

文章编号: 2095-4980(2014)05-0678-05

## 单脉冲技术的可测角度区间设计

苏志刚<sup>a,b</sup>, 卢献宇<sup>b</sup>, 郝敬堂<sup>a</sup>

(中国民航大学 a.中欧航空工程师学院; b.智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

**摘要:** 广播式自动相关监视(ADS-B)作为新一代空中交通管制监视系统存在位置报告信息真伪判决问题。本文提出基于单脉冲测角技术的解决方案, 并针对单脉冲测角可用线性区间尺度的影响因素进行研究。理论分析和仿真实验结果表明, 噪声水平、加权方式、波束指向和阵元个数均对单脉冲可用线性区间尺度产生影响, 合理配置系统参数可以实现单脉冲测角线性区间尺度的优化, 提高测角精确度。

**关键词:** 监视系统; 空中交通管制; 单脉冲技术; 到达方向估计

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201405.0678

## Measurable angle range design based on monopulse technology

SU Zhi-gang<sup>a,b</sup>, LU Xian-yu<sup>b</sup>, HAO Jing-tang<sup>a</sup>

(a.Sino-European Institute of Aviation Engineering; b.Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** There exist some authenticity judgment problems in position reporting in Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B) which is the next generation of air traffic control surveillance system. A solution based on monopulse angle measuring technology is proposed, and the influence factors on the available linear interval dimension of monopulse angle measurement are studied. Theoretical analysis and simulation experiments prove that the noise level, weighting method, beam direction and the number of array elements are all the disturbance factors to the monopulse available linear interval dimension. Therefore, configuring system parameters properly would be helpful to optimize the whole linear interval dimension and to improve the precision of angle measurement.

**Key words:** surveillance system; air traffic control; monopulse technology; Direction of Arrival (DOA) estimation

ADS-B 系统是国际民航组织, 也是欧美各航空运输发达国家积极建设使用的下一代航空运输系统的基础设施之一<sup>[1-3]</sup>。目前, 美国、澳大利亚、欧洲以及香港情报区和东南亚部分国家都在全力推行 ADS-B 技术。在中国民航新一代空中交通管理系统中, ADS-B 系统也是重要的基础监视设备, “十二五”期间, 全国范围内规划建设 ADS-B 地面站 340 余套<sup>[4]</sup>。ADS-B 系统对空中飞行器的监视是基于飞行器自主报告位置信息来实现<sup>[5]</sup>。ADS-B 系统的有效应用前提是对飞行器位置报告信息的充分信任, 因此, 该系统作为监视手段存在一定的脆弱性<sup>[6-8]</sup>。为解决飞行器位置报告的真伪判别问题, 相关文献从不同的角度进行了深入研究。

文献[9]提出使用模糊数学方法处理 ADS-B 报文可能虚假的问题, 通过建立模糊因子子集, 选择关系函数, 分配模糊因子权重并建立其航迹关系度, 确定报文在 ADS-B 航迹中是否存在相关性来判断其真假。文献[10]结合密码学概念, 利用单向陷门函数和离线/在线签名思想提出一种可对 ADS-B 消息进行认证的方案。文献[11]利用线阵到达方向(DOA)谱估计和从报文位置信息获得信号来向角的比较, 评判出 ADS-B 潜在的错误位置信息, 并证明应用 DOA 估计判别报文信息真伪的可行性。本文根据 Christoph Reck 分析的线阵 DOA 估计方法<sup>[11]</sup>, 提出线阵单脉冲技术。

单脉冲技术是获取目标方位信息的一种常规方法, 该技术虽存在缺点, 但不影响本文研究。首先, 单脉冲系统工作于低仰角条件时, 存在多路径误差, 该影响程度取决于测角波束“打地”程度<sup>[12]</sup>, 通过合理设计和调整

线阵可降低误差;其次,对于接收数据中强弱信号并存的问题,出现在需要同时跟踪多个目标的基于阵列空间谱估计中而非单脉冲技术;再者,当干扰或杂波落在主瓣区时,单脉冲测量目标方位的精确度将迅速下降,此缺陷可通过修正单脉冲测角公式<sup>[13]</sup>或波束保形<sup>[14]</sup>有效地弥补。同时,ADS-B地面站无法正常解译发生碰撞的位置报文,在任何时刻到达ADS-B接收天线的可正常解译的报文是唯一的。所以,单脉冲测角技术可应用于对飞行器报文的DOA估计,并将相应的DOA估计与报文中的位置信息相比较,实现对飞行器报告真伪性的判识。

## 1 问题描述

考虑 $N$ 维均匀线阵,阵元间距为 $d$ ,处于方位角 $\theta$ 方向上的目标辐射信号为 $s(t)$ ,则天线阵列接收的信号为:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{a}(\theta)s(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{a}(\theta)$ 为 $N \times 1$ 的方位导向矢量,具体形式为:

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp\{-j2\pi\phi(\theta)\}, \dots, \exp\{-j2\pi(N-1)\phi(\theta)\}]^T \quad (2)$$

且 $\phi(\theta) = d \sin\theta / \lambda$ 为相邻阵元间波程差引入的相移, $\lambda$ 为载波波长, $\mathbf{n}(t)$ 为 $t$ 时刻天线各阵元接收噪声分量构成的 $N \times 1$ 维矢量。假设噪声是方差为 $\sigma^2$ 的零均值高斯白噪声。

当波束指向在 $\theta_0$ 方向时,天线的和波束可表示为:

$$\Sigma(\theta) = \mathbf{w}_s^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{w}_s^H(\theta_0)$ 为和波束的加权矢量,通过合理选择该矢量,如选择Taylor加权值或Chebyshev加权值等,可以有效地控制波束的主副瓣参数。类似地可以将天线差波束表示为:

$$\Delta(\theta) = \mathbf{w}_d^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{w}_d^H(\theta_0)$ 为差波束的加权矢量。

利用式(3)和式(4)定义单脉冲比:

$$F(\theta) = \text{Re}\{\Delta(\theta)/\Sigma(\theta)\} \quad (5)$$

式中 $\text{Re}\{\cdot\}$ 表示取实部操作。

利用单脉冲比 $F(\theta)$ 进行方位估计时,通常利用函数 $F(\theta)$ 在 $\theta_0$ 附近的线性区,因此,对式(5)在 $\theta_0$ 附近进行一阶Taylor展开<sup>[13,15]</sup>

$$F(\theta) = F(\theta_0) + (\theta - \theta_0)F'(\theta_0) + R_1(\theta) \quad (6)$$

式中:

$$F'(\theta_0) = \partial F(\theta) / \partial \theta \Big|_{\theta=\theta_0} \quad (7)$$

为单脉冲鉴角率; $R_1(\theta)$ 表示一阶Taylor展开的余项,是 $(\theta - \theta_0)$ 的高阶无穷小。

单脉冲鉴角率 $F'(\theta_0)$ 与和、差波束加权值、阵列流形及波束指向相关。在工程上,在和、差波束加权值、阵列流形及波束指向给定前提下,单脉冲鉴角率常作为系统已知参数使用。忽略一阶Taylor展开的余项 $R_1(\theta)$ 时,由式(6)可获得角度估计

$$\hat{\theta} = \theta_0 + [F(\theta) - F(\theta_0)] / F'(\theta_0) \quad (8)$$

由式(8)可见,目标的角度估计 $\hat{\theta}$ 可利用目标方位 $\theta$ 对应的单脉冲比 $F(\theta)$ 直接计算得出。

单脉冲比函数 $F(\theta)$ 是较为复杂的高阶函数,在 $\theta_0$ 附近存在线性区,但范围有限,因此在特定的和、差加权条件下利用式(8)进行角度估计的范围是有限的。需要根据不同权值的角度估计范围选择几组不同的和、差加权值,实现一定方位范围内的测角能力。

## 2 角度估计范围

当天线波束指向为 $\theta_0$ 时,可有效估计目标方位 $\theta$ 的范围是由单脉冲比函数 $F(\theta)$ 在 $\theta_0$ 附近的可用线性区间决定的。确定 $F(\theta)$ 线性区间范围可利用一阶Taylor展开的余项 $R_1(\theta)$ ,即在 $F(\theta)$ 可用线性区间内,有

$$|R_1(\theta)| = |F(\theta) - F(\theta_0) - (\theta - \theta_0)F'(\theta_0)| \leq T \quad (9)$$

式中 $T$ 定义为可用线性区间门限,其为 $F(\theta)$ 一阶近似所许可的最大截断误差。

根据差波束零点约束可知,在波束指向 $\theta_0$ 方向时, $\Delta(\theta_0) = 0$ ,由式(5)可得 $F(\theta_0) = 0$ 。在实际系统中,目标方

位的单脉冲比  $F(\theta)$  是利用和、差波束的实际输出进行估计的。

$$\hat{F}(\theta) = \text{Re}\{\Delta(\theta, t)/\Sigma(\theta, t)\} \tag{10}$$

式中  $\Sigma(\theta, t)$  和  $\Delta(\theta, t)$  分别为和波束与差波束的输出信号，具体可表示为：

$$\Sigma(\theta, t) = \mathbf{w}_s^H(\theta_0)\mathbf{r}(t) = \mathbf{w}_s^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta)s(t) + \mathbf{w}_s^H(\theta_0)\mathbf{n}(t) \tag{11}$$

和

$$\Delta(\theta, t) = \mathbf{w}_d^H(\theta_0)\mathbf{r}(t) = \mathbf{w}_d^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta)s(t) + \mathbf{w}_d^H(\theta_0)\mathbf{n}(t) \tag{12}$$

因此，式(9)可进一步明确为：

$$\left| \hat{F}(\theta) - (\theta - \theta_0)F'(\theta_0) \right| \leq T \tag{13}$$

由式(13)可见，采用单脉冲测角时，可用的线性区间范围  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$  不仅与和、差波束加权值、阵列流行及波束指向有关，而且与噪声水平相关。显然，进行单脉冲测角的可用线性区间边界  $\theta_{\min}$  和  $\theta_{\max}$  均可使式(13)的等式成立。

### 3 仿真实验

本部分将通过几组不同的仿真实验来分析影响单脉冲测角可用线性区间大小的因素。

考虑阵元个数  $N=6$  的线性阵列天线，天线相邻阵元间隔  $d = \lambda/2$ 。假设到达天线阵列基准阵元的目标辐射信号为：

$$s(t) = a \exp\{j2\pi f_0 t\} \tag{14}$$

式中： $a$  为信号的复幅度； $f_0$  为载波频率。定义天线端信噪比为  $R_{SN} = |a|^2 / \sigma^2$ ，式(13)中的门限  $T = 0.0122$ 。在不考虑杂波抑制问题时，波束指向  $\theta_0$  的和、差波束加权矢量可分别表示为：

$$\mathbf{w}_s(\theta_0) = \mathbf{S} \cdot \mathbf{a}(\theta_0) \tag{15}$$

和

$$\mathbf{w}_d(\theta_0) = \mathbf{D} \cdot \mathbf{a}(\theta_0) \tag{16}$$

式中  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{D}$  均为  $N \times N$  的对角阵，相应对角线元素分别由阵列各阵元和、差加权值构成。

首先考虑噪声水平对单脉冲测角可用线性区间大小的影响。假设天线波束指向  $\theta_0 = 0$ ，并采用均匀加权，即矩阵  $\mathbf{S}$  为单位阵， $\mathbf{D}$  的对角线元素  $d_{i,i} = -1 (i=0,1,2)$  和  $d_{i,i} = 1 (i=3,4,5)$ ，加权等效于采用简单的左右半阵列的单脉冲测角方式。在不同信噪比下，通过改变噪声样本，进行 200 次 Monte-Carlo 实验得到单脉冲测角可用线性区间的角度范围如图 1 所示。由图 1 可见，噪声的存在将影响测角可用线性区间尺度，且噪声水平越高，对测角可用线性区间的压缩越显著。随着信噪比的增加，测角可用线性区间尺度增大，当  $R_{SN} \geq 15$  dB 时，与无噪声环境下的线阵测角尺度相同。

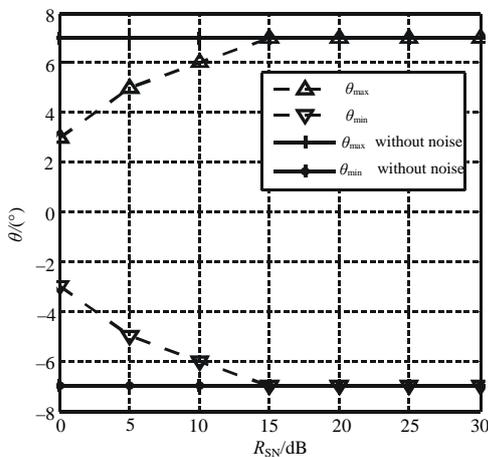


Fig.1 Relationship between SNR and the available linear interval dimension  
图 1 信噪比与可用线性区间尺度的关系图

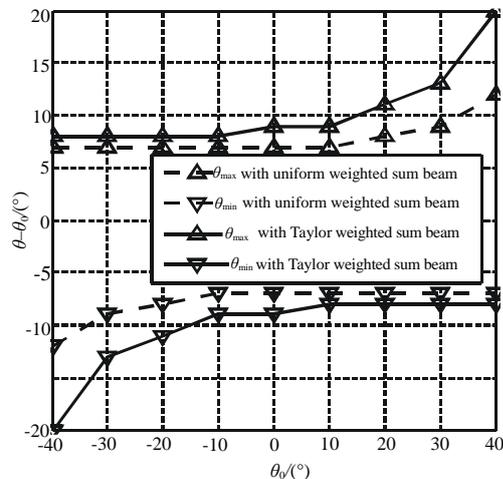


Fig.2 Dimension changes of the available linear interval along with  $\theta_0$  under different weighting values

图 2 不同加权下可用线性区间尺度随波束指向角  $\theta_0$  的变化

其次考虑在无噪声环境下单脉冲测角可用线性区间尺度随波束指向  $\theta_0$  的变化。对和、差波束采用均匀加权以及对和波束采用 Taylor 加权, 差波束采用 Bayliss 加权, 主副比控制分别为  $-25$  dB,  $-20$  dB, 控制旁瓣数均为 3, 此时的实验结果如图 2 所示。由图 2 可见, 随着波束指向偏离法线, 线性区间测角范围增大, 由于波束主瓣的关于波束指向不对称性, 靠近法线一侧的波束宽度较窄, 另一侧的波束宽度较宽。当对波束的副瓣电平进行控制时, 相应的主瓣展宽, 从而对应的线性区间测角范围增大。

最后考虑阵元个数对单脉冲测角可用线性区间大小的影响。假设天线波束指向  $\theta_0 = 0$ , 仍然采用均匀加权。考虑在无噪声环境下单脉冲测角可用线性区间范围随天线阵元数  $N$  的变化如图 3 所示。由图 3 可见, 随着阵元个数的增加, 测角范围减小, 这是波束主瓣宽度变窄所致。

#### 4 结论

本文针对机载 ADS-B 自主报告位置信息真伪判断问题提出基于单脉冲测角技术的解决方案, 并围绕该方案的单脉冲可测角区间尺度问题进行深入研究。理论分析及实验结果表明, 单脉冲测角可用线性区间尺度与工作噪声水平、波束加权方式、波束指向及阵列阵元个数有关, 欲实现可用线性区间尺度优化需要综合考虑上述各因素。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Young Dr, Lee C, John C. Effectiveness of the ground-based transceiver (GBT) parrot system for monitoring GPS integrity for Alaska ATC radar-like services using ADS-B[C]// IEEE Digital Avionics Systems Conference. [S.l.]:IEEE, 2004.
- [ 2 ] Rekkas C, Rees M. Towards ADS-B implementation in Europe[C]// IEEE Prof. Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri:IEEE, 2008:1-4.
- [ 3 ] Cedrini V, Zacchei M, Zampognaro V. ADS-B 1090ES implementation the CRISTAL-MED project[C]// IEEE Prof. Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri, Italy:IEEE, 2008:1-5.
- [ 4 ] 张薇. 东北管理局“试水”ADS-B 新技术共享[EB/OL]. (2011-12-22)[2013-11-15]. <http://www.caacnews.com.cn/news2011/newsshow.aspx?idnews=181247>. (ZHANG Wei. The Northeast Airtraffic Management Bureau of China tested and shared the new technology—ADS-B[EB/OL]. (2011-12-22)[2011-12-22]. <http://www.caacnews.com.cn/news2011/newsshow.aspx?idnews=181247>.)
- [ 5 ] RTCA, Inc. DO-260A: minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B)[Z]. Technical Report, 2003.
- [ 6 ] Donald L, McCallie. Exploring potential ADS-B vulnerabilities in the FAA's NexGen air transportation system[D]. Ohio, US: Air force institute of technology, 2011.
- [ 7 ] Barsheshat, Abraham A. Implementation of ADS-B systems benefits and considerations[C]// IEEE Prof. Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri, Italy:IEEE Press, 2011:197-201.
- [ 8 ] Andrei Costin, Aurelien Francillon. Ghost in the Air (Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices[C]// Black Hat 2012 USA Briefings Conference. Las Vegas: Eurecom Press, 2012:1-55.
- [ 9 ] ZU Feng, ZHANG Xue-jun. An application of fuzzy mathematics in ADS-B data validation[C]// IEEE Intelligent Computing and Intelligent Systems. Xiamen: Fujian, China: IEEE Press, 2010:882-886.
- [ 10 ] LAI Xin, PAN Wei-Jun. An ADS-B message authentication scheme based on one-way trapdoor function[C]// International Conference on Services Science, Management and Engineering. Tianjin, China: IEEE Press, 2010:882-886.
- [ 11 ] Christoph Reck, Max S, Reuther, et al. Verification of ADS-B positioning by direction of arrival estimation[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2012, 4(2):181-186.
- [ 12 ] Nickel U L. A corrected monopulse estimation method for adaptive arrays[C]// Radar International Conference. Brighton: IEEE Press, 1992:324-327.

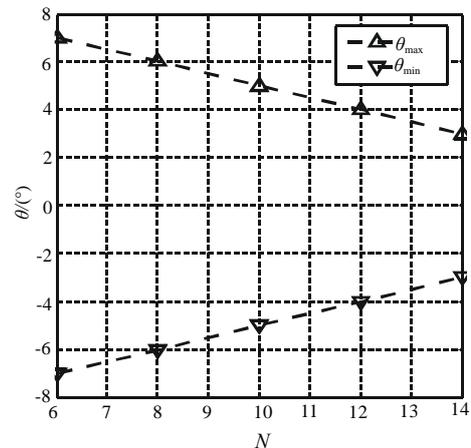


Fig.3 Relationship between the number of array elements and the available linear interval dimension  
图 3 阵元个数与可用线性区间尺度的关系