

基于混合储能和能量捕获的多接入信道容量建模与分析

姚信威, 章梦娜, 王超超, 王万良

(浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要: 能量捕获具有部署灵活和可持续供能的优点, 已成为解决物联网中设备能量受限的有效途径之一。针对基于能量捕获的多接入信道, 能量捕获技术存在能量来源不稳定、存储设备容量有限等因素, 因此采用基于超级电容和电池的混合储能结构。根据其信道的特点和能量捕获的随机特性, 引入节点能量约束关系, 提出了一种呈指数型下降 (ETD) 的近似最优能量分配策略对平均吞吐量进行分析, 推导其上下界及其常数差值。最后利用平均吞吐量和信道容量的关系求得近似信道容量。实验分析了捕获能量、储能容量以及节点数目对多接入信道容量的影响, 同时实验结果表明, 相比传统节点采用电池作为单一储能单元, 采用混合储能结构可以有效地提高节点的捕获能量数值, 使其在信号的发送上采用多进制的传输方式, 进而增大多接入信道的容量。

关键词: 物联网; 能量捕获; 混合储能; 信道容量; 能量分配

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018139

Modeling and analysis of multiple access channel capacity based on hybrid energy storage and energy harvesting

YAO Xinwei, ZHANG Mengna, WANG Chaochao, WANG Wanliang

College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: Energy harvesting (EH) has been considered as a promising technology to solve the constrained energy problem in the devices of IoT with its advantages of flexible deployment and sustainable energy supply. For multiple access channel with energy harvesting, a hybrid energy storage structure model composed by super capacitor and battery was proposed for the devices of IoT. According to the peculiarities of medium access channel and energy harvesting system, an optimized energy allocation strategy with exponential-type decline (ETD) was presented, the upper and lower bounds of the average throughput were deduced, in particular, the gap of two bounds was derived to be a constant. The channel capacity was further obtained by utilizing the relationship between the average throughput and the channel capacity. In the simulations, the effect of harvested energy, storage capacity and the number of nodes on the channel capacity were analyzed respectively. Experiment results show that compared with the conventional wireless node with single battery storage, the proposed hybrid energy storage structure can improve the harvested energy value and increase the multiple access channel capacity by using adaptive modulation scheme when transmitting the signals.

Key words: IoT, energy harvesting, hybrid energy storage, channel capacity, energy allocation

1 引言

随着物联网技术和无线通信技术的发展, 节点的供能问题已经成为制约其广泛应用的主要因素。

而能量捕获 (EH, energy harvesting) 技术的兴起, 使具备能量捕获能力的设备相较于传统的有线电或电池供电的设备具有明显的优势, 节点通过能量捕获模块可以从周围环境中收集多种类型的能量,

收稿日期: 2017-10-03; 修回日期: 2018-07-23

通信作者: 姚信威, xwyao@zjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61772471, No.61771430)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61772471, No.61771430)

例如机械能、热能和电磁辐射等^[1-2]，并将其转换为电能，从而达到设备可持续利用的目的。因此，将能量捕获技术作为解决无线网络节点供能问题的一种可行方案，吸引了学术界与产业界的广泛关注，同时也取得了显著的进展。

在物联网场景中，环境的能量源具有间歇性、随机性等特点，从而使捕获能量到达的时间以及量值较难预测^[3]。因此，传统的物联网中节点由电网或电池供能，节点电池能量能够保证稳定的数据传输；而基于能量捕获的物联网中，捕获能量的动态变化特性使节点中可用于数据传输的能量是间断、不连续的，在某个时刻节点可能因为捕获能量的不足而发生数据传输中断^[4]。

近年来，为了从理论层面系统地了解基于能量捕获的网络数据传输速率受限问题，一些学者开始针对无线传感器网络中基于能量捕获的通信信道容量问题展开研究^[5-15]。针对单一电池储能结构的点对点信道容量的研究已有许多的研究成果^[5-12]，研究表明，基于能量捕获的通信信道容量主要由节点电池储能容量和捕获能量值 2 个参数决定。当节点电池储能容量无限大时，研究成果证明，基于能量捕获的通信信道容量与平均能量捕获速率的约束关系和基于传统加性高斯白噪声的通信信道容量与平均发送速率的约束关系等价^[5-6]。当节点电池储能容量有限时，基于能量捕获的通信信道容量求解仍然是个开放性的难题。文献[7]分析基于能量捕获的二元信道的信道容量问题。文献[8]在 Verdu-Han 通用结构的基础上，提出了一种信道容量的计算方法，并进一步采用最优能量管理策略推导信道容量的下界。当节点电池储能容量有限并且捕获能量为定值时，利用文献[9]求解基于能量捕获的信道容量的边界。文献[10]分析基于能量捕获的瑞利衰减信道的近似信道容量。文献[11]通过设计编码策略，将功率控制问题与信道容量求解问题相结合，通过计算得出信道容量的近似值。文献[12]基于节点电池容量有限的情形给出基于能量捕获的信道容量的表达式，并推导信道容量的上下界限。相比于针对点对点信道容量的研究，国内外针对多节点网络信道模型的信道容量的研究较少^[13-15]。其中，文献[13]针对节点电池容量无限的多接入信道进行了分析，文献[14-15]针对节点电池容量有限的多接入信道进行了分析。

目前，现有的物联网节点或设备普遍采用电池

作为单一的能量存储单元，因此，基于能量捕获的通信信道容量的研究都是以此为基础的。然而，针对在实际应用环境中存在捕获能量动态变化和电池存储效率低的特性，本文采用混合能量存储结构（由电池和超级电容组成）作为物联网的储能单元。在文献[16-17]中已证明，相比于采用单一电池储能结构，采用电池和超级电容的混合储能结构可以提高整个网络的性能。考虑实际物联网中多个传感区域的传感器节点同时向汇聚节点发送数据的场景，如图 1 所示。因此，本文针对该场景下的多接入信道，分析基于能量捕获的多接入信道容量，首先建立基于混合储能和能量捕获的多接入信道模型，在全面分析信道模型特点的基础上，综合考虑捕获能量的动态随机特性，采用一种近似最优能量分配策略（ETD）求解基于混合储能和能量捕获的多接入信道平均吞吐量的上下界，并进一步求得信道容量。

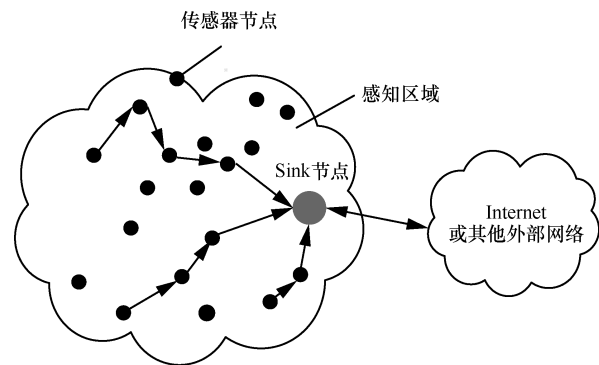


图 1 物联网中感知网络场景

2 系统模型

一个由 K 个发射节点、一个接收节点组成的加性高斯白噪声多接入能量捕获通信信道模型如图 2 所示。其中，每个节点都配备由电池和超级电容组成的混合储能结构，都具有从周围环境中捕获能量的能力并将捕获到的能量存储在能量队列中^[9]。发射节点捕获的能量为 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_K$ ，考虑能量到达模型为独立同分布的伯努利随机过程。假设每个节点捕获能量的平均值相等且均为 $E[E_i]$ ，但是每个节点的具体能量到达过程独立。设节点 i 在时刻 t 捕获的能量可表示为 E_{it} ，每个节点的电池和超级电容的最大储能容量相等，电池最大存储容量为 E_{\max}^b ，能量存储有损耗，设电池能量存储效率为 $\eta (0 \leq \eta < 1)$ ，超级电容容量较小，最大储能容量为 E_{\max}^{sc} 。

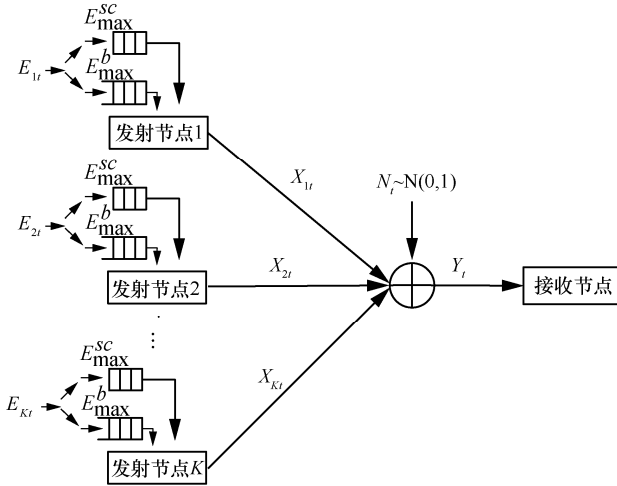


图2 基于混合储能的能量捕获多址接入通信信道模型

由于电池存储能量有损耗，因此每次能量到达后优先存储在超级电容中，当超级电容储满后，将多余的能量存到电池中。当需要发送数据时，发射节点按序先后从超级电容和电池中获取能量。在每个时刻 t ，系统的信道输入为 $X_{1_t}, X_{2_t}, X_{3_t}, \dots, X_{K_t}$ ，则信道输出为 $Y_t = X_{1_t} + X_{2_t} + \dots + X_{K_t} + N_t$ ，其中， N_t 表示符合单位标准分布 $N(0,1)$ 的高斯噪声。设 B_{i_t} 表示发射节点 i 在时刻 t 可利用的总能量， $E_{i_t}^{sc}$ 表示超级电容中可使用的能量， $E_{i_t}^b$ 表示电池中可使用的能量。通信系统中每个节点在每个时刻 t 的能量限制关系为

$$|X_{i_t}|^2 \leq B_{i_t} \quad (1)$$

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

其中， $i = 1, 2, \dots, K$ 。式(1)表示发射信号的能量不大于节点的总能量， $(1-\eta)E_{i_t}^b$ 表示电池中损耗的能量，即当前时刻总能量为当前时刻捕获的能量与上一时刻总能量之和，再减去传输信号所消耗的能量和多余部分能量的存储损耗。同时，受节点储能设备的物理限制，任一时刻节点的总能量不能超过节点的最大储能容量。假设物联网收发节点已知能量到达的因果关系的情形，即在时刻 t 对于发射节点 i 和接收节点均知晓 $\{E_{i_t}, E_{i_{(t-1)}}, \dots, E_{i_1}\}$ 。设每个发射节点的能量到达过程符合如下的伯努利随机分布，即

$$E_{i_t} = \begin{cases} E_i, p_i \\ 0, 1-p_i \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)知，每个发射节点捕获能量的平均值相等，即 $E_i p_i = E[E_i], (i = 1, 2, \dots, K)$ ，但每个发射节点的能量捕获过程相互独立。

3 能量分配策略

3.1 近似最优能量分配策略

根据每个发射节点的能量到达过程服从伯努利随机分布，即每个时刻捕获到能量为 E_i 的概率是 p_i ，为 0 的概率是 $1-p_i$ ，针对发射节点 i ，能量捕获模型如图 3 所示。

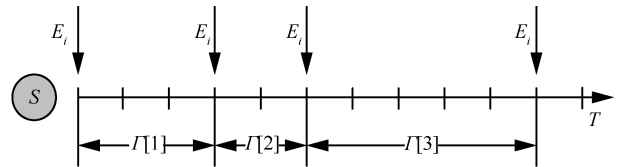


图3 节点能量捕获模型

图 3 中， $\Gamma[m]$ 表示第 m 次能量到达的时刻和第 $m+1$ 次能量到达 E_i 的时刻的时间间隔，由于能量到达过程符合伯努利随机分布，因此 $\Gamma[m]$ 为独立同分布的几何随机变量。设超级电容和电池中的能量分配策略分别为 $g_1(j)$ 和 $g_2(j)$ ，其中， $j = t - \max\{t' \leq t; E_{i_{t'}} = E\}$ 表示当前时刻 t 与最近一次能量到达为 E_i 的时刻相隔的时间。针对相邻 2 次能量到达为 E_i 的时刻之间的时间段，引入呈指数下降形式 (ETD, exponential-type decline) 的近似最优能量分配策略为

$$g_1(j) = p_i (1-p_i)^{j-1} E_{i_t}^{sc} \quad (4)$$

$$g_2(j) = (1-e^{-p_i}) e^{-p_i(j-1)} \eta E_{i_t}^b \quad (5)$$

从式(4)和式(5)可以看出，节点采用 ETD 策略以 2 种指数下降的方式消耗超级电容和电池中捕获到的能量，随着 $j \rightarrow \infty$ ，可以得到

$$\sum_{j=1}^{\infty} g_1(j) = \sum_{j=1}^{\infty} p(1-p)^{j-1} E_{i_t}^{sc} = E_{i_t}^{sc} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{\infty} g_2(j) = \sum_{j=1}^{\infty} [(1-e^{-p}) e^{-p(j-1)} \eta E_{i_t}^b] = \eta E_{i_t}^b \quad (7)$$

式(6)和式(7)表明，节点采用 ETD 策略共消耗的能量不超过总的捕获能量，并随着相邻 2 次能量到达时间间隔的增大，总的捕获能量近似于数据传输所消耗的能量，这既避免了能量过度消耗，又达到了对捕获能量的高效利用。图 4 描述了 ETD 策

略下的能量变化关系。本文提出 ETD 策略的动机是：由于捕获的能量符合伯努利随机分布，因此 $\Gamma[m]$ 是一个与参数 p_i 相关的几何随机变量，而几何随机变量的特点是无记忆性的，均值为 $\frac{1}{p_i}$ 。因此，对于每个时刻来说，与下一个能量到达为 E_i 的时刻的时间间隔的期望值为 $\frac{1}{p_i}$ 。另外，根据文献[18-20]

最优能量分配的结论可知，为了获得更高的传输速率，应尽可能地在每 2 次能量到达的时间段里均匀分配能量。由于能量到达的时刻不能提前知晓，只能以概率 p_i 预测，因此采用能量呈指数下降形式消耗的策略，并且指数下降的步长与参数 p_i 相关。采用 ETD 策略，在能量到达为 E_i 的时刻，节点的电池和超级电容里将会遗留小部分未利用完的能量，在本节不考虑这部分能量。

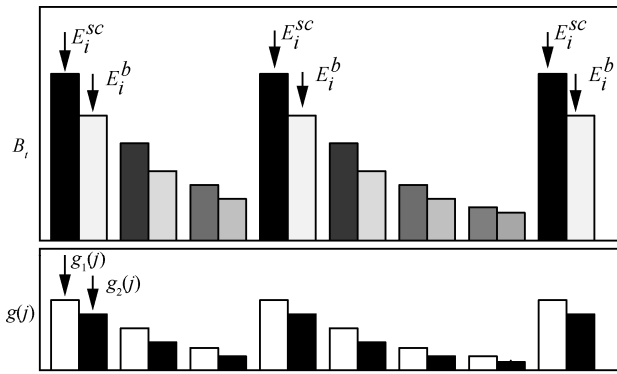


图 4 ETD 策略下的能量变化关系

3.2 平均吞吐量上下界

1) $E_{\max}^{sc} \leq E_i < E_{\max}^b + E_{\max}^{sc}$ 情形

针对每个发射节点，首先考虑捕获能量大于超级电容容量而小于总储能容量的一般情形。由于超级电容的能量存储效率远大于电池的能量存储效率，因此将每次捕获到的能量优先存储在超级电容中，并将多余的能量存储在电池中。根据能量的约束关系，对于每个发射节点，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，而当节点 i 在相邻 2 个能量到达为 E_i 的时刻之间消耗的能量接近于捕获的总能量时，就能达到对捕获能量的高效利用。因此，能量到达后发射节点 i 分别存储在超级电容和电池的能量 E_{it}^{sc} 和 E_{it}^b 分别为

$$E_{it}^{sc} = E_{\max}^{sc} \quad (8)$$

$$E_{it}^b = E_i - E_{\max}^{sc} \quad (9)$$

由高斯噪声符合标准分布 $N(0,1)$ ，依据文献[5]中平均吞吐量的定义，可将平均吞吐量表示为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \text{lb}(1 + g(t)) \right] \quad (10)$$

其中， \mathbb{E} 表示数学期望， $g(t)$ 表示用于数据传输的最优发送能量。设每个时刻超级电容用于传输数据的能量为 $g_i^{sc}(t)$ ，电池用于传输数据的能量为 $g_i^b(t)$ ，因此，系统中发射节点 i 的平均吞吐量可表示为

$$T_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left\{ \sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + g_i^{sc}(t)) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + g_i^b(t)) \right] \right\} \quad (11)$$

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，根据节点能量的限制关系，节点 i 在时刻 t 超级电容和电池中消耗的能量不能超过各自存储的总能量，即 $g_i^b(t)$ 和 $g_i^{sc}(t)$ 必须满足

$$\sum_{t=1}^n g_i^{sc}(t) \leq \sum_{t=1}^n E_{it}^{sc} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^n g_i^b(t) \leq \sum_{t=1}^n \eta E_{it}^b \quad (13)$$

依据式(11)和文献[14]，系统可达到的总平均吞吐量为 T_{sum} 如式(14)所示。

$$\begin{aligned} T_{\text{sum}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left\{ \sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \sum_{i=1}^K g_i^{sc}(t)) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \sum_{i=1}^K g_i^b(t)) \right] \right\} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \sum_{i=1}^K g_i^{sc}(t)) \right] + \\ &\quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \mathbb{E} \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \sum_{i=1}^K g_i^b(t)) \right] \\ &\stackrel{\textcircled{1}}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^K g_i^{sc}(t) \right] \right) + \\ &\quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^K g_i^b(t) \right] \right) \\ &\stackrel{\textcircled{2}}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n E_{it}^{sc} \right] \right) + \\ &\quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n \eta E_{it}^b \right] \right) \\ &\stackrel{\textcircled{3}}{=} \frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta K(\mathbb{E}[E_i] - E_{\max}^{sc})) \quad (14) \end{aligned}$$

其中，推导过程①是依据对数函数的凹凸性质得到的，推导过程②是依据式(12)和式(13)得到的，推导过程③是由式(8)和式(9)得到 $\mathbb{E}[E_i^{sc}] = E_{\max}^{sc}$ ， $\mathbb{E}[E_i^b] = \mathbb{E}[E_i] - E_{\max}^{sc}$ ，进而得到的。至此，依据系统中节点应满足的能量限制关系求得了系统平均吞吐量的一

个上界。下面将结合 ETD 策略对系统平均吞吐量的下界进行分析。

由于式(11)中 $g_i^{sc}(t)$ 和 $g_i^b(t)$ 代表的是发射节点 i 在整个传输时间段内的能量分配策略, 而 3.1 节给出的 ETD 策略中 $g_1(j)$ 和 $g_2(j)$ 代表的是发射节点 i 在相邻 2 个能量到达为 E_i 的时间段内的能量分配策略。根据文献[12]中的引理 1, 可以将上述两者建立关系为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \text{lb}(1 + g(t)) = \frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \text{lb}(1 + g(j)) \right] \quad (15)$$

其中, L 表示相邻 2 个能量到达为 E_i 的时刻的时间间隔。因此, 将式(11)变形为

$$T_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left\{ \sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + g_i^{sc}(t)) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + g_i^b(t)) \right] \right\} \\ = \frac{1}{E[L]} E \left\{ \sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + g_1(j)) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + g_2(j)) \right] \right\} \quad (16)$$

代入式(4)和式(5), 并由式(8)和式(9)可得

$$T_i = \frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i(1 - p_i)^{j-1} E_{\max}^{sc}) \right] + \\ \frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \text{lb}(1 + (1 - e^{-p_i}) e^{-p_i(j-1)} \eta(E_i - E_{\max}^{sc})) \right] \quad (17)$$

将式(17)等式右边分成 2 个部分分别进行计算, 对第一部分进行变换, 为

$$\frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p(1 - p)^{j-1} E_{\max}^{sc}) \right] \\ \stackrel{\textcircled{1}}{\geq} \frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2}(j-1)\text{lb}(1 - p) \right] \right] \\ = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + pE_{\max}^{sc}) + \frac{1}{4} \left(\frac{E[L^2]}{E[L]} - 1 \right) \text{lb}(1 - p) \\ \stackrel{\textcircled{2}}{=} \frac{1}{2} \text{lb}(1 + pE_{\max}^{sc}) - \frac{1-p}{2p} \text{lb} \left(\frac{1}{1-p} \right) \quad (18)$$

对式(17)等式右边的第二部分进行如式(19)所示的变换。

$$\frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \text{lb}(1 + (1 - e^{-p_i}) e^{-p_i(j-1)} \eta(E - E_{\max}^{sc})) \right] \\ \stackrel{\textcircled{1}}{\geq} \frac{1}{E[L]} E \left[\sum_{j=1}^L \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i \eta(E - E_{\max}^{sc})) + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{e^{-p_i(j-1)}(1 - e^{-p_i})}{p_i} \right) \right] \right]$$

$$= \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i \eta(E - E_{\max}^{sc})) + \\ \frac{1}{E[L]} E \left[L \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1 - e^{-p_i}}{p_i} \right) + \frac{L(L-1)}{2} \frac{1}{2} \text{lb}(e^{-p_i}) \right] \\ \stackrel{\textcircled{2}}{=} \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i \eta(E - E_{\max}^{sc})) + \\ \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1 - e^{-p_i}}{p_i} \right) + \frac{1-p_i}{2p_i} \text{lb}(e^{-p_i}) \quad (19)$$

在式(18)和式(19)的推导过程中推导过程①根据对数函数的性质 $\text{lb}(1 + \alpha x) \geq \text{lb}(1 + x) + \text{lb} \alpha$ ($0 < \alpha \leq 1$) 得到, 推导过程②是根据变量 L 为符合参数 p 的几何分布, 即 $L \sim G(p)$, 所以有

$$E[L] = \frac{1}{p}, \quad E[L^2] = \frac{2-p}{p^2}.$$

因此, 式(16)最终可以推导为

$$T_i \geq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta p_i (E - E_{\max}^{sc})) + \\ \frac{1-p_i}{2p_i} \text{lb}(1 - p_i) + \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1 - e^{-p_i}}{p_i} \right) + \frac{1-p_i}{2p_i} \text{lb}(e^{-p_i}) \\ = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta p_i (E - E_{\max}^{sc})) - \\ \frac{1}{2} \left[\frac{1-p_i}{p_i} \text{lb} \left(\frac{e^{p_i}}{1-p_i} \right) + \text{lb} \left(\frac{p_i}{1 - e^{-p_i}} \right) \right] \quad (20)$$

其中, 针对式(20)所得的结果中的 $\frac{1}{2} \left(\frac{1-p}{p} \text{lb} \left(\frac{e^p}{1-p} \right) + \text{lb} \left(\frac{p}{1 - e^{-p}} \right) \right)$ 进行计算, 由于 $p \in (0, 1]$, 当 $p \rightarrow 0$ 时取得最大值, 约等于 1.442, 因此可得

$$T_i \geq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i E_{\max}^{sc}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + p_i \eta (E - E_{\max}^{sc})) - 1.442 \quad (21)$$

综上可得单个发射节点 i 的平均吞吐量的下界, 下面对系统的总平均吞吐量的下界进行分析。由于每个发射节点捕获能量的平均值相等, 定义变量 λ_i , 满足

$$\lambda_i = \frac{E[E_i^{sc}]}{\sum_{j \in K} E[E_j^{sc}]} = \frac{E[E_i^b]}{\sum_{j \in K} E[E_j^b]} \quad (i \in K) \quad (22)$$

则有 $\sum_{i \in K} \lambda_i = 1$, 根据对数函数的凹凸性质可以

得到

$$\frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \sum_{i \in K} g_i(t) \right) \geq \sum_{i \in K} \lambda_i \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \lambda_i^{-1} g_i(t)) \quad (23)$$

即有

$$\frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \sum_{i \in K} g_i^{sc}(t) \right) + \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \sum_{i \in K} g_i^b(t) \right) \geq \sum_{i \in K} \lambda_i \left[\frac{1}{2} \text{lb} (1 + \lambda_i^{-1} g_i^{sc}(t)) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \lambda_i^{-1} g_i^b(t)) \right] \quad (24)$$

对于任意一个标量 $\alpha (\alpha > 0)$ ，定义 T_i^α 为

$$T_i^\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left\{ \sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \text{lb} (1 + \alpha g_i^{sc}(t)) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \alpha g_i^b(t)) \right] \right\} \quad (25)$$

对式(21)进行推导，可以得到

$$T_i^\alpha \geq \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \alpha \mathbb{E}[E_i^{sc}]) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \alpha \eta \mathbb{E}[E_i^b]) - 1.442 \quad (26)$$

对于式(26)，当 α 的值取 λ_i^{-1} 时，根据式(14)、式(24)~式(26)可得

$$\begin{aligned} T_{\text{sum}} &\geq \sum_{i \in K} \lambda_i \cdot T_i^{\lambda_i^{-1}} \\ &\geq \sum_{i \in K} \lambda_i \left[\frac{1}{2} \text{lb} (1 + \lambda_i^{-1} \mathbb{E}[E_i^{sc}]) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \lambda_i^{-1} \eta \mathbb{E}[E_i^b]) \right] - 1.442 \\ &\stackrel{\textcircled{3}}{=} \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \sum_{i=1}^K \mathbb{E}[E_i^{sc}]) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \eta \sum_{i=1}^K \mathbb{E}[E_i^b]) - 1.442 \quad (27) \end{aligned}$$

式(27)中推导过程 $\textcircled{3}$ 由式(22)可得。根据 $\mathbb{E}[E_i^{sc}] = E_{\text{max}}^{sc}$ ， $\mathbb{E}[E_i^b] = \mathbb{E}[E_i] - E_{\text{max}}^{sc}$ ，结合式(14)和式(27)可得系统的平均吞吐量的上下界为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \text{lb} (1 + KE_{\text{max}}^{sc}) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \eta K (\mathbb{E}[E_i] - E_{\text{max}}^{sc})) - 1.442 &\leq T_{\text{sum}} \\ &\leq \frac{1}{2} \text{lb} (1 + KE_{\text{max}}^{sc}) + \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \eta K (\mathbb{E}[E_i] - E_{\text{max}}^{sc})) \quad (28) \end{aligned}$$

2) $E_i < E_{\text{max}}^{sc}$ 情形

当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存储到超级电容中，即每个发射节点采用超级电容作为唯一的能量存储单元。设定发射节点 i 中超级电容的能量分配策略为 $g_i(t)$ ，根据式(10)和式(11)可以得到此时系统中单个发射节点 i 的平均吞吐量和系统总平均吞吐量分别为

$$T_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \text{lb} (1 + g_i(t)) \right] \quad (29)$$

$$T_{\text{sum}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{i=1}^K \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \sum_{t=1}^n g_i(t)) \right] \quad (30)$$

假设发射节点在第一次捕获能量到达之前初始能量为 0，根据消耗能量不大于总的可用能量，

有如下能量受限关系，为

$$\sum_{t=1}^n g_i(t) \leq \sum_{t=1}^n E_{it}^{sc} \quad (31)$$

对式(30)进行变形为

$$\begin{aligned} T_{\text{sum}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{i=1}^K \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \sum_{t=1}^n g_i(t)) \right] \\ &\stackrel{\textcircled{1}}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^K g_i(t) \right] \right) \\ &\stackrel{\textcircled{2}}{\leq} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n E_{it}^{sc} \right] \right) \\ &\stackrel{\textcircled{3}}{=} \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \sum_{i=1}^K \mathbb{E}[E_i]) \\ &= \frac{1}{2} \text{lb} (1 + K \mathbb{E}[E_i]) \quad (32) \end{aligned}$$

式(32)中推导过程 $\textcircled{1}$ 是由对数函数的凹凸性质得到，推导过程 $\textcircled{2}$ 由式(31)得到，推导过程 $\textcircled{3}$ 是由于节点捕获能量小于超级电容，则节点消耗超级电容中的总能量不大于节点总的捕获能量，进而得到最终结果。至此，求得了系统平均吞吐量的一个上界，下面将采用 3.1 节给出的 ETD 策略对系统平均吞吐量的下界进行分析。

采用 ETD 策略中的式(4)，此时 $E_{it}^{sc} = E_i$ ，根据式(15)对式(29)进行变形可得

$$T_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \sum_{t=1}^n \left[\frac{1}{2} \text{lb} (1 + g_i(t)) \right] \quad (33)$$

对式(33)进行与式(18)类似的变换，可以得到

$$T_i \geq \frac{1}{2} \text{lb} (1 + p_i E_i) - \frac{1-p}{2p} \text{lb} \left(\frac{1}{1-p} \right) \quad (34)$$

针对式(34)的后部分 $\frac{1-p}{2p} \text{lb} \left(\frac{1}{1-p} \right)$ ，当 $p \rightarrow 0$ 时取得最大值，约等于 0.72。因此求得了单个发射节点的平均吞吐量的下界，下面对系统总的平均吞吐量进行分析。

定义变量 $\lambda_i = \frac{\mathbb{E}[E_i]}{\sum_{j \in K} \mathbb{E}[E_j]}$ ($i \in K$)，则有 $\sum_{i \in K} \lambda_i = 1$ ，根据

对数函数的凹凸性质同样可以得关系式(23)。对于任意一个标量 $\alpha (\alpha > 0)$ ，定义 T_i^α 为

$$T_i^\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^n \frac{1}{2} \text{lb} (1 + \alpha g_i(t)) \right] \quad (35)$$

根据对式(34)的求解, 可以得到

$$T_i^\alpha \geq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \alpha E[E_i]) - 0.72 \quad (36)$$

对于式(36), 当 α 的值取 λ_i^{-1} 时, 由式(23)、式(30)和式(36)可得

$$\begin{aligned} T_{\text{sum}} &\geq \sum_{i \in K} \lambda_i T_i^{\lambda_i^{-1}} \\ &\geq \sum_{i \in K} \lambda_i \left[\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \lambda_i^{-1} E[E_i]) \right] - 0.72 \\ &= \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \sum_{i=1}^K E[E_i]) - 0.72 \end{aligned} \quad (37)$$

综上, 结合式(32)和式(37)可得系统的平均吞吐量的上下界为

$$\frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE[E_i]) - 0.72 \leq T_{\text{sum}} \leq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE[E_i]) \quad (38)$$

3) $E_i \geq E_{\text{max}}^{\text{sc}} + E_{\text{max}}^b$ 情形

当捕获能量大于超级电容和电池的总储能容量时, 则节点每次捕获的能量都能充满超级电容和电池。因此, 节点 i 在时刻 t 能够用于传输数据的能量为超级电容和电池的容量之和, 设超级电容中的能量消耗策略为 $g_i^{\text{sc}}(t)$, 电池中的能量消耗策略为 $g_i^b(t)$, 假设节点在第一次捕获能量到达之前的初始能量为 0, 则能量限制关系为

$$\sum_{t=1}^n g_i^{\text{sc}}(t) \leq \sum_{t=1}^n E_{\text{max}}^{\text{sc}} \quad (39)$$

$$\sum_{t=1}^n g_i^b(t) \leq \sum_{t=1}^n E_{\text{max}}^b \quad (40)$$

因此, 这种情况, 与第一种情况的区别仅仅在于, 对于每一个发射节点, 每当能量到达为 E_i 时刻, 发射节点中电池可用于传输数据的可用能量变为电池的存储容量, 即式(9)变为 $E_{it}^b = E_{\text{max}}^b$ 。所以在 $E_i \geq E_{\text{max}}^{\text{sc}} + E_{\text{max}}^b$ 情形下对系统平均吞吐量的分析与 $E_{\text{max}}^{\text{sc}} \leq E_i < E_{\text{max}}^b + E_{\text{max}}^{\text{sc}}$ 情形完全类似, 求解过程将不再重复描述, 最终可以得到

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\text{max}}^{\text{sc}}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta KE_{\text{max}}^b) - 1.442 \leq T_{\text{sum}} \\ &\leq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\text{max}}^{\text{sc}}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta KE_{\text{max}}^b) \end{aligned} \quad (41)$$

4 系统的信道容量

在第 3 节里已经分别求得了捕获能量小于节点总储能容量同时大于超级电容容量、捕获能量小于超级电容容量、捕获能量大于总储能容量 3 种情形下的系统平均吞吐量的上下界, 本节将依据文献[15]中得出的系统信道容量与系统平均吞吐量的关系, 进一步求得系统的近似信道容量。

文献[15]针对节点采用电池作为单一储能结构, 基于能量捕获的多接入信道容量进行了分析, 根据文献[15]中的定理 2 和定理 3 可以得到, 当发射节点和接收节点已知能量到达的因果关系的情形时, 信道容量与平均吞吐量为

$$T_{\text{sum}} - 1.05 \leq C_{\text{sum}} \leq T_{\text{sum}} \quad (42)$$

综合第 3 节中针对不同情况下求得的系统平均吞吐量的上下界和式(42), 可以得到信道容量如下所示。

1) 当 $E < E_{\text{max}}^{\text{sc}}$ 时, 有

$$\frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE[E_i]) - 1.77 \leq C_{\text{sum}} \leq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE[E_i]) \quad (43)$$

2) 当 $E_{\text{max}}^{\text{sc}} \leq E < E_{\text{max}}^b + E_{\text{max}}^{\text{sc}}$ 时, 有

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\text{max}}^{\text{sc}}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta K(E[E_i] - E_{\text{max}}^{\text{sc}})) - 2.49 \leq C_{\text{sum}} \\ &\leq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\text{max}}^{\text{sc}}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta K(E[E_i] - E_{\text{max}}^{\text{sc}})) \end{aligned} \quad (44)$$

3) 当 $E \geq E_{\text{max}}^{\text{sc}} + E_{\text{max}}^b$ 时, 有

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\text{max}}^{\text{sc}}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta KE_{\text{max}}^b) - 2.49 \leq C_{\text{sum}} \\ &\leq \frac{1}{2} \text{lb}(1 + KE_{\text{max}}^{\text{sc}}) + \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \eta KE_{\text{max}}^b) \end{aligned} \quad (45)$$

由上述结果可知, 系统信道容量主要与捕获能量的平均值、电池容量、超级电容容量以及节点个数相关, 且每种情况下其上下界的差值恒定不变。从结果中还可以观察到, 当节点数目 $K \rightarrow \infty$ 时, 系统信道容量上下界之间的差值可以忽略不计。

5 仿真实验和分析

根据第 4 节得到的系统近似信道容量, 本节对

信道容量与捕获能量、储能容量以及节点数目等参数关系进行仿真实验，同时为了验证采用基于电池和超级电容的混合储能结构对整个系统性能的影响，将本文实验与文献[15]得到的结论进行对比，本节的实验图中标注 HES 的曲线为本文针对基于混合储能结构（HES）模型求得的结果，标注 BS 的曲线为文献[15]针对基于单一电池储能结构模型求得的结果。实验中，将单位时间内随机捕获的功率作为捕获能量值，并随机产生单位时间内捕获能量值 E_i 。

1) 信道容量与捕获能量的关系

针对捕获能量小于超级电容容量的情形，设置节点数目 K 为 10，电池储能效率 η 为 0.8，超级电容容量 E_{\max}^{sc} 为 100。根据式(43)，实验结果如图 5 所示。当储能容量大小相等时，HES 上下界之间的差值与 BS 上下界之间的差值相等，均为 $1.77 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。然而，电池的能量存储效率比超级电容低，因此 HES 上下界均比 BS 上下界大，且两者之间的差距随着节点数目的增加而越加明显。

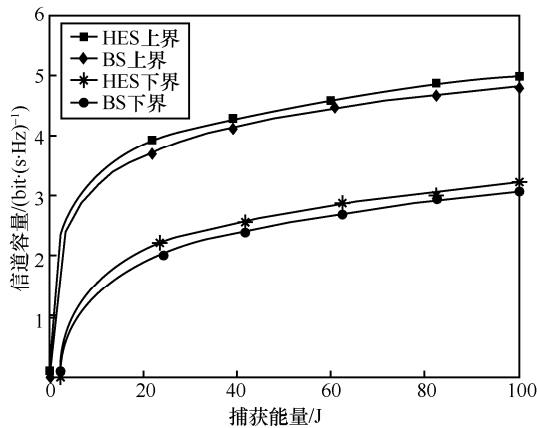


图 5 2 种储能模型在 $E_i < E_{\max}^{sc}$ 情形下的结果比较

针对捕获能量大于超级电容容量的情形，实验参数 K 、 η 、 E_{\max}^{sc} 的值保持不变，将文献[15]中的电池容量设定为等于本文采用的混合储能结构的总容量，并进行对比。根据式(44)，仿真实验如图 6 所示。从图 6 可以看出，采用混合储能结构对信道容量的提升较显著，随着捕获能量的增加，HES 的上下界都将超过 BS 的上下界，这是由于节点采用电池和超级电容进行混合储能提高了对捕获能量的利用率。当节点需要发送数据时，可以同时利用超级电容和电池中的能量，优化了节点的能量分配，因此整个系统所能达到的传输

速率有较大的提升。另外，HES 上下界之间的恒定差值为 $2.49 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ ，BS 上下界之间的恒定差值为 $1.77 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。

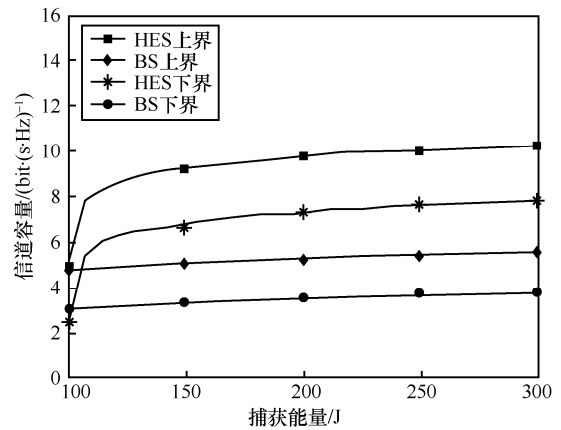


图 6 2 种储能模型在 $E_i \geq E_{\max}^{sc}$ 情形下的结果比较

2) 信道容量与储能容量的关系

为了研究系统信道容量与节点储能容量的关系，基于捕获能量充足的情况下进行实验。设置节点数目 K 为 10，电池储能效率 η 为 0.8，文献[15]中电池容量等于本文采用的混合储能结构总容量。根据式(45)，仿真实验如图 7 所示。由于混合储能结构提高了对捕获能量的利用率并优化了节点的能量分配，因此 HES 的上下界均比 BS 上下界要大，且随着储能容量的增大，HES 的下界将超过 BS 的上界。同时还可以得到 HES 上下界之间的差值为 $2.49 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ ，BS 上下界之间的差值为 $1.77 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ ，且不随着储能容量的变化而变化。

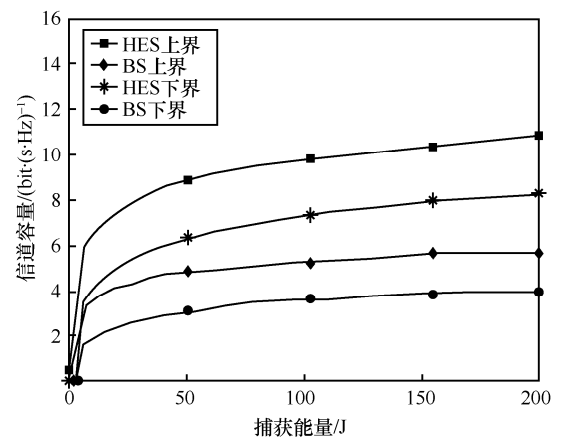


图 7 2 种储能模型在不同储能容量下的结果对比

3) 信道容量与节点数目的关系

为了分析节点数目对系统信道容量的影响，进

行 2 组实验, 分别取 $K = 10$ 和 $K = 100$, 并且在基于捕获能量充足的情形下进行实验, 仿真实验如图 8 所示。由图 8 可知, 信道容量随着节点数目的增加而增大, 而系统信道容量上下界之间的差值保持恒定不变, 为 $2.49 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。因此, 当节点数目趋于无穷大时, 随着信道容量的不断增大, 其上下界的恒定差值可以忽略不计。

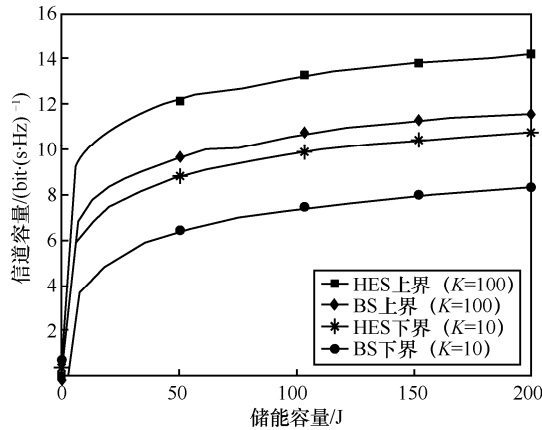


图 8 2 种储能模型在不同节点数目情形下的结果对比

6 结束语

本文对多接入能量捕获通信信道容量进行了分析, 每个发射节点采用电池和超级电容的结构, 且每个节点捕获能量平均值相等。根据能量到达的随机特性, 假设能量到达服从独立同分布的伯努利随机分布, 且每个节点捕获能量的平均值相等。通过对每个节点采用 ETD 策略推导出了系统平均吞吐量的上下界, 并进一步求得系统的近似信道容量。单位时间内, 当捕获能量小于超级电容存储容量时, 系统信道容量上下界之间的常数差值为 $1.77 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$; 当捕获能量大于超级电容存储容量情形时, 系统信道容量上下界之间的常数差值为 $2.49 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。仿真实验分析了系统信道容量与捕获能量、储能容量以及节点数目的关系, 实验表明, 相比节点采用单一电池储能, 采用混合储能结构可以有效地提高节点的捕获能量数值, 使其在信号的发送上采用多进制的传输方式, 进而增大系统的信道容量。

参考文献:

[1] 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, 33(12):1-10.
HAN J H, DING X, SHI L, et al. Research on the time-varying charg-

ing and dynamic data routing strategy for rechargeable wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(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] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, ULUKUS S, et al. Fundamental limits of energy harvesting communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4):126-132.
[4] YAO X W, WANG C C, WANG W L, et al. On the achievable throughput of energy-harvesting nanonetworks in the terahertz band[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(2): 902-912.
[5] OZEL O, ULUKUS S. Achieving AWGN capacity under stochastic energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(10):6471-6483.
[6] 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.
[7] TUTUNCUOGLU K, OZEL O, YENER A, et al. Binary energy harvesting channel with finite energy storage[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2013: 1591-1595.
[8] 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. 2013: 1789-1793.
[9] JOG V, ANANTHARAM V. An energy harvesting AWGN channel with a finite battery[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2014: 806-810.
[10] DOSHI J, VAZE R. Long term throughput and approximate capacity of transmitter-receiver energy harvesting channel with fading[C]//IEEE International Conference on Communication Systems. 2015: 46-50.
[11] DONG Y, FARMIA 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.
[12] SHAVIV D, NGUYEN P M, OZGUR A. Capacity of the energy harvesting channel with a finite battery[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2015:131-135.
[13] RAJESH R, DEEKSHITH P K, SHARMA V. Capacity of a Gaussian MAC with energy harvesting transmit nodes[C]// Information Theory and Applications Workshop. 2012:338-343.
[14] INAN H A, OZGUR A. Online power control for the energy harvesting multiple access channel[C]// International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad-Hoc and Wireless Networks. 2016:1-6.
[15] INAN H A, SHAVIV D, OZGUR A. Capacity of the energy harvesting Gaussian MAC[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2016: 2744-2748.
[16] CAO J, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(1):122-132.
[17] SAGGINI S, ONGARO F, GALPERTI C, et al. Supercapacitor-based hybrid storage systems for energy harvesting in wireless sensor net-

works[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2010: 2281-2287.

[18] JING Y, ULUKUS S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 60(1):220-230.

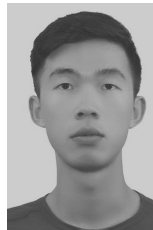
[19] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG J, et al. Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: optimal policies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8):1732-1743.

[20] 姚信威, 郑星航, 王万良, 等. 吞吐量最大化的二维无线能量传输算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11): 164-169.

YAO X W, ZHENG X H, WANG W L, et al. A bidimensional wireless energy transfer algorithm for maximum network throughput[J]. Computer Science, 2015, 42(11): 164-169.



章梦娜 (1993-), 女, 浙江绍兴人, 浙江工业大学硕士生, 主要研究方向为无线能量传输、移动机器人技术等。

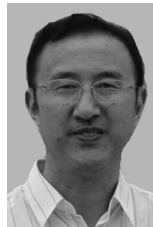


王超超 (1992-), 男, 浙江嘉兴人, 浙江工业大学博士生, 主要研究方向为微观尺度智能感知与通信、物联网和移动机器人技术等。

[作者简介]



姚信威 (1986-), 男, 浙江诸暨人, 博士, 浙江工业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为多尺度智能感知与通信/无线能量传输、物联网、智能大数据等。



王万良 (1957-), 男, 江苏高邮人, 博士, 浙江工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人工智能、物联网、大数据、网络控制等。