

认知无线 Mesh 网络中 QoS 约束的组播路由算法^{*}

邝祝芳^{1,2}, 陈志刚¹⁺

¹(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

²(中南林业科技大学 计算机与信息工程学院, 湖南 长沙 410004)

Multicast Routing Algorithm with QoS Constraints in Cognitive Wireless Mesh Networks

KUANG Zhu-Fang^{1,2}, CHEN Zhi-Gang¹⁺

¹(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

²(School of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

+ Corresponding author: E-mail: czg@csu.edu.cn

Kuang ZF, Chen ZG. Multicast routing algorithm with QoS constraints in cognitive wireless mesh networks. Journal of Software, 2012, 23(11): 3029-3044 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4210.htm>

Abstract: The problem of joining multicast routing and spectrum allocation with QoS constraints is studied in cognitive wireless mesh networks. A framework of solving the above problem, which contains a problem description, a representation of solution, fitness function, spectrum allocation algorithm, is proposed in this paper. Two algorithms for joint multicast routing and a spectrum allocation with end-to-end delay constraints based on intelligent computation are proposed in this paper. The first one is multicast routing and spectrum allocation algorithm based on genetic algorithm (GA-MRSA). The second one is multicast routing and spectrum allocation algorithm based on simulated annealing algorithm (SA-MRSA). The object of the two algorithms is to minimize the total channel conflict. Under the condition of getting lower total channel conflict number, the number of used channels is also few. Simulation results show that the two algorithms can achieve the expected goal: it can achieve a lower total channel conflict number.

Key words: cognitive wireless mesh network; multicast; spectrum allocation; genetic algorithm; simulated annealing

摘要: 对认知无线 Mesh 网络中满足 QoS 约束的联合组播路由及频谱分配问题进行研究,提出了一个针对该问题的求解框架,包括问题描述、解决方案的表示、适应度函数以及频谱分配算法。基于两种具有代表性的智能计算方法:遗传算法、模拟退火,提出了两种满足端到端延迟约束的组播路由及频谱分配算法 GA-MRSA 和 SA-MRSA。这两种算法追求的目标是最小化组播树信道冲突总数,并且在获得较低的信道冲突数的情况下,还能占用较少的信道。仿真结果表明,所提出的两种算法能够达到预期目标,获得较低的信道冲突总数。

关键词: 认知无线 Mesh 网络;组播;频谱分配;遗传算法;模拟退火

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* 基金项目: 国家自然科学基金(61073186, 60873082)

收稿时间: 2011-04-21; 修改时间: 2011-12-30; 定稿时间: 2012-03-23

频谱(信道)是一种宝贵的、有限的不可再生资源,随着无线用户的不断增多以及接入业务的日益增长,可分配的频谱资源越来越少,而全球授权频段,尤其是信号传播特性比较好的低频段,频谱利用率并不高^[1].2005年,DARPA XG 和 NSF 完成了一项频谱占用情况的调查,结果显示,3GHz 以下的频谱时空利用率低于 10%.该矛盾引起了业界的广泛关注,政策制定者与工业界、科研单位均提出了各种构想和解决方案.1999年,Mitola 博士首次提出了认知无线电的概念,其最核心的功能是,能对频谱环境进行感知,并且有效地进行频谱资源的分配和共享^[2,3],具体体现在次用户(secondary user,简称 SU)在不干扰主用户(primary user,简称 PU)的前提下抓住机会使用这些 PU 没有使用的频谱空穴.

无线 Mesh 网络作为下一代宽带接入系统^[4],将认知无线电技术应用于无线 Mesh 网络中解决其频谱缺乏的问题具有潜在的优势.在认知无线 Mesh 网络(cognitive wireless mesh network,简称 CWMN)中,每个 Mesh 节点(包括 Mesh 路由器、Mesh 网关、Mesh 终端)使用 CR 技术^[5].对于一个配备 CR 的 Mesh 节点(CR-Mesh 路由器、CR-Mesh 网关、CR-Mesh 终端统称 CR-Mesh 节点),它能够感知 PU 未使用的频谱,并动态地接入到这些可用的频谱.本文不考虑具体的频谱感知算法,主要研究 CR-Mesh 节点已经获得可用信道以及相关息条件下的 QoS 约束的组播路由及频谱分配问题.CWMN 仍然处于早期的研究中,因而面临着许多开放性的挑战.经查阅相关文献,目前,针对认知无线 Mesh 网络中满足 QoS 约束的组播路由及频谱分配算法还未见报道.对组播业务而言,端到端延迟是一种非常重要的 QoS 约束,本文的 QoS 约束指的是端到端延迟.

本文研究的对象是由 CR-Mesh 路由器以及 CR-Mesh 网关组成的骨干网,研究的问题是 CR-Mesh 节点满足 QoS 约束的组播路由及频谱分配问题,提出了基于智能计算的问题求解框架,并且分别提出了基于遗传算法及模拟退火算法的两个满足端到端延迟约束的组播路由及频谱分配算法.

本文第 1 节简要介绍认知无线 Mesh 网络路由及频谱(信道)分配方面的相关工作.第 2 节首先建立认知无线 Mesh 网络的模型,然后对本文的问题进行描述.第 3 节提出基于智能计算的问题求解框架.第 4 节和第 5 节分别提出遗传算法及模拟退火算法的两个满足 QoS 约束的组播路由及频谱分配算法.第 6 节是详细的性能仿真及结果分析.第 7 节是全文总结及下一步工作.

1 相关工作

组播作为一种能够有效节省网络资源的通信服务,一直是无线 Mesh 网络中的重要研究领域,近年来取得了一些研究成果^[6].Zeng^[7]提出了一种分层的组播和信道分配算法 LCA,LCA 包含两个部分:1) 基于 BFS 的组播树的构造;2) 基于组播树的信道分配.LCA 将组播路由与信道分配分割为两个相互独立的部分.信道分配也一直是无线 Mesh 网络的研究重点,并且已经被证明是 NP 完全的,同时也取得了一些研究成果^[8-11].

但是,这些无线 Mesh 网络中针对组播及信道分配的研究成果不能直接应用于认知无线 Mesh 网络中,认知无线 Mesh 网络中的组播及信道分配有以下几个主要特点:

- 1) 无线 Mesh 网络中的组播协议是工作在固定信道,且信道的通信状态已知的环境中,认知无线 Mesh 网络的组播协议是工作在信道动态变化的环境中.
- 2) CR-Mesh 节点使用信道必须保证不对 PU 产生干扰.
- 3) 认知无线 Mesh 网络中的可用信道是无线环境中所有信道的一个子集,且该子集是动态变化的.
- 4) 认知无线 Mesh 网络中的可用信道具有异构性,即这些可用信道的使用概率一般情况下是不同的.

CWMN 目前还处于研究的早期阶段,因而面临着许多开放性的挑战^[12].针对 CWMN 的路由问题,取得了一些研究成果^[13-25].

Pei^[13]提出了一个认知无线 Mesh 网络中改进的分层 AODV 路由协议.Sun^[14]提出了一个基于经典 AODV 协议的 AODV-COG 路由协议,AODV-COG 有效地利用了动态频谱来提高认知无线 Mesh 网络的吞吐量,在路由路径跳数一定的情况下,可以找到一条吞吐量高的路由路径.Amini^[15]针对认知无线 Mesh 网络中处理主用户行为动态性的自适应路由与信道管理问题,提出了一个经济学的框架进行路由和信道分配,其目的是优化网络效益.Yong^[16]研究了多源的视频点播问题,即在认知无线 Mesh 网络中存在多个视频源,某个终端用户给定点播要

求的情况下,以最小化每个会话消耗总带宽为目标,每个会话消耗的总带宽越小,同时会话的数目则越大.针对该问题提出一种联合多路径路由及频谱分配的算法.Dong^[17]针对认知无线 Mesh 网络与其他认知无线网络共存的网络环境,为使各种认知无线网络能够很好地共存,提出了认知无线 Mesh 网络中以最小化占用的信道数量为目标的路由及频谱分配算法.Zhang^[18]提出了一种联合路由的分布式信道分配策略.该信道分配策略主要宗旨是维持领域内信道差异,优化的性能指标是平均吞吐量和平均延迟.Gu^[19]提出了一种认知无线 Mesh 网络中联合多路径路由及信道分配的策略.该策略根据所选路径情况设置交叉节点的中继功能,并且以主用户曾经占用每个信道的最少次数作为衡量标准来选择信道,优化的性能指标是平均吞吐量和平均延时.Li^[20]提出了一个认知无线 Mesh 网络环境下的动态分层图路由模型,利用两状态离散时间马尔可夫链建模节点感知范围内的信道可用性,建立认知无线电 Mesh 网络拓扑和连通性的动态模型.Hicham^[21]根据 PU 的活动规律以及其所处的位置,选择满足无线业务概率最高的路径作为源点到目的节点的路径.Lei^[22]提出了一种跨层的机会频谱接入与动态路由算法 ROSA,其目标是最大化网络吞吐量.Kuang^[23]提出了一种自适应的满足 QoS 约束的路由与频谱分配算法 SA2JR,SA2JR 的目标是:在满足无线业务 QoS 约束的情况下最大化无线业务接受率,让尽可能多的无线业务需求能够得到满足.

Almasaeid 等人^[24]针对认知无线 Mesh 网络中一个组播组中的成员具有可用信道的异构性,每一个目的节点成功接收来自组播源节点数据总时间比较长的问题,提出了一种基于目的节点辅助的组播算法,其目标是减少组播总时间.在文献[25]中,Almasaeid 等人针对 CR-Mesh 路由器节点拥有可用信道的异构性,由于主用户不定期地出现占用信道,CR-Mesh 路由器节点不得不切换信道带来的延迟等问题,以降低端到端延迟为目标,提出了一种基于动态规划的认知无线 Mesh 网络组播路由算法 OMRA.Gao^[26]研究了多跳认知无线 Ad-Hoc 网络中的组播问题,其目标是最小化需要的网络资源,建模该问题为混合整数线性规划问题,并提出一种多项式时间算法来求解该问题.Guo^[27]提出了一种基于信任机制的安全的最小化能量消耗组播算法 SMEM.Chen^[28]提出了一种认知 Ad-Hoc 网络中以最大化组播树生存时间为目标的组播路由算法 GCM.

本文的创新点在于:

- 1) 提出了一个针对认知无线 Mesh 网络中满足 QoS 约束的联合组播路由及频谱分配的问题求解框架,其中包括问题描述、解决方案的表示、适应度函数、以及频谱分配算法.
- 2) 基于两个具有代表性的智能计算方法:遗传算法、模拟退火,分别提出了两个满足端到端延迟约束的组播路由及频谱分配算法.这两种算法追求的目标是最小化组播树冲突边总数,并且在获得较低的信道冲突数的情况下,还能占用较少的信道.

2 网络模型与问题描述

2.1 网络模型

假设在一个 $X \times Y$ 的区域中存在一些次用户 SU,包括 CR-Mesh 路由器和 CR-Mesh 网关节点,我们将静止的 CR-Mesh 路由器和 CR-Mesh 网关组成的认知无线 Mesh 网络建模为一个简单无向图 $G=(V,E)$,其中, V 表示 CR-Mesh 路由器和 CR-Mesh 网关的集合, E 表示链接两个能够相互通信的 CR-Mesh 路由器的无线链路的集合. $K=\{1,2,\dots,k\}$ 表示总的可用信道的集合,每个节点 $v_i \in V$ 都有一个感知的可用信道集合 K_i , I_i 表示节点 v_i 可用的认知射频接口数. $K_{i,j}$ 节点 v_i 和节点 v_j 公共可用信道集合.每个节点 $v_i \in V$ 均存在一个通信距离 T_R 和一个干扰距离 I_R .一般情况下有 $3T_R > I_R > T_R$,本文假设 $I_R = 2T_R$.

d_{ij} 表示节点 v_i 和节点 v_j 之间的物理距离. $N(v_i) = \{v_j | v_j \in V \ \&\& \ d_{ij} < T_R\}$, $N(v_i)$ 表示节点 v_i 的邻居节点集合.我们假设所有节点采用半双工方式工作.两个 CR-Mesh 节点能够相互通信必须满足以下条件:

- ① 具有相同的可用信道,即 $K_i \cap K_j \neq \emptyset$;
- ② 有空闲的认知射频接口可供分配;
- ③ 满足通信距离的约束,即 $d_{ij} < T_R$.

e_{ij} 表示无线链路 (v_i, v_j) , $X = x(e_{ij})$ 表示信道分配方案,其中, $x(e_{ij})$ 表示节点 v_i 和节点 v_j 之间的无线链路 e_{ij} 的信道

分配值,如果信道 k 分配给 e_{ij} ,则记为 $x(e_{ij})=k$;如果无线链路 e_{ij} 没有分配任何信道,则 $x(e_{ij})=0$.

如果无线链路 (v_a, v_b) 和 (v_c, v_d) 使用相同信道,即 $x(e_{ab})=x(e_{cd})$,并且 $d_{ac} < I_R$ 或者 $d_{ad} < I_R$ 或者 $d_{bc} < I_R$ 或者 $d_{bd} < I_R$, 则无线链路 e_{ab} 与 e_{cd} 相冲突,即 $IE(e_{ab}, e_{cd})=1$.

D^k 表示信道 $k(k \in K, k \geq 1)$ 的延迟,单位为 ms,由于不同的信道通常具有不同的延迟,因此对于不同的信道 i 和 $j, D^i \neq D^j$.

为了更好地描述 CWMN 的网络模型,我们给出了一个简单的网络拓扑示例,如图 1 所示,分布 13 个 CR-Mesh 路由器,当前网络环境中 5 个可用信道,即 $K=\{1,2,3,4,5\}$.图中 $CR_MR4\{2,3,4,5\}/2$ 表示 CR_MR4 的可用信道为 $\{2,3,4,5\}$,可用射频接口数为 2.即 $K_4=4, I_4=2$.

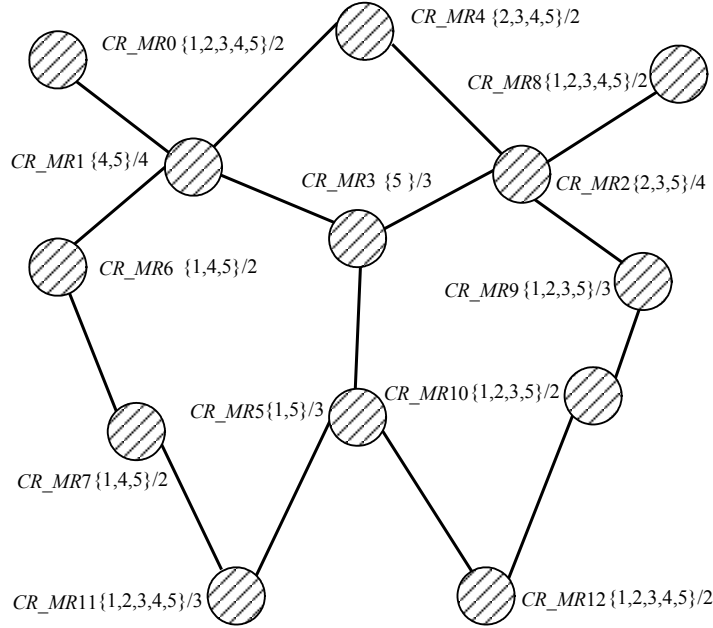


Fig.1 Cognitive wireless mesh network model
图 1 认知无线 Mesh 网络模型

2.2 问题描述

我们研究认知无线 Mesh 网络中满足 QoS 约束的联合组播路由及频谱分配问题,意思是在构造组播树的同时,不仅考虑 QoS 约束,而且联合考虑组播路由及频谱分配.联合考虑组播路由及频谱分配的原因是,假设极端情况下,当构建好一棵组播树之后,在该组播树中任意两个节点之间的无线链路没有任何可用的信道,从而导致组播业务无法进行.基于此情况,我们需要联合考虑组播路由及频谱分配.本文追求的目标是最小化信道冲突总数.信道冲突总数表示冲突的无线链路对的总数量.

假设 S 表示组播源节点. $R=\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 表示组播目的节点集合. $T=(V_T, E_T)$ 表示组播树, $P_T(S, r_i)$ 表示组播树 T 中一条从 S 到 r_i 的路径, d_L 表示无线链路 L 上的延迟, $I(T)$ 表示组播树 T 中信道冲突总数.

本文研究的问题可以描述为:在认知无线 Mesh 网络中,给定延迟上界 D 、一个源节点 S 、一个组播目的节点集合 R ,构造一棵满足延迟上界约束的组播树 T ,并且给每一条无线链路分配一个可用信道,目标是最小化组播树中的信道冲突总数 $I(T)$.形式化描述如公式(1)所示.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } I(T) \\
 & I(T) = \sum_{e_{ab}, e_{cd} \in E_T} 1\{IE(e_{ab}, e_{cd}) = 1\} \\
 & \text{s.t. } \text{Max}_{r_i \in R} \left\{ \sum_{L \in P_T(s, r_i)} d_L \right\} \leq D
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中, $1\{\cdot\}$ 是条件函数, 判断是否为真. 除了最小化信道冲突总数之外, 我们希望进一步优化系统资源的使用. 假设在多种认知无线网络共存的环境中, 我们希望在 CWMN 构造的组播树具有最小信道冲突数的同时, 最小化占用的信道数, 这样可以让更多其他认知无线网络有更多的可用信道.

信道 k 被 CWMN 占用的含义是, 只要信道 k 在 CWMN 中被分配任意一条无线链路, 即表示信道 k 被 CWMN 占用. θ^k 表示信道 k 是否被 CWMN 占用, 如果 $\sum_{e_{ij} \in E_T} 1\{x(e_{ij}) = k\} > 0$, 则 $\theta^k = 1$; 反之, $\theta^k = 0$. CWMN 占用的信道总数记为 $\sum_{k \in K} \theta^k$. 如果构造的多个组播树具有相同的信道冲突总数, 则我们将选择具有最小占用信道数的组播树.

3 问题求解框架

问题求解框架是本文提出的两种算法的公共部分, 主要包括问题描述、解决方案描述、适应度函数、频谱分配算法, 其中, 问题描述已在第 2.2 节描述.

3.1 解决方案描述

解决方案实际上是一棵组播树 T , 如图 2 所示. 采用一组表示节点编号的整数表示从源点 S 到目的节点 r_i 的路由路径, 第 1 个整数表示源点, 最后一个整数表示目的节点. 到每一个目的节点的路由路径长度不会超过 $|V|$, V 为认知无线 Mesh 网络中的节点集合.

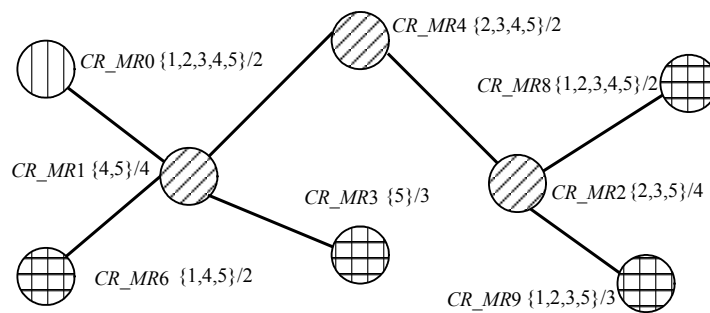


Fig.2 Multicast tree
图 2 组播树

图 2 所示的组播树的解决方案描述见表 1. 用二维数组 A 描述解决方案. 每一行为一条到达某一个目的节点的路由路径. A 共有 $|R|$ 行, R 为目的节点集合. 假设 CR-MR0 为源点 S , 用编号 0 表示, 假设 CR-MR3, CR-MR6, CR-MR8, CR-MR9 为目的节点, 分别用编号 3, 6, 8, 9 表示. 所有解决方案必须满足延迟约束, 如果到某个目的节点的路径不满足延迟约束, 则重复进行组播树的构造, 直到产生满足延迟约束的组播树.

Table 1 Representation of solution

表 1 解决方案描述

0	1	3		
0	1	6		
0	1	4	2	8
0	1	4	2	9

3.2 适应度函数

对于每一个解决方案,我们通过计算其适应度值来评价其质量.我们的目标是:构造一棵具有最小信道冲突总数的组播树,并且在获得较低的信道冲突数的情况下还能占用比较少的信道.我们的首要目标是信道冲突总数,其次是占用的信道数.即,如果构造的多个组播树具有相同的信道冲突总数,则选择占用信道数最小的组播树作为我们的解.我们把每一个构造的组播树看作染色体 Ch_i ,适应度函数的定义如公式(2)所示.

$$F(Ch_i) = \frac{1}{(I(T) + 1.0)} \quad (2)$$

在上述适应度函数中只包括了信道冲突总数,占用最小信道数的目标是通过在选择具有相同的信道冲突总数的组播树中体现的.

3.3 频谱分配算法

在产生组播树之后就进行频谱分配,一旦频谱分配完毕,我们就可以获得组播树中信道冲突总数以及组播树占用的信道数.由于在组播树构造的适应度函数中考虑了信道冲突总数,因此在信道分配的过程中,我们仅考虑占用尽可能少的信道这个目标.由于每个节点拥有的射频数不一样,因此,分配给节点的信道数还必须满足节点的射频约束,如公式(3)所示.

$$\sum_{v_i \in V} 1\{x(e_{ij})\} + \sum_{v_j \in V} 1\{x(e_{ji})\} < I_i \quad (3)$$

前面已经提到信道分配问题是 NP 完全的.遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法^[29],能够有效地求得 NP 问题的近似解.因此,提出基于遗传算法的频谱分配算法 GASA.GASA 算法包括编码表示、种群初始化、适应度函数、选择、杂交、变异操作.

3.3.1 编码表示

使用长度为 $n(n=|E_T|, E_T$ 表示组播树的边集)的 $k+1$ 进制串表示一个染色体,代表着一个信道分配方案,我们给组播树 T 中 n 条边从 1 到 n 进行编号,编码表示为 $X=x_1, x_2, \dots, x_n, x_i \in \{0\} \cup K, i \in \{1, 2, \dots, n\}$.在染色体中,如果 $x_i=0$,则表示组播树中编号为 i 的边没有分配任何信道;如果 $x_i=k, k \in K$,则说明编号为 i 的边分配的信道为 k .

3.3.2 初始种群的生成

我们随机生成初始种群,假设种群数为 N ,种群中染色体 j 表示为 $C_j=c_1(j)c_2(j)\dots c_n(j)$,其中, n 为组播树的边数, $c_i(j) \in \{0\} \cup K, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, N\}, N$ 为种群中的染色体总数.

3.3.3 适应度函数

在遗传算法中,适应度函数是用来衡量种群中染色体优劣的标准.它将直接反映染色体的性能,性能好的染色体适应度函数值大,性能差的适应度函数值小.根据适应度函数值的大小,决定某些染色体是繁殖还是消亡.

我们在信道分配算法中追求的目标是占用尽可能少的信道,因此我们定义频谱分配算法的适应度函数如公式(4)所示. $f(C_j)$ 值越大,表明染色体 C_j 越好,占用的信道数越少.

$$f(C_j) = |K| - \sum_{k \in K} \theta^k \quad (4)$$

3.3.4 选择、交叉和变异操作

选择操作主要采用基于适应值比例的策略.首先,根据适应度函数计算出染色体的适应值;然后,采用择优策略,将适应值最高的个体直接保留到子代种群中;最后,根据各染色体的适应值,按公式(5)计算出其相对适应值,作为该染色体的选择概率.公式(5)中, $f(C_j)$ 表示染色体 j 的适应值, N 为群体规模.

$$p(C_j) = \frac{f(C_j)}{\sum_{i=1}^N f(C_i)} \quad (5)$$

交叉操作主要是从群体集合中随机选择两个染色体 C_i 和 C_j ,在染色体的 n 位中,随机选择某个位置作为交叉点,比如选择 $pos=n-1$ 的交叉过程见表 2.

Table 2 Chromosomes C_i and C_j crossover at $n-1$
表 2 染色体 C_i 和 C_j 从 $n-1$ 开始交叉

染色体	交叉前					交叉后				
C_i	1	2	...	$n-1$	n	1	2	...	$n-1$	n
	2	1	...	3	2	1	2	...	2	3
C_j	1	2	...	$n-1$	n	1	2	...	$n-1$	n
	1	4	...	2	3	1	4	...	3	2

对染色体 C_j 的变异操作,主要是对组播树中某条边分配的信道值进行修改.假设染色体 j 表示为 $C_j=c_1(j)c_2(j)\dots c_n(j)$,其中, $c_i(j)=3$ 表示组播树中第 i 条边分配的信道为 3,并且第 i 条边连接的两个节点为 v_a 和 v_b , $K_{a,b}$ 为节点 v_a 和节点 v_b 相同的可用信道集合.变异操作如算法 1 所示.

算法 1. 变异操作.

输入:染色体 C_j .

输出:变异之后的染色体 C_j .

1. do {
2. $i=random(n)$;
//第 i 条边连接的两个节点为 v_a 和 v_b
3. $newC=random(K_{a,b})$;
4. if ($newC \neq c_i(j)$) {
5. $c_i(j)=newC$;
6. break; }
7. while (True);

3.3.5 GASA 算法描述

算法 2. 基于 GA 的频谱分配算法 GASA.

输入:种群数为 N ,遗传代数 Gen .

输出:分配方案 X .

//初始化种群

1. For ($j=0; j \leq N; j++$) {
2. $C_j \leftarrow \emptyset$;
3. For ($i=0; i \leq n; i++$) {
//第 i 条边连接的两个节点为 v_a 和 v_b
4. $c_i(j)=random(K_{a,b})$;
5. $C_j=C_j \cup c_i(j)$;
6. }
7. }

//计算最优频谱分配方案

8. For ($i=1; i \leq Gen; i++$) { i 表示第 i 代遗传
9. 计算 $f(C_j) = |K| - \sum_{k \in K} \theta^k$;
10. 计算相对适应度值 $p(C_j)$;
满足公式(3)的约束,且 $p(C_j)$ 较高的选择作为下一代;
进行交叉、变异操作;
11. }

4 GA-MRSA 算法

本节描述基于遗传算法的满足 QoS 约束的联合组播路由及频谱分配算法 GA-MRSA,包含的重要组成部分:基因表达式、初始化种群、选择、交叉和变异操作.基因表达式即染色体,我们采用候选的组播树表示.初始化种群的目的是产生一组能够体现物种多样性的候选组播树.适应度函数计算候选组播树中信道冲突总数,第 3.2 节已经描述.选择操作从群体中选择优胜的组播树,淘汰劣质的组播树,交叉操作把两个父代组播树的部分结构加以替换重组而生成新组播树.变异操作对候选组播树中的某个组播树的某些节点作变动.

4.1 初始化种群

一种通用的体现种群多样性的初始化种群方法是采用随机的方法,对于每一个染色体,所有路由路径都随机产生.比如,我们随机产生一条从源节点 S 到目的节点 $r_i \in R$ 的路由路径:首先,我们从 S 的邻居节点集合 $N(S)$ 中随机选择一个节点 v_1 作为下一跳;然后,再从 $N(v_1)$ 中随机选择一个节点 v_2 作为 v_1 的下一跳.重复此过程,直到下一跳到达 v_i .这样,我们得到一条从源节点 S 到目的节点 $r_i \in R$ 的路由路径 $P_T(S, r_i) = \{S, r_1, r_2, \dots, r_i\}$.我们产生的组播树中不允许产生环,因此,在随机产生路由路径时,确保产生的组播树不包含环.

为使我们的算法能够尽快地收敛,在初始化种群时,我们还通过分别使用 LCA 组播算法和最短路径 SPT 组播算法产生两棵候选组播树.初始化种群算法如算法 3 所示.

算法 3. 初始化种群.

输入:种群个体数 q ,源节点 S ,目的节点集合 R .

输出:候选组播树集合 $Q = \{Ch_0, Ch_1, \dots, Ch_{q-1}\}$.

1. for ($i=0; i < q-2; i++$) do {
2. $Ch_i = \emptyset; V_T = \emptyset; E_T = \emptyset;$
3. for ($j=0; j < |R|; j++$) {
4. 随机产生一条 S 到 r_j 的路径 $P_T(S, r_j)$;
5. 更新 Ch_i, V_T, E_T ,并保证 $Ch_i \cup P_T(S, r_j)$ 是一个无环图;
5. }
6. }
7. 使用 LCA 组播树构造算法产生种群 Ch_{q-2} ;
8. 使用 SPT 组播树构造算法产生种群 Ch_{q-1} ;

4.2 选择、交叉与变异操作

选择操作相对比较简单,建立在种群中组播树的适应度评估基础上,优化的候选组播树直接遗传到下一代.

交叉操作把两个父代组播树的部分结构加以替换重组而生成新的组播树,具有提高遗传算法搜索全局最优解的能力.变异操作具有使遗传算法跳出局部最优解的能力.

对组播树的交叉操作是这样进行的:在两棵组播树 Ch_i 和 Ch_j 中到达同一个目的节点 r_k 的两条路由路径中,假设存在一个相同的节点 v ,即,在组播树 Ch_i 中, $P_T(S, r_k)$ 可以看作 $S \xrightarrow{Ch_i} v$ 和 $v \xrightarrow{Ch_i} r_k$ 两段路径;在组播树 Ch_j 中, $P_T(S, r_k)$ 可以看作 $S \xrightarrow{Ch_j} v$ 和 $v \xrightarrow{Ch_j} r_k$ 两段路径.交叉操作即在两棵组播树 Ch_i 和 Ch_j 中交换 $v \xrightarrow{Ch_i} r_k$ 和 $v \xrightarrow{Ch_j} r_k$.图 3 所示为交叉操作,节点 CR_MR11 为目的节点,节点 CR_MR1 为两条路径相同的节点,交叉的路径是 $1 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 11$ 和 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 11$.

在给定变异概率的情况下,我们从组播树 Ch_i 中随机选择目的节点 r_k ,从源点 S 到目的节点 r_k 的路径 $S \xrightarrow{Ch_i} v$ 中随机选择一个节点 v ,随机产生从节点 v 到 r_k 的路径替换原来的从节点 v 到 r_k 的路径.

上述交叉和变异操作都有可能产生含有环的组播树,因此,在每次交叉和变异操作之后都应该进行检测,如果检测出环,则进行修复,直到组播树中没有环为止.

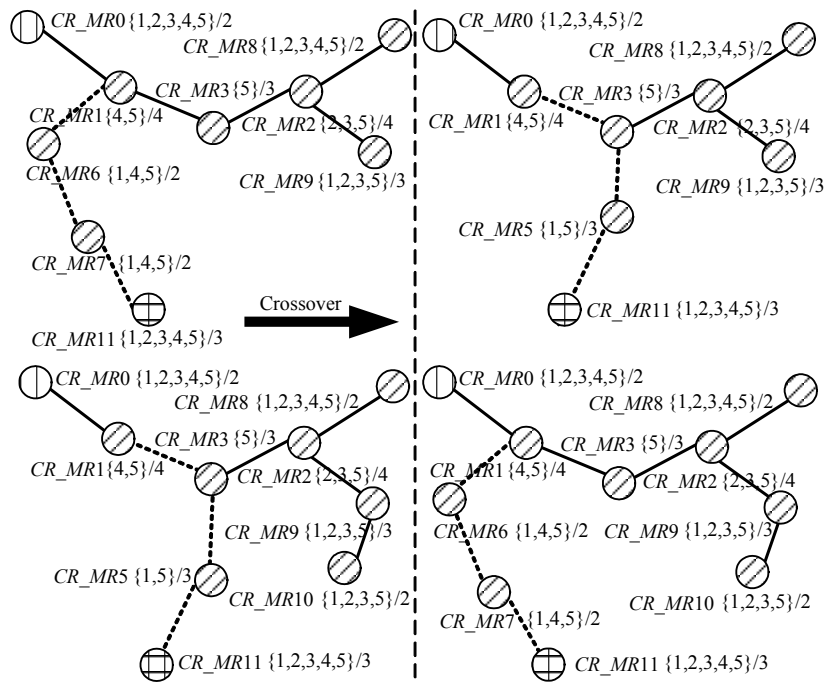


Fig.3 Crossover operation example

图 3 交叉操作示例

5 SA-MRSA 算法

模拟退火(simulated annealing,简称 SA)算法是一种通用概率算法,能够在较大的搜寻空间内找寻问题的最优解^[30].模拟退火算法将搜索空间中的每一点想象成空气中的一个分子;空气中的分子是具有能量的;而搜索空间中的每一点,也像空气中的分子一样带有能量,表示该点对问题的合适程度.

本节描述基于模拟退火算法,满足 QoS 约束的联合组播路由及频谱分配算法 SA-MRSA.模拟退火算法包含几个主要组成部分:初始化解决方案、邻居结构构造方法、初始温度及温度下降公式、温度值迭代次数、终止条件.SA-MRSA 的目标是第 3.2 节提出的适应度函数,即信道冲突总数.我们采用适应度值表示能量,从很高的能量开始进行搜索,在温度降低的过程中,退火过程试图找到最优的解决方案,即最优组播树.当温度降低到某一个值,并且当前最优值保持不变时算法终止,并且输出当前最优值为最优解决方案.

5.1 初始化解决方案

为了尽快获得最优解决方案,我们使用 LCA 组播算法和最短路径 SPT 组播算法初始化解决方案,分别计算 LCA 和 SPT 构造的组播树信道冲突总数,以这两棵组播树中具有较少信道冲突总数的组播树作为我们的初始解决方案 Q .初始化解决方案如算法 4 所示.

算法 4. 初始化解决方案.

输入:网络拓扑图 G .

输出:最优解决方案 Q .

1. $T_1=LCA$ Multicast Tree;
2. $T_2=SPT$ Multicast Tree;
3. $t_1=I(T_1)$;
4. $t_2=I(T_2)$;

5. if $t_1 < t_2$
6. $Q = T_1$;
7. else
8. $Q = T_2$;

5.2 邻居结构构造方法

在模拟退火算法中,解决方案的临近解决方案,即邻居结构,构成了问题候选解的集合.因此,采用某个候选解决方案时,我们需要计算其邻居结构.本文中,我们提出了两种构造邻居结构的方法:

- (1) 细粒度构造方法.首先,从目的节点集合 R 中随机选择一个目的节点 $r_i \in R$,然后,在路径 $P_T(S, r_i)$ 上随机选择一个节点 v ,随机产生一条到 $r_i \in R$ 的子路径替换 $v \rightarrow r_i$.
- (2) 粗粒度构造方法.首先,从目的节点集合 R 中随机选择两个目的节点 $r_i \in R$ 与 $r_j \in R$,然后,在路径 $P_T(S, r_i)$ 与 $P_T(S, r_j)$ 上随机选择两个节点 v' 与 v'' ,随机产生两条分别到 $r_i \in R$ 与 $r_j \in R$ 的子路径替换 $v' \rightarrow r_i$ 与 $v'' \rightarrow r_j$.

任何一个解决方案的邻居结构构造方法都采用上述两种方法中的一种.图 4 所示为采用细粒度构造方法作用于某一个解决方案的过程.一条新的子路径 $1 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 11$ 替换路径 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 11$,得到了一个新的解决方案.

在温度降低的过程中,前半段时间我们采用粗粒度邻居结构构造方法,后半段时间我们采用细粒度邻居结构构造方法.这样,我们不仅保证了从理论上找到最优值,而且加快了收敛的速度.

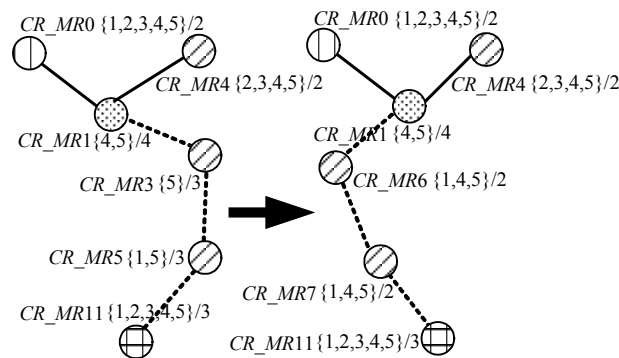


Fig.4 Construction of neighbor structure

图 4 邻居结构构造方法

5.3 初始温度及温度下降公式

设置一个比较合理的初始温度值,可以减少搜索时间.我们设置初始温度 $T_0=500$.温度下降公式如公式(6)所示.

$$T_{k+1} = \alpha \times T_k \quad (0 \leq k, 0 < \alpha < 1) \quad (6)$$

其中, α 表示温度下降系数.

5.4 温度值迭代次数

在我们的算法中,退火过程在每一个温度值的迭代次数,正比于到目前为止温度降低的次数.我们使用 L_i 表示在温度值 T_i 允许的最多迭代次数, M_i 表示在温度值 T_i 没有改变最优解决方案的迭代次数.当温度下降到 T_i 时, L_i 与 M_i 应该都变得更大,以便在解决方案空间中能够产生更多的候选解决方案.

在本文中,我们采用线性方式增加.即在温度值 T_i 时的 L_i 正比于到目前为止温度降低的次数, M_i 正比于 L_i . L_i 和 M_i 的计算如公式(7)和公式(8)所示.

$$L_i = (i+1) \times \delta \times |R| \quad (7)$$

$$M_i = \eta \times L_i \tag{8}$$

其中, $\delta(0 < \delta \leq 1)$ 表示温度值 T_i 时允许的最大迭代次数因子, $|R|$ 表示目的节点数. 在每一次迭代中, 我们需要改变到一个目的节点的子路径. 理想情况下, 我们希望在温度值 T_i 每一个目的节点都能经历子路径的改变操作. $\eta(0 < \eta \leq 1)$ 表示在温度值 T_i 没有改变最优解决方案的最大迭代次数因子.

5.5 终止条件

终止条件的作用是控制当前最优值没有改变的情况下, 温度值连续下降的最多次数. 设温度下降的最多次数为 I , 当前最优值没有改变的情况下, 温度连续下降次数的上界为 U , 它们的关系如公式(9)所示.

$$U = \lambda \times I (0 < \lambda < 1) \tag{9}$$

其中, λ 为最优值没有改变的情况下, 连续下降最多次数的因子; $I=20$.

6 性能仿真及结果分析

为了验证本文提出的算法, 我们实现了 GA-MRSA, SA-MRSA, OMRA^[25], MCMH^[26], LCA^[7] 以及 SPT 算法. OMRA 的目标是最小化端到端延迟, MCMH 的目标是最小化网络资源的使用, 网络资源指的是使用的信道. LCA 和 SPT 算法是我们针对认知无线 Mesh 网络环境实现的两种算法, 其步骤分别是: 首先, 基于 BFS 和最短路径方法构造组播树, 然后基于组播树进行信道分配. LCA 和 SPT 算法将组播树的构建与信道分配分开处理, 我们实现 LCA 和 SPT 算法并与其进行比较基于以下考虑:

- 1) GA-MRSA 和 SA-MRSA 的初始化种群和初始化解决方案中, 包括基于 BFS 和最短路径方法构造组播树.
- 2) LCA 和 SPT 算法将组播树的构建与信道分配分开处理, 而我们提出的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法是联合组播路由及频谱分配.

我们的仿真使用 Microsoft Visual C++ 6.0. 主机配置: CPU 为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU 2.2GHz, 主存 3GB, 操作系统为 Windows XP. 假设仿真的网络拓扑结构为某高校的校园网, 在 2500m×2500m 的区域, 随机部署着具有认知能力的 CR-Mesh 路由器, $T_R=50m, I_R=100m$. 为了充分测试我们提出的算法的性能, 我们设置两种拓扑结构: 第 1 种拓扑结构包含 23 个 CR-Mesh 路由器节点; 第 2 种拓扑结构包含 50 个 CR-Mesh 路由器节点. GASA 算法中, 种群数 $N=50$, 遗传代数 $Gen=100$; GA-MRSA 算法中, 种群数 $q=50$, 交叉概率 $p_c=0.6$, 变异概率 $p_m=0.05$; SA-MRSA 算法中, $\alpha=0.95, \delta=1, \eta=0.5, \lambda=0.3$.

以下的仿真中: 第 1 种拓扑结构组播目的节点个数变化范围是 2~10, 可用信道数 $|K|=5$, 延迟上界 $D=25ms$; 第 2 种拓扑结构组播目的节点个数变化范围是 8~18, $|K|=10$, 延迟上界 $D=35ms$. 信道的延迟属于 $[1, 5]$, 并随机产生, 单位为 ms. 所有结果均为 500 次独立仿真的均值. 性能的比较主要包括信道冲突总数、占用的信道数目、平均延迟以及最大延迟. 占用信道数越多, 表示其他认知无线网络可用的信道数越少.

主要从以下 4 个方面进行仿真:

- 1) 分析比较 GA-MRSA, SA-MRSA, OMRA, MCMH, LCA 与 SPT 算法信道冲突总数;
- 2) 分析比较 GA-MRSA, SA-MRSA, OMRA, MCMH, LCA 与 SPT 算法占用的信道数;
- 3) 分析比较 GA-MRSA, SA-MRSA, OMRA, MCMH, LCA 与 SPT 算法平均延迟;
- 4) 分析比较 GA-MRSA, SA-MRSA, OMRA, MCMH, LCA 与 SPT 算法最大延迟.

6.1 信道冲突总数比较

本仿真主要分析比较组播目的节点数的变化对 GA-MRSA, SA-MRSA, OMRA, MCMH, LCA 与 SPT 算法中信道冲突总数的影响. 图 5 所示为具有 23 个节点的第 1 种拓扑结构的仿真结果, 图 6 所示为具有 50 个节点的第 2 种拓扑结构的仿真结果.

由图 5 可知, GA-MRSA 算法最优. 当组播目的节点数小于等于 4 时, GA-MRSA 算法利用 PU 没有使用的可用信道进行频谱分配, 可以实现完全满足 QoS 约束的组播路由, 没有产生信道冲突, 从而有效地提高了频谱的利

用率.SA-MRSA 算法在组播目的节点小于等于 3 时,同样可以找到信道冲突总数为 0 的组播路由,并且满足 QoS 约束.由图 5、图 6 可知,GA-MRSA,SA-MRSA 算法的信道冲突总数低于其他 4 种算法,并且 GA-MRSA 算法的信道冲突总数最低.OMRA 算法和 MCMH 算法的信道冲突数高于我们提出的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法,这是因为 OMRA 算法和 MCMH 算法追求的目标分别是最小化端到端延迟和最小化信道的使用.LCA 算法和 SPT 算法产生的信道冲突数高于我们提出的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法,这主要是因为 LCA 算法和 SPT 算法将组播树构建与信道分配分开处理,而我们提出的算法将这两个过程紧密结合,从而有效地减少了信道冲突总数,提高了频谱的利用率.此外,随着组播目的节点数的增多,6 种算法的信道冲突总数也逐渐增多,这主要是因为可用信道数有限的情况下,组播目的节点数的增多,组播树包含的节点和无线链路越多,从而冲突也随之增多.

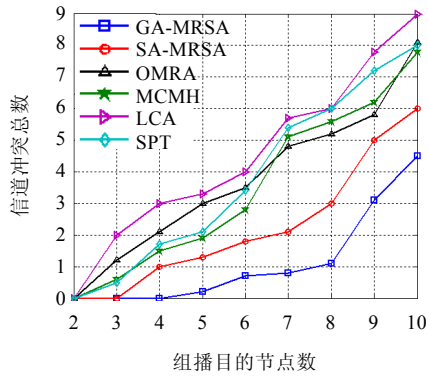


Fig.5 Total channel conflict comparison (N=23)

图 5 信道冲突总数的比较(N=23)

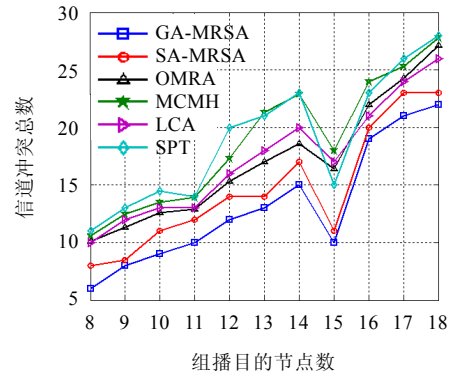


Fig.6 Total channel conflict comparison (N=50)

图 6 信道冲突总数的比较(N=50)

6.2 占用的信道数比较

本仿真主要分析比较组播目的节点数的变化对 GA-MRSA,SA-MRSA,OMRA,MCMH,LCA 与 SPT 算法占用信道数的影响.仿真结果如图 7、图 8 所示.

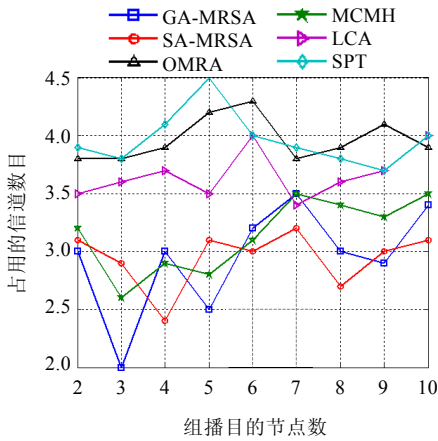


Fig.7 Used channel number comparison (N=23)

图 7 占用信道数的比较(N=23)

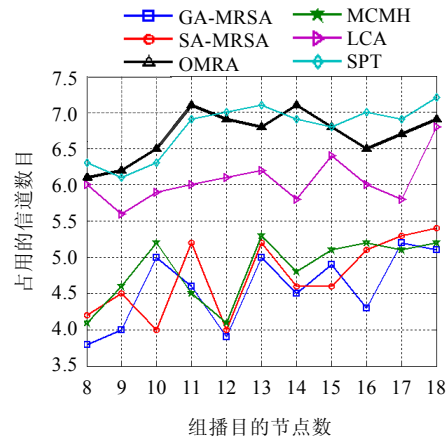


Fig.8 Used channel number comparison (N=50)

图 8 占用信道数的比较(N=50)

由图 7、图 8 可知,我们提出的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法占用的信道数比 OMRA,LCA 以及 SPT 算法要少.这主要是因为我们的频谱分配过程以最小化占用信道数为目标;而 OMRA 算法是以最小化端到端延迟为

目标;LCA 和 SPT 算法采用的是最简单的频谱分配方式,没有考虑占用尽可能少的信道这个指标.因此,我们提出的算法优于 OMRA,LCA 及 SPT 算法.MCMH 算法的占用信道数与我们提出的 GA-MRSA,SA-MRSA 算法相差不多,基本比较接近,这是因为 MCMH 算法是以最小化使用信道数为目标.对比图 7 和图 8 可知,随着网络规模的增大,6 种算法的占用信道数随之增大,这是因为网络规模越大,需要使用的信道随之增多.

6.3 平均延迟比较

本仿真主要分析比较组播目的节点数的变化对 GA-MRSA,SA-MRSA,OMRA,MCMH,LCA 与 SPT 算法平均延迟的影响,平均延迟指的是从组播源节点到所有组播目的节点的路径延迟之和的平均值.仿真结果如图 9、图 10 所示.

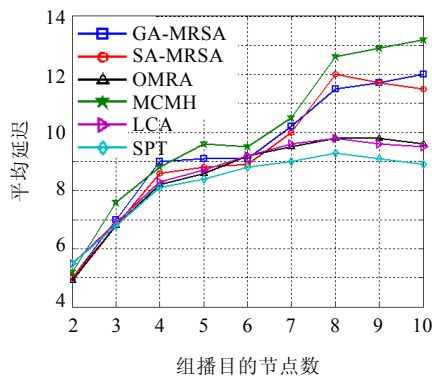


Fig.9 Average delay comparison (N=23)
图 9 平均延迟比较(N=23)

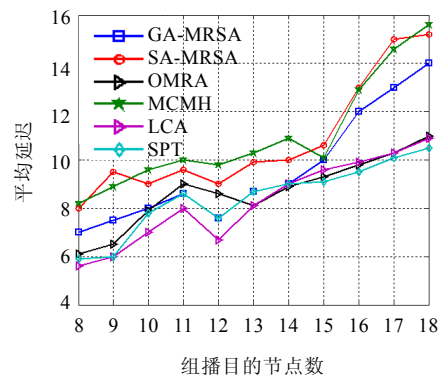


Fig.10 Average delay comparison (N=50)
图 10 平均延迟比较(N=50)

由图 9 可知,当组播目的节点数小于等于 6 时,6 种算法的平均延迟基本一样,但是当目的节点数从 7 开始,OMRA,LCA,SPT 算法的平均延迟低于 GA-MRSA,SA-MRSA 及 MCMH 算法.这主要是因为 OMRA 算法以最小化端到端延迟为目标,LCA 和 SPT 算法是以边的延迟作为构建组播树的指标,而我们提出的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法则是以最小化信道冲突总数为目标,MCMH 算法以最小化使用的信道数为目标.并且随着组播目的节点数的增多,平均延迟随之增大.

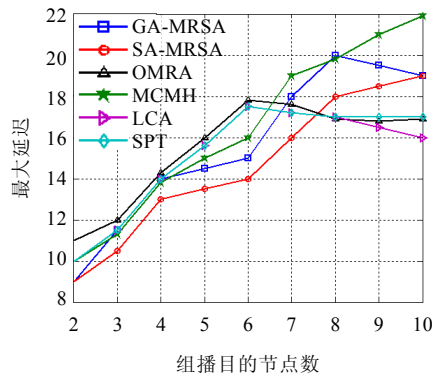
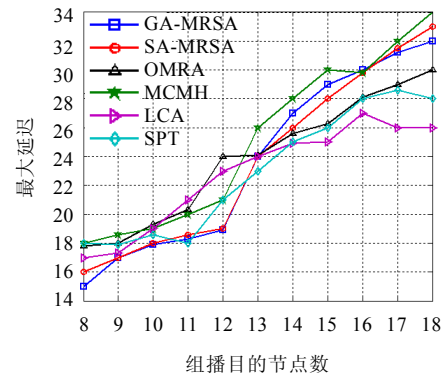
由图 10 可知,GA-MRSA,SA-MRSA 及 MCMH 算法的平均延迟依然略高于 OMRA,LCA 及 SPT 算法.并且随着组播目的节点数的增多,平均延迟随之增大.

6.4 最大延迟比较

本仿真主要分析比较组播目的节点数的变化对 GA-MRSA,SA-MRSA,OMRA,MCMH,LCA 与 SPT 算法最大延迟的影响,最大延迟指的是从组播源节点到所有组播目的节点路径延迟最大值.仿真结果如图 11、图 12 所示.

由图 11 可知,当组播目的节点数小于等于 8 时,GA-MRSA,SA-MRSA 及 MCMH 算法的最大延迟相差不多,但是当组播目的节点数大于 8 时,OMRA,LCA 及 SPT 算法的最大延迟低于 GA-MRSA,SA-MRSA 及 MCMH 算法.

由图 12 可知,当组播目的节点数小于等于 13 时,6 种算法的最大延迟相差不多,但是随着组播节点数的增多,GA-MRSA,SA-MRSA 及 MCMH 的最大延迟变得高于 OMRA,LCA 及 SPT 算法.这主要是因为我们提出的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法主要以最小化信道冲突总数为目标,MCMH 以最小化使用的信道为目标,而 OMRA 是最小化端到端延迟为目标,LCA 和 SPT 算法在构建组播树时以延迟作为其指标.随着组播目的节点数的增多,最大延迟也随之增大.这主要是因为随着目的节点数的增多,构造的组播树也随之变得更大,因此最大延迟也随之增大.

Fig.11 Maximum delay comparison ($N=23$)图 11 最大延迟比较($N=23$)Fig.12 Maximum delay comparison ($N=50$)图 12 最大延迟比较($N=50$)

7 结论及下一步工作

本文研究了认知无线 Mesh 网络中以最小化信道冲突总数为目标、满足端到端延迟约束的组播路由及频谱分配问题,提出了一个基于智能计算的问题求解框架、一种基于遗传算法的频谱分配算法 GASA、两个满足 QoS 约束的组播树构建及频谱分配算法 GA-MRSA 和 SA-MRSA.通过大量的仿真发现,通过合理的参数设置,能够达到最小化的信道冲突总数的目标.GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法的信道冲突数低于 OMRA,MCMH,LCA 与 SPT 算法.GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法占用的信道数低于 OMRA,LCA 及 SPT 算法,与 MCMH 算法相差不大.而 MCMH 算法是以最小化使用信道为目标,也被认为是目前针对占用信道数这个性能指标最优的算法.因此认为,GA-MRSA 和 SA-MRSA 在获得较低的信道冲突数的情况下,还能占用较少的信道,达到优化网络资源使用的目的.本文研究的成果是假设节点功率固定且传输距离固定情况下的组播路由及频谱分配问题,下一步工作将研究基于功率可调的满足 QoS 约束的联合组播路由及频谱分配算法.

致谢 在此,我们衷心感谢审稿专家中肯而有益的修改意见和编辑老师们严谨、热情的工作.同时,向对本文的工作给予支持和提出宝贵建议的同行专家以及中南大学信息科学与工程学院网络计算与分布式处理实验室的老师和同学表示诚挚的谢意.

References:

- [1] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005,23(2):201–220. [doi: 10.1109/JSAC.2004.839380]
- [2] Mitola J III, Jr Maguire GQ. Cognitive radio: Making software radio more personal. *IEEE Personal Communication*, 1999,6(4): 13–18. [doi: 10.1109/98.788210]
- [3] Mitola J III. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio [Ph.D. Thesis]. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [4] Akyildiz IF, Wang XD, Wang WL. Wireless mesh networks: A survey. *Computer Networks*, 2005,47(4):445–487. [doi: 10.1016/j.comnet.2004.12.001]
- [5] Wu GF, Ji ZM, Zhang J, He ZP. Cognitive wireless mesh networks. *Journal of Information Engineering University*, 2010,11(8): 429–433 (in Chinese with English abstract).
- [6] Fang YL, Li FM, Wu P, Liu XH, Ma XL. Multicast routing protocol for wireless mesh networks. *Journal of Software*, 2010,21(6): 1308–1325 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3777.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03777]

- [7] Zeng GK, Wang B, Ding Y, Xiao L, Mutka M. Multicast algorithms for multi-channel wireless mesh networks. In: Proc. of the 2007 15th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2007). Beijing: IEEE Computer Society Press, 2007. 1–10. [doi: 10.1109/ICNP.2007.4375831]
- [8] Yong D, Li X. Channel allocation in multi-channel wireless mesh networks. *Computer Communications*, 2011,34(7):803–815. [doi: 10.1016/j.comcom.2010.10.011]
- [9] Si WS, Selvakennedy S, Zomaya AY. An overview of channel assignment methods for multi-radio multi-channel wireless mesh networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010,70(5):505–524. [doi: 10.1016/j.jpdc.2009.09.011]
- [10] Wang J, Guan XT, Yang C, Zhang Y, Cheng X. CBLA: Cluster based load aware channel assignment for multi channel wireless mesh networks. *ACTA ELECTRONICA SINICA*, 2010,38(3):546–551 (in Chinese with English abstract).
- [11] Ren J, Qiu ZD. Load-Balancing routing based on path metric for multi-channel wireless mesh networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(12):2079–2086 (in Chinese with English abstract).
- [12] Akyildiz IF, Lee WY, Vuran MC, Mohanty S. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 2006,50(13):2127–2159. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.05.001]
- [13] Pei TR, Zhao Z, Zeng WL, Zhang ZX. A cognitive improved hierarchical AODV routing protocol for cognitive wireless mesh network. *Information Technology Journal*, 2011,10(2):376–384. [doi: 10.3923/itj.2011.376.384]
- [14] Sun XB, Zhang YR, Zhao CL. A new routing protocol in cognitive wireless mesh networks. In: Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Advanced Intelligence and Awareness Internet (AIAI 2010). Beijing, 2010. 123–126. [doi: 10.1049/cp.2010.0734]
- [15] Amini RM, Dziong Z. A framework for routing and channel allocation in cognitive wireless mesh networks. In: Proc. of the 2010 7th Int'l Symp. on Wireless Communication Systems (ISWCS 2010). IEEE Computer Society Press, 2010. 1017–1021. [doi: 10.1109/ISWCS.2010.5624547]
- [16] Yong D, Li X. Routing and spectrum allocation for video on-demand streaming in cognitive wireless mesh networks. In: Proc. of the 2010 IEEE 7th Int'l Conf. on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS 2010). IEEE Computer Society Press, 2010. 242–251. [doi: 10.1109/MASS.2010.5664001]
- [17] Lee DH, Jeon WS, Jeong DG. Joint channel assignment and routing in cognitive radio-based wireless mesh networks. In: Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. (IVTC 2010). IEEE Computer Society Press, 2010. 1–5. [doi: 10.1109/VETECS.2010.5494065]
- [18] Zhang GA, Gu JY, Bao ZH. Distributed joint routing and channel allocation algorithm in cognitive wireless mesh networks. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT 2010). IEEE Computer Society Press, 2010. 432–437. [doi: 10.1109/ICBNMT.2010.5705127]
- [19] Gu JY, Zhang GA, Bao ZH. Joint multi-path routing and channel assignment strategy for cognitive wireless mesh networks. *Computer Science*, 2011,38(5):45–48 (in Chinese with English abstract).
- [20] Li Y, Dong YN, Zhao HT. Dynamic layered-graph routing model and routing policy in cognitive radio mesh networks. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009,31(8):1975–1979 (in Chinese with English abstract).
- [21] Khalife H, Ahuja S, Malouch N, Krun M. Joint routing and spectrum selection for multihop cognitive radio networks. Technical Report, Paris: Universit'e Pierre et Marie Curie, 2008.
- [22] Ding L, Melodia T, Batalama S, Medley MJ. ROSA: Distributed joint routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks. In: Proc. of the 12th ACM Int'l Conf. on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM 2009). New York: ACM Press, 2009. 13–20. [doi: 10.1145/1641804.1641810]
- [23] Kuang ZF, Chen ZG, Deng XH. Self-Adaptive joint routing and spectrum allocation algorithm with QoS constraints in cognitive wireless mesh networks. *Journal on Communications*, 2011,32(11):59–70 (in Chinese with English abstract).
- [24] Almasaeid HM, Kamal AE. Assisted-Multicast scheduling in wireless cognitive mesh networks. In: Proc. of the 2010 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2010). IEEE Computer Society Press, 2010. 1–5. [doi: 10.1109/ICC.2010.5502790]
- [25] Almasaeid HM, Jawadwala TH, Kamal AE. On-Demand multicast routing in cognitive radio mesh networks. In: Proc. of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2010). IEEE Computer Society Press, 2010. 1–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683665]

- [26] Gao CH, Shi Y, Hou YT, Sherali HD, Zhou HB. Multicast communications in multi-hop cognitive radio networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011,29(4):784–793. [doi: 10.1109/JSAC.2011.110410]
- [27] Guo JW, Zhou XW, Miao XN, Zhang ZY. Secure minimum-energy multicast tree based on trust mechanism for cognitive radio networks. *Wireless Personal Communications*, 2011,62(9):1–19. [doi: 10.1007/s11277-011-0390-8]
- [28] Chen ZH, Jiang DD, Xu ZZ, Han Y, Xu HW, Zhang P. A multicast routing algorithm in cognitive ad hoc networks. In: *Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Computational Problem-Solving (ICCP 2010)*. IEEE Computer Society Press, 2010. 284–288.
- [29] Tsutsui S, Ghosh A. Genetic algorithms with a robust solution searching scheme. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 1997, 1(3):201–208. [doi: 10.1109/4235.661550]
- [30] Levanova TV, Loresh MA. Algorithms of ant system and simulated annealing for the p -median problem. *Automation and Remote Control*, 2004,65(3):431–438. [doi: 10.1023/B:AURC.0000019375.23201.c1]

附中文参考文献:

- [5] 作国锋,季仲梅,张静,何照盼. 认知无线 Mesh 网络. *信息工程大学学报*, 2010,11(8):429–433.
- [6] 方艺霖,李方敏,吴鹏,刘新华,马小林. 无线 Mesh 网络组播路由协议. *软件学报*, 2010,21(6):1308–1325. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3777.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03777]
- [10] 王晶,管雪涛,杨春,张杨,程旭. CBLA:多信道无线网状网络负载感知的分簇式信道分配. *电子学报*, 2010,38(3):546–551.
- [11] 任娟,裘正定. 多信道无线 Mesh 网络中基于路径尺度的负载平衡路由. *计算机研究与发展*, 2008,45(12):2079–2086.
- [19] 顾金媛,章国安,包志华. 认知无线 Mesh 网络联合多路径路由和信道分配策略. *计算机科学*, 2011,38(5):45–48.
- [20] 李洋,董育宁,赵海涛. 认知 Mesh 网络的动态分层图路由模型及路由策略. *电子与信息学报*, 2009,31(8):1975–1979.
- [23] 邝祝芳,陈志刚,邓晓衡. 自适应的认知无线 Mesh 网络 QoS 约束的路由与频谱分配算法. *通信学报*, 2011,32(11):59–70.



邝祝芳(1982—),男,湖南耒阳人,博士生,讲师,CCF 学生会员,主要研究领域为下一代宽带无线通信系统,认知无线 Mesh 网络.



陈志刚(1964—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络计算与分布式处理,无线 Mesh 网络.