

基于位置的认知网络中继选择与功率分配

雷维嘉, 崔 军, 谢显中

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 南岸区 400065)

【摘要】针对认知网络中, 认知源和目的都位于同一个主用户的覆盖区内但距离较远的情形, 通过使用主用户频段, 采用中继在源和目的间建立多跳路由实现通信。给出一种利用位置信息, 以优化跳数和总发射功率为目标的中继选择算法; 同时给出一种以最大化系统容量为目标、以总发射功率和接收信干比为约束条件的功率分配算法。仿真结果表明, 该文算法能够有效降低系统总发射功率和提高系统容量。

关键词 认知无线电; 位置信息; 多跳; 功率分配; 中继选择

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.04.003

Location Based Relay Selection and Power Allocation in Cognitive Networks

LEI Wei-jia, CUI Jun, and XIE Xian-zhong

(Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nanan Chongqing 400065)

Abstract In the case where the source is located within the coverage area of a primary user but far away from destination, the communication can be achieved by establishing a multi-hop router between the user and the source by sharing the frequency band of the primary user. A relay selection algorithm optimizing the number of hops and the total transmit power is proposed based on the location information, and a power allocation algorithm is presented for maximizing the system capacity under the constraints of the total transmit power and the received signal-to-interference ratio. Simulation results show that the algorithm can effectively reduce the total transmit power and improve the system capacity.

Key words cognitive radio; location information; multi-hop; power allocation; relay selection

近年来, 认知无线电^[1](cognitive radio, CR)作为一种提高频谱利用率的技术引起了学术界、工业界的广泛关注。在认知网络中, 认知用户以一种伺机的方式接入主用户的授权频谱, 其接入方式可分为Overlay方式和Underlay方式。Overlay方式要求认知用户在接入授权频谱之前需进行频谱检测, 然而由于频谱检测不可能完全正确以及实现的复杂性, 无需频谱检测的Underlay方式成为了认知网络中新的研究热点^[2]。

Underlay^[2-3]方式本质上是干扰信道, 即两组或两组以上的用户同时接入同一频谱, 这必定会引起不同用户之间的干扰。无线信道中信号的衰减主要由路径损耗决定, 故干扰信道中用户间的干扰与他们之间的几何距离相关^[4]。基于此, 文献^[2]提出了一种认知Ad-hoc网络与基础设施系统间基于位置意

识的共同传输方案, 并研究了这两种网络间的共同传输概率。该文献提出的共同传输方案具有一定的局限性, 即在主用户上行链路中, 当认知用户位于小区边缘时, 受限于主用户的干扰要求共同传输概率几乎为零。文献^[3]研究了基于位置意识的移动认知Ad-hoc网络共同传输的最优功率控制。本文利用位置信息研究Underlay认知网络中的中继选择与功率分配问题。

1 系统模型和问题规划

1.1 信道与系统模型

系统模型如图1所示, 主用户网络由源节点PS和目的节点PD构成。在认知网络中, 源节点CS和目的节点CD由于受限于主用户的服务质量要求, 不能直接以较大功率通信。本文在源节点和目的节点间

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61271259, 61301123); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ120501, KJ120502); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1299)

作者简介: 雷维嘉(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事无线通信传输技术方面的研究。

寻找 $N(N \leq N^{\max})$ 个认知中继 $CR_j(j=1, 2, \dots, N)$, 源节点和目的节点间的通信通过多跳中继传输实现。中继采用译码转发方式^[5](decode and forward, DF), 记节点 m 与节点 n 的直接距离为 $d_{m,n}$ ($m, n=CS, CD, PS, PD, CR_j$)。

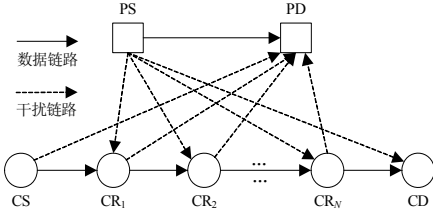


图1 系统模型

假设 R_p 为主用户覆盖的圆区半径, 在主用户覆盖范围内随机分布 M 个可作为中继的认知用户, 位置服从均匀分布。候选中继的位置如图2所示, 候选中继距离圆心PD的距离 R 和角度 θ 为随机变量, 其概率分布函数 $F_R(r)$ 、 $F_\theta(\theta)$ 分别为:

$$F_R(r) = \begin{cases} \frac{r^2}{R_p^2} & 0 < r \leq R_p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta}{2\pi} & 0 < \theta \leq 2\pi \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

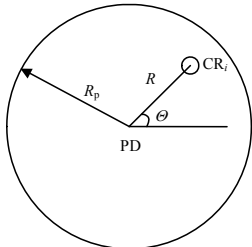


图2 候选中继的位置示意图

无线信道采用双线地面反射模型^[4]描述, 距发射机 d 处的接收功率为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^\alpha} \quad (3)$$

式中, P_r 和 P_t 分别为接收机和发射机的接收功率和发射功率; G_t 和 G_r 表示发射和接收天线增益; h_t 和 h_r 为发射和接收天线高度; α 为路径损耗指数。假设 $G_t=G_r=1$, 天线高度相同。信道中的高斯白噪声远小于于干扰功率, 分析中忽略了信道噪声的影响^[2]。

1.2 问题规划

认知用户共享主用户频谱时需要控制其发射功率以满足主用户和认知用户的接收信干比(signal-to-

interference ratio, SIR)要求。主用户和认知用户的SIR门限分别记为 γ_{th}^p 和 γ_{th}^c 。在第 $i(i=1, 2, \dots, N+1)$ 跳时, 认知网络的发射节点为 CR_{i-1} , 特别地, 在 $i=1$ 时, CR_0 为认知源节点CS。此时,

$$\gamma_i^p = \frac{P_0 d_{CR_{i-1}, PD}^\alpha}{P_i d_{PS, PD}^\alpha} \quad (4)$$

式中, P_i 为第 i 跳时认知用户的发射功率; P_0 为主用户的发射功率, 假设在整个认知通信过程中保持恒定。而第 i 跳时认知网络的接收节点为 CR_i , 特别地, 当 $i=N+1$ 时, CR_{N+1} 为目的节点CD。认知用户的SIR为:

$$\gamma_i^c = \frac{P_i d_{PS, CR_i}^\alpha}{P_0 d_{R_{i-1}, CR_i}^\alpha} \quad (5)$$

式中, 认知用户第 i 跳链路的单位带宽信道容量^[4]为:

$$C_i = \frac{1}{N+1} \log_2(1 + \gamma_i^c) \quad (6)$$

式中, $1/(N+1)$ 是因为采用 $N+1$ 跳传输, 每跳传输时, 源节点或中继只能使用 $1/(N+1)$ 的信道^[5]。

整个认知网络的系统容量可表示为:

$$C = \min\{C_1, C_2, \dots, C_{N+1}\} \quad (7)$$

最大化认知网络的系统容量等效于:

$$\max_{P_1, P_2, \dots, P_{N+1}} \min\{\gamma_1^c, \gamma_2^c, \dots, \gamma_{N+1}^c\} \quad (8)$$

约束条件为:

$$\frac{P_0 d_{CR_{i-1}, PD}^\alpha}{P_i d_{PS, PD}^\alpha} \geq \gamma_{th}^p \quad (9a)$$

$$\frac{P_i d_{PS, CR_i}^\alpha}{P_0 d_{CR_{i-1}, CR_i}^\alpha} \geq \gamma_{th}^c \quad (9b)$$

$$0 < P_i \leq P_i^{\max} \quad (9c)$$

$$P_1 + P_2 + \dots + P_{N+1} \leq P_{tot} \quad (9d)$$

式中, P_{tot} 为认知网络的最大发射功率; P_i^{\max} 为认知用户的最大发射功率^[3]。约束条件式(9a)和式(9b)分别表示主用户和认知用户的信干比要求; 约束条件式(9c)为认知用户可接受的发射功率范围; 考虑到认知网络的能量消耗, 约束条件式(9d)给出了认知网络的总发射功率(以下简称总功率)限制^[6]。

2 中继选择算法

本节给出一种利用位置信息, 以优化跳数和总功率为目标的多跳中继选择算法。为了使跳数最少, 应选择候选中继中离上跳发射节点尽量远的节点作为下一跳中继, 但距离越远, 发射功率要求越高。最终选择的路由需要满足总功率约束条件^[7]。

由于传输损耗与距离的 α 次方成反比, 因此对于

给定的SIR要求,跳数越多,单跳距离越短,需要的总功率越小。对于给定的总功率上限,若各跳发射节点都使用最大功率发送数据,跳数最少,但可能导致总功率超过系统总功率上限。当减小各跳发射功率使得目的节点刚好落在最后一跳发射节点的通信范围内时,选择的路由需要的发射功率最小。

由于约束条件(9a)和(9c)可得第*i*跳链路发射功率的上界可表示为:

$$P_i^{\text{sup}} = \min \left\{ P_i^{\text{max}}, \frac{P_0 d_{\text{CR}_{i-1}, \text{PD}}^\alpha}{\gamma_{\text{th}}^\alpha d_{\text{PS}, \text{PD}}^\alpha} \right\} \quad (10)$$

为确定候选中继所在区域,先设定一个中继的预设发送功率 $\tilde{P}_i = \beta_i P_i^{\text{sup}}$, 其中 $\beta_i (\leq 1)$ 为第*i*跳链路的功率缩减因子。为方便,假设 $\beta_i = \beta$ 。预设功率须满足:

$$\sum_{i=1}^{N+1} \tilde{P}_i = \sum_{i=1}^{N+1} \beta P_i^{\text{sup}} \leq P_{\text{tot}} \quad (11)$$

当式(12)不能满足时,需要减小 β 。

在确定第*i*跳链路预设功率后,就可确定候选中继的区域。将式(11)代入约束条件(9b)可得:

$$\frac{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}}{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}} \geq \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^\alpha P_0}{\tilde{P}_i} \right)^{1/\alpha} = \left(\frac{\gamma_{\text{th}}^\alpha P_0}{\beta P_i^{\text{sup}}} \right)^{1/\alpha} = \rho_i \quad (12)$$

式中, $d_{\text{PS}, \text{CR}_i}$ 与 $d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}$ 之比应不小于 ρ_i , 否则认知用户的信干比要求得不到满足。若用 $d_{\text{PS}, \text{CD}}$ 取代式中的 $d_{\text{PS}, \text{CR}_i}$, $d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CD}}$ 取代 $d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}$, 则式(12)变为:

$$\frac{d_{\text{PS}, \text{CD}}}{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CD}}} \geq \rho_i \quad (13)$$

当式(13)满足时,表示目的节点在第*i*跳发射节点的通信范围内。特别地,当*i*=1满足式(13)时表示源节点和目的节点可直接通信。

假设主用户源节点PS、认知第*i*跳发射节点 CR_{i-1} 和接收节点 CR_i 的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x, y) , 对式(12)进行整理可得:

$$d_{\text{PS}, \text{CR}_i} \geq \rho_i d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i} \quad (14)$$

用坐标表示可得:

$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \geq \rho_i \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \quad (15)$$

整理后得:

$$\left(x - \frac{\rho_i^2 x_2 - x_1}{\rho_i^2 - 1} \right)^2 + \left(y - \frac{\rho_i^2 y_2 - y_1}{\rho_i^2 - 1} \right)^2 \leq \left(\frac{\rho_i}{\rho_i^2 - 1} \right)^2 [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] \quad (16)$$

显然,式(16)所表示的区域为一圆区。记第*i*跳链路的候选中继集合为 Ω_i , 其元素共有 K_i 个,分别为 $\text{CR}_i^1, \text{CR}_i^2, \dots, \text{CR}_i^{k_i}, \dots, \text{CR}_i^{K_i}$ 。候选中继 $\text{CR}_i^{k_i}$ 应较 CR_{i-1} 离CD更近,结合可行区域的条件,候选中继应满足的条件为:

$$\begin{cases} d_{\text{PS}, \text{CR}_i^{k_i}} \geq \rho_i d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i^{k_i}} \\ d_{\text{CR}_i^{k_i}, \text{PD}} < R_p \\ d_{\text{CR}_i^{k_i}, \text{CD}} < d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CD}} \end{cases} \quad k_i = 1, 2, \dots, K_i \quad (17)$$

对于满足上述条件的候选中继,选取距该跳发射节点最远的节点作为中继,即:

$$k_i^* = \max_{k_i \in \Omega_i} \{ d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i^{k_i}} \} \quad (18)$$

当选择了第*i*跳链路的中继 $\text{CR}_i^{k_i^*}$ 后简记该中继为 CR_i 。

3 功率分配算法

在确定认知中继后,可以通过在源节点和各中继节点间进行功率分配进一步提高系统容量。对于式(8)的优化问题,当各链路信干比相等时取得最大值,即 $\gamma_1^c = \gamma_2^c = \dots = \gamma_{N+1}^c$ 。令 $\gamma_i^c = \gamma$, 将其代入式(5)可得:

$$P_i = \frac{\gamma P_0 d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha} \quad (19)$$

式中, $i=1, 2, \dots, N+1$ 。

为解优化问题式(8),首先假设各节点不受约束条件式(9a)~式(9c)限制。由约束条件式(9d)可知,当各节点所分得的总功率为认知链路可提供的最大功率 P_{tot} 时认知网络容量取得最大值,即:

$$\sum_{i=1}^{N+1} P_i = \gamma P_0 \sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}} \right)^\alpha = P_{\text{tot}} \quad (20)$$

对式(20)进行整理可得:

$$\gamma = \frac{P_{\text{tot}}}{P_0 \sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}} \right)^\alpha} \quad (21)$$

将式(21)代入式(19)即有:

$$P_i = \frac{P_{\text{tot}} d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha \sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}} \right)^\alpha} \quad (22)$$

结合约束条件式(9b)和式(10)可以得到:

$$\begin{cases} P_{\text{tot}} \geq \gamma_{\text{th}}^c P_0 \sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}} \right)^\alpha = P_{\text{tot}}^{\text{inf}} \\ P_{\text{tot}} \leq \min \left\{ \frac{P_1^{\text{sup}} d_{\text{CR}_0, \text{CR}_1}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_1}^\alpha}, \frac{P_2^{\text{sup}} d_{\text{CR}_1, \text{CR}_2}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_2}^\alpha}, \dots, \frac{P_{N+1}^{\text{sup}} d_{\text{CR}_N, \text{CR}_{N+1}}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_{N+1}}^\alpha} \right\} \sum_{i=1}^{N+1} \frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha} = P_{\text{tot}}^{\text{sup}} \end{cases} \quad (23)$$

由式(23)可得到当认知网络可使用的最大功率小于 $P_{\text{tot}}^{\text{inf}}$ 时, 认知网络由于没有足够的功率而达不到最低速率要求。当系统可使用的总功率大于 $P_{\text{tot}}^{\text{sup}}$ 时, 必定至少有一个认知节点 CR_i 的功率 $P_i > P_i^{\text{sup}}$, 由于干扰约束 P_i 取值为 $P_i = P_i^{\text{sup}}$ 。

设满足 $P_i > P_i^{\text{sup}}$ 的节点构成集合 Φ_i , 在 Φ_i 中寻找信干比最小的节点, 即:

$$i^* = \min_{i \in \Phi_i} \gamma_i^c = \min_{i \in \Phi_i} \frac{P_i^{\text{sup}} d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha}{P_0 d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha} \quad (24)$$

当找到 i^* 后, 容易得到 $\gamma_i^c = \frac{P_i^{\text{sup}} d_{\text{PS}, \text{CR}_{i^*}}^\alpha}{P_0 d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_{i^*}}^\alpha} = \gamma'$, 将其

代入式(22)可得:

$$P_i = \frac{\gamma' P_0 d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha} = \frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha P_i^{\text{sup}} d_{\text{PS}, \text{CR}_{i^*}}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_{i^*}}^\alpha} \quad (25)$$

由于集合 Φ_i 中的节点功率超过了其门限值, 须重新分配功率, 而剩余的节点还没有超过其门限值。因此, 以式(24)选择的第 i^* 跳链路在所有链路中, 其信干比最小, 该跳链路的信道容量为整个认知链路的信道容量, 所以, 当余下节点以此系统容量进行分配的功率将不再超过其门限值, 显然, 第 i^* 跳链路为整个认知链路的瓶颈。

结合式(22)和式(25), 第 i 跳发射功率可表示为:

$$P_i = \begin{cases} 0 \text{ (链路中断)} & P_{\text{tot}} < P_{\text{tot}}^{\text{inf}} \\ \frac{P_{\text{tot}} d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha \sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}} \right)^\alpha} & P_{\text{tot}}^{\text{inf}} \leq P_{\text{tot}} \leq P_{\text{tot}}^{\text{sup}} \\ \frac{d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}^\alpha P_i^{\text{sup}} d_{\text{PS}, \text{CR}_{i^*}}^\alpha}{d_{\text{PS}, \text{CR}_i}^\alpha d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_{i^*}}^\alpha} & P_{\text{tot}} > P_{\text{tot}}^{\text{sup}} \end{cases} \quad (26)$$

根据中继选择算法, 第一次选择的路由并非最佳链路, 当减小预设功率时, 每跳链路的通信距离减小, 直至目的节点 CD 刚好落在最后一跳中继的通信范围内时, 认知系统需要的功率最小。对于已选择的路由, 当实际发射功率大于预设功率时, 系统容量增加。本文所给的中继选择算法可以直观地理

解为寻找各跳链路的干扰距离与通信距离之比(即 $d_{\text{PS}, \text{CR}_i} / d_{\text{CR}_{i-1}, \text{CR}_i}$) 近似相等的路由, 此时, 系统容量最大。

4 仿真结果

本节在双线地面反射模型下给出算法的仿真结果。假设主用户网络覆盖范围为以目的节点 PD 为圆心、半径为 $R_p=100$ m 的圆区。在主用户覆盖范围内随机分布着 $M=500$ 个可作为候选中继的认知用户, 其位置按圆内均匀分布随机产生。节点 PS 、 PD 、 CS 和 CD 的坐标分别为 $(-50, -40)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(-80, 0)$ 和 $(70, 60)$ 。其他参数的取值如表1所示。

表1 参数设置

α	γ_{th}^c	γ_{th}^s	P_0	P_i^{max}	$\Delta\beta$	N^{max}
3	10 dB	3 dB	1W	1W	10^{-3}	5

P_{tot} 为 1 W 条件下的中继选择过程如图3所示。认知源节点首先根据其预设功率确定候选中继范围, 然后选择距离源节点最远的节点作为中继。已选择出的中继也根据其预设功率确定候选中继范围, 并选择离它最远的节点作为下一跳中继。类似操作, 直至目的节点落在最后一跳发射节点的通信范围内。然后, 依次迭代减小各跳发射节点的功率直至目的节点刚好落在最后一跳发射节点的通信范围内。

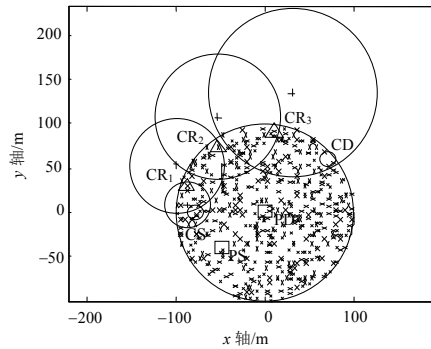


图3 中继选择过程

不同总功率上界时, 根据中继选择算法建立的路由可能不同, 我们仿真了总功率上界分别为 1, 0.6, 0.4 W 时的中继选择过程, 得到路由的跳数为 4 跳、

5跳和6跳。3个路由的示意图如图4所示。

4跳链路的最优功率分配结果如图5所示。由图可知,当 P_{tot} 小于0.65 W时,由于功率太小,达不到链路的最低信干比要求,链路中断;当 P_{tot} 介于0.65~0.78 W间时,各节点分配的功率随着总功率的增加而增加;当 P_{tot} 大于0.78 W时,各节点功率由于受限于主用户的信干比要求而保持不变。另外,根据式(26),各发射节点的功率与 $d_{\text{CR}_{i-1},\text{CR}_i}/d_{\text{PS},\text{CR}_i}$ 的 α 次方成正比。

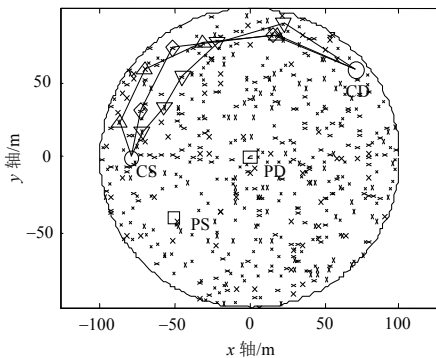


图4 不同跳数的链路

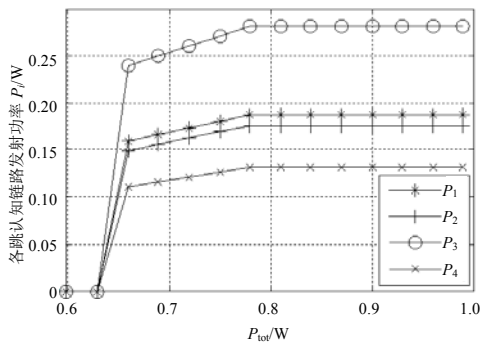


图5 最优功率分配结果

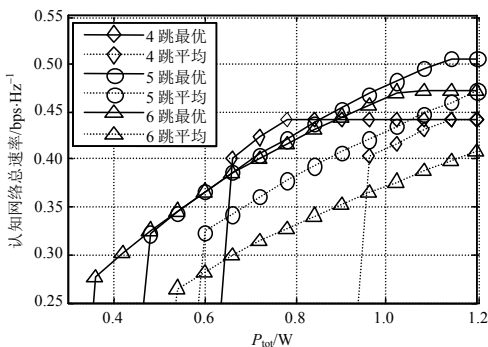


图6 不同跳数链路的系统总速率

不同跳数链路的系统容量如图6所示。由图可见,跳数越多的链路可选择的总功率范围更大。这是因为跳数越多,单跳距离更小,需要的功率更小,相对不容易受到主用户的约束。对于每条链路,当所给总功率低于最低要求时,系统中断;当总功率大于功率上界值时,由于受限于主用户的约束系统容量保持不变。图6还给出了平均功率分配算法下的系统总速率,与平均功率分配算法比较,本文所给功率分配算法明显改善了系统的总速率。

5 结论

本文针对源和目的距离较远而不能直接通信的情形,通过在源和目的间建立多跳中继实现通信,给出了中继选择算法,并在各跳发射节点间进行了功率分配。所给中继选择算法选择各跳链路的干扰距离与通信距离之比近似相等的链路,因此不仅需要的中继跳数最小,而且在满足系统最低速率要求下需要的功率最小。所给功率分配算法使各跳链路信干比相等,此时系统容量最大。仿真结果表明,所给算法能够有效降低系统总发射功率和提高系统容量。

参考文献

- [1] WANG Bei-bei, RAY LIU K J. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE J Sel Topics Signal Process, 2011, 5(1): 5-23.
- [2] WANG Li-chun, CHEN A. Effects of location awareness on concurrent transmissions for cognitive Ad hoc networks overlaying infrastructure-based systems[J]. IEEE Trans on Mobile Comput, 2009, 8(5): 577-599.
- [3] SONG Yi, Xie Jiang. Optimal power control for concurrent transmissions of location-aware mobile cognitive radio Ad hoc networks[C]//IEEE Globecom 2009. Hawaii, USA: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [4] RAPPAPORT T S. Wireless communication: Principles and practice[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1996.
- [5] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Trans on Inf Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [6] CHEN Yi-yi, FENG Zhi-yong, CHEN Xin. Joint relay selection and power allocation for energy-constrained multi-hop cognitive networks[C]// IEEE VTC Spring 2011. Budapest, Hungary: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [7] XIE Min, ZHANG Wei, WONG K K. A geometric approach to improve spectrum efficiency for cognitive relay networks[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2010, 9(1): 268-281.

编辑 张俊

带格式的: 项目符号和编号