无线 Ad hoc 网络中的随机功率控制

文 凯, 郭 伟, 黄广杰
(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 由于能量的限制, 无线 Ad hoc 网络面临网络生存时间、无线资源利用效率以及时延要求等方面的挑战. 无线 Ad hoc 网络中的功率控制已经成为研究领域中的一个热点, 其主要目的是降低网络在分发数据包中的能量消耗, 降低网络中的通信干扰. 为了节省网络能量消耗, 提出了一种随机功率控制的方法, 其核心是让节点的发射功率随机分布在一个功率区间. 通过对随机功率控制和固定功率控制在成功传输概率和网络节能上的理论分析和数值计算比较发现, 合理选择随机功率控制中的最小发射功率, 可获得与固定功率控制相当的成功传输概率, 并能节省网络能量消耗, 延长网络生存周期.

关键词: 固定功率控制; 随机功率控制; 传输成功概率; 平均发射功率
中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2008) 07-1304-05

Random Power Control in the Wireless Ad hoc Networks

WEN Kai, GUO Wei, HUANG Guang-jie
(*National Anti-interference Communication Technology Lab, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*)

Abstract: Due to energy limitation, the wireless Ad hoc networks face to the challenge of lifetime, wireless resource utilized efficiency and delay. Now, the power control in the wireless Ad hoc networks has been the focus of extensive research, its main objectives are to reduce the total energy consumed in packet delivery, reduce the interference to other users in the network. For energy reserving, a method of Random Power Control (RPC) is proposed, the RPC lets the transmission power of nodes randomly distribute in an interval. By theoretic analyzing and numerical computing in the successful transmission probability and average transmitting power of RPC and fixed power control, it indicates that when choosing the proper minimum transmission power in the RPC, the successful transmission probability is almost the same as the fixed power control, the energy consumed is lower, and the lifetime of network is prolonged.

Key words: fix power control; random power control; successful transmission probability; average transmitting power

1 引言

由于能量的限制, Ad hoc 网络面临网络生存时间、无线资源利用效率以及时延要求等方面的挑战, 网络中的节能技术已经成为研究领域中的一个热点; 同时无线 Ad hoc 网络主要采用共享信道, 网络中通信的节点会对其它节点的通信造成干扰, 有必要对节点的发射功率进行控制, 降低网络中的干扰并节省节点的能量消耗. 在第二代蜂窝移动通信网络中, 由于有集中的控制中心以及专用的控制信道, 网络利用这些资源能较好地实现网络节点的功率控制; 相对于传统的蜂窝移动通信网络, 无线 Ad hoc 网络没有集中控制中心, 网络带宽资源也相对有限, 不能使用传统网络中的功率控制算法, 同时由于节点的处理能力较为低下以及网络全分布等特点, 需要采用简单有效功率控制算法. 本文针对无线 Ad hoc 网络资源相对匮乏, 力求功率控制算法简单的特点, 研究了一种随机功率控制算法, 并分析了该算法对网络性能的影响, 经数学分析和数值计算, 表明该随机功率控制在保持网络传输成功概率基本不下降的情况下, 实现网络节能, 并降低网络干扰, 延长节点寿命.

2 相关研究

通常情况下, 在无线 Ad hoc 网络需要通过多跳转发才能实现端到端通信, 然而对网络节点进行功率控制所带来的直接影响就是会减少节点的邻居数量, 这势必将影响到网络的连接性以及节点间的成功通信概率. 文

收稿日期: 2007-03-14; 修回日期: 2008-02-20
基金项目: 国家自然科学基金(No. 60472052, No. 10577007); 战术通信抗干扰技术国防科技重点实验室基金(No. 51434020105ZS04)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

献[1]中 C. Bettstetter 和 C. Hartmann 研究了在对数-正态阴影衰落环境中, 多跳无线网络的连接性问题, 在假设节点具备相同的传输能力且服从同一泊松分布条件下, 给出了保证网络几乎完全连接时网络节点分布密度的下限, 并指出网络中的高衰落变化对网络连接性有正面的作用. 文献[2]研究了在瑞利衰落环境中, 节点均匀独立分布时, 能与同一节点通信的其他节点数量的概率分布情况. 文献[1]和文献[2]中的信号衰落变化从某种程度上可以等效为节点进行功率控制的情况. 文献[3]研究了当 n 个节点独立均匀在边长为 l 的 d 维空间中, 保证网络高概率连接条件下节点的最小传输半径, 研究给出了一维空间中传输半径的准确界以及二、三维空间中传输半径的准界, 研究还表明, 网络的连接性和网络的节能可以在一定程度上均衡. 文献[4]研究了邻居数量对网络连接概率的影响, 研究给出了节点邻居数量的两个界限: $0.074\log n$ 和 $5.1774\log n$, 界限 $0.074\log n$ 表示当节点的邻居数量低于 $0.074\log n$ 时, 随着 n 的减少, 网络连接的概率趋于 0; 界限 $5.1774\log n$ 表示当节点的邻居数量大于 $5.1774\log n$ 时, 随着 n 的增加, 网络连接的概率趋于 1. 文献[5]研究了在最小信号约束条件下, 无线通信系统的停机概率, 并通过马库姆(Marcum) Q 函数和修正贝塞尔函数给出了停机概率的表达式. Tae-Suk Kim 和 Seong-Lyun Kim 在文献[6]中分析了一种随机功率控制方法对 Ad hoc 网络性能的影响, 研究表明随机功率控制在降低网络干扰上有积极的作用, 并通过数学分析和计算表明, 该随机功率方法在高节点密度的网络中能提高网络的连接性.

上述的文献中, 研究了多种条件下网络的连接性, 这些条件在某种程度上可以视同为对节点发射功率的变化, 如无线网络中信号衰落和干扰等因素, 若将这些因素随机化, 则可视为节点发射功率是随机分布的. 基于该思想, 本文将重点研究随机功率控制对节点间传输成功概率的影响, 同时克服文献[6]中将网络中归一化的噪声干扰总和按照高斯分布进行处理的这个不足, 为在无线 Ad hoc 网络中实现随机功率控制提供更为准确的理论指导.

3　随机功率控制和固定功率控制

3.1　系统模型

为了分析随机功率控制对网络连接性的影响, 对系统模型作如下设定: 网络中的所有节点使用同一频率; 节点随机地, 均匀地, 相互独立地分布在预定的区域中; 所有节点均配置半双工的无线电收发信机以及全向天线; 在每次数据包交换期间, 收发信机间的链路增益是稳定不变的. 节点 j 能正确接收节点 i 报文的条件是: $\gamma_{ij}=\dfrac{p_i g_{ij}}{\sum_{k\neq i} p_k g_{kj}+v}\geqslant\gamma^*$, 其中 p_k 表示节点 k 的发射功率, g_{kj} 表示节点 k 到节点 j 的链路增益, v 表示节点 j 的热噪声, γ^* 表示最低信噪比要求; 考虑到接收机的接收灵敏度, 设定接收功率在 $-105\sim-50$dBm 范围内是有效的; 关于电波传播近场的考虑, 由于近场是感应场, 方向性不确定, 从时间统计平均的角度上看, 可视为无方向性, 故可将近场的衰耗看作为常数, 近场取定为 R_c (10 个波长左右), 近场衰减取定为 $c=(R_c)^{-\alpha}$, 其中 α 为电波传播的距离衰减指数.

3.2　随机功率控制

在随机功率控制中, 每个节点选择发射功率的过程相互独立, 且发射功率在区间 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 上服从均匀分布, 即节点在区间 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 中随机选择一个功率值用于通信.

3.2.1　基本分析

为了不失一般性, 我们让节点 j 位于半径为 R_d 圆形区域的中心, 共有 M 个发送节点(包括节点 j)独立且均匀分布于该圆形区域内[6]. 若 R 代表任意一个节点与中心节点间的距离, 则 R 服从下列分布:

$$f_R(r)=2r/R_d^2\quad 0\leqslant r\leqslant R_d \tag{1}$$

将收发节点间的链路增益 G 假设为:

$$G=\begin{cases} c, & \text{for}\quad 0\leqslant r\leqslant c^{-1/\alpha}\\ 1/r^{\alpha}, & \text{for}\quad c^{-1/\alpha}\leqslant r\leqslant R_d\end{cases} \tag{2}$$

根据 R 的分布可以得到 G 的分布函数:

$$P(G)=\begin{cases} 1-\dfrac{g^{-2/\alpha}}{R_d^2} & \text{for}\quad R_d^{-\alpha}\leqslant g< c\\ \dfrac{c^{-2/\alpha}}{R_d^2} & \text{for}\quad g=c\end{cases} \tag{3}$$

从而可以得到 G 的概率密度函数:

$$f_G(g)=\frac{2g^{-(2+\alpha)/\alpha}}{\alpha R_d^2}U(c-g)+\frac{c^{-2/\alpha}}{R_d^2}\delta(g-c)\quad \text{for}\quad R_d^{-\alpha}\leqslant g\leqslant c \tag{4}$$

在随机功率控制情况下, 节点的发射功率在区间 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 上服从均匀分布, 每个节点选择发射功率的过程是相互独立的. 由此可知节点发射功率的概率密度函数为:

$$f_P(p)=\frac{1}{(P_{\max}-P_{\min})}\quad \text{for}\quad P_{\min}\leqslant p\leqslant P_{\max} \tag{5}$$

根据系统模型, 节点 j 能正确接收到区域内某节点 i 信号时, 其信噪比须满足:

$$\gamma_{ij}=\frac{p_i g_{ij}}{\sum_{k\neq i}^{M} p_k g_{kj}+v}\geqslant\gamma^* \tag{6}$$

其中 v 是热噪声, 当 v 远远小于 $\sum_{k\neq i}^{M} p_k g_{kj}$ 时,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\gamma_{ij} \approx \frac{p_i g_{ij}}{\sum_{k\neq i}^{M} p_k g_{kj}} \tag{7}$$

令 $t=\sum_{k\neq i}^{M} p_k g_{kj}$, $t_k = p_k g_{kj}$, $k=1,2,\cdots,M$, t_k 的均值和方差如下:

$$\begin{aligned} E(t_k) &= \mu_k = E(p_k g_{kj}) = E(p_k)E(g_{kj}) \\ &= \frac{(P_{\max}+P_{\min})}{2}\int_{R_d^{-\alpha}}^{c} g \\ &\quad \times\left[\frac{2g^{-(2+\alpha)/\alpha}}{\alpha R_d^2}U(c-g)+\frac{c^{-2/\alpha}}{R_d^2}\delta(g-c)\right]dg \\ &= \begin{cases} \dfrac{(P_{\max}+P_{\min})}{2}\cdot\dfrac{1}{R_d^2}[\ln(R_c/R_d)^{-2}+1] & \text{for } \alpha=2 \\ \dfrac{(P_{\max}+P_{\min})}{2}\cdot\dfrac{2}{(\alpha-2)R_d^2}\left[\dfrac{\alpha}{2}R_c^{(2-\alpha)}-R_d^{(2-\alpha)}\right] & \text{for } \alpha>2 \end{cases} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} D(t_k) &= \sigma_k^2 = E(t_k^2)-E^2(t_k) = E(p_k^2)E(g_{kj}^2)-\mu_k^2 \\ &= \frac{(P_{\max}^2+P_{\max}P_{\min}+P_{\min}^2)}{3} \\ &\quad \times\frac{1}{(\alpha-1)R_d^2}[\alpha R_c^{-2(\alpha-1)}-R_d^{-2(\alpha-1)}]-\mu_k^2 \end{aligned} \tag{9}$$

由于节点位置分布相互独立, 节点发射功率选择也相互独立, 故 t_k 间是相互独立的. 当 M 足够大时, t 的分布呈现出高斯分布的特性, 其分布函数可表示为: $f(t)=N((M-1)\mu_k,(M-1)\delta_k^2)$.

3.2.2 节点 j 和 i 在 $p_i=P_i$, $g_{ij}=G_{ij}$ 条件下成功通信的概率

由式(7)可知, 当 p_i 和 g_{ij} 取某一对特定的值时, 即: $p_i=P_i$, $g_{ij}=G_{ij}$, 节点 j 和 i 间通信成功的概率:

$$\begin{aligned} P(ij)_{\substack{p_i=P_i\\ g_{ij}=G_{ij}}} &= P^{\substack{p_i=P_i\\ g_j=G_{ij}}}(\gamma_{ij}\geqslant\gamma^*) = P\left(\frac{P_iG_{ij}}{t}\geqslant\gamma^*\right) \\ &= P\left(t\leqslant\frac{P_iG_{ij}}{\gamma^*}\right) \\ &= \int_{-\infty}^{\frac{P_iG_{ij}}{\gamma^*}}\frac{1}{\sqrt{2\pi(M-1)\delta_k^2}}\exp\left(-\frac{(t-(M-1)\mu_k)^2}{2(M-1)\delta_k^2}\right)dt \\ &= \int_{-\infty}^{\frac{1}{\sqrt{M-1}\delta_k}\left(\frac{P_iG_{ij}}{\gamma^*}-(M-1)\mu_k\right)}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t'^2}{2}\right)dt' \\ &= \Phi(x) \end{aligned} \tag{10}$$

其中, $t'=\frac{t-(M-1)\mu_k}{\sqrt{M-1}\delta_k}$, $\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left(-\frac{x'^2}{2}\right)dx'$, $x=\frac{1}{\sqrt{M-1}\delta_k}\left(\frac{P_iG_{ij}}{\gamma^*}-(M-1)\mu_k\right)$

3.2.3 节点 j 和 i 通信概率

从前面的分析可知, 当 p_i 和 g_{ij} 取不同值时, 节点 j 能正确接收节点 i 信号的概率是一系列变化的值. 从统计学的角度来看, 在随机功率控制的条件下, 节点 j 能同 i 通信的概率可由下式计算出:

$$P_{random}(ij)=\int_{p_i}\int_{g_{ij}}\Phi(x)\cdot f(p_i,g_{ij})\,dp_i dg_{ij} \tag{11}$$

其中, $f(p_i,g_{ij})$ 为 p_i 和 g_{ij} 的联合概率密度函数.

由于 p_i 和 g_{ij} 相互独立, 可知 $f(p_i,g_{ij})$ 为:

$$\begin{aligned} f(p_i,g_{ij}) &= f_G(g_{ij})\cdot f_p(p_i) \\ &= \frac{1}{(P_{\max}-P_{\min})}\left[\frac{2g^{-(2+\alpha)/\alpha}}{\alpha R_d^2}U(c-g)+\frac{c^{-2/\alpha}}{R_d^2}\delta(g-c)\right] \\ &\quad \text{for}\quad R_d^{-\alpha}\leqslant g_{ij}\leqslant c\quad P_{\min}\leqslant p_i\leqslant P_{\max} \end{aligned} \tag{12}$$

3.3 固定功率控制

固定功率控制情况下节点的发射功率设定为 $P_{\max}$. 由此可见, 当随机功率控制中的 $P_{\min}$ 无限趋近于 $P_{\max}$ 时, 随机功率控制的网络性能将逼近固定功率控制的情况. 在固定功率控制情况下, 根据式(7), 节点 i 能同 j 通信的条件为:

$$\gamma_{ij}=\frac{p_i g_{ij}}{\sum_{k\neq i}^{M} p_k g_{kj}}=\frac{g_{ij}}{\sum_{k\neq i}^{M} g_{kj}}\geqslant\gamma^* \tag{13}$$

令 $t'=\sum_{k\neq i}^{M} g_{kj}$, $t_k'=g_{kj}$, $k=1,2,\cdots,M$, t_k' 的均值和方差如下:

$$\begin{aligned} E(t_k') &= \mu_k' = E(g_{kj}) \\ &= \begin{cases} \dfrac{1}{R_d^2}[\ln(R_c/R_d)^{-2}+1] & \text{for } \alpha=2 \\ \dfrac{2}{(\alpha-2)R_d^2}\left[\dfrac{\alpha}{2}R_c^{(2-\alpha)}-R_d^{(2-\alpha)}\right] & \text{for } \alpha>2 \end{cases} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} D(t_k') &= \sigma_k'^2 = E(t_k'^2)-E^2(t_k') = E(g_{kj}^2)-\mu_k'^2 \\ &= \frac{1}{(\alpha-1)R_d^2}[\alpha R_c^{-2(\alpha-1)}-R_d^{-2(\alpha-1)}]-\mu_k'^2 \end{aligned} \tag{15}$$

由于节点位置分布相互独立, 故 t_k' 间是相互独立的. 当 M 足够大时, t' 的分布呈现出高斯分布的特性, 其分布函数可表示为:

$$f(t')=N((M-1)\mu_k',(M-1)\sigma_k'^2)$$

由式(14)和(15), 当 $g_{ij}=G_{ij}$, 节点 j 和 i 间通信成功的概率:

$$\begin{aligned} P(ij)_{g_j=G_{ij}} &= P_{g_{ij}=G_{ij}}(\gamma_{ij}\geqslant\gamma^*) \\ &= P\left(\frac{G_{ij}}{t'}\geqslant\gamma^*\right)=P\left(t'\leqslant\frac{G_{ij}}{\gamma^*}\right) \\ &= \int_{-\infty}^{\frac{G_{ij}}{\gamma^*}}\frac{1}{\sqrt{2\pi(M-1)\delta_k'^2}}\exp\left(-\frac{(t'-(M-1)\mu_k')^2}{2(M-1)\delta_k'^2}\right)dt' \\ &= \int_{-\infty}^{\frac{1}{\sqrt{M-1}\delta_k'}\left(\frac{G_{ij}}{\gamma^*}-(M-1)\mu_k'\right)}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t''^2}{2}\right)dt'' \\ &= \Phi(x') \end{aligned} \tag{16}$$

其中, $t''=\frac{t'-(M-1)\mu_k'}{\sqrt{M-1}\delta_k'}$, $\Phi(x')=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x'}\exp\left(-\frac{x''^2}{2}\right)dx''$, $x'=\frac{1}{\sqrt{M-1}\delta_k'}\left(\frac{G_{ij}}{\gamma^*}-(M-1)\mu_k'\right)$

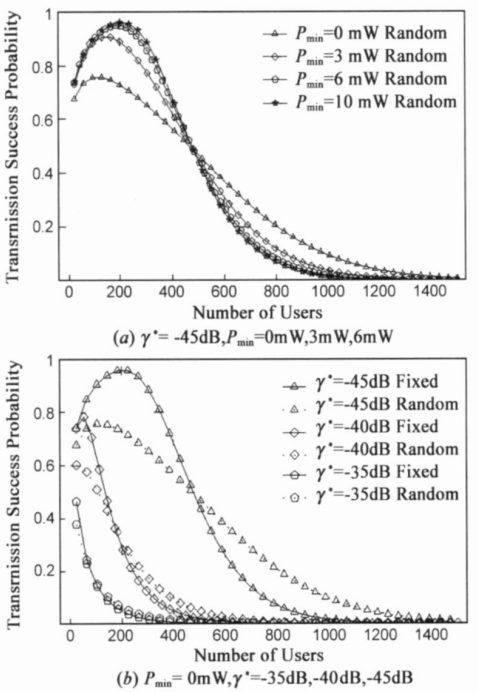
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采用与式(11)相同的方法, 可得到固定功率控制条件下节点 j 能同 i 通信的概率:

$$P_{fix}(ij) = \int_{g_j} \Phi(x') \cdot f(g_{ij})\, dg_{ij} \qquad (17)$$

4　数值计算

为了定量分析随机功率控制和固定功率控制对传输成功概率的影响, 我们利用 Matlab 这个数学工具进行了数值计算, 其中主要参数取定与文献[6]相同, 具体如下: 节点数量 M 的取值区间为 10– 1500; 节点的最大通信半径 R_d = 10m; 电波传播的近场约为 10 个波长: R_c = 1.0m(2.4G 频段); 节点最大发射功率: P_{max} = 10mW, 随机功率控制中节点的最小发射功率分别设定为: P_{min} = 0mW, 3mW, 6 mW; 节点最低信噪比(γ^*)设定为: –30db, –35db, –40 db, –45db; –50db, 无线电波传播距离衰减指数设定: a = 4; 近场衰减 c 是一个不大于 1 的常数, 设定为: c = 1. 文献[6]中主要结论如图 1 所示, 本文的主要结果如图 2~ 图 6 所示.



(a) γ^*= -45dB, P_{min}=0mW,3mW,6mW

(b) P_{min}= 0mW, γ^*=-35dB,-40dB,-45dB

图 1　成功传输概率 (文献 [6])

图 1 对文献[6]的主要结果进行了引用, 该结果表明: 在低节点密度条件下, 固定功率控制的传输成功概率要高于随机功率控制的情况; 反之, 在高节点密度条件下, 随机功率控制的传输成功概率要高于固定功率控制. 文献[6]虽然得出了一个似乎很有用的结论, 但由于其分析中的简单化处理, 使得分析结果与真实情况存在较大的偏差, 不能为无线 Ad hoc 中的随机功率控制提供很好的理论指导. 根据我们的分析结果, 如图 2~ 图 6 所示, 这两种功率控制策略的传输成功概率曲线是不相交的, 即不存在文献[6]中所描述的相交点, 这个结论与文献[6]的结论显然不同, 这主要的原因是通过使用了条件概率的分析方法, 使得结果更加准确.

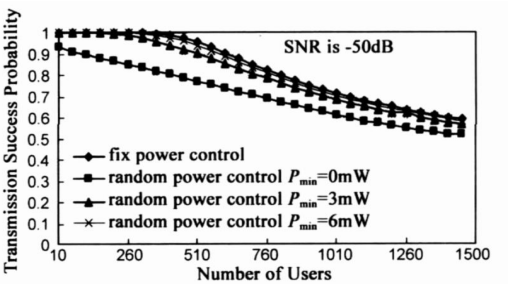


图 2　SNR 为 -50dB 时的成功传输概率

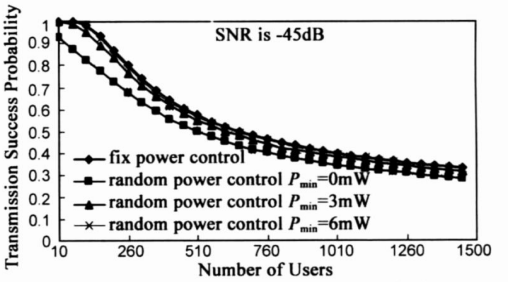


图 3　SNR 为 -45dB 时的成功传输概率

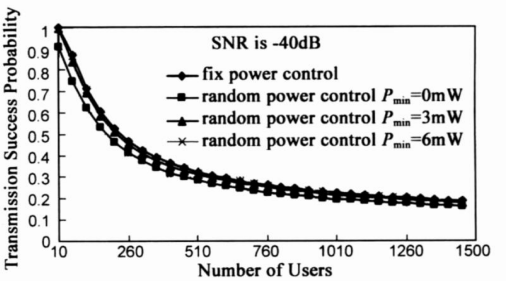


图 4　SNR 为 -40dB 时的成功传输概率

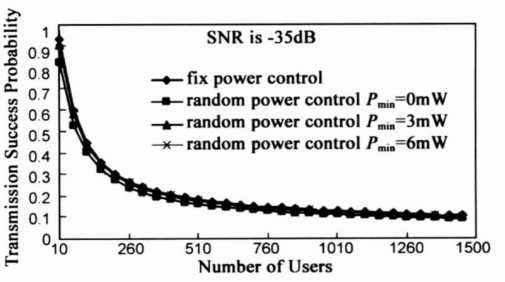


图 5　SNR 为 -35dB 时的成功传输概率

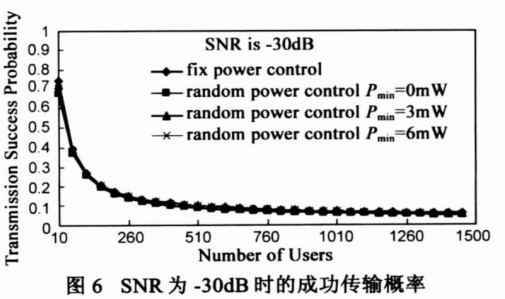


图 6　SNR 为 -30dB 时的成功传输概率

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 2 至图 6 是采用正确分析方法得出的性能曲线, 分别对应节点 SNR 要求为 - 50dB、- 45db、- 40db、- 35db 和 - 30db 时的情况. 从图中可以看出, 当节点的 SNR 要求越低时, 随机功率控制与固定功率控制性能间的绝对差异相对较大, 但随着 SNR 值的增大, 两种功率控制算法在性能上的绝对差异逐渐缩小, 甚至基本重合; 同时随机功率控制中的最小功率选择对性能的影响也较大, 随着最小功率取值的增加, 同一 SNR 条件下的成功传输概率更为接近固定功率控制. 为了进一步分析两种功率控制策略在传输成功概率上的差异, 使用相对差值描述的方法来比较不同功率控制策略下传输成功概率, 如图 7 所示. 相对差值的计算方法如下:

$$E\left(\frac{\mathrm{Pr}_{fix}-\mathrm{Pr}_{random}}{\mathrm{Pr}_{fix}}\right)\times 100\% \qquad (18)$$

从图 7 可以看出, 当随机功率控制情况下的 $P_{\min}$= 3mw 时, 随机功率控制的传输成功概率与固定功率控制的差异在 4% 以内; 当 $P_{\min}$= 6mw 时, 该差异在 2% 以内. 根据图 7 的分析结果, 当随机功率控制的最小功率大于最大功率的 30% 时, 其传输成功概率曲线是非常靠近固定功率控制情况的曲线, 成功传输概率上的绝对差值基本可以忽略, 然而随机功率控制情况下节点的平均发射功率同固定功率控制情况相比为:

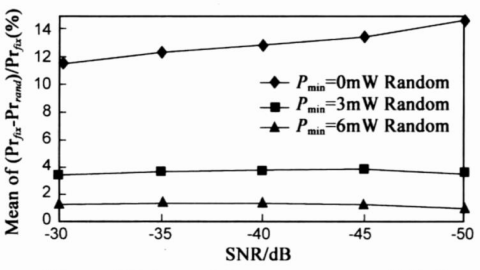


图 7 不同 SNR 下 $(\mathrm{Pr}_{fix}-\mathrm{Pr}_{rand})/\mathrm{Pr}_{fix}$ 的均值

$$\left(\frac{P_{\min}+P_{\max}}{2}\right)/P_{\max}=0.5+0.5(P_{\min}/P_{\max}) \qquad (19)$$

由式(19)可知, 随机功率控制的平均发射功率明显低于固定功率控制的情况, 这有利于降低网络的总体能量消耗, 延长节点的使用寿命和网络的生存周期.

通过上述的分析, 可以得到以下结论: 通过随机功率控制, 并使用较为合适的最小发射功率 ——$P_{\min}\geqslant 30\%P_{\max}$, 可以获得与固定功率控制相当的成功传输概率, 同时能显著降低网络中的能量消耗, 延长网络的生存周期.

5 结束语

在上述的分析研究中可以看出, 当选择较为合适的最小发射功率时, 随机功率控制的传输成功概率和固定功率控制基本相当, 并能有效降低节点的能量消耗, 延长网络的生存周期, 该结论为随机功率控制的应用提供了的理论指导, 有重要的应用价值. 在传感器网络中, 随机功率控制的方法尤其具备实用价值, 这是因为传感器网络的节点密度较大, 网络中往往会有多个传感器节点感知同一数据, 造成网络中多发一收的这种数据交换情况, 采用随机功率控制在保证网络数据传输成功概率基本保持不变的情况下, 又能达到节省网络的能量消耗的目的.

参考文献:

[1] C Bettstetter, C Hartmann. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment[J]. ACM/Springer Wireless Networks, 2005, 11(5): 571- 579.

[2] J Orriss, S K Barton. Probability distributions for the number of radio transceivers which can communicate with one another[J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(4): 676- 681.

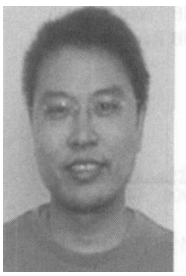
[3] P Santi, D M Blough. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2003, 4(3): 25- 39.

[4] F Xue, P R Kumar. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks[J]. ACM Journal of Wireless Networks, 2004, 10(2): 169- 181.

[5] H C Yang, M Alouini. Closed-form formulas for the outage probability of wireless communication systems with a minimum signal power constraint[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology. 2002, 51(6): 1689- 1698.

[6] Tae-Suk Kim, Seong-Lyun Kim. Random power control in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(12): 1046- 1048.

作者简介:



文 凯 男, 1972 年 8 月出生于重庆江津市, 博士研究生. 主要无线 Ad hoc 网络节能技术的研究. E-mail: kai.wen@163.net



郭 伟 男, 1964 年 6 月出生于四川省达县, 教授, 博士生导师. 主要从事网络优化设计及仿真技术、网络可靠性、自组网技术、信号检测与处理技术等方面的研究.

E-mail: guowei@uestc.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net