

# 基于混合储能结构的能量捕获无线通信信道容量分析

姚信威<sup>1</sup> 钟礼斌<sup>1</sup> 王万良<sup>1</sup> 杨双华<sup>1,2</sup>

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)<sup>1</sup> (拉夫堡大学计算机系 莱斯特郡 LE113TU)<sup>2</sup>

**摘要** 针对现有能量捕获技术存在能量来源不稳定、储能设备容量有限等特点,提出了一种基于超级电容和电池的混合储能结构,并建模分析其相应的通信信道容量性能。首先,针对点对点能量捕获无线通信系统,建立基于混合能量存储结构的通信信道模型。其次,根据能量捕获的随机特性,假设能量到达过程符合伯努利随机过程,提出了一种近似最优能量分配策略,推导出系统平均吞吐量的上、下界限及其常数差值,并进一步求得系统近似信道容量。最后,通过实验验证了在捕获能量小于和大于超级电容储能容量两种情形下,系统信道容量上、下界的恒定差值分别为 1.77bps/Hz 和 2.49bps/Hz;同时,相比传统节点采用电池作为单一储能结构,混合能量存储结构能够有效提高系统的能量利用率,增大系统的信道容量,当超级电容储能容量与电池储能容量的比例为 1:2 时,信道容量的上界可提升到 70%。

**关键词** 混合储能,能量捕获,信道容量,能量分配,能量到达过程

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.02.029

## Capacity Analysis of Energy Harvesting Wireless Communication Channel Based on Hybrid Energy Storage

YAO Xin-wei<sup>1</sup> ZHONG Li-bin<sup>1</sup> WANG Wan-liang<sup>1</sup> YANG Shuang-hua<sup>1,2</sup>

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)<sup>1</sup>

(Department of Computer Science, Loughborough University, Leicestershire LE113TU, UK)<sup>2</sup>

**Abstract** Due to the constraints of the instability of energy source and the limited storage capacities of devices in existing energy harvesting technology, a hybrid energy storage structure composed by super capacitor and battery was proposed for device, and the corresponding channel capacity of the proposed structure model was analyzed. Firstly, an energy harvesting channel model based on hybrid energy storage structure was presented for a point-to-point energy harvesting communication system. Secondly, by considering the intermittent peculiarities of energy harvesting, this paper assumed that the energy arrival process conforms to the Bernoulli stochastic process. A near optimal allocation policy was proposed with the upper and lower bounds of the average system throughput. In particular, the gap of two bounds is derived to be a constant, then the approximate channel capacity is obtained. Finally, simulation results illustrate that the gap between the upper and lower bounds of channel capacity is 1.77bps/Hz and 2.49bps/Hz respectively, when harvesting energy is less than and more than storage capacity of super capacitor. Meanwhile, the experiment results show that compared with the conventional wireless node with single battery storage, the hybrid energy storage structure can improve the energy utilization and increase the channel capacity of system. The upper bound of channel capacity can be increased up to 70% when the storage capacity ratio of super capacitor and battery is 1:2.

**Keywords** Hybrid energy storage, Energy harvesting, Channel capacity, Energy assignment, Energy arrival process

## 1 引言

随着无线传感网络和物联网的快速发展及广泛应用,网络节点能量的局限性成为学术界和工业界面临的主要难题<sup>[1]</sup>。而能量捕获(Energy Harvesting, EH)技术由于具有部署灵活、能提供绿色无污染的能量等特点,已成为未来解决无

线通信系统能耗问题的极具潜力的技术。特定的能量捕获设备可以获取自然界中的太阳能、风能、机械能、地热能等不同形式的能量,也可以获取其他设备通过无线形式发送的能量来维持自身的正常工作<sup>[2-3]</sup>。将无线能量捕获技术应用到无线网络中,能极大地延长网络的使用寿命,同时免去布线的约束,大大提高无线节点部署的便利性。因此,能量捕获技术已

到稿日期:2016-12-09 返修日期:2017-04-06 本文受国家自然科学基金资助项目(61772471, 61771430),浙江省自然科学基金项目(LQ15E050006)资助。

姚信威(1986—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感网、无线超宽带通信, E-mail: xwyao@zjut.edu.cn(通信作者);钟礼斌(1992—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感网;王万良(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机控制与智能自动化;杨双华(1963—),男,博士,博士生导师,主要研究方向为无线传感网、网络控制系统。

成为近年来无线网络领域的研究热点。

现有的能量捕获系统大都采用电池作为单一的能量存储单元,然而各种物理因素会导致电池的能量存储效率低下以及能量泄露等问题,加上能量捕获技术上的缺陷,捕获并存储的能量相对较低,因此对捕获能量的高效存储和管理是提高能量捕获系统性能的重要手段。另一方面,超级电容近乎理想的存储性能和高功率密度的特性,使其成为能量存储单元的理想选择<sup>[4-5]</sup>。由于超级电容的存储容量较小,采用电池和超级电容的混合结构作为储能模块能够加快充/放电速率,同时提高能量的利用率。

目前,国内外研究者针对能量捕获无线通信系统的研究主要集中于基于优化能量利用的数据传输调度问题<sup>[6-9]</sup>。例如,文献<sup>[6-8]</sup>研究了基于最大化系统吞吐量并假设捕获能量为可预测情形下的最优功率控制策略,文献<sup>[9]</sup>研究了基于混合能量存储结构模型的吞吐量最大化问题。然而,能量捕获无线通信系统与传统的通信系统不同,传统通信系统的发射节点由电池供给能量,能量值为确定且连续的量,通信受限于平均传输功率;而在能量捕获通信系统中,捕获能量的间歇性、随机性使得能量产生的速度随着时间显著波动,而且难以预测<sup>[10]</sup>。

近年来,研究者开始对能量捕获无线通信系统的根本性限制因素进行研究,比如信道容量。目前,一些研究成果分析了采用单一电池作为存储结构的点到点通信信道容量<sup>[11-19]</sup>。已有的研究工作表明,能量捕获无线通信系统的信道容量主要与节点电池的存储容量和捕获能量两个因素有关。针对节点电池存储容量无限大的情形,在文献<sup>[11-13]</sup>中已证明系统信道容量与平均能量捕获速率的限制关系等价于传统加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道容量与平均功率的限制关系。而针对节点电池存储容量有限的情形,求解信道容量仍然是一个开放性的问题。文献<sup>[14]</sup>采用Verdu-Han通用结构提供了一个信道容量的公式,并基于一个最优能量管理策略的猜想推导出了容量的下界。文献<sup>[15]</sup>针对电池容量有限、捕获的能量为定值的特殊情形,给出了信道容量的界限。文献<sup>[17]</sup>给出了一种最优在线功率控制策略,并提出了一种编码策略,将功率控制问题和信息理论容量问题联系起来,得出了容量的近似值。文献<sup>[19]</sup>针对电池容量有限的情形,基于能量到达信息在发射节点和接收节点是否可利用的多种假设情形,给出了信道容量的表达式,并推导出了信道容量的上限和下限。

综上,现有对基于能量捕获通信系统信道容量的研究都是针对发射节点采用电池储能进行讨论的。针对在实际场景中捕获能量的动态特性以及电池的低存储效率,本文提出了基于节点混合能量存储结构(由电池和超级电容组成)的能量捕获通信系统。图1为混合储能结构能量捕获节点结构图,进一步对其信道进行建模分析,并最终求得系统的近似信道容量。本文的研究动机旨在针对无线传感器网络能量的局限性给出有效的解决方案,将传统传感器节点的电池储能修改为基于电池和超级电容的混合储能结构后,将本文的研究内容直接应用在无线传感器网络场景中,以切实提高传感器节点对捕获能量的利用率,并优化节点对能量的管理和分配,从而达到延长无线传感器网络使用寿命的目的。

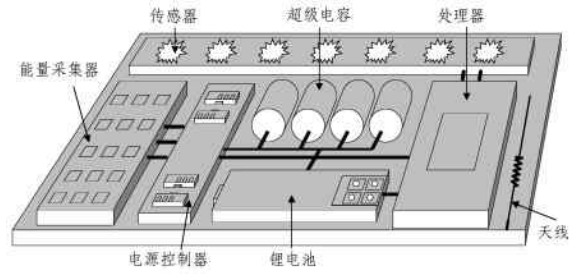


图1 能量捕获节点的结构

Fig. 1 Structure of nodes with energy harvesting

本文第2节建立节点混合能量存储结构的能量捕获通信系统模型;第3节根据节点获取能量的随机特性,采用一种近似最优能量分配策略,并推导出系统平均吞吐量的上、下界以及上、下界之间的常数差值;第4节基于文献<sup>[19]</sup>给出的平均吞吐量与信道容量的关系定理,得出系统的近似信道容量;第5节为仿真实验和分析;最后总结全文。

## 2 系统模型

考虑单用户加性高斯白噪声(AWGN)信道(见图2),发射节点采用电池和超级电容的混合储能结构,且具备能量捕获能力。在每个时刻 $t$ ,发射节点捕获的总能量为 $E_t$ ,电池存储容量为 $E_{\max}^b$ ,能量存储有损耗,假设存储效率为 $\eta(0 \leq \eta < 1)$ ,超级电容器(SC)存储容量较小,最大存储容量为 $E_{\max}^{sc}$ 。

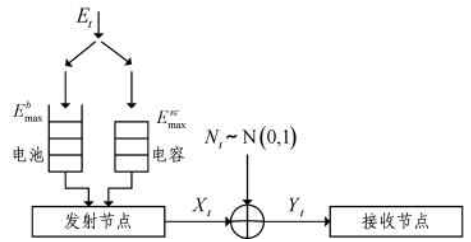


图2 系统模型

Fig. 2 System model

由于电池存储能量有损耗,因此在每次能量到达后将其优先存储到超级电容中,当超级电容存储的能量达到其最大容量时,再将捕获到的剩余能量存储到电池中,发射节点需要传输数据时可以同时从电池和电容中消耗能量。假设 $E_t^{sc}$ 表示发射节点在时刻 $t$ 将捕获的能量存储到超级电容中的能量, $E_t^b$ 表示发射节点在时刻 $t$ 将捕获的能量存储到电池中的能量, $X_t$ 表示信道在时刻 $t$ 的标准输入, $Y_t$ 表示信道在时刻 $t$ 的输出, $N_t$ 表示符合单位标准分布 $N(0,1)$ 的高斯噪声,则输入和输出的关系为 $Y_t = X_t + N_t$ 。设 $B_t$ 表示在时刻 $t$ 发射节点的超级电容和电池中可利用的总能量,其中超级电容中的可用能量为 $B_t^{sc}$ ,电池中的可用能量为 $B_t^b$ ,即有 $B_t = B_t^{sc} + B_t^b$ ,传输信号 $X_t$ 受限于总能量 $B_t$ 。因此,系统的能量限制关系可以概括为:

$$|X_t|^2 \leq B_t \quad (1)$$

$$B_{t+1} = \begin{cases} \min(B_t + E_{t+1} - (1-\eta)E_t^b - |X_t|^2, E_{\max}^b + E_{\max}^{sc}), & E_t \geq E_{\max}^{sc} \\ B_t + E_{t+1} - |X_t|^2, & E_t < E_{\max}^{sc} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $(1-\eta)E_t^b$ 表示电池中损耗的能量,即当前时刻的总能

量为上一时刻的总能量减去电池损耗的能量和传输信号的能量再加上当前时刻捕获的能量。当捕获能量超过节点的最大储能容量时,当前时刻的总能量即为最大储能容量。根据能量捕获机制,捕获能量是一个随时间变化的离散随机过程,本文针对发射节点和接收节点同时知晓能量到达过程的因果关系的情形,即在时刻  $t$ ,发射节点和接收节点知晓其能量捕获序列  $\{E_t, E_{t-1}, \dots\}$ 。能量到达过程为特定的伯努利随机过程,即  $E_t$  为独立同分布的伯努利随机变量:

$$E_t = \begin{cases} E, & \text{w. p. } p \\ 0, & \text{w. p. } 1-p \end{cases} \quad (3)$$

即在每个时刻,节点捕获的能量要么为  $E$ ,要么为  $0$ ,且每个时刻到达的能量互相不影响。

### 3 系统平均吞吐量的上、下界

#### 3.1 捕获能量大于超级电容最大容量而小于总储能容量的情形 ( $E_{\max}^{sc} \leq E < E_{\max}^b + E_{\max}^{sc}$ )

由于每次将捕获到的能量优先储存在超级电容中,超过超级电容最大存储容量的剩余能量储存在电池中,根据能量的受限关系,在每个非零能量到达的时刻超级电容和电池中的能量消耗不超过当前捕获到的总能量,并且当相邻两个非零能量到达时刻之间的时间间隔趋于非常大时,消耗的能量接近于捕获的总能量。因此,依据式(3)可以得到每个时刻分别存储在超级电容和电池的能量  $E_t^{sc}$  和  $E_t^b$ ,且其满足如下关系式:

$$E_t^{sc} = \begin{cases} E_{\max}^{sc}, & \text{w. p. } p \\ 0, & \text{w. p. } 1-p \end{cases} \quad (4)$$

$$E_t^b = \begin{cases} E - E_{\max}^{sc}, & \text{w. p. } p \\ 0, & \text{w. p. } 1-p \end{cases} \quad (5)$$

由于高斯噪声符合标准分布  $N(0,1)$ ,依据平均吞吐量的定义<sup>[19]</sup>,系统平均吞吐量的表达式为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \log(1+g(t)) \right] \quad (6)$$

其中,  $E$  表示数学期望,  $g(t)$  表示用于数据传输的最优发送能量。由于发射节点采用超级电容与电池的混合储能结构,因此超级电容和电池都可以为发射节点传输数据提供能量。设在每个时刻  $t$ ,超级电容用于发射节点传输数据的能量为  $g_1(t)$ ,电池用于发射节点传输数据的能量为  $g_2(t)$ ,则根据能量限制关系有:

$$g_1(t) \leq B_1^{sc} \quad (7)$$

$$g_2(t) \leq B_2^b \quad (8)$$

式(7)和式(8)分别表示在每个时刻  $t$ ,超级电容和电池中消耗的能量不能超过各自储存的总能量。因此,系统的平均吞吐量为:

$$T = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left\{ \sum_{t=1}^n \left[ \frac{1}{2} \log(1+g_1(t)) + \frac{1}{2} \log(1+g_2(t)) \right] \right\} \quad (9)$$

假设发射节点在第一次捕获能量到达之前的初始能量为  $0$ ,则根据消耗的能量不大于捕获到的总能量,得出如下关系式:

$$\sum_{t=1}^n g_1(t) \leq \sum_{t=1}^n E_t^{sc} \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^n g_2(t) \leq \sum_{t=1}^n \eta E_t^b \quad (11)$$

利用关系式(4)、式(5)、式(10)、式(11)对式(9)进行变换,得到:

$$\begin{aligned} T &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E \left\{ \frac{1}{2} \log(1+g_1(t)) + \frac{1}{2} \log(1+g_2(t)) \right\} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E \left[ \frac{1}{2} \log(1+g_1(t)) \right] + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E \left[ \frac{1}{2} \log(1+g_2(t)) \right] \\ &\stackrel{(a)}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log(1 + \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n g_1(t) \right]) + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log(1 + \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n g_2(t) \right]) \\ &\stackrel{(b)}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log(1 + \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n E_t^{sc} \right]) + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log(1 + \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n \eta E_t^b \right]) \\ &\stackrel{(c)}{=} \frac{1}{2} \log(1 + p E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1 + p \eta (E - E_{\max}^{sc})) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,(a)是根据对数函数的凹凸性质得到的;(b)是根据能量限制式(10)、式(11)得到的;根据式(4)、式(5)可以求得  $E[E_t^{sc}] = p E_{\max}^{sc}$  和  $E[E_t^b] = p(E - E_{\max}^{sc})$ ,进而得到(c)。

上面求得了系统平均吞吐量的一个上界,下面将通过一个具体的能量分配策略来求解平均吞吐量的下界。由于能量到达  $E_t$  是一个伯努利随机过程,即每个时刻节点捕获到能量  $E$  的概率为  $p$ ,为  $0$  的概率为  $1-p$ ,给出发射节点能量捕获模型,如图 3 所示。

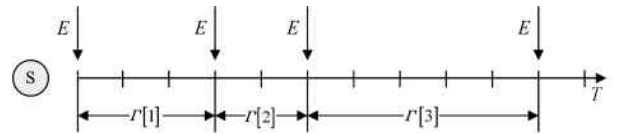


图 3 节点能量捕获模型

Fig. 3 Node energy harvesting model

变量  $\Gamma[i]$  表示第  $i$  次非零能量到达和第  $i+1$  次非零能量到达之间的时间间隔,  $L$  表示从时刻  $t=1$  到  $t=N$  间发射节点捕获到非零能量的总次数,即  $\sum_{i=1}^L \Gamma[i] \leq N < \sum_{i=1}^{L+1} \Gamma[i]$ ,显然  $\Gamma[i]$  是独立同分布的几何随机变量。分别定义超级电容和电池中的能量分配策略为  $g_1(j)$  和  $g_2(j)$ ,其中  $j = t - \max\{t' \leq t; E_{t'} = E\}$ ,表示当前时刻与最近一次非零能量到达相隔的时间。令每相邻两次非零能量到达时刻相隔的时间段内的能量分配方式相同,且与相隔时间段中的时隙个数相关,提出如下近似最优能量分配策略:

$$g_1(j) = p(1-p)^{j-1} E_{\max}^{sc} \quad (13)$$

$$g_2(j) = (1 - e^{-p}) e^{-p(j-1)} \eta (E - E_{\max}^{sc}) \quad (14)$$

从式(13)、式(14)可以看出,在每一次非零能量到达后,节点以指数下降的方式消耗能量,直到下一次非零能量到达。显然,它可以作为一个可行的策略,因为:

$$\sum_{j=1}^{\infty} g_1(j) = \sum_{j=1}^{\infty} p(1-p)^{j-1} E_{\max}^{sc} = E_{\max}^{sc} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\infty} g_2(j) &= \sum_{j=1}^{\infty} [(1 - e^{-p}) e^{-p(j-1)} \eta (E - E_{\max}^{sc})] \\ &= \eta (E - E_{\max}^{sc}) \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)表明,节点总共消耗的能量不超过总的捕获能量,

且随着时间间隔的增大,数据传输消耗的能量接近于捕获的总能量,其不仅避免了在一个能量到达时刻之前过早地将所有能量消耗完,也更充分地利用了能量。图4描述了发射节点中电池和超级电容内储存能量的变化以及相应的能量分配策略。采用能量分配策略(13)和(14)的动机是:由于捕获的能量  $E_i$  是一个伯努利随机过程,相邻两个非零能量到达时刻的时间间隔  $T[i]$  是一个与参数  $p$  相关的几何随机变量,具有无记忆性,均值为恒定值  $\frac{1}{p}$ ,因此对于每个时刻来说,预期与下一个非零能量到达时刻的间隔数为  $\frac{1}{p}$ 。另外,由文献[7-8]中最优能量分配的结论可以知道,为了获得更高的传输速率,应该尽可能地在每两次能量到达的时间段里均匀分配能量。由于本文研究的是在线场景,即能量到达的时刻不能提前知晓,而只能以概率  $p$  预测,因此以指数下降形式消耗能量的策略,并且指数下降的步长与参数  $p$  相关。文献[18]针对发射节点采用单一电池储能结构的系统模型提出了式(14)的能量分配策略,本文考虑到电池与超级电容特性的不同,分别对其采用不同的能量分配策略。采用该能量分配策略,在每一次非零能量到达时刻,节点的电池和超级电容中将会遗留一小部分未利用完的能量,在此不考虑这部分能量。下文将证明采用式(13)和式(14)的能量分配策略可以求得系统平均吞吐量的上界、下界以及上下界的差值,上下界的差值为一个常数,且该差值与系统的其他参数无关。

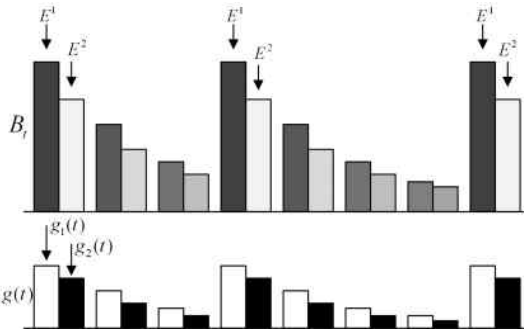


图4 能量分配策略

Fig. 4 Energy allocation strategy

**引理 1** 由于  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  是整个传输时间段内的能量分配策略,而  $g_1(j)$  和  $g_2(j)$  表示每两个相邻非零能量到达时刻之间的时间段的能量分配策略,根据大数定理可以得到如下关系式<sup>[19]</sup>:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \log(1+g(t)) = \frac{1}{E[\Gamma[i]]} E\left[\sum_{j=1}^{\Gamma[i]} \frac{1}{2} \log(1+g(j))\right] \quad (17)$$

因此,根据引理 1 可以重新得到系统平均吞吐量的公式为:

$$\begin{aligned} T &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E\left\{\sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \log(1+g_1(t)) + \frac{1}{2} \log(1+g_2(t))\right]\right\} \\ &= \frac{1}{E[\Gamma[i]]} E\left\{\sum_{j=1}^{\Gamma[i]} \left[\frac{1}{2} \log(1+g_1(j)) + \frac{1}{2} \log(1+g_2(j))\right]\right\} \end{aligned} \quad (18)$$

**定理 1** 根据本文采用的能量分配策略  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$ ,可以得到系统平均吞吐量的上界和下界的差值小于一个恒定常数 1.442:

$$\frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc})) - 1.442 \leq$$

$$T \leq \frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc})) \quad (19)$$

证明:对式(9)进行变形:

$$\begin{aligned} T &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E\left[\frac{1}{2} \log(1+g_1(t)) + \frac{1}{2} \log(1+g_2(t))\right] \\ &\stackrel{(a)}{=} \frac{1}{E[L]} E\left\{\sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \log(1+g_1(j)) + \frac{1}{2} \log(1+g_2(j))\right]\right\} \\ &= \frac{1}{E[L]} E\left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \log(1+p(1-p)^{j-1} E_{\max}^{sc})\right] + \frac{1}{E[L]} E \\ &\quad \left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \log(1+(1-e^{-p})e^{-p(j-1)} \eta(E-E_{\max}^{sc}))\right] \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)的两个部分分别进行计算,对第一部分的计算如下:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{E[L]} E\left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \log(1+p(1-p)^{j-1} E_{\max}^{sc})\right] \\ &\stackrel{(b)}{\geq} \frac{1}{E[L]} E\left[\sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} (j-1) \log(1-p)\right]\right] \\ &= \frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{E[L]} E\left[\frac{L(L-1)}{2} \frac{1}{2} \log(1-p)\right] \\ &= \frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{4} \left(\frac{E[L^2]}{E[L]} - 1\right) \log(1-p) \\ &\stackrel{(c)}{=} \frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) - \frac{1-p}{2p} \log\left(\frac{1}{1-p}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

对第二部分的计算推导如式(22)所示:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{E[L]} E\left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \log(1+(1-e^{-p})e^{-p(j-1)} \eta(E-E_{\max}^{sc}))\right] \\ &\stackrel{(b)}{\geq} \frac{1}{E[L]} E\left[\sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc})) + \frac{1}{2} \log\left(\frac{e^{-p(j-1)}(1-e^{-p})}{p}\right)\right]\right] \\ &= \frac{1}{E[L]} E\left[\frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc}))\right] + \frac{1}{E[L]} E\left[\sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \log\left(\frac{e^{-p(j-1)}(1-e^{-p})}{p}\right)\right]\right] \\ &\stackrel{(c)}{=} \frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc})) + \frac{1}{2} \log\left(\frac{1-e^{-p}}{p}\right) + \frac{1-p}{2p} \log(e^{-p}) \end{aligned} \quad (22)$$

其中,在两部分的推导过程式(21)和式(22)中的(a)是根据引理 1 得到的;对于(b),根据对数函数的性质有  $\log(1+ax) \geq \log(1+x) + \log a$  ( $0 < a \leq 1$ );对于(c),根据  $L$  是关于参数  $p$  的几何分布,即  $L \sim G(p)$ ,有  $E[L] = \frac{1}{p}$ ,  $E[L^2] = \frac{2-p}{p^2}$ 。因此,系统平均吞吐量如式(23)所示,对于所求结果的后半部分  $\frac{1}{2} \left(\frac{1-p}{p} \log\left(\frac{e^p}{1-p}\right) + \log\left(\frac{p}{1-e^{-p}}\right)\right)$ ,由于  $p \in (0, 1]$ ,当  $p \rightarrow 0$  时取得最大值,约等于 1.442。定理 1 得证。

$$\begin{aligned} T &\geq \frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc})) + \\ &\quad \frac{1-p}{2p} \log(1-p) + \frac{1}{2} \log\left(\frac{1-e^{-p}}{p}\right) + \frac{1-p}{2p} \log(e^{-p}) \\ &= \frac{1}{2} \log(1+pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+p\eta(E-E_{\max}^{sc})) - \\ &\quad \frac{1}{2} \left[\frac{1-p}{p} \log\left(\frac{e^p}{1-p}\right) + \log\left(\frac{p}{1-e^{-p}}\right)\right] \end{aligned} \quad (23)$$

以上结果是针对捕获的能量比超级电容容量大而比超级电容和电池的总容量小的一般情形。下面考虑两种特殊情形:1)捕获能量比超级电容容量小;2)捕获能量比超级电容与电池的总容量大。

### 3.2 捕获能量小于超级电容最大容量的情形 ( $E < E_{\max}^{sc}$ )

若捕获能量小于超级电容的存储容量,则每次将捕获的能量全部储存在超级电容中,这种情况等价于发射节点采用超级电容作为唯一的能量存储单元。设定超级电容的能量分配策略为  $g(t)$ ,根据平均吞吐量的定义式(6),得出系统的平均吞吐量为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \log(1+g(t)) \right] \quad (24)$$

系统需满足的能量限制关系为:

$$\sum_{t=1}^n g(t) \leq \sum_{t=1}^n E_t \quad (25)$$

对式(24)做如下变换:

$$\begin{aligned} T &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \log(1+g(t)) \right] \\ &\stackrel{(a)}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n g(t) \right] \right) \\ &\stackrel{(b)}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{1}{n} E \left[ \sum_{t=1}^n E_t \right] \right) \\ &\stackrel{(c)}{=} \frac{1}{2} \log(1+\rho E) \end{aligned} \quad (26)$$

其中,(a)是根据对数函数的凹凸性质得到的;(b)是根据能量限制式(25)得到的;对于(c),根据不等式(3)可以求得  $E[E_t] = \rho E$ ,进而得到最后结果。因此得到了系统平均吞吐量的一个上界,下面将通过 3.1 节中讨论的步骤来求得吞吐量的下界。

采用与 3.1 节中相同的能量分配策略,即  $g(j) = \rho(1-\rho)^{j-1} E, j = t - \max\{t' \leq t; E_{t'} = E\}$ ,其中  $j$  表示当前时刻与最近一次非零能量到达时刻相隔的时间间隔。根据 3.1 节对定理 1 的证明过程,可以得到如下结果:

$$T \geq \frac{1}{2} \log(1+\rho E) - \frac{1-\rho}{2\rho} \log\left(\frac{1}{1-\rho}\right) \quad (27)$$

针对公式的后半部分  $\frac{1-\rho}{2\rho} \log\left(\frac{1}{1-\rho}\right)$ ,当  $\rho \rightarrow 0$  时取得最大值,约等于 0.72。因此,当  $E < E_{\max}^{sc}$  时,系统的平均吞吐量为:

$$\frac{1}{2} \log(1+\rho E) - 0.72 \leq T \leq \frac{1}{2} \log(1+\rho E) \quad (28)$$

这与文献[19]中考虑单一电池储能单元得到的结论是一致的,但是采用超级电容作为储能单元时,由于超级电容近乎理想的能量存储效率,因此几乎不存在能量的存储损耗,而电池会产生能量的存储损耗。

### 3.3 捕获能量大于总储能容量的情形 ( $E \geq E_{\max}^{sc} + E_{\max}^b$ )

当捕获能量大于超级电容和电池的总容量时,每一次捕获到的能量都能将超级电容和电池充满。根据 3.1 节中的讨论,采取同样的能量分配策略,由于每一次非零能量到达时超级电容和电池的能量都被充满,因此超级电容中的能量分配策略不变,而电池中的能量分配策略式(14)则改变为:

$$g_x(t) = (1 - e^{-\rho}) e^{-\rho(j-1)} \eta E_{\max}^b \quad (29)$$

分别采用式(13)和式(29)的能量分配策略,在每个非零能量时刻到达之前,超级电容中的能量消耗总和趋近于捕获

到的总能量。将式(13)、式(29)代入式(18),通过与定理 1 类似的证明过程,最后可以计算得到如下结果:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \log(1+\rho E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+\rho \eta E_{\max}^b) - 1.442 \leq \\ T &\leq \frac{1}{2} \log(1+\rho E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+\rho \eta E_{\max}^b) \end{aligned} \quad (30)$$

## 4 系统的信道容量

上文已经求得了基于混合储能结构和能量捕获无线通信系统的平均吞吐量的上、下界,本节将根据文献[19]中得出的系统平均吞吐量与系统信道容量的关系进一步得到系统的信道容量。

引理 2<sup>[19]</sup> 能量捕获无线通信系统信道容量与平均吞吐量的关系如下:

$$T - \frac{1}{2} \log\left(\frac{\pi e}{2}\right) \leq C \leq T \quad (31)$$

根据式(19)、式(28)、式(30)和引理 2,得到基于混合储能结构的能量捕获无线通信系统的近似信道容量为:

$$\begin{aligned} 1) E < E_{\max}^{sc} \\ \frac{1}{2} \log(1+\rho E) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{\pi e}{2}\right) - 0.72 &\leq C \leq \frac{1}{2} \log(1+\rho E) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} 2) E_{\max}^{sc} \leq E < E_{\max}^b + E_{\max}^{sc} \\ \frac{1}{2} \log(1+\rho E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+\rho \eta (E - E_{\max}^{sc})) - 1.442 - \\ \frac{1}{2} \log\left(\frac{\pi e}{2}\right) &\leq C \leq \frac{1}{2} \log(1+\rho E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+ \\ &\rho \eta (E - E_{\max}^{sc})) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} 3) E \geq E_{\max}^{sc} + E_{\max}^b \\ \frac{1}{2} \log(1+\rho E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+\rho \eta E_{\max}^b) - 1.442 - \frac{1}{2} \log \\ \left(\frac{\pi e}{2}\right) &\leq C \leq \frac{1}{2} \log(1+\rho E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \log(1+\rho \eta E_{\max}^b) \end{aligned} \quad (34)$$

## 5 仿真实验

本节对混合储能结构能量捕获通信系统的信道容量与捕获能量、储能容量、电池存储效率 3 个参数的关系进行实验仿真,并与文献[19]针对单一电池储能结构得到的结论进行比较。下文的实验曲线图标注中,HES 代表本文对于混合储能结构(Hybrid Energy Storage)模型得到的结果,BS 代表文献[19]对单一电池储能结构(Battery Storage)进行分析得到的结果。下面将从以下 3 个方面分别进行仿真实验和对比,每组实验的实验参数设置如表 1 所列。其中,超级电容的最大容量设定为 100。

表 1 实验参数

Table 1 Simulation parameters

	能量到达概率 $\rho$	电池能量存储效率 $\eta$
5.1 节中的第一组实验	0.5	0.9
5.1 节中的第二组实验	0.5	0.9
5.2 节中的实验	0.5	0.9
5.3 节中的第一组实验	0.5	0.9
5.3 节中的第二组实验	0.5	0.7

### 5.1 信道容量与捕获能量的关系

首先,捕获能量小于超级电容的最大容量的情形,等价于采用单一超级电容储能单元进行能量存储,与文献[19]针对单一电池储能单元的情况类似,不同点在于电池的能量存储损耗较大,而超级电容的能量存储效率非常高,可以忽略存储损耗。根据系统平均吞吐量模型式(24)和推导的式(28)、式(32),得出实验结果仿真如图5(a)所示。可以看出在储能容量相等的情况下,HES上下界之间的差值与BS上下界之间的差值相等,约为1.77bps/Hz;而由于能量存储效率的不同,即超级电容的能量利用率高于电池的能量利用率,因此HES的上下界比BS的上下界大。

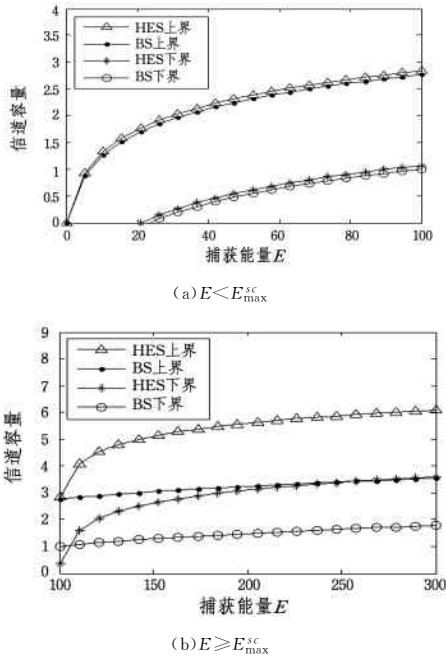


图5 两种模型在两种捕获能量情况下的结果比较  
Fig.5 Result comparison between two models in two conditions

针对捕获能量大于超级电容最大容量的情形,为了与文献[19]进行比较,设定文献[19]采用的电池容量等于本文采用的混合储能结构的总容量。由于采用超级电容和电池的储能结构提高了能量的利用率,同时优化了节点的能量分配,因此根据本文建立的系统平均吞吐量模型(9)和推导得出的式(19)、式(33),得出实验仿真结果如图5(b)所示。可以看出,两种模型下得到的结果存在显著差异,当储能容量的值约为105时,HES的下界开始超过BS的下界,随着捕获能量的增大,差距相应增大,当捕获能量的值达到260时,HES的下界逐渐超过BS的上界。同时可以观察到,HES的上界大于BS的上界,当捕获能量的值约为240时,HES的上界相比BS的上界之间的差距达到最大临界值,此时HES的上界比BS的上界提高了近74%;之后随着捕获能量的增大,差距开始缓慢缩小,这是对数函数的性质决定的。另外,HES的上下界之间的恒定差值约为2.49bps/Hz,BS的上下界之间的恒定差值约为1.77bps/Hz。显然,若超级电容最大容量增大,系统性能的提升也更明显。当然,实际中超级电容的存储容量是有限的。

### 5.2 信道容量与节点储能容量的关系

同样设定文献[19]中的电池容量等于本文采用的混合储能结构的总容量。为了研究系统信道容量与节点储能容量的关系,实验在能量捕获充足的情况下进行。根据本文建立的系统平均吞吐量模型式(9)和式(30)、式(34),得出实验仿真结果如图6所示。可以看出,超级电容的能量存储效率高,并且采用的混合储能结构优化了系统的能量分配,而随着储能容量的增大,电池存储能量的损耗增大。因此,HES的上下界与BS的上下界之间的差距随着储能容量的增大而越加明显。当储能容量的值为100时,HES的上界比BS的上界提高了70%;当储能容量的值为125时,HES的下界达到BS上界的值,并随着储能容量的增加,HES的下界逐渐超过BS的上界。其中,HES的上下界之间的差值约为2.49bps/Hz,BS的上下界之间的差值约为1.77bps/Hz,其随着捕获能量的增加保持不变。

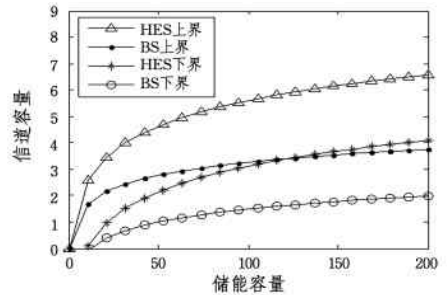


图6 两种模型在不同储能容量下的结果对比  
Fig.6 Result comparison between two models with different energy storage

### 5.3 信道容量与电池能量存储效率的关系

为了研究电池能量存储效率对系统的影响,本节分两组实验进行对比。根据式(34),得出实验仿真结果如图7所示。可以看出,两组实验中系统信道容量上下界的差值保持不变,上下界变化的趋势相同;随着电池能量存储效率的降低,系统对能量的利用率降低,因此系统信道容量减小。

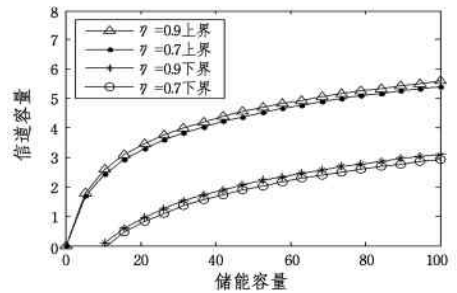


图7 不同电池存储效率情况的实验结果对比  
Fig.7 Result comparison under different battery storage efficiency

**结束语** 近年来能量捕获技术已成为无线网络领域的研究热点,对捕获能量的有效管理和高效利用是提高能量捕获无线通信系统性能的重要手段。本文针对网络节点能量的局限性,建立了基于超级电容和电池的混合能量存储结构模型。根据能量到达的随机特性,假设能量到达过程符合伯努利随

- [J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(11-13): 1191-1199.
- [16] ABDI H, WILLIAMS L J. Principal component analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics, 2010, 2(4): 433-459.
- [17] SPACKMAN K A. Signal detection theory: Valuable tools for evaluating inductive learning[C]// Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Machine Learning (IWML). Ithaca, NY, 1989: 160-163.

(上接第 170 页)

机过程;通过采用近似最优的能量分配策略,推导出系统平均吞吐量以及系统的近似信道容量;同时得到当捕获能量小于超级电容存储容量时系统信道容量的上下界之间的常数差值为 1.77 bps/Hz,当捕获能量大于超级电容存储容量时系统信道容量的上下界之间的常数差值为 2.49 bps/Hz。实验结果表明,采用混合能量存储结构,随着捕获能量的增加和超级电容存储容量的增大,系统的性能提升得越大,即系统的能量利用率增加且信道容量增大。未来将对多节点多跳网络模型、衰减信道以及捕获的能量符合其他一般随机过程情形下系统的平均吞吐量和信道容量进行分析。

### 参 考 文 献

- [1] HAN J H, DING X, SHI L, et al. Research on the time-varying charging and dynamic data routing strategy for rechargeable wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 2012(12): 1-10. (in Chinese)  
韩江洪, 丁煦, 石雷, 等. 无线传感器网络时变充电和动态数据路由算法研究[J]. 通信学报, 2012, 2012(12): 1-10.
- [2] PARADISO J A, STARNER T. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics [J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 18-27
- [3] SU B, LI Y Q, YU H Y, et al. The Wireless Sensor Node Harvesting Energy from Environment [J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2008, 21(9): 1586-1589. (in Chinese)  
苏波, 李艳秋, 于红云, 等. 从环境中获取能量的无线传感器节点[J]. 传感技术学报, 2008, 21(9): 1586-1589.
- [4] JIANG X F, POLASTRE J, CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor networks[C]// International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. IEEE Press, 2005: 463-468.
- [5] SUDEVALAYAM S, KULKAMI P. Energy Harvesting Sensor Nodes; Survey and Implications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 443-461.
- [6] YAO X W, ZHENG X H, WANG W L, et al. A Bi-dimensional Wireless Energy Transfer Mechanism for Maximum Network Throughput [J]. Computer Science, 2015, 42(11): 164-169. (in Chinese)  
姚信威, 郑星航, 王万良, 等. 吞吐量最大化的二维无限能量传输算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11): 164-169.
- [7] YANG J, ULUKUS S. Optimal Packet Scheduling in an Energy Harvesting Communication System[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 60(1): 220-230.
- [8] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG J, et al. Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732-1743.
- [9] OZEL O, SHAHZAD K, ULUKUS S. Optimal Energy Allocation for Energy Harvesting Transmitters With Hybrid Energy Storage and Processing Cost[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(12): 3232-3245.
- [10] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, ULUKUS S, et al. Fundamental limits of energy harvesting communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 126-132.
- [11] OZEL O, ULUKUS S. Information-theoretic analysis of an energy harvesting communication system[C]// International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops. IEEE Xplore, 2010: 330-335.
- [12] OZEL O, ULUKUS S. Achieving AWGN Capacity Under Stochastic Energy Harvesting [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(10): 6471-6483.
- [13] RAJESH R, SHARMA V, VISWANATH P. Capacity of Gaussian Channels with Energy Harvesting and Processing Cost [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 2563-2575.
- [14] MAO W, HASSIBI B. On the capacity of a communication system with energy harvesting and a limited battery [C]// IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. 2013: 1789-1793.
- [15] JOG V, ANANTHARAM V. An energy harvesting AWGN channel with a finite battery[C]// IEEE International Symposium on Information Theory. 2014: 806-810.
- [16] TUTUNCUOGLU K, OZEL O, YENER A, et al. Binary energy harvesting channel with finite energy storage[C]// IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. 2013: 1591-1595.
- [17] DONG Y, FARNIA F, OZGUR A. Near Optimal Energy Control and Approximate Capacity of Energy Harvesting Communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 33(3): 540-557.
- [18] DONG Y, OZGUR A. Approximate capacity of energy harvesting communication with finite battery[C]// IEEE International Symposium on Information Theory. 2014: 801-805.
- [19] SHAVIV D, NGUYEN P M, OZGUR A. Capacity of the Energy Harvesting Channel with a Finite Battery[C]// 2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2015: 131-135.