

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910103862.6

H04W 16/10 (2009.01)

H04W 72/08 (2009.01)

H04W 72/12 (2009.01)

H04W 88/18 (2009.01)

[43] 公开日 2009年10月28日

[11] 公开号 CN 101568124A

[22] 申请日 2009.5.15

[21] 申请号 200910103862.6

[71] 申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙坪坝正街174号

[72] 发明人 胡致远 刘国金 黄天聪 苏家勇
唐军 郭建丁 邓建良

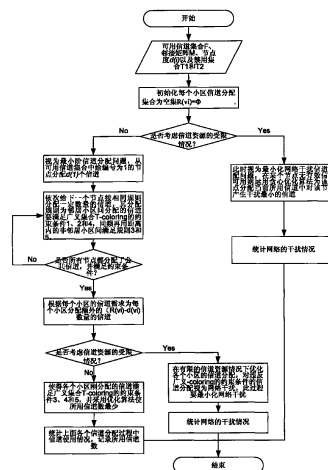
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

[54] 发明名称

一种无线 mesh 网络中的信道分配方法

[57] 摘要

本发明提供一种应用于无线 mesh 网络中的信道分配方法，该方法在虚拟层次化的 Mesh 网络结构中采用射频防卫度和小区业务强度作为信道分配指标以实现同频道复用；信道分配方案以小区为单位进行信道分配，并采用一种广义集合 T-coloring 着色模型；用射频防卫度作为信道分配的指标，在载波干扰比大于射频防卫度的情况下复用信道，且在小区业务强度不均匀时采用小区分裂方式来控制小区半径。本发明的显著效果是：为虚拟层次化的 Mesh 网络结构提供了一种无线信道分配方法，从而提高无线频谱资源的利用率，减少小区之间的无线干扰。



1、一种虚拟层次化的 Mesh 网络结构中的无线信道分配方法，以小区为单位进行信道分配，采用新型广义集合 T-coloring 信道分配模型并用射频防卫度和小区业务强度作为信道分配指标以优化信道资源复用，从而提高无线频谱资源的利用率和减少小区之间的无线干扰；其特征包含如下步骤：

A、建立虚拟层次化 Mesh 网络拓扑规则：将地理位置相近的节点（包括 mesh 客户端和 mesh 路由器）划分成小区，小区内所有节点虚拟成一个“虚拟节点”，每个虚拟节点内部的节点可以直接通信，邻居小区内的节点也可以直接通信，而非邻居小区内节点间要通过多跳通信。

B、根据虚拟层次化 mesh 网络拓扑结构建立一种新型广义集合 T-coloring 信道分配模型：保证邻居小区分配公共信道以维持网络的连通性，同时为降低网络干扰，在一定的同频道复用距离内非邻居小区要分配不同的信道，并满足 T-coloring 约束，邻居小区除公共信道外其余分配的信道也要满足一定的 T-coloring 约束，而距离大于同频道再用距离的节点可分配相同的信道以提高频率复用效率。

C、用射频防卫度作为信道分配的指标优化同频道复用距离，并采用小区分裂方式优化网络容量和信道分配公平性：在载波干扰比大于射频防卫度的情况下可复用信道，不需要为了避免干扰而在节点的干扰域以外才复用信道，而是在存在一定可接受干扰的情况下提高信道分配方案的实用性和频谱资源利用率；此外，在小区业务强度不均匀时采用小区分裂方式来控制小区半径，提高网络容量以满足通信需求，同时改善信道分配的公平性。

2、根据权利要求 1 所述步骤 A，其特征包含：在所形成的虚拟层次化 Mesh 网络的基础上信道分配方案以小区为单位进行信道分配，每个小区分配一组信道，邻居小区分配一定的公共信道以满足邻居小区间的通信需求，同时也根据每个小区的业务需求为每个小区分配额外的信道以满足小区内部节点间的通信。

3、根据权利要求 1 所述步骤 A，其特征包含：基于虚拟层次化 Mesh 网络拓扑规则的信道分配方法区别于以往平面结构和分层结构的无线 mesh 中信道资源的分配方法，后者以连接图或冲突图为基础分配给具体的链路或节点以降低网络干扰并保持网络的连通性；前者不分配信道给具体的网络节点或链路，而是在虚拟节点形成的拓扑结构的基础上根据网络的连通性要求和小区业务需求分

配一个信道集合给每个小区。

4、根据权利要求1所述步骤B,其特征在於:使用一种广义集合 T-coloring 模型进行信道分配,每个小区根据其业务需求分配一个信道集合,相邻小区分配的信道集合中要有一定数目的公共信道以进行多跳通信并维持网络的连通性,这不同于蜂窝网络中信道分配问题常用的集合 T-coloring 模型。

5、根据权利要求1所述步骤B的信道分配模型,其特征在於:为了维持网络的连通性并满足小区间的通信需求邻居小区要分类一定的公共信道;如果几个小区互为邻居小区,则它们各自分配的公共信道不能相同;在一定的同频道再用距离内的非邻居小区要分配不相交的信道集合,并使得其分配的信道间的差值不落在一定的频率禁用集合中,即满足 T-coloring 约束;邻居小区除分配的公共信道外其它分配的信道间的差值也要满足类似的 T-coloring 约束。

6、根据权利要求1所述步骤C,其特征在於:用射频防卫度作为信道分配指标,在以往的无线 mesh 网络信道分配问题中节点干扰域以内的其它节点不能使用相同信道,这种信道分配方式未充分考虑链路间的干扰程度,具有相对比较低的信道资源利用率;而用射频防卫度作为信道分配指标时在载波干扰比大于射频防卫度的情况下节点可复用相同信道,提高了信道利用率。

7、根据权利要求1所述步骤C,其特征在於:考虑当网络中节点分布不均匀时,即当部分小区节点分布比较密集,其业务强度比较高,这些小区可能有较多的节点需要和邻居小区内的节点通信,采用小区分裂的方式使得小区面积缩小,这样原来的小区分类为几个小区,分类后所有小区具有比较均匀的业务强度,然后再进行信道分配,在保持有效的网络连通性的同时提高网络容量,且提高了频谱利用效率。

一种无线 mesh 网络中的信道分配方法

技术领域

本发明涉及通信技术领域，特别是涉及无线 mesh 网络中的信道分配。

背景技术

无线 Mesh 网络是一种宽带无线自组网架构体系，具备“高带宽”、“高可靠性”和“高频谱利用率”特征。无线 Mesh 网络可以划分为平面结构和分层结构两类。平面结构又可以称为对等结构，其所有节点在网络控制、路由选择和流量管理上都是平等的。平面结构虽然具有组网简单且网络可靠性高的优点，但是其网络控制开销大，路由复杂度高；分层结构中，一些相邻的节点被聚合成簇(Cluster)，每个簇由簇头(Cluster Header)和多个簇成员(Cluster Member)组成。簇头之间形成 Mesh 网络，而簇成员通过簇头实现互通。这种分层结构虽然实现了网络控制的简化，但也使簇头成为网络瓶颈。

在虚拟层次化的 Mesh 网络结构中，将地理位置相近的节点划分成小区（也就是簇），小区内的所有节点可以直接与相邻小区中的节点直接通信，而非相邻小区的节点之间的通信则需要通过相邻小区节点转发。这样，小区之间成为虚拟层次网络的顶层 Mesh 网络，而底层小区内节点都可以具备簇头和簇成员这两种功能。即：小区内的所有节点可虚拟成一个位于小区中心的“虚拟节点”，如图 1 所示。将虚拟节点看成是路由层的节点，即每个小区内的所有节点都具有相同的 IP 子网地址，但具有不同的 MAC 地址，这样既简化了路由层的复杂度，又使数据链路层有更好的冗余。

在上述虚拟层次化的 Mesh 网络结构中，小区的划分方式类似于蜂窝网络中的小区划分方式，所不同的是蜂窝网络中小区内和小区间终端节点不能直接通信，小区内终端节点直接和基站通信。而这里划分的小区内部以及相邻小区内的节点可以直接通信，这样可实现不同小区内节点间的多跳通信。本发明针对这种虚拟层次化的 Mesh 网络结构提出了一种无线信道资源分配方法，通过有效的空间复用提高 Mesh 网络的频谱资源利用率。

发明内容

针对新的组网方式，本发明为虚拟层次化的 Mesh 网络结构提供一种无线信道分配方法，以提高无线频谱资源的利用率，减少小区之间的无线干扰。

本发明采用射频防卫度和小区业务强度作为信道分配指标以优化信道资源复用，其特征在于包含如下步骤：

A、建立虚拟层次化 Mesh 网络拓扑规则：将地理位置相近的节点（包括 mesh 客户端和 mesh 路由器）划分成小区，小区内的所有节点虚拟成一个“虚拟节点”，每个虚拟节点内部的节点可以直接通信，邻居小区内的节点也可以直接通信，而非邻居小区内节点间要通过多跳通信。

B、根据虚拟层次化 mesh 网络拓扑结构建立一种新型广义集合 T-coloring 信道分配模型：保证邻居小区分配公共信道以维持网络的连通性，同时为降低网络干扰，在一定的同频道复用距离内非邻居小区要分配不同的信道，并满足 T-coloring 约束，邻居小区除公共信道外其余分配的信道也要满足一定的 T-coloring 约束，而距离大于同频道再用距离的节点可分配相同的信道以提高频率复用效率。

C、用射频防卫度作为信道分配的指标优化同频道复用距离，采用小区分裂方式优化网络容量和信道分配公平性：在载波干扰比大于射频防卫度的情况下可复用信道，不需要为了避免干扰而在节点的干扰域以外才复用信道，而是在存在一定可接受干扰的情况下提高信道分配方案的实用性和频谱资源利用率；此外，在小区业务强度不均匀时采用小区分裂方式来控制小区半径，提高网络容量以满足通信需求，同时改善信道分配的公平性。

在步骤 A 中，在所形成的虚拟层次化 Mesh 网络的基础上信道分配方案以小区为单位进行信道分配，其特征是：每个小区分配一组信道，邻居小区分配一定的公共信道以满足邻居小区间的通信需求，同时也根据每个小区的业务需求为每个小区分配额外的信道以满足小区内部节点间的通信。

在步骤 A 中，基于虚拟层次化 Mesh 网络拓扑规则的信道分配方法区别于以往平面结构和分层结构的无线 mesh 中信道资源的分配方法，后者以连接图或冲突图为基础分配给具体的链路或节点以降低网络干扰并保持网络的连通性；前者不分配信道给具体的网络节点或链路，而是在虚拟节点形成的拓扑结构的基础上根据网络的连通性要求和小区业务需求分配一个信道集合给每个小区。

在步骤 B 中,使用一种广义集合 T-coloring 模型进行信道分配,其特征是:每个小区根据其业务需求分配一个信道集合,相邻小区分配的信道集合中要有一定数目的公共信道以进行多跳通信并维持网络的连通性,这不同于蜂窝网络中信道分配问题常用的集合 T-coloring 模型。

在步骤 B 中使用的广义集合 T-coloring 着色模型,其方法是:为了维持网络的连通性并满足小区间的通信需求邻居小区要分类一定的公共信道;如果几个小区互为邻居小区,则它们各自分配的公共信道不能相同;在一定的同频道再用距离内的非邻居小区要分配不相交的信道集合,并使得其分配的信道间的差值不落在一定的频率禁用集合中,即满足 T-coloring 约束;邻居小区除分配的公共信道外其它分配的信道间的差值也要满足类似的 T-coloring 约束。

在步骤 C 中用射频防卫度作为信道分配指标,在以往的无线 mesh 网络信道分配问题中节点干扰域以内的其它节点不能使用相同信道,这种信道分配方式未充分考虑链路间的干扰程度,具有相对比较低的信道资源利用率;而用射频防卫度作为信道分配指标时在载波干扰比大于射频防卫度的情况下节点可复用相同信道,提高了信道利用率。

在步骤 C 中考虑当网络中节点分布不均匀时,即当部分小区节点分布比较密集,其业务强度比较高,这些小区可能有较多的节点需要和邻居小区内的节点通信,采用小区分裂的方式使得小区面积缩小,这样原来的小区分类为几个小区,分类后所有小区具有比较均匀的业务强度,然后再进行信道分配,在保持有效的网络连通性的同时提高网络容量,且提高了频谱利用效率。

本发明的有益效果为:在虚拟层次化 Mesh 网络架构下提出了一种无线信道分配方法,采用射频防卫度和小区业务强度作为无线信道分配的指标的广义集合 T-coloring 着色模型,从而提高了虚拟层次化 Mesh 网络的无线频谱资源利用度。

附图说明

图 1 为网络虚拟层次结构图。

图 2 为小区结构划分和节点覆盖图。

图 3 为节点覆盖简化图和对应的网格拓扑规则图。

图 4 为载波干扰比说明图。

图 5 为基于射频频防卫度的信道分配举例分析图。

图 6 为广义集合 T-coloring 模型举例分析图。

图 7 为业务强度不均匀时小区划分和对应的小区分裂图。

图 8 为信道分配算法流程图。

具体实施方式

下面根据附图和实施例对本发明作进一步详细说明：

本发明的基本思路如下：结合虚拟层次化 Mesh 网络的组网要求提出一种无线 mesh 网络中的信道分配方案，方案中应用新的广义集合 T-coloring 着色模型作为信道分配规则，规则中采用射频频防卫度和小区业务强度作为信道分配的改进指标，在可接受的网络干扰的情况下维持网络的连通性以及有效提高网络容量。

图 2 是本发明的虚拟层次化 Mesh 网络中小区结构划分和节点覆盖图，小区划分后每个小区都包含一定数量的节点，小区具有相同半径 R ，为了不留空隙地覆盖整个平面区域，小区之间有一定的交叠，这类似于蜂窝网络中的小区结构。相邻小区中心间的距离为 d ，为了完成不同节点间的多跳通信，每个小区内的节点都可以和邻居小区内的任一节点通信，因此小区内不同地理位置的节点都可以通过一定的功率控制措施调整覆盖半径覆盖邻居小区的通信节点，若图 2 中的节点 A 要和邻居小区中的节点 B 通信，此时 A 的覆盖半径为 $d+2R$ ，而节点 A 和邻居小区边缘节点 C 通信时覆盖半径为 d ，因此小区内节点的覆盖半径在 d 和 $d+2R$ 之间。

位于小区中心的虚拟节点表示每个小区，图 3 (a) 为节点覆盖简化图举例分析，其小区覆盖半径为 $d+R$ ，实际上节点可位于小区内任何位置；为了用连接图来表示这种虚拟层次化 Mesh 网络结构的拓扑规则，邻居虚拟节点用一条边连接，图 3 (b) 给出了图 3 (a) 对应的网格 mesh 网络拓扑结构；进行信道分配时邻居小区要分配公共信道以完成节点间的多跳通信，这里暂不考虑各个小区内节点的间的具体信道分配情况，简单地讲由于小区内节点间可直接通信，因此从图着色角度来讲，可简单认为小区内节点的信道分配是对它们构成的完全图进行边着色或链路调度以有效解决小区内信道资源竞争问题。

为了减小同信道干扰的影响和保证接收信号的质量，必须使接收机输入端

的有用信号电平和同频道干扰电平之比 C/I 大于一定门限值, 该门限值为射频防卫度; 图 4 为载波干扰比图示说明, 图中载波 C 虽然受到干扰 I_x 和 I_y 的影响, 但只要载波干扰比 C/I 大于等于门限值 β , 节点 u 和 v 之间的通信是可能的; 定义每个节点接收端接收到的干扰为所有干扰之和, 如果节点 u 和 v 之间要正常通信, 则必须满足 $C/(I_x + I_y) \geq \beta$ 。

更一般地, 设 mesh 网络连接图用 $G(V, E)$ 表示, v 为边 $e_0 = (v, v_0)$ 的一个节点, $V_c = \{v_i, v_i \in V\}$ 是临近节点 v 的节点集合, $V_c \subset V$, $i=1, 2, \dots, k, k \leq |V|$, 并且每个 v_i 关联的边对 e_0 产生干扰, 若 e_0 上的信息传输是可能的则必须满足:

$$C/I = \frac{C(v, v_0)}{I(v, v_1) + I(v, v_2) + \dots + I(v, v_k)} \geq \beta$$

无线信号的强度随距离的增加而成比例的下降, 当节点间的距离足够大时可忽略产生的干扰, 定义 d_0 为节点 v 和 v_0 的距离, d_i 为 v 和临近 v 的节点 v_i 之间的距离, $i=1, 2, \dots, k$, 且 α 是值在 2 到 4 之间的衰落参数, 若每个节点具有相同的发射功率, 则载波干扰比可表示为:

$$C/I = \frac{C(v, v_0)}{I(v, v_1) + I(v, v_2) + \dots + I(v, v_k)} = \frac{d_0^{-\alpha}}{d_1^{-\alpha} + d_2^{-\alpha}, \dots + d_k^{-\alpha}} \geq \beta$$

基于以上对载波干扰比的定义, 在一定的射频防卫度的条件下可以计算出同频道再用距离 D 的大小, 举例来说, 在前面的三角形网格拓扑中, 每个虚拟节点具有相同的发射功率 P , 该虚拟节点会受到周围来自 6 个方向使用相同信道的虚拟节点的干扰, 因此对应的载波干扰比为:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{j=1}^6 I_j} = \frac{Pd^{-\alpha}}{6PD^\alpha} = \frac{d^{-\alpha}}{6D^{-\alpha}} \geq \beta$$

上式中假设 α 为 4, β 为 18dB, 则可计算出 $D/d=2.7$, 其中 $d=\sqrt{3}R$, 这样可近似认为相距为 $3d$ 的小区可使用相同信道通信而忽略干扰的影响。

假定 $D/d=2.7$, 图 5 所示为三角形网格 mesh 拓扑下用射频防卫度作为改进指标的信道分配情况, 其中相距为 3 跳的节点可使用相同信道, 如 $A \rightarrow D$ 和 $C \rightarrow G$ 通信时可同时使用信道 1, $B \rightarrow A$ 和 $G \rightarrow J$ 通信时可同时使用信道 2。

虚拟层次化 Mesh 网络结构的每个小区根据小区业务需求要分配一组信道, 而相邻小区要分配一定的公共信道以保持网络的连通性, 并且在用射频防卫度

作为信道分配改进指标时同频道复用距离内非邻居小区不能分配相同信道以避免网络干扰。本发明提出的广义集合 T-coloring 问题主要针对虚拟层次化 mesh 网络结构进行信道分配，其借鉴了集合 T-coloring 问题的着色规则并进行了适当的修改和扩充。相邻小区分配的信道集合的交集不能为空集，且同频道复用距离内非邻居小区不能分配相同信道。用图论建模后网络连接图用图 $G(V, E)$ 表示，其中 $|V|=n$ ， E 为边集合，存在频率禁用集合 T_1 、 T_2 ，按照一定规则 R 广义集合 T-coloring 模型必须满足：

1、 $(v_i, v_j) \in E \leftrightarrow R(v_i) \cap R(v_j) \neq \emptyset$ ，且 $(R(v_i) \cap R(v_j)) \subset R(v_i)$ ， $(R(v_i) \cap R(v_j)) \subset R(v_j)$ ，其中 $R(v_i) \in Z^+ \setminus \{0\}$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ， $R(v_i)$ 是分配给节点 v_i 的信道集合；

2、 $(v_i, v_j) \in E$ ， $(v_j, v_k) \in E$ ，且 $(v_i, v_k) \in E \leftrightarrow (R(v_i) \cap R(v_j)) \cap (R(v_i) \cap R(v_k)) = \emptyset$ ，

$(R(v_i) \cap R(v_j)) \cap (R(v_j) \cap R(v_k)) = \emptyset$ ， $(R(v_j) \cap R(v_k)) \cap (R(v_i) \cap R(v_k)) = \emptyset$ ；

3、 $(v_i, v_j) \notin E$ 且 $d(v_i, v_j) < D \leftrightarrow R(v_i) \cap R(v_k) = \emptyset$ ，其中 $d(v_i, v_j)$ 为节点 v_i 和 v_j 间的距离， D 为同频道再用距离；

4、 $(v_i, v_j) \in E \leftrightarrow |f(v_i) - f(v_j)| \notin T_1$ ，

其中 $f(v_i) \in (R(v_i) - (R(v_i) \cap R(v_j)))$ ， $f(v_j) \in (R(v_j) - (R(v_i) \cap R(v_j)))$ ， $T_1 \subset Z$ ；

5、 $(v_i, v_j) \notin E$ 时非邻居小区的信道约束有两种情况：

(a) $(v_i, v_k) \in E$ ， $(v_k, v_j) \in E$ ， $d(v_i, v_j) = 2d \leftrightarrow |f(v_i) - f(v_j)| \notin T_2$ ，

$f(v_j) \notin (R(v_k) \cap R(v_j))$ ， $f(v_i) \notin (R(v_i) \cap R(v_k))$ ；

(b) $2d < d(v_i, v_j) < D \leftrightarrow |f(v_i) - f(v_j)| \notin T_2$ ，其中 $f(v_i) \in R(v_i)$ ， $f(v_j) \in R(v_j)$ ，

$T_2 \subset Z$ ，其中 d 为邻居小区中心距离。

可以看出上述广义集合 T-coloring 模型的信道分配规则是对传统的集合 T-coloring 模型的修改和扩充，条件 1 为了维持小区内节点间的通信，可以保证邻居小区分配公共信道；条件 2 保证了互为邻居的几个小区要分配不同的公共信道以避免干扰；条件 3 保证了同频道再用距离内非邻居小区要分配不同信道；条件 4 保证了邻居小区除了分配的公共信道外，其余分配的信道要满足 T-coloring 信道分配约束，以避免网络干扰；条件 5 保证了同频道再用距离内非邻居小区分配的不同信道也要满足 T-coloring 信道分配约束。

假设一定的射频防卫度下同频道再用距离为 $3d$ ，图 6 给出了广义集合 T-coloring 模型下信道分配规则的一个简单举例，从本例中可以看出邻居小区

分配一个公共信道，邻居小区除了公共信道外其余分配的信道要符合 T-coloring 约束，此种情况下本例设定 $T = \{0,1\}$ ，而小区中心相距 $2d$ 的非邻居小区要分配不同的信道集合，且分配的信道也要满足 T-coloring 约束，此时设定 $T = \{0\}$ ，小区中心相距 $3d$ 的非邻居小区可以使用相同信道。

其次在小区业务强度不均匀时可采用小区分裂方式来提高网络容量以满足通信需求。上述信道分配模型保证了网络的连通性并有效控制了网络的无线干扰，如果网络中业务强度分布比较均匀，信道分配的效率会比较好；但实际上可能部分小区节点分布比较密集，其业务强度比较高，这些小区可能有较多的节点需要和邻居小区内的节点通信，如果按前面的信道分配规则对这些业务强度较高的小区分配和其它业务强度相对较低的小区按照相同规则分配信道，可能无法满足小区业务需求，也会影响信道分配的公平性和信道资源分配的有效性。而采用小区分裂的方式可以满足业务强度需求来提高网络容量，图 7 (a) 中中心部分几个小区节点分布比较密集，因此可采用小区分裂的方式使得小区面积缩小，这样原来的小区分裂为几个小区，分裂后所有小区具有比较均匀的业务强度。图 7 (b) 为小区分裂后的情况。

小区分裂后使得各个小区内业务强度比较均匀，然后再进行信道分配，在保持有效的网络连通性的同时，提高了网络容量，并且有利于提高频谱利用效率。原因在于小区分裂前的信道分配忽视了业务强度大的小区对信道的需求，并且不具有信道分配的公平性和有效性。而采用小区分裂后所有小区业务强度变得相对均匀，在满足信道分配公平性的同时，满足了原来高业务强度小区的信道需求，因此有效地提高了网络容量。

图 8 为信道分配算法的流程图，信道分配算法如下：

假设网络中划分小区后总能通过一定的小区分裂措施使各小区达到大致相等的业务强度，其小区总数为 N ，用 i 为每个小区编号， $1 \leq i \leq N$ ， $i=1, 2, \dots, N$ ，定义网络中总的可用信道为 $F = \{1, 2, \dots, \kappa\}$ ， $|F| = \kappa$ 。虚拟层次化后网络拓扑连接图用 $G(V, E)$ 表示， $|V| = N$ ，每个顶点 $v_i \in V$ 表示一个小区，如果两个小区为邻居小区就在他们之间连接一条边，定义对称矩阵 $M = \{e_{ij} : e \in E\}$ 表示图 G 的邻接矩阵，其每一行对应一个小区的连接情况。 $e_{ij} = 1$ 表示小区 i 和 j 为邻居小区，且 $e_{ij} = e_{ji}$ ，特殊情况下 $i = j$ 时， $e_{ii} = 0$ 。同时假设在一定的射频防卫度下非邻居小区间节点距离小于同频复用距离时，频率禁用集合为 T_1 ，而邻居小区除公共信道

外，其余分配的非公共信道的频率禁用集合为 T_2 ，且 $T_1 \subseteq T_2 \subset Z$ 。每个小区根据其业务强度其信道需求为集合 $R(v_i)$ ， $|R(v_i)| \leq \kappa$ 。定义邻居小区分配的公共信道个数为 S_{ij} ， $1 \leq S_{ij} < |R(v_i)|$ 且 $1 \leq S_{ij} < |R(v_j)|$ ，图 $G(V, E)$ 的每个节点 v_i 的度 $d(v_i)$ ， $d(v_i)$ 表示每个小区的邻居小区数目， $d(v_i)$ 等于邻接矩阵每行中值为 1 的元素数目。

用最小阶信道分配问题 (MO-CAP) 来分析基于集合 T-coloring 模型的信道分配方法时，定义用射频防卫度作为信道分配改进指标时优化信道分配后所用最少信道数 (最小阶) 用 $\chi_T(G)$ 表示。算法在满足 T-coloring 模型中信道分配规则的基础上要使用最少信道数优化信道分配，也就是使 $|F|$ 最小，其目标函数为：

$$\min |\bigcup_{v_i \in V} R(v_i)|$$

当网络中可用信道数目有限时，当小区数达到一定规模时进行信道分配会存在违反广义集合 T-coloring 约束条件的情况，可以用最小干扰信道分配问题 (MI-CAP) 来分析网络干扰。对于每个小区和每个可用信道，引入新的二进制变量 X_{vf} ：若信道 $f \in F$ 分配给了节点 v ，则 $X_{vf} = 1$ ，否则 $X_{vf} = 0$ 。同时引入代价函数 $\delta(|f - g|)$ ：当 $v_i, v_j \in V$ ， $v_i \neq v_j$ ， $f \in R(v_i)$ ， $g \in R(v_j)$ ， $d(v_i, v_j) < D$ ，且信道 f 和 g 违反广义集合 T-coloring 约束条件时 $\delta(|f - g|) = 1$ ，其它情况 $\delta(|f - g|) = 0$ 。则在可用信道资源有限时最小化网络时目标函数用整数线性规划可表示为：

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{f \in R(v), g \in R(v_j)} \delta(|f - g|)$$

$$s.t. \quad \sum_{f \in F} X_{vf} = R(v) \quad \forall v \in V$$

$$X_{vf} \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, f \in R(v)$$

$$1 + \delta(|f - g|) \leq X_{vf} + X_{wg} \quad \forall v_i, v_j \in V, v_i \neq v_j, f \in R(v_i), g \in R(v_j), d(v_i, v_j) < D$$

$$\delta(|f - g|) \in \{0, 1\} \quad \forall v_i, v_j \in V, v_i \neq v_j, f \in R(v_i), g \in R(v_j), d(v_i, v_j) < D$$

基于以上定义，信道分配算法要满足广义集合 T-coloring 成立的各项条件，现假设算法中邻居小区仅分配一个公共信道来维持网络连通性，分配多个公共信道时算法类似。算法的输入为网络中可用信道集合 F 、邻接图 M 、每个节点的度 $d(i)$ 以及频率禁用集合 T_1 和 T_2 。算法流程如下：

1、初始化每个小区信道分配集合 $R(v_i) = \emptyset$ ， $i = 1, 2, \dots, N$ 。从编号为 1 的小

区开始分配信道，根据图 G 每个节点 v_i 的度 $d(v_i)$ 给每个节点分配 $d(v_i)$ 数目的信道。分两种情况考虑：

A、若不考虑信道资源的受限性，只要信道分配合理总能满足相应的约束条件，则可视为最小阶信道分配问题。其分配规则为邻居小区间分配的信道要满足广义集合 T-coloring 的约束条件 1、2 和 4，同频道复用距离内的非邻居小区间满足规则 3 和 5。此过程采用优化算法使所用信道资源最少。当所有节点都分配有效信道后执行步骤 2；

B、信道资源受限情况下若违反一定的约束条件则认为存在网络干扰，此时可视为最小干扰信道分配问题，在某个节点无有效信道可用则运用贪心优化算法为该节点分配当前所用信道中对该节点产生干扰最小的信道。所有节点都分配信道后直接执行步骤 3。

2、若步骤 1 中的信道分配规则满足小区间的通信规则，则从编号为 1 的小区开始根据每个小区的信道需求 $R(v_i)$ 为每个小区分配 $(R(v_i)-d(v_i))$ 数量的信道以满足各个小区的信道需求。此时其分配规则要满足广义集合 T-coloring 的约束条件 3、4 和 5。同样信道资源受限情况下若不满足一定约束条件则认为存在网络干扰。此过程优化规则与步骤 1 相同。

3、统计信道分配后满足信道分配规则的情况下所用最少信道数和信道资源受限时网络干扰情况。由于步骤 1 和 2 均采用优化算法以保证所用信道资源最少或网络干扰最小，因此可认为统计后的信道数和网络干扰近似为所求优化值。

若不考虑网络中存在干扰的情况，从以上步骤可以看出，信道分配算法主要包括 2 个过程，第一个过程中步骤 1 使得邻居小区分配有效的公共信道资源，保证了网络的连通性，该过程可以看作是一个多重图的边着色问题。而第二个过程中步骤 2 可保证每个小区分配的信道数都满足了各个小区的业务需求，并满足对应的信道分配约束条件，有效地控制了网络干扰。

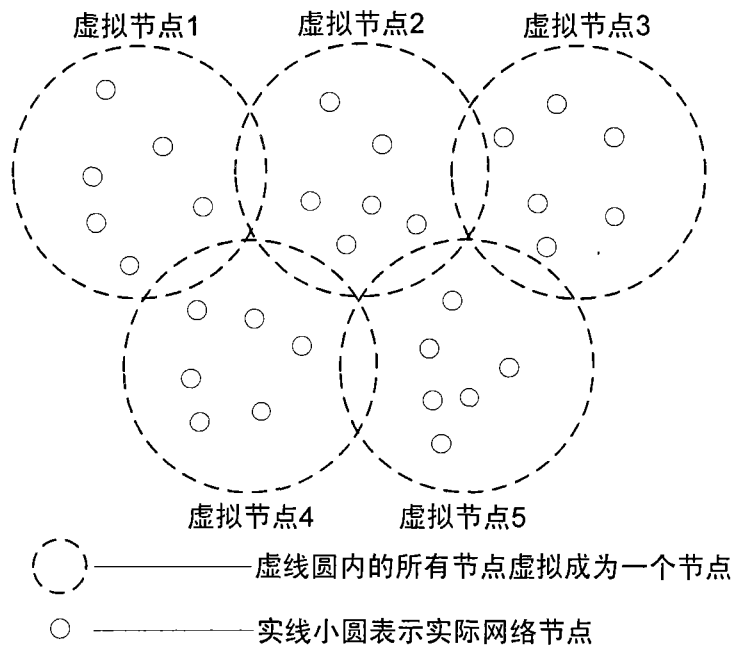


图 1

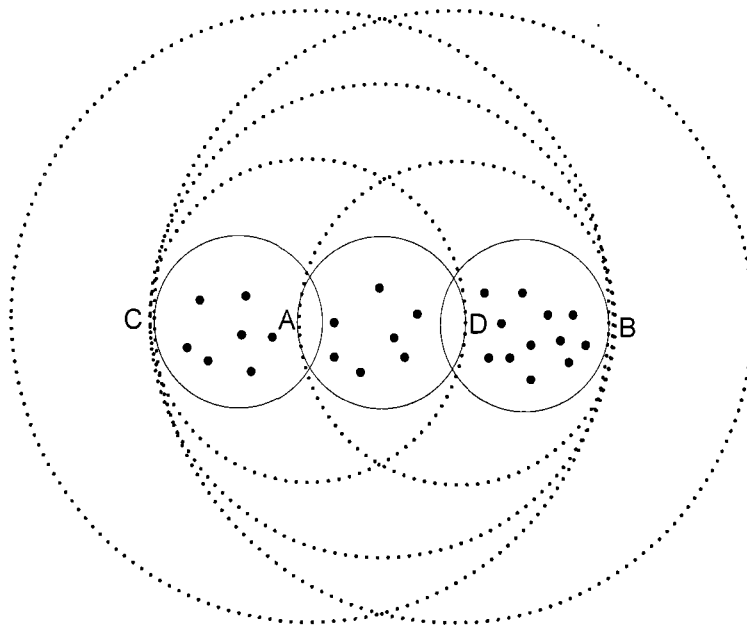


图 2

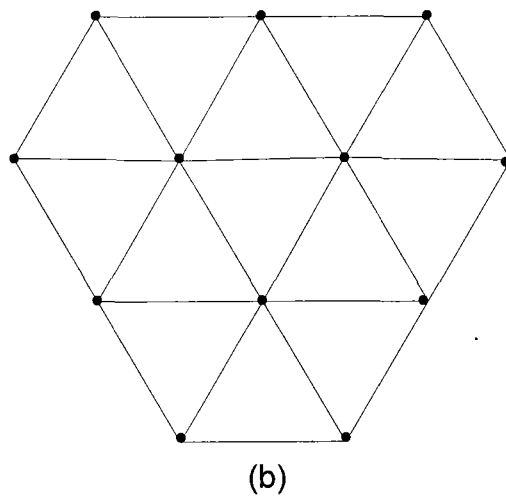
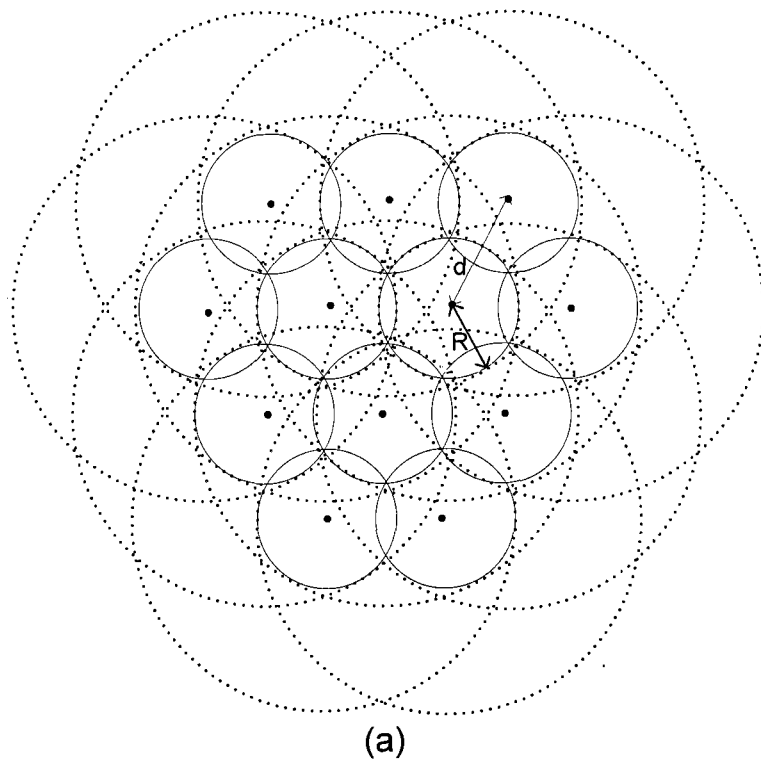


图 3

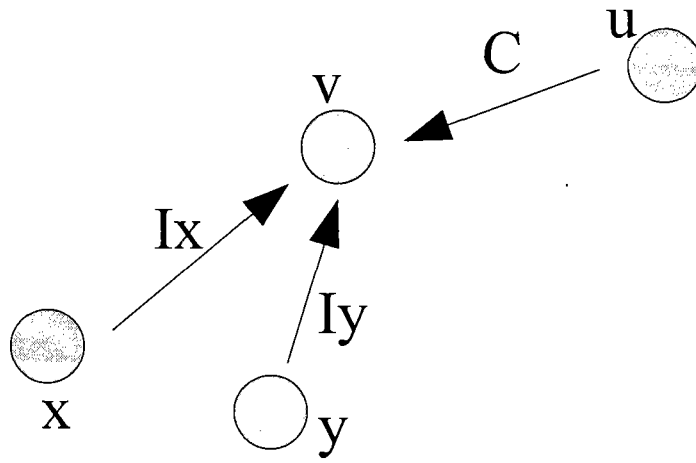


图 4

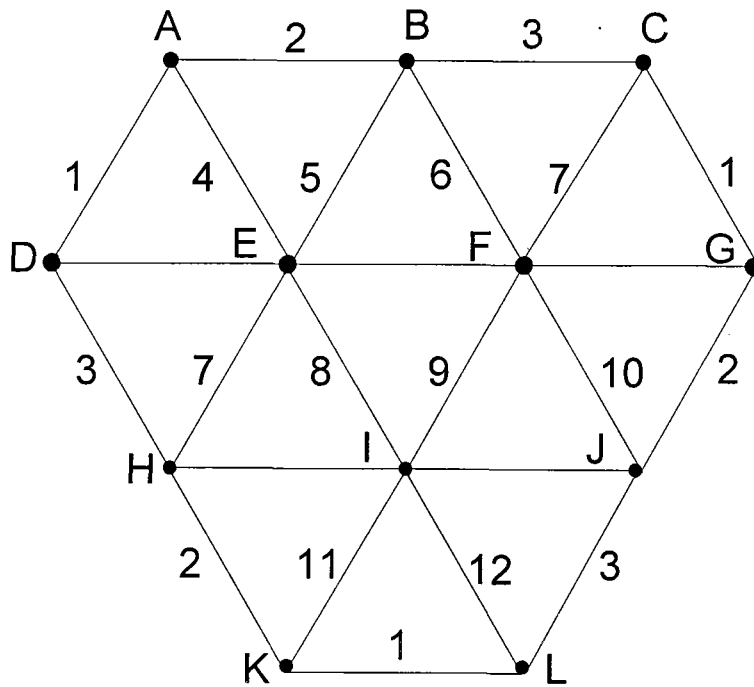


图 5

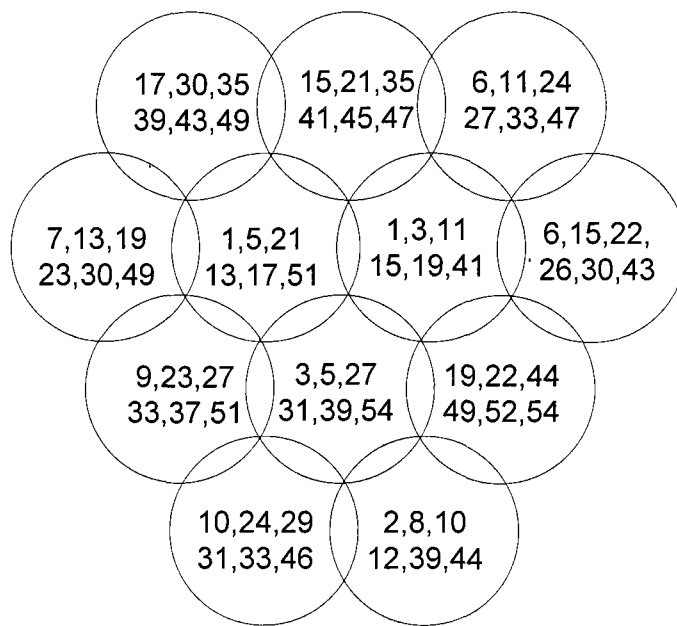
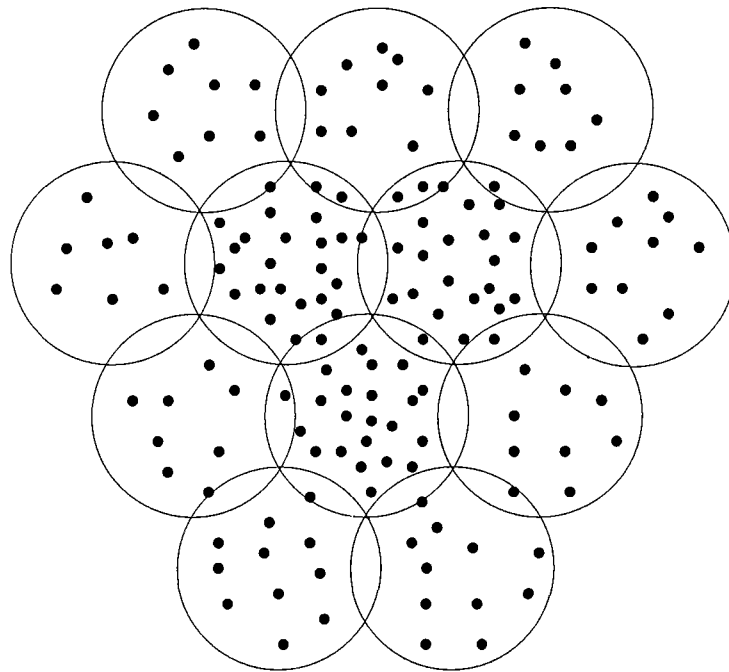
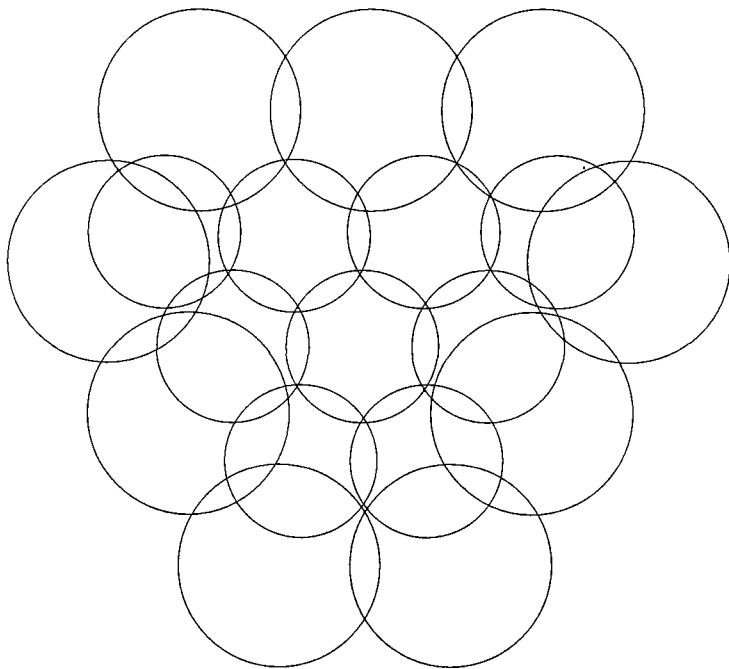


图 6



(a)业务强度不均匀时小区划分



(b)小区分裂

图 7

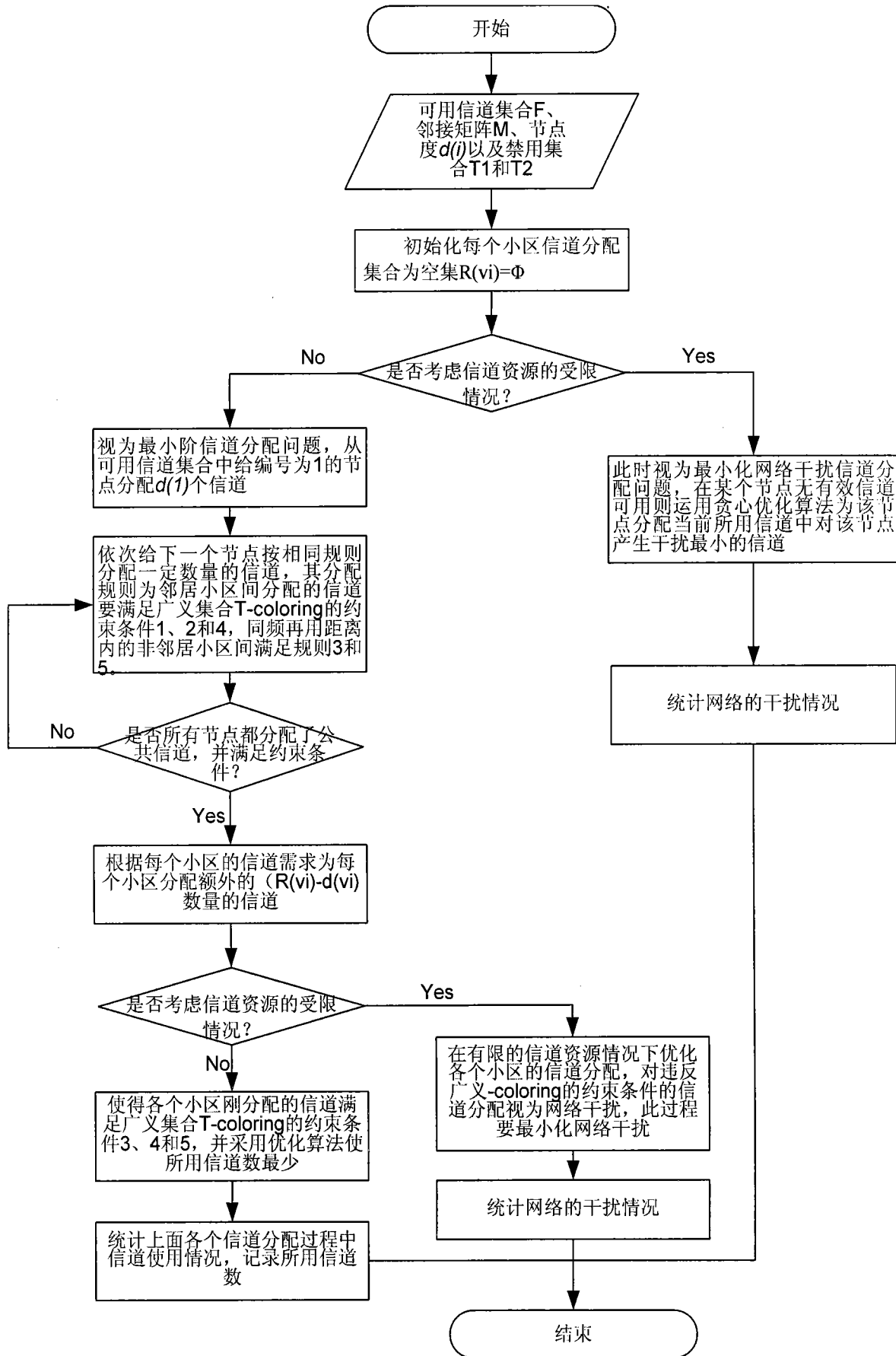


图 8