

认知无线 Ad Hoc 网络中一种基于选择区域的多跳路由协议^①高 静^{②*} 刘 旻^{*} 尹长川^{*}

(* 北京邮电大学网络体系构建与融合北京市重点实验室 北京 100876)

(** 重庆邮电大学光电学院 重庆 400065)

摘 要 根据认知无线 Ad Hoc 网络中次网络多跳传输数据的特点,提出了一种基于选择区域的多跳路由协议。该协议假设主网络和次网络节点分布在同一二维平面内,且服从相互独立的泊松点过程,传输信道包含大尺度路损和小尺度瑞利衰落;在定义的选择区域内,选取距离发射节点最近的节点作为多跳路由协议中下一跳传输的中继节点;通过约束次网络对主网络的干扰,以期望前进密度为目标函数,推导出次网络发射概率确定时的最优参考传输距离的上界,参考传输距离确定时的最优次网络发射概率,以及二者同时优化时满足的关系式。由于综合考虑了参考传输距离、发射概率和传输角度,从而确保了多跳传输的方向性和有效性。数值分析结果证明了理论分析的正确性,表明次网络的期望前进密度与主网络节点密度之间存在折衷关系。

关键词 认知无线 Ad Hoc 网络, 多跳路由, 前进密度, 选择区域, 泊松点过程

0 引 言

无线 Ad Hoc 网络是一种有分布式特点的自组织网络,网络中的数据常通过多跳传输,因此高效、节能的路由算法是该网络研究的重要课题,合理有效的路由度量一直是追求的目标。Gupta 和 Kumar^[1]研究了多跳 Ad Hoc 网络的传送容量,并指出了无线 Ad Hoc 网络的传送容量与网络节点密度之间的变化关系。Baccelli 等^[2]提出了一种应用于多跳无线 Ad Hoc 网络的 Aloha 类型接入控制协议,该协议以空间前进密度(density of progress, DoP)即单位面积内成功传输节点数和每次传输的平均距离的乘积为度量目标,每一跳均选择 DoP 最大的节点作为中继节点。Andrews 等^[3]定义了一个用于多跳无线 Ad Hoc 网络的新容量度量——随机接入传送容量,量化了在归一化面积上成功通信的平均最大速率和传输距离的乘积。Li 等^[4]提出了一种基于选择域(由选择角度和参考距离共同决定)的多跳路由协议,该协议确保了信息由源到目的传输的方向性。近年来随着节约频谱资源的认知无线电(cog-

nitive radio, CR)技术的发展,对 CR Ad Hoc 网络^[5]多跳路由的研究日益增多。Xie 等^[6]分析了多跳 CR 网络的性能,提出了一种用于提高频谱效率的几何方法,对多跳次网络端到端能量消耗、时延等性能进行了分析。Chen 等^[7]考虑了在二维次网络中采用贪婪几何路由,对次网络的连通性、端到端吞吐量以及端到端时延等性能进行了分析,但这些分析均假设主网络中仅存在一对通信节点,所得结论与实际网络运行情况差别较大。Li 等^[8]针对次网络密度受到主网络中断约束这一前提,提出了单跳传送吞吐量的度量新方法,把传输距离和中断约束融合到一起,推导出了次网络单跳传送吞吐量的极限及上界。本文将文献[4]提出的适用于单网络的基于选择域的路由协议拓展到认知无线 Ad Hoc 网络中,提出了一种适用于认知无线 Ad Hoc 网络的基于选择区域的多跳路由协议。

1 思路与前提

在认知无线 Ad Hoc 网络中,次网络的节点密度、传输功率和概率等网络参数会受到主网络能容

① 国家自然科学基金(61271257,60972073),863 计划(2011AA100706)和北京市自然科学基金(4122034)资助项目。

② 女,1979 年生,硕士,讲师;研究方向:认知无线电网络路由及性能分析;联系人,E-mail: jing401@126.com

(收稿日期:2012-03-26)

忍的中断性能的约束,通常由源节点到目的节点的传输不能一步到达,因而常常需要多跳。为了提出一种适用于这样的网络的基于选择域的多跳路由协议,本研究遵循以下考虑:假设主、次网络节点分布在同一二维平面内,共享相同的无线频谱资源,其中主网络具有频谱资源使用优先权,其密度和中断约束不会由于次网络的存在而发生变化;在满足主网络数据传输中断约束的前提下,次网络调整其自身的节点密度、发射概率及参考传输距离进行网络性能优化;联合考虑大尺度路损和小尺度瑞利衰落,通过最大化次网络期望前进密度优化次网络节点发射概率和参考传输距离,并通过数值结果给出次网络期望前进密度与主网络节点密度间的折衷关系。

2 系统模型

2.1 网络模型

在一个无线自组织网络中,主、次网络节点分布在同一二维平面内,并假设:

(1)主网络用户有使用频谱的优先权。主、次网络节点之间相互独立,不进行协作通信。

(2)在某一时刻主网络节点发射机(TXs)构成一个平稳的泊松点过程 Π_0' , 其空间密度为 $\bar{\lambda}_0 = \lambda_0 p_0$, p_0 为发射概率,这里 λ_0 表示主网络节点的密度。主网络节点接收机(RXs)构成另一个平稳的泊松点过程 Π_0' , 空间密度为 $\lambda_0' = \lambda_0(1 - p_0)$ 。同样,次网络节点 TXs 构成一个空间密度为 $\bar{\lambda}_1 = \lambda_1 p_1$ 的泊松点过程 Π_1' , p_1 为次网络节点 TXs 发射概率,这里 λ_1 表示次网络节点的密度。次网络节点 RXs 构成平稳泊松点过程 Π_1' , 空间密度为 $\lambda_1' = \lambda_1(1 - p_1)$ 。

(3)所有的主(次)网络 TXs 使用相同的发射功率 $P_0(P_1)$ 。无线信道考虑大尺度路损和小尺度衰落。因此,距离发送节点 d 处的接收功率为 $Phd^{-\alpha}$, 这里 P 是发射功率,路损指数 $\alpha > 2$, h 代表小尺度衰落,概率密度函数服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布,本文假设 $\mu = 1$ 。

(4)网络传播环境干扰受限,忽略热噪声。成功传输数据的条件是在参考点 RX 处的信干比(signal to interference ratio, SIR)大于阈值 β 。我们分别使用 β_0 和 β_1 来表示主、次网络 SIR 的阈值。主网络的中断约束可以表示为

$$\Pr(SIR_0 < \beta_0) = \varepsilon_0 \quad (1)$$

为了简化中断概率的分析,在以下主、次网络的性能分析中,我们假设有一个典型的主(次)网络接收节点分别放置于原点,此接收节点的中断性能分别代表了主(次)网络中其他接收节点的中断性能。根据随机几何理论中的 Slivnyak 定理^[9],在主(次)网络中增加此接收节点后,各网络节点的分布仍服从原性质的泊松分布。

2.2 主网络中断概率对次网络节点密度的约束

与文献[8]类似,假设主、次网络发送节点密度受到主网络中断概率约束。考虑到主网络使用无线频谱的高优先级,主网络的节点密度和中断概率不会由于次网络的引入而变化。假设主网络能够接受的中断概率为 ε_0 , 则当主网络单独存在和主、次网络同时存在时,主网络的中断概率约束式分别为

$$\Pr\left(\frac{P_0 h d_0^{-\alpha}}{I_0} \leq \beta_0\right) = \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\Pr\left(\frac{P_0 h d_0^{-\alpha}}{I_0 + I_1} \leq \beta_0\right) = \varepsilon_0 \quad (3)$$

这里 $I_0 = \sum P_0 h d_0^{-\alpha}$ 表示主网络中其它节点 TXs 对该节点 RXs 的干扰, $I_1 = \sum P_1 h d_1^{-\alpha}$ 表示次网络中所有节点 TXs 对主网络该点 RXs 的干扰。 $d_0(d_1)$ 是主(次)网络不同节点 TXs 与 RXs 之间的距离。把 I_0 和 I_1 代入式(2)和(3),由文献[2]中 III 节的结果,可得到主、次网络发送节点密度 $\bar{\lambda}_0$ 和 $\bar{\lambda}_1$ 满足的约束关系如下:

$$\bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_{0,m} = \frac{-\ln(1 - \varepsilon_0)}{K_\alpha \beta_0^{2/\alpha} d_0^2}, K_\alpha = \frac{2\pi^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_1 \leq \bar{\lambda}_{1,m} = \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{2/\alpha} (\bar{\lambda}_{0,m} - \bar{\lambda}_0) \quad (5)$$

在式(4)中, $\bar{\lambda}_{0,m}$ 表示不存在次网络时,由主网络中断概率所确定的主网络发送节点密度的最大值。 $\bar{\lambda}_{1,m}$ 表示主网络和次网络共存时,次网络发送节点密度的最大值。由不等式(5)可以看出,次网络发送节点的密度由主网络发送功率比 (P_0/P_1) 和可供次网络节点使用的“白色空间” $(\bar{\lambda}_{0,m} - \bar{\lambda}_0)$ 决定。如果主网络中发送节点的密度 $\bar{\lambda}_0$ 达到了其允许上限 $\bar{\lambda}_{0,m}$, 则此时次网络将不被允许使用主网络的频谱资源,即其发射节点的密度将为 0。

2.3 基于选择区域的多跳路由协议

在次网络中,源节点发送数据包到目的节点,由于受到主网络和自身次网络中干扰的影响,数据分

组通常不能一次到达目的节点,这时就需要多跳路由。如何选取中继节点进行数据传输对于 CR Ad Hoc 网络就显得尤为关键。本论文参考文献[4]提出的基于选择区域的多跳路由协议,定义 CR 网络中次网络的多跳路由协议如下:

考虑图 1 所示的次网络多跳传输场景,对于多跳传输中的任意一跳, TX 代表所选定的次网络节点的发射机,定义由参考传输距离 $|OA| = R$ 确定的弧 $\widehat{AB}$ 之外,选择角度 φ 张成的扇形之内的区域为选择区域,如图中阴影部分所示,其中射线 $\overrightarrow{OC}$ 由发射机所在位置 O 指向目的节点,且满足 $\angle BOC = \angle AOC = \varphi/2$, φ 的取值范围在 $(0, \pi)$ 。在选择区域内选择距离发送节点 TX 最近的节点作为下一跳的中继节点。

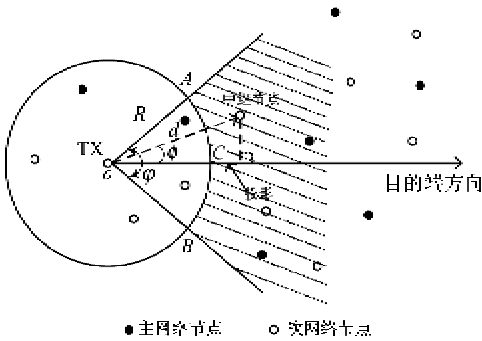


图 1 次网络多跳传输中的选择区域

在所提出的路由协议中,设定选择区域是为了保证数据传输过程中每一跳都指向目的节点,并在一定传输可靠性的前提下,每次传输距离(由参考距离 R 确定)尽可能远。具体来说,每次选择中继节点时,认为角度 φ 以外或与 O 点的距离小于参考距离 R 的节点都是无效的,不予选择。以下分析中均假设在任意一跳中,所选中继节点的 RX 与当前节点的 TX 之间的线段与射线 $\overrightarrow{OC}$ 间的夹角 ϕ 在 $[-\varphi/2, \varphi/2]$ 间均匀分布。

与文献[4]中考虑单个无线 Ad Hoc 网络中基于选择区域的多跳路由协议不同,本文在 CR Ad Hoc 场景中,考虑到主网络中断概率的约束,对次网络基于选择区域的多跳路由协议参数进行了优化。对于多跳路由中的每一跳,构建了以最大化网络期望前进密度为目标的参数优化问题,在不同的条件下,推导出了参考传输距离上界和次网络发射概率的闭合表达式,进而得出了次网络期望前进密度与主网络发送节点密度间的折衷优化关系。

3 次网络的期望前进密度

本节在主网络通信中断概率小于 ε_0 的约束下,对次网络每一跳的优化目标,即期望前进密度,进行了分析并构建了多跳路由的参数优化问题。为了保护主网络的通信链路,主、次网络发送节点密度要限定在式(4)和(5)给出的范围,即 $0 \leq \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_{0,m}$, $0 \leq \bar{\lambda}_1 \leq \bar{\lambda}_{1,m}$ 。

根据文献[2]中的定义,次网络的前进密度(DoP)为

$$D_s = \lambda_1 p_1 P_{\text{succ}} d \cos \phi \quad (6)$$

其中, $d \cos \phi$ 是传输距离 d 在发送节点到目的节点方向上的投影,如图 1 所示; P_{succ} 是次网络的成功传送概率。根据第 2 节中的假设,次网络接收节点密度为 λ'_1 , ϕ 在 $[-\varphi/2, \varphi/2]$ 上均匀分布,则其概率密度函数(PDF)为 $\frac{1}{\varphi}$, 所以传输距离 d 的累积分布函数可以表示为

$$\begin{aligned} \Pr(d \leq r) &= 1 - \Pr(d > r) \\ &= 1 - \Pr\left(\bigcap_i I_i \cap b(R, r) = \emptyset\right) \\ &= 1 - \exp\left[-\lambda'_1 \frac{\varphi}{2} (r^2 - R^2)\right] \\ R &\leq r < \infty \quad (7) \end{aligned}$$

由此得到 d 的 PDF 为

$$f_d(r) = \lambda'_1 \varphi r \exp\left[-\lambda'_1 \frac{\varphi}{2} (r^2 - R^2)\right] \quad (8)$$

次网络的成功传送概率 P_{succ} 可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{succ}} &= \Pr\left(\frac{P_1 h d^{-\alpha}}{I_1 + I_{01}}\right) \\ &= \psi_{I_1}\left(\frac{\beta_1}{P_1 d^{-\alpha}}\right) \psi_{I_{01}}\left(\frac{\beta_1}{P_1 d^{-\alpha}}\right) \end{aligned}$$

其中 $\psi_{I_1}(\cdot)$ 和 $\psi_{I_{01}}(\cdot)$ 表示次网络中的干扰 I_1 和主网络对次网络干扰 I_{01} 的拉普拉斯(Laplace)变换。根据文献[8], $\psi_{I_1}(i) = \exp[-K_\alpha \lambda_1 (P_1 i)^{2/\alpha}]$, $\psi_{I_{01}}(i) = \exp[-K_\alpha \lambda_0 (P_0 i)^{2/\alpha}]$, 因此有

$$P_{\text{succ}} = \exp\left\{-K_\alpha d^{2/\alpha} \beta_1^{2/\alpha} \left[\lambda_1 + \lambda_0 \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{2/\alpha}\right]\right\} \quad (9)$$

把式(8)和(9)代入式(6),得到期望前进密度为

$$\begin{aligned} E[D_s] &= \lambda_1 p_1 \int_{R-\frac{\varphi}{2}}^{\frac{\varphi}{2}} \int_{R-\frac{\varphi}{2}}^{\frac{\varphi}{2}} \exp\left[-K_\alpha \beta_1^{2/\alpha} \frac{\varphi}{2\pi} p_1 (\lambda_1 + \lambda_0 \theta^{2/\alpha}) x^2\right] \cdot \\ &\quad f_d(x) x \cos \phi \left(\frac{1}{\varphi}\right) dx d\phi \end{aligned}$$

$$= \lambda_1^2 p_1 (1 - p_1) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \exp\left(\lambda_1' \frac{\varphi}{2} R^2\right) K^{-\frac{3}{2}} \cdot$$

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) \quad (10)$$

其中 $K = K_a \beta_1^{2/\alpha} p_1 (\lambda_1 + \lambda_0 \theta^{2/\alpha}) + \lambda_1' \frac{\varphi}{2}$, $\theta = P_0/P_1$,

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) = \int_{KR^2}^{\infty} e^{-x} x^{\frac{3}{2}-1} dx \text{ 是不完整 } \Gamma \text{ 函数。}$$

次网络前进密度函数作为网络容量的一种度量值,其优化非常困难,因此,我们研究上述的期望前进密度作为替代,这仍然有一定的理论意义。以下分三种情况讨论式(10)中期望前进密度函数的优化问题。分别是:次网络节点发射概率 p_1 给定时,参考传输距离 R 的优化;次网络参考传输距离 R 给定时节点发射概率 p_1 的优化;以及次网络发射概率 p_1 和参考传输距离 R 的联合优化问题。

3.1 p_1 给定情况下最优的 R

在发送概率 p_1 给定时,最优的参考传输距离 R 很难得到其解析表示的显式,下面我们给出一个上界。

令 $E[D_s]$ 对 R 求导等于零,我们得到

$$\frac{dE[D_s]}{dR} = \lambda_1^2 p_1 (1 - p_1) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) K^{-\frac{3}{2}} \left\{ \exp\left(\lambda_1' \frac{\varphi}{2} R^2\right) \cdot \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) \lambda_1' \varphi R + \exp\left(\lambda_1' \frac{\varphi}{2} R^2\right) \frac{d\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right)}{dR} \right\} = 0 \quad (11)$$

由 $\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) = \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) + \sqrt{KR} \exp(-KR^2) -$

$\frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf}(\sqrt{KR})$ 可把式(11)改写如下:

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) \lambda_1' \varphi R - 2K^{3/2} R^2 \exp(-KR^2) = 0 \quad (12)$$

利用泰勒级数展开公式可推出

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) > \frac{1}{2} [\Gamma(1, KR^2) + \Gamma(2, KR^2)] \\ = \frac{1}{2} \exp(-KR^2) (2 + KR^2)$$

代入式(12)可以得到 R 的上界为

$$R < \frac{2K^{3/2} - \sqrt{4K^3 - 2K[\lambda_1 \varphi (1 - p_1)]^2}}{K \lambda_1 \varphi (1 - p_1)} \quad (13)$$

图2描绘了当 $p_1 = 0.1$ 时,最优参考传输距离 R 随选择角度 φ 的变化情况。并对 R 的数值结果和式(13)求出的上界值进行了比较。由图可见,

式(13)给出了 R 的一个紧致的上界。

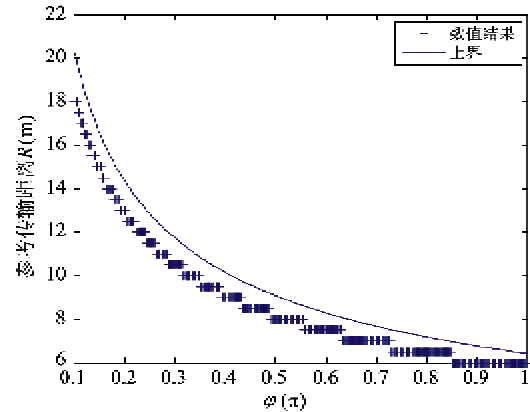


图2 最优参考距离 R 的数值解与其上界的比较

3.2 R 给定情况下最优的 p_1

本节在给定参考传输距离 R 的条件下,对次网络节点的发射概率 p_1 进行优化。类似地,将式(10)中的 $E[D_s]$ 对 p_1 求导后等于0,得到

$$\frac{dE[D_s]}{dp_1} = \frac{d\left[\lambda_1^2 p_1 (1 - p_1) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) K^{-\frac{3}{2}} \exp\left[\lambda_1 (1 - p_1) \frac{\varphi}{2} R^2\right] \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right)\right]}{dp_1} = 0 \quad (14)$$

通过整理得

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) \left[(1 - 2p_1) - \lambda_1 p_1 (1 - p_1) \frac{\varphi}{2} R^2 \right] + (1 - p_1) (K - (\lambda_1 \varphi / 2)) \cdot \left[-\frac{3}{2} K^{-1} \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) + K^{\frac{1}{2}} R^3 \exp(-KR^2) \right] = 0 \quad (15)$$

求解式(15)得到

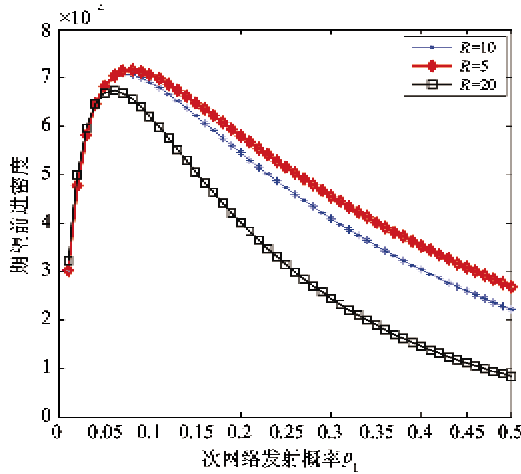
$$p_1 = \frac{\left(2\Gamma + \frac{1}{2} \varphi \lambda_1 R^2 \Gamma + Q\right) - \sqrt{\left(2\Gamma + \frac{1}{2} \varphi \lambda_1 R^2 \Gamma + Q\right)^2 - 2\lambda_1 \varphi R^2 \Gamma (\Gamma + Q)}}{\lambda_1 \varphi R^2 \Gamma}$$

其中, $\Gamma = \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right)$, $Q = (K - (\lambda_1 \varphi / 2)) \cdot$

$$\left[-\frac{3}{2} K^{-1} \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) + K^{\frac{1}{2}} R^3 \exp(-KR^2) \right],$$

$$\left(2\Gamma + \frac{1}{2} \varphi \lambda_1 R^2 \Gamma + Q\right)^2 - 2\lambda_1 \varphi R^2 \Gamma (\Gamma + Q) \geq 0.$$

图3在 $R = 5, R = 10$ 和 $R = 20$ 的条件下,描绘了期望前进密度随次网络发射概率 p_1 的变化情况。将数值结果与理论推导得到的 p_1 进行比较,可确定两者是一致的。

图3 期望前进密度随 p_1 的变化曲线

3.3 同时优化 R 和 p_1

下面对参考距离 R 和次网络节点发射概率 p_1 的联合优化进行讨论。同样以式(10)为目标函数,同时对 R 和 p_1 进行优化,令式(10)对 R 求偏导等于0,则有

$$\frac{\partial E[D_s]}{\partial R} = \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) \lambda_1' \varphi R - 2K^{3/2} R^2 \exp(-KR^2) = 0$$

由此得

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) = \frac{2K^{3/2} R \exp(-KR^2)}{\lambda_1 (1 - p_1) \varphi} \quad (16)$$

令式(10)对 p_1 求偏导等于0,则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[D_s]}{\partial p_1} &= \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) \left[(1 - 2p_1) - \lambda_1 p_1 (1 - p_1) \frac{\varphi R^2}{2} \right] \\ &\quad + (1 - p_1) (K - (\lambda_1 \varphi / 2)) \\ &\quad \cdot \left[-\frac{3}{2} K^{-1} \Gamma\left(\frac{3}{2}, KR^2\right) + K^{1/2} R^3 \exp(-KR^2) \right] \\ &= 0 \end{aligned}$$

将式(16)代入上式整理得

$$\begin{aligned} &[2K(1 - 2p_1) - \lambda_1 \varphi (1 - p_1)] R^2 - \\ &\frac{-3\lambda_1 (1 - p_1) \varphi - K(1 + p_1)}{\lambda_1 (1 - p_1) \varphi} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

整理式(17),得出期望进度密度取最优值情况下, p_1 和 R 关系式如下:

$$R = \sqrt{\frac{K(1 + p_1) - 3\lambda_1 (1 - p_1) \varphi}{2\lambda_1 (1 - p_1) \varphi [K(1 - 2p_1) - \lambda_1 \varphi (1 - p_1)]}} \quad (18)$$

要保证式(18)有意义,必须满足条件

$$\begin{cases} \lambda_1 < \frac{K(1 - 2p_1)}{(1 - p_1) \varphi}, & \frac{2}{7} < p_1 < 0.5 \\ \lambda_1 < \frac{K(1 + p_1)}{3(1 - p_1) \varphi}, & 0 < p_1 < \frac{2}{7} \end{cases}$$

或者

$$\begin{cases} \lambda_1 > \frac{K(1 + p_1)}{3(1 - p_1) \varphi}, & \frac{2}{7} < p_1 < 1 \\ \lambda_1 > \frac{K(1 - 2p_1)}{(1 - p_1) \varphi}, & 0 < p_1 < \frac{2}{7} \end{cases}$$

4 数值结果及分析

本节根据上述分析给出数值结果,并对其予以解释。在不做特殊说明的情况下, $\beta_0 = 3, \beta_1 = 1, \varepsilon_0 = \varepsilon_1 = 0.05$ 以及 $\alpha = 4, p_1 = 0.1$, 此时由式(4)得出 $\bar{\lambda}_{0,m}$ 为0.074, $\bar{\lambda}_1$ 根据式(5)由 $\bar{\lambda}_0$ 确定。

图4描绘了期望前进密度在三种 $\theta = P_0/P_1$ 情况下,随参考传输距离 R 的变化。从图中可以得出两个结论:(1)可以找到一个最优的参考传输距离 R 使得期望前进密度最大化,即期望前进密度是参考传输距离 R 的凸函数;(2)在同等条件下,期望前进密度随着主、次网络发射功率比单调增加。这点很容易理解,因为主、次网络发射功率比越大,意味着主网络的发射功率相对次网络的发射功率越大,进而主网络可以忍受更多来自次网络的干扰,从而次网络的期望前进密度越大。

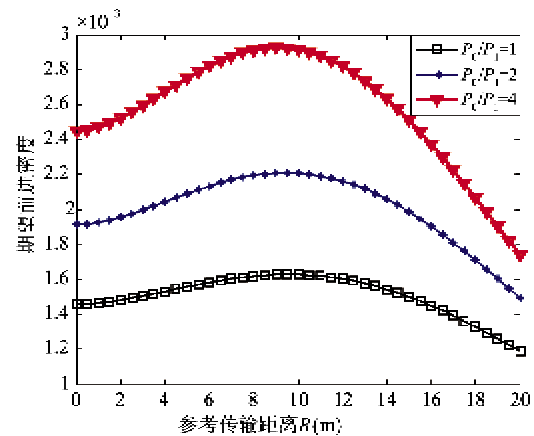
图4 期望前进密度随参考距离 R 的变化

图5描绘了 $\bar{\lambda}_0 = 0.0012$ 时,次网络期望前进密度随 R 和 p_1 变化的情形。在图中,次网络期望前进密度取最大值 $E[D_s] = 0.034$ 时, $p_1 = 0.52, R = 6.375$ 。可以验证此时 R 和 p_1 关系满足式(18)。可

见,同时优化这两个参数时次网络期望前进密度存在最大值。

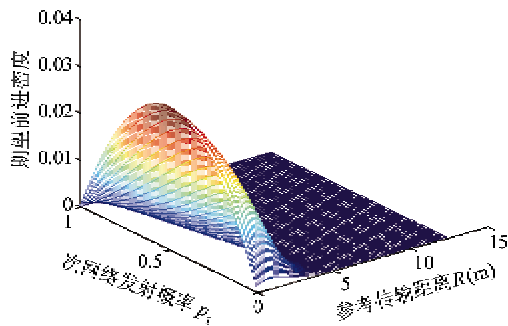


图5 期望前进密度随 p_1 和参考距离 R 的变化曲线

图6描绘了次网络参考传输距离 R 随着主网络节点密度 λ_0 的变化情况。 R 先增大后减小。这是由于,当 λ_0 从 0 逐渐增加, λ_1 由它的最大值开始下降。 λ_1 大时意味着次网络用户密度大,干扰也大,因此每跳的传输距离要小才能保证其自身网络的中断约束。随着 λ_1 的减小,传输范围开始增大,直到达到最大值后开始下降,这是因为当 λ_1 减小到一定程度时, λ_0 也增大到很大,以至于用于发射的次网络节点越来越少,从而 R 快速减小。

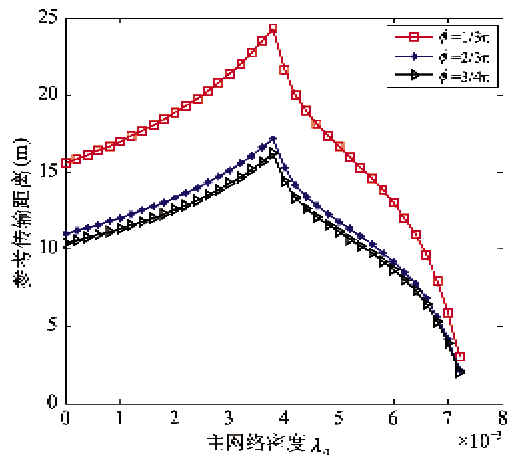


图6 参考距离 R 随主网络节点密度 λ_0 的变化曲线

图7描绘了最优的次网络期望前进密度随着主网络的节点密度 λ_0 变化的情况,图中给出了 $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = 0.03, 0.05$ 和 0.1 这三种情况时的曲线。可以看出,最优次网络期望前进密度与主网络节点密度之间存在着反比关系,即主网络密度的增加将导致次网络所能达到的最优的期望前进密度减小。此结果说明,次网络的传输机会或者网络容量与主网络的节点密度(或者网络容量)存在折衷关系,主网络

节点密度越小,次网络传输机会或者容量越大。

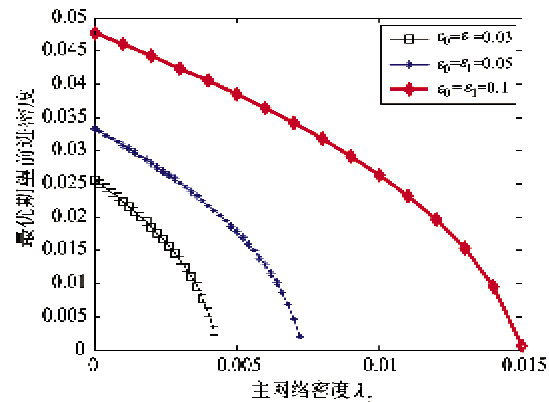


图7 最优期望前进密度随主网络节点密度 λ_0 的变化曲线

5 结论

本文提出的一种适用于无线 Ad Hoc 网络的基于选择区域的多跳路由协议综合考虑了参考传输距离 R 、发射概率 p_1 和传输角度 φ , 而能确保多跳传输的方向性和有效性。文中以次网络节点期望前进密度为目标函数,分别讨论了单独优化 R 、 p_1 及同时优化这两个参数时期望前进密度与各参数的理论关系,并进行了数值分析,结果验证了理论分析的正确性,证明期望前进密度是参考传输距离 R 和节点发送概率 p_1 的凸函数,而且表明次网络的期望前进密度与主网络的节点密度之间存在折衷关系。

本文所得结果都是基于主网络中断约束和节点密度不受次网络存在影响这一前提,而没有讨论如果受到影响的情况下,次网络的路由协议又会怎样,这是我们以后的研究中需要探讨的内容。

参考文献

- [1] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404
- [2] Baccelli F, Blaszczyzyn B, Muhlethaler P. An Aloha protocol for multi-hop mobile wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 421-436
- [3] Andrews J G, Weber S, Kountouris M, et al. Random access transport capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(6): 849-856
- [4] Li D, Yin C, Chen C, et al. A selection region based routing protocol for random mobile ad hoc networks. In: *Proceedings of GLOBECOM Workshops, Miami, USA, 2010*. 104-108

- [5] Akyildiz I F, Lee W, Chowdhury K R. CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7 (5):810-836
- [6] Xie M, Zhang W, Wong K K. A geometric approach to improve spectrum efficiency for cognitive relay networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9 (1):268-281
- [7] Chen Q J, Chou C T, S S K, et al. Performance of multi-hop whisper cognitive radio networks. In: Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum, Singapore, 2010. 1-12
- [8] Li C Z, Dai H Y. Transport throughput of secondary networks in spectrum sharing systems. In: Proceedings the 30th INFOCOM, Shanghai, China, 2011. 2732-2740
- [9] Stoyan D, Kendall W S, Mecke J. Stochastic geometry and its applications. Second edition. Chichester/New York/Brisbane/ Toronto/ Singapore: John Wiley & Sons, 1995. 25-46

A selection region based multi-hop routing protocol for cognitive radio Ad Hoc networks

Gao Jing^{* **}, Liu Yang^{*}, Yin Changchuan^{*}

(^{*} Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

(^{**} Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

Abstract

According to the multi-hop transmission characteristics of the secondary network in cognitive radio (CR) Ad Hoc networks, a selection region based multi-hop routing protocol is proposed. The protocol assumes primary and secondary nodes are distributed on the same two-dimensional plane, obeying the independent Poisson Point Process, and considers large-scale path loss and small-scale Rayleigh fading in the wireless channels. It chooses the node nearest to the transmitter from the selection region as the next-hop relay node. By constraining the interference from the secondary network to the primary network and defining the expected density of progress as the objective function, it presents an upper-bound of the optimum transmission distance in a given transmission probability, and derives the optimum transmission probability in a given transmission distance. It also obtains the relationship between the optimum transmission distance and the optimum transmission probability when jointly optimizing both of them. The numeric results are presented to prove the correctness of the theoretical analysis and also indicate that there is a tradeoff between the optimized expected density of progress of the secondary network and the density of primary nodes.

Key words: cognitive radio Ad Hoc networks, multi-hop routing, density of progress, selection region, poisson point processes