

自适应的认知无线 Mesh 网络 QoS 约束的路由与频谱分配算法

邝祝芳^{1,2}, 陈志刚¹, 邓晓衡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)

摘要: 提出了一种自适应的满足 QoS 约束的路由与频谱分配(SA2JR)算法, 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被满足。SA2JR 包括 2 个部分, 按需的 κ -路径路由 (κ -Routing) 算法, 以及 QoS 驱动的频谱分配(QDSA)算法。 κ -Routing 负责为每一个需求产生 κ 条潜在路由路径, QDSA 算法自适应地进行频谱分配, 目标是从 κ -Routing 产生的 κ 条潜在路由路径中找出一条满足 QoS 约束的可行路由路径。仿真结果表明 SA2JR 能达到预定目标, 获得了较高的无线业务接受率。

关键词: 认知无线 Mesh 网络; 路由; 频谱分配; QoS 约束

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0059-12

Self-adaptive joint routing and spectrum allocation algorithm with QoS constraints in cognitive wireless Mesh networks

KUANG Zhu-fang^{1,2}, CHEN Zhi-gang¹, DENG Xiao-heng¹

(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 & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: A self-adaptive joint routing (SA2JR) and spectrum allocation algorithm with QoS constraints in cognitive wireless mesh networks was proposed. Maximizing the accept ratio of wireless service was the objective of SA2JR under the QoS constraints. The SA2JR algorithm contained κ -Routing and QDSA algorithm. The κ -Routing algorithm produces κ paths for each wireless service. QDSA algorithm took charge of maintaining a feasible path from the κ paths which produced by κ -Routing algorithm. Simulation results show that SA2JR algorithm can achieve expectation goal. It can achieve a higher accept ratio.

Key words: cognitive wireless Mesh network; routing; spectrum allocation; quality of service constraints

1 引言

1999 年 Mitola 博士首次提出认知无线电 (CR, cognitive radio) 的概念, 其最核心的功能是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^[1]。具体体现在无牌照用户即次用户 (SU, secondary users) 在不干扰有牌照用户即主用户 (PU, primary users) 的前提下抓住机会使用这些 PU 没有

使用的频谱空穴^[2]。

认知无线 Mesh 网络 (CWMN, cognitive wireless mesh network) 是一种具有智能的无线频谱资源共享技术的无线 Mesh 网络, 是结合了认知无线电的无线 Mesh 网络^[3,4]。在 CWMN 中, 每一个 Mesh 节点 (包括 Mesh 路由器、Mesh 网关和 Mesh 客户端) 都使用了 CR 技术。对于一个配备 CR 的 Mesh 节点 (CR-Mesh 路由器、CR-Mesh 网关和 CR-Mesh

收稿日期: 2011-06-20; 修回日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61073186, 61073104, 60903058, 60873082)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61073186, 61073104, 60903058, 60873082)

客户端统称 CR-Mesh 节点), 它能够感知主系统中未使用的频谱, 并动态地接入到这些频谱中。

本文主要研究认知无线 Mesh 网络中满足 QoS 约束的路由与频谱分配联合优化问题。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。因为带宽是无线业务所有 QoS 约束中最重要, 因此, 本文主要研究无线业务的带宽约束。如果对于一个无线业务, 存在一条从源点到终点的满足带宽约束的可行路径, 那么这个无线业务的需求将被接受。可行路径的存在依赖于无线业务传输路径中无线链路的带宽, 无线业务传输路径的无线链路是由路由算法决定的, 无线业务传输路径中无线链路的带宽是由频谱分配算法决定的。因此, 为了最大化网络性能, 满足 QoS 约束的路由问题与频谱分配问题应该同时考虑。

近年来, 随着底层无线通信技术的进步以及 WMN 自身研究的深入, WMN 呈现出以多射频、多信道和多速率(MR2-MC, multi-radio multi-channel multi-rate)为基本特征的全新网络形态, 并且取得了一些研究成果^[5,6]。

但是这些 WMN 中针对路由和信道分配的研究成果不能直接应用于 CWMN 中, CWMN 中的路由和信道分配有以下几个主要特点: ①无线 Mesh 网络中的路由协议是工作在固定信道, 并且信道的通信状态已知, 认知无线 Mesh 网络工作在信道动态变化的环境中; ②CR-Mesh 节点使用 PU 的授权信道必须保证不对 PU 产生干扰; ③认知无线 Mesh 网络中可用的信道是无线环境中所有信道的一个子集, 并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在一般情况下是不同的。

自从认知无线网络提出, 信道分配一直是非常重要的研究内容之一, 并且也取得了一些成果^[7-10]。但是针对认知无线网络中信道分配的研究成果也不能直接应用于认知无线 Mesh 网络中, 因为目前认知无线网络一般指的是有基础设施的无线网络, 而 CWMN 是没有基础设施的无线网络。

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^[11]。针对 CWMN 的路由问题取得了一些研究成果^[12-19]。

PEI T R 提出了一种认知无线 Mesh 网络中改进的分层 AODV 路由协议^[12]。SUN X B 提出了一种基于经典 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^[13]。AMINI R M 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^[14]。DING Y 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, 某个终端用户在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, 则同时会话的数目则越大。针对该问题提出分布式和集中式的联合多路径路由与频谱分配算法 DRCA 和 CRCA^[15]。LEE D H 等针对认知无线 Mesh 网络与其他认知无线网络共存的网络环境中, 为了使得各种认知无线网络能够很好的共存, 提出了认知无线电 Mesh 网络中以最小化占用信道数量为目标的路由与频谱分配算法^[16]。

ZHANG G A 等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^[17]。GU J Y 等提出一种认知无线 Mesh 网络中联合多路径路由和信道分配的策略。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迟^[18]。LI Y 等提出了认知无线 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^[19]。

区别已有的研究工作, 本文主要研究认知无线 Mesh 网络中满足 QoS 约束的路由与频谱分配联合优化问题。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。

相对于已有研究工作本文做了如下创新: ①本文研究满足 QoS 约束的路由及频谱分配问题, 并且考虑了各可用信道之间的差异, 认为不同信道具有不同带宽, 这是与实际情况相符的。②本文考虑了多个无线业务之间的影响, 并且本文优化的目标是最大化无线业务接受率。③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, 其中包括一个求解 κ 条路径的 κ -Routing 算法和一个 QoS 驱动的频谱分配 (QDSA) 算法。

本文第 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 节提出了满足 QoS 约束的自适应的路由与频谱分配 (SA2JR) 算法。第 4 节提出按需的 κ -路径路由 (κ -Routing) 算法, 第 5 节提出 QoS 约束驱动的频谱分配算法 QDSA。第 6 节和第 7 节分别是详细的性能仿真及结果分析和总结及下一步工作。

2 网络模型及问题描述

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。假设每个次用户 SU 都通过频谱感知算法检测到主用户 PU 没有使用的频段, 并且每个 SU 检测到的可用频段是不一样的, 本文不研究具体的频谱感知算法。主要研究 SU 检测了一些可用的频段之后, 如何构造满足无线业务 QoS 约束的路由路径, 并进行频谱分配, 从而提高无线业务的接受率。

将由静止的 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 2 个能相互通信的 CR-Mesh 路由器的无线链路的集合。每个节点 $v_i \in V$ 都有一个感知的可用信道集合 K_i , 以及一个认知射频接口(CRI, cognitive radio interface)数 I_i 。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 $3 I_R > T_R > I_R$, 本文假设 $I_R = 2 \times T_R$ 。 $d(v_i, v_j)$ 表示节点 v_i 和节点 v_j 之间的物理距离。2 个 CR-Mesh 路由器能相互通信必须具有以下条件: ①相同的可用信道, 即 $K_i \cap K_j \neq \emptyset$, ②有空闲的 CRI 可供分配, ③满足通信距离的约束, 即 $d(v_i, v_j) < T_R$ 。其他符号的含义见表 1。

$X = \{x_{(u,v)}\}_{n \times n}$, $x_{(u,v)} = k$ 表示无线链路 (u, v) 分配信道 k , $x_{(u,v)} = 0$ 表示没有给无线链路 (u, v) 分配任何信道, 并且, 规定每条无线链路只能分配一个信道, 或者不分配任何信道。 B^k 表示信道 k 的带宽, 单位为 Mbit/s, 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 i 和 j , $B^i \neq B^j$ 。

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 $d(u_1, u_2) \leq I_R$ 或者 $d(u_1, v_2) \leq I_R$ 或者 $d(v_1, u_2) \leq I_R$ 或者 $d(v_1, v_2) \leq I_R$; ② 2 条无线链路分配相同的信道, 即 $x_{(u_1, v_1)} = x_{(u_2, v_2)}$ 。用 $I_{(u,v)}$ 表示与无

线链路 (u, v) 冲突的无线链路集合。

$\Psi = \{l_{(u,v)}^k \mid u, v \in V, k \in K\}$ 表示无线链路负荷的集合, $l_{(u,v)}^k$ 表示无线链路 (u, v) 在信道 k 的负荷, 单位为 Mbit/s。无线链路 (u, v) 在信道 k 的可用带宽 $\mathcal{R}_\Psi^k(u, v)$ 定义如式(1)所示, 其中 $\frac{l_{(a,b)}^k}{B^k}$ 表示无线链路 (a, b) 传输负荷 $l_{(a,b)}^k$ 需要占用的带宽比例。

$$\mathcal{R}_\Psi^k(u, v) = B^k \left(1 - \sum_{(a,b) \in I_{(u,v)}} \frac{l_{(a,b)}^k}{B^k} \right) \quad (1)$$

表 1 符号含义

符号	含义
V	节点的集合 $ V =n$
E	边的集合 $ E =m$
Δ	无线业务的集合
K	可用信道的集合
T_R	节点的通信距离
I_R	节点的干扰距离
I_i	节点 i 可用射频数
K_i	节点 i 可用信道集合
Γ	频谱分配方案
B_k	信道 k 的带宽
$x_{(u,v)}$	无线链路 (u,v) 分配的信道
$I_{(u,v)}$	与无线链路 (u,v) 冲突的无线链路集合
$w_{(u,v)}^\Gamma$	路由算法中无线链路 (u,v) 的路由指标
$\xi_{(u,v)}^\Gamma$	在频谱分配方案 Γ 下无线链路 (u,v) 的权重
$l(u,v)$	无线链路 (u,v) 的通信负载
$l_{(u,v)}^k$	无线链路 (u,v) 在信道 k 的通信负荷
Ψ	无线链路负荷集合

2.2 问题描述

本文研究在满足无线业务 QoS 约束的情况下, 以最大化无线业务接受率为性能指标的路由与频谱分配问题。假设路由与频谱分配是网络管理工具的组成部分, 所以存在一个负责无线业务接受管理服务器, 本文提出的集中式算法运行于该服务器中。并且假设存在一个公共控制通道(CCC, common control channel)用于各 SU 之间传递控制信息。设 $\Delta = \{\delta_i = (s_i, d_i, b_i, t_i, e_i)\}$ 为无线业务需求集合, 其中, s_i 和 d_i 表示无线业务 δ_i 的源点和目的点, b_i 表示无线业务 δ_i 需要的带宽, t_i 和 e_i 表示无线业务 δ_i 到达时间和离开时间。设 Ψ 为 δ_i 到达之前的无线链路负荷的集合, Ψ' 为 δ_i 到达之后的无线链路负荷的集合。假设 p 是从 s_i 到 d_i 的一条路由路径, 路径

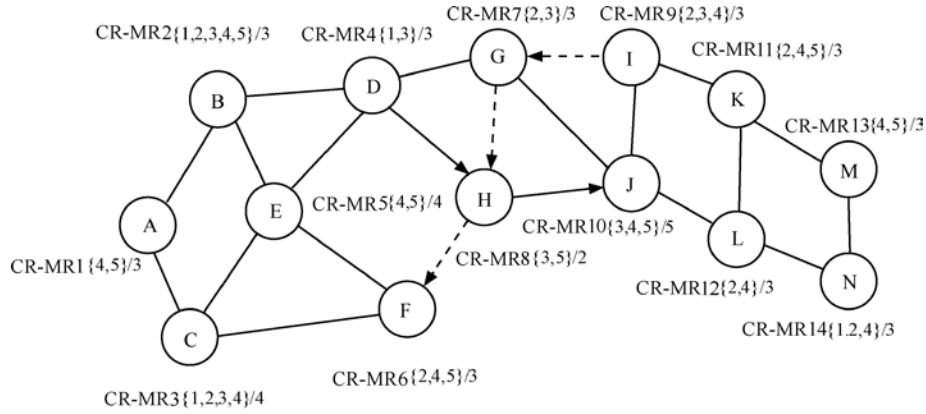


图1 认知无线 Mesh 网络拓扑

p 可行需验证是否满足式(2)和式(3)表示的 QoS 约束:

$$\mathcal{R}_\psi^k(u, v) > b_i \quad \forall (u, v) \in p \quad (2)$$

$$\mathcal{R}_\psi^k(u, v) > 0 \quad \forall (u, v) \in E \quad (3)$$

为了更好地描述本文研究的问题,给出了一个简单的网络拓扑示例,如图1所示,分布着14个CR-Mesh路由器。图中CR-MR2{1,2,3,4,5}/3表示CR-MR2可用的信道为{1,2,3,4,5},可用的射频接口数为3。即 $K_2=5, I_2=3$ 。假设系统中有5个可用信道,即 $K=\{1,2,3,4,5\}$,这5个可用信道的带宽分别是 $B=\{40,70,90,60,50\}$ 。

无线业务需求集合如表2所示, δ_1 和 δ_2 是已经接受的无线业务, $D \xrightarrow{3} H \xrightarrow{5} J$ 表示接受 δ_1 的路径,其含义为从节点CR-MR4到CR-MR8分配的信道为3,从CR-MR8到CR-MR10分配的信道为5。接受无线业务 δ_2 的路径为 $I \xrightarrow{3} G \xrightarrow{3} H \xrightarrow{5} F$ 。无线链路冲突集合如表3所示,无线链路的负荷及可用带宽如表4所示,其中 $\mathcal{R}_\psi^3(G, H)$ 的计算过程如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_\psi^3(G, H) &= B^3 \left(1 - \frac{l_{(G,H)}^3}{B^3} - \frac{l_{(G,I)}^3}{B^3} - \frac{l_{(D,H)}^3}{B^3} \right) \\ &= 90 \left(1 - \frac{30}{90} - \frac{30}{90} - \frac{20}{90} \right) = 10 \end{aligned} \quad (4)$$

表2 无线业务需求集合

ID	$\delta_i = (s_i, d_i, b_i, t_i, e_i)$	路径
1	$\delta_1 = (D, J, 20, 0, 30)$	$D \xrightarrow{3} H \xrightarrow{5} J$
2	$\delta_2 = (I, F, 30, 5, 25)$	$I \xrightarrow{3} G \xrightarrow{3} H \xrightarrow{5} F$

表3 无线链路冲突集合

(u, v)	$I_{(u,v)}$
(D, H)	$\{(D, H), (D, B), (D, E), (D, G), (F, H), (G, H), (J, H)\}$
(H, J)	$\{(H, J), (H, G), (H, D), (H, F), (G, J), (I, J), (L, J)\}$
(I, G)	$\{(G, I), (G, D), (G, H), (G, J), (I, J), (I, K)\}$
(G, H)	$\{(G, H), (G, I), (G, D), (G, J), (D, H), (J, H), (F, H)\}$
(H, F)	$\{(H, J), (H, G), (H, D), (H, F), (E, F), (C, F)\}$

表4 无线链路负荷

(u, v)	$x_{(u,v)}$	$l_{(u,v)}^k$	$\mathcal{R}_\psi^k(u, v)$
(D, H)	3	20	10
(H, J)	5	20	40
(I, G)	3	30	10
(G, H)	3	30	10
(H, F)	5	30	40

设 $\delta_3 = (A, N, 20, 10, 20)$ 是新到的无线业务需求。通过分析发现,在无线业务 δ_3 从CR-MR1到CR-MR14的所有路径中,出现不满足QoS约束的无线链路只有无线链路 (D, H) 或者 (D, G) ,因为这2条无线链路中一条必定在CR-MR1到CR-MR14的路径中,并且这2条无线链路可用信道都只有信道3。根据式(1)可知 $\mathcal{R}_\psi^3(D, H) = 10$,而 $b_3 = 20$ 。因此为了能够接受无线业务需求 δ_3 ,需要重新进行频谱分配。针对上述实例,一个可行的解决方案是将节点CR-MR9到CR-MR7分配的信道3修改为信道2。假设各节点具有很好的频谱切换机制,进行频谱切换的时间可以忽略不计,本文不研

究具体的频谱切换机制。

本文的目标是最大化无线业务接受率，在获得相同接受率的情况下，还考虑优化网络资源的使用，主要体现在最小化占用信道数。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 $\sum_{(u,v) \in E} x_{(u,v)} > 0$ 则 $\theta^k = 1$ ，反之， $\theta^k = 0$ ，CWMN 占用的总的信道数记为 g ，如式(5)所示。

$$g = \sum_{k \in K} \theta^k \quad (5)$$

3 QoS 约束的路由与频谱分配算法

3.1 基本思想

本文提出的满足 QoS 约束的路由与频谱分配算法是一个迭代算法，包括 2 个部分，按需的 κ -路径路由算法以及 QoS 驱动的频谱分配算法，对应 2 个步骤。第 1 步：找路径；第 2 步：进行频谱分配使得找到的路径能够满足 QoS 约束。SA2JR 算法迭代过程的核心是：对于一个给定的需求， κ -Routing 算法找一条不一定必须可行的路径，如果找出的路径不可行，QDSA 算法重新进行频谱分配使得该路径可行，如果 QDSA 算法无法使得该路径变成可行路径，则 κ -Routing 算法再找一条路径，重复此过程，直到已经找到了一条可行路径，接受该无线业务，或者 κ -Routing 算法已经找了 κ 条路径，但是还没有找到可行路径。

除此之外，还需要说明的是，SA2JR 算法中的 κ -Routing 算法和 QDSA 算法是一个有机的整体，而不是简单的结合。

一方面， κ -Routing 算法必须感知 QDSA 算法的能力，因为 κ -Routing 算法找出的路径不一定必须可行，通过 QDSA 算法可以使它变得可行。所以应当避免出现 κ -Routing 算法找出的路径无法通过 QDSA 算法使其变成可行路径。另一方面，QDSA 算法应该考虑 κ -Routing 算法找出路径的优劣性，即应该把可用带宽比、冲突集等参数作为 κ -Routing 算法的路由指标。QDSA 算法应该与路由指标保持一致，换言之，QDSA 算法进行信道分配的目标不应该与 κ -Routing 算法的路由指标相冲突。

3.2 SA2JR 算法实现

算法 1 SA2JR 算法

输入： $\delta_i = (s_i, d_i, b_i, t_i, e_i)$ ， κ

输出： Γ

```

1) while  $\forall (u,v) \in E$  do
2)  $x_{(u,v)} = \text{Random}(K_u \cap K_v)$ 
3) for  $i=1$  to  $\kappa$  {
4)  $p = \kappa$ -Routing( $\delta_i$ )
5) Status=QDSA( $\delta_i, p$ )
6) if (Status==Accept)
7) break;
8) }
```

4 κ -路径路由算法

κ -Routing 算法是 SA2JR 迭代算法第一阶段运行的算法。 κ -Routing 的输入是无线业务需求，输出是一条路径，这条路径不一定是可行路径。

κ -Routing 算法包括剪枝和路径搜索 2 个阶段。

4.1 剪枝

剪枝是一种非常重要的降低搜索算法时间复杂度，提高搜索算法效果的技术。但是已有的 QoS 路由中的搜索技术，不能直接应用到 QoS 约束的路由与频谱分配问题中。在单独的满足 QoS 约束路由问题中，如果一条无线链路的可用带宽不能支持新的无线业务，则可以直接对其进行剪枝，但是，在满足 QoS 约束的联合路由与频谱分配问题中，该链路不能被剪枝，因为这条本来不能满足 QoS 约束的无线路径，可能可以通过合适的频谱分配策略使其支持新的无线业务。

本文的剪枝策略如下：假设每一条无线链路只能分配一个信道，在最好情况下，没有任何无线链路与其冲突，无线链路 (u, v) 能够承受的最大负荷如下：

$$\mathcal{N} = \max\{B^k \mid x_{(u,v)} = k, k \in K_u \cap K_v\} \quad (6)$$

对于一个给定的无线业务需求 $\delta_i = (s_i, d_i, b_i, t_i, e_i)$ ，如果 $l_{(u,v)} + b_i > \mathcal{N}$ ，则对无线链路 (u, v) 进行剪枝。此外，对于不存在公共可用信道的 2 个节点之间的无线链路也将直接被剪枝，即如果 $K_u \cap K_v = \emptyset$ ，则对无线链路 (u, v) 进行剪枝。

4.2 自适应路径搜索

为了最大化无线业务接受率，应该最小化每一条无线链路冲突集的大小 $|I_{(u,v)}|$ ，以及消耗的带宽比 $(1 - \mathcal{R}_{\psi}^k(u,v) / B^k)$ ，在本文中，每一条无线链路

权重 $w_{(u,v)}^\Gamma$ 如式(7)所示, 其中 $\alpha + \beta = 1$, $w_{(u,v)}^\Gamma$ 即 κ -Routing 算法的路由指标。

$$w_{(u,v)}^\Gamma = \alpha \frac{|I_{(u,v)}|}{\sum_{(a,b) \in E} |I_{(a,b)}|} + \beta \frac{(1 - \mathfrak{R}_\psi^k(u,v)/B^k)}{\sum_{(a,b) \in E} (1 - \mathfrak{R}_\psi^k(a,b)/B^k)} \quad (7)$$

因此, 以 $w_{(u,v)}^\Gamma$ 为权重采用迪杰斯特拉 (Dijkstra) 算法求源目的之间最短的路由路径。

在本文中, 对于每一个无线业务需求, 都搜索 κ 条路径, 这是因为, 一方面, 路由算法找到的路径不一定是可行路径, 可以通过频谱分配算法使得该路径成为可行路径, 但是, 频谱分配算法不能保证将路由算法构造的不可行路径变成可行路径, 因此, 搜索 κ 条路径, 增大找到可行路径的概率。另一方面, 路由算法是自适应的, 搜索路径的数量 κ 是可调节的, 调节 κ 可以达到算法运行时间与提高无线业务接受率之间的权衡。

4.3 κ -Routing 算法实现

算法 2 κ -Routing 算法

输入: $\Psi, \Gamma, \delta_i = (s_i, d_i, b_i, t_i, e_i)$, κ

输出: p

- 1) while $\forall (u,v) \in E$ do {
- 2) $\mathfrak{N} = \text{Max}\{B^k \mid x_{(u,v)} = k \quad \& \quad k \in K_u \cap K_v\}$
- 3) if $(I_{(u,v)} + b_i > \mathfrak{N} \mid K_u \cap K_v = \emptyset)$
- 4) Pruning (u, v)
- 5) Computing $w_{(u,v)}^\Gamma$
- 6) }
- 7) $p = \text{Dijkstra}(s_i, d_i)$ //迪杰斯特拉算法
- 8) return p

5 QoS 驱动的频谱分配算法

QDSA 算法是 SA2JR 迭代算法第 2 个阶段运行的算法。QDSA 算法的输入是 κ -Routing 算法找到的一条路径 p , 目标是使得所有无线业务都满足 QoS 约束。QDSA 算法包括按需的信道分配和按组的信道调整 2 个阶段。

5.1 按需信道分配

本文提出的信道分配算法是 QoS 约束驱动的, 在当前的信道分配情况下, 只有 κ -Routing 路由算法找的路径不可行或者存在不可行链路时, QDSA 算法才进行信道分配。如果路径 p 可行, 则路径 p 肯定是满足式(2)和式(3)表示的 QoS 约束, 如果路

径 p 不可行, 则路径 p 肯定满足式(8)。对于满足式(8)的无线链路, 称之为不可行链路。

$$\exists (u,v) \in E \text{ s.t. } \mathfrak{R}_\psi^k(u,v) < 0 \quad (8)$$

按需信道分配的流程是这样的, 对于为无线业务构造的任何路径 p , 如果当前信道分配方案 Γ' 下, 任何链路都可行, 则接受该无线业务需求, 否则, 找出其不可行链路, 并且对其分配的信道进行修改。具体见如下分析。

在无线业务构造的路径 p 可行的情况下, 还要检查当前信道分配方案 Γ' 下是否有不可行链路的原因是, 因为不可行链路不一定存在于 κ -Routing 算法为无线业务找的路径 p 中, 有可能 κ -Routing 算法找的路径 p 是可行的, 但是网络中存在不可行路径。路径外链路冲突示意如图 2 所示。

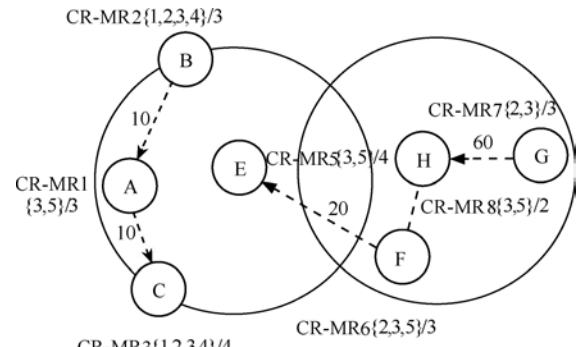


图 2 路径外链路冲突示意

$\delta_1 = (G, H, 60, 0, 30)$, $\delta_2 = (F, E, 20, 10, 25)$ 是已经接受的无线业务, $x_{(G,H)} = 3$, $x_{(F,E)} = 3$, $B^3 = 90$ 。 $\delta_3 = (B, C, 10, 10, 20)$ 为新到的无线业务需求, 并且 $x_{(B,A)} = 3$, $x_{(A,C)} = 3$ 。节点 E 和节点 H 的冲突范围如图 2 中实心圆所示, 无线链路 (E, F) 、 (B, A) 和 (A, C) 的冲突集如式(9)和式(10)所示。

$$I_{(E,F)} = \{(B, A), (A, C), (E, F), (G, H)\} \quad (9)$$

$$I_{(B,A)} = I_{(A,C)} = \{(B, A), (A, C), (E, F)\} \quad (10)$$

无线链路 (E, F) 、 (B, A) 和 (A, C) 的可用带宽如式(11)和式(12)所示。

$$\mathfrak{R}_\psi^3(B, A) = \mathfrak{R}_\psi^3(A, C) = 90 \left(1 - \frac{10}{90} - \frac{10}{90} - \frac{20}{90} \right) = 50 \quad (11)$$

$$\mathfrak{R}_\psi^3(E, F) = 90 \left(1 - \frac{10}{90} - \frac{10}{90} - \frac{20}{90} - \frac{60}{90} \right) < 0 \quad (12)$$

当接受新的无线业务需求 δ_3 时，它的路径 $B \xrightarrow{3} A \xrightarrow{3} C$ 是可行路径，但是 δ_2 的路径 $F \xrightarrow{3} E$ 变成了不可行路径。因此，应当对无线链路 (E, F) 重新分配信道，针对这种情况，提出了一种最佳信道选择策略，如算法 3 所示。本例中，将 (E, F) 的信道置为 5 可使 (E, F) 变成可行路径。

对于不可行链路存在多个可用信道的时候，应当为不可行链路选择最佳信道，正如前面提到的，频谱分配算法影响到路由算法的性能，因此，频谱分配算法应该与路由算法保持一致。即最佳信道选择的标准应该与 κ -Routing 算法的路由指标保持一致。

因此，设 $\xi_{(u,v)}^{\Gamma}$ 表示无线链路 (u, v) 在信道分配方案 Γ 下的权重，并且设 $\xi_{(u,v)}^{\Gamma} = w_{(u,v)}^{\Gamma}$ 。

上文已经提出，为了优化网络资源的使用，在获得相同接受率的情况下，还考虑尽量最小化占用的信道数。在当前信道分配方案 Γ ，未占用的信道数记为 $(|K| - \mathcal{G})$ 。在信道分配方案 Γ' ，未占用的信道数记为 $(|K| - \mathcal{G}')$ 。

当为无线链路选择最佳信道时，将把信道分配方案 Γ 变成 Γ' ，无线链路的权重以及未占用的信道数也将改变。

在当前信道分配方案 Γ 下所有无线链路的权重为 $W(G, \Gamma)$ ，其定义如式 (13) 所示，其中 $\eta + \mu = 1$ 。

$$W(G, \Gamma) = \eta \sum_{(u,v) \in E} \xi_{(u,v)}^{\Gamma} + \mu \frac{(|K| - \mathcal{G})}{|K|} \quad (13)$$

QDSA 算法的目标是找出 $W(G, \Gamma)$ 最小的一种最佳信道分配方案。对于不可行链路，频谱分配算法选择最佳信道的标准是找到一种信道分配方案 Γ' ，使得 $W(G, \Gamma')$ 最小， $W(G, \Gamma')$ 表示新的信道分配方案 Γ' 下所有无线链路的权重和，如式 (14) 所示。

$$W(G, \Gamma') = \eta \sum_{(u,v) \in E} \xi_{(u,v)}^{\Gamma'} + \mu \frac{(|K| - \mathcal{G}')}{|K|} \quad (14)$$

由于每个节点拥有的射频数不一样，设 ρ_i 表示 $v_i \in V$ 使用的射频数，如式 (15) 所示， $1\{\cdot\}$ 是条件函数，判断是否为真。分配给某节点的信道数还必须满足节点的射频约束，如式 (16) 所示。

$$\rho_i = \sum_{v_j \in V} 1\{x_{(i,j)}\} + \sum_{v_j \in V} 1\{x_{(j,i)}\} \quad (15)$$

$$\rho_i \leq I_i \quad (16)$$

算法 3 BestChannel 算法

输入: $(u, v), \Gamma, \Psi$

输出: true/false, Γ'

- 1) $CC = K_u \cap K_v$
- 2) while $\forall c \in CC$ and $c \neq x_{(u,v)}$ do {
- 3) $x'_{(u,v)} = c$
- 4) if 满足约束 (3) & (16) {
- 5) Compute $W(G, \Gamma')$
- 6) if $MinW > W(G, \Gamma')$ {
- 7) $ct = c$
- 8) $MinW = W(G, \Gamma')$
- 9) $feasible = true$
- 10) }
- 11) }
- 12) }
- 13) if (feasible == true) {
- 14) $x'_{(u,v)} = ct$
- 15) return true;
- 16) }
- 17) else {
- 18) return false;
- 19) }

5.2 按组信道调整

按需信道分配策略能够将不可行链路通过重新分配信道，使其变成可行链路，但条件是可行链路必须存在可用信道，对于不可行链路不存在可用信道的情况，按需信道分配策略将变得无能为力。因此，对于不可行链路不存在任何可用信道的情况下，需要采用按组信道调整策略解决。为了更好地说明这类情况，图 3 给出了组信道调整示意。

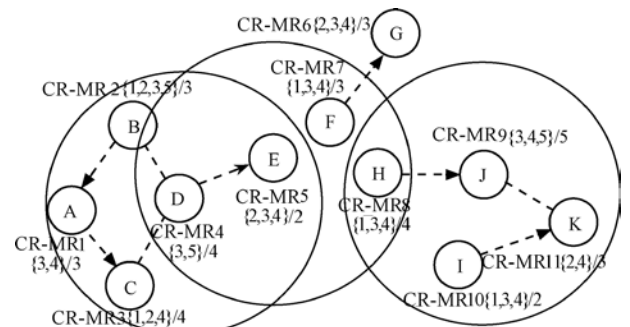


图 3 组信道调整示意

其中， $B^3 = 90$ ， $B^4 = 60$ 。已经接受的 4 个无线业

务如下:

$$\delta_1 = (B, C, 50, 0, 30), \quad x_{(B,A)} = 3, \quad x_{(A,C)} = 4;$$

$$\delta_2 = (F, G, 20, 5, 30), \quad x_{(F,G)} = 3;$$

$$\delta_3 = (H, J, 20, 6, 25), \quad x_{(H,J)} = 3;$$

$$\delta_4 = (I, K, 20, 10, 30), \quad x_{(I,K)} = 4;$$

$\delta_5 = (D, E, 10, 10, 20)$ 为最新到达的无线业务需求, 并且 $x_{(D,E)} = 3$ 。节点 D、节点 E 和节点 J 的冲突范围如图 3 中实心圆所示, 无线链路 (D, E) 的冲突集如式(17)所示。无线链路 (D, E) 的可用带宽如式(18)所示。

$$I_{(D,E)} = \{(B, A), (D, E), (F, G), (H, J)\} \quad (17)$$

$$\mathcal{R}_{\Psi}^3(D, E) = 90 \left(1 - \frac{50}{90} - \frac{10}{90} - \frac{20}{90} - \frac{20}{90} \right) < 0 \quad (18)$$

由式(18)可知, 无线业务 δ_5 的无线链路 (D, E) 分配信道 3 将无法满 QoS 约束, 意味着无线链路 (D, E) 为不可行链路, 并且 (D, E) 没有其他的可用信道, 无法通过按需的信道分配策略使得无线业务 δ_5 被接受。但是无线业务需求 δ_2 和 δ_3 的无线链路 (F, G) 和 (H, J) 还有可用信道 4, 如果调整无线链路 (F, G) 和 (H, J) 的信道为 4, 则 $I_{(D,E)} = \{(B, A), (D, E)\}$, 并且 $\mathcal{R}_{\Psi}^3(D, E) > 0$, 无线业务 δ_5 的无线链路 (D, E) 变成满足 QoS 约束的可行链路。

组信道调整策略存在一定的负面影响, 比如, 调整无线链路 (F, G) 和 (H, J) 的信道为 4 之后, 无线业务 δ_5 存在可行路径, 但是可能会影响无线链路 (D, E) 冲突集之外的无线链路, 如 (I, K) 可能导致无线链路 (I, K) 成为不可行链路。因此, 为了降低组信道调整策略的负面影响, 使得它产生的影响局部化, 本文做如下限定, 只对不可行链路, $2I_R$ 范围内的无线链路进行组信道调整, 例如上例中的不可行链路 (D, E) , 只对 $I_{(D,E)}$ 的 $2I_R$ 内的链路 (F, G) 和 (H, J) 重新分配信道, 具体详见算法 4 所示。

算法 4 GroupChannel 算法

输入: $(u, v), \Gamma, \Psi$

输出: True/False, Γ', Ψ'

- 1) while $\forall (a, b) \in I_{(u,v)} \ \& \ (a, b) \neq (u, v)$ do
- 2) add (a, b) to Group Change Set GCS;
- 3) while $\forall (a, b) \in GCS$ do {

- 4) feasible= BestChannel((a, b))
- 5) if (feasible==true)
- 6) if ($\mathcal{R}_{\Psi}(u, v) > 0 \ \forall (u, v) \in E$)
- 7) return true
- 8) else {
- 9) while $\forall (c, d) \in I_{(a,b)} \ \& \ (c, d) \neq (a, b)$ do
- 10) add (c, d) to Group Change Set GCS2
- 11) while $\forall (c, d) \in GCS2$ do {
- 12) feasible= BestChannel((c, d))
- 13) if (feasible == true)
- 14) if ($\mathcal{R}_{\Psi}(u, v) > 0 \ \forall (u, v) \in E$)
- 15) return true
- 16) else
- 17) Remove (c, d) from GCS2
- 18) if (GCS2=NULL)
- 19) Remove (a, b) from GCS }
- 20) }
- 21) }
- 22) if (GCS=NULL)
- 23) return false
- 24) }

5.3 QDSA 算法

算法 5 QDSA 算法

输入: $\Psi, \Gamma, \delta_i = (s_i, d_i, b_i, t_i, e_i), p$

输出: Accept/Reject

- 1) while $\forall (u, v) \in E$ do {
- 2) if $\mathcal{R}_{\Psi}^k(u, v) < 0$ s.t. $x_{(u,v)} = k$
- 3) add (u, v) to Violated Links Set VLS
- 4) }
- 5) while $\forall (u, v) \in VLS$ do {
- 6) feasible= BestChannel((u, v))
- 7) if (feasible == true)
- 8) Remove (u, v) from VLS
- 9) else {
- 10) feasible = GroupChannel((u, v))
- 11) if (feasible==true)
- 12) Remove (u, v) from VLS
- 13) else
- 14) return Reject;
- 15) }
- 16) }
- 17) if VLS==NULL return Accept

6 性能仿真及结果分析

为了验证本文提出的算法 SA2JR 的正确性和有效性, 实现了 CRCA^[15]以及 JCAR^[16]这 2 个算法。本文进行了大量仿真比较 SA2JR、CRCA、JCAR 算法的性能。实验使用 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无线接入网络, 在 2 500m×2 500m 的区域存在若干可用信道, 主用户随机占用这些可用信道, 因此 CR-Mesh 节点能够机会式地占用这些没有被主用户占用的信道。设 CR-Mesh 路由器节点的传输范围为 50m, 干扰范围为 100m。以下的实验结果均为 500 次独立仿真结果的均值。性能的比较主要包括无线业务需求接受率、占用的信道数目 2 个方面, 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。假设在默认情况下, 所有仿真都是在 CR-Mesh 节点数为 15 和 30 这 2 种环境下进行, 用 $n=15$ 和 $n=30$ 表示这 2 种网络拓扑结构, $n=15$ 和 $n=30$ 的可用信道数分别为 $|K|=5$ 和 $|K|=8$, 各信道的带宽属于 $[0,100]$, 并且随机产生。无线业务需求随机产生, 各无线业务需求带宽 b_i 的最大值为 B_{\max} , $n=15$ 和 $n=30$ 的最大带宽分别为 $B_{\max}=15$ 和 $B_{\max}=25$ 。此外, $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, $\eta=0.5$, $\mu=0.5$, $\kappa=8$ 。

实验主要从以下 3 个方面进行仿真。

- 1) 分析需求到达速率对 SA2JR、CRCA 和 JCAR 算法性能的影响。
- 2) 分析最大需求带宽对 SA2JR、CRCA 和 JCAR 算法性能的影响。
- 3) 分析可用信道数对 SA2JR、CRCA 和 JCAR 算法性能的影响。

6.1 需求到达速率对算法性能的影响

在本仿真中, 采用需求到达速率 λ 表示无线业务需求的到达情况, 并且无线业务需求的到达满足泊松分布, 意味着 λ 为泊松分布的均值。 $\tau_i = e_i - t_i$ (s) 表示 δ_i 持续的时间, t_i 之后, δ_i 占用的频谱和射频资源自动释放。 τ 表示平均持续时间, 默认情况下, 设 $\tau=10$ s。 $\lambda \times \tau$ 表示平均到达无线业务需求个数。对于 $n=15$ 和 $n=30$ 这 2 种网络拓扑结构, 其最大带宽分别为 $B_{\max}=15$ 和 $B_{\max}=25$ 。 $\lambda \tau \left(\frac{1+B_{\max}}{2} \right)$ 表示平均带宽需求。仿真结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知, 不管 $n=15$ 还是 $n=30$ 的网络拓扑结构, 本文提出的 SA2JR 算法的接受率高于其他 2 个算法。这是因为本文以最大化接受率为目标, 并且 SA2JR 算法的确也达到了预期的目标。CRCA 算法的接受率高于 JCAR 算法, 这是因为 CRCA 以最小化每个会话消耗总带宽为目标, 而 JCAR 是以最小化占用的信道数量为目标。随着到达速率 λ 的增大, SA2JR、CRCA 和 JCAR 3 个算法的接受率都随之降低。这是因为随着需求到达速率 λ 的增大, 无线业务需求量增多, 但是能够提供的网络资源是一定的, 因此无需业务需求接受率将降低。

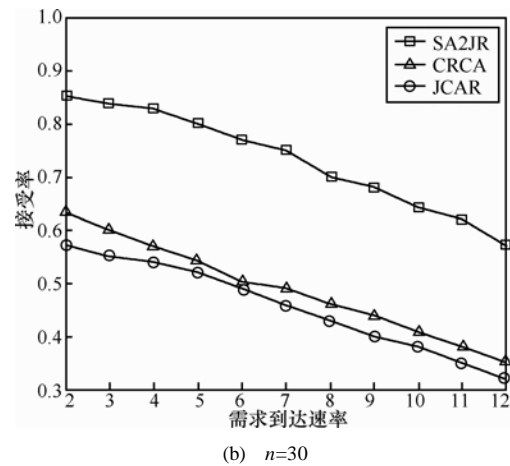
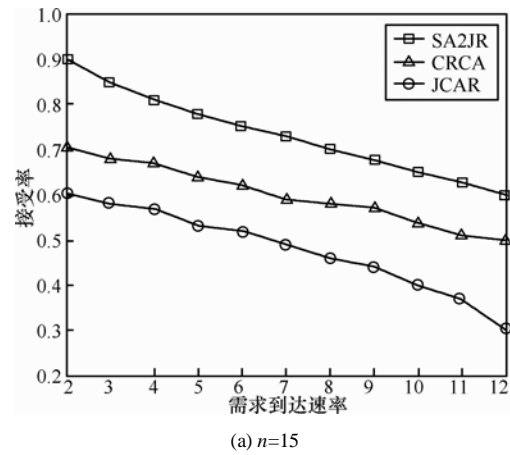
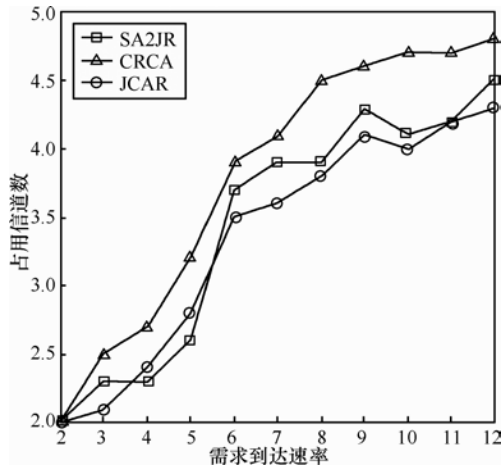


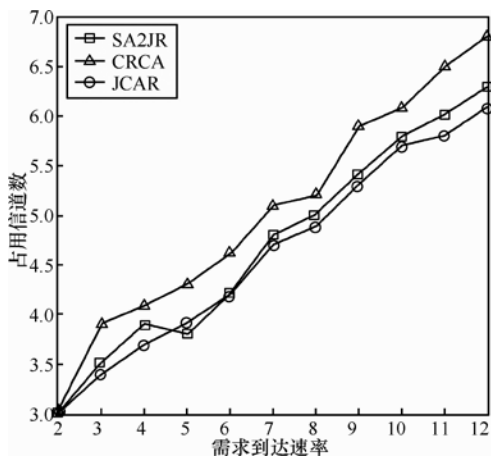
图 4 需求到达速率对接受率的影响

由图 5 可知, CRCA 算法的占用信道数高于 SA2JR 和 JCAR 算法。这是因为 CRCA 以最小化每个会话消耗总带宽为目标, 没有考虑优化占用信道数, 而 SA2JR 和 JCAR 算法考虑了优化占用信道数。此外, SA2JR 和 JCAR 算法占用的信道数基本一样。这说明 SA2JR 也优化了占用的信道数。随着到达速率 λ 的增大, SA2JR、CRCA 和 JCAR 3 个算法占

用的信道数也随之增大，这是因为随着需求到达速率 λ 的增大，无线业务需求量增多，占用的信道数也将随之增多。



(a) $n=15$



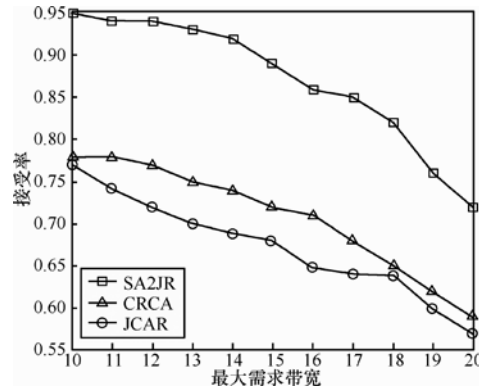
(b) $n=30$

图 5 需求到达速率对占用信道数的影响

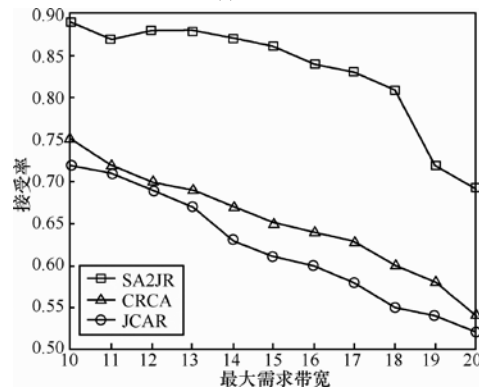
6.2 最大需求带宽对算法性能的影响

在本仿真中，设无线业务需求到达速率 $\lambda=4$ ，其他参数保持默认值，仿真结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知，SA2JR 算法的接受率高于 CRCA 和 JCAR 算法。这是因为 SA2JR 算法以最大化接受率为目标，而 CRCA 以最小化每个会话消耗总带宽为目标，JCAR 是以最小化占用的信道数量为目标，并且 CRCA 算法的接受率高于 JCAR 算法。随着最大需求带宽的增大，SA2JR、CRCA 和 JCAR 3 个算法的接受率都随之降低。这是因为最大需求带宽的增大，意味着各无线业务需求的带宽也随之增大，而网络资源没有增大，因此能够接受的无线业务量将减少。

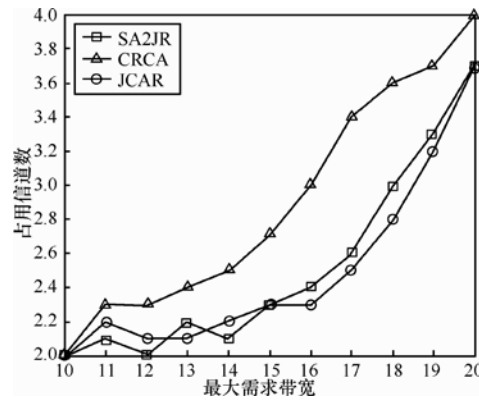


(a) $n=15$

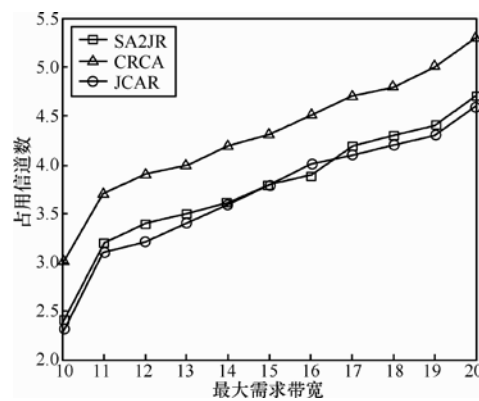


(b) $n=30$

图 6 最大需求带宽对接受率的影响



(a) $n=15$



(b) $n=30$

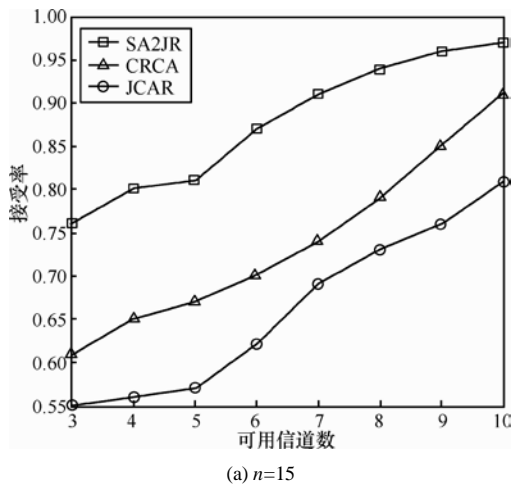
图 7 最大需求带宽对占用信道数的影响

由图 7 可知, SA2JR 和 JCAR 算法占用的信道数低于 CRCA 算法。这是因为 SA2JR 和 JCAR 算法考虑了优化占用的信道数, 而 CRCA 算法没有考虑, 并且, SA2JR 和 JCAR 算法占用的信道数基本一样。随着最大需求带宽的增大, SA2JR、CRCA 和 JCAR 3 个算法的占用信道数都随之增大, 这是因为最大需求带宽增大, 需要使用更多的信道。

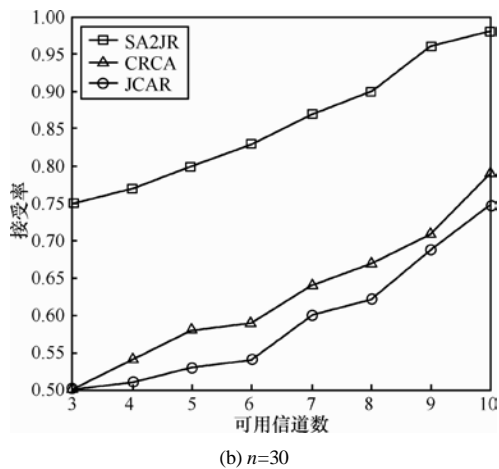
6.3 可用信道数对算法性能的影响

在本仿真中, 设无线业务需求到达速率 $\lambda=4$, 其他参数保持默认值。仿真结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知, SA2JR 算法的接受率高于 CRCA 和 JCAR 算法。随着可用信道数增多, SA2JR、CRCA 和 JCAR 3 个算法的接受率也随之增大, 这是因为有更多可用信道, 更多的无线业务需求将可以被接受, 因此接受率随之增大。



(a) n=15

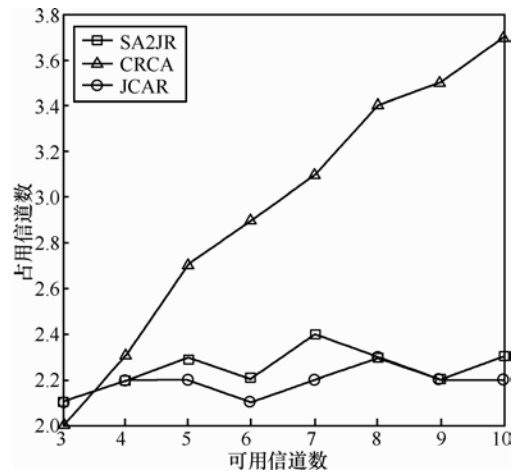


(b) n=30

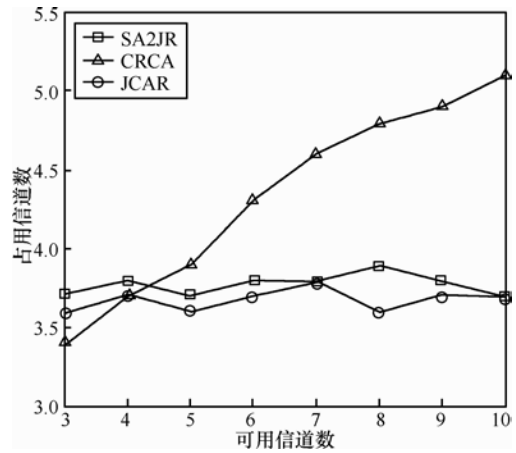
图 8 可用信道数对接受率的影响

由图 9 可知, SA2JR 和 JCAR 算法占用的信道数低于 CRCA 算法, 并且, 随着可用信道数的增多,

CRCA 算法占用的信道数随之增大, 但是 SA2JR 和 JCAR 算法占用的信道基本保持不变, 这是因为 CRCA 主要考虑如何最小化每个会话消耗总带宽, 而没有考虑最小化占用的信道数。



(a) n=15



(b) n=30

图 9 可用信道数对占用信道数的影响

7 结束语

本文研究了认知无线 Mesh 网络中以最大化无线业务接受率为目标, 满足 QoS 约束的路由与频谱分配问题。提出了一个自适应的满足 QoS 约束的路由与频谱分配算法。SA2JR 算法包含按需的 κ -路径路由算法, 以及 QoS 驱动的频谱分配算法。通过大量的仿真发现, 通过合理的参数设置, SA2JR 能够达到最大化无线业务接受率的目标。SA2JR 算法的接受率高于 CRCA 和 JCAR 算法, SA2JR 算法的占用信道数低于 CRCA 算法, 与 JCAR 算法相差不多。而 JCAR 算法是以最小化占用信道数为目标的算

法,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 SA2JR 在获得较高的无线业务接受率的情况下,还能占用比较少的信道,达到优化网络资源使用的目的。下一步工作将研究分布式的满足 QoS 约束的路由与频谱分配算法。

参考文献:

- [1] MITOLA J III. Cognitive radio: making software radio more personal [J]. IEEE Personal Communication, 1999, 6(4):13-18.
- [2] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, MOHANTY S. Next generation /dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(9):2127-2159.
- [3] 仵国锋, 季仲梅, 张静等. 认知无线 Mesh 网络[J]. 信息工程大学学报, 2010, 11(8):429-433.
- WU G F, JI Z M, ZHANG J, *et al.* Cognitive wireless mesh networks[J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(8):429-433.
- [4] BOUABDALLAH N, ISHIBASHI B, BOUTABA R. Performance of cognitive radio-based wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(1):122-135.
- [5] BRUNO R, NURCHIS M. Survey on diversity-based routing in wireless mesh networks challenges and solutions[J]. Computer Communications, 2010, 33(3):269-282.
- [6] SI W S, SELVAKENNEDY S, ZOMAYA A Y. An overview of channel assignment methods for multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(5): 505-524.
- [7] TIAN Z, LEUS G, LOTTICI V. Joint dynamic resource allocation and waveform adaptation for cognitive networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2):443-454.
- [8] 郝丹丹, 邹仕洪, 程时端. 开放式频谱系统中启发式动态频谱分配算法[J]. 软件学报, 2008, 19(3):479-491.
- HAO D D, ZOU S H, CHENG S D. Open-spectrum systems heuristic dynamic spectrum allocation algorithm[J]. Journal of Software, 2008, 19(3):479-491.
- [9] 黄丽亚, 刘臣, 王锁萍. 改进的认知无线电频谱共享博弈模型[J]. 通信学报, 2010, 31(2):136-140.
- HUANG L Y, LIU C, WANG S P. Improved cognitive radio spectrum sharing game model[J]. Journal on Communications, 2010, 31(2): 136-140.
- [10] 柴争义, 刘芳. 基于免疫克隆选择优化的认知无线网络频谱分配[J]. 通信学报, 2010, 31(11):92-100.
- CHAI Z Y, LIU F. Spectrum allocation of cognitive wireless network based on immune clone selection optimization[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11):92-100.
- [11] DULAIMI A A, RAWESHIDY A H, COSMAS J, *et al.* Cognitive mesh networks[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2010, 5(3): 54-60.
- [12] PEI T R, ZHAO Z, ZENG W L, *et al.* A cognitive improved hierarchical AODV routing protocol for cognitive wireless mesh network[J]. Information Technology Journal, 2011, 10(2):376-384.
- [13] SUN X B, ZHANG Y R, ZHAO C L. A new routing protocol in cognitive wireless mesh networks[A]. Proc of International Conference on Advanced Intelligence and Awareness Internet[C]. 2010.123-126.
- [14] AMINI R M, DZIONG Z. A framework for routing and channel allocation in cognitive wireless mesh networks [A]. Proc of 7th International Symposiums on Wireless Communication Systems [C]. 2010. 1017-1021.
- [15] YONG D, LI X. Routing and spectrum allocation for video on-demand streaming in cognitive wireless mesh networks [A]. Proc of IEEE 7th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems[C]. 2010. 242-251.
- [16] LEE D H, JEON W S, JEONG D G. Joint channel assignment and routing in cognitive radio-based wireless mesh networks [A]. Proc of IEEE Vehicular Technology Conference[C]. 2010. 1-5.
- [17] ZHANG G A, GU J Y, BAO Z H. Distributed joint routing and channel allocation algorithm in cognitive wireless mesh networks [A]. Proc of 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology[C]. 2010.432-437.
- [18] 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[J]. 计算机科学, 2011, 38(5):45-48.
- GU J Y, ZHANG G A, BAO Z H. Joint multi-path routing and channel assignment strategy for cognitive wireless mesh networks[J]. Computer Science, 2011, 38(5):45-48.
- [19] 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[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1975-1979.
- LI Y, DONG Y N, ZHAO H T. Dynamic layered-graph routing model and routing policy in cognitive radio Mesh networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 1975-1979.

作者简介:



邱祝芳 (1982-), 男, 湖南耒阳人, 中南大学博士生, 中南林业科技大学讲师, 主要研究方向为下一代宽带无线通信系统、认知无线 Mesh 网络。

陈志刚 (1964-), 男, 湖南益阳人, 博士, 中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络计算与分布式处理。

邓晓衡 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 中南大学副教授, 主要研究方向为无线网络、网络计算与可信计算。