

## 考虑多因素的 RNAV 陆基无线电自动选台算法

马航帅, 王丹, 孙晓敏

(航空电子系统综合技术重点实验室, 上海 200233)

**摘要:** 针对利用陆基无线电导航系统实施区域导航(RNAV)运行时需要自动选择合理的导航台进行导航的要求,提出了一种考虑多因素的陆基无线电自动选台算法,并且采用两机场间的 RNAV 航路和周围 DME 导航台的信息,对 RNAV 航路阶段设计的考虑多因素的自动选台算法与考虑单一因素的选台算法结果进行对比和分析,并对所选的 DME/DME 区域导航精度进行验证。实验表明,提出的考虑多因素的陆基无线电自动选台算法可有效地选择较好的导航台,在及时切换为更好的导航台的同时能避免导航台切换频繁,最终实现飞机的精确定位,满足 DME/DME 区域导航性能要求。

**关键词:** 区域导航; 无线电导航; 测距机; 甚高频全向信标; 导航台选择

**中图分类号:** V249.32<sup>+</sup>4; TN96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0037-06

## Ground-Based Radio Automatic Station Selection Algorithm for RNAV Considering Multiple Factors

MA Hang-shuai, WANG Dan, SUN Xiao-min

(Key Laboratory of Science and Technology on Avionics Integration Technologies, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** For the implementation of RNAV operation by using ground-based radio navigation system needs to select a reasonable station for navigation, a ground-based radio automatic station selection algorithm is proposed with multiple factors into consideration. Based on the information of RNAV airways and DME stations around between ZSSS and ZBAA, a comparative analysis is made of the automatic station selection algorithm considering multiple factors for RNAV airway design with the algorithm only considering a single factor, and the precision of selected DME/DME RNAV is verified. The experimental results show that the proposed multi-factor ground-based radio automatic station selection algorithm can effectively select better stations, avoid frequent switching of stations while switching to a better station in time, as well as ultimately achieving precise positioning of the aircraft, and satisfying the requirements of DME/DME RNAV performance.

**Key words:** RNAV; radio navigation; DME; VOR; station selection

### 0 引言

区域导航(RNAV)可以使航空器在导航系统信号覆盖范围之内,或在机载导航设备的工作能力范围之内,或二者的组合范围之内,沿任意期望的路径飞行<sup>[1]</sup>。RNAV 利用 DME/DME, VOR/DME, GNSS, IRS 等多个导航源的信号,通过机载飞行管理系统(FMS)连续计算航空器的地理位置,从而得到实时的导航信息<sup>[2-3]</sup>。在众多导航源中,由于陆基无线电导航不要求对机载导航设备做任何改变,且比其他导航方式需

要更少的导航台数,因此陆基无线电导航方式在 RNAV 中越来越受到重视<sup>[4]</sup>。目前,我国现实可行的 RNAV 主要是基于陆基无线电导航系统 DME/DME 和 VOR/DME 的区域导航方式<sup>[5]</sup>。

在飞行过程中,FMS 主要利用陆基无线电导航台的信号完成位置的实时解算,但是飞机可能接收到许多不同频率的导航台信号,因此需要选择最合适的地面导航台进行导航。目前 FMS 可以人工选台也可以自动选台,人工选台在一定程度上增加了飞行员的工作量,采用导航台的自动选择方法可以有效地降低飞行员选台的工作量。由于地面导航台数目众多且类型不一,每一个导航台可用范围和信号强弱也不同,同时在导航台选择时切换是否频繁以及所选导航台是否有

利于飞机位置的精确计算问题,这些都需要在选择导航台时进行综合考虑。因此,为使用陆基无线电导航系统实施 RNAV, FMS 如何考虑众多因素实现自动选台显得尤为关键。目前,国外在这方面的研究已经非常成熟,如波音、空客系列机型的 FMS 早已具有无线电自动选台功能<sup>[6-7]</sup>,但是由于技术封锁的原因,很难看到自动选台的具体实现方法;国内学者在这方面也进行了探索性研究,文献[8-9]指出,为避免导航台切换频繁,在进行导航台选择时考虑飞机到导航台的有效导航距离因素,但是这种选台方法对定位精度较少考虑。因此,如何避免导航台切换频繁并且能够保证定位精度满足区域导航性能要求,这些在导航台选择时都需要综合考虑。

针对上述问题,本文在深入分析导航台选择原则和限制条件的基础上,提出了一种考虑多因素的陆基无线电自动选台算法,并采用两机场间的 RNAV 航路进行了仿真实验,实验结果表明,本文提出的算法可有效选择较好的导航台,在能及时切换更好的导航台同时降低导航台切换频繁,定位结果满足 RNAV 的精度要求。

## 1 考虑多因素的陆基无线电自动选台算法设计

陆基无线电导航系统是借助于飞机上的无线电接收机设备接收 FMS 选择的导航台信号进行距离和角度的测量,通过几何式定位确定飞机位置的一种导航系统。在飞机飞行过程中,由于地面导航台数目众多且类型不一,每一个导航台可用范围和信号强弱不同,导航台切换是否频繁,所选导航台是否有利于飞机位置的精确计算,这些因素在导航台选择时都要进行综合考虑。为此,本文在考虑众多因素基础上提出了陆基无线电自动选台算法。

### 1.1 导航台选择原则和限制条件分析

一般而言,飞机上的无线电导航接收机包含两台 VOR(甚高频全向信标)接收机,两台 DME(测距机)接收机。它们分别向 FMS 发送各自接到的信号,而 FMS 根据不同的情况选择不同的信号来进行导航与定位。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 VOR/DME 方式<sup>[10]</sup>,所以只要飞机具备利用 DME/DME 方式的条件,就不会选择 VOR/DME 方式,因此,本文所设计的自动选台算法针对的是 DME/DME 方式,当它无法使用时,则发出警告并利用其他方式进行导航定位,如 VOR/DME, GNSS, IRS 导航。

考虑导航台的可用性、角度限制、切换时间、定位

精度以及算法的复杂度等因素<sup>[11]</sup>,自动选台算法需要满足的限制条件如下所述。

1) 所选导航台必须满足可用性条件,即飞机处于导航台的信号覆盖范围内,且信号的强度足够强,通常 DME 信号服务范围为 3~200 n mile(1 n mile = 1852 m);飞机不处于导航台的顶空静锥之内,所谓静锥,指的是导航台上空的一定角度内的锥形范围;导航台属于标准导航数据库。

2) 测距线的夹角要处于 30°~150°之间,夹角越靠近 90°,定位精度越高。

3) 导航台对不能频繁切换。由于地面导航台分布密集,传统的 DME 导航台选择方式会出现导航台频繁切换的问题,严重影响了定位的精确性和连续性,并会带来很大的安全隐患,因此导航台选择时台对不能频繁切换。

4) 导航台对的定位精度应该满足 DME/DME 区域导航性能要求,即满足 RNAV1 的精度要求。

### 1.2 自动选台算法原理

自动选台算法首先根据飞机当前估计的位置,从机载标准导航数据库中选择 100 个距离最近的 DME 导航台,且其距飞机的距离小于 200 n mile,形成最近导航台清单;然后考虑导航台的可用性,包括导航台锥形盲区、信号覆盖范围等限制条件,得到可用导航台清单,如果可用导航台清单大于 2 个,根据有效导航距离、测距线夹角、飞机到导航台的距离等因素,采用多因素选台公式计算每个导航台对的权重值,选取最大权重值的导航台对作为候选导航台;最后根据导航台切换准则比较候选导航台和当前所用的导航台,决定是否切换为新的候选导航台。其中,考虑算法运算的复杂度,最近导航台清单每 2 min 更新一次,自动选择算法每 5 s 更新一次。

#### 1.2.1 考虑多因素的自动选台算法和切换准则

综合无线电波传播特性和飞机与导航台的相对位置关系分析可知,为保证 DME/DME 导航定位精度和导航台对不会频繁切换,有效导航距离、测距线夹角和飞机到导航台的距离等因素在选台时需要重点考虑。其中: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;所谓测距线夹角是指飞机与 2 个 DME 导航台连线的夹角;而飞机到导航台的距离是导航台与飞机之间的斜距,在 DME/DME 方式中,选择距飞机较远的导航台计算飞机与导航台的距离。

影响导航台对切换频度的主要因素是有效导航距

离,有效导航距离越长,那么切换频度越低;测距线的交角越接近 90°,定位误差越小;影响信号强度的主要因素是飞机与导航台的距离,一般情况下,距离越近,信号越强,测量误差也越小。综合考虑有效导航台距离  $D_{\text{eff}}$ 、测距线夹角  $\alpha$ 、飞机到导航台距离  $D$  等因素,通过理论推导和大量仿真实验,设计考虑多因素的自动选台算式为

$$f(p, s) = \sin \alpha \times \exp\left(\sqrt{\frac{D_{\text{eff}}}{R}}\right) \times \left(\frac{R}{D}\right)^2 \quad (1)$$

式中:  $p$  和  $s$  为导航台的索引号;  $R$  为 DME 信号覆盖范围,即 200 n mile;测距线夹角范围为 30° ~ 150°;有效导航距离范围为 0 ~ 200 n mile,飞机到导航台的距离范围为 3 ~ 200 n mile;第 1 项  $\sin \alpha$  代表测距线夹角因素的影响,越靠近 90°定位精度越高,  $\sin \alpha$  值也越大;第 2 项表征有效导航距离因素的影响情况,有效导航距离越大,则导航台对使用时间越长,切换频度越低,第 2 项值对最终权重贡献也越多;最后一项反映飞机到导航台距离因素的影响,即导航台信号强弱对定期精度的影响,距离越近则信号越强,测量误差越小最终的定位精度也越高。因此,该选台算法综合考虑了影响导航台对切换频率和定位精度的多个因素,能够选择合理的导航台对。

通过计算可用导航台对的权值  $f(p, s)$ , 并选择  $f(p, s)$  最大值作为候选导航台对,但仅根据这个公式选出的候选导航台对无法避免选台切换频繁的问题,必须要设置一定的换台条件,才能保证不是每一次更新候选台对时都会换台,也不是只要有更好的导航台对就进行换台,设计导航台对切换准则如下:

- 1) 如果飞机已飞过当前导航台对有效导航距离的 80% 时;
- 2) 候选导航台对的有效导航距离也比当前导航台对大时;
- 3) 如果当前导航台对不满足可用性条件,例如飞机处于盲区,或者不处于导航台信号覆盖范围,或者测距线夹角不在 30° ~ 150° 之间时;
- 4) 如果当前使用其他导航方式,且存在两个以上的可用导航台时。

### 1.2.2 导航台自动选择算法程序流程

针对陆基无线电导航系统的实际工作情况,给出了整体的导航台自动选择算法流程,具体实现流程如图 1 所示。先根据导航台限制条件对本地导航台数据进行选择,挑选出备选导航台,然后利用多因素选台算法选出候选导航台对,最后根据导航台切换条件比较候选导航台和当前所用的导航台,决定是否切换为新的候选导航台。

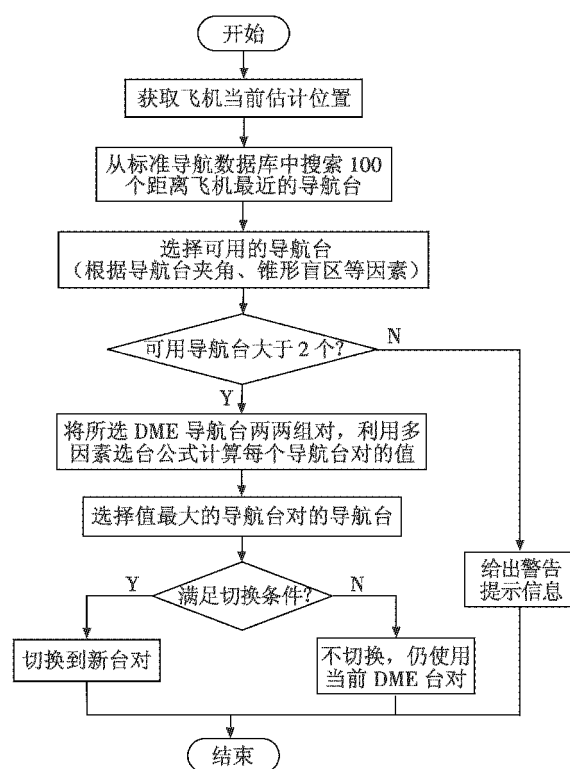


图 1 导航台自动选择算法流程图

Fig. 1 Flow chart of automatic station selection algorithm

## 2 仿真试验分析

### 2.1 仿真环境搭建

本文利用搭建的仿真试验环境对设计的考虑多因素的陆基无线电自动选台算法进行仿真试验分析。仿真试验采用了在 C 环境下搭建的仿真模型平台,见图 2。仿真环境主要包括 3 个部分:飞行仿真器、无线电导航传感器仿真系统和陆基无线电导航系统。其中,无线电导航传感器仿真系统根据自动选台信息和飞机位置信息,通过查询标准导航数据库,实现 DME 理想斜距计算,并根据 RTCA DO-236B 标准中对 DME 测量距离误差的精度要求,在理想 DME 斜距上添加均值为 0、标准差为 0.1 n mile 的白噪声测量误差,最终实现斜距测量信息的仿真。

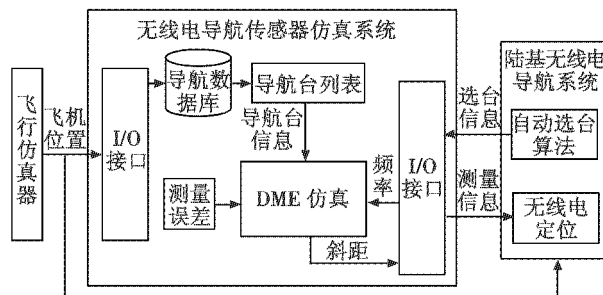


图 2 仿真试验环境结构图

Fig. 2 The simulation test environment structure



### 2.2 飞行仿真轨迹及无线电台分布

仿真过程中,从航路图上提取两机场间的 RNAV 航路进行了仿真试验。其中,飞行过程中航线包括 12 个航路点,分别为:ZSSS,POMOK,PIKAS,PIMOL,PIX,UDINO,ABTUB,GOLAL,EPGAM,BTO,VYK,ZBAA。仿真过程中,飞机最大速度为 320 kn(1 kn≈0.51 m/s),最大飞行高度为 35 000 ft(1 ft≈0.3 m),仿真步长为 0.1 s,全程飞行仿真 8800 s。飞行仿真轨迹水平位置曲线及航路中附近的陆基无线电台分布情况如图 3 所示。其中,航路点用蓝色“☆”标识,陆基无线电台用红色“△”标识。

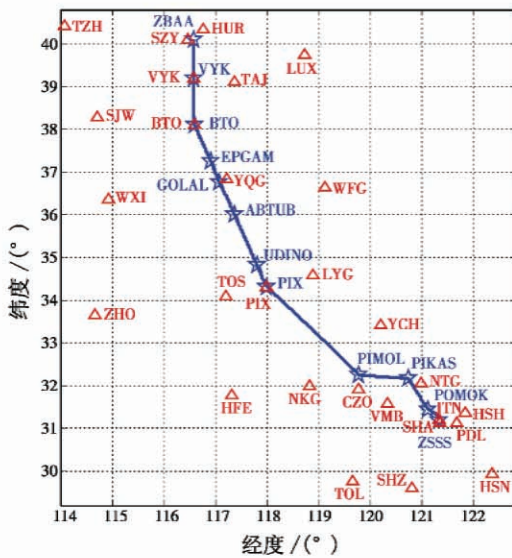


图3 飞行轨迹水平位置曲线及航路中陆基无线电台分布示意图

Fig.3 Flight trajectory curve in horizontal position and the ground-based radio station distribution

### 2.3 自动选台算法仿真试验

为验证本文设计的自动选台算法的有效性和合理性,利用上述两机场间的 RNAV 航路进行全程飞行仿真。分别采用只考虑测距线夹角因素、只考虑飞机到导航台距离、只考虑有效导航距离和 3 种因素全部考虑这 4 种情况进行测试对比分析,验证设计的自动选台算法在减少切换频率方面的有效性;同时,为了验证本文设计的算法是否满足 RNAV 导航性能要求,根据 RTCA DO-236B 中的要求进行导航精度计算,对算法的合理性进行全面的验证。

情况 1,自动选台准则中只考虑测距线夹角,不考虑飞机到导航台的距离、有效导航距离 2 个因素。仿真全程自动选择的 DME/DME 频率结果如图 4 所示,在这种情况下,选台以测距线夹角为主,测距线夹角越接近 90°,导航台被选择的可能性越大。可见选台结果比较混乱,共出现了 99 次导航台对的切换,并且每

对导航台的导航距离都比较短。考虑测距线夹角时,虽然定位精度得到了保证,但是出现了导航台频繁切换的问题,没有把飞机到导航台的距离考虑在内,在部分导航台对的选择中舍近求远,导航台信号的强度和准确度很难保证,所以这种情况下有着明显的不妥。

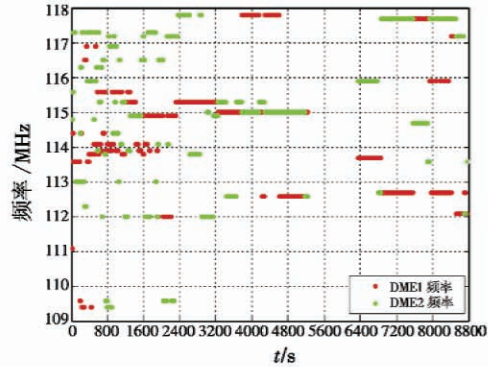


图4 只考虑测距线夹角的选台结果

Fig.4 Station selection considering only ranging line angle

情况 2,只考虑飞机到导航台的距离,不考虑其他 2 个因素。由图 5 可见,全程导航台切换共 52 次,导航台的切换比较频繁,一方面是由于在选台时只选择离飞机最近的可用的导航台对,它的有效导航距离比较短,而这样会导致飞行很短的距离就不得不重新选择导航台,增加了选台负担;另一方面,没有考虑测距线的夹角,在实际的飞行过程中,无法保证定位精度,所以这种算法的可行性不高;还有一个问题是,由于选台算法是定时更新的(5 s 计算一次),而算法中又没有考虑测距线夹角的问题,所以在飞行过程中,有部分时间其测距线夹角已超出了可用范围,导致飞机使用不可用的导航台。

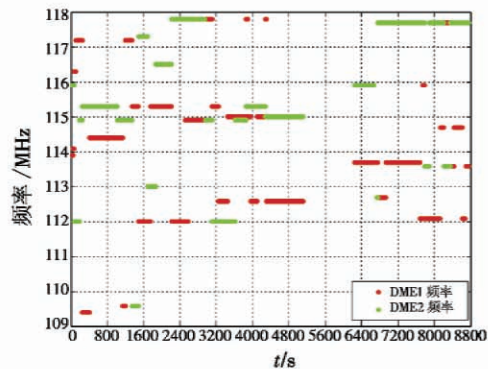


图5 只考虑飞机到导航台距离的选台结果  
Fig.5 Station selection considering only distance from plane to station

情况 3,只考虑有效导航距离,不考虑其他 2 个因素,自动选台结果如图 6 所示。在这种情况下,选择有效导航距离最大的导航台作为候选台对。由于在选择导航台时没有考虑测距线夹角,那么导航台的选择将不会把定位精度作为选台因素,选择的导航台有效导



航距离很长,但可能其定位精度较低,但是在图中定位精度无法体现出来。考虑有效导航距离会在相当大程度上避免导航台切换太过频繁,由图 6 可以看出,导航台切换共 31 次,导航台对的切换都是经过了很长的距离之后才进行的,与图 4 和图 5 相比,导航台切换频繁的问题得到了很好的解决。但是这种情况下仍然没有解决情况 2 中测距线的夹角有可能超出可用性范围的问题,其解决方案是,飞机每次更新位置的时候都计算一次测距线夹角,如果临近  $30^\circ$  或  $150^\circ$ ,则立即通知选台算法进行导航台对的切换,以保证测距线的夹角总是满足可用性条件。

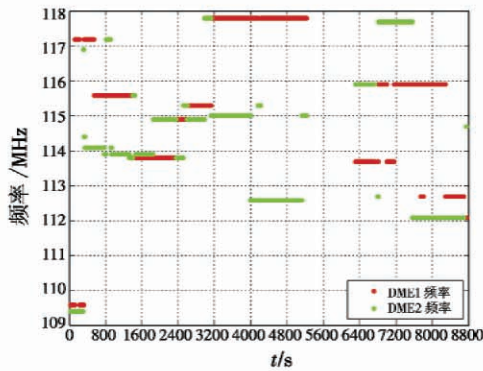


图 6 只考虑有效导航距离的选台结果

Fig.6 Station selection considering only effective navigation distance

情况 4,把所有的因素都考虑在内,利用选台公式计算。由图 7 可见,这种情况下,把飞机到导航台对的距离、导航台对的有效导航距离、测距线的夹角都作为考虑因素,可以全面把握情况 1 ~ 情况 3 中出现的各种问题,避免了导航台切换频繁问题,共切换 29 次,且定位结果较好。下面以飞机在航路点  $E119.778\ 34^\circ$ ,  $N32.246\ 666^\circ$  为例,分析考虑多因素的导航台对权值以及各个因素的值,并对数据进行分析。此时满足限制条件的导航台对及各影响因素的导航台对共 34 个,由于篇幅所限,本文中仅列出了具有代表性的前 6 个导航台对中各因素值作为示例,如表 1 所示。

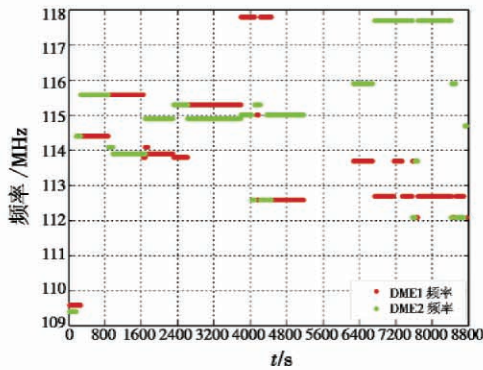


图 7 考虑所有因素的选台结果

Fig.7 Station selection with consideration of all the factors

表 1 导航台对中各因素的值

Table 1 Value of each factor in station team

导航台索引号 ( <i>p,s</i> )	有效导航 距离/km	测距线夹 角/ $(^\circ)$	飞机到导航台 的距离/km	选台公式 $f(p,s)$
VMB NKG	150.99	108.90	95.21	27.11
NSE SUF	151.20	94.34	103.42	24.22
VMB NSE	140.35	93.14	102.62	24.07
CZO NKG	91.37	72.99	94.11	23.78
NKG SUF	163.03	110.09	103.42	23.38
CZO NTG	114.54	80.39	114.79	17.90

由表 1 可以看出每一个因素的数量级和大致的取值范围。单独的因素并不能完全决定选台的结果,如导航台对(NKG,SUF)的有效导航距离最大,(VMB,NSE)的测距线夹角最接近  $90^\circ$ , (CZO,NKG) 导航台与飞机的距离最小,但是最终选择的导航台对为(VMB,NKG),因为它的选台公式计算结果  $f(VMB,NKG)$  最大,达到了 27.11,这一对导航台有效导航距离有 150.99 km,即当飞机飞行经过  $80\% \times 150.99 = 120.79$  km 的距离后才需要切换导航台,相对来讲,导航台对的切换并不频繁,因为有效导航距离比较大;另外,测距线的夹角为  $108.90^\circ$ ,比较接近  $90^\circ$ ,定位的精度也会比较高;飞机与导航台的距离为 95.21 km,距离比导航台的信号覆盖范围 370 km 小很多,信号的强度足够。

下面根据 4 种情况下所选的导航台对的测量距离信息进行位置计算,并以理想飞行轨迹位置为基准,通过对定位结果进行对比分析,考量 4 种情况的选台和定位效果。

本文采用 RTCA DO-236B 中推荐的位置估计误差 (PEE) 分析方法对定位结果进行评估,其中,EPE 表示位置计算结果的 95% 的精确度性能。

根据 RNAV1 的要求,实现 DME/DME 区域导航要求在 95% 的飞行时间内,总系统误差 (TSE) 必须小于等于  $\pm 1$  n mile。TSE 包括导航系统误差 (NSE) 和飞行技术误差 (FTE)。其中,导航系统误差包括位置估计误差、航路定义误差和显示误差,对于航路定义误差及显示误差这里可以暂不考虑。目前 FTE 一般可达到 0.5 n mile,因此,总的误差分配给 NSE 最大误差可达到 0.866 n mile,即按照 PEE 计算出的结果必须小于 0.866 n mile<sup>[12]</sup>。

4 种情况下的位置估计误差曲线如图 8 所示,可以明显看出,只考虑有效导航距离和飞机到导航台距离两种情况的定位误差存在较大的波动,定位误差远大于只考虑夹角和考虑所有因素的情况。但是由于只考虑夹角因素会导致导航台对切换过于频繁,切换次数为 99 次,选台负担较大,而考虑所有因素时导航台对切换次数仅有 29 次,因此,综合考虑有效导航距离、测距线夹角、飞机到导航台距离以及其他限制条件等



多种因素的选台算法,能够有效选择合适的 DME/DME 导航台对,避免导航台切换频繁,同时所选导航台的位置误差小于 0.866 n mile,验证了本文设计的算法是满足 RNAV1 性能要求的。

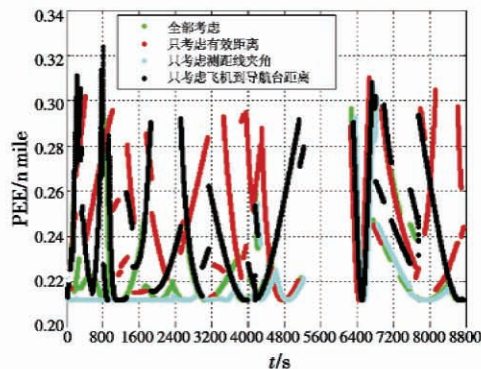


图 8 4 种情况下定位 PEE 结果

Fig.8 The positioning PEE result of four cases

### 3 结论

针对采用陆基无线电导航系统开展 RNAV 实施时需要 FMS 选择合理且有效的导航台进行精确位置计算的要求,提出了考虑多因素的陆基无线电自动选台算法。仿真实验表明,采用本文所设计的自动选台算法能选择有效的 DME 台对,同时算法能一定程度上避免导航台频繁切换。算法对导航台有效导航距离、测距线夹角、飞机到导航台距离以及导航台限制条件都进行了综合考虑,保证了算法的有效性、可靠性;另外,根据自动选台的测量信息进行定位的结果满足 DME/DME 区域导航性能要求。

#### 参考文献

- [1] Advisory Circular 90-100A. Terminal and en route Area Navigation (RNAV) operations[S]. Washington D C; Federal Aviation Administration, 2007.
- [2] ALBERT A, CRAMER M, NICHOLSON T, et al. Analysis of advanced Flight Management Systems (FMS), Flight Management Computer (FMC) field observations trials; Area Navigation (RNAV) holding patterns [C]//IEEE 30th Digital Avionics Systems Conference (DASCON), 2011: 4A1-4A17.
- [3] RTCA DO-236B. Minimum aviation system performance standards; required navigation performance for area navigation[S]. Washington D C; RTCA Inc, 2003.
- [4] KIM E. Investigation of APNT optimized DME/DME network using current state of the art dMEs [C]//Position Location and Navigation Symposium, 2012 IEEE/ION, Myrtle Beach, 2012: 146-157.
- [5] 中国民航总局. 中国民航区域导航 (RNAV) 飞行程序的试验和实施 [C]//第 11 次航行会议, 蒙特利尔, 2003: 1-3. (Civil Aviation Administration of China. Experiment and Application of China Civil Area Navigation Flight Program [C]//The 11th Aviation Flight Conference, Montreal, 2003: 1-3.)
- [6] 737 Flight crew operation manual of FMC equipped [Z]. US; Boeing Company, 2011.
- [7] A318, A319, A320, A321 flight crew operating manual [Z]. France; Airbus, 2003.
- [8] 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 (10): 2039-2045. (SHI B F, CHENG P, CHENG N. Station selection model and simulation for RNAV approach [J]. Journal of System Simulation, 2011 (10): 2039-2045.)
- [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 X Y, CHU S C, JIAO W D, et al. Optimized station selection algorithm for DME/DME RNAV [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32 (3): 31-36.)
- [10] TRAN M. DME/DME accuracy [C]//ION National Technical Meeting of The Institute of Navigation January, San Diego, CA, 2008: 1-15.
- [11] International Civil Aviation Organization. Performance Based Navigation (PBN) manual [DB/OL]. [2011-10-10]. <http://www.caac.gov.cn/dev/fbs/XJSYY/201110/PO20111010540008641095.pdf>.
- [12] SHI D W, LU Y D. Method of signal assessment and flight inspection for DME/DME RNAV [C]//16th International Flight Inspection Symposium, Beijing, 2010: 199-205.



请扫描二维码关注我刊