

基于信干噪比模型的多跳认知网络速率优化

田 峰,朱雯君

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:随着无线通信技术的迅速发展,频谱短缺问题日益突出。认知无线电技术作为缓解频谱供需矛盾的重要技术受到了广泛关注。文中综合研究了多跳认知网络的物理层、链路层及网络层的限制,以信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)模型下多跳认知网络的速率问题为优化目标,形成混合整数非线性规划(MINLP)问题。针对该问题,通过重构线性化技术(RLT)实现线性松弛,得到问题的最优解。仿真验证了该方法的有效性,多跳认知网络跨层设计对系统性能的影响,实现了认知网络速率优化的目标。

关键词:多跳认知网络;重构线性化技术;信干噪比模型;速率

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)08-0113-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.08.024

Rate Optimization Based on SINR in Cognitive Radio Network

TIAN Feng, ZHU Wen-jun

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University
of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the rapid development of wireless communication, problem of spectrum scarcity is becoming more and more prominent. Cognitive radio network, as an important technology to ease the contradiction between supply and demand, has been widely followed. In this paper, the constraints of physical, link and network layers is researched comprehensively with objective of maximizing rate in cognitive radio networks under Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR). The problem is formed of mixed integer nonlinear program. To solve the problem, a Reformulation Linearization Technique (RLT) is adopted and optimal solution for it is obtained. Simulation demonstrates the efficacy of the solution procedure, offering the benefit for cross-layer design and achieving the goal of rate optimization for cognitive radio network.

Key words: multi-hop cognitive radio network; RLT; SINR; rate

0 引 言

随着无线通信技术的迅速发展,无线设备及应用的爆炸式增长对有限频谱资源的要求越来越高^[1]。另一方面,研究表明现有的频谱分配方案未能使已分配的频谱资源得到充分利用,导致频谱短缺问题日益突出^[2-3]。认知无线电技术作为解决频谱资源匮乏问题的新技术得到了广泛研究^[4-6]。认知网络是具有认知特性的通信网络,网络中的非授权用户能够感知当前通信环境中授权用户的空闲频谱,即频谱空洞^[7]。在保障授权用户通信质量不受影响的情况下,动态地调整自身系统参数以接入到空闲频谱。一旦授权用户需要使用当前频谱,就立即让出频段^[8-9]。

认知网络的速率问题近年来得到了广泛研究。文献[10]研究了基于传输功率和干扰温度的加权和速率问题,提出了全局优化算法求解该问题的 ε -最优解。文献[11]在满足次用户QoS要求及主用户干扰限制的条件下,设计了一个框架联合考虑次用户的接入控制和速率/功率分配方案。但是,上述研究没有考虑跨层优化。文献[12]采用跨层优化策略研究多跳认知网络在时变信道的速率分配、路由选择、频谱共享问题。文献[13]综合考虑频段分配和流量控制,提出了分布式速率自适应算法。文献[14]以最大化次用户速率为目标,研究了主、次节点共存多跳认知网络,提出主、次用户协作通信方案。但是,上述文献所考虑

收稿日期:2015-11-10

修回日期:2016-03-09

网络出版时间:2016-06-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61001077);教育部重点实验室开放课题(NYKL201308)

作者简介:田 峰(1979-),男,副教授,研究生导师,研究方向为认知无线电与动态频谱资源管理、协作通信和干扰管理等;朱雯君(1990-),女,硕士研究生,研究方向为认知无线网络的优化。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160622.0845.054.html>

的干扰是基于协议模型,无法准确地反映网络干扰的实际情况。

文中主要在文献[14]的基础上研究了多跳认知网络物理层、链路层及网络层在时域上的限制,以信干噪比模型下多跳认知网络速率的优化为目标,形成混合整数非线性优化问题。通过重构线性化技术(RLT)^[15]将原本非线性问题松弛为线性问题,再通过CPLEX计算,获得优化问题的最优解。

1 系统模型及优化问题描述

1.1 系统描述

如图1所示,文中考虑的多跳认知网络由 N 个节点和 L 组网络会话组成。其中每组会话的源节点 $\text{Src}(l)$ ($l \in L$)与目的节点 $\text{Dst}(l)$ ($l \in L$)之间没有直达信道,以多跳无线方式通信。数据以帧为单位从源节点传送到目的节点,每一帧分为10个时隙。每个节点采用半双工模式工作,即节点在某个时隙只能接收或发送数据,不能同时进行。各节点的通信采用单播方式,即每次的数据传送仅有一个发送方或接收方。为了提高多跳认知网络的系统性能,假定同一会话的数据流可以经过不同的链路到达目的节点。

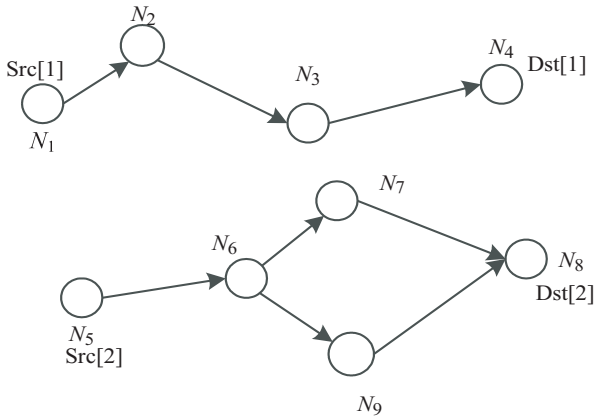


图1 多跳认知网络的网络拓扑图

1.2 干扰模型

目前认知无线网络中存在两种应用比较广泛的干扰模型,分别是协议模型和物理模型。在协议模型中,当某区域内存在一个链路进行传输时,那么检测到该传输的其他链路就会认为干扰过大而不进行通信。直到在该区域检测不到有链路进行通信后才使用信道进行通信,即通过独占信道的方式消除用户干扰。在物理模型中,链路的传输不是取决于区域内是否存在其他正在传输的链路,而是取决于区域内所有传输的链路所造成的干扰是否大于某个门限值,即信干噪比(SINR)模型。与协议模型相比,信干噪比模型能够更准确地反映网络干扰的实际情况,因此文中将使用该模型分析网络中认知节点之间的干扰特性。定义信干

噪比变量 $s_{ij}(t)$ ($i \in N, j \in N, t \in [0, T]$)表示节点 i 在时隙 t 向节点 j 发送数据时,接收节点 j 的信干噪比。采用 η 表示加性高斯白噪声的功率谱密度, W 表示系统带宽; $p_{ij}(t)$ 表示节点 i 在时隙 t 向节点 j 发送数据时的发送功率, T_i 表示位于节点 i 传输范围的节点集合,则接收节点的SINR计算公式如下:

$$s_{ij}(t) = \frac{g_{ij}p_{ij}(t)}{\eta W + \sum_{k \in N, k \neq i, j} \sum_{h \in T_i} g_{kh}p_{kh}(t)} \quad (i \in N, j \in T_i, 1 \leq t \leq T) \quad (1)$$

其中,节点 i 和节点 j 之间的传播增益 $g_{ij} = d_{ij}^{-4}$; d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离。

为了保证节点之间成功传输和达到合理的通信速率,接收节点的SINR必须满足门限值 β 的限制,即:

$$s_{ij}(t) \geq \beta \quad (2)$$

1.3 调度模型

定义链路调度变量 $x_{ij}(t)$ 表示链路 (i, j) 在时隙 t 上的调度情况。若在时隙 t 上,链路 (i, j) 被激活且有数据传输,则 $x_{ij}(t) = 1$;否则, $x_{ij}(t) = 0$ 。由于网络中节点采用半双工单播方式,则有:

$$\sum_{k \in T_i} x_{ki}(t) + \sum_{j \in T_i} x_{ij}(t) \leq 1 \quad (i \in N, k \in T_i, j \in T_i) \quad (3)$$

1.4 链路容量与数据流模型

文中采用多会话数据流模型描述网络中数据流的多径路由,从同一源节点发送数据至同一目的节点的数据流称为一个会话。在多跳认知网络中,源节点的数据需要经过多个中间节点转发才能到达目的节点。为了提高系统性能,允许同一会话的数据流经过不同路径到达目的节点。定义 $s(l)$ 表示会话 $l \in L$ 的源节点, $d(l)$ 表示会话 $l \in L$ 的目的节点, $f_{ij}(l)$ 表示会话 l 数据流在链路 (i, j) 上的数据速率, $r(l)$ 表示会话 l 上的数据速率总需求,则有:

(1)假定节点 i 为会话 l 的源节点,源节点的数据速率总需求等于从源节点流出的数据速率总和:

$$\sum_{j \in T_i} f_{ij}(l) = r(l) \quad (l \in L, i = s(l)) \quad (4)$$

(2)假定节点 i 为会话 l 的中继节点,流入该中继节点的数据速率之和等于流出该中继节点的数据速率之和:

$$\sum_{j \in T_i} f_{ij}(l) = \sum_{k \in T_i} f_{ki}(l) \quad (l \in L, i \neq s(l), d(l)) \quad (5)$$

(3)假定节点 i 为会话 l 的目的节点,流入该节点的数据速率之和必须等于该节点的数据速率总需求:

$$\sum_{k \in T_i} f_{ki}(l) = r(l) \quad (l \in L, i = d(l)) \quad (6)$$

(4)所有流经该链路的数据速率总和不能超过该

链路的实际有效容量:

$$\sum_{l \in L} f_{ij}(l) \leq \frac{1}{T} \sum_{1 \leq l \leq T} W \log_2(1 + s_{ij}(t)) \quad (7)$$

1.5 优化问题描述

1.5.1 目标函数

多跳认知网络的速率问题是近年来的研究热点。通常最简单的方法是分析网络中所有会话可达到的速率之和,但该方法对各个会话缺乏公平性。因而,采用另一种方法—最大化最小目标函数,即最大化网络中的最小会话速率。定义 r_{\min} 表示多跳认知网络中所有会话的最小数据速率,即:

$$r_{\min} \leq r(l) \quad (8)$$

因此,优化问题的目标函数为:

$$\text{Max: } r_{\min} \quad (9)$$

1.5.2 传输功率的离散化

在上面的讨论中,假定节点的发送功率是连续的。实际上,多跳认知网络节点的发送功率 $p_{ij}(t)$ 为 $[0, P]$ 范围上的离散值。因此,定义 Q 表示发送节点功率量化等级总数,定义 $q_{ij}(t)$ 表示节点 i 与节点 j 在时隙 t 上发送数据时,节点 i 的发送功率等级。当调度变量 $x_{ij}(t) = 1$ 时, $q_{ij}(t)$ 为 $[1, Q]$ 范围上的任意值;当 $x_{ij}(t) = 0, q_{ij}(t) = 0$, 因此有:

$$x_{ij}(t) \leq q_{ij}(t) \leq Qx_{ij}(t) \quad (10)$$

根据 $q_{ij}(t)$ 与 $p_{ij}(t)$ 的关系 $\frac{p_{ij}(t)}{P} = \frac{q_{ij}(t)}{Q}$, 式(1)

变换为:

$$s_{ij}(t) = \frac{g_{ij} \frac{q_{ij}(t)}{Q} P}{\eta W + \sum_{k \in N} \sum_{h \in T_i} g_{kj} \frac{q_{kh}(t)}{Q} P} \quad (11)$$

上式经变换等价于:

$$\frac{\eta W Q}{P} s_{ij}(t) + \sum_{k \in N} \sum_{h \in T_i} g_{kj} q_{kh}(t) s_{ij}(t) - g_{ij} q_{ij}(t) = 0 \quad (12)$$

为了简化,引入变量 $\sum_{h \in T_i} q_{kh} = v_k(t)$, 则式(12)进一步改写为:

$$\frac{\eta W Q}{P} s_{ij}(t) + \sum_{k \in N} g_{kj} v_k(t) s_{ij}(t) - g_{ij} q_{ij}(t) = 0 \quad (13)$$

1.5.3 优化问题

综合调度、数据流、功率、信干噪比等约束条件,多跳认知网络速率最大化问题可以表示为:

$$\text{Max: } r_{\min}$$

$$\text{s. t}$$

$$\sum_{k \in T_i} x_{ki}(t) + \sum_{j \in T_i} x_{ij}(t) \leq 1 \quad (i \in N, k \in T_i, j \in T_i)$$

$$r_{\min} - r(l) \leq 0$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in T_i} q_{ij}(t) - v_i(t) &= 0 \\ q_{ij}(t) - Qx_{ij}(t) &\leq 0 \\ \frac{\eta W Q}{P} s_{ij}(t) + \sum_{k \in N} g_{kj} v_k(t) s_{ij}(t) - g_{ij} q_{ij}(t) &= 0 \\ s_{ij}(t) - \beta x_{ij}(t) &\geq 0 \\ \sum_{j \in T_i} f_{ij}(l) &= r(l) \quad (l \in L, i = s(l)) \\ \sum_{j \in T_i} f_{ij}(l) &= \sum_{k \in T_i} f_{ki}(l) \quad (l \in L, i \neq s(l), d(l)) \\ \sum_{k \in T_i} f_{ki}(l) &= r(l) \quad (l \in L, i = d(l)) \\ \sum_{l \in L} f_{ij}(l) &\leq \frac{1}{T} \sum_{1 \leq l \leq T} W \log_2(1 + s_{ij}(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $Q, \eta, W, \beta, P, g_{ij}$ 为常量; $x_{ij}(t), q_{ij}(t), v_i(t), s_{ij}(t), f_{ij}(l)$ 为变量。

2 优化问题求解

上述优化问题包含了整数型的变量 $x_{ij}(t), q_{ij}(t)$, 故该优化是一个混合整数非线性规划(MINLP)问题。MINLP问题通常是 NP-hard 问题,直接求解非常复杂。因此对优化问题的求解分成两步:第一步利用重新线性化技术(RLT)对非线性优化问题进行线性松弛;第二步利用 CPLEX 中的分支定界法计算出问题的最优解。

重构线性化技术用一些新的变量替换非线性多项式,对新加的变量增加一些线性约束条件,达到把非线性约束放松成线性约束的目的。以式(14)描述的优化问题中多项式 $v_i(t)s_{ij}(t)$ 为例,详细介绍 RLT 放松过程。假设变量 $v_i(t)$ 的下界为 $v_i(t)_L$, 上界为 $v_i(t)_U$, 即 $v_i(t)_L \leq v_i(t) \leq v_i(t)_U$ 。变量 $s_{ij}(t)$ 的下界为 $s_{ij}(t)_L$, 上界为 $s_{ij}(t)_U$, 即 $s_{ij}(t)_L \leq s_{ij}(t) \leq s_{ij}(t)_U$ 。根据 RLT 技术,可得

$$\begin{aligned} [v_i(t) - v_i(t)_L] \cdot [s_{ij}(t) - s_{ij}(t)_L] &\geq 0 \\ [v_i(t)_U - v_i(t)] \cdot [s_{ij}(t) - s_{ij}(t)_L] &\geq 0 \\ [v_i(t) - v_i(t)_L] \cdot [s_{ij}(t)_U - s_{ij}(t)] &\geq 0 \\ [v_i(t)_U - v_i(t)] \cdot [s_{ij}(t)_U - s_{ij}(t)] &\geq 0 \end{aligned}$$

引入变量 $u_{ijk}(t) = v_k(t) s_{ij}(t)$, 通过展开上述不等式并带入变量 $u_{ijk}(t)$, 可得 RLT 约束:

$$\begin{aligned} v_i(t)_L \cdot s_{ij}(t) + s_{ij}(t)_L \cdot v_i(t) - u_{ijk}(t) &\leq v_i(t)_L \cdot s_{ij}(t)_L \\ v_i(t)_U \cdot s_{ij}(t) + s_{ij}(t)_L \cdot v_i(t) - u_{ijk}(t) &\leq v_i(t)_U \cdot s_{ij}(t)_L \\ v_i(t)_L \cdot s_{ij}(t) + s_{ij}(t)_U \cdot v_i(t) - u_{ijk}(t) &\leq v_i(t)_L \cdot s_{ij}(t)_U \\ v_i(t)_U \cdot s_{ij}(t) + s_{ij}(t)_U \cdot v_i(t) - u_{ijk}(t) &\leq v_i(t)_U \cdot s_{ij}(t)_U \end{aligned}$$

因此, 优化问题中多项式 $v_i(t)s_{ij}(t)$ 可由上述 $u_{ijk}(t)$ 变量的 RLT 不等式约束替换。

对于式 (14) 的非线性变量 $\log_2(1 + s_{ij}(t)) = \frac{\log(1 + s_{ij}(t))}{\log 2}$, 引入变量 $c_{ij}(t) = \log(1 + s_{ij}(t))$, 且受限于切线 I, II, III 和弧线 IV 所围成的范围之内, 如图 2 所示。三个切线的切点分别为 $(1 + s_{ij}(t)_L, \log(1 + s_{ij}(t)_L))$, $(1 + \beta, \log(1 + \beta))$, $(1 + s_{ij}(t)_U, \log(1 + s_{ij}(t)_U))$, 其中 $\beta = \{ [[1 + s_{ij}(t)_L] \cdot [1 + s_{ij}(t)_U] \cdot [\log(1 + s_{ij}(t)_U) - \log(1 + s_{ij}(t)_L)]] / [s_{ij}(t)_U - s_{ij}(t)_L] \} - 1$, $1 + \beta$ 为切线 I、III 交点的横坐标。弧线 IV 为点 $(1 + s_{ij}(t)_L, \log(1 + s_{ij}(t)_L))$ 与 $(1 + s_{ij}(t)_U, \log(1 + s_{ij}(t)_U))$ 的连线, 则变量 $c_{ij}(t)$ 约束在下列线性条件之内:

$$\begin{aligned} [1 + s_{ij}(t)_L]c_{ij}(t) - s_{ij}(t) &\leq [1 + s_{ij}(t)_L] \cdot [\log(1 + s_{ij}(t)_L) - 1] + 1 \\ [1 + \beta]c_{ij}(t) - s_{ij}(t) &\leq [1 + \beta] \cdot [\log(1 + \beta) - 1] + 1 \\ [1 + s_{ij}(t)_U]c_{ij}(t) - s_{ij}(t) &\leq [1 + s_{ij}(t)_U] \cdot [\log(1 + s_{ij}(t)_U) - 1] + 1 \\ [s_{ij}(t)_U - s_{ij}(t)_L] \cdot c_{ij}(t) + [\log(1 + s_{ij}(t)_L) - \log(1 + s_{ij}(t)_U)] \cdot s_{ij}(t) &\geq s_{ij}(t)_U \cdot \log(1 + s_{ij}(t)_L) - s_{ij}(t)_L \cdot \log(1 + s_{ij}(t)_U) \end{aligned}$$

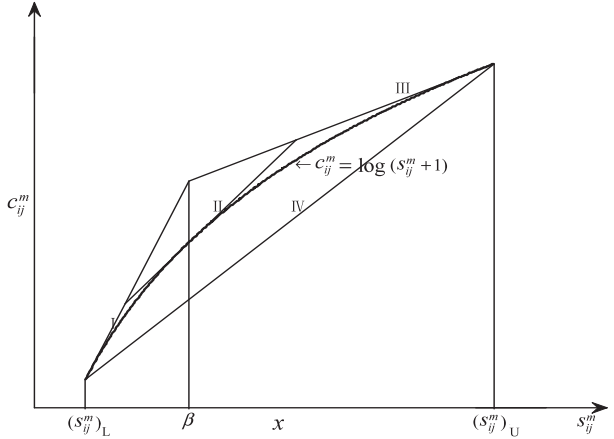


图 2 变量 $c_{ij}(t) = \log(1 + s_{ij}(t))$ 的凸包

MINLP 优化问题经 RLT 技术变换成线性优化问题后, 可以运用 CPLEX 中的分支定界法计算出问题的最优解。

3 仿真结果

文中假设多跳认知网络由 30 个节点组成, 且随机分布在 100×100 的空间范围内, 4 组会话进行数据通信。多跳认知网络中每组会话源节点、目的节点选择情况如表 1 所示。每个节点可使用的带宽 $W = 10$, 接收节点接收信噪比门限 $\beta = 3$, 数据帧 T 分为 10 个时

隙。可调节的量化功率等级总数 $Q = 10$, 发送节点最大发送功率为 $P = (20)^4 \beta \eta W$ 。

表 2 给出了 30 个节点在多跳认知网络中各个时隙功率等级, 表 3 给出了数据接收节点在各个时隙上的信干噪比情况。

表 1 30 个节点 4 组会话网络的源节点及目标节点

会话 l	源节点 $s(l)$	目标节点 $d(l)$
1	N_{16}	N_6
2	N_{20}	N_{23}
3	N_{14}	N_{29}
4	N_{12}	N_1

表 2 节点功率分布

时隙	节点功率
1	$q_{1,28}(1) = 10, q_{4,20}(1) = 10, q_{5,25}(1) = 10, q_{10,8}(1) = 7, q_{12,22}(1) = 10, q_{14,18}(1) = 10, q_{15,13}(1) = 10, q_{21,23}(1) = 10, q_{27,19}(1) = 10$
	$q_{4,1}(2) = 10, q_{9,25}(2) = 10, q_{12,22}(2) = 10, q_{16,14}(2) = 10, q_{18,27}(2) = 10, q_{20,13}(2) = 10, q_{21,23}(2) = 10, q_{28,15}(2) = 10$
2	$q_{4,15}(3) = 10, q_{8,2}(3) = 10, q_{14,18}(3) = 10, q_{20,13}(3) = 10, q_{21,29}(3) = 10, q_{22,6}(3) = 10, q_{27,19}(3) = 10, q_{28,1}(3) = 4$
	$q_{10,8}(4) = 10, q_{12,22}(4) = 6, q_{14,18}(4) = 10, q_{15,13}(4) = 10, q_{20,4}(4) = 9, q_{21,23}(4) = 10, q_{25,28}(4) = 10, q_{27,19}(4) = 10$
3	$q_{4,20}(5) = 10, q_{5,10}(5) = 10, q_{9,25}(5) = 10, q_{13,21}(5) = 3, q_{15,28}(5) = 10, q_{22,6}(5) = 10, q_{27,1}(5) = 10$
	$q_{2,30}(6) = 3, q_{14,18}(6) = 10, q_{15,13}(6) = 10, q_{19,9}(6) = 4, q_{20,4}(6) = 10, q_{21,29}(6) = 7, q_{22,12}(6) = 10, q_{25,28}(6) = 10, q_{27,1}(6) = 10$
4	$q_{4,1}(7) = 10, q_{9,25}(7) = 10, q_{13,21}(7) = 10, q_{14,27}(7) = 10, q_{22,20}(7) = 8, q_{24,29}(7) = 3, q_{28,15}(7) = 10$
	$q_{2,30}(8) = 9, q_{9,5}(8) = 7, q_{12,22}(8) = 10, q_{13,21}(8) = 9, q_{14,18}(8) = 10, q_{15,4}(8) = 10, q_{20,6}(8) = 10, q_{27,19}(8) = 10, q_{28,1}(8) = 10$
5	$q_{1,4}(9) = 10, q_{15,13}(9) = 10, q_{16,14}(9) = 4, q_{18,27}(9) = 7, q_{19,9}(9) = 8, q_{22,20}(9) = 10, q_{23,24}(9) = 3$
	$q_{1,4}(10) = 10, q_{8,2}(10) = 10, q_{13,21}(10) = 10, q_{16,14}(10) = 10, q_{18,27}(10) = 10, q_{19,9}(10) = 10, q_{20,22}(10) = 10, q_{28,15}(10) = 10$

由表 3 看出, 接收节点满足信噪比 $\beta \geq 3$ 条件的限制, 故发送节点与接收节点可成功通信, 实际发送功率理论上应不为 0, 表 2 很好地验证了这一结论。下

列数据反映了每组会话被激活链路上数据流的数据速率:

表 3 接收节点信噪比

时隙	信噪比
1	$s_{1,28}(1) = 8.658, s_{4,20}(1) = 11.430, s_{5,25}(1) = 3.491,$
	$s_{10,8}(1) = 3, s_{12,22}(1) = 5.767, s_{14,18}(1) = 9.460,$
	$s_{15,13}(1) = 3.350, s_{21,23}(1) = 8.593, s_{27,19}(1) = 4.626$
2	$s_{4,1}(2) = 11.430, s_{9,25}(2) = 3.041, s_{12,22}(2) = 5.767,$
	$s_{16,14}(2) = 9.220, s_{18,27}(2) = 14.274, s_{20,13}(2) =$
	$14.031, s_{21,23}(2) = 8.593, s_{28,15}(2) = 22.726$
3	$s_{4,15}(3) = 13.305, s_{8,2}(3) = 3.930, s_{14,18}(3) = 9.460,$
	$s_{20,13}(3) = 18.417, s_{21,29}(3) = 9.789, s_{22,6}(3) =$
	$4.631, s_{27,19}(3) = 4.626, s_{28,1}(3) = 3.463$
4	$s_{10,8}(4) = 4.657, s_{12,22}(4) = 3.460, s_{14,18}(4) = 3.195,$
	$s_{15,13}(4) = 3.350, s_{20,4}(4) = 10.280, s_{21,23}(4) =$
	$8.593, s_{25,28}(4) = 11.970, s_{27,19}(4) = 3.507$
5	$s_{4,20}(5) = 11.430, s_{5,10}(5) = 3, s_{9,25}(5) = 3.041,$
	$s_{13,21}(5) = 4.060, s_{15,28}(5) = 11.434, s_{22,6}(5) =$
	$4.631, s_{27,1}(5) = 7.509,$
6	$s_{2,30}(6) = 4.151, s_{14,18}(6) = 9.460, s_{15,13}(6) = 3.350,$
	$s_{19,9}(6) = 3.900, s_{20,4}(6) = 11.422, s_{21,29}(6) =$
	$6.852, s_{22,12}(6) = 5.767, s_{25,28}(6) = 11.970, s_{27,1}(6) =$
7	$s_{4,1}(7) = 3.344, s_{9,25}(7) = 3, s_{13,21}(7) = 13.533,$
	$s_{14,27}(7) = 6.108, s_{22,20}(7) = 9.865, s_{24,29}(7) =$
	$3.363, s_{28,15}(7) = 4.895$
8	$s_{3,20}(8) = 12.454, s_{9,5}(8) = 8.690, s_{12,22}(8) = 5.767,$
	$s_{13,21}(8) = 12.180, s_{14,18}(8) = 9.460, s_{15,4}(8) =$
	$13.305, s_{20,6}(8) = 10.612, s_{27,19}(8) = 4.626, s_{28,1}(8) =$
9	$s_{1,4}(9) = 3.344, s_{15,13}(9) = 3.351, s_{16,14}(9) = 3,$
	$s_{18,27}(9) = 9.992, s_{19,9}(9) = 7.250, s_{22,20}(9) =$
	$12.331, s_{23,24}(9) = 4.322$
10	$s_{1,4}(10) = 3.344, s_{8,2}(10) = 3.930, s_{13,21}(10) =$
	$13.533, s_{16,14}(10) = 5.903, s_{18,27}(10) = 14.274,$
	$s_{19,9}(10) = 9.749, s_{20,22}(10) = 12.337, s_{28,15}(10) =$
	16.295

会话 1:

$f_{1,4}(1) = 4.245, f_{4,20}(1) = 8.872, f_{5,25}(1) = 1.761,$
 $f_{9,5}(1) = 1.761, f_{9,25}(1) = 2.866, f_{14,18}(1) = 5.894,$
 $f_{14,27}(1) = 2.978, f_{15,4}(1) = 4.626, f_{16,14}(1) = 8.872,$
 $f_{18,27}(1) = 5.894, f_{19,9}(1) = 4.626, f_{20,6}(1) = 3.968,$
 $f_{20,22}(1) = 4.904, f_{22,6}(1) = 4.904, f_{25,28}(1) = 4.626,$
 $f_{27,1}(1) = 4.245, f_{27,19}(1) = 4.626, f_{28,15}(1) = 4.626$

会话 2:

$f_{13,21}(2) = 8.872, f_{20,13}(2) = 8.872, f_{21,23}(2) = 8.871$

会话 3:

$f_{1,28}(3) = 3.767, f_{2,28}(3) = 2.016, f_{4,20}(3) = 0.374,$
 $f_{5,10}(3) = 2.016, f_{8,2}(3) = 2.016, f_{9,5}(3) = 2.016,$
 $f_{9,25}(3) = 3.088, f_{10,8}(3) = 2.016, f_{13,21}(3) = 8.872,$
 $f_{14,18}(3) = 8.872, f_{15,4}(3) = 0.374, f_{15,13}(3) = 8.498,$
 $f_{18,27}(3) = 8.871, f_{19,9}(3) = 5.10, f_{20,13}(3) = 0.374,$
 $f_{21,23}(3) = 1.546, f_{21,29}(3) = 7.326, f_{23,24}(3) = 1.546,$
 $f_{24,29}(3) = 1.546, f_{25,28}(3) = 3.088, f_{27,1}(3) = 3.767,$
 $f_{27,19}(3) = 5.105, f_{28,15}(3) = 8.872$

会话 4:

$f_{4,1}(4) = 4.245, f_{4,15}(4) = 4.626, f_{12,22}(4) = 8.872,$
 $f_{15,28}(4) = 4.626, f_{20,4}(4) = 8.872, f_{22,20}(4) = 8.872,$
 $f_{28,1}(4) = 4.626$

以会话 4 为例,链路 (20,4)、(4,1) 及链路 (4,15) 满足流入节点数据流的流量总和等于流出该节点数据流总和,即 $f_{4,1}(4) + f_{4,15}(4) = f_{20,4}(4) = 8.872$ 。以链路 (4,1) 为例,由上面数据可知 $f_{4,1}(4) = 4.245$, 链路有效容量为 $\frac{1}{T} \sum_{1 \leq t \leq T} W \log_2(1 + s_{ij}(t)) = \frac{1}{10} [10 \log_2(1 + s_{4,1}(2)) + 10 \log_2(1 + s_{4,1}(7))]$, 满足流经该链路的数据流量之和不超过该链路有效容量的约束条件。图 3 反映了 30 节点 4 组会话多跳认知网络在信干噪比模型下的实际网络拓扑结构。

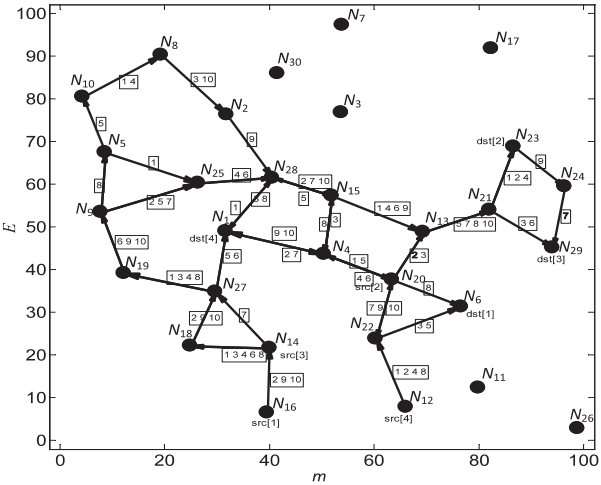


图 3 30 个节点 4 组会话多跳认知网络的拓扑结构

4 结束语

文中分析了多跳认知网络的物理层、链路层及网络层的限制,以 SINR 模型下网络速率为优化目标,构成了混合整数非线性规划问题。文中提出利用重构线性化技术将优化问题线性松弛,再通过 CPLEX 软件中的分支定界法求解问题的最优解。仿真结果验证了该方法的有效性,得出网络中节点在各个时隙上的功率

等级以及接收节点的信噪比情况,实现了认知网络速率的优化目标。

参考文献:

- [1] 王钦辉,叶保留,田 宇,等. 认知无线网络中频谱分配算法[J]. 电子学报,2012,40(1):147-154.
- [2] Ozcan G, Gursoy M C. Optimal power control for underlay cognitive radio systems with arbitrary input distributions [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(8):4219-4233.
- [3] 李红岩. 认知无线电的若干关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2009.
- [4] McHenry M A. NSF spectrum occupancy measurements project summary[R]. [s. l.]:Shared Spectrum Company,2005.
- [5] Haykin S. Cognitive radio; brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [6] 赵 勇. 认知无线电的发展与应用[J]. 电讯技术,2009,49(6):93-101.
- [7] 裴二荣. 认知无线网络中的资源优化分配的研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [8] Zhou P, Yuan W, Liu W, et al. Joint power and rate control in cognitive radio networks; a game-theoretical approach [C]//Proc of IEEE international conference on communications. [s. l.]:IEEE,2008;3296-3301.

- [9] 何智锋. 认知无线电系统的频谱感知与动态频谱接入技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2012.
- [10] Zheng L, Tan C W. Maximizing sum rates in cognitive radio networks; convex relaxation and global optimization algorithms [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(3):667-680.
- [11] Kim D I, Le L B, Hossain E. Joint rate and power allocation for cognitive radios in dynamic spectrum access environment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):5517-5527.
- [12] Wu Y, Tsang D H K. Dynamic rate allocation, routing and spectrum sharing for multi-hop cognitive radio networks [C]//Proc of IEEE international conference on communications workshops. [s. l.]:IEEE,2009;1-6.
- [13] 秦 航. 基于认知无线网络动态资源管理的跨层设计研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
- [14] Yuan Xu, Shi Yi, Hou Y T, et al. UPS; a united cooperative paradigm for primary and secondary networks [C]//Proc of 2013 IEEE 10th international conference on mobile ad-hoc and sensor systems. Hangzhou:IEEE,2013;78-85.
- [15] Sherali H D, Adams W P. A reformulation-linearization technique for solving discrete and continuous nonconvex problems [M]. [s. l.]:Springer,2013.

(上接第 112 页)

droid 客户端网络访问技术的研究,设计了一个基于 Android 平台的移动学习评价系统,并对服务器端和客户端的功能进行了编码实现。在系统设计和实现过程中,对系统的整体框架和功能进行了详细的说明,采用模块化的设计方法,使系统具有良好的可扩展性,实现了客户端和服务端间的数据交互。最后通过真机环境运行,结果表明该系统具有良好的人机交互界面,老师可以通过 PC 端方便地上传练习题库,学生可以随时登录系统下载练习题并完成自己的学习效果评价,达到了系统开发的要求。

参考文献:

- [1] 韩 超,梁 泉. Android 系统原理及开发要点详解[M]. 北京:电子工业出版社,2010:18-20.
- [2] 姚昱旻,刘卫国. Android 的架构与应用开发研究[J]. 计算机系统应用,2008(11):110-112.
- [3] 倪红军,周巧扣. Android 开发工程师案例教程[M]. 北京:北京大学出版社,2014:266-277.
- [4] MITRAN. SOAP version 1.2 part0; primer [EB/OL]. [2007-04-27]. <http://www.w3c.org/TR/soap12-part0>.
- [5] Schlingloff H. Modeling and model checking web services[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2005, 126

- (8):3-26.
- [6] Seely S. SOAP, cross platform web service development using XML [M]. Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall PRT,2002.
- [7] 郑小慎,盛莉莉. 基于 Web 的海洋观测仪器管理系统设计与实现[J]. 实验技术与管理,2015,32(4):152-155.
- [8] Zhu Fujun, Turner M, Kotsiopoulos I, et al. Dynamic data integration using web services [C]//Proceedings of the IEEE international conference on web services. [s. l.]:IEEE,2004:262-269.
- [9] 崔再惠. Access 数据库与 SQL Server 数据库主要功能的比较[J]. 鞍山师范学院学报,2009,11(6):51-52.
- [10] 彭海文. Android Web Services 应用研究[J]. 电脑知识与技术,2011,7(12):2851-2852.
- [11] 黄锦川,金炜东. 基于 Android 平台 Web 服务的应用研究[J]. 铁路计算机应用,2010,19(11):24-27.
- [12] 郑世良,朱云仙,蒋文蓉,等. 基于 Web Services 的高校科研管理平台的集成设计[J]. 实验技术与管理,2008,25(2):104-106.
- [13] 闵现畅,黄理灿. 基于 Android 平台的 Web 服务技术研究[J]. 工业控制计算机,2011,24(4):92-94.
- [14] 范宝锋,方 勇,汤云革,等. 基于 SOAP 的 Web 服务互操作性问题分析[J]. 成都信息工程学院学报,2005,20(2):142-146.