

文章编号:1001-9081(2015)02-0345-06

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2015.02.0345

## 能量捕获无线传感器网络中低时延的可靠数据传递

邱树伟<sup>1\*</sup>, 李琰琰<sup>2</sup>

(1. 汕头职业技术学院 计算机系, 广东 汕头 515078; 2. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310014)

(\*通信作者电子邮箱 city-qsw@163.com)

**摘要:**在能量捕获无线传感器网络(EH-WSN)中,采用网络编码(NC)技术可有效提高数据传递的可靠性。已有的研究成果大多采用固定的数据速率(DR)和固定的最大重传次数(MNR),传输时延较高。为了降低传输时延,结合EH-WSN中节点的能量捕获特性和相邻节点之间的无线链路质量,提出一种优化数据速率和最大重传次数的低时延数据传递方案。通过对节点的能量捕获过程和能量消耗进行建模,给出了节点的剩余能量公式;对相邻节点之间的无线链路质量进行建模,推导出节点发送数据包的成功收包率和每个数据包的期望传输次数,进而推导出传输路径上每一跳的传输时延公式;基于优化方程,在节点满足链路收包率条件和剩余能量条件的前提下,对其数据速率和最大重传次数进行优化配置,使得每一跳的传输时延最小。实验结果表明,与采用固定数据速率和固定最大重传次数的数据传递方案相比,所提出的方案具有最小的端到端传输时延。

**关键词:**能量捕获无线传感器网络;链路质量;网络编码;传输时延;可靠数据传递

**中图分类号:** TN929.5; TP212.9    **文献标志码:**A

### Reliable data delivery with low delay in energy harvesting wireless sensor network

QIU Shuwei<sup>1\*</sup>, LI Yanyan<sup>2</sup>

(1. Department of Computer Science, Shantou Polytechnic, Shantou Guangdong 515078, China;

2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310014, China)

**Abstract:** Using Network Coding (NC) can effectively improve the reliability of data delivery in Energy Harvesting Wireless Sensor Network (EH-WSN). Most of the existing research used fixed Data Rate (DR) and fixed Maximum Number of Retransmissions (MNR) in reliable data delivery, and its end-to-end delay is long. In order to reduce the data delivery delay, a data delivery scheme, which combined the energy harvesting characteristics of EH-WSN node and the link quality between the adjacent nodes, was proposed to obtain low end-to-end delay by optimizing the DR and the MNR. The energy harvesting process and the energy consumption were modeled and the residual energy equation of node was given. The probability of successfully transmitting a packet under the retransmission mechanism was derived by modeling the link quality between the adjacent nodes, and the transmission delay over a hop on the data delivery path was also derived. The proposed scheme can minimize the transmission delay of each hop by optimizing the DR and the MNR based on the optimization equation under the condition that the node can satisfy the constraints of link quality and residual energy. The experimental results show that compared with the fixed DR and fixed MNR data delivery scheme, the proposed scheme can obtain the lowest end-to-end data delivery delay.

**Key words:** Energy Harvesting Wireless Sensor Network (EH-WSN); link quality; Network Coding (NC); transmission delay; reliable data delivery

### 0 引言

在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)中,节点大多采用电池供电,而且,传感器节点一经部署,就难以更换节点的电池。因此,利用能量捕获技术为传感器节点提供电能成为近几年的研究热点。能量捕获无线传感器网络(Energy Harvesting Wireless Sensor Network, EH-WSN)的节点自带能量捕获设备,其运行所需的能量从环境(比如阳光、无线电波、震动、风力、压力等)中捕获而来。与传统的有源无线传感器网络(Battery-Powered Wireless Sensor Network, BP-WSN)相比,EH-WSN具备许多新的特征,例如节点的能量捕获速率(单位为J/s)无法准确预知,节点剩余能量存在不确

定性等。因此,EH-WSN在能量管理和数据传递等方面面临一些新的挑战<sup>[1]</sup>。

在WSN中,经常结合网络编码(Network Coding, NC)来提高数据传递的可靠性<sup>[2-4]</sup>,这在安防多媒体传感器网络或战场环境感知网络中显得格外重要。例如,在安防多媒体传感器网络中,传感器节点感知到一组数据(例如一个窃听画面),而这组数据在传递过程中不允许有数据包丢包,因为数据包丢包会导致用户在查看画面时清晰度下降,不利于安防决策。同样地,在EH-WSN中也存在类似的应用。为了保证数据包传递的可靠性,在文献[2-4]的方案中,对于某一条数据流,源节点先将要发送的数据包进行编码(编码包的个数大于原始数据包的个数),再发送给下一跳;在传输路径

收稿日期:2014-09-01;修回日期:2014-10-31。 基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(y1101183)。

作者简介:邱树伟(1979-),男,广东潮州人,讲师,博士研究生,CCF会员,主要研究方向:分布式计算、计算机网络; 李琰琰(1981-),男,河南平顶山人,实验师,博士研究生,主要研究方向:无线网络、GIS、虚拟现实。

上,每个中继节点必须收到来自它的上一跳节点发来的一组编码包(收到的编码包个数至少等于原始数据包的个数才能解码)之后,才能进行解码,还原出原始数据包;接着,再对原始数据包进行编码,然后再传递给下一跳节点。以此类推,当 sink 节点(即信宿)收到一组编码包之后,通过解码操作,就可以将源节点发出的原始数据包还原出来。显然,这种方法可以提高数据传输的可靠性,但是,由于它的数据包传递是按组逐跳转发的,无法充分发挥网络固有的并发传输特性,因此,这类数据传递方案的端到端传输时延较长。然而,在实际中,有些应用(例如上述的安防多媒体传感系统)对数据传递的及时性要求比较高,因此,如何在数据包可靠传递的前提下,尽可能地降低端到端传输时延具有实际意义。

在 EH-WSN 中,它的数据传递和 BP-WSN 相比有许多不同之处。首先,从能量的角度来看,由于 EH-WSN 中每个节点所处的环境可能不同,因此,各节点的能量状态各异,剩余能量随时间呈动态变化,有些节点的能量捕获速率较快,即使当前剩余能量很少,也可以长时间高速率地传输数据;相反,有些节点能量捕获速率较慢,即使当前剩余能量很多,也不能保证长时问高速运行。其次,从性能的角度来看,节点在能量充足时完全可以通过提高发送速率或增加重传次数来降低时延或提高链路的成功收包率;而在能量短缺时,则可以通过降低发送速率或减少重传次数来适应较差的能量状态,以维持网络持续运行。

从以上分析可以看出,在采用基于网络编码的可靠数据传递方案时,可考虑根据节点的能量状态和链路质量来调整节点物理层(Physical layer, PHY)的数据速率和媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)层的最大重传次数,这样,既考虑到节点的能量负载和链路质量,又能尽可能地降低时延。这也是本文研究的目的。

## 1 相关工作

在 EH-WSN 节点的能量捕获方面已有一些研究成果: Kansal 等<sup>[5]</sup>给出了节点预测太阳能捕获规律的指数加权移动平均算法; Piorno 等<sup>[6]</sup>提出了基于天气条件的移动平均算法,这种方法不受能量源的限制,能大体上反映能量捕获的规律; Chin 等<sup>[7]</sup>假设震动能和太阳能的捕获过程符合 L 阶稳态马尔可夫模型,它是基于特定能量源的能量捕获参考模型; Lin 等<sup>[8]</sup>指出,节点可在异构能量源环境下工作,即节点之间的能量捕获设备呈异构状态(例如,有些节点捕获太阳能,而有些节点则捕获震动能,等等),而且还假设每个节点可以知道短时间之内的能量补给方案,例如能量捕获的速率或者能量捕获设备的开-关过程; Ventura 等<sup>[9]</sup>认为能量源的出现是一个泊松过程。可见,对 EH-WSN 节点能量捕获过程的建模一般是基于概率模型来进行的。

在基于网络编码的可靠数据传递方面,Chi 等<sup>[2]</sup>解决了 6LoWPAN(IPv6 over Low-Rate Wireless Personal Area Network)中将 IPv6 数据包可靠传递给 WSN 中的目标节点。为了提高数据包的成功递交率,文献[2]将 IPv6 数据包进行分片,并将分片编码成一组编码包,然后按组逐跳传递给目的节点,当目的节点收到编码包时,可以还原出原始的 IPv6 数据包分片。Srouji 等<sup>[3]</sup>在 WSN 中采用基于擦除码的可靠数据传递方案,该方案在数据传输路径上的每个节点均运行擦除码,并且通过逐跳的解码-编码-发送操作来减少源节点的编码开销,同时可以减少冗余的数据包。James 等<sup>[4]</sup>为了解决 WSN 中端

到端传输数据包的低效率问题,在传输路径的每一跳采用了喷泉码编码方案,提高了数据传递的可靠性,能以较低的开销获得较高的传输成功率。

以上数据传递方案虽提高了传输的可靠性,但是,由于这些方案在数据传递时采用逐跳传递的模式,无法充分发挥网络本身固有的并行传输特性;且在数据传递过程中均采用固定的数据速率和固定重传次数,因此,传输时延较长。那么,在 EH-WSN 中,如何结合节点的能量捕获特性和当前链路质量(即链路的成功收包率),对节点数据速率和最大重传次数进行优化配置,降低传输时延,是亟待解决的问题。

本文的主要工作如下:1)对 EH-WSN 节点的能量捕获过程和能量消耗进行建模,推导出节点的剩余能量公式;2)对相邻节点之间的无线链路质量进行建模,推导出节点发送数据包时的成功收包率和每个数据包的期望传输次数,进而推导出传输路径上每一跳的传输时延公式;3)基于优化方程,在节点满足链路收包率条件和剩余能量条件的前提下,对其数据速率和最大重传次数进行优化配置,降低了端到端传输时延。

## 2 节点剩余能量分析

### 2.1 节点的结构

一般来说,EH-WSN 节点具有能量捕获设备和能量存储设备,用以捕获和存储能量,使得节点在未能从环境中捕获到能量时,也能够完成一些工作。图 1 显示了通用 EH-WSN 节点的主要部件<sup>[10]</sup>。

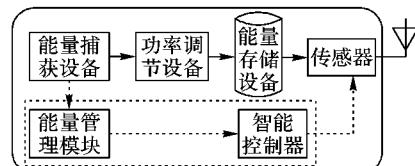


图 1 EH-WSN 节点的主要部件

### 2.2 节点能量捕获模型

在 EH-WSN 中,节点从环境中捕获能量(单位为 J),在一段时间之内能量源出现的次数和每次能量源出现后节点从该能量源捕获到的能量值是随机的。例如,对于捕获振动能的节点来说,一段时间之内,振动出现的次数以及每次振动节点能够捕获到的能量是随机的。

对于节点  $i$ ,以  $N_i(t)$  表示在时间区间  $[0, t]$  之内能量源出现的次数;以  $E_i^j (j = 1, 2, \dots, N_i(t))$  表示节点  $i$  在第  $j$  次能量源出现时从中捕获到的能量;以  $E_i^h(t)$  表示在时间区间  $[0, t]$  之内节点  $i$  捕获到的总能量。假设:1)  $N_i(t)$  是一个速率率为  $\lambda_i$  的泊松过程<sup>[9]</sup>;2)  $E_i^j$  服从参数为  $\mu_i$  和  $\gamma_i$  的 Gamma 分布;则  $E[E_i^j] = \mu_i^{-1}$ ,其中  $E[\cdot]$  表示求期望值。通过选择适当的  $\mu_i$  和  $\gamma_i$  这两个参数,Gamma 分布可以逼近任意分布(例如均匀分布或正态分布等)。由于节点所处的地理环境和所捕获的能量源可能不同,因此,每个节点所对应的  $\lambda_i$ 、 $\mu_i$  和  $\gamma_i$  等参数也可能不同。

由于时间区间  $[0, t]$  之内节点能量捕获的量  $E_i^h(t)$  在  $t$  时刻之后才能确定,因此,在理论分析时可考虑采用均值(期望值)来代替。根据上面的假设,有:

$$E_i^h(t) = E[N_i(t)]E[E_i^j] = \lambda_i t / \mu_i \quad (1)$$

### 2.3 节点的能耗

根据文献[11],在自由空间中,一个节点向与之距离为  $d$

$m$ 的另一个节点每发送1个长度为 $l$ (单位为b)的数据包所消耗的能量为:

$$E_{\text{Tx}}(l, d) = l(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^2) \quad (2)$$

且接收节点每接收1个数据包所消耗的能量为:

$$E_{\text{Rx}}(l) = l\varepsilon_0 \quad (3)$$

其中: $\varepsilon_0$ 表示编码、调制1b电路上的能耗; $\varepsilon_1$ 表示发送1b时放大器的能耗。

现考虑文献[2-4]的方案中节点的能耗。对于某一条数据流,假设它所经过的路径由 $0, 1, 2, \dots, n-1, n$ 的 $n+1$ 个节点组成,其中:0表示源节点, $n$ 表示sink节点,节点 $i-1$ 和 $i+1$ 是邻居( $1 \leq i \leq n-1$ )。在路径 $0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow n$ 上,以 $P_{s(i)}$ 表示在允许重传的情况下,节点 $i$ 通过无线链路( $i, i+1$ )向节点 $i+1$ 成功发送数据包的概率(即成功收包率)。现假设源节点0有 $S_0$ 个原始数据包要发送,则节点0先将这 $S_0$ 个数据包进行编码,生成 $S$ ( $S > S_0$ ,且 $S$ 在传输路径上的每一跳中均取相同的固定值)个编码包,再将这 $S$ 个编码包发送给节点1,那么,节点1收到的编码包的期望个数是 $P_{s(0)}S$ (为了使节点1能够顺利解码出 $S_0$ 个原始数据包,其收到的编码包的期望个数必须满足 $P_{s(0)}S \geq S_0$ ,即 $P_{s(0)} \geq S_0/S$ ,后面的分析也类似);然后,节点1对这 $P_{s(0)}S$ 个编码包进行解码,得到 $S_0$ 个原始数据包,再对这 $S_0$ 个数据包进行编码,又生成 $S$ 个编码包,再转发给节点2。以此类推,当节点 $n$ 收到 $P_{s(n-1)}S(P_{s(n-1)}S \geq S_0)$ 个编码包之后,就可以还原出源节点0所发送的 $S_0$ 个原始数据包了。这个过程如图2所示。

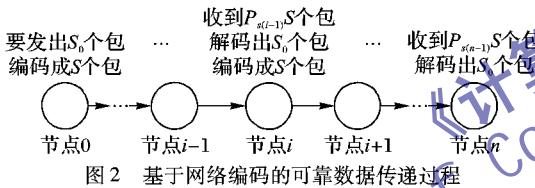


图2 基于网络编码的可靠数据传递过程

为了便于描述,图2中所提到的“编码包”在下文中统称为“数据包”。从图2可知,传输路径上任意节点 $i$ ( $0 \leq i \leq n-1$ )每次发送的数据包个数均为 $S$ ,节点 $i$ 每次收到的数据包的期望个数为 $P_{s(i-1)}S$ 。由于无线链路的不可靠性,节点 $i$ 很多时候需要重传数据包(发生丢包时),以 $N_i$ 表示节点 $i$ 向节点 $i+1$ 发送数据包时每个包的期望传输次数,以 $l_p$ 和 $l_a$ 分别表示数据包和ACK包的长度。若在时间区间 $[0, t]$ 之内,节点 $i$ 接收来自节点 $i-1$ 发送过来的数据包并对成功接收到的每1个数据包返回1个ACK包;向节点 $i+1$ 发送数据包并接收来自节点 $i+1$ 发送过来的ACK包。相比通信能耗,节点的计算能耗和节点在休眠时的能耗可以忽略,则在时间区间 $[0, t]$ 之内,节点 $i$ 的总能耗可表示为:

$$\begin{aligned} E_i^e(t) = & E_{\text{Rx}}(l_p)N_{i-1}S + E_{\text{Tx}}(l_a, d)P_{s(i-1)}S + \\ & N_iSE_{\text{Tx}}(l_p, d) + P_{s(i)}SE_{\text{Rx}}(l_a) = N_{i-1}Sl_p\varepsilon_0 + \\ & P_{s(i-1)}Sl_a(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^2) + N_iSl_p(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^2) + \\ & P_{s(i)}Sl_a\varepsilon_0 = S[(N_{i-1}l_p + P_{s(i)}l_a)\varepsilon_0 + \\ & (P_{s(i-1)}l_a + N_il_p)(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^2)] \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)所表示的能耗由四个部分组成:1)接收来自节点 $i-1$ 发送 $N_{i-1}S$ 个数据包时的接收能耗;2)向节点 $i-1$ 发送 $P_{s(i-1)}S$ 个ACK包的能耗;3)发送 $N_iS$ 个数据包给节点 $i+1$ 的发送能耗;4)接收来自节点 $i+1$ 发送 $P_{s(i)}S$ 个ACK包时的接收能耗。值得一提的是,在1)中,虽然节点 $i$ 正确接收到的数据包的期望个数仅为 $P_{s(i-1)}S$ ,但它的接收能耗实际上是以接收了 $N_{i-1}S$ 个数据包来计算的,这是因为节点 $i-1$ 在发送数据

包时,节点 $i$ 的无线收发器一直开着,虽然有些包因为发生误码没有被正确接收(丢包),但其接收能耗还是消耗掉了。例如,节点 $i-1$ 总共发送了10个数据包,节点 $i$ 成功收到了7个(有3个因误码而丢包),那么,节点 $i$ 的接收能耗仍然是10个数据包的接收能耗,而不是7个。

## 2.4 节点的剩余能量

由于节点 $i$ 在转发数据包时,节点 $i$ 本身及其上游节点 $i+1, i+2, \dots, n-1$ 等的能量捕获一直在进行(节点 $n$ 是sink节点,它是有源设备,无需捕获能量),以 $T_i$ 表示节点 $i$ 向节点 $i+1$ 发送 $S$ 个数据包所持续的时间(含重传),易知,任意节点 $i$ ( $0 \leq i \leq n-1$ )从源节点0开始传输的那一刻(不妨设该时刻为0)起直到节点 $i$ 数据包传输完毕时的能量捕获持续时间为:

$$t_i = \sum_{j=0}^i T_j \quad (5)$$

节点能量捕获的时间线如图3所示。

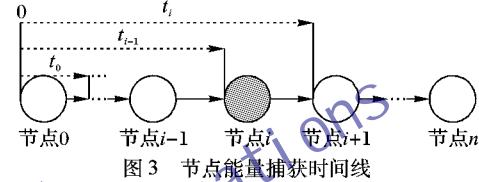


图3中的虚线箭头的长度表示对应的节点从时刻0开始直到传输任务结束(即时刻 $t_i$ )所持续的时间,节点 $i$ 在时间区间 $[0, t_i]$ 之内所捕获到的能量 $E_i^h(t_i)$ 和所消耗的能量 $E_i^e(t_i)$ 决定了节点 $i$ 在时间区间 $[0, t_i]$ 之后的剩余能量 $E_i^r(t_i)$ 。由于在 $t_i$ 时刻之后,节点 $i$ 捕获到的能量对本轮传输已经没有影响,因此可不作考虑。

那么,在路径 $0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow n$ 上,任意节点 $i$ 从时刻0开始持续 $t_i$ 时间之后的剩余能量可表示为:

$$E_i^r(t_i) = E_i^r(0) + \beta[E_i^h(t_i) - E_i^e(t_i)]^+ - [E_i^e(t_i) - E_i^h(t_i)]^+ \quad (6)$$

其中: $E_i^r(0)$ 表示在时刻0时节点 $i$ 的剩余能量; $\beta$ ( $0 < \beta < 1$ )表示节点电容器的充电系数, $\beta$ 反映了电容器的充电效率,这个系数的取值与具体的电容器有关。式(6)中 $[ \cdot ]^+$ 的定义如下:

$$[x]^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(6)中的第二项表示当 $E_i^h(t_i) > E_i^e(t_i)$ 时,有 $\beta[E_i^h(t_i) - E_i^e(t_i)]$ 能量充入电容器;而第三项则表示当 $E_i^h(t_i) \leq E_i^e(t_i)$ 时,有 $[E_i^e(t_i) - E_i^h(t_i)]$ 能量被消耗掉。

结合式(1)和(4),当 $E_i^h(t_i) > E_i^e(t_i)$ 时,有:

$$E_i^r(t_i) = E_i^r(0) + \beta[\lambda_i t_i / \mu_i - S[(N_{i-1}l_p + P_{s(i)}l_a)\varepsilon_0 + (P_{s(i-1)}l_a + N_il_p)(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^2)]] \quad (8)$$

而当 $E_i^h(t_i) \leq E_i^e(t_i)$ 时,则有:

$$E_i^r(t_i) = E_i^r(0) - [S[(N_{i-1}l_p + P_{s(i)}l_a)\varepsilon_0 + (P_{s(i-1)}l_a + N_il_p)(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^2)] - \lambda_i t_i / \mu_i] \quad (9)$$

以 $\bar{E}$ 和 $E$ 分别表示节点的电容器容量上限和节点的后备电能,则:

$$E \leq E_i^r(t_i) \leq \bar{E} \quad (10)$$

后备电能 $E$ 一般情况下不会被使用,它只用于临时能量周转,设置后备电能是由于节点的能量捕获速率具有随机性,在时间区间 $[0, t_i]$ 之内无法保证对于 $\forall t' \in [0, t_i]$ 都有

$E_i(t') \geq E$  成立,因此,当  $E_i^c(t') < E$  时,允许节点使用后备电能  $E$ ,而在时间区间  $[0, t']$  之内  $E$  中被用掉的那部分能量会在时间区间  $(t', t_i]$  之内捕获回来。

### 3 时延优化方程

节点  $i$  通过链路  $(i, i+1)$  将  $S$  个数据包传输给节点  $i+1$  的传输时延跟许多因素有关,比如节点  $i$  的发送功率、数据速率、最大重传次数以及链路  $(i, i+1)$  的成功收包率等,这些因素之间相互影响,且跟具体的信道模型有关。

以直序扩频技术(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)和偏移正交相移键控(Offset Quadrature Phase Shift Keying, OQPSK)调制方式的信道为例,考虑节点  $i$  通过链路  $(i, i+1)$  向与之距离为  $d_{i, i+1}$  的节点  $i+1$  发送数据包,则链路  $(i, i+1)$  的误码率  $P_e^{[12]}$  可表示为:

$$P_e = Q(\sqrt{2\psi(d_{i, i+1})B_N/R_i}) \quad (11)$$

其中:  $B_N$  是噪声带宽,  $R_i$  是数据速率,  $Q(\cdot)$  是高斯尾部积分函数,即:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt; x \geq 0 \quad (12)$$

而且  $\psi(\cdot)$  是接收信噪比,它是关于  $d_{i, i+1}$  的函数,有:

$$\psi(d_{i, i+1}) = P_t - P_{\text{lost}}(d_0) - 10\eta \lg(d_{i, i+1}/d_0) - P_n \quad (13)$$

其中:  $P_t$  为发射功率;  $P_{\text{lost}}(d_0)$  为单位距离  $d_0$  ( $= 1$  m) 下的功率损耗;  $\eta$  为功率衰减系数,取值范围为  $2 \sim 4$ ;  $P_n$  为接收功率下限。

将式(12)、(13)代入式(11)中,在  $d_{i, i+1}$ 、 $P_t$  和  $R_i$  等参数已知的情况下,可求得误码率  $P_e$ 。那么,在无重传机制之下,节点  $i$  发送数据包给节点  $i+1$  被成功接收的概率为  $P_{\text{pkt}} = (1 - P_e)^{l_p}$ ;若采用重传机制,则节点  $i+1$  在收到数据包时需向节点  $i$  发送 ACK 包,ACK 包也可能发生误码和丢包,则 ACK 包被节点  $i$  正确接收到的概率为  $P_{\text{ack}} = (1 - P_e)^{l_a}$ 。可得,在重传机制之下,链路  $(i, i+1)$  一次传输成功的概率为:

$$p_i = P_{\text{pkt}} P_{\text{ack}} = (1 - P_e)^{l_p + l_a} \quad (14)$$

若采用重传机制,在节点  $i$  的最大重传次数为  $K_i$  时,恰好在第  $k$  次发送成功的概率为:

$$P_s(k) = (1 - p_i)^{k-1} p_i; k \leq K_i + 1 \quad (15)$$

重传  $K_i$  次之后仍然失败的概率为:

$$P_{f(i)} = (1 - p_i)^{K_i+1} \quad (16)$$

则对于节点  $i$  来说,在允许重传的情况下数据包发送成功的概率(即成功收包率)为:

$$P_{s(i)} = 1 - P_{f(i)} = 1 - (1 - p_i)^{K_i+1} \quad (17)$$

那么,节点  $i$  每传输 1 个数据包总的期望传输次数为:

$$N_i = \sum_{k=1}^{K_i+1} [kP_s(k)] + (K_i + 1)P_f = \\ p_i \sum_{k=1}^{K_i+1} [k(1 - p_i)^{k-1}] + (K_i + 1)(1 - p_i)^{K_i+1} \quad (18)$$

令  $q_i = (1 - p_i)$ ,则:

$$N_i = (1 - q_i) \sum_{k=1}^{K_i+1} (kq_i^{k-1}) + (K_i + 1)q_i^{K_i+1} = \\ (1 - q_i) \frac{d}{dq_i} \left( \sum_{k=1}^{K_i+1} q_i^k \right) + (K_i + 1)q_i^{K_i+1} = \\ (1 - q_i^{K_i+1})/(1 - q_i) \quad (19)$$

将  $q_i = (1 - p_i)$  代回上式,可得:

$$N_i = [1 - (1 - p_i)^{K_i+1}] / p_i \quad (20)$$

将式(17)和(20)代入式(4)就可以求得时间区间  $[0, t_i]$  之内节点  $i$  的能耗  $E_i^c(t_i)$  了。

下面讨论节点  $i$  通过链路  $(i, i+1)$  将  $S$  个数据包传输给节点  $i+1$  的传输时延  $T_i$ 。由于在 EH-WSN 中,节点  $i$  和节点  $i+1$  之间的距离一般不会很大,且电磁波在空气中的传播速度极快,因此,与数据包的传输时延相比,电磁波在链路  $(i, i+1)$  的传播时延可忽略不计。以  $\tau_c$ 、 $\tau_d$  和  $\tau_a$  分别表示节点竞争信道、发送 1 个数据包和发送 1 个 ACK 包所消耗的平均时间。由于节点每次发送数据包之前,需要竞争信道,它所消耗的时间为  $\tau_c$ ,在获得信道之后发送一个数据包的时延为  $\tau_d$ ,因此,发送数据包  $N_i S$  次的时延为  $N_i S (\tau_c + \tau_d)$ 。考虑到 ACK 包不需要竞争信道而直接发送<sup>[13]</sup>,因此,发送  $P_{s(i)} S$  个 ACK 包所消耗的时间为  $P_{s(i)} S \tau_a$ 。再者,在 IEEE 802.15.4 标准<sup>[13]</sup>中,节点每次发送数据包之前,需要在  $0, 1, \dots, 2^{BE} - 1$  中随机选择一个退避值  $g$ ,然后,节点退避  $g$  个时隙,每个时隙长度为  $UB$  个符号周期,其中  $BE$  是退避指数。因此,在信道空闲时,节点的平均退避时间为  $(2^{BE} - 1)/2$  个时隙。注意到文献[14]的实验表明:在节点数较少的网络中,节点发送一个数据包的平均退避次数接近于 1,即使在 3000 个节点的大规模网络中,节点发送一个数据包的平均退避次数也小于 1.5。因此,可置节点竞争信道的平均时间  $\tau_c = (2^{BE} - 1)/2 \times UB + CCA$ ,其中  $CCA$  (Clear Channel Assessment) 是节点评估信道是否空闲所需要的时间。

设节点  $i$  以速率  $R_i$  向节点  $i+1$  传输数据包,节点  $i+1$  以速率  $r_1$  向节点  $i$  发送 ACK 包,  $r_1$  是节点能支持的所有速率中最低的速率,这是为了减少 ACK 包丢包的概率。则链路  $(i, i+1)$  的传输时延:

$$T_i = N_i S (\tau_c + \tau_d) + P_{s(i)} S \tau_a = \\ S [N_i (\tau_c + \tau_d) + P_{s(i)} \tau_a] = \\ S \{N_i [(2^{BE} - 1)/2 \times UB + CCA + \tau_d] + P_{s(i)} \tau_a\} = \\ S [1 - (1 - p_i)^{K_i+1}] \\ \{p_i^{-1} [(2^{BE} - 1)/2 \times UB + CCA + l_p/R_i + l_a/r_1]\} \quad (21)$$

从  $T_i$  的表达式可以看出,当  $S$ 、 $l_p$  和  $l_a$  等参数给定时,通过优化配置节点  $i$  的速率  $R_i$  和最大重传次数  $K_i$ ,可以使链路  $(i, i+1)$  的传输时延  $T_i$  最小。

因此,本文所要解决的主要问题可以通过以下优化方程来描述:

$$\begin{aligned} & \min T_i \\ \text{w. r. t. } & R_i, K_i \\ \text{s. t. } & R_i \in \{r_1, r_2, \dots, r_m\} \\ & K_i \in \{0, 1, 2, \dots, M\} \\ & P_{s(i)} \geq S_0/S \\ & E_i^c(t_i) \geq E \\ & i \in [1, n - 1] \end{aligned} \quad (22)$$

其中:  $r_1, r_2, \dots, r_m$  是候选数据速率,而  $0, 1, \dots, M$  是候选最大重传次数。根据 IEEE 802.15.4g 标准<sup>[15]</sup>(该标准是 IEEE 802.15.4 标准的增补版本),节点最多可以支持 4 种数据速率,即  $m = 4$ ,而  $M = 7^{[13]}$ ,因此,  $R_i$  和  $K_i$  的组合个数只有  $4 \times 8 = 32$ ,显然,式(22)能够通过穷举法求解。求解算法描述如下:

Algorithm of finding optimal  $R_i$  and  $K_i$ .

- 1) Initialize parameters  $\beta$ ,  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$ ,  $E$ ,  $S_0$  and  $S$ , etc.;
- 2) if node  $i$  want to deliver  $S$  packets to node  $i + 1$  then
- 3) for  $(s = 1; s \leq m; s++)$  do
- 4)      $R_i = r_s$ ;
- 5)     for  $(k = 0; k \leq M; k++)$  do
- 6)          $K_i = k$ ;
- 7)         compute  $P_{s(i)}$  according to equation (17);
- 8)         if  $(P_{s(i)} \geq S_0/S)$  then
- 9)             compute  $T_i$  and  $t_i$  according to equation (21) and (5);
- 10)          compute  $E_i^r(t_i)$  according to equation (6);
- 11)          if  $(E_i^r(t_i) \geq E)$  then
- 12)             save  $R_i$ ,  $K_i$  and  $T_i$  to table  $C$ ;
- 13)          end if
- 14)     end if
- 15) end for
- 16) end for
- 17) end if
- 18) Finds the smallest value of  $T_i$  in table  $C$  if table  $C$  is not null and return  $(R_i, K_i)$ .

以上算法的时间复杂性主要由外部循环(第3~16行)和内部循环(第5~15行)决定,共有 $m$ 次外部循环和 $M$ 次内部循环,因此,这两重循环的时间复杂性是 $O(Mm)$ 。此外,节点*i*需要在表C中查找最小的 $T_i$ (第18行),表C最多 $Mm$ 行,采用折半查找法,其时间复杂度为 $O(\log Mm)$ 。因此,算法总的时间复杂度为 $O(Mm) + O(\log Mm) = O(Mm)$ 。这个时间复杂度对于处理能力受限的传感器节点来说,是可以接受的。

以上算法是在传输路径已经给定的情况下,路径上每个节点分别运行(从源节点开始,逐跳运算,每一跳节点要向其下一跳节点传递相关参数,例如 $T_i$ ),在每一跳节点都求出最优的 $R_i$ 和 $K_i$ 之后,才开始进行数据传递。若已给定的路径上,某些节点不存在 $R_i$ 和 $K_i$ 的可行解,则由网络层重新分配传输路径。

显然,路径 $0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow n$ 的端到端传输时延为:

$$T = \sum_{i=0}^{n-1} T_i \quad (23)$$

#### 4 仿真实验与性能评价

实验环境配置如下:Windows 7 操作系统,Intel Pentium 2.2 GHz CPU,2.0 GB 内存,Matlab R2012b。

物理层和 MAC 层的主要参数设置<sup>[16]</sup>如下: $P_t = 0$  dBm,  $B_N = 30$  kHz,  $P_{\text{lost}}(d_0) = 55$  dBm,  $\eta = 2$ ,  $P_n = -95$  dBm, 数据包长度  $l_p = 88$  B, ACK 包长度  $l_a = 11$  B。节点的通信半径  $d = 70$  m, 候选数据速率(单位:kb/s)为 {6.25, 12.50, 25, 50}<sup>[15]</sup>, 候选最大重传次数为 {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}<sup>[13]</sup>。

物理层采用 O-QPSK 调制方式,符号周期为 16 μs, CCA 为 8 个符号周期, UB 为 20 个符号周期, BE = 3。则  $\tau_c = (2^3 - 1)/2 \times 20 \times 16 + 8 \times 16 = 1248$  μs,  $\tau_A = (5 \times 8)/(6.25 \times 10^3) = 640$  μs。

EH-WSN 节点的能量捕获参数设置<sup>[1]</sup>如下:  $\lambda_i = 1$ ,  $\mu_i \in [0.000032^{-1}, 0.037^{-1}]$ ,  $\gamma_i = 0$ , 表示能量捕获机会平均每秒出现 1 次,每次捕获到的能量在区间 [0.000032, 0.037] 上等概率随机出现。取节点能量下限  $E = 10$  J, 电容器的容量  $\bar{E} = 100$  J<sup>[17]</sup>, 每个节点的初始能量在 10 ~ 100 J 之间随机选取, 电容器的充电系数  $\beta = 0.9$ 。在能耗参数方面, 取  $\varepsilon_1 = 10$  pJ/(b · m<sup>2</sup>),  $\varepsilon_0 = 50$  nJ/b。

另外,设置源节点拟发送的原始数据包个数  $S_0 = 36$ , 编

码后的数据包个数  $S = 40$ 。

在一个 500 m × 500 m 的方形区域中,随机均匀部署 100 个节点,sink 节点的坐标固定在(250 m, 250 m),并指定其编号为 1。

实验共进行 100 次。

首先,对于每一次具体的实验,先随机生成一棵以 sink 节点为树根的数据收集树(每一次实验所生成的数据收集树不一定相同);然后,在这棵数据收集树中分别随机选取距离 sink 节点 1 跳,2 跳, ..., 6 跳共 6 条路径,在每一条路径上分别运行本文提出的算法,求解出路径上每一跳中使得时延最低的  $R$  和  $K$ ;接着,从路径的源节点开始发送数据包,并逐跳统计传输时延和能耗,同时记录节点的运行状态数据。

图 4 显示了某次运行中所生成的一条距离 sink 节点 6 跳的数据传输路径,这条路径为:88 → 79 → 72 → 30 → 23 → 16 → 1, 其中:节点 88 为源节点,节点 1 为 sink 节点。这条路径上各个节点的运行状态数据如表 1 所示。

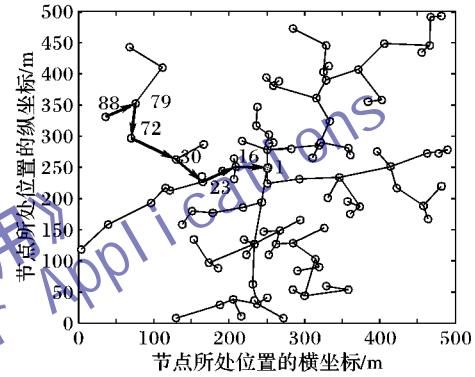


图 4 数据传输路径

表 1 节点运行状态数据

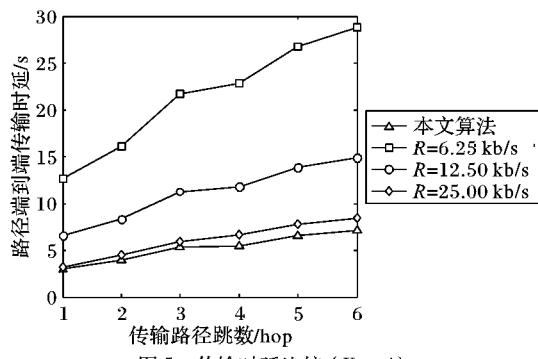
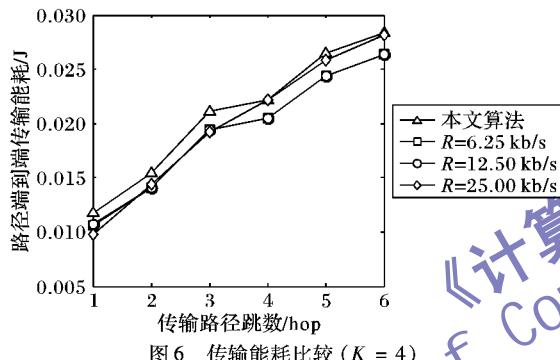
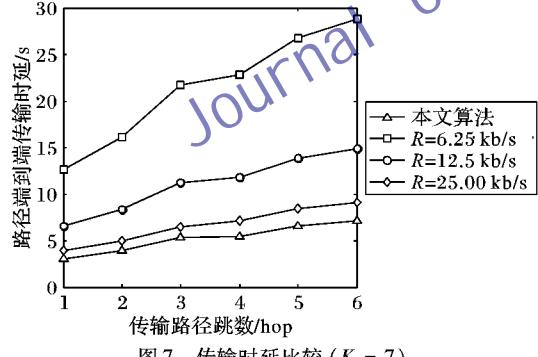
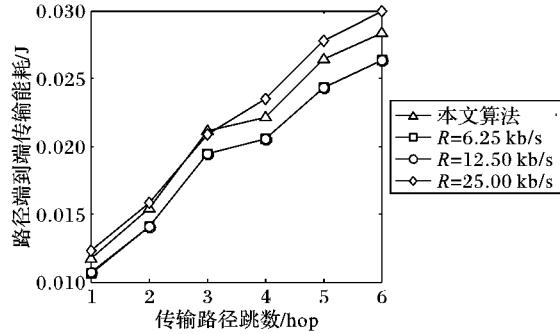
$i$	$R_i/(kb \cdot s^{-1})$	$K_i$	$T_i/s$	$P_{s(i)}$	$N_i$	$E_i^r(0)/J$	$E_i^r(t_i)/J$
88	25.00	1	1.7311	0.9850	1.0000	86.5738	86.6020
79	25.00	1	1.8694	0.9863	1.1169	68.1723	68.1940
72	12.50	0	2.9029	0.9840	1.0000	78.8827	78.9941
30	25.00	3	1.7212	0.9675	1.0000	41.7904	41.8932
23	25.00	0	1.7177	0.9613	1.0000	59.5271	59.5631
16	12.50	2	1.5246	0.9092	1.6514	72.5163	72.7057

从表 1 可以看出,在这条路径上,节点 88、79、30 和 23 采用 25 kb/s 的数据速率,对应的最大重传次数分别为:1、1、3 和 0;而节点 72 和 16 则采用 12.5 kb/s 的数据速率,对应的最大重传次数分别为:0 和 2。从表 1 中还可以看出,节点完成传输任务后的剩余能量  $E_i^r(t_i)$  并不一定比初始剩余能量  $E_i^r(0)$  少,这是由于节点具有能量捕获设备,在运行过程中可以从环境中捕获到能量。

其次,为了测试本文算法的性能,将本文算法与采用固定数据速率和固定重传次数的数据传输方案相比较。将 100 次实验所得到的数据取平均值,绘制数据曲线,结果如图 5~8 所示。以图 5 为例,图中的横坐标表示传输路径的跳数,纵坐标表示对应的端到端传输时延,例如,点(2, 3.9597)表示长度为 2 跳的路径其端到端传输时延为 3.9597 s,而点(3, 4.4163)则表示长度为 3 跳的路径其端到端传输时延为 4.4163 s,以此类推。

从图 5 和图 7 中可以看到,对于距离 sink 节点 1 至 6 跳的每一种路径长度,在端到端传输时延方面,与采用固定数据

速率和固定最大重传次数的数据传输方案相比,本文算法均具有最低的端到端传输时延。从图 6 和图 8 中可以看到,本文算法在能量消耗方面要略高于采用固定数据速率和固定最大重传次数的数据传输方案,这是因为在本文的方法中,节点总是趋向于采用较高的数据速率,根据式(11),这会导致误码率增加,从而增加了数据包的重传次数,使得能耗有所上升。不过,能耗的增加对于 EH-WSN 来说并不是明显的缺陷,因为 EH-WSN 节点的能量可以从环境中捕获而来。

图 5 传输时延比较 ( $K = 4$ )图 6 传输能耗比较 ( $K = 4$ )图 7 传输时延比较 ( $K = 7$ )图 8 传输能耗比较 ( $K = 7$ )

在实验过程中,当节点采用 50.00 kb/s 时,链路  $(i, i + 1)$  的质量(即成功收包率)太低,导致优化式(22)中的第一

个约束条件  $P_{s(i)} \leq S_0/S$  无法得到满足;同时,根据上文的分析,更高的数据速率会导致能耗上升,使得优化式(22)中的另一个约束条件  $E_i(t_i) \geq E$  也可能无法得到满足,因此,在本文的实验中 50.00 kb/s 不是可行的数据速率,在图 5~8 中没有画出来。

最后,以一条长度为 6 跳的路径为例来考察本文算法的实际性能,从图 5 和图 7 中的数据统计得出,在  $K = 4$  时,本文算法在端到端时延方面分别比采用 6.25, 12.50 和 25.00 kb/s 降低了 21.7403 s (75.21%), 7.8361 s (52.23%) 和 1.4528 s (16.86%);在  $K = 7$  时,则分别降低了 21.6224 s (75.04%), 7.7600 s (51.90%) 和 1.9281 s (21.14%);其他长度的路径的实验结果也是类似的。

显然,本文算法在端到端传输时延方面的优势比较明显。

## 5 结语

本文研究了 EH-WSN 中基于网络编码的可靠数据传递的时延问题,现有的可靠数据传递方案大多采用固定的数据速率和固定的最大重传次数,在数据传递过程中,这种方案无法很好地权衡 EH-WSN 节点的剩余能量、无线链路质量、数据速率以及最大重传次数;而且,它的数据是按组逐跳传递的,传输时延较高。本文结合 EH-WSN 中节点的能量捕获特性和相邻节点之间的无线链路质量,基于优化方程,提出一种优化节点数据速率和最大重传次数的低时延可靠数据传递方案。通过对节点的能量捕获和能量消耗进行建模,给出了节点的剩余能量公式;推导出在可重传机制下每个节点发送数据包的成功收包率和每个数据包的期望传输次数,进而得到传输路径上每一跳的传输时延公式;根据传输时延公式,建立以链路成功收包率条件和剩余能量条件为约束的优化方程,对节点的数据速率和最大重传次数进行优化配置,使得每一跳的传输时延最小。实验结果和数据分析表明,与采用固定数据速率和固定最大重传次数的数据传递方案相比,本文算法在端到端传输时延方面有较为明显的改善。

## 参考文献:

- [1] SEAH W K G, ZHI ANG EU, TAN H. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) — survey and challenges [C]// Wireless VITAE 2009: Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology. Piscataway: IEEE, 2009: 1–5.
- [2] CHI K, ZHU Y, CHENG Z. Network coding based mesh-under routing in 6LoWPAN with high end-to-end packet delivery rate [C]// MSN 2012: Proceedings of the 2012 Eighth International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Piscataway: IEEE, 2012: 1–5.
- [3] SROUJI M S, WANG Z, HENKEL J. RDTS: a reliable erasure-coding based data transfer scheme for wireless sensor networks [C]// ICPADS 2011: Proceedings of the 2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems. Piscataway: IEEE, 2011: 481–488.
- [4] JAMES A, MADHUKUMAR A S, KURNIAWAN E, et al. Performance analysis of fountain codes in multihop relay networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(9): 4379–4391.
- [5] KANSAL A, HSU J, ZAHEDI S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2007, 6(4): Article No. 32.

(下转第 434 页)

- [4] WEN C, WANG Q, HUANG F, et al. Self-adaptive encryption algorithm based on affine and composed chaos [J]. Journal on Communications, 2012, 33(11): 119–127. (文昌辞, 王沁, 黄付敏, 等. 基于仿射和复合混沌的图像自适应加密算法[J]. 通信学报, 2012, 33(11): 119–127.)
- [5] WEN C, WANG Q, LIU X, et al. An encryption algorithm for image based on affine and composed chaos [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(2): 319–324. (文昌辞, 王沁, 刘向宏, 等. 基于仿射和复合混沌的图像加密新算法[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(2): 319–324.)
- [6] ZHANG Y, XIAO D, SHU Y, et al. A novel image encryption scheme based on a linear hyperbolic chaotic system of partial differential equations [J]. Signal Processing: Image Communication, 2013, 28(3): 292–300.
- [7] XU G, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Digital image encryption algorithm based on an alternating iterative chaotic system [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(4): 464–470. (徐刚, 张亚东, 张新祥, 等. 基于交替迭代混沌系统的图像加密算法[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(4): 464–470.)
- [8] LUO Y, DU M. Image encryption algorithm based on quantum Logistic map in wavelet domain [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(6): 53–62. (罗玉玲, 杜明辉. 基于量子 Logistic 映射的小波域图像加密算法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(6): 53–62.)
- [9] ZHU H, ZHAO C, ZHANG X. A novel image encryption-compression scheme using hyper-chaos and Chinese remainder theorem [J]. Signal Processing: Image Communication, 2013, 28(6): 670–680.
- [10] DAI Y, ZHANG H, YU L. Medical image encryption method based on even scrambling and chaotic mapping [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2013, 34(8): 1096–1099. (代茵, 张瀚秋, 于利伟. 基于均匀置乱和混沌映射的医学图像加密方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(8): 1096–1099.)
- [11] DENG X, LIAO C, ZHU C, et al. Image encryption algorithms based on chaos through dual scrambling of pixel position and bit [J]. Journal on Communications, 2014, 35(3): 216–223. (邓晓衡, 廖春龙, 朱从旭, 等. 像素位置与比特双重置乱的图像混沌加密算法[J]. 通信学报, 2014, 35(3): 216–223.)
- [12] HUANG W, CHEN Z, LIANG D, et al. Medical image encryption algorithm based on multiple chaos systems [J]. Computer Science, 2012, 39(12): 261–263. (黄伟琦, 陈志刚, 梁涤青, 等. 基于多混沌系统的医学图像加密算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(12): 261–263.)
- [13] ZHU G, ZHU H, ZHANG X. Finite precision of Logistic mapping sensitive values [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(2): 664–666. (朱贵良, 朱宏飞, 张晓强. Logistic 映射敏感值的有限精度研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(2): 664–666.)
- [14] LI C, LI Y, ZHAO L, et al. Research on statistical characteristics of chaotic pseudorandom sequence for one-dimensional Logistic map [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(5): 1403–1406. (李彩虹, 李贻斌, 赵磊, 等. 一维 Logistic 映射混沌伪随机序列统计特性研究[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(5): 1403–1406.)

(上接第 350 页)

- [6] PIORNO J R, BERGONZINI C, ATIENZA D, et al. Prediction and management in energy harvested wireless sensor nodes [C]// Wireless VITAE 2009: Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology. Piscataway: IEEE, 2009: 6–10.
- [7] CHIN K, PHAM D, PANG C. Markovian models for harvested energy in wireless communications [C]// ICCS 2010: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 311–315.
- [8] LIN L, SHROFF N B, SRIKANT R. Asymptotically optimal energy-aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5): 1021–1034.
- [9] VENTURA J, CHOWDHURY K. Markov modeling of energy harvesting body sensor networks [C]// PIMRC 2011: Proceedings of the 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE, 2011: 2168–2172.
- [10] ALI M I, AL-HASHIMI B M, RECAS J, et al. Evaluation and design exploration of solar harvested-energy prediction algorithm [C]// DATE 2010: Proceedings of the 2010 Conference on Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Piscataway: IEEE, 2010: 142–147.
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660–670.
- [12] LANDOLSI M A, STARK W E. On the accuracy of Gaussian approximations in the error analysis of DS-CDMA with OQPSK modulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(12): 2064–2071.
- [13] LAN/MAN Standards Committee. IEEE Std 802.15.4-2011, IEEE standard for local and metropolitan area networks — part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [S]. Piscataway: IEEE, 2011.
- [14] TIMMONS N F, SCANLON W G. Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking [C]// IEEE SECON 2004: Proceedings of the 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2004: 16–24.
- [15] LAN/MAN Standards Committee. IEEE Std 802.15.4g-2012, IEEE standard for local and metropolitan area networks — part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) amendment 3: Physical Layer (PHY) specifications for low data-rate, wireless, smart metering utility networks [S]. Piscataway: IEEE, 2012.
- [16] VURAN M C, AKYILDIZ I F. Cross-layer analysis of error control in wireless sensor networks [C]// SECON '06: Proceedings of the 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. New York: IEEE Communications Society, 2006: 585–594.
- [17] WU Y, LIU W. Routing protocol based on genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks [J]. Wireless Sensor Systems, 2013, 3(2): 112–118.