

## 可移动基站网络频谱资源块动态分配方法研究

何明捷<sup>1,2</sup>, 徐勇军<sup>1</sup>, 王峰<sup>3</sup>, 吴畏<sup>3</sup>, 徐朝农<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;  
3. 海军装备研究院, 北京 100161; 4. 中国石油大学 计算机系, 北京 102249)

**摘要:** 首先从应用需求, 引出了移动式基站的概念, 然后设计了一种针对该网络资源分配的优先级策略并从提高资源利用率和降低频谱重分配次数 2 个角度出发, 提出了 2 种基于图论的资源分配策略, 最后完整地提出了一种低复杂度的分布式频谱资源块动态分配算法。仿真结果表明, 所提算法有良好的性能。

**关键词:** 移动式基站; 资源分配; 图论

中图分类号: TP391.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z2-0265-08

## Research on dynamic spectrum resource allocation in mobile base station networks

HE Ming-jie<sup>1,2</sup>, XU Yong-jun<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>3</sup>, WU Wei<sup>3</sup>, XU Chao-nong<sup>4</sup>

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;  
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China;  
4. Dept. of Computer Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** A priority policy of resource allocation for mobile base station networks was presented. In order to improve resource utilization and maintain good fairness, two resource allocation mechanisms based on graph theory were proposed. Finally, a distributed dynamic spectrum resource block allocation algorithm with low complexity was proposed. Simulation results show that the proposed algorithm has good performance.

**Key words:** mobile base station; spectrum resource allocation; graph theory

### 1 引言

在国防安全、抗灾救灾、远洋作业等一类特定应用中, 由于工作区域缺少先期部署的通信网络或者已有通信网络受到严重损坏, 导致工作区域用户不能获得必要的通信服务<sup>[1]</sup>。针对这种特殊场景设计部署有效的通信网络的需求正在不断增长。适应上述应用的通信网络应具有以下特点: 一是能够快速进入, 快速安装, 并且可以根据工作进程实时推进覆盖范围; 二是由于通信网络部署难以进行详细的事前规划和优化, 通信接入点的位置选择也受到实际条件的限制, 要求网络拓扑结构和参数设定在设计上有充分的动态调整能力。

移动式基站(MBS, mobile base station)网络是满足上述应用需求的一种技术解决方案。移动式基站又称为可移动基站是指安装在可移动平台上的基站设备, 它可以通过改变布设位置或者在行进中工作来提供可变化的通信覆盖范围。

作为一个无线通信系统, 移动式基站网络也是资源受限的系统, 尤其是服务于一些应急场景时, 高效地利用有限的资源非常重要。为了高效地利用频谱资源, 需要建立干扰协调机制来避免基站间盲目竞争带来的干扰。在移动式基站网络中, 小区域干扰比传统固定的蜂窝网络更加严重, 所以对资源分配方法的要求更高。一方面, 基站的移动使得基站处于变化的干扰环境中, 资源分配方法需要动态

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2014ZX03006003)

Foundation Item: The National Science & Technology Major Project (2014ZX03006003)

分配基站使用的频谱资源。另一方面,基站的移动使得网络的拓扑结构不规则,资源分配方法要能够在不同的局部地区实现不同的频率复用因子。为了满足上述要求,本文设计的小区间频谱资源分配方法以干扰协调作为出发点,提高资源利用率以及降低算法的迭代次数是该资源分配方法的研究目标。

在移动式基站网络中,频谱资源的分配方案是研究最多的主题,但相比传统蜂窝网络,移动式基站网络资源分配方向的相关研究依然处于探索阶段。最早的方案由 NESARGI S 在文献[2]中提出,每个 MBS 在分配一个信道给用户前, MBS 搜索自身所拥有的信道集合和正在使用的信道集合,如果有一个空闲的信道,则分配给该用户,否则该 MBS 收集邻居基站的信道使用信息,然后再去选择一个可以使用的空闲信道。在文献[3]中, LIN Y 等对文献[3]设计的信道分配方法进行了改进,提高了容错性能。在文献[4]中, SALEM M 等提出使用该种方法去解决移动基站间骨干网通信的信道分配问题。文献[2~4]中的这些方法在思路上基本相同,虽然方法本身有效,但是资源分配的粒度过小,分配过程复杂,信令开销大,离实际应用还有一段距离。

目前最具有实用价值的解决移动式基站网络频谱资源分配的思路是由 JONG-KWAN L 等在 2012 年提出的<sup>[5]</sup>。其主要的思想是每个移动式基站安装认知无线电设备,整个系统的频谱资源在时间轴和频率轴上分成小块,每个 MBS 维持一个频谱分配序列(FA, frequency assignment sequence)。凭借认知无线电能力, MBS 之间能够感知相互之间邻居关系的存在并保持 FA 序列正交。当发生 FA 序列冲突时, FA 序列进行重分配。但是该方法依然存在一些值得改进的地方。一方面由于不同位置邻居的驻留时间不同,当邻居间发生资源分配冲突时,不能无差别地使用邻居数量作为判断资源分配优先级的参数。另一方面该方法的设计思路是以提高公平性为出发点,采用 Latin Square 等矩阵来生成每一个行都相互正交的 FA 矩阵,而该矩阵的维数则是选取邻居最多的基站邻居数量。这种方法没有充分考虑网络的拓扑结构。虽然能够保证邻居最多的 MBS 一定能分到频谱资源,但是对于其他 MBS 而言会出现资源浪费。

在依然保证公平分配的前提下,如果进一步考虑网络具体的拓扑结构,局部的 FA 矩阵并不一定

需要每一行都正交。并且,由于 FA 序列的长度对应频谱块在时间轴上的分配周期,在总的频谱分块数固定时,越长的 FA 序列意味着在一个分配周期中无频谱的空时间块越多,为了提高网络的资源利用效率,生成 FA 矩阵时要在保证相邻的基站间不发生冲突的前提下,尽可能地缩短所使用的 FA 序列的长度。因此,本文将提出一种改进型的分布式的频谱资源块动态分配方法,用来提高移动式基站网络的资源利用率。

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 系统模型

在本文的研究场景中,完全由移动式基站为一定区域提供通信覆盖。移动式基站一直处于运动状态,为了最大程度地体现分配算法的广泛适应性,对基站的移动模型不做假设,它们可以朝任何方向移动。

网络中的接入网采用 OFDMA 体制,考虑由于基站移动性来带的下行干扰。如图 1 所示,每个移动式基站覆盖一个半径为  $d$  的小区。仅仅考虑路损,同信道干扰距离为  $\alpha d$ ,  $\alpha > 1$ 。当 2 个 MBS 之间的距离小于  $R = (1 + \alpha)d$  时定义它们互为邻居。随着 MBS 的运动,某个 MBS 覆盖的小区中用户距离它的邻居基站的距离可能会小于  $\alpha d$ , 为了避免该用户受到该邻居基站的干扰,相邻基站间不能同时使用相同的频谱。

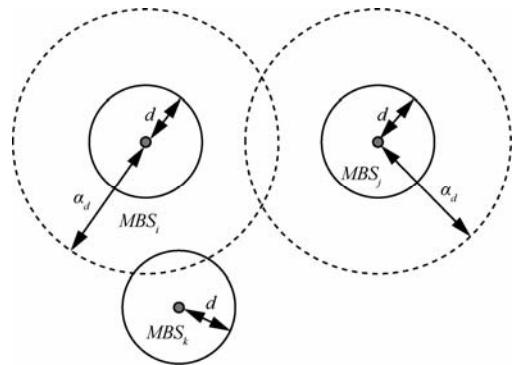


图 1 移动式基站网络干扰范围模型

### 2.2 问题描述

在 2.1 节描述的系统模型中,当 2 个原先不互为邻居的移动式基站随着运动相互靠近并成为邻居后,如果在同一时刻依然使用相同的频谱资源,则会产生严重的下行干扰。因此,为了实时规避由于运动带来的干扰,移动式基站网络需要一个频谱

分配方案来控制移动式基站在时间轴上使用频谱的次序，当周围的邻居基站发生变化后，要能及时调整各移动式基站使用的频谱资源。

综合考虑系统模型和移动式基站网络的特点，需要设计的资源分配方案必须满足以下要求。

- 1) 频率复用因子要能够在不同的位置根据实时的网络拓扑结构动态的调整。
- 2) 为了避免信令开销过大，资源分配的粒度不能过小。
- 3) 由于移动式基站网络是一个动态的移动网络，因而资源分配方法必须是一个分布式的方法，能够在局部完成自我配置。
- 4) 为了适应移动式基站网络部署环境的不稳定性，分配方法必须简单可靠，与此同时还要尽可能提高资源利用率。

为了实现上述的目标，首先将整个系统的频谱资源分块，分成  $C$  块。为了在时间轴上规划这些频谱块的使用顺序，每个移动式基站需要一个记录该顺序的序列。因此这里定义每个移动式基站都有一个频谱分配序列，即定义 FA 序列：FA 序列是一个频谱分配表，FA 序列中的每个位置标记一个频谱块，这些频谱块在 FA 序列中的顺序对应为它们在时间轴上被该 MBS 使用的顺序，FA 序列长度是频谱块的使用周期。为了使得基于 FA 序列的频谱使用方案在网络中有效，移动式基站间需要精确同步时间轴。然后，每个 MBS 使用 FA 序列控制频谱块的使用次序，并通过修改 FA 序列来避免由于运动带来的干扰。

在 FA 序列的定义中，长度是一个关键要素，它是频谱块的使用周期。可以通过调整该周期的大小来支持不同的频率复用因子。由于频谱的分块数

$C$  固定，当某个时刻需要的 FA 序列长度超过  $C$  时，FA 序列中需要添加一些无频谱块的空闲时刻。在 FA 序列的定义中，另一个关键要素是频谱块的排序。当 2 个原先不相邻的 MBS 移动到相邻的位置后，如果两者的 FA 序列规定的频谱使用次序中出现了冲突，则其中一方需要修改 FA 序列。

如图 2 所示，随着 MBS 的移动，MBS 的 FA 序列发生改变，在时刻 1，MBS1、MBS2、MBS3 相互处于干扰范围内，它们通过 FA 序列来协调各自使用的频谱块在时间轴上交错。而 MBS4 由于没有邻居，因此它的 FA 序列可以随意生成。

在时刻 2，MBS4 随着运动而进入了 MBS1、MBS2、MBS3 的附近，首先它和 MBS1 进入了邻居范围，所以 MBS4 需要更改 FA 序列，由于此时 MBS4 只有一个邻居，因此仅需要修改自己的 FA 序列即可避免冲突，称此类修改为“本地修改”。

时刻 3 时，4 个 MBS 互相都处于对方的干扰范围内，但是由于 FA 序列的长度为 3，不能得到足够多的正交组合。因此，需要将 FA 序列的长度增大为 4 并添加没有频谱的空时间块。此时，MBS4 需要发起一次“区域修改”，使用  $4 \times 4$  的 Latin Square 矩阵得到 4 个全新的长度为 4 的正交 FA 序列。

时刻 4 之后，由于 MBS4 的继续移动使得网络的干扰图继续发生改变，此时，FA 序列回到 3 列就可以产生足够多的正交组合。

在设计基于上述 FA 序列的资源分配方法时，首先需要实现的是防止相邻的 MBS 间发生 FA 序列冲突，此外还要尽可能提高资源利用率。这里定义  $\rho_i$  为 MBS<sub>*i*</sub> 的资源利用率，即

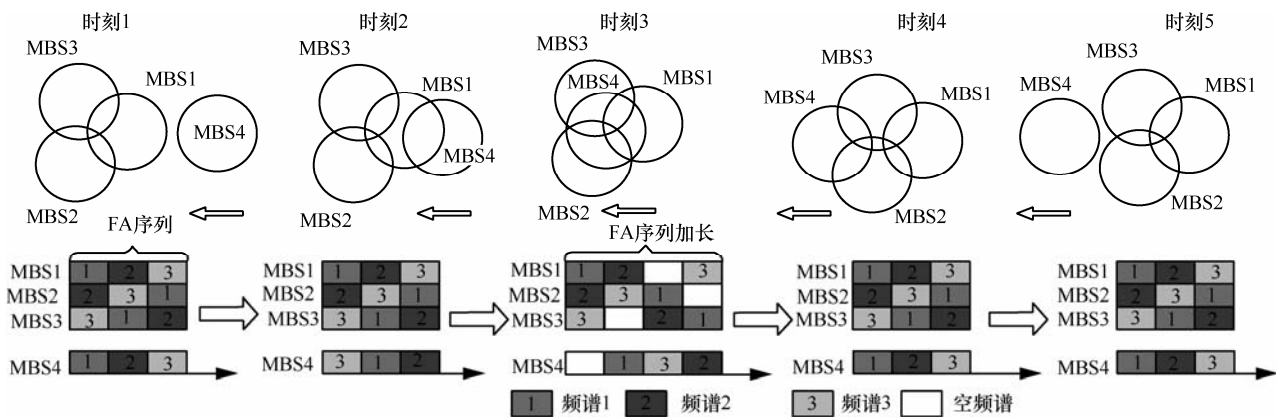


图 2 频谱资源块动态分配示例

$$\rho_i = \frac{C}{L_i} \quad (1)$$

资源利用率则与 FA 序列的长度  $L_i$  有关, 当 FA 序列的长度超过频谱块数  $C$  时, MBS 在一个分配周期内会存在不使用任何频谱的空时间块。因此, 要在保证不冲突的前提下, 尽可能缩短 FA 序列的长度。

本节所用符号如表 1 所示。

表 1 符号及其说明

符号	符号含义
$i$	MBS 的标号
$R$	2 个基站成为邻居时的临界距离
$C$	总的频谱块数量
$FA_i$	MBS <sub><math>i</math></sub> 的 FA 序列
$L_i$	MBS <sub><math>i</math></sub> 的 FA 序列的长度
$\rho_i$	MBS <sub><math>i</math></sub> 的资源利用率
$NB_i$	MBS <sub><math>i</math></sub> 的邻居基站集合
$NBI_i$	和 MBS <sub><math>i</math></sub> 存在冲突的邻居基站集合
$ABS_i$	MBS <sub><math>i</math></sub> 可用的备选 FA 序列集合
$ \cdot $	集合的大小
$\sigma_i$	MBS <sub><math>i</math></sub> 的优先级因子
$d_i$	包含 MBS <sub><math>i</math></sub> 最大簇的大小
$\Delta(G)$	图 $G$ 的最大度
$\omega(G)$	图 $G$ 的最大簇大小
$\chi(G)$	图 $G$ 的染色数

### 3 频谱资源块动态分配方案

#### 3.1 资源分配优先级

当某个 MBS 改变自身的 FA 序列后有可能使得周围的 MBS 需要连带性的修改 FA 序列。为了尽可能减少这种连带性的改变, 当网络中某些 MBS 必须改变 FA 序列时, 需要选择影响最小的方式。

在实际中, 每个移动式基站邻居的数量和位置动态变化, 不同位置和运动方向的邻居对它造成干扰的时间也不同。由于邻居基站间可以相互交互位置和速度信息, 基于这 2 个信息, MBS <sub>$i$</sub>  可以计算它的邻居基站在邻居范围内的驻留时间  $t_{i,l} \quad l \in NB_i$ 。定义 MBS <sub>$i$</sub>  的优先级因子

$$\sigma_i = \sum_{l=1}^{|NB_i|} t_{i,l} \quad (2)$$

当某个移动式基站发现 FA 冲突时, 首先将自己的  $\sigma$  值与冲突各方的  $\sigma$  值比较, 如果自己的  $\sigma$  是最小的则自己更改, 否则等待其他有更低  $\sigma$  的移动

式基站修改。

#### 3.2 基于图论的分配策略

在进行完优先级判断之后, 高优先级的 MBS 的 FA 序列需要重新分配, 如果该 MBS 需要进行一次“区域修改”。它首先要确定新的 FA 序列长度, 由于此时也为周围的邻居重新规划 FA 序列, 所以将这些局部所有基站的 FA 序列放到一起, 称之为 FA 矩阵。在生成 FA 矩阵时, 该 MBS 首先需要选择该矩阵的列数。

从图论的角度解决此问题, 构造一个干扰图  $G=(V,E)$ , 把基站间的拓扑结构抽象成图, 每个移动式基站为干扰图中的一个顶点, 2 个相邻的移动式基站间存在一条边。于是频谱分配问题等价于顶点的着色问题(GCP, graph coloring problem)。

在这里颜色对应的资源是频谱在时间轴上的使用次序, 也就是上述的 FA 序列。FA 序列的长度对应为频谱块在时间轴上的分配周期, 越长的 FA 序列能够通过排序得到越多的正交组合, 即更多可用于染色的颜色, 但是当频谱分块数固定时, 越长的 FA 序列意味着在一个分配周期中无频谱的空时间块越多, 资源利用率下降。所以要在不冲突染色所有顶点的前提下, 尽可能缩短 FA 序列的长度。

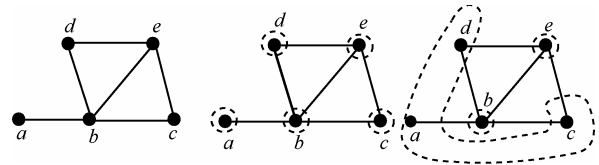


图 3 基于不同策略的基站分组示例

一种已有的选择 FA 序列长度的策略是使用局部范围内邻居基站最多的移动式基站的邻居基站数目加 1 来作为重新生成 FA 序列的列数<sup>[5]</sup>。对应到干扰图中, 与某个顶点关联的边数称之为该顶点的度, 邻居数量最多的移动式基站对应为该局部分扰图中的最大度顶点。因此该策略又可以称为最大度策略。以图 3(a)所示的干扰图为例, 顶点  $b$  为最大度顶点。如果采用基于最大度的染色分组方法, 则顶点  $b$  和它的所有邻居各需要一个不同的资源, 即在图 3(b)中需要 5 种资源。这种方法非常简单而且也是完全分布式的, 但是对冲突做出了过度的估计, 虽然保证了最大度顶点的资源分配, 但是由于没有考虑网络的拓扑结构, 导致了一定的资源浪费。例如, 虽然  $a$  顶点和  $b$  顶点相邻但是  $a$  顶点和  $d, e, c$  顶点不相邻, 所以  $a$  顶点可以使用和  $d, e,$

c 顶点一样的资源而不会造成干扰。

为了克服上述的现有分配方法资源利用率不高的缺点，下面将提出 2 种 FA 序列分配策略。

### 3.2.1 基于本地最大簇的高资源利用率的分配策略

对于网络中的每个基站，由于它已知 2-hop 范围内的邻居信息，因此它可以得到包含自身的最大簇。在它以及它的邻居中所需要的正交 FA 序列的数量一般不会超过该最大簇的大小。例如在图 3(c) 中，对于顶点 b 而言，包含它的最大的簇之一是图中被粗线连接的 3 个顶点 d、b、e。因此如果顶点 b 发起 FA 序列区域修改，它所生成的 FA 矩阵的列数只需要为 3。相对于最大度策略时列数为 5 的 FA 矩阵，它能明显提高资源利用率。

移动式基站在进行 FA 序列区域修改时可以使用局部干扰图中包含自身的最大簇大小作为新生成 FA 矩阵的列数，并将新生成的该矩阵逐行推送给它的最大簇中的邻居基站作为新的 FA 序列。

例如在图 4 中，包含顶点 4 的最大簇为 {1,4} 以及 {4,5}，最大簇的大小为 2。所以对于顶点 4 的局部而言，FA 序列的长度只需要为 2 就可以得到足够多的正交 FA 序列。因为顶点 4 的邻居 1 和 5 不互相干扰，顶点 1 和 5 可以使用相同的 FA 序列。

使用包含自己最大簇的大小作为 FA 序列的长度能够最高效的利用频谱资源，但是由于它仅仅考虑了 1-hop 的局部信息，虽然能够在 1-hop 范围内不

发生冲突，但是 1-hop 中的邻居基站可能会在 2-hop 范围内出现 FA 序列长度不够的问题。例如在图 3 中，虽然在 {1,4,5} 这样一个以顶点 4 为中心的 1-hop 范围内，FA 序列只需要长度为 2，但是对于顶点 1 而言，它还处于一个大小为 3 的簇中，所以对于顶点 1，宽度为 2 的 FA 序列无法找到足够多的正交组合使得在它的邻居范围内不会发生冲突。虽然存在上述问题，但是通过冲突之后的 FA 序列本地修改机制能够保证网络的资源分配达到稳定可用，如图 4 所示。基于本地最大簇的分配策略的资源利用率高，但是它会出现频繁的 FA 序列更改。

### 3.2.2 基于邻居最大簇的低信令开销的分配策略

在移动式基站网络的一些复杂的应用环境中，对于系统可靠性的要求高于资源的利用率要求，因此在资源分配算法时要降低信令开销，避免频繁的 FA 序列重分配。为此，本节提出基于邻居最大簇的分配策略。首先做一个定义，对于一个顶点，它的本地最大簇是包含它的所有簇中顶点数最多的簇，它的邻居最大簇是它以及它所有 1-hop 的邻居的本地最大簇中顶点数最多的簇。以图 4 为例，顶点 4 的邻居最大簇为 {1,2,3}。

移动式基站在进行 FA 序列区域修改时可以使用局部干扰图中自己的邻居最大簇大小作为新生成的 FA 矩阵的列数，并将新生成的该矩阵逐行推送给它的本地最大簇中的邻居基站作为它们新的

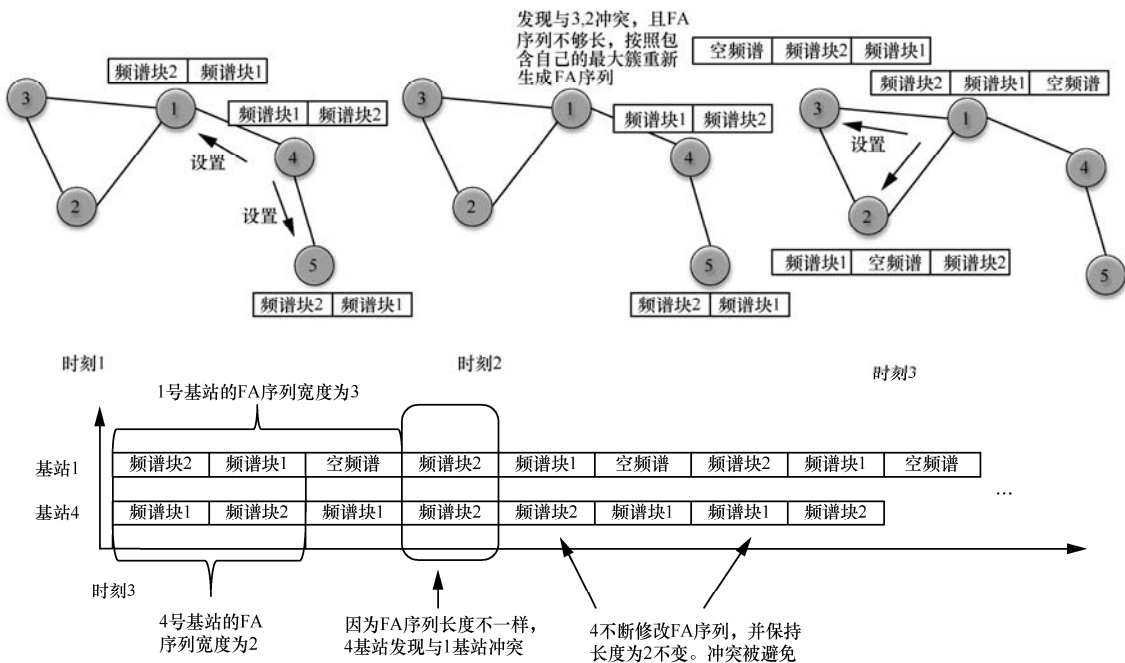


图 4 以本地最大簇作为 FA 序列长度时的资源分配过程

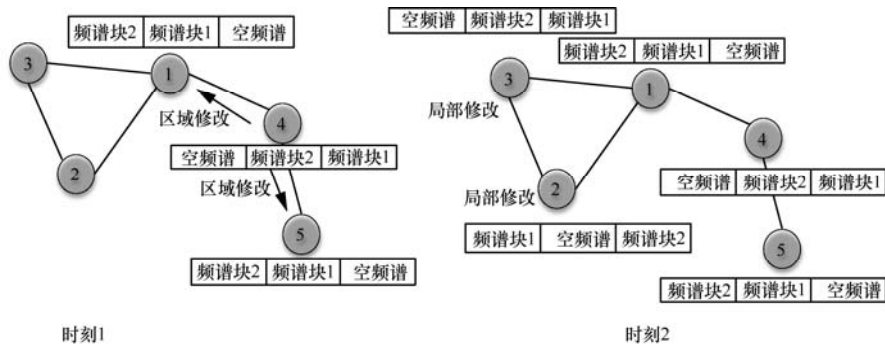


图 5 以邻居最大簇作为 FA 序列长度时的资源分配过程

FA 序列（注：由于邻居最大簇的大小一定大于或者等于本地最大簇大小，所以基于邻居最大簇大小生成的 FA 矩阵一定能够分解成足够多的 FA 序列供本地最大簇中的邻居使用）。

使用邻居最大簇的大小作为 FA 序列区域修改时新的 FA 序列的长度可以明显避免本地最大簇策略带来的后续 FA 序列频繁修改，分配方案能够更快到达稳定状态。如图 5 所示，时刻 1 时，顶点 4 在发起区域修改时使用邻居最大簇大小 3 作为 FA 序列的长度，将新生成的 FA 序列推送给邻居顶点 1 和顶点 5。在时刻 2，当顶点 3 和顶点 2 发现顶点 1 的 FA 序列发生了改变，因此它们需要修改 FA 序列与之兼容，由于 FA 序列的宽度已经是 3，所以可以找到不冲突的正交的 FA 序列。相对于图 4，这里减少了 1 次区域修改以及避免了后续的大量本地修改。但是顶点 4 在它的 1-hop 范围内也存在一定的资源浪费。

值得注意的是，这 2 种策略虽然相对于已有的最大度策略有资源利用率高的优点，但是这类基于最大簇的方法在一些特殊场景下依然存在一些会导致资源配方案失败的问题。从图的角度来看，对于一个包含大小为  $\omega(G)$  的最大簇的干扰图，至少需要  $\omega(G)$  种颜色来对该干扰图来染色。但是该结论的逆结论并不成立。一个典型的例子是一个五边形干扰图，如图 6 所示。最大簇的大小为 2，但是该图至少需要 3 个颜色才能完成染色。

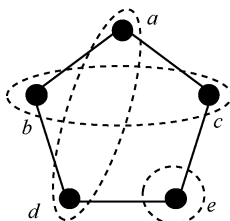


图 6 最大簇大小与最小颜色数关系

对于一个图的染色问题，Brooks 定理给出了染色数的一个更紧的上界，即对一个图，它的染色数不超过最大度， $\chi(G) \leq \Delta(G)$ ，除非图  $G$  是一个完全图或者一个奇数环<sup>[6]</sup>。

因此，要对本节中提出的分配策略进行一些补充。每个顶点当需要改变 FA 序列长度时，在直接使用邻居的最大簇的大小或者本地最大簇大小之前，要判断该簇大小是否大于目前现有的 FA 序列长度。如果大于，则使用；否则，在现有 FA 序列宽度上加 1 之后再使用。这样实际的 FA 序列长度会随着网络拓扑结构的特点在最大簇大小与最大度之间渐进变化，既能保证资源的利用率，又能修正直接利用最大簇大小带来的上述问题。

### 3.3 资源分配算法

综合上述的资源分配优先级策略以及基于图论的 FA 序列分配策略，每个移动式基站资源分配过程分成 2 个阶段。

第 1 阶段是邻居信息更新，每个移动式基站获取邻居基站信息，这些邻居基站信息中也包括它们的邻居基站信息，即总共 2-hop 的信息。然后更新邻居列表并计算最大簇的大小。最后广播自身的 FA 序列信息、1-hop 邻居信息以及最大簇大小。这种自身信息的广播需要定时进行。

第 2 阶段是 FA 序列更新，首先将自身的 FA 序列和上一阶段获取的邻居基站的 FA 序列比对。如果存在冲突，则再进行优先级判断。在进行完优先级判断之后，如果自身是最高优先级，则自己需要更改 FA 序列并判断是需要本地修改还是区域修改，优先进行本地修改。如果无法本地修改，则进入区域修改状态并基于 3.2 节提出的策略，为 1-hop 范围内的邻居重新分配 FA 序列。

为了更清楚地描述上述方案，整个资源分配算

法详细过程如下。

1) 更新  $NB_i$ 、 $NBI_i$ 、 $NB_{NB_i(n)}$ 、 $d_n$ 、 $\sigma_n$ ，其中  $n=1,2,\dots,|NB_i|$ 。

2) 计算包含自己的最大簇大小  $d_i$  以及  $\sigma_k$ ，并连同  $FA_i$ 、 $NB_i$  等信息向外广播。

3) **if**  $NB_i = \emptyset$  **then**

初始化包含  $C$  个频谱块的  $FA_i$  序列

**end if**

4) **if**  $NBI_i \neq \emptyset$  **then**

**if**  $|\sigma_i| \leq \min(\sigma_l), l \in NBI_i$  **then**

优先更改自身的 FA 序列;

**if**  $ABS_i = \emptyset$  **then**

**switch** 选择的分配策略

**case 1:** 本地最大簇策略

设置  $L'_i = d_i$ ;

**break;**

**case 2:** 邻居最大簇策略

设置  $L'_i = \max\{d_i, d_n\}$ ,

$n = 1, 2, \dots, |NB_i|$ ;

**break;**

**end**

$L_i = \max\{L'_i, L_i + 1\}$ ;

生成  $L_i \times L_i$  维的 Latin Square 矩阵;

逐行发送给本地最大簇内的邻居;

**else if**  $ABS_i \neq \emptyset$

新的 FA 序列根据  $ABS_i \neq \emptyset$  生成;

使用新的 FA 序列;

**else**

不做任何操作;

**end if**

5) **Go to 1**

## 4 仿真与性能评估

### 4.1 仿真场景

仿真针对一个长宽各 100 km 的正方形区域，移动式基站初始在区域内均匀分布，运动模型采用 Random Waypoint 模型<sup>[7]</sup>。移动式基站的移动速度为 50 km/h 并保持恒定。假设 2 个移动式基站之间的距离  $R \leq 8$  km 时，为了避免用户处于 2 个基站的交叠区域时受到邻居基站的干扰，2 个基站不能同时使用相同的频谱块。

### 4.2 仿真结果

选用了 3 个参数来评估本文所提出的算法的性能：平均资源利用率、公平性因子和资源重分配的次数。为了比较算法的性能，对文献[5]中提出的最大度策略的分配方法也进行了仿真，用以比较。

图 7 比较了该资源块动态分配算法分别使用最大度策略(DSA)、本地最大簇策略(LC DSA)、邻居最大簇策略(NC DSA)时，资源利用率随着基站数目以及频谱块的分段数的变化曲线。从图中可以看到，在频谱块分段数  $C$  相同时，使用本地最大簇时的资源利用率最高，其次是邻居最大簇策略，最低是最大度策略，这也验证了前文的分析。

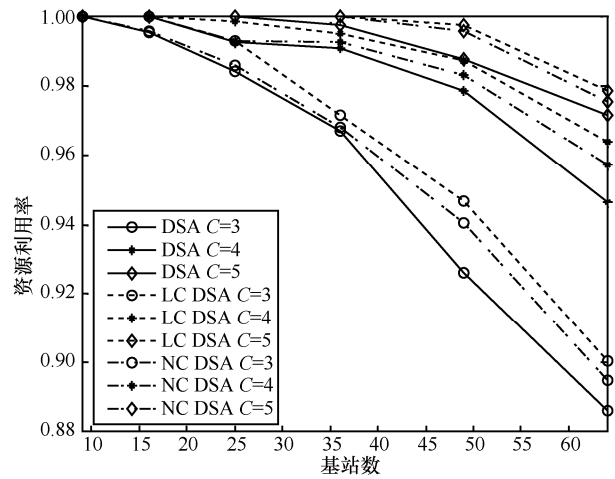


图 7 不同基站数量下的资源利用率

使用经典的 Jain 公平性因子来评估本文所提出的算法的公平性，该公平性因子的定义如下<sup>[8]</sup>

$$Fairness\ Index = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \rho_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n \rho_i^2} \quad (1)$$

其中， $n$  为移动式基站的数目。图 8 比较了当频谱分段数  $C = 3, 4, 5$  时本文所提出的方案在不同策略下的公平性因子。

从图 8 中可以看出，在基站数目固定的情况下，随着频谱分段数  $C$  的增大，公平性因子随之上升。与此同时，随着基站数目的增大，公平性因子下降。此外，不同策略时的公平性因子间的差异较小并且都接近于 1。因此该算法是一种公平的分配算法。

图 9 比较了不同策略下的 FA 序列发生重传的时刻占总仿真时刻的比例。可以看到，在同一种策略下，资源重分配的时刻占总仿真时刻的比例随着基站数目的增多而增加。这是因为随着基站数目的增多，该

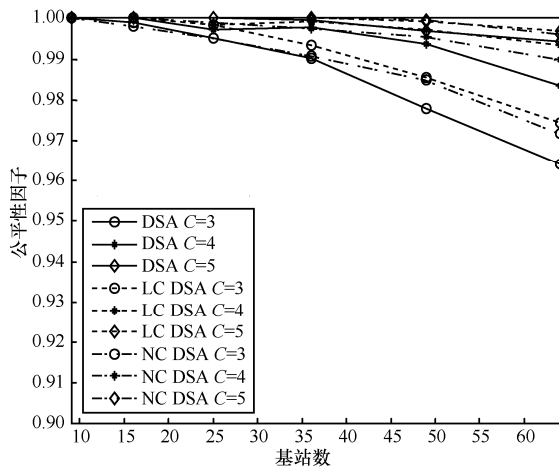


图 8 不同基站数量下的公平性因子

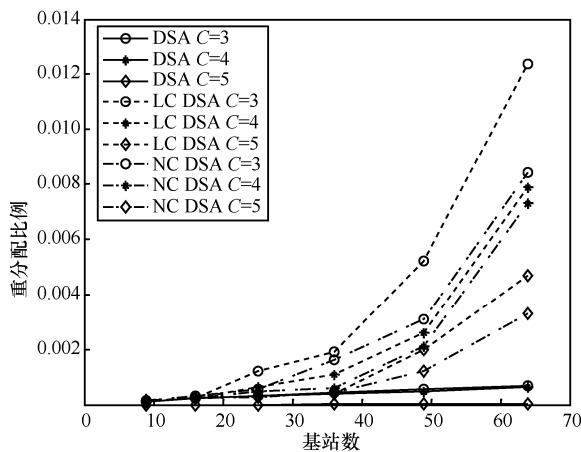


图 9 不同基站数量下的资源重分配比例

区域内基站的密度增大，邻居数量增多，发生 FA 序列冲突的概率增大，因而会出现更多资源重分配。与此同时，随着频谱分段数  $C$  越大，资源重分配的比例变小。这是因为频谱分块较多时，FA 序列的默认长度较大，能够生成足够的正交组合，因而会降低冲突的概率。在基站数量和频谱分段数相同的情况下使用本地最大簇策略时，该算法带来的资源重分配比例最高，其次是邻居最大簇策略。与这两者相反，最大度策略带来的资源重分配比例最低，并且随着基站数量的增加，增长很慢。这也验证了之前的分析，即本地最大簇策略会带来最多的 FA 序列重分配，而最大度策略由于损失了一部分资源利用率，FA 序列有足够的冗余长度，因而重分配次数远远少于前者。

## 5 结束语

本文首先简述了移动式基站的概念，针对其中关键的频谱资源分配问题，提出了基于驻留时间的资源分配优先级策略，然后从提高资源利用率的角度出

发，提出了基于本地最大簇的资源分配策略，再从降低资源重分配次数的角度，提出了基于邻居最大簇的资源分配策略。综合上述提出的各种策略，本文提出了一种完整的低复杂度分布式频谱资源块动态分配算法，所提的算法具有良好的公平性。在实际的系统中，可以根据应用场景对与资源利用率与重分配次数的需求来选择所使用的分配策略。

## 参考文献:

- [1] YANG R. Considerations and suggestions on improvement of communication network disaster countermeasures after the Wenchuan earthquake[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(1): 44-47.
- [2] NESARGI S, PRAKASH R. Distributed wireless channel allocation in networks with mobile base stations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1407-1421.
- [3] LIN Y, ALOUINI M S. A fault-tolerant channel-allocation algorithm for cellular networks with mobile base stations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(1): 349-361.
- [4] SALEM M, SALAMAH M. A novel distributed wireless channel allocation algorithm in cellular networks with mobile base stations[A]. Proceedings of the Mosharaka International Conference on Communications, Signals and Coding[C]. 2008.
- [5] JONG-KWAN L, JAESUNG L. Dynamic spectrum access to improve fairness in tactical networks with mobile base stations[A]. IEEE International Conference on ICC[C]. 2012.
- [6] LOVÁSZ L. Three short proofs in graph theory[J]. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 1975, 19(3): 269-271.
- [7] ROY R R. Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models[M]. Springer, 2010.
- [8] JAIN R, CHIU D M, HAWE W R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System[M]. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.

## 作者简介:



何明捷 (1990-), 男, 安徽安庆人, 中国科学院计算技术研究所助理工程师, 主要研究方向为多感知信息融合、移动通信网络、无人系统与智能控制。

徐勇军 (1979-), 男, 安徽安庆人, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 主要研究方向为多感知信息融合、物联网技术与应用。

王峰 (1977-), 男, 山东济宁人, 博士, 海军装备研究院高级工程师, 主要研究方向为低能耗网络、传感器网络、物联网技术与应用。

吴畏 (1980-), 男, 四川绵阳人, 海军装备研究院高级工程师, 主要研究方向为电磁频谱管理。

徐朝农 (1975-), 男, 安徽巢湖人, 中国石油大学计算机系副主任、副教授, 主要研究方向为无线自组织网络、嵌入式系统。