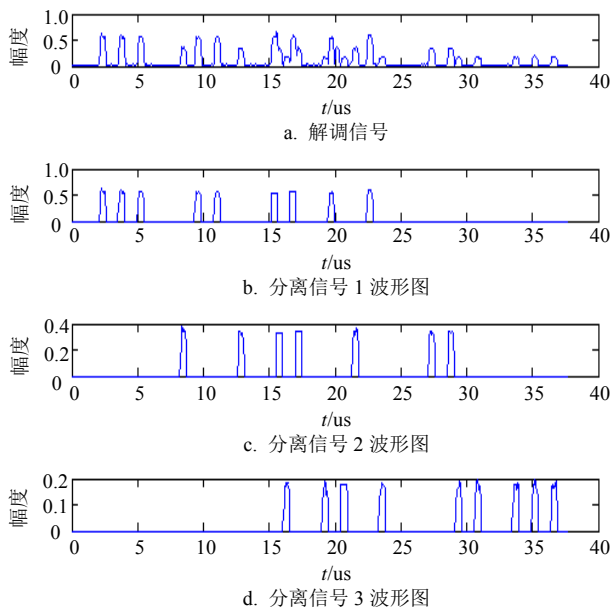


图5 混叠信号分离结果

在1 000次试验中, 3个信号采用不同的延时、幅度、载频偏差, 对分离出的所有信号解码, 全部数据正确视为有效分离, 正确率为81.7%。两个信号混叠时正确率则在95%以上。3个信号混叠时出现3个子脉冲混叠在一起, 难以分离, 导致解混叠的概率下降。

文献[3-5]采用投影算法和扩展到投影算法分离混叠的S模式信号, 两个信号时成功率为100%, 3个信号时为93%, 但该方法需要足够多的混叠脉冲以构造分离的特征向量, A/C模式平均只有6个高电平数据脉冲, 而S模式有64个或128个, 因此该方法只能用于S模式信号的分离, 对A/C模式不适用。文献[10]采用盲分离算法, 对3个S模式的信号分离, 信噪比15 dB时正确率为98%, 正确率高于本文, 但盲分离算法运算复杂, 不利于硬件实现。

3 结论

不同飞机应答信号间的相互干扰是多点定位系统走向实用需解决的难题之一, 对系统的检测概率和可靠性有重要影响, 而可靠性是民航设备最重要的一项指标。本文针对工程的实际问题, 在分析混叠信号脉冲特征的基础上, 提出从时域上分离A/C模式混叠信号的方法, 取得了较好的效果。时域分离方法依赖于信号的幅度和相位特征, 特征的稳定性与算法的稳健性密切相关。文中提出的方法和步骤可直接用于多点定位的工程样机, 方法的实用

性强。

参 考 文 献

- [1] CAROTENUTO S. State of the art in A-SMGCS[R]. Germany: EMMA, 2005.
- [2] 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, 23(9): 4-11.
LÜ Xiao-ping. Discussions on the application of MDS technology in China civil aviation[J]. Air Traffic Management, 2006, 23(9): 4-11.
- [3] PETROCHILOS N, GALATI G, PIRACCI E. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 965-982.
- [4] PETROCHILOS N, GALATI G, MENÉ L. Separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment by a novel projection algorithm[C]//ISSPIT'05. Athens: IEEE, 2005: 17-21.
- [5] PETROCHILOS N, GALATI G, PIRACCI E. Projection techniques for separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment[C]//SAM'06. Waltham: IEEE, 2006: 12-14.
- [6] PETROCHILOS N, PIRACCI E, GALATI G. Separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment for the near-far case[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu: IEEE, 2007: 3988-3991.
- [7] MASSA G, COSTANZO S, BORGIA A, et al. Multiple sources discrimination by array processing[C]//European Conference on Antennas and Propagation. Rome: IEEE, 2011: 620-622.
- [8] ICAO. Manual on the secondary surveillance radar system [M]. USA: ICAO, 2004.
- [9] STEVENS M C. Secondary surveillance radar[M]. USA: Artech House, 1988.
- [10] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚, 等. 多点定位混叠信号的盲分离[J]. 电讯技术, 2009, 49(12): 1-4.
WANG Hong, LIU Chang-zhong, WANG Xue-gang, et al. Blind separation of garbles in multilateration[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(12): 1-4.
- [11] PIRACCI E, PETROCHILOS N, GALATI G. Mixed SSR sources separation exploiting sparsity: a geometrical approach[C]//European Radar Conference. Rome: EUMA, 2009: 85-88.
- [12] PIRACCI E, PETROCHILOS N, GALATI G. Superimposed mode S signals: single-antenna projection algorithm and processing architecture[C]//International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Egypt: IEEE, 2007: 1-5.
- [13] GALATI G, LEONARDI M, PIRACCI E, et al. The transponder data recorder: first implementation and applications[C]//Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV). Italy: IEEE, 2011: 147-151.

编辑 税红