

基于 ADS-B 的低空飞行航迹预测

周波¹, 黄小宝¹, 程颖², 赵元浩², 沈笑云²

(1. 中国民用航空中南地区空中交通管理局湖北分局, 武汉 430000;

2. 中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

摘要: 针对低空自由飞行目标航迹预测问题, 提出从战略与战术两层面综合考虑的方法。基于 ADS-B 监视数据 TC 报告, 考虑目标多重状态参量偏移值, 引入衰减记忆和移动窗口平滑模型综合历史信息, 实现适合于低空飞行特点的飞行意图推断, 规划出战略预测航迹。同时, 依据一种新型跟踪监视算法, 提出战术与战略预测相结合的航迹混合预测思想, 预测目标未来中远期航迹。

关键词: 低空飞行; 航迹预测; 广播自动相关监视; 意图推断

中图分类号: V328.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)07-0017-05

Trajectory Prediction of Low-Altitude Flight Target Based on ADS-B

ZHOU Bo¹, HUANG Xiao-bao¹, CHENG Ying², ZHAO Yuan-hao², SHEN Xiao-yun²

(1. Hubei Branch, Air Traffic Management Bureau of Middle & Southern Region, CAAC, Wuhan 430000, China;

2. Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Considering the problem of trajectory prediction of low-altitude free flight targets, a new method was proposed from both strategic and tactical considerations. Based on TC report from surveillance data by ADS-B, multi-parameter offset value of target were taken into consideration, and the fading memory and moving window smoothing model were introduced into comprehensive historical information. The flight intent inference was achieved, which was suitable for low-altitude flight, then the trajectory by strategic prediction was obtained. A trajectory prediction idea based on both tactical prediction and strategic prediction was also proposed according to a new algorithm for tracking and monitoring, which can be used for predict the medium and long term future trajectory of a target.

Key words: low-altitude flight; trajectory prediction; ADS-B; intent inference

0 引言

考虑到低空飞行导航精度、复杂空情及环境等要素影响, 飞机航迹具有不确定性, 因此航迹预测是准确跟踪监视目标的核心部分。ADS-B 作为未来重要监视手段, 采用 GNSS 等多源数据融合结果, 依靠专门地空、空空数据链提供 TIS-B, FIS-B 等监视服务。与雷达等监视设备相比, 其具有高精度和高更新速率的特点, 研究基于 ADS-B 的新型航迹预测方法不仅有利于减小飞行间隔, 提高空域资源利用率, 同时能提高空域目

标监视能力, 保障飞行安全, 为空中交通协同管理提供决策依据^[1]。

DO-282^[2], DO-242^[3] 及文献[4]指出 ADS-B 数据链提供未来航迹改变关键点 (Trajectory Change Points, TCPs) 报告功能, 其中, A3 级别设备 TC 报告点增加到 4 个以上。依据 ADS-B 数据 TCPs 报告, 根据历史和当前状态信息, 推断飞行意图, 从而实现目标航迹战略预测。由于多个航迹改变点可确定未来长期坚持的飞行航迹, 准确估计未来 TCPs 是战略层面预测航迹的关键^[5]。因此, 本文研究的重点在于完善飞行意图推断算法, 在此基础上, 结合前期研究成果文献[6], 提出战术与战略相结合的思想, 实现低空目标的中远期航迹预测。文献[6]介绍了一种基于 ADS-B 的新型跟踪监视算法, 算法结合传统卡尔曼方法和基于残差的多

收稿日期: 2014-08-05

修回日期: 2014-09-09

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (14JCYBJC16000)

作者简介: 周波 (1985—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 研究方向为空中交通管理、导航监视。

模交互估计算法(RMIMM),在平稳航段采用效率高的卡尔曼滤波,在机动航段采用精度高但运算复杂的RMIMM,最终实现运算复杂程度与跟踪监视精度的平衡,依据该方法实现目标航迹战术层面上预测。图1所示为本文航迹预测方法思路概略图。

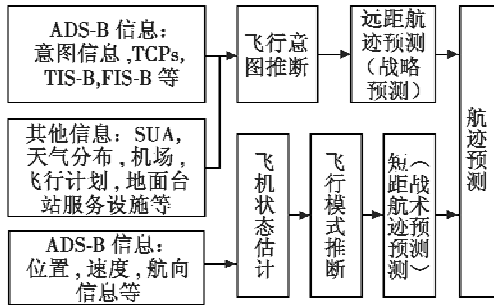


图1 战略与战术航迹预测

Fig.1 Tactical and strategic trajectory prediction

在目标飞行意图推断研究方面,文献[7]中提出基于速度偏移量和航向偏移量来推断飞行意图,飞行意图的判断是速度偏移与航向偏移等影响因子权衡的结果,最后考虑到达时间(Time To Go, TTG)影响因素实行二次加权,在考虑TTG加权时采取ATC规则指令与飞行计划TTG区别对待;文献[8]通过分析位置和航向偏移量得出长期意图(Long-Term Intent, LTI);文献[5]则通过将飞行意图模型编号分类,提出考虑速度与航向偏移量且适应多模型切换的意图推测算法,该算法试图以水平、垂直、速度意图组合为一个节点模型,通过衰减记忆和移动窗口方式处理历史数据;文献[4]从航向偏移量与TTG角度进行过相关研究,但考虑的模型更加简单。以上算法的总体缺陷是未能全面考虑影响飞行意图推断的关键因素,在分析历史数据方面存在不足。

在参考文献[7]中方法的基础上,本文提出考虑多重变量偏移值的算法。算法引入文献[5]中衰减记忆和移动窗口处理数据方法,实现针对低空目标自由多变、灵活飞行特点的飞行意图准确推断。在此基础上,依据文献[6]方法判断目标的飞行状态和飞行模式,具体来讲是通过4D信息、速度、航向等参量,结合历史数据分析未来短期内飞行模式和状态,精细预测未来相对较短一段航迹,该过程即为航迹战术预测过程。航迹战术预测方法中多模型建立、多模态切换及跟踪算法请参阅文献[6]。

1 本文飞行意图推断算法

计划航路上局部区域可能存在恶劣天气、特殊用途、飞行冲突等情况而禁止通行时,飞行员需针对当前复杂空情或环境要素适当调整航路,表现为增加或改

变航迹改变点^[4-5,7]。图2是恶劣天气条件下飞行意图改变示意图,图中,多边形区域为恶劣天气推断分布区域,以深颜色显示,分布在3部分,区域周围分布有扩展保护缓冲区域,以浅颜色显示。此时需根据飞机已有状态信息推断飞行意图,目标可能沿原计划航线飞行,也可能从危险区域边缘一侧避开危险区域。因此,从战略层面预测未来航迹需要根据现有信息确立下一个TCP,飞行意图推断极为关键。

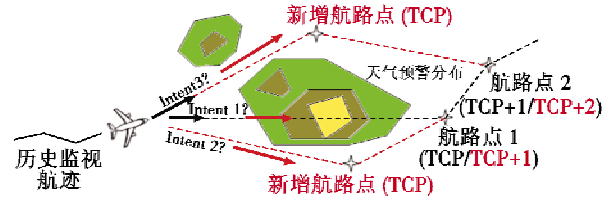


图2 特殊天气下飞行示意图

Fig.2 Flight intention under special weather

依据Lebeg中心极限定理分析航迹误差服从高斯分布,其关键影响参量具备独立性,同样服从高斯分布。并且,文献[4-5,7]在讨论航迹关键参数航向、位置、TTG、速度等时,其偏移量均服从高斯分布,本文沿用该研究结果。

1.1 航向偏移

航向偏移表示飞机当前航向与计划航向偏差,如图3所示。图中: θ_{wi} 为飞机到各航路点方位角; θ 为飞机当前航向; $\theta(W_i)$ 为飞机当前航向与前往航路点 W_i 的偏差量。航向偏移服从均值为0、方差为 σ_h 的高斯分布,求得 t 时刻航向偏移对应概率值 $p_h(t)$ 为^[4,7]

$$p_h(W_i, t) = N(\theta(W_i); 0, \sigma_h) \quad (1)$$

$$\theta(W_i) = (\theta - \theta_{wi}) \cdot 180/\pi \quad (2)$$

式中:取 $\sigma_h = 10^\circ$; $i = 1, 2, \dots, M$, M 表示飞机最近经过航路点的邻近航路点数,理论上这些关键点都可能成为飞机计划到达的航路点。根据 3σ 边缘分布得到该方差保证飞机航向分布在意图模型航向 $\pm 30^\circ$ 区间内。

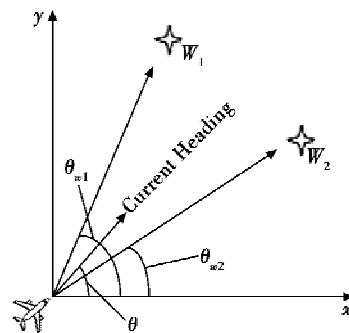


图3 航向偏移模型

Fig.3 Heading offset model

1.2 位置偏移

如图4所示,飞机经过 W_0 航路点飞向 W_1 过程中,

其位置偏离了计划航线。图中： d_{wi} 表示飞机飞往 W_1 航路点偏离计划航线的垂直偏移量； r_{wi} 表示飞机当前位置到 W_1 的距离； φ_{wi} 为二者夹角。依此类推，对航路点 W_2 也得到类似关系。位置偏移对应的概率 $p_d(t)$ 通过计算 φ_{wi} 服从均值为 90° 、方差为 σ_d 的高斯分布可得

$$p_d(W_i, t) = N(\varphi_{wi}; 90, \sigma_d) \quad (3)$$

$$\varphi_{wi} = \arccos(d_{wi}/r_{wi}) \cdot 180/\pi \quad (4)$$

式中：取 $\sigma_d = 10^\circ$ ； $i = 1, 2, \dots, M$ 。

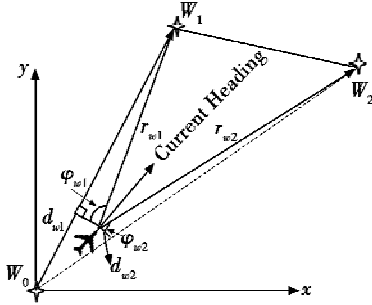


图4 位置偏移模型

Fig.4 Position offset model

1.3 TTG 偏移

TTG 偏移表示飞机以当前速度和离航路点距离计算得到的到达时间与计划时间的偏差，TTG 偏移服从均值为 0、方差为 σ_T 的高斯分布。求得概率值为

$$p_{TTG}(W_i, t) = N(TTG(W_i); 0, \sigma_T) \quad (5)$$

式中， σ_T 为时间偏移误差方差，根据实际 TTG 误差规定适当选取，本文取 900 s。

1.4 速度偏移

速度偏移是通过真实速度与计划速度的比值服从均值为 1、方差为 σ_v 的高斯分布计算得到的，即

$$p_v(W_i, t) = N(\hat{v}_{an}/v_t; 1, \sigma_v) \quad (6)$$

式中： \hat{v}_{an} 表示当前真实速度值； v_t 表示计划速度值，二者可通过 ADS-B 数据和飞行计划提取计算得到；取 $\sigma_v = 0.1$ ，根据 3σ 边缘分布得到，该方差保证飞机速度分布在意图模型速度的 70% ~ 130% 间，速度允许范围较大，是与低空飞行特点相适应的。

对每种偏移量对应可能航路点概率采用记忆衰减和移动窗口方式处理，如对速度偏移处理为

$$\rho_v(W_i, n) = \frac{1}{G_{Nk=n-m+1}} \sum_{k=n-m+1}^n f^{N-k} L_v(W_i, k) = \frac{G_{n-1}}{G_n} \left(f \rho_v(W_i, n) + \frac{L_v(W_i, n)}{G_{n-1}} \right) \quad (7)$$

$$L_v(W_i, n) = \frac{1}{m} \sum_{k=n-m+1}^n p_v(W_i, k) = \frac{n}{m} L_v(W_i, n) - \frac{n-m}{m} L_v(W_i, n-m) \quad (8)$$

式中： $G_n = \sum_{k=n-m+1}^n f^{n-k} = G_{n-1} + f^{n-1}$ 且 $G_1 = 1$ ， n 为离散

的当前时刻， m 为窗口宽度； $f \in [0, 1]$ 为记忆衰减因子；式(7)表示 n 时刻指向 W_i 且与速度偏移量有关的总体相关函数；式(8)表示 n 时刻指向 W_i 且与速度偏移量有关的局部相关函数；同理可得 $\rho_{TTG}(W_i, n)$ ， $\rho_d(W_i, n)$ ， $\rho_h(W_i, n)$ 。

定义似然函数为

$$\Lambda(W_i, i) = \frac{\rho_v(W_i) \rho_{TTG}(W_i) \rho_d(W_i) \rho_h(W_i)}{\sum_{i=1}^M \rho_v(W_i) \rho_{TTG}(W_i) \rho_d(W_i) \rho_h(W_i)} \quad (9)$$

式中： M 表示飞机最近经过航路点的邻近航路点数，理论上这些关键点都可能成为飞机计划到达的航路点；同时式(9)具有归一化作用。

最后得飞行意图为

$$\hat{I}(i) = \operatorname{argmax} \Lambda(W_i, i) \quad (10)$$

2 意图推断算法仿真分析

图5所示为飞行意图仿真模型，飞机沿计划航段(TCP→TCP+1→TCP+2→TCP+3)飞行，但实际飞行的航迹受多种不确定因素影响，导致垂直计划航迹方向和沿航迹方向均存在偏差。航迹误差由多种因素造成，由勒贝格中心极限定理可知此类误差符合高斯分布。美国 NASA Ames 研究中心对 4000 多例飞机航行信息的研究也表明航迹误差近似符合零均值高斯分布。文献[9-10]通过进一步研究指出：航迹误差可以定义为 3 个互相独立的部分，分别是沿航迹方向误差、垂直航迹侧面方向误差和垂直地面方向误差。因此，仿真过程中实际飞行航迹数据按照沿航迹方向、垂直航迹方向服从正态分布生成。图5中 A, B, C 指向部分飞机出现明显扰动，可能影响对飞行意图判断的准确度。计算过程中，平滑窗宽 $m = 5$ ，记忆衰减因子 $f = 0.7$ 。

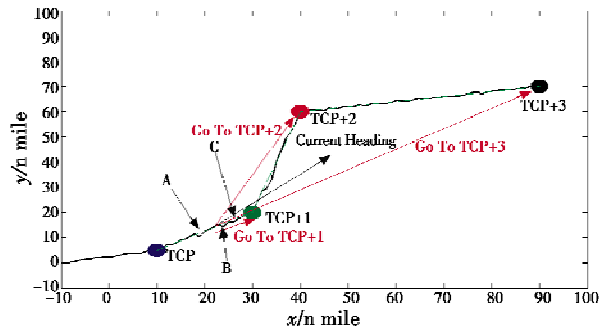


图5 飞行航迹仿真及意图示意

Fig.5 Trajectory simulation and intent schematic

通过本文算法和文献[7]算法计算，推断结果概率分布如图6所示，图6a所示为采用文献[7]算法得到的飞行过程中到达周围 TCPs 点概率，即到达 TCP, TCP+1, TCP+2, TCP+3 点意图概率；图6b所示为本文意图推断算法计算结果。对比图6a、图6b得到本文推断结

果分布更清晰,减少误判。文献算法推断结果在多个航段表现为两种意图概率交替干扰。

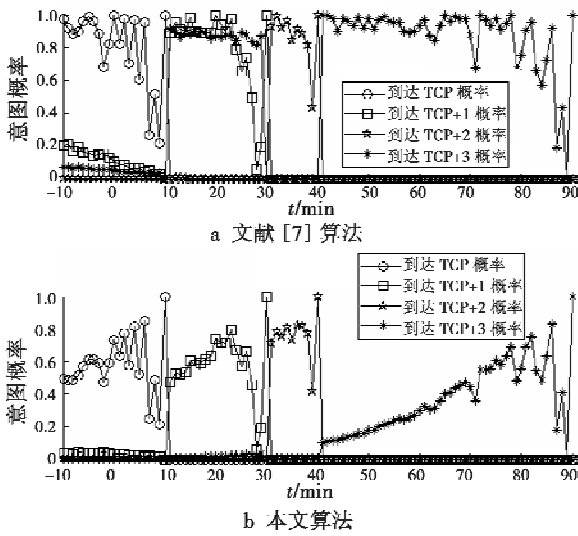


图6 意图推断概率分布

Fig. 6 Probability distribution after intent inference

图7是最终推断统计结果,文献[7]算法在 t 为10~30 min航段出现较多的毛刺和误判,而本文算法表现相对更稳定,准确判断当前飞行意图。在 t 为10~30 min航段,飞机设定的计划到达点为TCP+1,但是目标飞行状态及航迹扰动对意图判断产生干扰,只有综合考虑多种可能的影响因素,才能排除因某项指标恶化导致整体误判。文献[7]算法因为未考虑位置偏移量,没有很好地融合历史数据协同判断,导致上述多处意图推断产生误判。本文算法考虑航向偏移量、TTG偏移量、速度偏移量和位置偏移量,相对完整地考虑多种可能的影响因素,有效地提高判断的准确性,引入衰减记忆和移动窗口平滑模型综合历史信息,提高意图判断的稳定性。

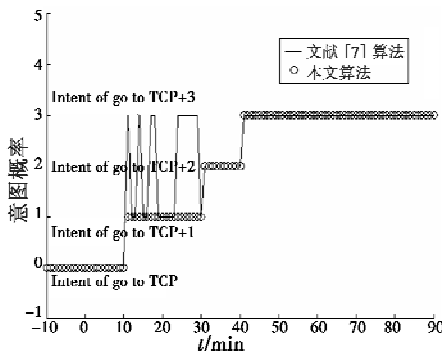


图7 意图推断结果比较

Fig. 7 The result comparison after intent inference

3 战略与战术航迹预测及仿真分析

综合本文与文献[6]给出的关于航迹预测相关算法,新型跟踪监视算法是从战术层面预测监视目标的短

期未来航迹;飞行意图推断算法则是从战略层面预测未来较远航迹。前者可以认为是未来航迹的“显微镜”,后者可以认为是“路线图”。总之,二者结合就可以粗中有细,远程预测是短程预测的指针,短程预测则弥补远程预测过于粗略的不足。图8中显示的分别为真实航迹与计划航迹,由TCP,TCP+1,TCP+2,TCP+3确定的是计划航段,体现为战略预测;真实的飞行轨迹则是相对光滑的曲线,是以计划航线为依据,按照可操作的存有局部差异的实际航迹飞行,体现于战术分析。综合判断的结果为图9,飞机当前位置处于CT模式起始处,通过战术预测算法准确判断飞机处于CT模式,结合意图推断,判断飞机将到达TCP+1点,因此得到CT模式的短程航迹,接着飞机从CT模式转换为CV模式直线飞行(与战略预测匹配),在接近TCP+2时,又转换为CT模式,依此类推,得到图9中标示的战术与战略综合航迹。

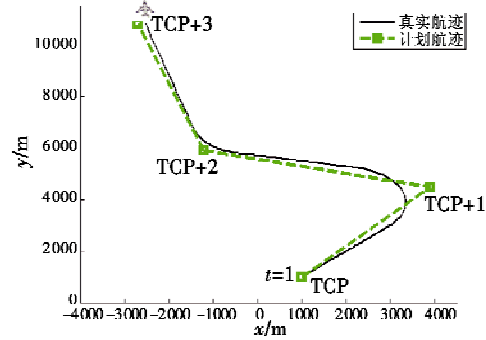


图8 计划航迹与真实航迹

Fig. 8 The planned track and real track

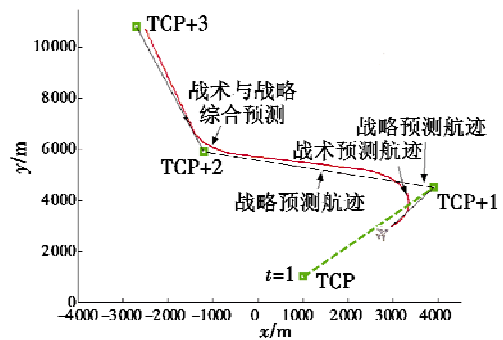


图9 战术与战略航迹预测

Fig. 9 Tactical and strategic trajectory prediction

4 小结

针对低空自由飞行目标跟踪监视时航迹不确定性问题,提出从战略与战术层面综合考虑方法。依据ADS-B监视TC报告,考虑目标多重状态参量偏移值,综合历史信息,实现目标未来远程航迹的粗略规划;战术预测是依据目标多模态间切换及新型跟踪监视算法,精细预测未来相对较短航迹。前者具有指针作用,后者弥补前者预测结果相对粗略的不足。实验结果表明,意图

推断算法在准确性方面有明显改善,战略与战术混合航迹预测在中远程航迹预测方面优势明显。

参考文献

- [1] 张军. 空地协同的空域监视新技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011. (ZHANG J. Air-ground collaborative air-space surveillance [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.)
- [2] RTCA SC-186. DO-282B minimum operational performance standards for Universal Access Transceiver (UAT) Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) [S]. Washington: RTCA, 2009.
- [3] BARHYDT R, WARREN A W. Development of intent information changes to revised minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (RTCA/DO-242A) [R]. Hanover: NASA, NASA/TM-2002-211669.
- [4] LIN X, ZHANG J, ZHU Y B, et al. Simulation study of algorithms for aircraft trajectory prediction based on ADS-B technology [C]//Asia Simulation Conference, 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing, IEEE, 2008:322-327.
- [5] KROZEL J, ANDRISANI D. Intent inference and strategic

path prediction [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2005:15-18.

- [6] 周波, 曹博, 唐鹏, 等. 基于 ADS-B 的新型跟踪监视算法 [J]. 电光与控制, 2014, 21(7):45-49. (ZHOU B, CAO B, TANG P, et al. A new algorithm for track monitoring based on ADS-B [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(7):45-49.)
- [7] YEPES J L, HWANG I, ROTEA M. New algorithms for aircraft intent inference and trajectory prediction [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2007, 30(2):370-382.
- [8] MUELLER K T, KROZEL J. Aircraft ADS-B intent verification based on a Kalman tracking filter [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, AIAA-2000-4067.
- [9] PRANDINI M, HU J, LYGEROS J, et al. A probabilistic approach to aircraft conflict detection [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(4):199-220.
- [10] 沈笑云, 周波, 曹博, 等. 基于概率的低空自由飞行冲突检测算法 [J]. 电光与控制, 2014, 21(6):47-51. (SHEN X Y, ZHOU B, CAO B, et al. A free flight conflict detection algorithm of low-attitude airspace based on conflict probability [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6):47-51.)

(上接第 16 页)

强。综合表明,该算法具有较强的稳健性和可靠性。

参考文献

- [1] BRENNAN L E, REED I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Transactions on AES, 1973, 9(2):237-252.
- [2] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. (WANG Y L, PENG Y N. Space-time adaptive processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [3] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, Philadelphia: IEEE, 2004:71-78.
- [4] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. Performance of MIMO radar systems: advantages of angular diversity [C]//The 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove: IEEE, 2004:305-309.
- [5] ROBEY F C, S. COUTTS S, WEIKLE D, et al. MIMO radar theory and experimental results [C]//The 38th Asilomar Conference on Signals, Systems, Computers, Pacific Grove: IEEE, 2004:300-304.

- [6] WANG H, CAI L S. On adaptive implementation of optimum MTI in severely nonhomogeneous environments [C]//International Radar Conference, Arlington: IEEE, 1990:351-355.
- [7] WANG H, ZHANG Y H, ZHANG Q. Lessons learned from recent STAP experiments [C]//Proceedings of the CIE International Conference of Radar Proceedings, Beijing: IEEE, 1996:761-765.
- [8] 周云, 汪学刚, 段锐. 一种机载预警雷达改进 JDL-STAP 算法 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(6):1052-1056. (ZHOU Y, WANG X G, DUAN R. A modified JDL-STAP algorithm for airborne early-warning radar [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6):1052-1056.)
- [9] 张兰英, 陈祝明, 江朝抒, 等. 一种新的 JDL-STAP 算法的研究 [J]. 信号处理, 2009, 25(10):1612-1615. (ZHANG L Y, CHEN Z M, JIANG C S, et al. The study for a new kind of JDL-STAP algorithm [J]. Signal Processing, 2009, 25(10):1612-1615.)
- [10] 李晓明, 冯大政. 一种机载雷达两级降维空时二维自适应处理方法 [J]. 航空学报, 2008, 29(1):170-175. (LI X M, FENG D Z. A two-stage dimension-reduced STAP method for airborne radar [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1):170-175.)