

# 区域导航陆基无线电导航系统自动选台优化算法研究



彭旭飞<sup>1</sup>, 秦鹏<sup>2</sup>, 张萌<sup>2</sup>, 张阳康<sup>1</sup>, 祖肇梓<sup>1</sup>

1. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

2. 陆军装备部航空军代局, 陕西 西安 710065

**摘要:**飞机使用区域导航系统进行导航时,为了减轻机组的工作负荷,需要机载设备对陆基无线电导航台进行自动选台。为了解决传统选台算法中导航台频繁切换对定位精度和连续性的影响,本文提出了一种自动选台优化算法。通过分析导航台的信号覆盖范围及实际导航性能,在导航台切换原则中引入有效导航距离和 ANP 阈值,改进了传统算法中的导航台切换原则。最后使用北京至上海航路进行仿真试验,结果表明优化算法可满足区域导航性能要求,同时避免了导航台频繁切换,提高了导航台使用的稳定性。

**关键词:**区域导航;无线电导航;测距机;甚高频全向信标;自动选台

中图分类号:V249

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.11.007

为了在空中交通中缩小航路间隔,提高空域利用率,同时优化飞行航迹,降低运行成本,国际民航组织(ICAO)提出了基于性能的导航(PBN)的概念<sup>[1-2]</sup>,并要求按照适航管理体系完成适航验证<sup>[3-4]</sup>。PBN包含区域导航(RNAV)和所需导航性能(RNP)两类基本导航规范。RNAV是可以使航空器在导航系统信号覆盖范围内,或在机载导航设备的工作能力范围内,或二者组合,沿任意的所需路径飞行的一种导航方式<sup>[5-6]</sup>。

在RNAV陆基无线电导航方式中,主要依赖测距机(DME)和甚高频全向信标台(VOR)。由于地面导航台很多,它们使用不同的标识和频率,因此需要选择最合适的陆基导航台进行导航。

为了减轻机组的工作负荷,飞行管理系统(FMS)可以自动选择需要调谐的陆基导航台,再根据测量信息完成位置解算。目前,国外民用飞机(如波音、空客)的FMS已经具备无线电自动调谐和定位的功能<sup>[7]</sup>。国内学者也进行了相应的研究,提出了DME台选台算法<sup>[8-10]</sup>,并将定位精度作为选台算法的考虑因素<sup>[11-12]</sup>。但是,这些自动选台算法逻辑较为简单,未考虑选台持续性的问题,导致使用过程中会出现导航台频繁切换的问题,影响区域导航的精度和连续性。

本文在分析DME/DME、DME/VOR导航台的信号覆盖范围及实际导航性能的基础上,提出了一种自动选台优化算法,在导航台切换原则中引入有效导航距离和ANP阈值,并使用北京至上海航路进行仿真试验。结果表明,优化算法可满足区域导航性能要求,同时避免了导航台频繁切换,提高了导航台使用的稳定性。

## 1 算法设计

### 1.1 导航台限制条件

DME导航系统由机载测距机和地面测距信标台组成,DME通过询问应答方式来测量飞机到地面导航台的斜距,需要两个及以上的DME信号,才能确定飞机的位置。DME/DME定位原理如图1所示。VOR导航系统由机载VOR接收机和地面VOR台组成。地面台发送两种信号:一种是固定相位的基准信号;另一种是相位可变的信号。可变信号不断朝各个角度发射相位不同的信号。飞机上的VOR接收机根据所收到的两种信号的相位差就可以判断飞机处于信号台的哪个角度上,如图2所示。

当信标台同时收发DME信号时,即构成DME/VOR,

收稿日期: 2022-05-18; 退修日期: 2022-07-14; 录用日期: 2022-09-11

引用格式: Peng Xufei, Qin Peng, Zhang Meng, et al. Research on optimized automatic station selection algorithm for RNAV ground-based radio navigation[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 50-57. 彭旭飞, 秦鹏, 张萌, 等. 区域导航陆基无线电导航系统自动选台优化算法研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(11): 50-57.

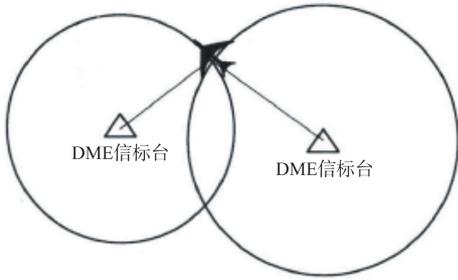


图 1 DME/DME 定位原理

Fig.1 DME/DME positioning principle

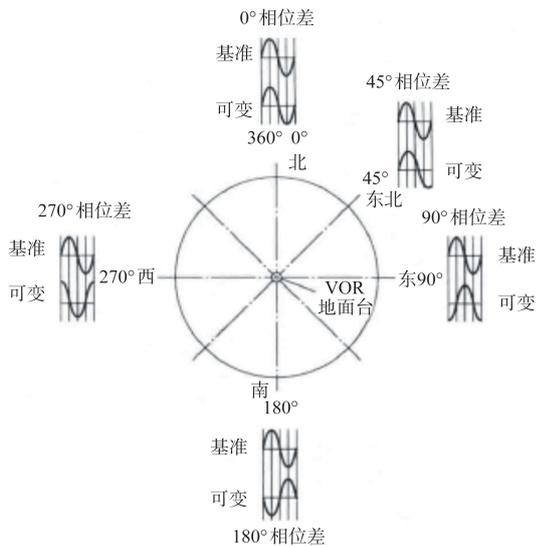


图 2 VOR 测向原理

Fig.2 VOR bearing measuring principle

也可实现对飞机的定位。DME/VOR 定位原理如图 3 所示。

由于在选台的过程中,DME/DME 方式在定位精度、使用范围等多个方面均优于 DME/VOR 方式,所以若飞机具备利用 DME/DME 方式的条件,就不会选择 DME/VOR 方式。使用无线电导航台时还有多个限制条件。

(1) 距离限制条件

根据 PBN 手册中的规定,导航台到飞机的距离  $L$  大于



图 3 DME/VOR 定位原理

Fig.3 DME/VOR positioning principle

160n mile (1n mile $\approx$ 1852m) 和小于 3n mile 时均不可参与基于性能的导航。因此飞机到可用导航台的距离应满足:  $3n \text{ mile} < L < 160n \text{ mile}$ 。

(2) VOR 台顶角盲区限制条件

导航台的顶空静锥为工作盲区,当飞机处于盲区中时,导航台也不可用,该静锥一般为  $30^\circ$ ,如图 4 所示。

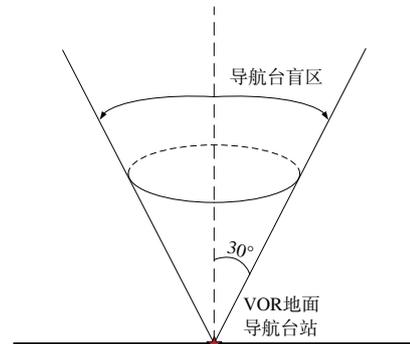


图 4 导航台盲区

Fig.4 Blind area of navigation station

(3) DME/DME 角度限制条件

飞机与两个 DME 导航台连线的夹角必须满足  $30^\circ \sim 150^\circ$  条件。

以两个 DME 台的位置为圆心,以其导航台信号覆盖范围  $R$  为半径画圆,这两个圆的交集是飞机可以同时接收两个 DME 导航台信号的区域。再考虑飞机与两个 DME 导航台连线夹角满足  $30^\circ \sim 150^\circ$  的区域:以两个导航台之间的连线为基准形成两个等边三角形,以等边三角形的顶点为圆心,以两个 DME 导航台之间的距离  $r$  为半径画圆。这两个圆的交集与两个 DME 导航台信号覆盖范围的交集再除去盲区的部分就是满足  $30^\circ \sim 150^\circ$  夹角条件的区域,如图 5 所示。

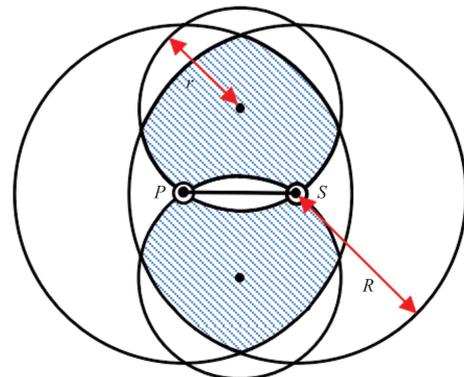


图 5 DME/DME 有效导航区域

Fig.5 DME/DME effective navigation area

### 1.2 实际导航性能评估

对无线电导航进行实际性能评估,既是RNAV体系下的导航性能要求,也是导航台选台算法的考虑因素。实际导航性能用ANP表示,定义了一个误差圆半径,其能使飞机实际飞行位置有至少95%的概率落入该圆内,单位为海里<sup>[13]</sup>。

#### (1) VOR系统测量均方差

根据RTCA DO-236B, VOR系统精度的基本表达式是

$$\sigma_{\text{VOR}}^2 = (\sin(\text{GS\_error}) \times D)^2 + (\sin(\text{airborne\_error}) \times D)^2 \quad (1)$$

式中,GS\_error为地面站校准和弯曲误差;D为到VOR的距离;airborne\_error即机载设备误差的标准差,包括接收机噪声。

#### (2) DME系统测量均方差

DME误差的基本表达式是

$$\sigma_{\text{DME}}^2 = (\text{GS\_error})^2 + (\text{air\_error})^2 + (K \times D)^2 \quad (2)$$

式中,GS\_error为地面站的时间误差;Air\_error为空中误差;K为常数;D为到DME的距离。

#### (3) ANP计算方法

DME/DME导航模式下,定位误差方差为

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{\sin^2 2\varphi'} (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) \quad (3)$$

式中, $\varphi'$ 为两个DME地面台与飞机连线之间的夹角; $\sigma_a^2$ 、 $\sigma_b^2$ 分别为两个DME导航台的测量均方差。DME/VOR导航模式下,定位误差方差为

$$\sigma_s^2 = \sigma_{\text{DME}}^2 + \sigma_{\text{VOR}}^2 \quad (4)$$

式中, $\sigma_{\text{DME}}^2$ 、 $\sigma_{\text{VOR}}^2$ 分别为DME和VOR的测量均方差。

位置估计的水平随机误差服从二维高斯分布,因此 $1\sigma$ 误差椭圆的长半轴为 $\sigma_s$ 。对二维高斯分布的概率密度函数积分,可得到其95%不确定度误差圆的半径,即为ANP

$$\text{ANP} = K\sigma_s \quad (5)$$

式中,K为转换因子,与误差椭圆长短半轴的比例有关,取值范围为1.96~2.45。

### 1.3 有效导航距离

有效导航距离是指飞机处于某一DME/DME导航台对的有效导航区域内,飞机以当前的方向飞行,DME/DME导航台对可为飞机提供的最长导航距离,直到飞机飞出DME/DME的有效导航区域。导航台选台算法中应考虑有效导航距离因素,当所选的DME对的有效导航距离过短时,飞机飞行很短的距离就不得不切换其他台站。这样导致导航台跳变问题,在整个航路上有效导航距离都较短,总

计切换台站次数过多,即导航台切换过于频繁。

有效导航距离包括三种情况<sup>[14]</sup>。

(1)飞机在有效导航区域向下一航路点飞行时,与DME/DME台的夹角逐渐小于 $30^\circ$ ,从而不满足DME/DME的角度限制条件,如图6所示。

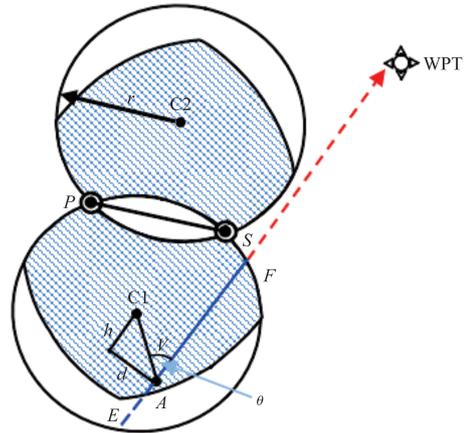


图6 DME/DME有效导航区域情况1

Fig.6 The situation of DME/DME effective navigation area 1

(2)飞机在有效导航区域向下一航路点飞行时,航线方向穿过C1和C2源之间的交集。飞机与DME/DME台的夹角会超过 $150^\circ$ ,不满足DME/DME的角度限制条件,如图7所示。

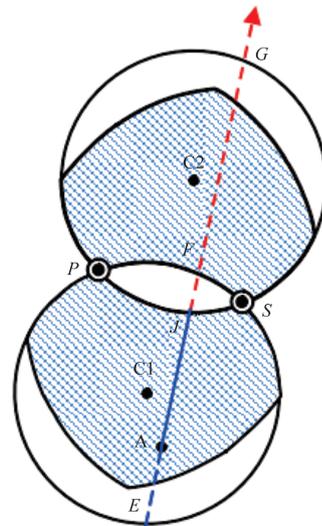


图7 DME/DME有效导航区域情况2

Fig.7 The situation of DME/DME effective navigation area 2

(3)飞机在有效导航区域向下一航路点飞行时,航线方向与导航台的覆盖半径相交,使得飞机与导航台之间不满足距离限制条件,如图8所示。

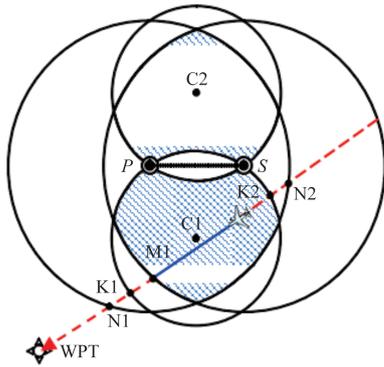


图8 DME/DME有效导航区域情况3

Fig.8 The situation of DME/DME effective navigation area 3

### 1.4 切换原则

传统的无线电自动选台算法为了保证最优导航精度，以ANP最小作为切换准则，导致所选择的导航台频繁切

换，影响定位的连续性。本文对切换原则进行优化时，考虑了有效导航距离和ANP阈值因素。整个选台算法流程如图9所示。

首先经过初始化和工作状态检查后，读取导航数据库中的导航台信息，计算飞机与导航台之间的距离，并筛选出满足3~160n mile限制条件的导航台。当导航台数量不足2时进入DME/VOR分支，当导航台数量 $\geq 2$ 时进入DME/DME分支。

在DME/VOR分支中，排除处于顶角盲区的导航台，优选出距离最近的导航台，并计算ANP。若 $ANP < RNP$ 则进行DME/VOR位置解算。在DME/DME分支中，筛选出满足 $30^\circ \sim 150^\circ$ 角度条件的导航台。当飞机处于起始航路点时按照ANP最小原则选台，否则在无线电导航设备的主通道中计算当前DME对的ANP和有效导航距离，在无线电导航设备的备用通道中计算使ANP最小的DME

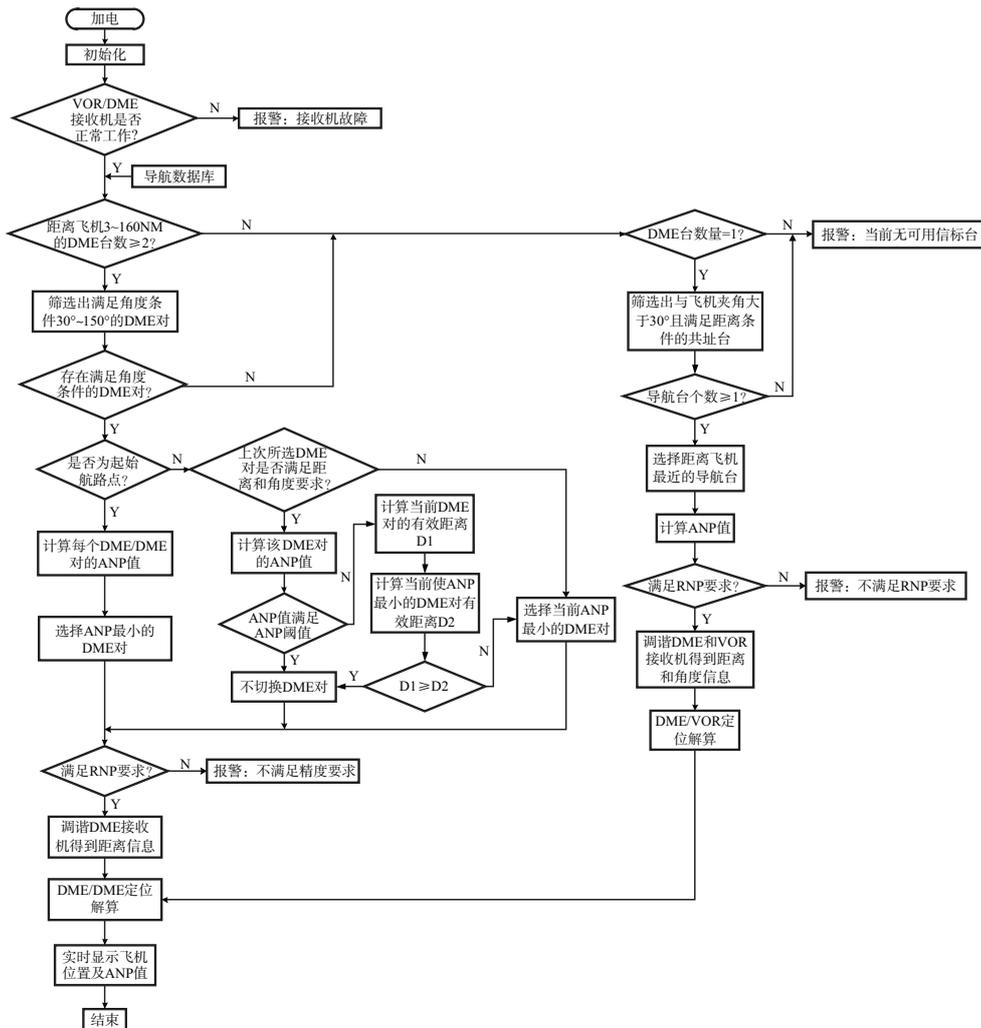


图9 选台算法流程

Fig.9 Algorithm flow of navigation station selection

的ANP和有效导航距离。当ANP超过ANP阈值且备选DME对的有效导航距离大于当前DME对的有效导航距离时进行导航台切换,否则不切换。完成DME/DME选台后进行位置解算。

在这一选台算法中,对主用DME对和备用DME对的有效导航距离进行判断,可以避免有效导航距离过短而引发导航台频繁切换。此外,可通过设定不同的ANP阈值,调整选台的灵敏度。当ANP阈值较大时,则换台不灵敏,但可能导致定位误差较大;当ANP阈值较小时,可以保证定位精度,但可能导致选台频繁切换。综上所述,可选飞机和DME/DME台连线的夹角为 $60^\circ$ 时ANP的值作为换台阈值。

## 2 仿真计算

以北京首都机场到上海浦东机场航线为例进行仿真计算,对比分析传统选台算法和优化选台算法在导航台使用、换台频度、定位误差、ANP等方面的差异。读取导航数据库中的所有导航台位置,其与飞行轨迹的关系如图10所示。

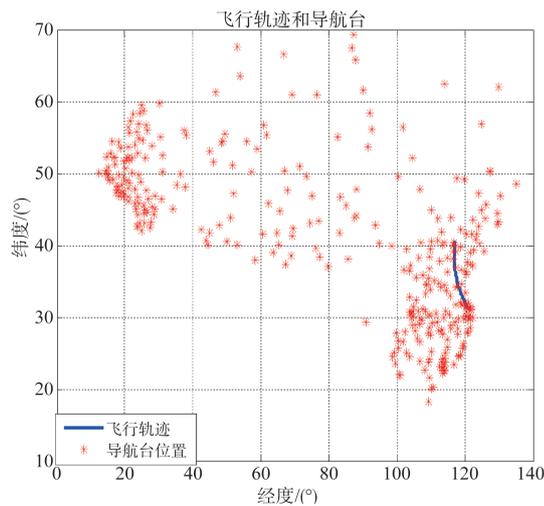


图10 导航台位置和飞行轨迹

Fig.10 Navigation station position and flight trajectory

使用传统选台算法和优化选台算法,在整个飞行过程中使用的导航台如图11和图12所示。可见部分导航台在传统算法中使用,在优化算法中未使用。说明优化选台算法的切换不如传统算法频繁。

使用传统选台算法和优化选台算法的定位误差的ANP如图13和图14所示,两种算法均可以保证ANP不大于RNP(RNP取4nmile),保证了定位精度。此外,还可以看出定位误差和ANP的变化趋势一致,存在明显相关性。ANP跳变是由于导航台的切换。图中红点表示此刻导航台发生了切换,可见优化选台算法相比传统选台算法,换台不频繁。

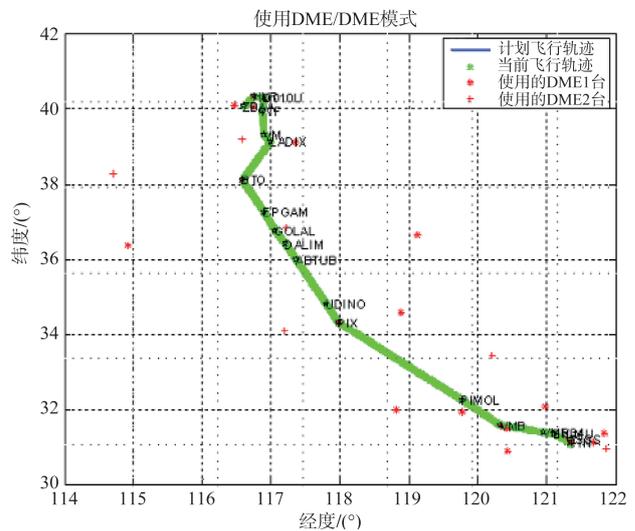


图11 传统选台算法时地面导航台使用情况

Fig.11 Usage of ground navigation station with traditional navigation station selection algorithm

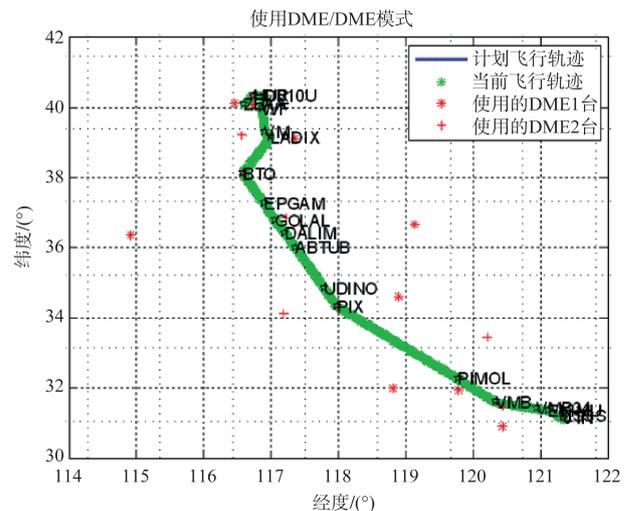


图12 优化选台算法时地面导航台使用情况

Fig.12 Usage of ground navigation station with optimized navigation station selection algorithm

在整个航线中,使用传统选台算法和优化选台算法所使用的导航台见表1。

## 3 结束语

本文根据RNAV对导航性能的精度要求,在分析导航台的信号覆盖范围及实际导航性能的基础上,提出了适用于无线电导航的优化选台算法。针对传统选台算法出现的导航台频繁切换问题,综合考虑了主备用DME对有效导航距离、ANP阈值设定等因素,实现了对切换原则的优化设

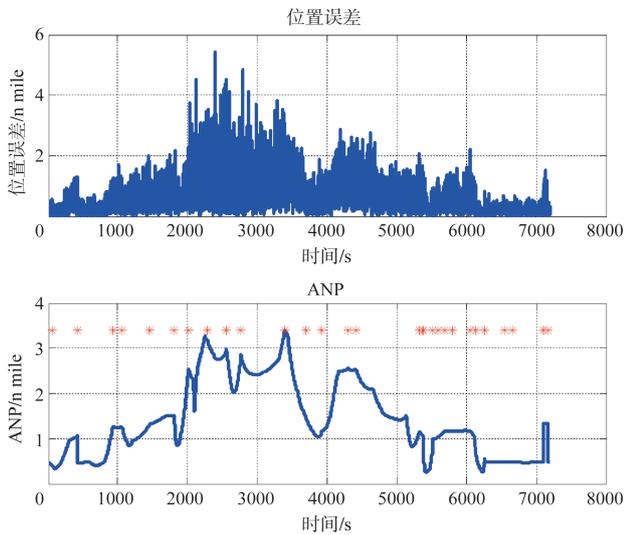


图 13 传统选台算法的定位误差、ANP 和切换标志

Fig.13 Positioning error, ANP and switch flag of traditional navigation station selection algorithm

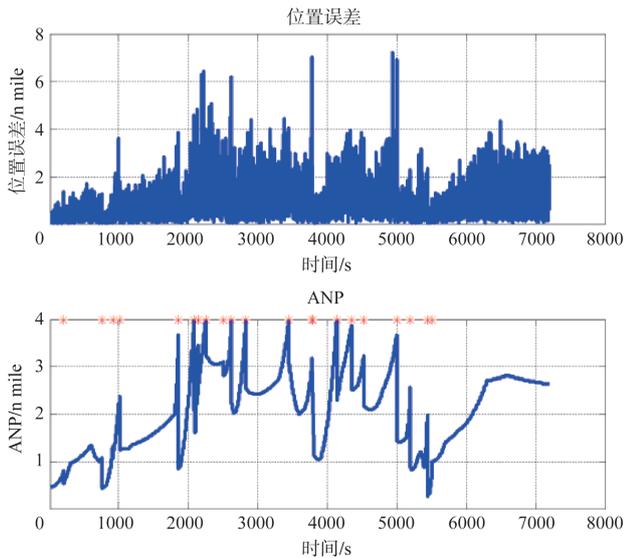


图 14 优化选台算法的定位误差、ANP 和切换标志

Fig.14 Positioning error, ANP and switch flag of optimized navigation station selection algorithm

计。最后使用北京至上海航路进行仿真试验,结果表明优化算法可满足区域导航性能要求,同时避免了导航台频繁切换,提高了导航台使用的稳定性,算法可用有效。 **AST**

参考文献

[1] 黄卫芳. 浅谈基于性能导航(PBN)[J]. 空中交通管理, 2007 (7):10-16.  
Huang Weifang. Performance based navigation[J]. Air Traffic Management, 2007(7):10-16. (in Chinese)

表 1 选择的导航台对比

Table 1 Comparison of navigation station selection

传统选台算法			
航路点序号	选台类型	DME1	DME2
1-16	DME/DME	HUR	SZY
17-61	DME/DME	HUR	PEK
62-426	DME/DME	PEK	SZY
427-883	DME/DME	HUR	PEK
884-928	DME/DME	HUR	SZY
929-1059	DME/DME	SZY	VYK
1060-1458	DME/DME	TAJ	VYK
1459-1694	DME/DME	PEK	VYK
1695-1812	DME/DME	PEK	TAJ
1813-2012	DME/DME	TAJ	VYK
2013-2078	DME/DME	BTO	SJW
2079-2110	DME/DME	BTO	VYK
2111-2140	DME/DME	BTO	TAJ
2141-2246	DME/DME	BTO	SJW
2247-2284	DME/DME	BTO	WXI
2285-2555	DME/DME	WXI	YQG
2556-2767	DME/DME	BTO	YQG
2768-3392	DME/DME	WFG	YQG
3393-3431	DME/DME	LYG	WFG
3432-3586	DME/DME	LYG	TOS
3587-3691	DME/DME	LYG	PIX
3692-3926	DME/DME	PIX	TOS
3927-4125	DME/DME	LYG	PIX
4126-4167	DME/DME	LYG	TOS
4168-4308	DME/DME	LYG	YCH
4309-4410	DME/DME	NKG	YCH
4411-4659	DME/DME	CZO	YCH
4660-5133	DME/DME	CZO	NKG
5134-5137	DME/DME	CZO	NTG
5138-5328	DME/DME	CZO	VMB
5329-5373	DME/DME	NTG	VMB
5374-5382	DME/DME	CZO	VMB
5383-5508	DME/DME	SUF	VMB
5509-5523	DME/DME	NXD	VMB
5524-5592	DME/DME	NXD	SUF
5593-5684	DME/DME	NTG	SUF
5685-5790	DME/DME	NXD	SHA
5791-6056	DME/DME	JTN	NXD
6057-6135	DME/DME	HSH	JTN
6136-6252	DME/DME	JTN	SHA
6252-6542	DME/DME	PDL	SHA
6543-6659	DME/DME	JTN	PDL
6660-7106	DME/DME	PDL	SHA
7107-7158	DME/DME	HSH	SHY
7159-7200	DME/DME	JTN	PDL

表 1 (续)

优化选台算法			
航路点序号	选台类型	DME1	DME2
1-203	DME/DME	HUR	SZY
204-754	DME/DME	PEK	SZY
755-907	DME/DME	HUR	PEK
908-1011	DME/DME	HUR	SZY
1012-1855	DME/DME	SZY	VYK
1856-2080	DME/DME	TAJ	VYK
2081-2132	DME/DME	BTO	VYK
2133-2247	DME/DME	BTO	TAJ
2248-2507	DME/DME	BTO	WXI
2508-2622	DME/DME	WXI	YQG
2623-2829	DME/DME	BTO	YQG
2830-3449	DME/DME	WFG	YQG
3450-3785	DME/DME	LYG	TOS
3786-4137	DME/DME	PIX	TOS
4138-4352	DME/DME	LYG	TOS
4353-4524	DME/DME	NKG	YCH
4525-5002	DME/DME	CZO	YCH
5003-5198	DME/DME	CZO	NKG
5199-5443	DME/DME	CZO	VMB
5444-5508	DME/DME	SUF	VMB
5509-7200	DME/DME	NXD	VMB

- [2] 孙晓敏,王丹,戴苏榕.支持基于性能导航运行的飞行管理系统需求分析[J].航空电子技术,2018,49(4):21-28.  
Sun Xiaomin, Wang Dan, Dai Surong. Flight management system requirements analysis for performance-based navigation operation[J]. Avionics Technology, 2018, 49(4):21-28. (in Chinese)
- [3] 李岩.欧美军用航空器系统适航性发展分析[J].航空科学技术,2021,32(11):19-22.  
Li Yan. Analysis on development of airworthiness of European and American military aircraft system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(11): 19-32. (in Chinese)
- [4] 徐明,宫蓁.军机适航与安全性发展综述[J].航空科学技术,2021,32(10):13-20.  
Xu Ming, Gong Qi. Overview of airworthiness and safety development of military aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 13-20. (in Chinese)
- [5] 陈志勇.飞行管理系统与基于性能的导航的历史与发展[J].中国民航飞行学院学报,2010,21(3):14-18.  
Cheng Zhiyong. The history and development of flight

- management system and performance based navigation[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2010, 21(3):14-18. (in Chinese)
- [6] 王党卫.基于性能导航(PBN)技术研究[J].现代导航,2013,2(1):5-10.  
Wang Dangwei. Research of performance-based navigation technology[J]. Modern Navigation, 2013, 2(1): 5-10. (in Chinese)
- [7] Boeing Company. Flight crew operation manual of FMC equipped 737[Z]. Seattle: Boeing Company, 2011.
- [8] 苏志刚,李志勃,吴仁彪.实现PBN技术的陆基DME台选择算法[J].系统工程与电子技术,2013,35(10):2170-2175.  
Su Zhigang, Li Zhibo, Wu Renbiao. DME selection algorithm for implementation of PBN technology[J]. System Engineering and Electronics, 2013,35(10):2170-2175.(in Chinese)
- [9] 沈笑云,褚世超,焦卫东,等.DME/DME区域导航的导航台优选算法[J].中国民航大学学报,2014,32(3):31-36.  
Shen Xiaoyun, Chu Shichao, Jiao Weidong, et al. Optimized station selection algorithm for DME/DME RNAV[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2014,32(3):31-36. (in Chinese)
- [10] 马航帅,王丹,孙晓敏.区域导航陆基无线电导航系统自动选台和定位算法研究[J].航空电子技术,2015,46(1):29-34.  
Ma Hangshuai, Wang Dan, Sun Xiaomin. Research on the ground-based radio navigation automatic station selection and location algorithm for RNAV[J]. Avionics Technology, 2015,46(1):29-34. (in Chinese)
- [11] 马航帅,王丹,孙晓敏.考虑多因素的RNAV陆基无线电自动选台算法[J].电光与控制,2015,22(8):37-42.  
Ma Hangshuai, Wang Dan, Sun Xiaomin. Ground-based radio automatic station selection algorithm for RNAV considering multiple factors[J]. Electronics Optics & Control, 2015,22(8): 37-42. (in Chinese)
- [12] 郑晴.基于ANP的DME/DME台优选方法研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2019.  
Zheng Qing. The research of DME/DME station selection method based on ANP[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight Academy of China,2019.(in Chinese)
- [13] 王丹,马航帅,孙晓敏.陆基区域导航实际导航性能评估方法研究[J].航空电子技术,2018,49(2):13-18.

Wang Dan, Ma Hangshuai, Sun Xiaomin. Research on the actual navigation performance evaluation method of the ground-based area navigation[J]. Avionics Technology, 2018,49(2):13-18. (in Chinese)

[14] 石宝峰,程朋,程农. 区域导航进近阶段导航台选择模型与仿

真[J]. 系统仿真学报, 2011,23(10):2039-2045.

Shi Baofeng, Cheng Peng, Cheng Nong. Station selection model and simulation for RNAV approach[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(10):2039-2045. (in Chinese)

## Research on Optimized Automatic Station Selection Algorithm for RNAV Ground-Based Radio Navigation

Peng Xufei<sup>1</sup>, Qin Peng<sup>2</sup>, Zhang Meng<sup>2</sup>, Zhang Yangkang<sup>1</sup>, Zu Zhaozi<sup>1</sup>

1. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

2. Aviation Military Representative Bureau, Army Equipment Department, Xi'an 710065, China

**Abstract:** When the aircraft uses the area navigation system, in order to reduce the workload of the flight crew, it is necessary to select the ground-based navigation station automatically by airborne equipment. In order to solve the influence of frequent switch of navigation station on position accuracy and continuity in traditional navigation station selection algorithm, an optimized automatic station selection algorithm is proposed. By analyzing the signal coverage and actual navigation performance, the effective navigation distance and ANP threshold are introduced into the navigation station switching principle, which improves the traditional station switching principle. Finally, the simulation test of Beijing to Shanghai is carried out. The result shows that optimized automatic station selection algorithm can meet the performance requirements of regional navigation, as well as avoid frequent switch of navigation station, and improve the stability of usage of navigation station.

**Key Words:** RNAV; radio navigation; DME; VOR; station automatic selection