

异步组网跳频序列选择问题建模与优化

杨迎辉, 李建华, 王刚, 张磊
(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 跳频序列的选择是决定跳频电台异步组网质量的重要因素。针对异步组网跳频序列的优选问题, 结合异步组网跳频通信特点, 定义了频率相似度、序列相似度和总体相似度, 构建了异步组网可选跳频序列相似度模型。通过引入层次聚类分析法, 解析了跳频序列在特征空间中的聚类结构。根据网间互扰度与序列相似度正相关的原则, 从不同聚类中优选序列, 组成跳频序列对, 选出相似度最小的一组, 即为异步组网的最优跳频序列组合。理论和仿真实验分析表明, 层次聚类分析法简单易懂, 可操作性强, 具有较好的适应性和效率, 所建相似度模型合理有效, 能够较好地解决异步组网中跳频序列的优选问题。

关键词 跳频序列; 异步组网; 相似度; 层次聚类分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.013

中图分类号 TN924+.1 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0065-04

异步组网是跳频电台组网的主要方式, 与同步组网相比, 具有速度快、定时要求低等优点。在异步组网质量要求高或组网频率少且序列间碰撞几率高的情况下, 由于存在相同或者相近频率发生碰撞可能, 必须对异步组网的跳频序列进行优选^[1-2]。目前, 该方面研究主要集中在算法直接生成序列上, 如 Safer + 算法、M 序列生成算法和对偶法算法等, 生成的序列具有一定的随机性^[2-5], 其优劣度由算法决定, 但对跳频频率区间相对固定, 跳频点或跳频序列指定情况, 序列生成方法存在精度低、运算复杂、适用性差和效率低等缺点。

1 跳频序列相似度模型

基于层次聚类分析法^[6-7]的跳频序列相似度模型的基本原理是对于已有的跳频序列集, 首先通过定义频率相似度, 计算出任意 2 个跳频序列各个相应频率位置的相似度, 其次利用序列相似度的定义, 计算出任意 2 个序列在某一位置的相似度, 然后根据总体相似度的定义, 计算任意 2 个序列的总体相似度, 最后通过定义相似度矩阵, 得到跳频序列集中任意 2 个序列的相似度, 并以矩阵形式表示出来。模型建立完成后, 借助层次聚类分析法对生成的相似度矩阵进行仿真运算, 即可得到满足条件的优选跳频序列对。运用跳频序列相似度模型, 优选频率序列对的基本流程见图 1。

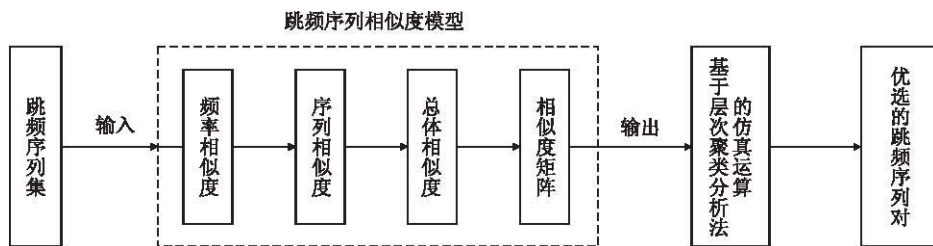


图 1 跳频序列对优选的基本流程

Fig. 1 Basic flow of FH sequences' optimization and selection

* 收稿日期: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174162); 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08-ZT13); 国家社科基金资助项目(10GJ376-067)

作者简介: 杨迎辉(1988-), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 主要从事军事通信系统规划与评估研究。

E-mail: yangyinghui. good@163.com

设跳频电台异步组网可用频率数为 n , 对应频点为 F_1, F_2, \dots, F_n , 跳频序列长度为 m , 跳频序列集为 X 。

1.1 频率相似度

对于任意 $x_i, x_j \in X$, 设 2 个序列和某个位置的频率分别为 $f_{x_{ip}}$ 和 $f_{x_{jp}}$ 。如果 $f_{x_{ip}} = f_{x_{jp}}$, 则对应位置会出现同频互扰, 定义 $f_{x_{ip}}$ 和 $f_{x_{jp}}$ 的相似度 $k(f_{x_{ip}}, f_{x_{jp}}) = 1$; 如果 $f_{x_{ip}}$ 和 $f_{x_{jp}}$ 相邻, 对应位置可能出现一定程度的互扰, 通信质量受到影响, 则 $0 < k(f_i, f_j) < 1$ 。如果 $f_{x_{ip}}$ 和 $f_{x_{jp}}$ 在频谱中相距较远, 则不会出现互相干扰, 即 $k(f_{x_{ip}}, f_{x_{jp}}) = 0$ 。

结合跳频通信话音业务特点和跳频频率设置规则^[6], 给出 $f_{x_{ip}}$ 和 $f_{x_{jp}}$ 的相似性度量准则为:

$$k(f_{x_{ip}}, f_{x_{jp}}) = \begin{cases} 1, & |f_{x_{ip}} - f_{x_{jp}}| \leq 0.5 \text{ kHz} \\ 0.5, & 0.5 \text{ kHz} < |f_{x_{ip}} - f_{x_{jp}}| < 4.0 \text{ kHz} \\ 0, & |f_{x_{ip}} - f_{x_{jp}}| \geq 4.0 \text{ kHz} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 0.5 kHz 根据电台频率间隔和频漂的实际情况选定, 4.0 kHz 根据话音带宽和跳频频点设置等要求选定。随着具体组网和电台性能指标的不同, 可作适当调整。

1.2 序列相似度

定义序列 x_i 和 x_j 的相似度 $\hat{\varphi}(x_i, x_j)$ 为序列对应位置的频率相似度之和, 即:

$$\hat{\varphi}(x_i, x_j) = \sum_{p=1}^m k(f_{x_{ip}}, f_{x_{jp}}) \quad (2)$$

2 个序列相似度越大, 表明同步组网情况下的频率碰撞几率也越大, 跳频网之间相互干扰越大。

1.3 总体相似度

对于异步组网而言, 即使单个位置时隙完全匹配, 由于跳频网跳频时延不同, 跳频序列 x_i 可能和序列 x_j 循环排列集中的任何一个序列相碰。定义序列 x_i 与 x_j 的总体相似度 $\varphi(x_i, x_j)$ 为序列 x_i 与 x_j 所有循环排列形成的序列当中相似度最大的一个, 见式(3), 式中 x_j^{+r} 为 x_j 的单频点位置经过 r 次循环右移后的序列, r 为循环右移位。显然, x_i 与 x_j 的位置可以互换, 即 $\varphi(x_i, x_j) = \varphi(x_j, x_i)$ 。

$$\varphi(x_i, x_j) = \max \{ \hat{\varphi}(x_i, x_j), \hat{\varphi}(x_i, x_j^{+1}), \dots, \hat{\varphi}(x_i, x_j^{+(m-1)}) \} \quad (3)$$

1.4 相似度矩阵

跳频序列集经层次聚类法运算后, 序列将归属于不同的聚类。相似度矩阵反映了一个聚类中任意一个序列与另一个聚类中任意一个序列的总体相似度。基于相似度矩阵, 根据异步组网间互扰度与序列相似度正相关的原则, 可以确定出由分属于不同聚类的序列组成的最优跳频序列组合。

基于总体相似度的定义, 对于任取序列 $x_i, x_j \in X$, 相似度矩阵 D 中的元素 D_{ij} 定义为:

$$D_{ij} = \varphi(x_i, x_j) = \langle \varphi(x_i), \varphi(x_j) \rangle \quad (4)$$

式中: D_{ij} 为分属于不同聚类的序列 x_i 和 x_j 的总体相似度, 指采用跳频序列 x_i, x_j 进行异步组网通信时相互之间的干扰程度; φ 为隐性映射, 映射内积是对 2 个序列相似度即异步组网通信相互影响程度的界定。

显然, 跳频序列选取问题的输入是序列集 X , 其中每一个元素都是 m 维向量, 向量分量是 n 个频点中的一个。异步组网跳频序列的相似度对应相似度矩阵 D , 其中的元素 D_{ij} 对应序列 x_i 和 x_j 在特征空间中距离。相似度越大, 2 个序列的投影在特征空间中距离越近, 反之距离越远。

2 层次聚类分析优化方法

2.1 层次聚类分析法基本原理

层次聚类分析法是分析数据结构的最为通用的方法, 其思想是根据聚类内部的相似性和类间相异性, 实现特定层上分割层次树, 并划成若干不相交的组^[8]。其优点在于可以指出由粗到细的多种分类情况, 典型的聚类结果可由一个聚类树图展示出来。层次聚类分析方法可以通过 2 个途径实现: 合并和分裂^[9]。合并(自底向上)时, 先使得每个样本各成一类, 然后通过合并不同的类, 来减少类别数目。分裂(自顶向下)时, 先将所有样本归入一类, 然后通过后续分裂, 来增加类别数目。

产生的层次树图中可以定义个体之间的新距离集^[10]。设个体集为 G , 当合并 2 个类时, 定义个体 i 和 j 之间的距离是包含它们的类之间的距离(也就是连接它们的最低联接的距离级)。这样, 寻找树图的过程可以看成是从原始相异程度集 d_{ij} 到新集 d_{ij} 的变换, 其中 d_{ij} 满足超度量不等式:

$$d_{ij} \leq \max(d_{ik}, d_{jk}), i, j, k \in G \quad (5)$$

这意味着 3 个类之间的距离可以用来定义一个等边(3 个距离相等)或者等腰(2 个相等,1 个较小)的三角形。变换 $d \rightarrow \hat{d}$ 称作超度量变换。

2.2 优化步骤

设有跳频序列集中有 t 个序列,两两之间的相似度矩阵为 D ,则基于层次聚类分析法的跳频序列选取步骤如下:①将 t 个序列一一对应直接定义为 t 个类,每一类的平台高度均为 0;②合并相似度矩阵中相似度值最近的两类为新类,并以两类的平均相似度值作为聚类树图中的平台高度;③计算新类与当前各类的相似度,若类的个数已经等于 1,转入步骤④,否则,回到步骤②;④画出聚类树图,确定聚类的个数和聚类中的序列;⑤从聚类树的最后两类中各选取一个序列组成跳频序列对,分别提取其两两之间的相似度值,组成新的相似度矩阵;⑥选取新相似度矩阵中相似度值最小的跳频序列对,即为满足条件的优选序列。

3 仿真分析

设定跳频频率下限和上限分别为 6 MHz 和 12.5 MHz,从中随机生成 30 个跳频频点并构造 20 个长度为 10 的跳频序列作为跳频序列集合,对应序列编号依次为 1-20。

首先根据式(1)-(4),计算出 20 个跳频序列的相似度矩阵 D ,然后按照 2.2 节中的优化步骤求解出聚类树图和聚类分析结果。聚类树见图 2,详细分析结果见表 1。

从 2 个聚类中各选取一个序列组成跳频序列对,产生新的相似度矩阵,见表 2。分析新相似度矩阵可以看出,相似度最小值为 0.1,对应的跳频序列对有(9,4)、(7,13)、(7,18)和(14,17),均满足异步组网对跳频序列优选的要求,即 2 个跳频网相互干扰最弱。在实际应用中,有时是直接从既有的序列集中优选出序列对,其方法如上所示。有时其中一个跳频序列已经选定,目标是选择新建跳频网的最优跳频序列,也可以从表 2 中得到结果。

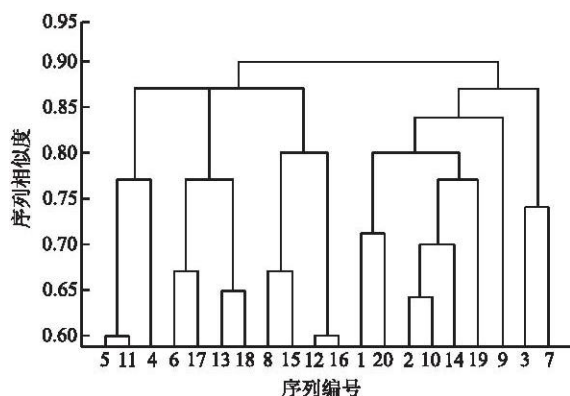


图 2 20 个跳频序列的聚类树图
Fig. 2 Clustering tree of 20 FH sequences

表 1 聚类分析的结果

Tab. 1 Result of clustering analysis

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 序列编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 各序列聚类归属情况 Y | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 聚类 1 | 4 | 5 | 6 | 8 | 11 | 12 | 13 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | |
| 聚类 2 | 1 | 2 | 3 | 7 | 9 | 10 | 14 | 19 | 20 | | | | | | | | | | | |

表 2 重组后的相似度矩阵

Tab. 2 Similarity matrix after recombining

| | | | | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 序列号 | 4 | 5 | 6 | 8 | 11 | 12 | 13 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1 | 0.19 | 0.16 | 0.16 | 0.23 | 0.26 | 0.20 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.13 | 0.26 |
| 2 | 0.22 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.22 | 0.26 | 0.13 | 0.23 | 0.23 | 0.20 |
| 3 | 0.16 | 0.36 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.20 | 0.20 |
| 7 | 0.19 | 0.13 | 0.22 | 0.19 | 0.20 | 0.13 | 0.10 | 0.20 | 0.20 | 0.12 | 0.10 |
| 9 | 0.10 | 0.16 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.36 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.23 | 0.16 |
| 10 | 0.22 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.23 | 0.12 | 0.13 | 0.23 | 0.20 | 0.19 | 0.20 |
| 14 | 0.20 | 0.30 | 0.20 | 0.23 | 0.20 | 0.16 | 0.15 | 0.13 | 0.32 | 0.10 | 0.26 |
| 19 | 0.23 | 0.13 | 0.23 | 0.20 | 0.26 | 0.22 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.20 | 0.22 |
| 20 | 0.19 | 0.20 | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.26 | 0.22 | 0.23 | 0.22 | 0.19 | 0.30 |

4 结束语

跳频序列的选择是无线电通信异步跳频组网的重要环节。文中在给出异步组网跳频序列相似度定义的

基础上,引入了层次化聚类分析方法来分析跳频序列聚类结构特征,给出了跳频序列优选的方法和步骤。论文主要针对2组跳频序列,对于多个跳频序列的优选,其相似性定义相同,优化的思路和方法同样可以借鉴。

参考文献:

- [1] 胡中豫. 现代短波通信[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
HU Zhongyu. Modern shortwave communication[M]. Beijing: National defense industry press, 2005. (in Chinese)
- [2] 马媛, 张晓博. 直接序列扩频和跳频技术[J]. 科技信息,2009,26(25):82,114.
MA Yuan, ZHANG Xiaobo. Frequency extending and hopping technology of direct sequence [J]. Science & technology information, 2009,26(25):82,141. (in Chinese)
- [3] 刘友永,梁国龙,李新欣. 基于混沌序列的水声差分跳频 G 函数仿真[J]. 计算机仿真, 2009,26(7):17-18.
LIU Youyong, LIANG Guolong, LI Xinxin. Simulation of G function for underwater acoustic DFH communication system based on chaotic sequence[J]. Computer simulation, 2009,26(7):17-18. (in Chinese)
- [4] 蔡丹姑,姚远程. 基于 TOD 的跳频序列设计[J]. 数字通信世界, 2009,5(9):60-63.
CAI Dangu, YAO Yuancheng. Design of frequency hopping based on TOD [J]. The world of digital communication, 2009,5(9):60-63. (in Chinese)
- [5] 杨化斌,孙俊. 基于聚类分析的跳频序列选取[J]. 计算机工程与应用,2009,45(27):113-114.
YANG Huabin, SUN Jun. FH sequences selected based on clustering analysis [J]. Computer engineering and applications, 2009,45(27):113-114. (in Chinese)
- [6] YUAN Hejin, ZHANG Yanning, YANG Fuzeng, et al. A novel sum ensemble approach using clustering analysis[J]. Journal of electronics,2008,25(2):246-253.
- [7] YUAN Hong, CHEN Huafu, YAO Dezhong, et al. A new hierarchical clustering analysis and the application in localization of brain activities[J]. Chinese journal of electronics, 2006,15(4):679-681.
- [8] 赵玲玲,翁苏明. 模式识别的核方法[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
ZHAO Lingling, WENG Suming. Kernel method of pattern recognition [M]. Beijing: Machine industry press, 2006. (in Chinese)
- [9] YANG Jianfeng, YAN Puli, XIA Delin, et al. Analysis of spatial clustering optimization[J]. Geo-spatial information science, 2008,11(4):302-307.
- [10] LIU Bo, WANG Yong, WANG Hongjian. Using genetic algorithm based fuzzy adaptive resonance theory for clustering analysis [J]. Journal of Harbin engineering university,2006,27(B7):547-551.

(编辑:徐楠楠)

Modeling and Optimization of Asynchronously Organized Network's Frequency Hopping Sequence Selection Problem

YANG Ying-hui, LI Jian-hua, WANG Gang, ZHANG Lei

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: The selection of Frequency Hopping (FH) sequences is a crucial factor affecting the quality of FH communication in asynchronously organized networks. According to the requirement of FH communication in asynchronously organized networks, some definitions such as the frequency similarity, the sequence similarity, and the collective similarity are put forward, and then the similarity matrix of available FH sequences is constructed. The hierarchy clustering analysis method is introduced to analyze the clustering structure of FH sequences in characteristic space. Based on the principle that the similarity of suitable FH sequences used in different networks should be the least, the optimized sequences can be selected from different clusters finally.

Key words: FH sequence; asynchronously organized network; similarity; hierarchy clustering analysis