

无线 Ad hoc 网络传输容量的性能分析

胡 晗* 朱洪波 朱 琦

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)

(南京邮电大学教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室 南京 210003)

摘 要: 无线 Ad hoc 网络由于其具备自组织、自配置以及自适应等能力, 被灵活地应用于各种无任何固定通信基础设施支撑的环境中。如何对网络容量性能进行评估, 是目前无线 Ad hoc 网络研究的热点问题之一。该文依据随机几何理论以及泊松点过程建立了无线 Ad hoc 网络模型, 基于不同的调制方式及纠错编码方案, 并结合功率控制机制, 分别分析了采用时隙 ALOHA、非时隙 ALOHA 及 CSMA 协议时, 无线 Ad hoc 网络的中断概率及传输容量的性能指标。数值仿真结果表明: 在分组错误概率受限的条件下, 对调制方式与编码方案选择与网络空间分组密度(即网络累积干扰)有关; 根据不同的空间分组密度选取调制方式和编码方案, 才能获取最佳的网络容量性能。

关键词: Ad hoc 网络; 泊松点过程; 中断概率; 传输容量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1457-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01237

Performance Analysis of Transmission Capacity in Wireless Ad hoc Networks

Hu Han Zhu Hong-bo Zhu Qi

(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(Key Laboratory on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The intrinsic characteristics of wireless Ad hoc network, such as self-organizing, self-configuration and self-adaptation, make this kind of network an attractive solution in several scenarios in which lack of a fixed infrastructure. How to evaluate the capacity performance becomes one of the hot topics in the research area of wireless Ad hoc networks. In this paper, stochastic geometry and Poisson point process are applied to establish the network model under different medium access control schemes, namely un-slotted, slotted ALOHA, and CSMA. Based on different modulation/coding schemes and assuming channel inversion power control strategy, outage probability and transmission capacity of networks are investigated. The numerical results show that under a constraint of maximum packet error probability, the choices of the modulation and coding schemes that maximize the transmission capacity, depend on the density of transmissions, and that is, the interference level of the network.

Key words: Ad hoc networks; Poisson point process; Outage probability; Transmission capacity

1 引言

无线 Ad hoc 网络的容量是衡量网络性能的重要参数。2000 年, 文献[1]关于 Ad hoc 网络传送容量(transport capacity)的研究, 被认为是无线网络容量研究领域的奠基石。他们将网络传送容量定义

为网络传送的所有信息量与其运输距离乘积之和, 并分析得出对于一个典型的具有 n 节点的多跳网络的总吞吐量随节点数量 n 变化关系的数量级可以达到 $\Theta(\sqrt{n/\log n})$ (Knuth 符号表示法^[2]; $O(\cdot)$ 表示渐进上限, $\Omega(\cdot)$ 表示渐进下限, $\Theta(\cdot)$ 表示上下同时逼近)。然而, 他们的理论分析中采用的构造性的证明方法是建立在确定性的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)模型及确定性的信道接入方式之上, 并不能针对具体的通信策略及低密度节点的网络效率提供更深层次的见解。为了对分布式 Ad hoc 网络物理层及 MAC 层节点行为进行更加精

2011-11-25 收到, 2012-02-22 改回

国家 973 计划项目(2007CB310607), 国家科技重大专项(2011ZX03001-006-02, 2011ZX03005-004-03), 国家自然科学基金(61171094), 江苏省研究生创新计划(CXZZ11_0387)和江苏 973 计划项目(BK2011027)资助课题

*通信作者: 胡晗 huhan68@163.com

确有效的建模,文献[3]指出在中断传输概率条件下,网络能够支持的并发传输的最大密度与数据速率、成功传输概率的乘积定义为网络的传输容量(transmission capacity),利用随机几何理论^[4]建立了一种随机性的 SINR 数学分析模型,推导并比较了两种扩频 Ad hoc 系统(DS-CDMA 及 FH-CDMA),在采用时隙 ALOHA 协议下传输容量的上下界。

由于传输容量可以反映在给定数据速率、带宽和中断概率时网络能够支持的用户数,因此,成为很多 Ad hoc 网络广泛采用的一种性能分析指标。文献[5-7]分别对采用扩频技术、协作通信技术以及频谱共享技术下的网络传输容量进行了分析研究。在分析过程中,为了简化分析,通常是将数据传输速率及传输带宽进行了归一化处理。但是在实际网络中,需要结合系统采取的特定调制方式及编码方案进行综合分析,这样才能对网络设计及网络性能进行更加准确有效的评估。

本文采用文献[3]中随机 SINR 模型,并结合信道反转(Channel Inversion, CI)功率控制机制,将其扩展到非时隙 ALOHA 协议和载波侦听多址接入(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)协议中。基于该模型,在给定最大分组错误概率条件下,分析了采用不同的调制方式及纠错编码方案时,系统的中断概率及传输容量的近似表达式。为了简化分析,本文只考虑单跳通信及传播路径损耗指数的影响。数值仿真结果表明:最大传输容量的获得不仅与系统采用的调制方式、编码方案有关,还与单位区域内分组传输密度有关,即与网络中的累计干扰有关。在不同分组传输密度的条件下,选取合适的调制方式与编码方案,才能获得最佳的网络容量性能。

2 网络模型

假设 Ad hoc 网络的发送节点(TX)按照密度为 λ^s 的标值齐次泊松点过程: $\Pi(\lambda^s) = \{X_i, D_i\}$ 分布于一个 2 维平面内,其中 $\{X_i\}$ 表示第 i 个 TX 的位置,标值 $\{D_i\}$ 表示第 i 个 TX 与其对应的接收节点(RX)之间的距离;每个 TX 的业务分组到达服从参数为 λ^p 的 1 维泊松点过程,且每个分组的持续时间为 T 。

任选一个 TX 作为参考节点,记为 TX_0 ,将其对应的 RX,记为 RX_0 ,二者之间的距离记为 d_0 。根据 Palm 分布及随机几何中的 Slivnyak 定理^[4],将整个泊松点过程进行移动,使得 RX_0 处于原点处,而此时 TX 的条件分布仍服从于具有相同强度的齐次泊松点过程。使用 $|X_i|$ 表示第 i 个 TX 距离参考原点的距离,由于 Ad hoc 网络是分布式网络,无中心

控制,因此发送节点之间无序的,未经协调的信息传输会引起彼此之间的干扰。如图 1 所示,参考节点 RX_0 在接收发送节点 TX_0 的数据时,会受到来自其它发送节点 $TX_i (i = 1, 2, \dots)$ 的干扰。

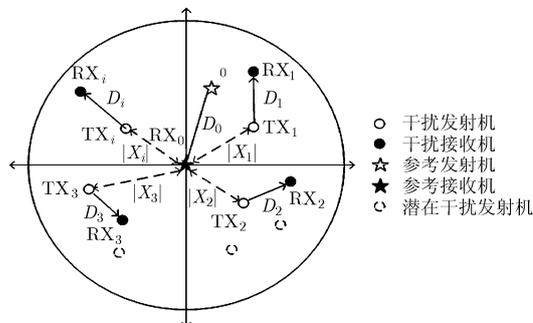


图 1 Ad hoc 网络模型

由于时间上的分组到达与空间上的节点分布是两个相互独立的泊松点过程,为了分析系统的中断概率,本文采用文献[8,9]中的方法,计算网络在给定时长 T 内生成的空间分组密度,并将其等价为一瞬网络干扰源密度,表示为

$$\lambda = T \cdot \lambda^p \cdot \lambda^s \quad (1)$$

为简化分析,假设每个 TX 采用信道反转(CI)功率控制方法将数据分组分别传送到各自对应的 RX,即每个 TX 根据信道衰落情况动态选择发射功率,以保证在其目标 RX 处的信号功率为定值 P_r ^[10]。在只考虑传播路径损耗影响的信道模型下,假设 TX 能够支持的最大发送功率为 P_{\max} ,易知最大传输距离为 $d_{\max} = (P_{\max} / P_r)^{1/\alpha}$ ($\alpha > 2$ 为传播路径损耗指数),传输距离 D 的累计分布函数(CDF)表示为

$$F_D(d) = (d^2 - 1) / (d_{\max}^2 - 1), \quad 1 \leq d \leq d_{\max} \quad (2)$$

由于系统背景噪声在网络设计中为一定值,因此,同文献[11],分析中忽略背景噪声,使用 SIR 模型替代 SINR 模型,参考节点 RX_0 处的 SIR 可表示为

$$SIR = P_r / \sum_{(X_i, D_i) \in \Pi(\lambda)} P_r \left(\frac{D_i}{|X_i|} \right)^\alpha \quad (3)$$

3 MAC 协议下的中断概率分析

3.1 时隙 ALOHA

时隙 ALOHA 要求所有的节点同步,如果多个 TX 试图在同一个时隙进行发送,必然导致碰撞。考虑重传机制后,当分组在 RX 处的 SIR 低于规定门限 β 时,表明该次传输失败,规定 TX 需等待一个随机时间之后再进行重传(设该随机时间服从指数分布)。假设系统设置的最大重传次数为 N ,如果

某个分组 N 次重传均失败, 则系统视为产生一次中断。假设分组重传的概率为 $p_{rt,s}$, 则中断概率 $p_{out,s}$ 可写成

$$p_{out,s} = p_{rt,s}^{N+1} \quad (4)$$

由于分组重传机制, 增加了网络中空间分组密度, 那么瞬时等价空间分组密度可表示为

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{aloha},s} &= \lambda(1 + p_{rt,s} + p_{rt,s}^2 + \dots + p_{rt,s}^N) \\ &= \lambda \frac{1 - p_{rt,s}^{N+1}}{1 - p_{rt,s}} \end{aligned} \quad (5)$$

考虑参考激活链路 $\text{TX}_0\text{-RX}_0$, 假设其分组传输时刻为 t_0 , 由于使用时隙 ALOHA 协议, 那么在时间区间 $[t_0 - T, t_0]$ 具有分组到达的其他链路将会对参考链路产生干扰。这些干扰可能将会导致参考链路传输失败进而需要被重传, 重传的概率可表示为

$$\begin{aligned} p_{rt,s} &= P(\text{SIR} < \beta \text{ at } t_0) \\ &= P \left(\frac{P_r}{\sum_{(X_i, D_i) \in \Pi(\lambda_{\text{aloha},s})} P_r \left(\frac{D_i}{|X_i|} \right)^\alpha} < \beta \right) \\ &= P \left(\sum_{(X_i, D_i) \in \Pi(\lambda_{\text{aloha},s})} \left(\frac{|X_i|}{D_i} \right)^{-\alpha} > \frac{1}{\beta} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

采用文献[3]中的推导方法, 将 $\Pi(\lambda_{\text{aloha}})$ 中的干扰源节点分成主导节点和非主导节点。主导节点距离参考节点足够近, 将会使得 $(|X_i|^{-\alpha} / D_i) > 1/\beta$, 即其单独产生的干扰造成参考原点处 $\text{SIR} < \beta$; 其他节点则为非主导节点。主导节点与非主导节点通过半径 s 进行划分。

通过解 $(s/D_i)^{-\alpha} > 1/\beta$, 又 $1 \leq D_i \leq d_{\max}$, 可推得, $s \in (0, d_{\max} \beta^{1/\alpha})$ 。

由于标值点过程 $\Pi(\lambda_{\text{aloha},s}) = \{X_i, D_i\}$ 的标值 D_i 与节点位置 X_i 相互独立, 因此, 该标值点过程可等价于密度强度为 $\lambda_{\text{aloha},s} \bar{F}_D(s\beta^{-1/\alpha})$ 的空间泊松点过程^[4]。

将主导节点对参考链路造成重传的概率作为重传概率的下限, 将其近似为 $p_{rt,s}$ 。

$$\begin{aligned} p_{rt,s} &\approx p_{rt,s}^l = 1 - P(\Pi \cap b(o, s) = \emptyset) \\ &= 1 - \exp(-\lambda_{\text{aloha},s} \bar{F}_D(s\beta^{-1/\alpha}) \pi s^2) \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $s \in (0, d_{\max} \beta^{1/\alpha})$, 对式(7)求关于 s 的导数, 可得当 $s = s^* = d_{\max} / (\sqrt{2} \beta^{-1/\alpha})$, 有最紧的下限, 此时,

$$p_{rt,s} \approx 1 - e^{-\pi \lambda_{\text{aloha},s} \frac{d_{\max}^4}{4(d_{\max}^2 - 1)} (\beta)^{2/\alpha}} \quad (8)$$

将式(5)代入式(8), 得

$$p_{rt,s} \approx 1 - e^{-\pi \left(\lambda \frac{1 - p_{rt,s}^{N+1}}{1 - p_{rt,s}} \right) \frac{d_{\max}^4}{4(d_{\max}^2 - 1)} (\beta)^{2/\alpha}} \quad (9)$$

通过解式(9)得到时隙 ALOHA 下网络的分组重传概率 $p_{rt,s}$, 然后将其代入式(4)中, 进而可得系统的中断概率 $p_{out,s}$ 。

3.2 非时隙 ALOHA

若系统中没有采用同步技术, 则需要采用非时隙 ALOHA 协议。在非时隙 ALOHA 协议中, TX 产生分组后便立即发送。因此在时间段 $[t_0 - T, t_0 + T]$ 具有分组到达的其他链路将会对参考链路的传输过程进行干扰。设最大重传次数为 N , 则非时隙 ALOHA 下的重传概率 $p_{rt,u}$ 可通过式(10)给出。

$$\begin{aligned} P_{rt,u} &= P(\text{SIR} \leq \beta \text{ at } t \in [t_0, t_0 + T]) \\ &= 1 - e^{-\pi \lambda_{\text{aloha},u} \frac{d_{\max}^4}{2(d_{\max}^2 - 1)} (\beta)^{2/\alpha}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\lambda_{\text{aloha},u}$ 为考虑重传机制后非时隙 ALOHA 等效空间分组密度, 同式(5), 可表示为

$$\lambda_{\text{aloha},s} = \lambda \frac{1 - p_{rt,u}^{N+1}}{1 - p_{rt,u}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中, 通过解方程, 可得 $p_{rt,u}$ 。

进而非时隙 ALOHA 协议下, 系统的中断概率表示为

$$p_{out,u} = p_{rt,u}^{N+1} \quad (12)$$

3.3 CSMA

载波侦听多址技术(CSMA)通过让用户监听信道, 若发现链路信噪比 SIR 小于侦听门限 β_{sens} (本文假设 $\beta_{\text{sens}} = \beta$), 则等待一段随机时间(服从指数分布)再发送, 这种随机退避机制避免了信道变为空闲后, 多个用户同时抢占信道的情况。本文假设最大退避次数为 K , 若同一分组退避了 K 次, 则系统视为一次中断。同时, 分组传输过程中由于会受到其他分组的干扰造成传输错误, 因此仍然采用重传机制, 设最大重传次数为 N , 当 N 次重传均失败时, 系统视为产生一次中断。

载波侦听有两种方式: 发送端侦听或接收端侦听, 发送端处的载波侦听在实际系统中用得更为普遍, 因此本节只分析发射机处采用 CSMA 机制的系统中断概率。

假设退避率为 p_b , 首次传输失败需要进行重传的概率为 $p_{rt1,\text{csma}}$, 接下来重传失败需要进行下一次重传的概率为 $p_{rt,\text{csma}}$, 则在 CSMA 协议下, 考虑重传及退避机制下的等价空间分组密度表示为

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{csma}} &= \lambda \left(\sum_{k=0}^{K-1} p_b^k + (1 - p_b^K) p_{rt1,\text{csma}} \right) \sum_{n=1}^N p_{rt,\text{csma}}^n \\ &= \lambda \left(\frac{1 - p_b^K}{1 - p_b} + (1 - p_b^K) p_{rt1,\text{csma}} \frac{1 - p_{rt,\text{csma}}^N}{1 - p_{rt,\text{csma}}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

CSMA 机制下, 中断概率表示为

$$p_{\text{out,csma}} = p_b^K + (1 - p_b^K) p_{\text{rt1,csma}} p_{\text{rt,csma}}^N \quad (14)$$

下面分别对 p_b , $p_{\text{rt,csma}}$ 及 $p_{\text{rt1,csma}}$ 进行分析:

CSMA 机制下, 分组在传输起始对信道进行监听, 当发现 $\text{SIR}_0 < \beta$ 时, 则发生退避, 退避概率 p_b 等价于在时间段 $[t_0 - T, t_0]$ 传输的分组至少有一个落入以 RX_0 为圆心, s 为半径的圆域 $b(\text{RX}_0, s)$ 内的概率, 因此 p_b 可表示为

$$\begin{aligned} p_b &= 1 - \exp\left(-\lambda_{\text{act}} \bar{F}_D\left(s\beta^{-1/\alpha}\right) \pi s^2\right) \\ &= 1 - \exp\left(-\lambda_{\text{act}} \bar{F}_D\left(\frac{\pi d_{\text{max}}^3}{2\sqrt{2}\beta^{-2/\alpha}}\right)\right) \end{aligned} \quad (15)$$

其中 λ_{act} 为不考虑退避时空分组的等效密度, 可表示如下:

$$\lambda_{\text{act}} = \lambda \left(1 - p_b^K + (1 - p_b^K) p_{\text{rt1,csma}} \frac{1 - p_{\text{rt,csma}}^N}{1 - p_{\text{rt,csma}}}\right) \quad (16)$$

假设参考链路 TX_0 - RX_0 分组重传发送时刻为 t_0 , 令事件 ξ_1 , ξ_2 分别表示如下:

ξ_1 : 表示该分组在某次重传起始 $t = t_0$ 时, 发生 $\text{SIR}_0 < \beta$, 该次重传失败需要进行下一次重传。

ξ_2 : 表示该分组在某次重传过程中 $t \in (t_0, t_0 + T]$ 时, 发生 $\text{SIR}_0 < \beta$, 该次重传失败需要进行下一次重传。

则在 CSMA 机制下, 某次重传失败需要进行下次重传的概率表示为

$$\begin{aligned} p_{\text{rt,csma}} &= P(\xi_1 \cup (\bar{\xi}_1 \cap \xi_2)) = P(\xi_1) + (1 - P(\xi_1))P(\xi_2) \\ &= p_{\text{rt,initial}} + (1 - p_{\text{rt,initial}}) \cdot p_{\text{rt,during}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $p_{\text{rt,initial}}$, $p_{\text{rt,during}}$ 分别对应事件 ξ_1 , ξ_2 发生的概率。

由于事件 ξ_1 需要考虑时间段 $[t_0 - T, t_0]$ 内发送的分组, 易知

$$p_{\text{rt,initial}} = p_b \quad (18)$$

进一步分析 $p_{\text{rt,during}}$, 考虑图 2 中参考链路 TX_0 - RX_0 , 假设其分组传输起始时刻为 t_0 , 若此时有其它的 TX (例如 TX_1) 产生一新的分组到达, 并且 TX_1 恰好落在以 RX_0 为圆心, s 为半径的圆 $B(\text{RX}_0, s)$ 内, 同 3.1 节分析, 其干扰将会使得参考链路上的分组进行重传; 另一方面, 由于 CSMA 特性, 为了保证 TX_1 在侦听时, 不受到 TX_0 的影响, TX_1 应当落在以 TX_0 为圆心, s 为半径的圆 $B(\text{TX}_0, s)$ 之外, 即 TX_1 处在区域 $A_s = B(\text{RX}_0, s) \cap \bar{B}(\text{TX}_0, s)$ 中才能造成参考链路上分组的重传。

如图 2 所示, 假设 $s > D_i/2$, 区域 A_s , 即阴影部分的面积由式(19)给出:

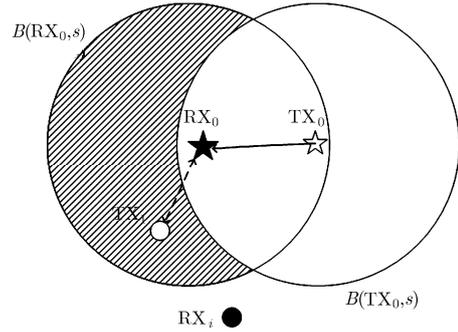


图 2 分析 CSMA 机制下的重传概率示意图

$$\begin{aligned} A_s &= \int_1^{d_{\text{max}}} \left(\pi s^2 + x\sqrt{s^2 - (x)^2/4} - 2s^2\right. \\ &\quad \left. \cdot \cos^{-1}(x/(2s))\right) f_D(x) dx \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $f_D(x)$ 表示 D 的概率密度函数:

$$f_D(x) = \frac{2x}{d_{\text{max}}^2 - 1} \quad (20)$$

则同 3.1 节分析, $p_{\text{rt,during}}$ 可表示为

$$p_{\text{rt,during}} = 1 - \exp(-\lambda_{\text{csma}} \bar{F}_D(s\beta^{-1/\alpha}) A_s) \quad (21)$$

将式(18), 式(21)分别代入式(17)中, 可得

$p_{\text{rt,csma}}$ 。

又 $p_{\text{rt1,csma}}$ 代表数据分组在首次传输失败需要进行重传的概率, 同前面 $p_{\text{rt,csma}}$ 的分析, 可表示为

$$p_{\text{rt1,csma}} = p_{\text{rt1,initial}} + (1 - p_{\text{rt1,initial}}) p_{\text{rt1,during}} \quad (22)$$

其中 $p_{\text{rt1,initial}}$ 代表首次传输起始发生错误的概率, 可用式(23)表示。

$$\begin{aligned} p_{\text{rt1,initial}} &= p_b \frac{1}{\pi s^2} \left(\int_1^{d_{\text{max}}} (\pi s^2 + x\sqrt{s^2 - (x)^2/4} \right. \\ &\quad \left. - 2s^2 \cos^{-1}(x/(2s))) f_D(x) dx \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$p_{\text{rt1,during}}$ 表示首次传输过程中发生错误的概率, 易知,

$$p_{\text{rt1,during}} = p_{\text{rt,during}} \quad (24)$$

将式(23), 式(24)代入式(22)中可得 $p_{\text{rt1,csma}}$ 。

将得到的 p_b , $p_{\text{rt,csma}}$ 及 $p_{\text{rt1,csma}}$ 分别代入式(14)即可得到 CSMA 机制下的系统中断概率 $p_{\text{out,csma}}$ 。

4 误分组率受限下网络传输容量分析

4.1 纠错编码的 MPSK 调制方式下误分组率性能

考虑相干解调下的 M 进制的相移键控: MPSK ($M=2, 4, 8, 16, 32, \dots$), 其近似误符号率可表示为^[12]

$$P_{e_{\text{sym}}} = \begin{cases} Q(\sqrt{2\text{SIR}}), & \text{BPSK} \\ Q(\sqrt{\text{SIR}}), & \text{QPSK} \\ 2Q(\sqrt{2\text{SIR}} \sin(\pi/M)), & \text{MPSK}(M = 8, 16, 32, \dots) \end{cases} \quad (25)$$

同时本文采用二进制线性分组码作为系统的纠

错编码，对于编码方案为 (n, k, t) 的线性分组码，其中 n 为码长， k 为有效负载符号数， t 为纠错编码能力。以汉明码与 BCH 码为例，误码率可表示为^[12]

$$P_{e_{code}} = \sum_{j=t+1}^n \binom{n}{j} P_{e_{sym}}^j (1 - P_{e_{sym}})^{n-j} \quad (26)$$

假设网络中所有的分组均含有 S bit，则进行纠错编码并采用 MPSK 调制后，每个分组所含码字个数为 $L = \lceil S / k \log_2 M \rceil$ ^[13]。

在调制解调过程中，当一个分组的所有码字都能够被成功进行接收并且正确解调时，该分组才能视作被成功接收。因此，在编码及调制方式下，分组错误概率表示为

$$P_{e_{packet}} = 1 - (1 - P_{e_{code}})^L \quad (27)$$

4.2 网络传输容量

在文献[3]中，给定中断传输概率条件下，网络能够支持的并发传输的最大密度与数据速率、成功传输概率的乘积定义为网络的传输容量。本文结合纠错编码方案及不同的调制方式进行分析，将网络传输容量定义如下：

$$TC = \lambda \cdot (1 - P_{e_{packet,max}}) \cdot (1 - p_{out}) \cdot \eta \quad (28)$$

其中 λ 为时间周期 T 内的空间分组密度； $P_{e_{packet,max}}$ 为系统能容忍的最大误分组率； η 为系统的频谱效率。

假设采用单位带宽，进行纠错编码和 MPSK 调制后，成功传输时系统的频谱效率可表示为

$$\eta = (S/T)(k/n) \log_2 M \quad (\text{bit}/(\text{sec} \cdot \text{Hz})) \quad (29)$$

给定最大误分组率 $P_{e_{packet,max}}$ ，将其代入式(27)，式(26)，式(25)中得 SIR 门限 β ，然后分别代入 3.1 节，3.2 节，3.3 节中系统的中断概率的求解过程中，得到采用纠错编码及调制策略后，最大分组错误概率受限时 3 种 MAC 协议下系统中断概率，最后将其分别代入式(28)中，进而得到 3 种 MAC 协议下网络的传输容量性能。

5 数值仿真与性能分析

本节通过数值仿真给出了时隙 ALOHA 协议、

非时隙 ALOHA 协议及 CSMA 协议下，无线 Ad hoc 网络传输容量的性能仿真。仿真参数设置如下：信道衰落指数 $\alpha = 4$ ；时隙长度 $T = 0.5$ ms；最大分组错误概率 $P_{e_{packet,max}} = 10^{-3}$ ；每个分组含有比特数 $S = 1023$ bit；TX-RX 发送接收节点之间的最大距离 $d_{max} = 10$ m。

图 3 给出了采用不同的纠错编码策略及 QPSK 调制方式，3 种 MAC 层协议下网络传输容量的性能比较。其中设最大退避次数 $K = 2$ ，最大重传次数 $N = 1$ ；易知汉明码(7,4,1)、汉明码(15,11,1)、汉明码(31,26,1)的编码效率 (k/n) 依次增大。由图 3 可以看出，在空间分组密度较小时，编码效率越高的纠错编码对应的网络传输容量越大；但是在空间分组密度较大时，编码效率越高的纠错编码对应的网络传输容量反而越小。因为在空间分组密度较小时，干扰对网络容量的限制并不起到决定性作用，编码效率越大，对应的系统频谱效率 η 越大，因此网络传输容量也就越大；但在分组空间密度较大时，容量主要受限于干扰，3 种编码策略下的编码效率越大，系统所需要的 SIR 门限越大，意味着中断概率越大，因此此时网络传输容量随着编码效率的增大而减小。

图 4 给出了采用不同的调制方式及 BCH(127, 36,15)纠错编码，3 种 MAC 层协议下网络传输容量的性能比较。由图 4 可以看出在空间分组密度较小时，调制效率越高意味着单位时间内将传输更多的比特数，传输容量会增大，此时干扰并未成为制约网络容量的主导因素；但是当空间分组密度较大时，增加调制因子 M ，意味着需要更大的 SIR 门限来满足最大分组错误概率的限制，这将使得系统中断概率增大，网络传输容量减小，因此需要针对不同的空间分组密度，选择合适的调制方式才能使得网络传输容量性能达到最佳。

6 结束语

本文采用文献[3]中随机 SINR 模型，并结合信

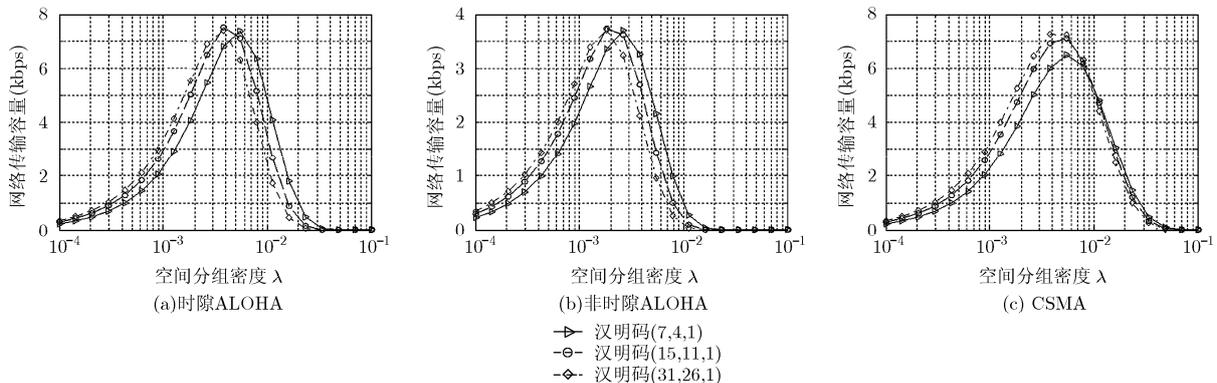


图 3 3 种 MAC 层协议下不同编码策略对网络容量的影响

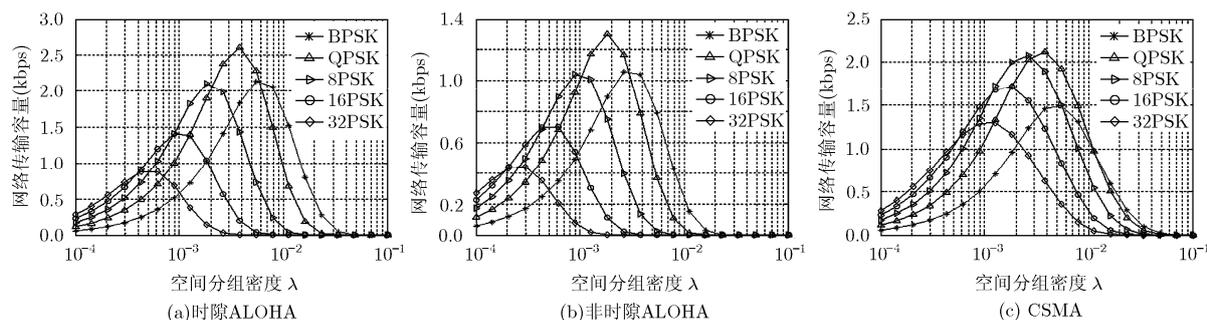


图4 3种MAC层协议下不同调制方案对网络容量的影响

道反转功率控制机制将其扩展到非时隙ALOHA协议、CSMA协议中。然后考虑实际的链路数据速率,分别分析了在满足最大分组错误概率条件下,采用不同的调制方式及纠错编码方案时网络的中断概率及传输容量的性能指标。数值仿真结果表明:最大传输容量的获得不仅与系统的调制方式、编码方案有关,还与单位区域内传输密度有关,在不同传输密度的条件下,选取合适的调制方式与编码方案,才能获得最佳的网络容量性能。

参考文献

- [1] Gupta P and Kumar P R. The capacity of wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404.
- [2] Knuth D E. The Art of Computer Programming [M]. MA, Addison-Wesley, 1997: 107-123.
- [3] Weber S, Yang X, Andrews J, et al. Transmission capacity of wireless Ad hoc networks with outage constraints[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4091-4102.
- [4] Stoyan D, Kendall W, and Mecke J. Stochastic Geometry and Its Applications [M]. 2nd Edition, Chichester: John Wiley and Sons, 1996: 33-41.
- [5] Andrews J, Weber S, and Haenggi M. Ad hoc networks: to spread or not to spread [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2007, 45(12): 84-91.
- [6] Sheng Z, Ding Z, and Leung K K. Transmission capacity of decode-and-forward cooperation in overlaid wireless networks [C]. *IEEE International Conference on Communication 2010*, Cape town, South Africa, May 23-27, 2010: 1-5.
- [7] Wu H, Li D, and Yin C. Asymptotic analysis of transmission capacities for overlaid spread spectrum wireless networks [J]. *China Communication*, 2010, 7(3): 81-91.
- [8] Kaynia M, Jindal N, and Oien G E. Performance analysis and improvement of MAC protocols in wireless Ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(1): 240-252.
- [9] Kaynia M, Nardelli P H J, Cardieri P, et al. On the optimal design of MAC protocols in multi-hop Ad hoc networks[C]. *IEEE International Symposium of Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks*, Avignon, France, June 4, 2010: 424-429.
- [10] Weber S, Andrews J, and Jindal N. The effect of fading, channel inversion, and threshold scheduling on Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(11): 4127-4149.
- [11] Weber S, Andrews J, and Jindal N. An overview of the transmission capacity of wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(12): 3593-3604.
- [12] Carlson A B, Rutledge J C, and Crilly P B. Communication Systems [M]. 4nd Edition, New York: McGraw Hill College, 2001: 547-665.
- [13] Subbarao M and Hughes B. Optimal transmission ranges and code rates for frequency-hop packet radio networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(4): 670-678.

胡 晗: 女, 1985年生, 博士生, 研究方向为移动通信与无线技术。

朱洪波: 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 副校长, 研究方向为无线通信与电磁兼容、移动通信与无线技术。

朱 琦: 女, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信与无线技术。