

# 认知无线 Mesh 网络中资源节约的最小信道冲突值组播路由算法\*

杨艺清, 陈志刚

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 认知无线 Mesh 网络中满足服务质量约束的多目标优化组播路由问题比单目标优化组播问题更加复杂, 为了快速求解认知无线 Mesh 网络中满足服务质量约束的、以最小化资源消耗与最小化信道冲突值为目标的多目标优化组播路由问题, 提出一种基于粒子群优化算法的问题求解框架, 包括问题描述、粒子编码与粒子初始化、适应度函数、粒子飞行、粒子变异、粒子消环。粒子由表示节点之间连接关系的带权邻接矩阵表示, 重新定义了用于粒子飞行的 3 种运算规则以及粒子飞行运算和粒子变异运算。仿真结果表明提出的算法能达到预定目标, 资源消耗较低且能获得较低的信道冲突值。

**关键词:** 认知无线 Mesh 网络; 组播; 频谱分配; 粒子群优化

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2016)04-076-09

## Multicast routing algorithm with minimizing channel collision and resource consumption in cognitive wireless Mesh networks

YANG Yiqing, CHEN Zhigang

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

**Abstract:** In cognitive wireless Mesh networks, the multiple-objective optimization problem with quality of service constraints is more complicated than the single objective optimization problem. To obtain the optimal multicast routing solution which satisfies the quality of service constraints and is aimed at minimizing the channel collision and the resource consumption, a problem solving framework which contains problem description, particle encoding, particle initialization, fitness function, particle flight, particle mutation, particle elimination circle, was proposed on the basis of particle swarm optimization. Adjacency matrix which shows the connection relation between nodes was used to represent particle. Three operation rules, particle flight operation and particle mutation operation were redefined. Simulation results show that the proposed algorithm can achieve the expected goal. It can achieve the effect of a lower resource consumption and a smaller channel collision value.

**Key words:** cognitive wireless Mesh network; multicast; spectrum allocation; particle swarm optimization

认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 技术可以很好地缓解无线通信系统中的频谱缺乏问题, 而无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Networks, WMNs) 将成为下一代宽带接入网络, 故将 CR 技术应用于 WMNs 中解决频谱缺乏问题具有潜在的优势<sup>[1-2]</sup>。在认知无线 Mesh 网络 (Cognitive Wireless Mesh Networks, CWMNs) 中, 每一个 CR-Mesh 节点通过频谱感知技术能够智能地接入主用户 (Primary Users, PUs) 未使用的频谱资源<sup>[3]</sup>。

本文以资源节约和最小化总的信道冲突值为目标, 研究 CWMNs 中满足服务质量 (Quality of Service, QoS) 约束的多目标优化组播路由与频谱 (信道) 分配问题。其中资源节约表示最小化新到组播业务对应组播树的传输节点数, 最小化总

的信道冲突值即为最小化新到组播业务对已接受组播业务的冲突。同时, 考虑已接受组播业务的权重, 具有较高权重的已接受组播业务相比低权重的已接受组播业务受到的信道冲突更低。本文的 QoS 约束指组播业务的带宽约束。

学界对 WMNs 中的组播路由问题的研究已经有一段时间, 取得了较多的研究成果<sup>[4-5]</sup>, 但是这些研究成果不能直接应用于 CWMNs 中<sup>[6]</sup>。同时, 针对 CWMNs 中的组播路由问题, 也取得了一些研究成果<sup>[7-19]</sup>。

Almasaeid 等<sup>[8]</sup> 研究了 CWMNs 中的组播路由问题, 针对 CWMNs 中组播目的节点具有可用信道的异构性, 因而组播源节点成功将数据传输到所有目的节点的总时间较长的问题, 以减少组

\* 收稿日期: 2015-12-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61379057, 61309027, 61073186); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目 (13B148); 中国博士后基金面上资助项目 (2013M542136)

**作者简介:** 杨艺清 (1973—), 男, 湖南韶山人, 博士研究生, E-mail: yyq@hunnu.edu.cn;  
陈志刚 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: czg@mail.csu.edu.cn

播总时间为目标,提出了一种基于组播目的协作的组播路由算法。在文献[9]中,Almasaeid 等针对由于主用户节点使用授权信道的差异,CR-Mesh 路由器节点必须进行信道切换,从而导致延迟增加的问题,以降低端到端延迟为目标,提出了一种 CWMNs 中基于动态规划的组播路由算法。邝祝芳等在文献[10-11]中提出了 CWMNs 中 2 种组播路由算法。文献[10]针对 CWMNs 中无线组播业务数据流保持时间较长且比较固定,需事先构造其组播树的情形,以最小化组播树的信道冲突总数为目标,提出了基于智能计算的 GA-MRSA 和 SA-MRSA 算法。文献[11]针对 CR-Mesh 节点可用信道差异导致 CR-Mesh 节点、CR-Mesh 链路负载不均衡的问题,以节点负载均衡为目标,提出了一种 CWMNs 中负载均衡的组播路由与频谱分配算法 LMRS2A。Xie 等<sup>[12]</sup>以最小化组播树消耗的总带宽为目标,研究了认知无线自组织网络(Cognitive Radio Ad Hoc Networks, CRAHNs)中满足 QoS 约束的组播路由问题,针对该问题提出了两种解决方法。第一种方法:首先基于最小生成树算法构造组播路由树,然后提出一个时间槽分配算法给组播路由树中的无线链路分配时间槽。第二种方法:将上述两个阶段合并,同时考虑组播树构造与时间槽分配。Pan 等<sup>[13]</sup>研究了认知无线多跳网络中,以最大化吞吐量为目标的组播路由问题,同时还考虑频谱的可用性和共享的公平性。Naeem 等<sup>[14]</sup>研究了认知无线网络中多组播组考虑最大最小公平性的联合功率、子载波分配以及中继分配的问题。Shu 等<sup>[15]</sup>以最大化网络吞吐量为目标,研究了认知无线网络中的组播路由与频谱分配问题。Gao 等<sup>[16]</sup>研究了 CRAHNs 中的组播路由问题,以最小化需要的网络资源为目标,提出了一种多项式时间算法求解混合整数线性规划问题。Hu 等<sup>[17]</sup>研究了认知无线网络中的可扩展流媒体组播问题,其以优化网络的流媒体质量、达到各组播用户之间的公平性和对 PU 产生的干扰低于某一个阈值为目标。Jie 等<sup>[18]</sup>针对认知无线网络中的组播路由问题,提出了一种多速率多层混合图模型,目标是实现最小化组播树最差情况下的端到端延迟、最大化组播树的速率以及最小化组播树的传输链路。Tan 等<sup>[19]</sup>在考虑主用户活动的情况下,研究了认知无线网络中基于正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的组播路由问题,组播成员中的各次用户基于其感知的可用信道,被分为多个簇,目标是最大化聚合数据率。

## 1 网络模型及问题描述

### 1.1 网络模型

简单无向图  $G = (V, E)$  建模认知无线 Mesh 网络,其中  $V$  表示 CR-Mesh 节点的集合, $E$  表示链接 2 个能相互通信的 CR-Mesh 节点的无线链路的集合。每个节点  $v_i \in V$  都有一个可用信道集合  $K_i$  以及一个认知射频接口数  $RF_i$ 。每个节点均存在一个通信距离  $T_R$  和一个干扰距离  $I_R$ 。一般情况下满足  $3T_R > I_R > T_R$ ,本文假设  $I_R = 2 \times T_R$ 。假设存在一个公共控制通道(Common Control Channel, CCC)用于各 CR-Mesh 节点之间传递控制信息。

$d(v_i, v_j)$  表示节点  $v_i$  和节点  $v_j$  的物理距离。 $N(v_i) = \{v_j | v_j \in V, d(v_i, v_j) < T_R\}$  表示节点  $v_i$  的邻居节点集合。

设  $X = \{x(v_i, v_j)\}_{n \times n}$ ,  $x(v_i, v_j) = k$  表示无线链路  $(v_i, v_j)$  分配的信道是  $k$ ,  $x(v_i, v_j) = 0$  表示无线链路  $(v_i, v_j)$  没有分配任何信道,规定只给每条无线链路分配一个信道,或者不分配任何信道。 $B^k$  表示信道  $k$  的带宽,单位是 Mbps,由于不同的信道通常具有不同的带宽,因此,对于不同的信道  $k$  和  $k'$ ,有  $B^k \neq B^{k'}$ 。

无线链路  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$  相互冲突必须满足以下条件:①  $d(u_1, u_2) < I_R$  或者  $d(u_1, v_2) < I_R$  或者  $d(v_1, u_2) < I_R$  或者  $d(v_1, v_2) < I_R$ ;② 2 条无线链路  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$  分配相同的信道,即  $x(u_1, v_1) = x(u_2, v_2)$ 。

### 1.2 问题描述

研究的问题是以资源节约和最小化组播业务信道冲突值为目标的满足无线业务 QoS 约束的多目标优化组播路由问题。对新到组播业务本身,希望构造资源节约组播树,其目的是希望预留更多的资源以便能接受更多的无线组播业务;对已接受组播业务,希望受到较少的信道冲突。

设  $\ell = \{\gamma_p = (S_p, D_p, w_p, b_p)\}$  为无线组播业务需求集合,其中  $S_p$  表示无线组播业务  $\gamma_p$  的源点, $D_p$  表示  $\gamma_p$  的目的节点集合, $w_p$  表示  $\gamma_p$  的权重, $b_p$  表示  $\gamma_p$  需要的带宽约束。设  $T_p = (V_p, E_p)$  是无线组播业务  $\gamma_p$  的组播树。

本文的第一个目标是资源节约,资源节约指的是最小化组播树的传输节点。

**定义 1(传输节点)** 在组播树  $T_p$  中,节点  $v_i$  存在到其邻居节点分配信道  $k$  的数据通道(逻辑链路),则称信道  $k$  为传输节点。

$V(T_p, k)$  表示在组播树  $T_p$  中工作在信道  $k$  上

的传输节点集合。

**定义 2** 组播树  $T_p$  的花费  $Cost(T_p)$ , 指在组播树  $T_p$  中所有可用信道上的传输节点数之和, 即如式(1)所示:

$$Cost(T_p) = \sum_{k \in K} |V(T_p, k)| \quad (1)$$

本文的第二个目标是 minimized 信道冲突值,  $I(T_p)$  表示总的信道冲突值, 其定义如式(2)所示: 无线组播业务  $\gamma_p$  的组播树  $T_p$  与所有已接受组播业务的组播树的无线信道冲突值的和。

$$I(T_p) = \sum_{T_q \in \vartheta_p} H(T_p, T_q) \quad (2)$$

式中,  $\vartheta_p$  是除组播树  $T_p$  之外的所有组播树的集合,  $T_q$  是已接受无线组播业务  $\gamma_q$  对应的组播树,  $H(T_p, T_q)$  表示组播树  $T_p$  与  $T_q$  的无线信道冲突值, 如式(3)所示:

$$H(T_p, T_q) = \sum_{(u,v) \in T_p} f^q(k, u, v) \quad (3)$$

式中,  $f^q(k, u, v)$  表示组播树  $T_p$  中的无线链路  $(u, v)$  分配信道  $k$  时与组播树  $T_q$  的信道冲突值, 其定义如式(4)所示:

$$f^q(k, u, v) = \sum_{(a,b) \in T_q \&\& (a,b) \in I(u,v)} w(k, a, b) \quad (4)$$

式中,  $w(k, a, b)$  表示组播树  $T_q$  中无线链路  $(a, b)$  分配信道  $k$  的信道冲突值。用组播树  $T_q$  对应组播业务  $\gamma_q$  的权重  $w_q$  表示无线链路  $(a, b)$  的信道冲突值, 目的是为了让较高权重的组播业务相比较低权重的组播业务获得更高吞吐量, 受到尽可能少的冲突。即无线链路的信道冲突值如式(5)所示:

$$\begin{cases} w(k, a, b) = w_q \\ \text{s. t. } (a, b) \in T_q \&\& x(a, b) = k \end{cases} \quad (5)$$

本文求解问题的形式描述如式(6) ~ (11) 所示:

$$\begin{cases} \text{Min} Cost(T_p) \\ \text{Min} I(T_p) \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{(a,b) \in I(u,v) \&\& x(a,b)=k} l_{(a,b)}^k \leq B^k, \quad \forall (u, v) \in T_p \quad (7)$$

$$l_{(a,b)}^k = \sum_{q=1}^{|\ell|} l_{(a,b)}^k(q) \quad (8)$$

$$\rho(u) = \sum_{v \in N(u)} A\{x(u, v)\}, \quad \forall u \in T_p \quad (9)$$

$$\rho(u) < RF_u \&\& \rho(v) < RF_v, \quad \forall u, v \in T_p \quad (10)$$

$$x(u, v) \in \{0\} \cup K, \quad \forall (u, v) \in T_p \quad (11)$$

$Cost(T_p)$  和  $I(T_p)$  的定义如式(1)和式(2)所示。式(7)为 QoS 约束, 表示组播树  $T_p$  中的所有无线链路必须满足带宽约束。 $l_{(a,b)}^k$  表示无线链路

$(a, b)$  在信道  $k$  的负载, 单位为 Mbps。式(8)中,  $l_{(a,b)}^k(q)$  表示无线组播业务  $\gamma_q$  在无线链路  $(a, b)$  上的负载。式(9)中的  $\rho(u)$  统计节点  $u$  已使用的射频频数,  $A\{\cdot\}$  是条件函数, 判断无线链路  $(u, v)$  是否已经分配信道。式(10)表示节点  $u$  和节点  $v$  必须满足射频约束。式(11)表示无线链路  $(u, v)$  可用分配的信道集合。

## 2 多目标优化的粒子群优化算法

为了求解前文提出的多目标优化问题, 本节提出一个针对 CWMNs 中满足 QoS 约束的多目标优化组播路由与频谱分配问题求解框架, 包括问题描述、粒子编码与粒子初始化、适应度函数、粒子飞行、粒子变异和粒子消环。

### 2.1 粒子群优化算法简介

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法是一种群体智能算法, 由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出<sup>[20]</sup>。它是模拟自然界中飞鸟集群活动的规律, 在状态空间中搜索问题的最优解。在 PSO 算法中, 每一个个体被称为一个粒子, 它代表问题中的一个可能解。每一个粒子根据自我经验以及向其他粒子的学习来调整飞行轨迹, 改善搜索效率, 促进整个群体向最优解收敛。每一个粒子具有一个位置向量和一个速度向量, 算法在搜索过程中记录下每一个粒子搜索到的最优位置以及整个粒子群中搜索到的最优位置。每次迭代过程中, 粒子通过跟踪个体最优位置和群体最优位置来更新自己。基本的 PSO 算法<sup>[21]</sup> 还无法直接用于求解本文研究的满足 QoS 约束的多目标优化组播路由与频谱分配问题。因此, 需重新定义粒子编码和粒子飞行, 并且定义粒子变异和粒子消环操作。

### 2.2 粒子编码

以节点链接关系表示组播树, 粒子采用表示节点之间连接关系的带权有向邻接矩阵表示。有向邻接矩阵中的权值表示无线链路分配的信道。第  $i$  个粒子的编码表示为  $X_i = \{X_i[u][v]\}$ , 其也表示粒子的位置,  $X_i$  是  $|V| \times |V|$  的邻接矩阵,  $i \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$ ,  $L$  为种群中粒子的个数。  $X_i[u][v]$  表示节点  $u$  与节点  $v$  之间的关系,  $X_i[u][v] \in \{0\} \cup K$ ,  $(u, v) \in T_p$  并且分配了信道, 则  $X_i[u][v]$  为无线链路  $(u, v)$  分配的信道, 否则  $X_i[u][v]$  为 0。计算公式如式(12)所示:

$$X_i[u][v] = \begin{cases} 0 & (u, v) \notin T_p \\ x(u, v) & x(u, v) \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

对于无线组播业务  $\gamma_p = (A, \{G, H, F, I\}, 4, 20)$ , 图1所示为  $T_p$  的组播树, 图2所示为组播树  $T_p$  的粒子编码表示。

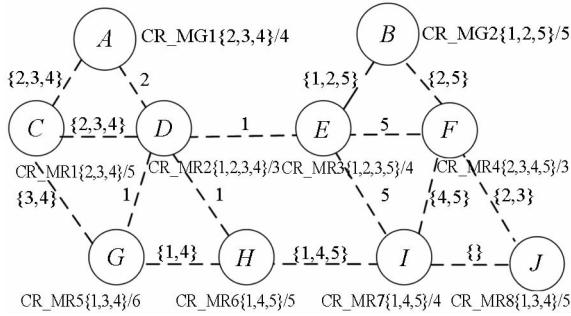


图1 组播树  $T_p$

Fig. 1 Multicast tree  $T_p$

0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图2 组播树  $T_p$  的粒子编码

Fig. 2 Particle encode of multicast tree  $T_p$

PSO 算法中, 所有粒子除了有位置属性外, 还有速度属性  $V_i$ , 表示为  $V_i = \{V_i[u][v]\}$ , 也是  $|V| \times |V|$  的邻接矩阵,  $V_i$  的作用是改变粒子的位置。粒子速度  $V_i$  表示组播树与频谱分配的改进方向;  $V_i[u][v] \in \{0\} \cup K, i \in \{1, 2, \dots, L\}$ 。若  $V_i[u][v] = 0$ , 则表示不改变相应维上的数据, 即不改变无线链路  $(u, v)$  分配的信道。若  $V_i[u][v] \neq 0$ , 则表示修改此位置相应维上的数据为  $V_i[u][v]$ , 即改变无线链路  $(u, v)$  分配的信道为  $V_i[u][v]$ 。

### 2.3 粒子初始化

本文提出粒子初始化算法 InitPSO, 基本步骤如下:

**步骤 1:** 初始化种群集合  $Q$  为空集, 初始化组播树  $T_p$  为空集, 初始化粒子  $X_i$  中的所有元素为 0, 将源节点  $S_p$  添加到  $T_p$  中。

**步骤 2:** 在目的节点集合  $D_p$  中选择一个目的节点  $d_j$ , 从  $D_p$  中删除  $d_j$ ,  $d_j$  添加到分支  $Branch(d_j)$ ,  $d_j$  作为当前节点  $v$ 。

**步骤 3:** 构造当前节点  $v$  的未添加到  $Branch(d_j)$  的邻居节点集合, 在该集合中随机选择一个节点  $u$ , 将节点  $u$  添加到  $Branch(d_j)$  中, 为无线链路  $(u, v)$

从其可用的信道集合  $K(u, v)$  中随机选择一个信道分配给  $(u, v)$ , 更新当前节点。

**步骤 4:** 判断当前节点是否属于正在构造的组播树  $T_p$ , 若属于, 则将分支  $Branch(d_j)$  添加到  $T_p$ , 转步骤 5; 否则, 转步骤 3。

**步骤 5:** 若目的节点集合  $D_p$  为空, 则粒子  $X_i$  已经生成, 继续产生下一个粒子; 否则, 返回步骤 2。

算法 InitPSO 详见算法 1。

### 算法 1 InitPSO 算法

Alg. 1 Algorithm InitPSO

```

输入:  $G = (V, E)$ ,  $\gamma_p = (S_p, D_p, w_p, b_p)$ 
输出:  $Q = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$ 
1)  $Q \leftarrow \phi$ ;  $i \leftarrow 1$ ;
2) while  $i \leq L$  do {
3)    $T_p \leftarrow \phi$ ;  $X_i \leftarrow 0$ ;
4)    $T_p \leftarrow T_p \cup \{S_p\}$ ;
5)   while  $d_j \in D_p$  do {
6)      $Branch(d_j) \leftarrow Branch(d_j) \cup \{d_j\}$ ;
7)      $D_p \leftarrow D_p - d_j$ ;
8)      $v \leftarrow d_j$ ;
9)     while  $v \notin T_p$  do {
10)       $u \leftarrow Random(N(v))$ ;
11)       $x(u, v) \leftarrow Random(K(u, v))$ ;
12)       $X_i[u][v] \leftarrow x(u, v)$ ;
13)       $Branch(d_j) \leftarrow Branch(d_j) \cup \{u\}$ ;
14)       $v \leftarrow u$ ;
15)    } //end while
16)     $T_p \leftarrow T_p \cup Branch(d_j)$ ;
17)  } //end while
18)  if  $T_p$  satisfied constraints (7) and (10) {
19)     $Q \leftarrow Q \cup X_i$ ;
20)     $i++$ ;
21)  } else {
22)    continue;
23)  } end if
24) } //end while
    
```

### 2.4 适应度函数

本文的目标是资源节约和最小化信道冲突值, 形式定义分别如式(1)和式(2)所示, 适应度函数的定义如式(13)所示:

$$f(X_i) = \alpha \times Cost(T_p) + \beta \times I(T_p) \quad (13)$$

$f(X_i)$  的值越小, 说明粒子  $X_i$  越靠近极值。

### 2.5 粒子飞行

定义粒子飞行方法是设计粒子群优化算法的重要内容, 基本 PSO 算法中的位置和速度更新公式无法适应于本文研究的问题, 因此, 重新定义了粒子的飞行以及粒子飞行中用到的 3 种基本运算。

#### 2.5.1 加法 ( $\oplus$ ) 运算

加法 ( $\oplus$ ) 运算将粒子  $X_i$  的位置与速度相

加,得到一个新的位置,即: $\mathbf{X}_i^{\text{new}} = \mathbf{X}_i \oplus \mathbf{V}_i$ 。计算公式如式(14)所示:

$$\mathbf{X}_i^{\text{new}}[u][v] = \begin{cases} \mathbf{X}_i[u][v] & \mathbf{V}_i[u][v] = 0 \\ \mathbf{V}_i[u][v] & \mathbf{V}_i[u][v] \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

加法运算的作用是把原来组播树中的一部分用新的分支进行替换,或者组播树中某分支的频谱分配方案用新的频谱分配方案替换。

### 2.5.2 减法( $\ominus$ )运算

减法( $\ominus$ )运算的作用是计算当前组播树和频谱分配方案与全局较优方案以及与局部较优方案的差别,找到替换的方向。两个位置值  $\mathbf{X}_i$  和  $\mathbf{X}'_i$  相减得到速度,即  $\mathbf{V}_i^{\text{new}} = \mathbf{X}_i \ominus \mathbf{X}'_i$ 。

减法运算可以描述为:

$$\mathbf{V}_i^{\text{new}}[u][v] = \begin{cases} 0 & \mathbf{X}_i[u][v] = \mathbf{X}'_i[u][v] \\ \mathbf{X}_i[u][v] & \mathbf{X}_i[u][v] \neq \mathbf{X}'_i[u][v] \end{cases} \quad (15)$$

### 2.5.3 乘法( $\otimes$ )运算

乘法( $\otimes$ )运算的作用是实现截取,计算公式如式(16)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_g = \mathbf{R}_1 \otimes (\mathbf{P}_g \ominus \mathbf{X}_i) \otimes \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{V}_l(i) = \mathbf{R}_2 \otimes [\mathbf{P}_l(i) \ominus \mathbf{X}_i] \otimes \mathbf{R}_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{R}_1 = [r_{11}, r_{12}]$ ,  $\mathbf{R}_2 = [r_{21}, r_{22}]$ ,  $\mathbf{R}_3 = [r_{31}, r_{32}]$ ,  $r_{ij} \in [1, |V|]$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ,  $j \in \{1, 2\}$ );  $\mathbf{P}_g$  和  $\mathbf{P}_l(i)$  分别表示全局最优位置和粒子  $\mathbf{X}_i$  经历过的最优位置,同样是  $|V| \times |V|$  的邻接矩阵,  $\mathbf{P}_g \ominus \mathbf{X}_i$  和  $\mathbf{P}_l(i) \ominus \mathbf{X}_i$  分别表示  $\mathbf{P}_g$  和  $\mathbf{P}_l(i)$  与粒子  $\mathbf{X}_i$  的减法运算。其结果表示  $\mathbf{P}_g$  和  $\mathbf{P}_l(i)$  与当前组播树和频谱分配方案的差异,用于指导粒子的飞行。

$\mathbf{V}_g$  与  $\mathbf{V}_l(i)$  分别表示粒子  $\mathbf{X}_i$  向全局最优位置和个体最优位置学习的速度,同样是  $|V| \times |V|$  的邻接矩阵。 $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$  和  $\mathbf{R}_3$  可设定或随机产生,表示向全局最优位置和个体最优位置学习的程度。 $\mathbf{P}_g \ominus \mathbf{X}_i$  两边分别乘  $\mathbf{R}_1$  与  $\mathbf{R}_2$  表示新速度  $\mathbf{V}_g$  左上角坐标为  $[r_{11}, r_{12}]$ 、右下角坐标为  $[r_{21}, r_{22}]$  的子矩阵从  $\mathbf{P}_g \ominus \mathbf{X}_i$  矩阵中截取,其余的设置均为 0。 $\mathbf{V}_l(i)$  计算公式的含义与  $\mathbf{V}_g$  类似。

### 2.5.4 粒子飞行运算

粒子  $\mathbf{X}_i$  飞行运算的作用是向全局最优位置和局部最优位置学习,更新粒子当前的位置,表达式如式(17)所示:

$$\mathbf{X}_i = (\mathbf{X}_i \oplus \mathbf{V}_g) \oplus \mathbf{V}_l \quad (17)$$

粒子  $\mathbf{X}_i$  与  $\mathbf{V}_g$  相加表示粒子向全局优化目标逼近,其结果再与  $\mathbf{V}_l$  相加表示粒子向局部优化目标逼近。

更新粒子  $\mathbf{X}_i$  的位置时,同时与  $\mathbf{V}_g$  和  $\mathbf{V}_l$  两个速度相加得到一个新的位置,这个新位置包含全

局最优的信息、局部最优的信息、粒子本身的信息,这完全符合 PSO 算法的本质特征。

## 2.6 粒子变异

为了使粒子包含新的分支以及给无线链路分配新的信道,本文借鉴遗传算法的变异操作设计了组播树的变异操作。变异操作可看作是粒子向组播树与频谱分配方案解空间中某个随机生成的粒子的一次飞行。基于粒子飞行运算可以定义粒子变异操作,如式(18)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_y = \mathbf{R}_4 \otimes (\mathbf{Y}_i \ominus \mathbf{X}_i) \otimes \mathbf{R}_5 \\ \mathbf{X}_i = \mathbf{X}_i \oplus \mathbf{V}_y \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{R}_4 = [r_{41}, r_{42}]$ ,  $\mathbf{R}_5 = [r_{51}, r_{52}]$ ,  $r_{ij} \in [1, |V|]$  ( $i \in \{4, 5\}$ ,  $j \in \{1, 2\}$ );  $\mathbf{Y}_i$  表示采用粒子初始化算法 InitPSO 随机生成的一个粒子,  $\mathbf{Y}_i \ominus \mathbf{X}_i$  表示粒子  $\mathbf{X}_i$  与  $\mathbf{Y}_i$  的差异。 $\mathbf{R}_4$  与  $\mathbf{R}_5$  表示从  $\mathbf{Y}_i \ominus \mathbf{X}_i$  截取的子矩阵的左上角坐标和右下角坐标,  $\mathbf{V}_y$  表示作用于  $\mathbf{X}_i$  的变异分支。

本文中,以变异概率  $P_m$  在粒子种群中选择待变异的粒子。

## 2.7 粒子消环

上述的粒子飞行和粒子变异操作都可能导致粒子中存在环,因此有必要设计粒子消环操作。图 3 粒子  $\mathbf{X}_i$  和速度  $\mathbf{V}_i$  相加可能产生环的情况,图 3 左图和右图展示了不同情况下的环。 $\mathbf{X}_i^{\text{new}}$  表示  $\mathbf{X}_i \oplus \mathbf{V}_i$  运算之后的粒子,  $T_p^{\text{new}}$  表示  $\mathbf{X}_i^{\text{new}}$  对应的组播树。

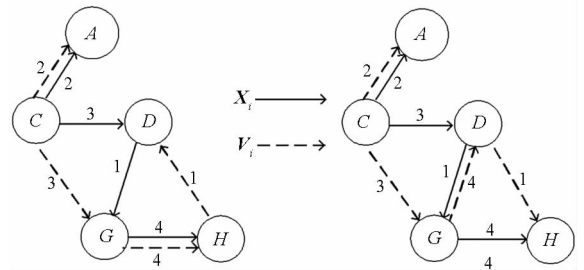


图 3  $\mathbf{X}_i \oplus \mathbf{V}_i$  运算之后产生的环

Fig. 3 Directed circles generated after  $\mathbf{X}_i \oplus \mathbf{V}_i$

消环操作的基本步骤包括:

步骤 1: 对  $\mathbf{X}_i^{\text{new}}$  中的所有节点  $v$ , 计算其入度  $in-degree(v)$  及弧尾节点集合  $N-in(v)$ 。

步骤 2: 采用拓扑排序判断  $T_p^{\text{new}}$  是否含有环。

步骤 3: 如果没有环, 则返回; 否则, 转步骤 4。

步骤 4: 初始化组播树  $T'_p$  使之只包括源节点  $S_p$ 。

步骤 5: 从目的节点集合  $D_p$  中选择一个目的节点  $d_j$ , 从  $D_p$  中删除  $d_j$ ,  $d_j$  添加到分支  $Branch(d_j)$ ,  $d_j$  作为当前节点  $v$ 。

步骤 6: 判断节点  $v$  的入度  $in-degree(v)$  是否

等于1,若是,则只需将  $N-in(v)$  中弧尾节点  $u$  添加到  $Branch(d_j)$  中,更新当前节点,转步骤9。

**步骤7:**如果  $in-degree(v)$  不等于1,则对  $N-in(v)$  中每一个弧尾节点  $u$ ,判断其是否包括在  $T'_p$  中,若是,则转步骤5;否则,比较  $N-in(v)$  中所有弧尾节点  $u$  到节点  $v$  的链路  $(u,v)$  对其他组播业务的信道冲突值  $f(u,v)$ ,计算公式如式(19)所示。

$$f(u,v) = \sum_{T_q \in \mathcal{D}_p} f^q(k,u,v) \quad (19)$$

其中  $f^q(k,u,v)$  的定义如式(4)所示。

**步骤8:**比较所有链路  $(u,v)$  的  $f(u,v)$ ,  $u'$  记为具有最小值  $f(u,v)$  的节点,  $u'$  添加到  $Branch(d_j)$ , 并且更新当前节点。

**步骤9:**判断当前节点是否属于正在构造的组播树  $T'_p$ ,若属于,则将分支  $Branch(d_j)$  添加到组播树  $T'_p$ ,转步骤10;否则,转步骤6。

**步骤10:**若目的节点集合  $D_p$  为空,则环已经消除,不含环的组播树  $T'_p$  已经生成;否则,返回步骤5。

粒子消环步骤详见算法2。

## 算法2 消环算法

Alg.2 Elimination circle algorithm

---

输入:  $G=(V,E)$ ,  $\gamma_p=(S_p, D_p, w_p, b_p)$ ,  $T_p^{new}$   
 输出:  $T'_p$

```

1) for  $u=1$  to  $|V|$  do {
2)   for  $v=1$  to  $|V|$  do {
3)     if  $X_i^{new}[u][v] \neq 0$  {
4)        $in-degree(v)++$ ;
5)        $N-in(v) \leftarrow N-in(v) \cup \{u\}$ ;
6)     } //end if
7)   } //end for
8) } //end for
9) if  $Topsort(T_p^{new}) = \text{circled}$  {
10)   $T'_p \leftarrow T'_p \cup \{S_p\}$ ;
11)  while  $d_j \in D_p$  do {
12)     $Branch(d_j) \leftarrow Branch(d_j) \cup \{d_j\}$ ;
13)     $D_p \leftarrow D_p - d_j$ ;
14)     $v \leftarrow d_j$ ;
15)    while  $v \notin T'_p$  do {
16)      if  $in-degree(v) = 1$  {
17)         $u \leftarrow N-in(v)$ ;
18)         $Branch(d_j) \leftarrow Branch(d_j) \cup \{u\}$ ;
19)         $v \leftarrow u$ ;
20)      } else {
21)        for each  $u \in N-in(v)$  do {
22)          if  $u \in T'_p$  {
23)             $T'_p \leftarrow T'_p \cup Branch(d_j)$ ;
24)            continue;
25)          } //end if
26)        } //end for
27)         $(u',v) \leftarrow \arg \min_{u \in N-in(v)} \{f(u,v)\}$ ;
28)         $Branch(d_j) \leftarrow Branch(d_j) \cup \{u'\}$ ;
29)         $v \leftarrow u'$ ;
30)      } //end if
31)    } //end while
32)  } //end while
33) } //end if

```

---

## 2.8 算法 MRC3 - PSO

本小节提出满足 QoS 约束的多目标优化组播路由与频谱分配问题的粒子群优化算法 MRC3 - PSO。步骤包括:

**步骤1:**调用粒子初始化算法 InitPSO 初始化粒子种群;

**步骤2:**对每一个粒子  $X_i$ ,初始化其局部最优位置  $P_l(i)$ ,根据式(13)计算粒子的适应度函数值,初始化全局最优位置  $P_g$ ;

**步骤3:**对每一个粒子  $X_i$ ,随机产生  $R_1, R_2$  和  $R_3$ ,粒子根据式(17)执行飞行操作;

**步骤4:**以变异概率  $P_m$  从粒子种群中选择变异粒子,随机产生  $R_4$  和  $R_5$ ,根据式(18)执行粒子变异操作;

**步骤5:**对经过飞行操作和变异操作之后存在环的粒子,首先进行消环,然后根据式(13)计算每个粒子的适应度函数值;

**步骤6:**将每一个粒子与其经历过的局部最好位置  $P_l(i)$  进行比较,如果优于  $P_l(i)$ ,则更新  $P_l(i)$ ;

**步骤7:**比较所有粒子的局部最好位置与整个种群全局最好位置  $P_g$ ,如果粒子的局部最好位置优于  $P_g$ ,则更新  $P_g$ ;

**步骤8:**如果算法满足终止条件(算法终止条件为迭代次数 Generation),则全局最优位置  $P_g$  为所求的路由与频谱分配方案,否则转步骤3。

算法 MRC3 - PSO 详见算法3。

## 3 性能分析

本节对提出的算法 MRC3 - PSO 进行性能分析,与之对比的算法为 MSTTP<sup>[12]</sup> 和 CL - MTO<sup>[13]</sup>,其中 MSTTP 算法是以最小化组播树的带宽总消耗为目标的组播路由算法, MSTTP 算法的基本思想是,单个组播树消耗的资源越小,整个网络就可以接受更多的无线组播业务。CL - MTO 算法是以最大化网络吞吐量为目标的组播路由算法。仿真采用 Microsoft Visual C++ 6.0。

仿真的网络拓扑结构为  $2400 \text{ m} \times 2400 \text{ m}$  的区域。CR-Mesh 节点数  $|V| = 50$ ,组播源点和目的节点随机产生;存在若干可用信道,并且 PU 随机地占用这些信道。各信道的带宽、各无线业务需求带宽都随机产生,各信道的带宽  $B^k$  取值范围属于  $[0,100]$ ,单位为 Mbps,各无线业务需求带宽  $C_p$  取值范围属于  $[0,20]$ ,各组播业务的权重  $w_p$  也随机产生,其取值范围属于  $[3,20]$ 。

算法 3 MRC3 - PSO 算法

Alg.3 Algorithm MRC3 - PSO

输入:  $G = (V, E)$ ,  $\gamma_p = (S_p, D_p, w_p, b_p)$

输出:  $P_g$

```

1)  $Q \leftarrow \text{InitPSO}(\gamma_p)$ ;
2)  $g \leftarrow 1$ ;  $f(P_g) \leftarrow \infty$ ;
3) for  $i = 1$  to  $L$  do {
4)  $P_i(i) \leftarrow X_i$ ;
5) computing  $f(X_i)$  according to (13);
6) if  $f(X_i) < f(P_g)$  {
7)  $P_g \leftarrow X_i$ ;
8) } //end if
9) } //end for
10) for  $g = 1$  to  $Generation$  do {
11) for  $i = 1$  to  $L$  do {
12)  $R_1 \leftarrow \text{random}(1, |V|)$ ;
13)  $R_2 \leftarrow \text{random}(1, |V|)$ ;
14)  $R_3 \leftarrow \text{random}(1, |V|)$ ;
15) computing  $X_i$  according to (17);
16) } //end for
17) if  $\text{random}(0, 1) \leq P_m$  {
18)  $j \leftarrow \text{random}(1, L)$ ;
19) computing  $X_j$  according to (18);
20) } //end if
21) for  $i = 1$  to  $L$  do {
22)  $Elimination\_circles(X_i)$ ;
23) computing  $f(X_i)$  according to (13);
24) if  $f(X_i) < f(P_i(i))$  {
25)  $P_i(i) \leftarrow X_i$ ;
26) } //end if
27) if  $f(P_i(i)) < f(P_g)$  {
28)  $P_g \leftarrow P_i(i)$ ;
29) } //end if
30) } //end for
31) } //end for
    
```

假设在默认情况下,无线组播业务随机到达,并随机离开,在规定时间内到达的组播业务数  $|\ell| = 30$ ,组播目的节点数  $|D_p| = 6$ ,设定规定时间长度为 1800 s;可用信道数为  $|K| = 8$ ,  $T_R = 50$  m,  $I_R = 100$  m,  $L = 100$ ,  $Generation = 1000$ ,  $P_m = 0.1$ ,  $\alpha = 30$ ,  $\beta = 2$ 。

以下所有的仿真结果均为 500 次独立仿真结果的均值。仿真主要以无线组播业务数、组播目的节点数和可用信道数作为参数,从 2 个方面进行仿真:组播树的花费;总的信道冲突值。

3.1 组播树花费比较

在本仿真中,分析比较不同无线组播业务数、不同组播目的节点数和不同可用信道数对组播树花费的影响。仿真结果如图 4~6 所示。

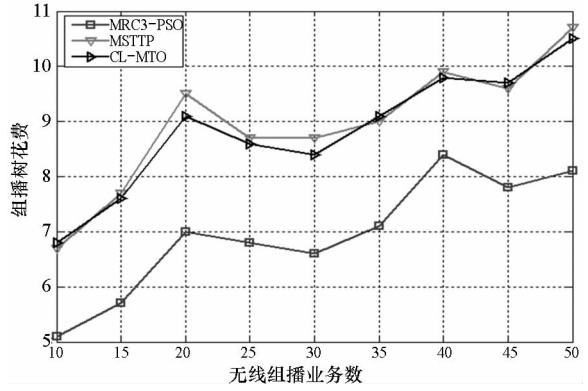


图 4 无线业务需求数对组播树花费的影响  
Fig. 4 Comparison of multicast tree cost at different number of multicast requests

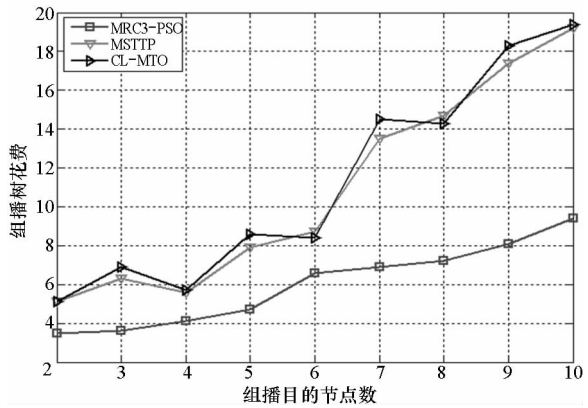


图 5 组播目的节点数对组播树花费的影响  
Fig. 5 Comparison of multicast tree cost at different number of multicast destination nodes

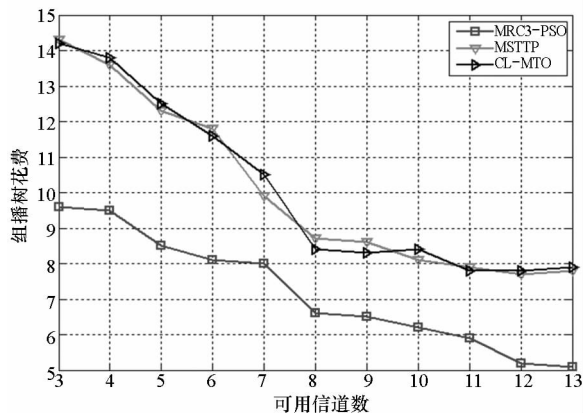


图 6 可用信道数对组播树花费的影响  
Fig. 6 Comparison of multicast tree cost at different number of available channels

由图 4 可知,提出的 MRC3 - PSO 算法的组播树花费低于其他 2 个算法,这是因为其适应度函数中包含资源节约的目标,通过粒子的飞行和变异操作能够搜索到具有较低组播树花费的解决方案。随着组播业务数的增多,3 个算法的组播

树花费随之增大。当无线组播业务数为 50 时, MRC3 - PSO 的组播树花费比 MSTTP 和 CL - MTO 的分别低 24% 和 23%。

由图 5 可知,随着组播目的节点数的增多,3 个算法的组播树花费随之增多,提出的 MRC3 - PSO 算法的组播树花费低于其他 2 个算法。当组播目的节点数为 10 时, MRC3 - PSO 的组播树花费比 MSTTP 和 CL - MTO 的分别低 51% 和 52%。

由图 6 可知,随着可用信道数的增多,3 个算法的组播树花费随之减少,这是因为可用信道越多,一个传输可到达的邻居节点越多,所以将需要较少的传输节点。提出的 MRC3 - PSO 算法的组播树花费低于其他 2 个算法,当可用信道数为 13 时, MRC3 - PSO 的组播树花费比 MSTTP 和 CL - MTO 的分别低 35%。

### 3.2 总的信道冲突值比较

在本仿真中,分析比较不同无线组播业务数、不同组播目的节点数和不同可用信道数对总的信道冲突值的影响。仿真结果如图 7 ~ 9 所示。

由图 7 可知,随着组播业务数的增多,3 个算法的信道冲突值随之增大,这是因为同样的网络资源,组播业务数越多,组播业务直接产生冲突的可能性越大。提出的 MRC3 - PSO 算法的信道冲突值低于其他 2 个算法,这是因为其适应度函数中包含最小化信道冲突值的目标。当无线组播业务数为 50 时, MRC3 - PSO 的总信道冲突值比 MSTTP 和 CL - MTO 的分别低 48% 和 50%。

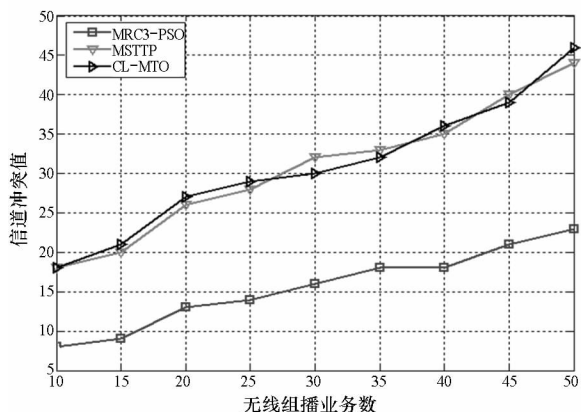


图 7 无线业务需求数对总的信道冲突值的影响

Fig. 7 Comparison of channel collision value at different number of multicast requests

由图 8 可知,随着组播目的节点数的增多,3 个算法的信道冲突值随之增大。提出的 MRC3 - PSO 算法的信道冲突值低于其他 2 个算法。当组播目的节点数为 10 时, MRC3 - PSO 的总信道冲突值比 MSTTP 和 CL - MTO 的分别低

53% 和 55%。

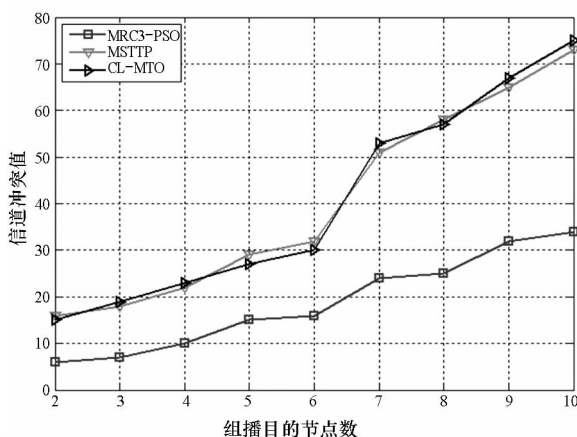


图 8 组播目的节点数对总的信道冲突值的影响

Fig. 8 Comparison of channel collision value at different number of multicast destination nodes

由图 9 可知,随着可用信道数的增多,3 个算法的信道冲突值随之减少,这是因为可用信道数越多,给各组播业务分配的信道产生冲突的可能性越低。提出的 MRC3 - PSO 算法的信道冲突值低于其他 2 个算法。当可用信道数为 13 时, MRC3 - PSO 的总信道冲突值比 MSTTP 和 CL - MTO 的分别低 54% 和 58%。

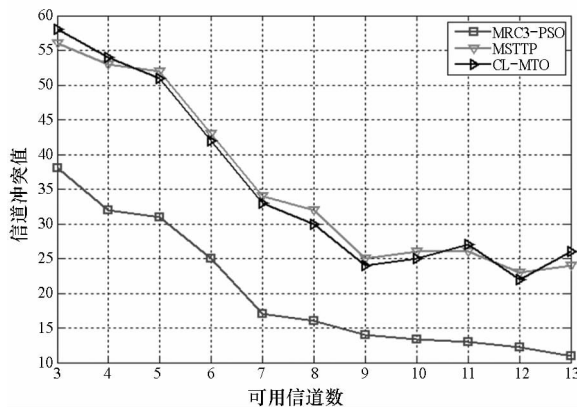


图 9 可用信道数对总的信道冲突值的影响

Fig. 9 Comparison of channel collision value at different number of available channels

## 4 结论

研究了认知无线 Mesh 网络中,满足 QoS 约束的多目标优化组播路由与频谱分配问题,目标是资源节约和最小化信道冲突值。不仅考虑为新到组播业务构造资源节约的组播树,而且还考虑新到组播业务对已接受组播业务的影响,同时区别对待已接受组播业务的影响,考虑各无线组播业务具有不同的权重,高权重的已接受组播业务相比低权重的已接受组播业务将受到较低的信道



冲突。基于粒子群优化算法提出了一个满足 QoS 约束的多目标优化组播路由问题求解框架,包括问题描述、粒子编码与粒子初始化、适应度函数、粒子飞行、粒子变异、粒子消环。

通过大量的仿真发现,MRC3-PSO 算法不仅具有较低的组播树花费,达到了资源节约的目的,而且达到了最小化信道冲突值的目的。下一步工作将研究资源节约和最小化冲突的满足 QoS 约束的分布式组播路由与频谱分配算法。

## 参考文献 (References)

- [1] Chowdhury K R, Akyildiz I F. Cognitive wireless Mesh networks with dynamic spectrum access [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 168-181.
- [2] Chen T, Zhang H G, Maggio G M, et al. CogMesh: a cluster-based cognitive radio network [C] // Proceeding of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Piscataway, NJ, 2007: 168-178.
- [3] 贾杰, 林秋思, 陈剑, 等. 认知无线 Mesh 网络中联合功率控制与信道分配的拥塞避免[J]. 计算机学报, 2013, 36(5): 915-925.
- JIA Jie, LIN Qiusi, CHEN Jian, et al. Joint power control and channel assignment for congestion avoidance in cognitive radio Mesh network [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(5): 915-925. (in Chinese)
- [4] 方艺霖, 李方敏, 吴鹏, 等. 无线 Mesh 网络组播路由协议[J]. 软件学报, 2010, 21(6): 1308-1325.
- FANG Yilin, LI Fangmin, WU Peng, et al. Multicast routing protocol for wireless Mesh networks [J]. Journal of Software, 2010, 21(6): 1308-1325. (in Chinese)
- [5] Jahanshahi M, Barmi A T. Multicast routing protocols in wireless mesh networks: a survey [J]. Computing, 2014, 96(11): 1029-1057.
- [6] Cesana M, Cuomo F, Ekici E. Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions [J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(3): 228-248.
- [7] Qadir J, Baig A, Ali A, et al. Multicasting in cognitive radio networks: algorithms, techniques and protocols [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 45: 44-61.
- [8] Almasaeid H M, Kamal A E. Exploiting multichannel diversity for cooperative multicast in cognitive radio mesh networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(3): 770-783.
- [9] Almasaeid H M, Jawadwala T H, Kamal A E. On-demand multicast routing in cognitive radio Mesh networks [C] // Proceeding of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Piscataway, NJ, 2010: 1-5.
- [10] 邝祝芳, 陈志刚. 认知无线 Mesh 网络中 QoS 约束的组播路由算法[J]. 软件学报, 2012, 23(11): 3029-3044.
- KUANG Zhufang, CHEN Zhigang. Research on joint multicast routing and spectrum allocation algorithm with QoS constraints in cognitive wireless Mesh networks [J]. Journal of Software, 2012, 23(11): 3029-3044. (in Chinese)
- [11] 邝祝芳, 陈志刚, 刘蕙. 一种认知无线 Mesh 网络中负载均衡的组播路由算法 [J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 521-531.
- KUANG Zhufang, CHEN Zhigang, LIU Hui. A load-balanced multicast routing algorithm in cognitive wireless Mesh networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 521-531. (in Chinese)
- [12] Xie L M, Jia X H, Zhou K X. QoS multicast routing in cognitive radio ad hoc networks [J]. International Journal of Communication Systems, 2012, 25(1): 30-46.
- [13] Pan M, Long Y, Yue H, et al. Multicast throughput optimization and fair spectrum sharing in cognitive radio networks [C] // Proceeding of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Piscataway, NJ, 2012: 1085-1089.
- [14] Naeem M, Pareek U, Lee D C. Max-min fairness aware joint power, subcarrier allocation and relay assignment in multicast cognitive radio [J]. IET Communications, 2012, 6(11): 1511-1518.
- [15] Shu Z H, Qian Y, Yang Y Q, et al. Channel allocation and multicast routing in cognitive radio networks [C] // Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Piscataway, NJ, 2013: 1703-1708.
- [16] Gao C H, Shi Y, Hou Y T, et al. Multicast communications in multi-hop cognitive radio networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4): 784-793.
- [17] Hu D L, Mao S W, Hou Y T, et al. Scalable video multicast in cognitive radio networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(3): 434-444.
- [18] Jie Y, Kamal A E. Multi-objective multicast routing optimization in cognitive radio networks [C] // Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2014: 2576-2581.
- [19] Tan C K, Chuah T C, Tan S W. A coalitional game-based algorithm for OFDMA resource allocation in multicast cognitive radio networks [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 80(1): 415-427.
- [20] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // Proceeding of IEEE Conference on Neural Network, Perth, Australia, 1995, 4: 1942-1948.
- [21] 刘安丰, 吴贤佑, 陈志刚. 一种基于 PSO 的有效能量空洞避免的无线传感器路由算法 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(4): 575-582.
- LIU Anfeng, WU Xianyou, CHEN Zhigang. An energy-hole avoidance routing algorithm for WSN based on PSO [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(4): 575-582. (in Chinese)