

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.010

引用格式:李锐,周自力,刘松涛,等.一种提高频谱利用率的航空导航台站频率指配算法[J].电讯技术,2016,56(12):1359-1364. [LI Rui, ZHOU Zili, LIU Songtao, et al. An efficient frequency allocation algorithm for improving spectrum utilization of aeronautical navigation aid facilities[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12):1359-1364.]

一种提高频谱利用率的航空导航台站频率指配算法*

李 锐¹,周自力¹,刘松涛^{**2},王建强¹,王 军²

(1. 中国民用航空局第二研究所,成都 610041;2. 电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,成都 611731)

摘 要:针对多个新建航空无线电导航台站高效频率指配问题,根据美国联邦航空管理局(FAA)的频谱管理规范,研究了在已有多台站场景下的频率指配算法。总结了导航台站频率指配的复用干扰和频率配对两个约束条件,给出了提高频谱利用率的频率指配度量准则,设计了单个新建台站的频率指配算法,给出了多台站频率指配的深度优先递归搜索算法。数值仿真结果表明,所提算法在为多个新建台站同时指配频率时,可有效提高频谱利用率。

关键词:航空无线电导航;频率指配;复用干扰;频率配对;深度优先搜索

中图分类号:TN965 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)12-1359-06

An Efficient Frequency Allocation Algorithm for Improving Spectrum Utilization of Aeronautical Navigation Aid Facilities

LI Rui¹, ZHOU Zili¹, LIU Songtao², WANG Jianqiang¹, WANG Jun²

(1. The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to efficiently allocate spectrum resource for aeronautical navigational aid(NAVAID) facilities under the scenario with many stations, spectrum allocation algorithms are proposed based on the spectrum management regulation of Federal Aviation Administration(FAA). With the constraints of frequency reuse interference and frequency pairing, a spectrum efficiency oriented metric is first proposed, and on this base, a spectrum allocation algorithm is provided for the case of a single-station. Then, a depth-first searching based spectrum allocation method is further proposed for the case of multi-stations. Numerical simulation results show that the proposed spectrum allocation algorithms can assign frequencies for all applied stations with high spectrum utilization.

Key words: aeronautical radio navigation; frequency allocation; reuse interference; frequency pairing; depth-first searching

1 引 言

(Instrument Landing System, ILS)、甚高频全向信标

民用航空无线电导航台站主要有仪表着陆系统 (Very High Frequency Omnidirectional Range, VOR)

* 收稿日期:2016-03-30;修回日期:2016-10-25 Received date:2016-03-30;Revised date:2016-10-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2015AA01A705);国家自然科学基金资助项目(61471099);民航安全能力建设项目(TMSA1510);高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(博导类)(20130185110005);四川省应用基础研究计划项目(2016JY0104)

Foundation Item: The National High-tech R&D Program(863 Program) of China(2015AA01A705);The National Natural Science Foundation of China(No. 61471099);The Civil Aviation Safety Capacity Build Project(TMSA1510);The Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20130185110005);The Application Oriented Fundamental Research Project(2016JY0104)

** 通信作者:303413956@qq.com Corresponding author:303413956@qq.com

和测距仪 (Distance Measuring Equipment, DME) 等。ILS 系统的航向信标 (Localizer, LOC) 与下滑信标 (Glideslope, GS) 分别工作在甚高频 (108.10 ~ 111.95 MHz) 和特高频 (329.15 ~ 335 MHz), VOR 工作在甚高频, DME 工作在 L 频段 (962 ~ 1213 MHz)^[1]。

随着民用航空市场的高速发展,需要新建的 ILS、VOR 和 DME 台站不断增加,导致无线频谱资源日益紧张。为此,在保证已有台站安全工作的前提下,有必要对新建台站进行高效的频率指配,提高频谱利用率。在新建台站的频率指配中面临两方面的问题:一是各台站发射的无线电信号可能产生相互干扰,影响航空器的飞行安全;二是不同类型台站配合工作时,需要考虑频率配对要求。

频率指配算法分为确定性算法和优化算法^[2]。优化算法包括遗传算法、蚁群算法等,主要用于频谱使用环境动态变化的复杂军用系统,实现设备频率的动态实时改变,其复杂度高。在频谱环境稳定、不需实时改变频谱的民用航空无线电系统中,一般采用复杂度低的确定性算法,如深度优先的搜索算法。文献[3]基于确定性算法的思想,研究了局域增强系统台站的频率指配算法。

针对上述民用导航台站频率的高效指配问题,本文根据美国联邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, FAA) 的频谱管理规范^[4],首先总结了与 ILS、VOR 和 DME 频率指配相关的约束条件,以提高频谱利用率为目标,给出了频率指配的频谱利用率准则;在此基础上,设计了单个新建台站的频率指配算法;进一步,针对大量台站频率指配的问题,采用深度优先的搜索方法,给出了多台站频率指配的算法。仿真结果表明,所提算法在大量台站下可实现高频谱利用率的频率指配。

2 导航台频率指配目标和约束条件

将已建 LOC、GS、VOR 台站所使用的频率和 DME 台站询问、应答所用频率分别构成 5 组向量: $f_{L_{used}} = \{f_{L_{used},i}\}$, $f_{G_{used}} = \{f_{G_{used},i}\}$, $f_{V_{used}} = \{f_{V_{used},i}\}$, $f_{Din_{used}} = \{f_{Din_{used},i}\}$ 和 $f_{DreP_{used}} = \{f_{DreP_{used},i}\}$, 其中, i 是正整数。根据频率配对规范要求^[4],表 1 定义了可为新建台站指配的频率向量组。表中, $f_{i,l}$ 、 $f_{i,g}$ 、 $f_{i,ILS,din}$ 、 $f_{i,ILS,drep}$ 分别是按规范配对的 LOC、GS 以及 DME 的询问和应答频率向量, $f_{i,v}$ 、 $f_{i,VOR,din}$ 、 $f_{i,VOR,drep}$ 分别是按标准配对的 VOR 与 DME 的询问和应答频率向量, $f_{i,DME,l}$ 、 $f_{i,DME,g}$ 、 $f_{i,DME,v}$ 、 $f_{i,DME,din}$ 、 $f_{i,DME,drep}$ 分别是按标准配对的 LOC、GS、VOR 以及 DME 的询问和应答

频率向量; ω_i 表示对应该组频率向量的权重,其值等于频率的复用次数。

表 1 新建台站频率指向向量组
Tab. 1 Frequency allocation vector set for new stations

与第 i 个新建 ILS 台站关联	$F_{i,ILS} = \{f_{i,l}, f_{i,g}, f_{i,ILS,din}, f_{i,ILS,drep}, \omega_{i,ILS}\}$
与第 i 个新建 VOR 台站关联	$F_{i,VOR} = \{f_{i,v}, f_{i,VOR,din}, f_{i,VOR,drep}, \omega_{i,VOR}\}$
与第 i 个新建 DME 台站关联	$F_{i,DME} = \{f_{i,DME,l}, f_{i,DME,g}, f_{i,DME,v}, f_{i,DME,din}, f_{i,DME,drep}, \omega_{i,DME}\}$

为了提高频谱的整体利用率,定义如下频率复用因子:

$$\eta_t = \sum_{p=1}^q (n_{p,t})^2. \tag{1}$$

式中: t 为台站类型; $n_{p,t}$ 为该台站的第 p 个已用频率的复用次数; q 为该台站已用频点的个数。本文采用两类频率指配的目标:

(1) 最大化式(1)定义的频率复用因子。显然,当复用次数较多的频率被再次指配给新建台站时,频率复用因子的增量就会大于指配复用次数较少的频率。

(2) 频率负载均衡。在指配频率时,首先指配频率复用因子小的频率,以使得所有频率复用因子尽可能接近。

在进行频率指配时,需要考虑如下两个约束条件:

约束条件 1 (C1): 频率复用干扰约束。在进行频率复用时,必须通过合理的频率规划,利用足够的地理间隔将同频或邻频的干扰抑制到可容忍的范围内^[5]。文献[4]的附录 3 第 2、3 部分给出了具体的射频保护要求,文献[6]给出了具体的信号保护比。

约束条件 2 (C2): 频率配对约束。ILS、VOR、DME 的频率需要根据文献[3]附录 3 给出的频率配对表进行配对。每一组配对频率可以构成如下向量:

$$f_j = \{f_{j,l}, f_{j,g}, f_{j,v}, f_{j,din}, f_{j,drep}\}. \tag{2}$$

式中: $f_{j,l}$ 、 $f_{j,g}$ 、 $f_{j,v}$ 、 $f_{j,din}$ 、 $f_{j,drep}$ 分别为配对表中第 j 组的 LOC、GS、VOR 以及 DME 的询问和应答频率。由于给定频率的 DME 只会和 ILS 或 VOR 之一配对,令式(2)中元素没有取值的时候为 0,则 $\{f_{j,l}, f_{j,g}\}$ 和 $f_{j,v}$ 不同时为正值。当新建 ILS 或 VOR 台站时,无论它们是否与 DME 台站合建,都要考虑与之配对的 DME 台站的频率保护^[7]。

根据规范要求^[4],对应 3 类导航设备频率指配的具体约束关系如下:

(1) VOR

$$\begin{cases} C_{VOR1}: \{f_{i,v}, f_{v_{used}}\} \text{ 同频、第一、二邻频干扰}, \{f_{i,v}, f_{L_{used}}\} \text{ 第一邻频干扰} \\ C_{VOR2}: \{f_{i,v}, f_{i,VOR,drep}\}, \{f_{i,VOR,din}, f_{i,VOR,drep}\} \text{ 配对要求} \end{cases} \tag{3}$$

(2) ILS

$$\begin{cases} C_{\text{ILS}1}: |f_{i,1}, f_{L_{\text{used}}}| \text{ 同频、第一邻频干扰}, |f_{i,1}, f_{V_{\text{used}}}| \text{ 第一、二邻频干扰} \\ C_{\text{ILS}2}: |(f_{i,1}, f_{i,g}), (f_{i,1}, f_{i,\text{ILS},\text{drep}}), (f_{i,\text{ILS},\text{din}}, f_{i,\text{ILS},\text{drep}})| \text{ 配对要求} \end{cases} \quad (4)$$

(3) DME

$$\begin{cases} C_{\text{DME}1}: |f_{i,\text{DME},\text{drep}}, f_{\text{Drep}_{\text{used}}}| \text{ 同频、第一邻频干扰}, |f_{i,\text{DME},\text{din}}, f_{\text{Din}_{\text{used}}}| \text{ 同频干扰} \\ C_{\text{DME}2}: |(f_{i,\text{DME},1}, f_{i,\text{DME},g}, f_{i,\text{DME},\text{drep}}), (f_{i,\text{DME},v}, f_{i,\text{DME},\text{drep}}), \\ (f_{i,\text{DME},\text{din}}, f_{i,\text{DME},\text{drep}})| \text{ 配对要求} \end{cases} \quad (5)$$

本文的目标是在已有大量已建 ILS、VOR 和 DME 台站的情况下,为多个新建的 ILS、VOR 或 DME 台站指配频率,在满足干扰约束和频率配对约束的前提下,提高频谱利用率或使频谱负载均衡。

3 单台站频率指配算法

单台站频谱指配算法包括两个步骤:首先根据上一节中的频率指配约束 C1(即式(3)~(5)中的第一个约束条件)对可用频率进行第一次筛选,保留满足频率复用干扰约束的备选频率;然后针对频谱指配约束 C2(即式(3)~(5)中的第二个约束条件)对可用频率进行第二次筛选,保留满足频率配对约束的备选频率。

3.1 基于频率复用干扰约束 C1 的频率筛选

3.1.1 VOR 频率复用(C_{VOR1})筛选

根据规范^[4],两个 VOR 台站之间的最大保护距离为 406 n mile,故对第 i 个新建 VOR 台站,采用下面所述算法对 406 n mile 内的每一个已建 VOR 台站进行处理,分别去掉不满足 VOR 和与之配对的 LOC 同频及邻频干扰的备选频率:

(1) 计算第 k 个已建 VOR 台站与新建 VOR 台站的距离 $D_{v,v}$ ^[8],和第 m 个已建 LOC 台站与新建 VOR 台站的距离 $D_{l,v}$,令 $f_{i,v} = f_{v_{\text{used}},k}$;

(2) 若 $D_{v,v} \leq S_{v,v}$ ($S_{v,v}$ 是文献[4]附录 3 给出的与台站功率差有关的 VOR 台站间的最小保护距离),则从 $f_{i,v}$ 中去掉 $f_{i,v}$,跳转到步骤 1。

(3) 遍历新建 VOR 台站 181 n mile 内所有 LOC 台站,若存在 $D_{l,v} \leq S_{l,v}$ ($S_{l,v}$ 是文献[4]附录 3 给出的与台站功率差有关的 VOR 台站与 LOC 台站间的最小保护距离),则从 $f_{i,v}$ 中去掉 $f_{i,v}$;

(4) 令 $f_{i,v} = f_{v_{\text{used}},k} \pm 50 \text{ kHz}$ 和 $f_{i,v} = f_{v_{\text{used}},k} \pm 100 \text{ kHz}$,重复步骤 2。

3.1.2 ILS 的频率复用(C_{ILS1})筛选

根据规范^[4],LOC 台站之间的保护距离最大值为 157 n mile,对第 i 个新建 LOC 台站,与 VOR 类

似,采用下述算法,对 157 n mile 内每一个已建 LOC 台站进行频率筛选:

(1) 计算第 k 个已建 LOC 台站与新建 LOC 台站的距离 $D_{l,l}$,第 m 个已建 VOR 台站与新建 LOC 台站距离 $D_{v,l}$,令 $f_{i,l} = f_{l_{\text{used}},k}$;

(2) 若 $D_{l,l} \leq S_{l,l}$ ($S_{l,l}$ 是文献[4]附录 3 所给的与台站功率差有关的 LOC 台站间最小保护距离),则从 $f_{i,l}$ 中去掉 $f_{i,l}$,跳转到步骤 4;

(3) 若 $|f_{i,g} - f_{G_{\text{used}},k}| > 150 \text{ kHz}$,则从 $f_{i,l}$ 中去掉 $f_{i,l}$,跳转到步骤 5;

(4) 遍历与新建 LOC 台站相距 74 n mile 内所有 VOR 台站,若存在 $D_{v,l} \leq S_{l,v}$ ($S_{l,v}$ 是文献[4]附录 3 所给的与台站功率差有关的 VOR 与 LOC 最小保护距离),则从 $f_{i,l}$ 中去掉 $f_{i,l}$;

(5) 令 $f_{i,l} = f_{l_{\text{used}},k} \pm 50 \text{ kHz}$,重复步骤 2。

3.1.3 DME 的频率复用(C_{DME1})筛选

采用与 VOR 台站相同的方法,考虑第 i 个新建 DME 台站,对 411 n mile 内已有 DME 台站采用下述算法进行频率筛选:

(1) 计算第 k 个已建 DME 台站与新建 DME 台站距离 $D_{d,d}$,令 $f_{i,\text{drep}} = f_{\text{Drep}_{\text{used}},k}$;

(2) 对于 $D_{d,d} \leq 15 \text{ n mile}$ 的已建 DME 台站,从 $f_{i,\text{DME},\text{drep}}$ 中去掉与它们 $f_{\text{Drep}_{\text{used}}}$ 值相等的频率;

(3) 若 $D_{d,d} \leq S_{d,d}$ ($S_{d,d}$ 是文献[4]附录 3 所给的与台站功率差有关的 DME 台站间最小保护距离),则从 $f_{i,\text{DME},\text{drep}}$ 中去掉 $f_{i,\text{drep}}$;

(4) 令 $f_{i,\text{drep}} = f_{\text{Drep}_{\text{used}},k} \pm 1 \text{ MHz}$,重复步骤 2。

3.2 基于频率配对约束 C2 的频率筛选

在上述基于干扰约束的频率筛选后,进一步采用下述算法对得到的可用频率进行满足频率配对约束的频率筛选,最终得到各类台站的可用频率。下述算法以提高频谱利用率为优化目标,若以负载均衡为目标,则将“最大频率复用次数”改为“最小频率复用次数”。

(1) 新建 VOR:若 $f_{i,v}$ 中的第 j 个频率对应的 $f_{j,\text{din}}$ 不在 $f_{i,\text{DME},\text{drep}}$ 中,则从 $f_{i,v}$ 中剔除该频率。遍历 $f_{i,v}$ 中所有值后得到可用频率向量 $F_{i,\text{VOR}}$,则新建 VOR 台站的频率指配为 $F_{i,\text{VOR}}$ 中具有最大频率复用次数的频率。

(2) 新建 ILS:若 $f_{i,l}$ 中的第 j 个频率对应的 $f_{j,\text{din}}$ 不在 $f_{i,\text{DME},\text{drep}}$ 中,则从 $f_{i,l}$ 中剔除该频率。遍历 $f_{i,l}$ 中所有值后得到可用频率向量 $F_{i,\text{ILS}}$,则新建 VOR 台站的频率指配为 $F_{i,\text{ILS}}$ 中具有最大频率复用次数的频率。

(3) 新建 DME:若与 $f_{i,\text{DME},\text{drep},j}$ 配对的 $f_{j,1}$ 和 $f_{j,v}$ 分别均不在 $f_{i,1}$ 和 $f_{i,v}$ 中,则从 $f_{i,\text{DME},\text{drep}}$ 中剔除 $f_{i,\text{DME},\text{drep},j}$ 。

遍历 $f_{i,DME,drop}$ 中所有值后得到可用频率向量 $F_{i,DME}$ ，则新建 VOR 台站的频率指配为 $F_{i,DME}$ 中具有最大频率复用次数的频率。

4 多个导航设备的频谱指配算法

根据第 3 节的算法,每一个台站可能有多个可用频率,对多个台站均需要指配频率的情况,先指配频率的台站将会影响后指配频率台站的频率指配。为此,本文采用深度优先搜索算法进行多台站频率指配^[2]。深度优先搜索算法是把最近产生的结点优先扩展,直到达到一定的深度限制。若未找到目标或无法再扩展时,再回溯到前一个结点继续扩展^[9]。

以 VOR 为例,设一共有 N 个新建台站,采用深度优先搜索的频率指配算法如下 (ILS 和 DME 台站的频率指配算法类似,此处不再赘述):

(1)对第 i 个新建 VOR 台站,统计频率复用次数得到 $\omega_{i,VOR}$,通过第 3 节算法得到 $F_{i,VOR}$,记可用频率个数为 n_i ;

(2)当以最大化频率复用因子为目标时,为第 i 个新建 VOR 台站指配权重 $\omega_{i,VOR}$ 为正值且最大的频率,并令 $\omega_{i,VOR}=0, n_i=n_i-1$,将其作为已建台站加入 f_{Vused} ,将其配对 DME 加入 $f_{dropused}$,令 $i=i+1$;

(3)当以频率负载均衡为目标时,为第 i 个新建 VOR 台站指配权重 $\omega_{i,VOR}$ 为正值且最小的频率,并令 $\omega_{i,VOR}=0, n_i=n_i-1$,将其作为已建台站加入 f_{Vused} ,将其配对 DME 加入 $f_{dropused}$,令 $i=i+1$;

(4)若 $f_{i+1,v}$ 为空,则回溯 k 层,找到 $n_{i-k}>0$ 的层,从 $f_{Lused}, f_{Gused}, f_{Vused}, f_{Dinused}, f_{Dropused}$ 中删除 $i-k$ 层及以后加入的台站信息,令 $i=i-k$,重复步骤 2;

(5)重复步骤 1,直到 $i=N$,完成 N 个台站的频率指配,或前 $i-1$ 个台站的可用频率个数为 0,不能同时为所有新建台站的频率指配。

5 数值结果与分析

5.1 频率指配仿真

仿真参数均为虚拟参数。已有台站信息和新建 VOR 台站信息如表 2~4 所示。

表 2 已有 ILS/DME 台站信息表
Tab.2 ILS/DME information list

ILS 台站	LOC 纬度 (N)/(°)	LOC 经度 (E)/(°)	LOC 频率/MHz	GS 频率/MHz	DME 频率/MHz
ILS1	28.47	104.34	109.90	333.80	1 060
ILS2	31.09	104.22	111.15	331.55	1 072
ILS3	29.35	106.33	111.55	332.75	1 076
ILS4	25.30	103.48	108.90	329.30	1 050
ILS5	34.20	108.43	108.30	334.10	1 044

表 3 已有 VOR/DME 台站信息表
Tab.3 VOR/DME information list

VOR 台站	VOR 纬度(N)/(°)	VOR 经度(E)/(°)	VOR 频率/MHz	DME 频率/MHz
VOR1	24.27	118.06	108.20	1 043
VOR2	25.04	102.42	108.40	1 045
VOR3	25.34	100.13	109.40	1 055
VOR4	26.05	119.18	109.65	1 057
VOR5	26.34	101.43	109.80	1 059
VOR6	26.35	106.42	113.20	1 103
VOR7	26.35	104.50	109.65	1 057
VOR8	27.42	106.55	112.60	1 097
VOR9	28.54	105.24	108.40	1 045
VOR10	29.18	106.16	109.40	1 055
VOR11	29.35	106.33	111.20	1 073
VOR12	29.59	102.59	110.80	1 069
VOR13	30.40	104.04	108.40	1 045
VOR14	31.52	117.17	109.80	1 059
VOR15	34.22	107.09	110.85	1 069
VOR16	36.04	103.51	108.60	1 047
VOR17	36.38	101.48	108.40	1 045
VOR18	36.40	117.00	108.40	1 045
VOR19	39.55	116.24	108.20	1 043

表 4 新建 VOR/DME 台站信息表
Tab.4 New applied VOR/DME information list

新建 VOR 台站	VOR 纬度(N)/(°)	VOR 经度(E)/(°)
New_VOR1	28.12	112.59
New_VOR2	30.35	114.17
New_VOR3	21.37	108.20
New_VOR4	22.48	108.19

图 1 是各台站地理位置示意图,距离计算采用 WGS84 模型。

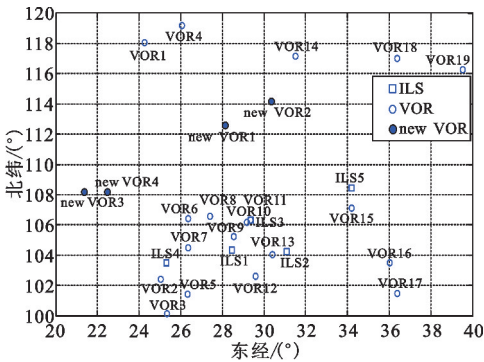


图 1 台站经纬度示意图
Fig.1 Sketch map of stations

首先对已建 VOR 台站进行频率复用统计,其中 108.20 MHz、109.40 MHz、109.65 MHz、109.80 MHz 复用次数为 2,108.40 MHz 复用次数为 5,其余 6 个频率的复用次数为 1,复用因子 $\eta_{\text{VOR}} = \sum_{p=1}^{19} (n_{p,\text{VOR}})^2 = 47$ 。

采用本文的频率指配算法,对 4 个新申请台站进行频率指配,结果如图 2 所示,4 个台站被指配了频率 108.40 MHz。对重新指配后的频率进行复用统计,在满足射频干扰保护和频率配对要求的情况下,为新建的 4 个台站所指配的频率是复用次数最多的频率,此时,频率复用因子 $\eta_{\text{VOR}} = \sum_{p=1}^{23} (n_{p,\text{VOR}})^2 = 103$,大于原来的频率复用因子 47,根据频率复用因子的定义,本文所提算法提高了频谱利用率。

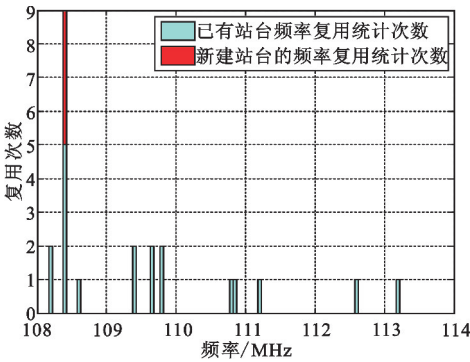


图 2 以提高频谱利用效率为目标的指配频率后的复用统计直方图

Fig. 2 Statistical histogram of frequency multiplexing aiming to enhance spectrum efficiency after spectrum allocation

为了提高频率复用因子,各个频率对应的权重 $\omega_{i,\text{ILS}}$ 、 $\omega_{i,\text{VOR}}$ 或 $\omega_{i,\text{DME}}$ 是递归尝试的关键。若在给新建台站指配频率的时候,采用从可用频率向量中按频率配对表中编号由小到大的顺序进行递归尝试,则指配结果为 4 个新建台站都被指配了 108.20 MHz,此时的 $\eta_{\text{VOR}} = \sum_{p=1}^{23} (n_{p,\text{VOR}})^2 = 79$,小于按权重由大到小进行递归尝试的复用因子值 103。

若采用随机指配频率的模式进行递归尝试,则为 4 个台站分别指配了 111.40 MHz、115.80 MHz、110.60 MHz 和 114.75 MHz,此时的 $\eta_{\text{VOR}} = \sum_{p=1}^{23} (n_{p,\text{VOR}})^2 = 51$,小于按权重由大到小进行递归尝试的复用因子值 103。

当优化目标为使频谱负载更均衡时,采用本文算法可得 4 个台站指配结果为 108.25 MHz、108.45 MHz、108.65 MHz、108.8 MHz,复用统计如图 3 所示,指配的频率均为未被已有台站使用的频率。

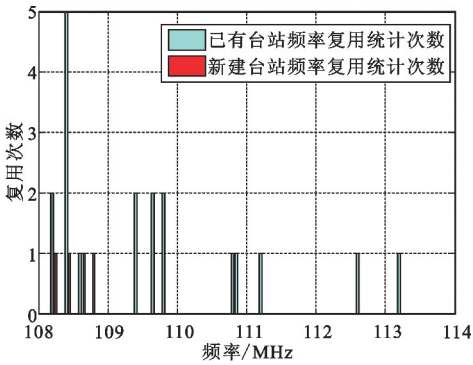


图 3 以均衡频谱负载为目标的指配频率后的复用统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of frequency multiplexing aiming to balance spectrum load after spectrum allocation

综上所述,本文所提的频率指配算法可以获得高于顺序和随机指配的频率利用效率或使频谱负载更均衡。

5.2 与我国现有航空导航频率指配方法的比较

我国目前正在使用的航空导航频率指配方法与本文方法相比较,存在两点不足:一是没有考虑台站间的功率差,而是取同类型台站最大保护距离进行比较,比如新建 VOR 台站,则 VOR/VOR 台站间的保护距离全为 800 km,新建 LOC 台站时,保护距离全为 150 km;二是一次只考虑一个新建台站,由于先指配频率的台站可能对后续台站造成影响,所以不能同时为多个新建台站进行频率指配。

5.3 与基于欧洲频率管理规范的指配方法的比较

与 FAA 的频率管理规范不同,欧洲频率管理手册^[10]简单地规定:LOC 台站半径 92.5 n mile 范围内不能有同频 LOC 台站,半径 18 n mile 内不能有邻频 LOC 台站。本文算法根据 FAA 频率管理规范^[4]规定的不同 K 值,划分了同频、第一邻频多个保护区。此外,由于 ILS 设备使用方向性天线,欧洲的半径标准会造成资源浪费,而本文算法明确区分了 LOC 台站正反方向的保护半径,可以降低复用距离,提高频谱利用率。例如:表 2 中 ILS1 台站位于北纬 28.47°,东经 104.34°,朝向正北方,其 LOC 工作频率 109.90 MHz;若另一计划新建 LOC 台站位于北纬 26.92°,东经 104.34°,计划工作频率 109.90 MHz,根据欧洲标准^[10],两同频 LOC 台站距离小于 92.5 n mile,该新建台站将不符合频率保护要求,而根据本文算法,该已有 LOC 台站正向航道的保护半径为 95.5 n mile,反向航道的保护半径为 85.5 n mile,由于新建台站在反向航道上,则允许布设,从而提高了频率资源的利用效率。

6 结 论

本文根据 FAA 的频率管理规范,建立了 ILS、VOR 和 DME 可用频率向量组的数学描述,考虑频率复用干扰和频率配对约束两个条件,设计了单台站的频率指配算法,然后对各层频率组合进行深度优先的搜索,得到了高频谱利用率的频率指配方案。数值仿真结果表明,本文所提算法在为多个新建台站同时指配频率时,能提高频谱利用率或使频谱负载更均衡。在实际应用中,本文算法为在已有大量导航台站的复杂环境中基于不同优化目标新增部署多导航台站提供了便利。此外,由于实际情况更为复杂,后续还可针对算法复杂度进行优化。

参考文献:

- [1] 王世锦,王湛. 机载雷达与通信导航设备[M]. 北京:科学出版社,2009:111-123,130-147,252-266.
WANG Shijin, WANG Zhan. Airborne radar and communication navigation equipment[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2009: 111-123, 130-147, 252-266. (in Chinese)
- [2] 王强,沙斐. 频谱管理关键技术——频率指配算法研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
WANG Qiang, SHA Fei. Research on key technique of spectrum management——frequency assignment algorithms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [3] 周自力,李锐,王建强,等. 局域增强系统台站最小保护间隔的计算[J]. 电讯技术,2016,56(9):995-999.
ZHOU Zili, LI Rui, WANG Jianqiang, et al. Calculation of minimum protected distance between navigation facilities for local area augmentation system[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(9): 995-999. (in Chinese)
- [4] Department of Transportation Federal Aviation Administration. FAA order 6050. 32b spectrum management regulations and procedures manual[S]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2008:1-24, 7-132.
- [5] 李映雪,钟士元,雷静,等. 认知无线电中 OFDM 协作频谱感知技术及其优化[J]. 北京邮电大学学报,2015,38(5):96-98.
LI Yingxue, ZHONG Shiyuan, LEI Jing, et al. Optimization of cooperative spectrum sensing based on OFDM for cognitive radio networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(5): 96-98. (in Chinese)
- [6] International Civil Aviation Organization. ICAO handbook on radio frequency spectrum requirements for civil aviation[S]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2013:1-7.
- [7] International Civil Aviation Organization. Aeronautical telecommunication[S]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2006:1-11.
- [8] 黎珍惜,黎家勋. 基于经纬度快速计算两点间距离及测量误差[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(11):235-237.
LI Zhenxi, LI Jiaxun. Quickly calculate the distance be-

tween two points and measurement error based on latitude and longitude[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(11): 235-237. (in Chinese)

- [9] 乐美龙,李贞. 基于深度优先搜索算法的机组复原研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(9):63-68.
LE Meilong, LI Zhen. Solving the crew recovery problem by depth first search[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(9): 63-68. (in Chinese)
- [10] ICAO. European and North Atlantic Office. EUR Doc 011 frequency management manual[S]. Paris: European and North Atlantic Office, 2014:27-33.

作者简介:



李锐(1968—),女,四川成都人,1999年于中国科学院成都计算所获工学硕士学位,现为中国民用航空局第二研究所高级工程师,主要从事航空通信导航监视技术等领域的研究工作;

LI Rui was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1968. She received the M. S. degree from Institute of Computer Application, Chinese Academy of Sciences in 1999. She is now a senior engineer. Her research concerns aviation communication, navigation and surveillance technology.

Email: sharplr@atmb.net.cn

周自力(1971—),男,重庆人,1993年于上海交通大学获双学士学位,现为中国民用航空局第二研究所高级工程师,主要从事航空通信导航监视技术研究工作;

ZHOU Zili was born in Chongqing, in 1971. He received the dual B. S. degrees from Shanghai Jiaotong University in 1993. He is now a senior engineer. His research concerns aviation communication, navigation and surveillance technology.

刘松涛(1993—),男,重庆人,2016年于电子科技大学获学士学位,现为电子科技大学通信抗干扰重点实验室研究生,主要从事无线通信算法及其实现的研究工作;

LIU Songtao was born in Chongqing, in 1993. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2016. He is now a graduate student. His research concerns signal processing algorithms and corresponding implementation for wireless communication systems.

Email: 303413956@qq.com

王建强(1977—),男,山西沁县人,2001年于四川大学获工学学士学位,现为中国民用航空局第二研究所工程师,主要从事计算机应用、航空无线电导航频率工程等方面的研究;

WANG Jianqiang was born in Qinxian, Shanxi Province, in 1977. He received the B. S. degree from Sichuan University in 2001. He is now an engineer. His research concerns computer application, aeronautical navigational aid frequency engineering.

王军(1974—),男,四川人,2009年于电子科技大学获工学博士学位,现为电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室教授、博士生导师,主要从事无线与移动通信技术方面的研究。

WANG Jun was born in Sichuan Province, in 1974. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns signal processing for wireless communications, air-to-ground communication systems, and cognitive radio.