

单跳节点间传输距离对无线传感器网络性能影响的评估

刘智杰^{1,2}, 陶军^{1,2}, 陈文强^{1,2}

(1. 东南大学 教育部计算机网和信息集成重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 在无线传感器网络中对传输距离与传输能量及传输速率的关系进行了研究。传统的工作对该关系的认识并不准确, 而这是考虑网络各性能指标的基础。首先介绍了实验所用到的无线传感器网络节点, 实验的环境及实验的设计; 然后通过实验测量得到在不同传输距离上的报文丢失率, 并对其进行拟合得到传输距离与报文丢失率的关系; 最后在该关系的基础上考虑了报文的重传, 进一步研究了传输距离对传输能量及传输速率的影响。主要贡献是在 Imote2 型节点平台上定量地给出了单跳节点间传输距离对无线传感器网络性能影响的评估。

关键词: 无线传感器网络; Imote2; 传输距离; 传输能量; 传输速率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z1-0255-07

Effect evaluation of one-hop transmission distance vs performance in wireless sensor network

LIU Zhi-jie^{1,2}, TAO Jun^{1,2}, CHEN Wen-qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of China, Nanjing 210096, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The research was on the influence of transmission distance respectively on energy consumption and transmission rate in wireless sensor network. The views of traditional work on this impact was not so precise, which was essential to the performance of WSN. The sensor node used, experimental environment and design have been introduced; Then the packet loss ratio for different transmission distance have been examined experimentally, and their functional relation by fitting the experimental data have been acquired; finally, considering packet retransmission based on that conclusion at the same time, focused on the variance of energy cost and transmission rate with distance. The main contribution is to acquire the quantitative effect evaluation of one-hop transmission distance and performance in WSN.

Key words: wireless sensor network; Imote2; transmission distance; energy consumption; transmission rate

1 引言

随着通信、嵌入式和传感器技术的日益成熟, 由一组具有一定的感知能力、计算能力和通信能力的传感器节点以 ad hoc 方式构成的无线传感器网络

引起了人们的极大关注。无线传感器网络正广泛地应用于国防军事、环境科学、交通管理、医疗卫生、空间探索和反恐抗灾等领域, 成为无线网络领域的一个重要技术研究方向。在无线传感器网络的相关研究中, 网络的传输性能与生命期是最受关注的性

收稿日期: 2012-08-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320501); 国家自然科学基金资助项目(61272532); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010414); 中国博士后基金资助项目(20100480071); 博士后特别资助基金资助项目(20090092120029)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320501); The National Natural Science Foundation of China(61272532); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2010414); China Postdoctoral Science Foundation (20100480071); China Postdoctoral Science Special Foundation (20090092120029)

能指标。为此,研究者在传输功率控制(TPC, transmission power control)问题上做了大量工作。文献[1]提出了 2 种 TPC 方法,通过仿真发现可以节省 57%的能量;Jeong 等人通过实验研究了 TPC 的性能并对其进行评估,认为现实中的 TPC 性能不如仿真结果,但是他们的动态 TPC 方法能够为 10% 的任务节省 37%的能量^[2]。

现有研究表明传感节点的能量消耗主要集中在无线射频的能耗,认为在合理的传输范围内,采用相同的发射功率传感器节点的传输性能相同,包括节点间的报文丢失率、传输能量消耗及传输速率等都保持稳定;然而,传统观点并没有考虑节点间实际的传输距离对传输性能的影响,而这是影响网络的传输性能与生命期的重要因素。在实际的系统应用中,作者发现节点间的传输距离与传输性能有着紧密的联系,因此本文通过实验在发射功率不变条件下研究了该关系。为了寻求传输距离对网络的传输性能与生命期的影响,传输距离与传输能量及传输速率间的准确的关系是首先需要解决的问题。在研究了无线传感器网络节点间传输距离与报文丢失率的关系的基础上,考虑了传输距离对传输能量及传输速率的影响。

本文的主要贡献是在 Imote2 型节点平台上对传输距离与传输能量及传输速率的关系有了更准确的认识。通过实验测量得到在不同的传输距离上的报文丢失率,并对其拟合得到传输距离与报文丢失率的函数关系;在该关系的基础上考虑了报文的重传,进一步研究了传输距离与传输能量及传输速率的关系,发现节点间传输距离的增大导致传输单位数据所消耗能量的上升与传输速率的下降,且定量地给出了这一关系。

本文首先在第 2 节介绍了相关的研究工作;第 3 节定义了文章用到的符号;接着,第 4 节介绍了实验所用到的无线传感器网络节点,实验的环境及实验的设计;然后,通过对实验测量得到的不同传输距离对应的报文丢失率的拟合得到了传输距离与报文丢失率的函数关系,并在该关系的基础上考虑了报文的重传,在第 5 节进一步研究了传输距离与传输能量及传输速率的关系。最后,在第 6 节中给出相关结论和进一步的工作。

2 相关工作

无线链路传输特性的研究已广泛展开,并取得

了相应的研究成果。文献[3~6]提出无线通信范围是不规则的,无线链路是不对等的。为了研究无线链路,尤其是无线传感器网络节点间 802.15.4 链路的传输特性,现有的研究方法之一是实验测量链路质量与通信距离、环境等的关系,这些被测量的参数包括:接受信号强度指示(RSSI)、链路质量指示(LQI)、链路损耗(PL)、报文接收率/报文丢失率(PRR/PLR)。最近,Ahmed 等人在文献[7]中测量了通信距离对 PL 的影响:通信距离越大,PL 越大;文献[8]较为全面地测量了室外环境中二维平面上无线传感器网络节点 Tmote Sky 周围的 PLR 随距离的变化情况;同时,Srinivasan 等人^[9]在选择更合适的描述链路质量的参数时将 RSSI、LQI 都与 PRR 对比,这说明 PRR/PLR 是更为准确的描述链路质量的参数。然而,上述工作只进行了测量但未从测量数据得到较为合理的传输距离和报文丢失率的函数关系,以刻画传输距离对报文丢失率的影响;并且均未考虑无线传感器网络主流节点 Imote2 的传输特性。

无线传感器网络中一个重要的性能指标节点间的传输能量,会因分组丢失的发生而出现变化,目前关于传输距离和传输能量关系的研究工作并不多。Correia 等人在文献[10]中研究了传输距离与 RSSI 的关系,随着传输距离的增大,RSSI 逐渐减小,通过提高发送功率来保证接收端的信号强度,从而导致能量消耗上升。文献[11~13]也按照这一思路,不同的是他们分别利用了 LQI、PL、PRR 作为衡量链路质量的标准。此外,Kohvakka 等人通过改变 DOI(degree of irregularity)或 VSP(variance of sending power)导致控制报文数量的变化,最后改变传输能耗^[14]。然而,上述 5 种思路都没有考虑报文的重传也会导致传输能量的改变;同时他们所共同得到的传输距离和传输能量呈正相关性的结论也进一步佐证了本文对这一问题的讨论。

另一个重要的无线传感器网络性能指标节点间的传输速率也受到分组丢失的影响,当前关于传输距离和传输速率关系的研究工作相对较少。Duquennoy 等人^[15]在 PIP(packets in pipe)情况下测量了报文丢失率和实际吞吐量的关系;由于报文丢失率的上升导致了实际吞吐量的下降;同时,由于无线收发器模块一直处于开启状态,所以传输每比特所消耗能量上升;然而,该文献并未考虑报文丢失率上升的原因。同时,Sheth 等人对 IEEE 802.11

链路测量了传输距离和带宽的关系^[16]; 随着距离的增大, 报文延迟过大而超时重传, 所以带宽下降; 然而在报文延迟增大的同时, 报文丢失率也会增大, 从而影响报文重传及传输速率。

综合上述, 当前的研究工作大多忽略了分组丢失及报文重传对无线传感器网络性能的影响, 所以本文通过对传输距离与报文丢失率关系的研究, 考虑了报文重传对传输能量与传输速率的影响, 指明了传输距离与无线传感器网络性能的关系。

3 预备工作

考虑一个二维的无线传感器网络中的 2 个节点, 当其中一个节点向另一个通过无线方式发送数据报文时, 由于无线信号的自身衰减、相互干扰等特性, 会发生分组丢失现象。为了便于讨论, 本文用到了特定的符号, 现定义如下。

- 1) L : 每个数据报文或 NACK 的长度。
- 2) d : 2 个传感器节点间的传输距离。
- 3) p_1 : 数据传输过程中的报文丢失率。
- 4) t_T : 发送节点通过无线发送一个报文所需时间; t_0 : 超时时间; t_1 : 发送节点通过无线发送报文的时间间隔。
- 5) E_{tx} : 传感器节点通过无线发送每比特数据所需能量; E_{rx} : 接收每比特数据所需能量; 2 者随传感器节点类型的不同而变化, 对相同类型的传感器节点有 $E_{rx} = \alpha * E_{tx}$, 其中 α 是非零常数。

4 实验方法

使用 Imote2 节点作为实验节点, 在学校水泥甬路场景中, 通过节点收到报文数量来计算报文丢失率, 进行了本次实验。

4.1 实验环境设置

本文选用的无线传感器网络的节点为 Imote2, 如图 1 所示。由于该传感器节点具有体积小, 性能高, 能耗低, 生存期长, 支持多种操作系统等优点, 被无线传感器网络的研究者所普遍使用。

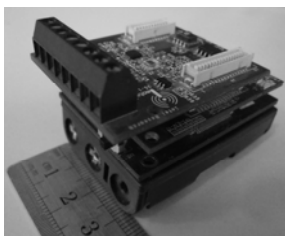


图 1 Imote2 型节点

本实验以学校水泥甬路为场景, 如图 2 所示, 甬路宽 9m, 两侧植树, 在视距范围内无障碍物遮挡。一般来说, 对于无线传感器网络的测量实验应分别在 3 个场景中进行: 室内(如房间, 走廊内等), 草地或森林, 平直的马路或停车场。然而本文没有考虑前 2 种场景。在实际的无线传感器网络的应用中, 无线传感器节点通常不会部署在室内场景; 在森林, 草场等环境中, 由于树木、灌木或草等的密度分布, 风向等因素会对无线信号的强度造成较大影响, 即使对草地场景进行了测量, 其结果对实际应用也并无意义。因此, 测量仅在水泥甬路中进行。同时, 在该实验场景中, 假设外界的无线电波(如移动电话基站等)、风速、空气温度和湿度的变化等对实验结果的影响可以忽略, 测试过程中没有人员走动等其他干扰。



图 2 实验场景

4.2 实验设计

本实验使用 TinyOS 2.x 作为 Imote2 上运行的操作系统, 使用 nesC 作为编程语言。TinyOS 2.x 是加州大学伯克利分校 (UC Berkeley) 开发的开放源码的操作系统, 专为嵌入式无线传感网络设计。TinyOS 2.x 基于构件的架构使得代码的快速更新成为可能, 而这又减小了受传感器节点存储器限制的代码长度。同时, TinyOS 2.x 事件驱动任务事件协同的模型适用于对时间要求严格的应用。TinyOS 2.x 已经被移植到 10 多个平台和众多的传感器板上, 如 TelosB、Imote2、MicaZ 等, 得到了无线传感器网络研究者的广泛认可。

本实验使用 2 个 Imote2 节点, 一个作为发送节点 Transmitter, 另一个作为接收节点 Receiver, 后者通过串口与一台计算机相连, 如图 3 所示。

在某一特定传输距离 d 上, 发送节点 Transmitter 通过无线方式连续发送 n 个数据报文给接收节点 Receiver, 接收节点 Receiver 将收到的数

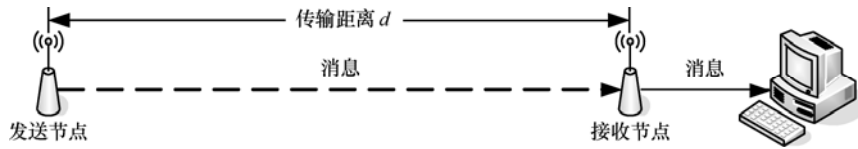


图 3 在特定传输距离 f 上报文丢失率的测量

据报文通过串口线发送给计算机，并存储在计算机的硬盘里。待通信过程结束，通过查看计算机收到的数据报文的个数 m 来确定传输距离 d 上的报文丢失率 $1 - m/n$ 。

本次实验的流程为：测试距离从 0~100m，平均每 10m 为一组，每组测试 2~3 次，在数据报文丢失率波动较大的距离（本场景此距离为 60~80m），每隔 0.3~0.5m 为一组。每次测试，发送节点 Transmitter 以 50 个/s 的速度发送 30 000 个固定长度的数据报文。

为了方便后面的讨论，现给出实验对时间参数的设置，如表 1 所示。

t_T /s	t_0 /s	t_1 /s
0.004	0.1	0.02

5 实验数据结果分析

在通过第 4 节所述的方法获得实验数据之后对其进行预处理，数据预处理的方式主要包括剔除不平滑的坏点，将对应于相同传输距离的报文丢失率取平均值等。最后得到了如图 4 所示的实验数据点。

5.1 传输距离 vs 报文丢失率

本文将试图通过实验数据来研究传输距离和数据报文丢失率之间的关系，即对实验数据进行拟合，并筛选出 2 个误差较小的拟合结果，如图 4 所示。其中，由式(1)所给出的拟合曲线方程为

$$p_l = \begin{cases} 0, & 0 \leq d < d_1 \\ a_1 \operatorname{atan}(a_2 d + a_3) + a_4, & d_1 \leq d \leq d_2 \\ 1, & d > d_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中，相关参数的取值如表 2 所示。该曲线和实验数据点的误差均方差为 0.011 47。由式(2)所给出的拟合曲线方程为

$$p_l = a_1 \operatorname{erf}(a_2 d + a_3) + a_4, \quad d \geq 0 \quad (2)$$

其中，相关参数的取值如表 2 所示。该曲线和实验数据点的误差均方差为 0.015 68。

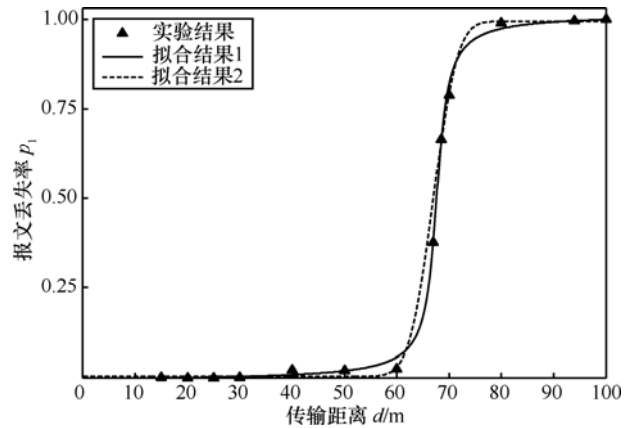


图 4 实验数据点的拟合

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	d_1	d_2
式(1)拟合参数	0.33	0.63	-52.32	0.50	16.59	100.96
式(2)拟合参数	0.50	0.20	-13.19	0.50	-	-

由于拟合结果式(1)的误差均方差更小，从图 4 中看它更接近于实验数据点，所以后面的讨论均以式(1)为基础展开。

上面通过对报文丢失率实验数据点的拟合，得到了传输距离和报文丢失率之间的函数关系。然而，在无线传感器网络的研究中，本文更关注由此产生的数据传输能量消耗和延迟。所以，本文将以上面的结果作为基础，通过理论推导得出两个传感器节点的传输距离与传输单位数据所需能量的关系；在此证明后，继续扩展到报文丢失率对数据传输速率的影响上。

5.2 传输距离 vs 传输能效

该问题相关研究的主要思路是随着传输距离的增大，链路质量下降，通过增大发送功率来保证接收端的信号强度，从而导致能量消耗的上升。而本文的思路在于不改变发射功率，而是由于传输距离的增大，报文丢失率上升，使报文重传的概率增大，从而导致传输能量的改变。

如图 5 所示，由于 2 者相距 d ，由前面的讨论，

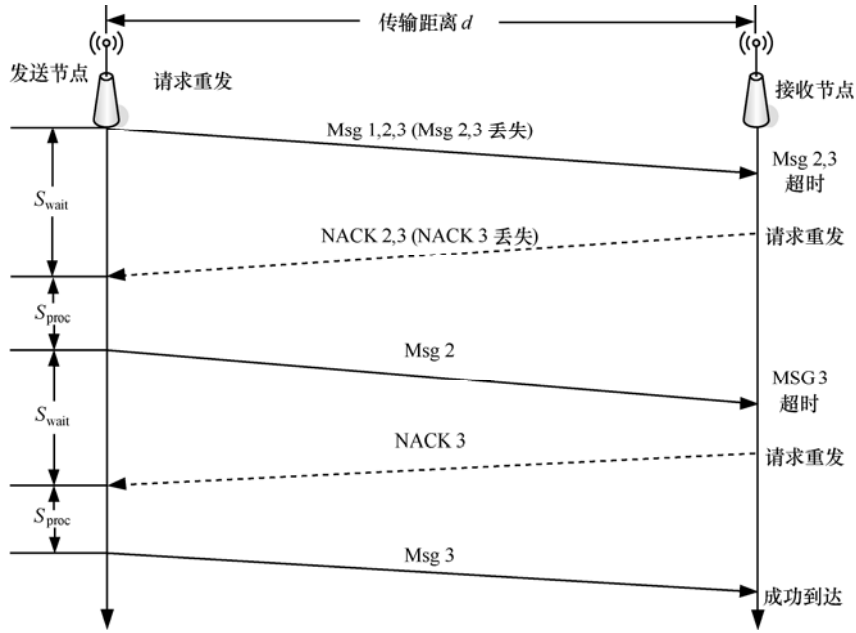


图 5 实验实例时序 (S_{wait} 表示等待状态, S_{proc} 表示处理状态)

2 者传输数据的报文丢失率为 p_1 , 所以在传感器节点 Transmitter 向传感器节点 Receiver 发送的 n 个 message 中, 平均而言会有 np_1 个丢失。在此, 采用选择重传机制 (SR) 来处理分组丢失的情况, 所以此时接收节点 Receiver 回复 np_1 个 NACK 表明需要重发的数据报文。在这些 NACK 中, 平均又会有 np_1^2 个丢失, 所以传感器节点 Transmitter 会重发 $np_1(1 - p_1)$ 个 message; 后面过程以此类推。

由上述过程, 分别给出发送节点有效传输每比特数据所需能量 E_v 及传输效能 e_v 的定义。

定义 1 在考虑传感器节点间传输存在分组丢失的应用中, 发送节点有效传输每比特数据所需能量 (单位: J/bit)

$$E_v = E/8nL$$

其中, E 为发送节点传输 n 个数据报文所需总能量。

为了更客观地反映某种型号节点在实际发送过程中与某次实验测量无关的能量利用效率特性, 定义了传输能效 e_v 。

定义 2 (传输能效) 定义传输能效为实际数据传输所需能量相对于传输的理论所需能量的比值

$$e_v = E_v/E_{tx}$$

对于传感器节点 Transmitter 而言, 由于处理数据报文所需能量远小于发送数据报文所需能量, 所以在考虑传输数据报文所消耗的能量时可以忽略处理数据报文所需能量; 而由于接收数据报文所需

能量是可观的, 所以本文将考虑这部分能量。

命题 1 在发送节点向相距为 d 的传感器节点发送数据的过程中, 其传输效能为

$$e_v = \frac{1 + \alpha p_1}{1 - p_1}$$

证明 数据传输过程中, 由于分组丢失的存在, 则发送节点实际的报文传输个数近似为

$$n_v = n \lim_{K \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=0}^K p_1^i \right) = \frac{n}{1 - p_1}$$

由于 $E_{rx} = \alpha * E_{tx}$ 及定义 1, 所以有效传输每比特数据所需能量为

$$E_v = \frac{1 + \alpha p_1}{1 - p_1} E_{tx} \tag{3}$$

将式(3)代入定义 2, 得证。

由拟合结果式(1)与命题 1 可以得到传输距离与传输能效间的关系, 如图 6 所示, 其中 2 条曲线分别代表 α 的 2 个典型取值下传输能效的变化情况, 并给出了对传输距离从 65~70m 的传输能效的放大图。

由于传输距离的增大, 由式(1)可知报文丢失率上升, 因此报文重传的概率增大, 从而导致有效传输每比特数据所需能量上升, 因此图 6 中呈现传输能效随传输距离的增大而上升的趋势。这进一步表明了传输能效的实际意义: 传输能效的值越大, 意味着实际的传输能量与理论的相差越大, 说明实际传输过程中能量的利用效率越低。

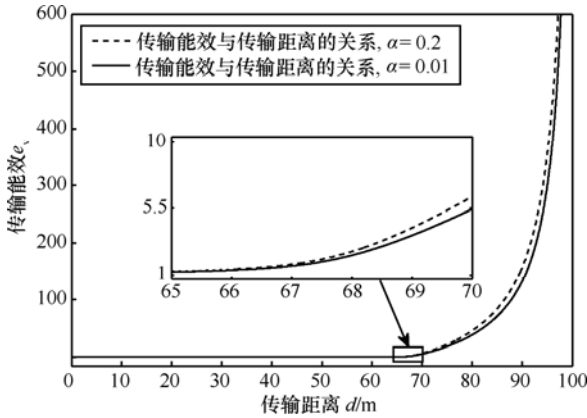


图 6 传输距离与传输能效的关系

另外，由命题 1 也可以得到， E_{ix} 即为无分组丢失情况下有效传输每比特数据所需能量；所以 e_v 也可以认为是 E_v 与无分组丢失情况下该量的比值。

5.3 传输距离 vs 传输速率

在现有的相关研究工作中 Sheth 等人对 IEEE 802.11 链路测量了传输距离和带宽的关系^[16]；随着传输距离的增大，报文延迟过大而超时重传，所以带宽下降。而传输距离增大使报文丢失率增大，最终也会影响传输速率。

由 5.1 节的拟合结果，传输距离越大，报文丢失率越大，如 5.2 节中对选择重传机制 (SR) 的描述，发送节点为了传输一定数量的 message 而不得不重传的 message 就越多，所需时间也越长，数据传输速率 R 随之减小；在无分组丢失情况下传输速率达到理论传输速率 R_m 。

下面将研究另一个传输参数：传输效率 r ，参见定义 3。

定义 3 (传输效率) 在考虑传感器节点间传输存在分组丢失的应用中，为了方便地描述传输速率，这里定义实际传输速率相对于理论传输速率的比值为： $r = R/R_m$ 。

由于处理器处理报文的时间远小于发送一个报文所需要的时间，因此传感器节点 Transmitter 处理报文的时间也是可以忽略的。

命题 2 在发送节点向相距为 d 的传感器节点发送数据的过程中，其节点的传输效率为

$$r = \frac{(n-1)t_1}{\left(\frac{1-p_1(1-p_1)(2-p_1)}{(1-p_1)^2}\right)t_T + p_1t_O + (n-1)t_1}$$

证明 数据传输过程中，由于分组丢失的存在，发送节点实际的报文传输个数近似为 n_v ，则所

需时间为

$$t = \left(\frac{1-p_1(1-p_1)(2-p_1)}{(1-p_1)^2}\right)t_T + p_1t_O + (n-1)t_1$$

数据传输速率为

$$R = \frac{8nL}{\left(\frac{1-p_1(1-p_1)(2-p_1)}{(1-p_1)^2}\right)t_T + p_1t_O + (n-1)t_1} \quad (4)$$

将式(4)代入定义 3，得证。

由拟合结果式(1)与命题 2 可以得到传输距离与传输效率间的关系，如图 7。由于传输距离的增大，由式(1)可知报文丢失率上升，因此报文重传的概率增大，从而延长传输单位数据报文的时间，因此在图 7 中随着传输距离的增大传输效率呈现下降的趋势。这进一步表明了传输效率的实际意义：传输效率的值越小说明实际的传输速率和理论的相差越大，意味着实际传输过程中传输数据的效率越低。

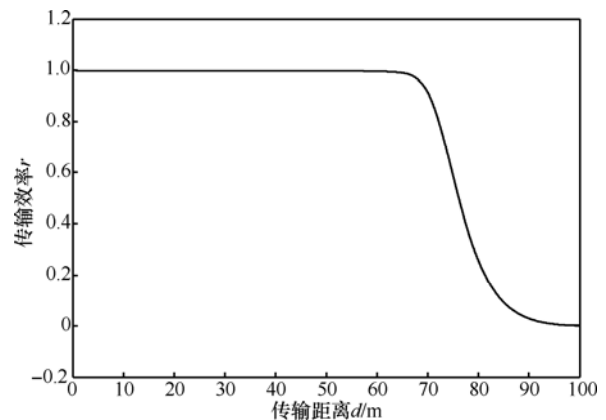


图 7 传输距离与传输效率的关系

另外，由命题 2 还可以得到，在无分组丢失情况下传输速率达到理论传输速率 $R_m = \frac{8nL}{t_T + (n-1)t_1}$ 。

6 结束语

在无线传感器网络的相关研究中，网络的传输性能与生命期是备受关注的研究目标。但由于在传统观点中没有考虑节点间实际的传输距离对传输性能的影响，因此无线传感器网络的性能并不令人满意。通过研究发现，随着节点间传输距离的增大，报文丢失率、报文重传的概率随之增大，从而导致传输单位数据所消耗能量的上升与传输速率的下降；且本文定量地给出了这一关系。

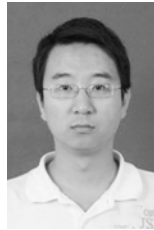
本文的工作有利于其他与无线传感器网络相

关的研究, 将会影响到拓扑控制、路由算法、移动元素的采集距离等一系列问题, 例如静态无线传感器网络规划中节点的部署密度何时最佳, 或传感器网络移动数据收集方案中移动元素与被访问节点的实际传输距离的选择。

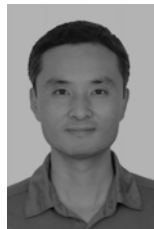
参考文献:

- [1] CORREIA A H L, MACEDO F D, SANTOS d L A, *et al.* Transmission power control techniques for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(17): 4765-79.
- [2] JEONG J, CULLER D, OH H J. Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks[A]. *Fourth International Conference on Networked Sensing Systems*[C]. Braunschweig, Germany, 2007. 27-34.
- [3] CERPA A, BUSEK N, ESTRIN D. SCALE: A Tool for Simple Connectivity Assessment in Lossy Environments[R]. UCLA: CENS Technical. 2003.
- [4] GANESAN D, KRISHNAMACHARI B, WOO A, *et al.* Complex Behavior at Scale: An Experimental Study of Low-Power Wireless Sensor Networks[R]. Technical Report UCLA/CSD-TR 02-0013, 2002.
- [5] WOO A, TONG T, CULLER D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks[A]. *ACM SenSys*[C]. Los Angeles, USA, 2003. 14-27.
- [6] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding Packet Delivery Performance in Dense Wireless Sensor Network[A]. *ACM SenSys*[C]. Los Angeles, USA, 2003: 1-13.
- [7] AHMED I, ORFALI S, KHATTAB T, *et al.* Characterization of the indoor-outdoor radio propagation channel at 2.4 GHz[A]. *GCC Conference and Exhibition*[C]. Piscataway, USA, 2011.605-8.
- [8] HOLLAND M M, AURES G R, HEINZELMAN B W. Experimental investigation of radio performance in wireless sensor networks[A]. *Wireless Mesh Networks*[C]. Reston, USA, 2006: 140-150.
- [9] SRINIVASAN K, LEVIS P. RSSI is under appreciated[A]. *The Third Workshop on Embedded Networked Sensors*[C]. Cambridge, USA, 2006.
- [10] LUIZ H A C, DANIEL F M, DANIEL A C, *et al.* Transmission power control in MAC protocols for wireless sensor networks[A]. *ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*[C]. Montréal, Canada 2005. 282-289.
- [11] WANG J, YANG L S, ZHAO Y F. Research of wireless sensor networks cross-layer energy optimization based on link quality[A]. *Measuring Technology and Mechatronics Automation*[C]. Shanghai, China, 2011. 1092-1094.
- [12] KOHVAKKA M, SUHONEN J, HANNIKAINEN M, *et al.* Transmission Power Based Path Loss Metering for Wireless Sensor Networks[A]. *International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*[C]. Helsinki, Finland, 2006.
- [13] JEONGGIL K, TERZIS A. Power control for mobile sensor networks: an experimental approach[A]. *Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*[C]. Boston, USA, 2010.
- [14] ZHOU G, HE T, KRISHNAMURTHY S, *et al.* Impact of radio irregularity on wireless sensor networks[A]. *international conference on Mobile systems*[C]. Boston, USA, 2004.125-138.
- [15] DUQUENNOY S, ÖSTERLIND F, DUNKELS A. Lossy links, low power, high throughput[A]. *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*[C]. Seattle, USA, 2011. 12-25.
- [16] SHETH A, NEDEVSCI S, PATRA R, *et al.* Packet loss characterization in WiFi-based long distance networks[A]. *INFOCOM*[C]. Anchorage, USA, 2007. 312-320.

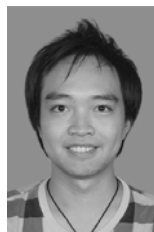
作者简介:



刘智杰 (1987-), 男, 河南濮阳人, 东南大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络的移动性。



陶军 (1975-), 男, 江苏南京人, 东南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线网络、高性能网络、信息经济学及分布式计算与系统。



陈文强 (1988-), 男, 广东广州人, 东南大学硕士生, 主要研究方向为移动传感器网络。