

## 源节点电池容量受限的菱形信道最优传输策略

李陶深<sup>1,2</sup>, 孙莉<sup>1</sup>, 王哲<sup>3</sup>

(1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004; 2. 南宁学院信息工程学院, 广西 南宁 530299;  
3. 广西民族大学人工智能学院, 广西 南宁 530005)

**摘 要:** 为了解决无线能量收集网络中节点能量的不确定性使系统难以设计合理的传输策略的问题, 构建源节点电池容量受限的菱形信道, 以最大化系统端到端的吞吐量为目标, 在满足传输节点间能量和数据因果及电池能量无溢出约束的条件下, 构建系统中端到端吞吐量最大化的模型, 提出一种最优的离线传输功率和速率分配策略。该策略首先根据理论分析和公式推导, 将最优传输问题转化为求解广播信道侧的最优传输问题, 利用注水算法求解源节点到中继节点的最优总功率。然后根据广播信道吞吐量最大化问题中的截止功率水平, 分析源节点到各中继节点的吞吐量, 根据中继节点数据到达情况, 采用迭代注水法求解中继节点到目的节点最优传输功率, 并通过扩展多址接入信道最优速率满足条件求解最优速率。仿真结果证明了所提优化策略的可行性和正确性。

**关键词:** 能量收集; 菱形信道; 电池容量受限; 最优功率分配; 最大吞吐量

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2021069

## Optimal transmission strategy of diamond channel with limited battery capacity of source node

LI Taoshen<sup>1,2</sup>, SUN Li<sup>1</sup>, WANG Zhe<sup>3</sup>

1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China  
2. School of Information Engineering, Nanning University, Nanning 530299, China  
3. School of Artificial Intelligent, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530005, China

**Abstract:** In order to solve the problem that the energy harvesting uncertainty of node in wireless energy harvesting network makes it difficult for the system to design a reasonable transmission strategy, a diamond channel with limited battery capacity of the source node were constructed. The goal was to maximize the end-to-end throughput of the system. Under the conditions of meeting the constraints of energy and data causality between transmission nodes and no battery energy overflow, a model to maximize the end-to-end throughput of the system was built, and an optimal offline transmission power and rate allocation strategy was proposed. Firstly, based on theoretical analysis and formula derivation, the strategy transformed the optimal transmission problem into the optimal transmission problem on the side of the broadcast channel, and used the water-filling algorithm to solve the optimal total power from the source node to the relay node. Then, the throughput of the source node to each relay node was analyzed based on the cutoff power level in the broadcast channel throughput maximization problem. Finally, according to the data arrival of the relay node, the iterative water-filling method was used to solve the optimal transmission power from the relay node to the destination node, and the optimal rate was solved by extending the optimal rate of the multiple access channel. Simulation results demonstrate the feasibility and correctness of the proposed optimization policies.

**Keywords:** energy harvesting, diamond channel, limited battery capacity, optimal power allocation, maximum throughput

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2021-02-22

通信作者: 孙莉, sunli285@jd.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61762010)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61762010)

## 1 引言

无线通信网络的性能受到设备电池寿命限制, 电池的手动更换或充电导致无线设备的频繁中断。能量收集技术可以从周围环境中源源不断地收集能量, 并将这些能量用于无线通信系统中, 大大延长了无线设备的寿命, 降低了维护成本, 提高了无线网络系统的性能<sup>[1-3]</sup>。在能量收集网络系统中, 由于能量收集的间歇性和不稳定性, 某些节点可能会出现能量消耗殆尽的情况, 因此需要考虑节点电池容量受限的约束<sup>[4]</sup>。针对电池容量受限的能量收集网络中的功率和速率分配问题, 人们基于简单的点对点网络模型进行了比较深入具体的研究。然而在点对点传输中, 信道环境的不稳定性可能会导致某个时隙(短期)的传输状态极差, 从而影响后续(长期)的传输状态。为此, 本文考虑将点对点模型拓展为菱形信道模型, 即在源节点和目的节点中间添加2个中继节点, 从而提高传输的稳定性。

本文针对无线通信网络中源节点电池容量有限的条件, 研究源节点电池容量受限情况下基于能量收集和能量协作的双中继通信信道的最优功率和速率分配策略, 解决系统端到端的吞吐量最大化问题。本文的主要贡献包括以下几个方面。

1) 基于传输节点间能量因果关系约束、数据因果约束关系及电池能量无溢出约束, 构建系统中端到端吞吐量最大化的优化模型, 提出一种最优的离线传输功率和速率分配策略。

2) 将最优传输问题转化为求解左侧广播信道的最优传输问题, 然后根据广播信道吞吐量最大化问题中的截止功率水平, 分析求解源节点到各中继节点的吞吐量, 最后根据中继节点数据到达迭代中继节点的电池能量求解源节点到中继节点的最优总功率和中继节点到目的节点最优传输功率, 并通过扩展多址接入信道最优速率满足条件求解最优速率问题。

3) 通过模拟仿真实验, 验证了所提优化策略的可行性和正确性。

## 2 相关工作

近年来, 能量收集无线网络中电池容量受限的节点功率分配问题和最优传输策略得到了广泛的研究, 取得了一定的研究成果<sup>[5]</sup>。

文献[6]考虑了具有有限容量电池的发射机的

情况, 证明了传输时间最小化问题等价于吞吐量最大化问题, 研究了可充电节点的传输策略, 给出了解决有限的时间范围内传输的数据量最大化问题和给定数据量的传输完成时间最小化问题的2个最优解决方案。文献[7]研究了利用具有受限容量电池的能量收集发射机在无线衰落信道中进行通信来优化点对点数据传输, 提出了最优离线和在线策略。其中, 最优离线策略证明了对于吞吐量最大化问题, 可利用自适应定向注水算法与吞吐量最大化对应的等价性来解决传输时间最小化问题; 最优在线策略在随机衰落和能量到达的过程中, 可根据信道状态反馈, 使用随机动态规划方法最大化在截止期限传送的数据平均值。

文献[8-9]分别考虑在双用户加性白高斯噪声(AWGN, additive white gaussian noise)广播信道和多用户AWGN广播信道中使用有限容量电池的能量收集发射机的最小传输完成时间。鉴于能量的收集是在随机时刻到达发射机的, 且发射机的电池容量有限使溢出的能量不能用于数据的传输, 作者使用双重问题分析最优传输策略的结构特性, 通过定向注水算法求解最优总发射功率序列, 然后通过截止功率电平分析分配功率。

文献[10]证明了在系统中引入半双工放大和转发中继节点将导致凸优化问题, 提出了以最大化吞吐量为目标的最优分配策略, 通过将问题表述为2个凹函数之间的差异, 把问题放大到具有线性目标函数的图问题来降低边界计算的复杂度。文献[11]研究了能量收集中继节点电池容量有限通信网络中端到端系统吞吐量最大化问题, 提出了在离线优化框架下求解最优离线时间调度和功率分配传输策略, 将吞吐量最大化问题表示为在线优化框架下的随机动态规划问题, 并基于能量到达和信道状态的随机知识, 通过求解一系列凸优化问题获得最优的在线时间调度和功率分配。文献[12]考虑了具有有限电池容量和衰落信道的单个发射器的点对点无线通信系统, 引入了能量中断概率的概念, 设计了一种封闭形式的最优功率分配方案, 解决了在线能量收集约束的速率最大化问题。

以上文献重点考虑了能量收集技术, 提出了一些有效的离线或在线的功率分配传输策略。但是, 由于能量收集存在不稳定性 and 随机性, 因此不同节点收集到的能量可能存在很大的差异, 有些能量收集节点可能会由于收集能量过少造成数据的丢失

或传输中断。另外,收集能量的随机性、可用性对确定最优传输策略提出了很大的挑战,尤其是网络的中心节点由于能量收集条件而变得能量不足,将会影响整个网络的性能。为解决这个问题,研究者提出了无线能量协作的概念,节点在传输数据的同时将其收集能量的一部分无线传输给另一个能量收集节点,这使能量接收节点处能量到达的形成和优化成为可能。尽管能量转移会损失少量的能量,但是可以改善系统的整体性能。

按照能量转移的方向,可将能量协作无线网络最优传输策略分为单向能量协作和双向能量协作。单向能量协作是指能量收集节点可接收来自其他节点的能量用于数据协作数据传输,但不能向其他能量收集节点转移能量。双向能量转移是指能量收集节点既可以接收其他能量收集节点转移的能量,也可以向其他节点转移能量用于协作传输数据。

在单向能量协作系统最优策略研究方面,文献[13-14]考虑了几种具有能量收集和无线能量转移能力的基本多用户网络结构:中继信道、双向通信信道和多址接入信道,确定了能量管理策略,并使用拉格朗日公式和产生的 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 最优条件,在给定的持续时间内最大化系统的吞吐量。文献[15]通过能量协作研究每个节点的最优能量管理问题以及节点之间的最优能量路由,提出了一种迭代算法来确定网络中的最优能量路径。文献[16]对于固定的数据和能量路由拓扑,根据流量和能量守恒约束确定最优数据速率、传输功率和能量转移,以解决能量收集通信网络中的时延最小化问题。文献[17]研究了由源节点、中继节点和目的节点组成的三节点中继网络的数据协作和能量协作的权衡问题,并在数据协作场景中使用现有的优化方案来优化系统性能。文献[18]考虑了中继多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 高斯菱形信道,确定了在多跳多址解码转发协议的多址状态下每个中继要使用的传输协方差矩阵。文献[19]研究了节点配备无限容量电池的情形下,基于能量收集的高斯菱形信道模型的功率和速率分配问题。文献[20]考虑了基于能量收集和双向能量协作的菱形信道通信系统,其中假设源节点和中继节点都是从环境中收集能量,然后存储在相应的容量不受限制的电池中,并在此条件下提出了一种实现系统端到端的吞吐量最大化的功率分配和能量转移策略。

经过研究分析发现,尽管单向能量协作系统在一定程度上可以提高系统端到端吞吐量,但也存在一些不足。例如,如果系统中能量收集的节点比较少,那么不同时间收集的能量在数量上可能是不同的。此时,可以通过双向能量协作的方式来实现节点间能量的相互转移和补给<sup>[20]</sup>。

在双向能量协作系统最优策略研究方面,文献[21]考虑了具有能量收集发射机节点的多终端网络,提出了双向、两跳和多址接入信道的联合最优传输功率和能量转移策略,以最大化总吞吐量。文献[22]考虑了一种点对点的无线通信系统,提出了一种基于能量协作的先节能后发射方案,通过最小化中断概率实现能量协作功率的优化。文献[23]研究了对称双用户高斯干扰信道,通过证明平均速率区域上的每个拐角点都是以适当的功率分配约束的总和速率,提出了 2 个发射机之间的能量协作和功率分配的最优策略,以求取平均速率区域的边界点。文献[24]推导了有能量收集发射机的多用户多址接入信道 (MAC, multiple access channel) 的容量区域,并说明了每个用户可使用能量缓冲存储和调度随机到达的能量,还可以通过向其他用户转移能量或从它们接收能量来进行能量协作。文献[25]考虑了具有能量收集发射机的双用户协作多址接入信道,提出了在有限电池容量和能量存储损失下解决发射域最大化问题的技术方案,分析了时延约束和时延容忍协作场景下最优传输功率和速率分配对电池限制和存储低效率的依赖性。文献[26]研究具有无线信息和功率传输能力的两跳中继网络中的中继选择问题,提出了基于时间切换 (TS, time splitting) 的无线携能通信优化方案和基于功率分裂 (PS, power splitting) 的无线携能通信优化方案,以实现用户的总收获功率最大化。

由于源节点能量是从环境中收集的,而存储能量的电池容量有限,因此可能导致能量溢出,而含有能量溢出的策略都不是最优的,因此需要添加限制能量溢出的条件。对于两跳的通信网络,需要协调源节点和中继节点数据的传输,涉及的约束条件比较多,难以求解。目前的研究还没有很好地考虑上述的因素并有效地解决这些问题。

为此,本文在文献[19]的基础上,结合实际生活中电池容量都是有限的状况,研究基于能量收集和双向能量协作的高斯菱形信道通信网络系统。其中,系统中的源节点和中继节点从环境中收集能

量，然后将收集的能量存储在相应的电池中，源节点的电池容量有限，中继节点的电池容量不受限制。在数据和能量条件约束下，提出一种实现端到端吞吐量最大化的功率和速率分配策略，通过构建系统吞吐量优化模型，求解信道的最优离线传输功率和速率分配，解决最大化端到端吞吐量问题。

### 3 系统模型

本文考虑如图 1 所示的源节点电池容量受限的能量收集菱形信道的系统模型。其中，源节点 S 与中继节点 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 均从环境中收集能量。假设源节点 S 的电池容量有限，其所能存储的最大容量用 E<sub>max</sub> 表示。假设 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 的电池容量为无穷大<sup>[19-20]</sup>且与源节点 S 之间无能量传输。目标节点 D 通过接收来自 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 转发的信息，以实现对于源节点发送信息的接收与解码。系统以时隙作为最小传输时间单位，一个传输周期包含多个等长的时隙。在时隙 i 中，源节点总传输功率用 P<sub>s,i</sub> 表示，R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 收集的总能量分别用 E<sub>1,i</sub> 和 E<sub>2,i</sub> 表示，R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 到目的节点的传输功率分别用  $\bar{P}_{1,i}$  和  $\bar{P}_{2,i}$  表示，源节点到 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 的传输速率分别用 r<sub>1,i</sub> 和 r<sub>2,i</sub> 表示，R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 到目的节点的传输速率分别用  $\bar{r}_{1,i}$  和  $\bar{r}_{2,i}$  表示。源节点总传输功率为 P<sub>s</sub>，R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 到目的节点的传输功率分别用  $\bar{P}_1$  和  $\bar{P}_2$  表示，源节点到 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 的传输速率分别用 r<sub>1</sub> 和 r<sub>2</sub> 表示，R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 到目的节点的传输速率分别用  $\bar{r}_1$  和  $\bar{r}_2$  表示。功率和速率的矢量序列为 P<sub>s</sub>,  $\bar{P}_1$ ,  $\bar{P}_2$ , r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>,  $\bar{r}_1$ ,  $\bar{r}_2$ 。

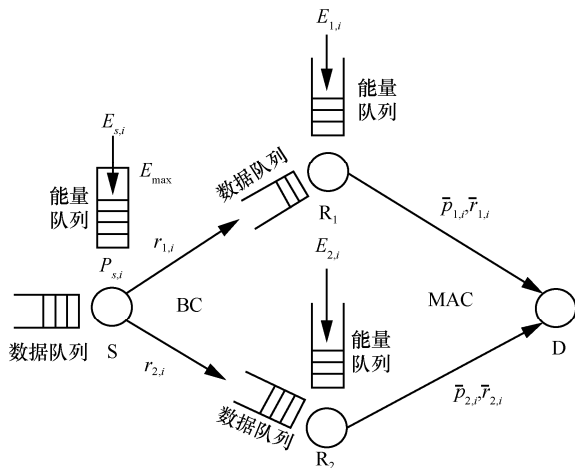


图 1 源节点电池容量受限的能量收集菱形信道系统模型

在模型中，源节点和中继节点将收集的能量存储在相应的电池中。假设中继节点 R<sub>1</sub> 是更强的数据信息接收者，信道噪声的方差为  $\sigma_1^2 \leq \sigma_2^2$ ，具有传

输功率 P 的高斯广播信道容量分区为

$$C_{BC}(P) = \left\{ r_1 \leq f\left(\frac{\alpha P}{\sigma_1^2}\right), r_2 \leq f\left(\frac{(1-\alpha)P}{\alpha P + \sigma_2^2}\right) \right\} \quad (1)$$

其中，C<sub>BC</sub>(P) 是传输功率为 P 的信道容量，BC 是广播信道，α 是用于中继节点 1 传输数据的功率分数， $f(x) \triangleq \frac{1}{2} \log(1+x)$ 。

两用户广播信道容量区域的关系如图 2 所示，其中横坐标表示源节点 S 至中继节点 R<sub>1</sub> 的信道容量 C<sub>1</sub>，纵坐标表示源节点 S 至中继节点 R<sub>2</sub> 的信道容量 C<sub>2</sub>。图 2 说明了 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的关系。

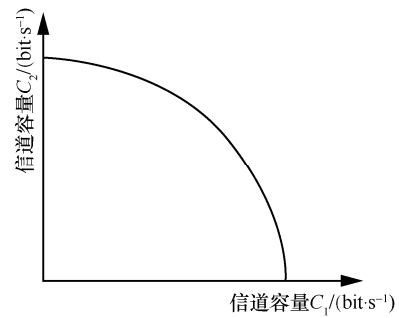


图 2 两用户广播信道容量区域的关系

定义函数 g(r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>) 是以速率 (r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>) 传输所需的最小能量<sup>[19]</sup>，其物理含义是中继节点 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 分别以速率 r<sub>1</sub> 和 r<sub>2</sub> 工作时所消耗的单位能量（即功率）之和。在本文的系统模型中，将时段进行了单位化处理，因此单位时段内的能量即等价于功率。g(r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>)<sup>[19]</sup> 可表示为

$$g(r_1, r_2) \triangleq \sigma_1^2 2^{2(r_1+r_2)} + (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) 2^{2r_1} - \sigma_2^2 \quad (2)$$

其中，σ<sub>1</sub><sup>2</sup> 和 σ<sub>2</sub><sup>2</sup> 是中继节点 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 的分布方差。显然，g(r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>) 是一个严格凸函数。

由于 R<sub>1</sub> 相对于 R<sub>2</sub> 是衰减的，因此 R<sub>2</sub> 可以解码 R<sub>1</sub> 的消息，因此第二跳是具有公共数据的扩展多址接入信道。具有传输节点功率 ( $\bar{P}_1, \bar{P}_2$ ) 的扩展多址接入信道的容量分区和高斯噪声功率 σ<sub>3</sub><sup>2</sup> 的关系为

$$C_{EMAC}(\bar{P}_1, \bar{P}_2) = \left\{ \bar{r}_1 \leq f\left(\frac{(1-\beta)\bar{P}_1}{\sigma_3^2}\right), \bar{r}_1 + \bar{r}_2 \leq f\left(\frac{\bar{P}_1 + \bar{P}_2 + 2\sqrt{\beta\bar{P}_1\bar{P}_2}}{\sigma_3^2}\right) \right\} \quad (3)$$

其中，C<sub>EMAC</sub>( $\bar{P}_1, \bar{P}_2$ ) 是传输功率为  $\bar{P}_1, \bar{P}_2$  的信道容量，EMAC 是扩展多址接入信道，β 是用于 R<sub>1</sub> 衰

減的传输数据功率分数,  $f(x) \triangleq \frac{1}{2} \log(1+x)$ 。

本文研究具有  $N$  个等长时隙的信道, 并假设每个时隙的长度为  $1$  s, 解决问题的目标是在一定的时间内传输的数据量最多, 即使端到端的吞吐量最大化。假设传输节点可根据到达的能量和数据量自适应地改变传输功率和传输速率, 那么源节点  $S$  满足能量的因果约束关系, 即在前  $n$  个时隙未到达的能量不能使用。因为源节点的电池容量有限, 如果在第  $n$  个时隙, 收集到的能量除了消耗的能量外剩余的能量大于  $E_{\max}$ , 那么就会产生溢出, 最后只有  $E_{\max}$  的能量留在电池中。由于溢出的能量不能用来传输数据, 因此凡是有能量溢出的策略都不是最优的。研究表明<sup>[19]</sup>, 在每条传输链路上消耗的功率部分取决于中继的能量到达, 对于一个同时具有数据和能量到达的多址信道, 只能用数据传输速率来描述。为此, 本文系统将时段进行了单位化处理, 使当前单位时段中消耗掉的能量在数值上可用该时段中的数据传输速率来描述。由于传输功率通过消耗能量获得, 因此根据能量的因果约束关系, 对于求解的问题, 需要满足

$$\sum_{i=1}^n P_{s,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{s,i}, \quad \forall n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n E_{s,i} - E_{\max} \leq \sum_{i=1}^n P_{s,i}, \quad \forall n \quad (5)$$

本文用图 3 来清晰地表示以上 2 个表达式的含义。图 3 中的横坐标表示时隙, 即系统运行时段中均匀分割成的诸多连续周期; 纵坐标表示源节点  $S$  的能量消耗。图 3 说明了能量总消耗曲线在任意时隙都不能超过能量收集曲线。为了防止由于溢出造成的能量损失, 收集的能量减去消耗的能量后得到的剩余能量在任意时隙都不能超过电池的最大容量。

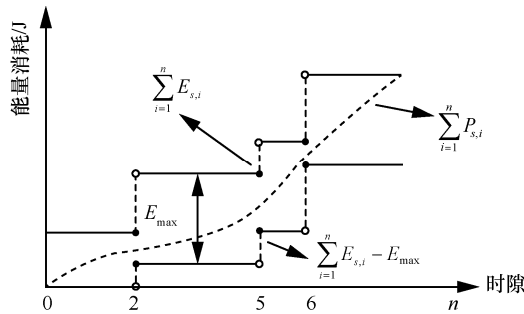


图 3 源节点满足能量因果约束关系且无能量溢出的能耗

中继节点  $R_1$  和  $R_2$  还应满足能量和数据的因果关系约束, 即在前  $n$  个时隙未达到的数据不能转发, 未收集的能量不能够使用。约束条件为

$$\sum_{i=1}^n \bar{r}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{1,i}, \quad \forall n \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{r}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{2,i}, \quad \forall n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{1,i}, \quad \forall n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{2,i}, \quad \forall n \quad (9)$$

对于速率, 每个信道可用的约束条件为

$$(r_{1,i}, r_{2,i}) \in C_{BC}(P_{s,i}), \quad \forall i \quad (10)$$

$$(\bar{r}_{1,i}, \bar{r}_{2,i}) \in C_{EMAC}(\bar{P}_{1,i}, \bar{P}_{2,i}), \quad \forall i \quad (11)$$

综上所述, 系统中端到端的最大吞吐量就是本文要解决的优化问题, 可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{P_{s,i}, \bar{P}_{1,i}, \bar{P}_{2,i}, r_{1,i}, r_{2,i}, \bar{r}_{1,i}, \bar{r}_{2,i}} \quad & \sum_{i=1}^N \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \\ \text{s.t. 式(4)~式(11)} \quad & (P_s, \bar{P}_1, \bar{P}_2, r_1, r_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2) \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

#### 4 功率和速率分配策略

定义  $(B_1, B_2)$  分别为在任意固定时间  $T$ , 满足能量因果约束和源节点电池能量无溢出约束条件下  $R_1$  和  $R_2$  接收到的信息总比特数, 则  $B_1 = \sum_{i=0}^T r_1$ ,

$$B_2 = \sum_{i=0}^T r_2。D(T) \text{ 为最大分离域, 即 } R(B_1, B_2) = \{(b_1,$$

$b_2) : 0 \leq b_1 \leq B_1; 0 \leq b_2 \leq B_2\}$  的并集,  $r_{1,i}$  和  $r_{2,i}$  分别是源节点到中继节点  $R_1$  和  $R_2$  的传输速率。  $D(T)$  的计算式为

$$D(T) = \bigcup_{(r_{1,i}, r_{2,i})} R(B_1, B_2) \quad (13)$$

其中,  $(r_{1,i}, r_{2,i})$  满足以下能量因果和源节点能量无溢出约束条件

$$\sum_{i=1}^n g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq \sum_{i=0}^n E_{s,i}, \quad \forall n \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n E_{s,i} - \sum_{i=1}^n g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq E_{\max}, \quad \forall n \quad (15)$$

因为任何造成能量溢出的分离域策略都可由不允许能量溢出的策略代替, 所以最优策略必须满

足式(5)中能量不允许溢出的条件。因此，最优问题式(12)可转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{r}_{1,i}, \bar{r}_{2,i}, r_{1,i}, r_{2,i}, \bar{r}_{1,i}, \bar{r}_{2,i}} \sum_{i=1}^N \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \\ & \text{s.t. 式(6)~式(11), 式(14)~式(15), } (P_s, \bar{P}_1, \bar{P}_2, r_1, r_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2) \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

**定理 1** 存在一种最优总源功率序列  $g(r_{1,i}^*, r_{2,i}^*)$  与基于能量到达  $E_{s,i}$  的单用户传输序列相同。

**证明** 最优问题式(16)的 Lagrangian 函数为

$$\begin{aligned} L = & -\sum_{i=1}^N \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} + \sum_{n=1}^N \lambda_{1,n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{r}_{1,i} - \sum_{i=1}^n r_{1,i} \right) + \\ & \sum_{n=1}^N \lambda_{2,n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{r}_{2,i} - \sum_{i=1}^n r_{2,i} \right) + \sum_{n=1}^N \gamma_n \left( \sum_{i=1}^n g(r_{1,i}, r_{2,i}) - \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^n E_{s,i} \right) + \sum_{n=1}^N \eta_n \left( \sum_{i=1}^n E_{s,i} - \sum_{i=1}^n g(r_{1,i}, r_{2,i}) - E_{\max} \right) - \\ & \sum_{n=1}^N \theta_{1,n} r_{1,i} - \sum_{n=1}^N \theta_{2,n} r_{2,i} + \text{其他} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中包括了 Lagrange 乘数的其他约束条件，但是证明中并不需要，所以为简单起见，可以省略这些约束条件。于是，Lagrange 乘数的互补条件为

$$\lambda_{1,n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{r}_{1,i} - \sum_{i=1}^n r_{1,i} \right) = \lambda_{2,n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{r}_{2,i} - \sum_{i=1}^n r_{2,i} \right) = 0 \quad (18)$$

$$\gamma_n \left( \sum_{i=1}^n g(r_{1,i}, r_{2,i}) - \sum_{i=1}^n E_{s,i} \right) = 0 \quad (19)$$

$$\theta_{1,n} r_{1,i} = \theta_{2,n} r_{2,i} = 0, \quad \lambda_{1,n}, \lambda_{2,n}, \gamma_n, \eta_n \geq 0 \quad (20)$$

对  $L$  进行相对于  $r_{1,i}, r_{2,i}$  的求导，可得

$$-\sum_{n=i}^N \lambda_{1,n} + \left( \sum_{n=i}^N \gamma_n - \sum_{n=i}^N \eta_n \right) \sigma_1^2 2^{2(r_{1,i} + r_{2,i})} - \theta_{1,n} = 0 \quad (21)$$

$$-\sum_{n=i}^N \lambda_{2,n} + \left( \sum_{n=i}^N \gamma_n - \sum_{n=i}^N \eta_n \right) (g(r_{1,i}, r_{2,i}) + \sigma_2^2) - \theta_{2,n} = 0 \quad (22)$$

由式(21)和式(22)，可得

$$g(r_{1,i}, r_{2,i}) = \frac{\theta_{2,n} + \sum_{n=1}^N \lambda_{2,n}}{\sum_{n=1}^N \gamma_n - \sum_{n=1}^N \eta_n} - \sigma_2^2 \quad (23)$$

$$2^{2(r_{1,i} + r_{2,i})} = \frac{\theta_{1,n} + \sum_{n=1}^N \lambda_{1,n}}{\sigma_1^2 \left( \sum_{n=i}^N \gamma_n - \sum_{n=i}^N \eta_n \right)} \quad (24)$$

由定理 1 可知，对于式(14)，存在一种解决方案，当  $g(r_{1,i}^*, r_{2,i}^*) = P_i$ ， $P_i$  是对于源节点能量到达为

$E_{s,i}$  的单用户最优传输功率，约束条件可以被放松为  $g(r_{1,i}^*, r_{2,i}^*) \leq P_i$ ，所以式(16)的最优问题可转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{r}_{1,i}, \bar{r}_{2,i}, r_{1,i}, r_{2,i}} \sum_{i=1}^T \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \\ & \text{s.t. 式(6)~式(11)} \\ & P_i - g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq E_{\max} \\ & g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq P_i, (P_s, \bar{P}_1, \bar{P}_2, r_1, r_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2) \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

证毕。

**引理 1**  $D(T)$  是一个凸区域。

**证明** 假设  $(B_1, B_2)$  和  $(B'_1, B'_2)$  是满足能量因果约束条件和源电池能量无溢出约束条件下，实现速率分配策略  $\{(r_{1,i}, r_{2,i})\}_{i=1}^n$  和  $\{(r'_{1,i}, r'_{2,i})\}_{i=1}^n$  中的 2 个点，即

$$(B_1, B_2) = \left( \sum_{i=1}^n r_{1,i}, \sum_{i=1}^n r_{2,i} \right) \quad (26)$$

$$(B'_1, B'_2) = \left( \sum_{i=1}^n r'_{1,i}, \sum_{i=1}^n r'_{2,i} \right) \quad (27)$$

下面需要证明的是，当  $\lambda' = 1 - \lambda$  时，存在一个速率分配策略实现  $(\lambda B_1 + \lambda' B'_1, \lambda B_2 + \lambda' B'_2)$ 。

由于  $g(r_1, r_2)$  是一个严格凸函数，则有

$$g(\lambda B_1 + \lambda' B'_1, \lambda B_2 + \lambda' B'_2) \leq \lambda g(r_{1,i}, r_{2,i}) + \lambda' g(r'_{1,i}, r'_{2,i}) \quad (28)$$

由于联合传输  $(B_1, B_2)$  和  $(B'_1, B'_2)$  比分别传输  $(B_1, B_2)$  和  $(B'_1, B'_2)$  需要更少的能量，因此速率分配  $\{\lambda B_1 + \lambda' B'_1, \lambda B_2 + \lambda' B'_2\}_{i=1}^n$  可能不满足式(14)中能量无溢出的条件，所以可以通过增加能量的消耗来提高源节点到中继节点的吞吐量得到一个满足能量无溢出和因果约束条件的速率分配策略。定义新的速率分配策略为  $\{(r''_{1,i}, r''_{2,i})\}$ ， $r''_{1,i} \geq \lambda B_{1,i} + \lambda' B'_{1,i}$ ， $r''_{2,i} \geq \lambda B_{2,i} + \lambda' B'_{2,i}$ ，则有

$$g(\lambda''_{1,i}, \lambda''_{2,i}) = \lambda g(r_{1,i}, r_{2,i}) + \lambda' g(r'_{1,i}, r'_{2,i}) \quad (29)$$

由于  $g(r_1, r_2)$  是严格单调并连续的点，因此一定存在最优的  $\{(r''_{1,i}, r''_{2,i})\}_{i=0}^n$ ，表示为  $(\bar{B}_1, \bar{B}_2)$ ，则

$$\bar{B}_1 \geq \lambda B_{1,i} + \lambda' B'_{1,i} \quad (30)$$

$$\bar{B}_2 \geq \lambda B_{2,i} + \lambda' B'_{2,i} \quad (31)$$

由于任何  $(B_1, B_2)$  和  $(B'_1, B'_2)$  的联合传输都可以被遵守能量因果约束和无能量溢出的策略实现，因此

可证明  $D(T)$  是凸函数。证毕。

最大分离域  $D(T)$  是一个凸区域的证明结果如图 4 所示, 其中, 横坐标表示中继节点  $R_1$  接收到的来自源节点的信息总比特数, 纵坐标表示中继节点  $R_2$  接收到的来自源节点的信息总比特数。

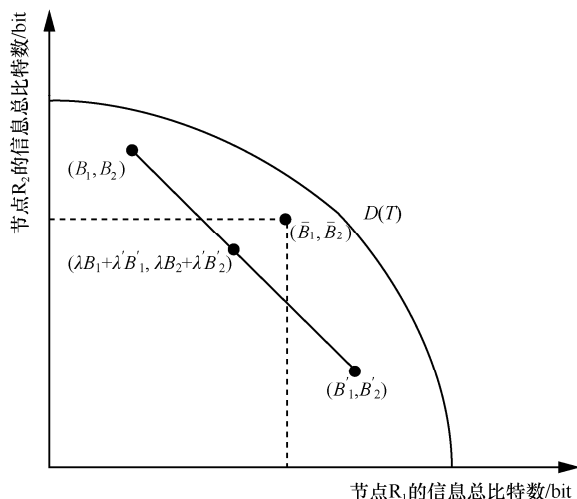


图 4 最大分离域  $D(T)$  是一个凸区域的证明结果

由于  $D(T)$  是凸区域, 因此存在一个正实矢量  $\mu \triangleq \{\mu_i\}_{i=1}^N$ ,  $\mu_i \in [0, 1]$ , 使  $g(r_{1,i}^*, r_{2,i}^*)$  可以将式(16)表示的最优化问题转化为

$$\begin{aligned} \max_{r_{1,i}, r_{2,i}} \sum_{i=1}^N \mu_i r_{1,i} + r_{2,i} \\ \text{s.t. } P_i - g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq E_{\max} \\ g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq P_i \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)的问题是具有线性目标函数的约束最大化问题。由于无能量溢出约束条件不等式的方向, 约束集是非凸的, 因此即使存在 2 个策略本身不会导致能量溢出, 但是它们的凸组合可能会导致能量的溢出, 所以原则上存在多个极值。假设实际上存在一个针对这个问题的唯一的全局最优解, 则可将可能的速率分配策略扩展到包含允许能量溢出的策略。于是, 式(32)的最优化问题式可以转化为

$$\begin{aligned} \max_{r_{1,i}, r_{2,i}} \sum_{i=1}^N \mu_i r_{1,i} + r_{2,i} \\ \text{s.t. } g(r_{1,i}, r_{2,i}) \leq P_i \end{aligned} \quad (33)$$

文献[6]已经证明传输时间最小化问题等价于吞吐量最大化问题, 因为利用最少的时间传输一定量的数据和在一定的时间内传输最多的数据在原

理上是一样的。文献[8-9]研究了单跳的广播信道在源节点电池有限条件下的最小传输完成时间问题, 研究表明, 无论  $\mu_i$  的值如何, 都可以通过定向注水算法找到唯一的总功率分配。本文同样采用定向注水算法计算各时隙中总传输功率  $P_{s,i}$  的值。

电池容量有限的两时间段的定向注水算法如图 5 所示。该算法基于水能类比, 每个时隙到达的能量首先分配给当前时隙, 如果当前时隙的功率水平大于下一个时隙的功率水平, 则将一些能量从当前时隙转移到下一个时隙(即能量从过去传递到未来以均衡功率水平)。由于能量的因果关系, 未到达的能量不可以使用, 因此能量不可以从右向左转移(即不可以从未来传递到过去)。由于存储收集能量的电池有限, 最大为  $E_{\max}$ , 因此当下一个时隙需要当前时隙传递能量时, 最多只能转移  $E_{\max} - E_i$ 。因为如果超过  $E_{\max} - E_i$ , 当前时隙的能量就会超过  $E_{\max}$  造成能量溢出。由于溢出的能量没有用于传输数据, 因此属于无意义的损耗, 当前策略就不是最优的策略。因此当右渗透阀门打开时, 最多只会有  $E_{\max} - E_i$  能量从当前时隙转移到下一个时隙。

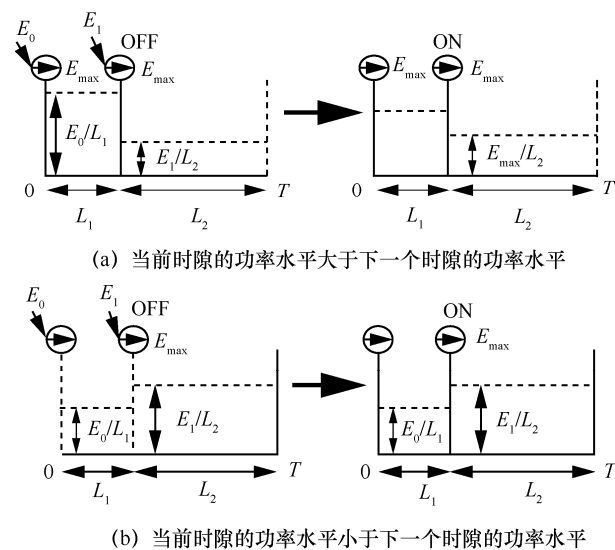


图 5 电池容量有限的两时间段右透水定向注水算法

利用定向注水算法求得各个时隙中总传输功率  $P_{s,i}$  后, 可通过式(34)定义一个常量功率水平  $P_{c,i}$ [9], 该值代表最优策略中较强的用户的截止功率水平。

$$P_{c,i} \triangleq \left( \frac{\mu_i \sigma_2^2 - \sigma_1^2}{1 - \mu_i} \right)^+ \quad (34)$$

其中,  $\mu_i \in [0, 1)$ 。

**引理 2**<sup>[8]</sup> 由  $\mu_i$  表示的  $D(T)$  的边界点  $(B_1, B_2)$  可以通过以下策略实现: 如果在一个时隙中的总传输功率  $P_{s,i}$  低于式(34)中的  $P_{c,i}$ , 只传输更强的节点数据, 否则, 2 个节点的数据都被传输, 更强节点的功率为  $P_{c,i}$ 。

由引理 2 可知, 最优策略情况下速率  $r_{1,i}^*$  和  $r_{2,i}^*$  的值分为以下 3 种情况。

$$1) \mu_i > \frac{P_{s,i} + \sigma_1^2}{P_{s,i} + \sigma_2^2}$$

由  $P_{s,i} < P_{c,i}$ ,  $P_{c,i} \triangleq \left( \frac{\mu_i \sigma_2^2 - \sigma_1^2}{1 - \mu_i} \right)^+$  代入可得

$$\mu_i > \frac{P_{s,i} + \sigma_1^2}{P_{s,i} + \sigma_2^2}。$$

此时只传输更强的节点数据。在系统模型中, 中继节点  $R_1$  被定义为更强的信息接收者, 所以只传输  $R_1$  的数据。由此可得

$$r_{1,i}^* = \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{P_{s,i}}{\sigma_1^2} \right) \quad (35)$$

$$r_{2,i}^* = 0 \quad (36)$$

$$2) \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq \mu_i < \frac{P_{s,i} + \sigma_1^2}{P_{s,i} + \sigma_2^2}$$

由  $P_{s,i} \geq P_{c,i}$ ,  $P_{c,i} \triangleq \left( \frac{\mu_i \sigma_2^2 - \sigma_1^2}{1 - \mu_i} \right)^+$  代入可得

$$\mu_i \leq \frac{P_{s,i} + \sigma_1^2}{P_{s,i} + \sigma_2^2}。$$

由于更强的接收节点的传输功率水平为  $P_{c,i}$ , 如果要求 2 个节点的数据都可以被传输, 则  $P_{c,i}$  必须大于 0, 即  $\frac{\mu_i \sigma_2^2 - \sigma_1^2}{1 - \mu_i} > 0$ ,  $\mu_i > \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$ 。

因为中继节点  $R_1$  被定义为更强的接收节点, 所以  $R_1$  的传输功率为  $P_{c,i}$ , 则中继节点  $R_2$  的传输功率为  $P_{s,i} - P_{c,i}$ 。由此可得

$$r_{1,i}^* = \frac{1}{2} \log(1 + P_{c,i}) \quad (37)$$

$$r_{2,i}^* = \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{(P_{s,i} - P_{c,i})^+}{P_{c,i} + \sigma_2^2} \right) \quad (38)$$

$$3) \mu_i \leq \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$$

如果只传输较弱的接收节点的数据, 则此时  $P_{c,i}$

必须小于或等于 0, 即  $\frac{\mu_i \sigma_2^2 - \sigma_1^2}{1 - \mu_i} \leq 0$ ,  $\mu_i \leq \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$ ,

此时中继节点  $R_1$  的传输功率小于或等于 0, 所以速率为 0。由此可得

$$r_{1,i}^* = 0 \quad (39)$$

$$r_{2,i}^* = \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{P_{s,i}}{\sigma_2^2} \right) \quad (40)$$

综上所述, 对于固定的时间  $T$ , 端到端吞吐量最大化条件下最优策略的总传输功率可以通过定向注水算法获得, 源节点到中继节点的传输速率取决于  $\mu_i$ , 对于不同的  $\mu_i$  最优策略的最大分离区域实现不同的边界点。换句话说, 给定  $(\mu_i, P_{s,i})$ , 速率对  $(r_{1,i}, r_{2,i})$  可以通过式(35)和式(36)或式(37)和式(38)或式(39)和式(40)获得  $r_{1,i}(\mu_i, P_{s,i})$  的唯一速率对, 表示为  $r_{2,i}(\mu_i, P_{s,i})$  和  $(\mu_i, P_{s,i})$ 。由此最优公式可以转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2} \sum_{i=1}^N \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^n \bar{r}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{1,i}(\mu_i, p_{s,i}), \quad \forall n \\ & \sum_{i=1}^n \bar{r}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{2,i}(\mu_i, p_{s,i}), \quad \forall n \\ & \text{式(8)~式(9), 式(11), } (\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2) \geq 0 \quad (41) \end{aligned}$$

因为此时中继节点  $R_2$  相对于中继节点  $R_1$  是衰减的,  $R_1$  可以解码  $R_2$  中的消息, 所以第二跳是具有公共数据的扩展多址接入信道。上述问题等价于基于数据到达的协作多址接入信道吞吐量最大化问题。定义新的变量  $\bar{P}_{11,i} = (1 - \beta_i) \bar{P}_{1,i}$  和  $\bar{P}_{21,i} = \beta_i \bar{P}_{1,i}$ , 则式(41)可转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{r}_1, \bar{r}_2} \sum_{i=1}^N \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^n \bar{r}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{1,i}(\mu_i, P_{s,i}), \sum_{i=1}^n \bar{r}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{2,i}(\mu_i, P_{s,i}) \\ & \bar{P}_{11,i} + \bar{P}_{21,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{1,i}, \sum_{i=1}^n \bar{P}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{2,i} \\ & \bar{r}_{1,i} \leq f \left( \frac{\bar{P}_{11,i}}{\sigma_3^2} \right) \\ & \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \leq f \left( \bar{P}_{11,i} + \bar{P}_{21,i} + \bar{P}_{2,i} + \frac{2\sqrt{\bar{P}_{21,i} \bar{P}_{2,i}}}{\sigma_3^2} \right) \quad (42) \end{aligned}$$

本文定义三元组  $P = (\bar{P}_{11}, \bar{P}_{21}, \bar{P}_2)$  和对于固定  $P$

基于  $(\bar{r}_1, \bar{r}_2)$  的函数  $y(P)$  为

$$\begin{aligned}
 y(P) &\triangleq \max_{(\bar{r}_1, \bar{r}_2)} \sum_{i=1}^N \bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \\
 \text{s.t. } &\sum_{i=1}^n \bar{r}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{1,i}(\mu_i, P_{s,i}), \sum_{i=1}^n \bar{r}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n r_{2,i}(\mu_i, P_{s,i}) \\
 &\bar{r}_{1,i} \leq f\left(\frac{\bar{P}_{11,i}}{\sigma_3^2}\right) \\
 &\bar{r}_{1,i} + \bar{r}_{2,i} \leq f\left(\bar{P}_{11,i} + \bar{P}_{21,i} + \bar{P}_{2,i} + \frac{2\sqrt{\bar{P}_{21,i}\bar{P}_{2,i}}}{\sigma_3^2}\right) \quad (43)
 \end{aligned}$$

对于固定的  $P$ , 式(43)是一个线性问题。

**引理 3**<sup>[19]</sup>  $y(P)$  是关于  $P$  的非递减的凹函数。

由引理 3 可知, 式(42)等价于

$$\begin{aligned}
 &\max_{\bar{P}_{11}, \bar{P}_{21}, \bar{P}_2} y(\bar{P}_{11}, \bar{P}_{21}, \bar{P}_2) \\
 \text{s.t. } &\bar{P}_{11,i} + \bar{P}_{21,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{1,i} \\
 &\sum_{i=1}^n \bar{P}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{2,i} \quad (44)
 \end{aligned}$$

由于约束条件是线性约束, 目标函数是凹函数, 因此式(44)是一个凸函数。由于目标函数不是严格递增的, 因此可能无法利用所有的可用能量。尤其是当中继节点收集的能量充足而源节点能量不足时, 可能会导致数据没有传输给中继节点, 使中继节点无法传输数据而不会消耗能量, 因此需要考虑当前时隙的能量多余问题。为此, 增加一个额外的第  $N+1$  个水槽存储多余的能量, 该水槽不计算在固定时隙内, 只相当于一个额外的能量容器。

基于以上考虑, 本文利用右透水水龙头来计算存储在电池中留给未来使用的能量, 并在时隙的最后使用额外的溢出水槽来计算未使用的剩余能量。为此, 为每个水龙头配置一个水表来测量通过它的能量, 如果需要更新能量分配时, 允许水龙头将能量回流, 但回流的能量不能超过从当前水龙头流出的能量。通过允许能量在各时隙间流动计算出最优的水位。

具体实现时, 首先在每个水槽中加入收集到的能量  $E_i$ , 并且关闭水龙头, 最后一个是一个空的溢出水槽。如果能量向未来水槽流动增加了式(44)中的目标函数值, 则允许能量向一个时隙水槽流动。同样, 如果能量向过去的水槽流动增加了式(44)中的目标函数值, 并且流动的能量不超过水表记录的流出的能量, 则允许能量向后流动。这样的计算调整是经过足够多次迭代更新才能完成的。由于迭代

会在保持可行性的同时单调增加目标函数的值, 且本文的问题是凸优化问题, 因此保证了本文算法将会收敛到最优解上。

通过上述迭代注水算法可以求解得到最优的  $(\bar{P}_{11,i}, \bar{P}_{21,i}, \bar{P}_{2,i})$ , 则最优的中继节点到目的节点的传输速率为

$$\begin{aligned}
 \bar{r}_{1,i} &= f\left(\frac{\bar{P}_{11,i}}{\sigma_3^2}\right) = \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{\bar{P}_{11,i}}{\sigma_3^2}\right) \\
 \bar{r}_{2,i} &= f\left(\bar{P}_{11,i} + \bar{P}_{21,i} + \bar{P}_{2,i} + \frac{2\sqrt{\bar{P}_{21,i}\bar{P}_{2,i}}}{\sigma_3^2}\right) - \bar{r}_{1,i} = \\
 &\frac{1}{2} \log\left(1 + \bar{P}_{11,i} + \bar{P}_{21,i} + \bar{P}_{2,i} + \frac{2\sqrt{\bar{P}_{21,i}\bar{P}_{2,i}}}{\sigma_3^2}\right) - \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{\bar{P}_{11,i}}{\sigma_3^2}\right) \quad (45)
 \end{aligned}$$

本文提出的基于吞吐量最大化的最优传输算法的核心伪代码如下。

**输入** 当前第  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) 个时隙起始时源节点  $S$ 、中继节点  $R_1$  和  $R_2$  收集到的能量  $E_{s,i}$ 、 $E_{1,i}$ 、 $E_{2,i}$

**输出** 第  $i$  个时隙中中继节点  $R_1$  和  $R_2$  的最优传输速率  $\bar{r}_{1,i}$  和  $\bar{r}_{2,i}$

**begin**

**初始化**  $C=0$ ,  $\text{sum}=0$ ,  $\gamma_{k,i}=0$ ,  $\delta_{k,i}=0$ ,  $E_{s,i}^0 = E_{s,i}$ ,  $E_{1,i}^0 = E_{1,i}$ ,  $E_{2,i}^0 = E_{2,i}$  ( $1 \leq i \leq N$ )

通过定向注水处理过程计算  $P_{s,i}$  的值;

根据式(34)计算  $P_{c,i}$  的值;

**switch** ( $\mu_i$ ):

**case**  $\mu_i > \frac{P_{s,i} + \sigma_1^2}{P_{s,i} + \sigma_2^2}$ : 根据式(35)和式(36)

计算  $r_{1,i}^*$  和  $r_{2,i}^*$  的值;

**case**  $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq \mu_i < \frac{P_{s,i} + \sigma_1^2}{P_{s,i} + \sigma_2^2}$ : 根据式(37)和式

(38)计算  $r_{1,i}^*$  和  $r_{2,i}^*$  的值;

**case**  $\mu_i \leq \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$ : 根据式(39)和式(40)计算

$r_{1,i}^*$  和  $r_{2,i}^*$  的值;

**do**

通过迭代注水算法计算问题(44)中的传输功率  $(\bar{P}_{11,i}, \bar{P}_{21,i}, \bar{P}_{2,i})$ ;

$C = \sum_{i=1}^L \left( \frac{1}{2} \log\left(1 + \bar{P}_{11,i}^0\right) + \frac{1}{2} \log\left(1 + \bar{P}_{21,i}^0 + \bar{P}_{2,i}^0\right) \right)$ ;

**if**  $C > \text{sum}$  **then**  $\text{sum}=C$ ;

while (  $C \geq \text{sum}$  );

根据式(45)计算  $\bar{r}_{1,i}$  和  $\bar{r}_{2,i}$  的值;

end

当算法根据  $\mu_i$  的值计算得到  $r_{1,i}^*$  和  $r_{2,i}^*$  后, 在 do 循环部分首先使用注水算法计算第 0 个水池的  $(\bar{P}_{11,i}^0, \bar{P}_{21,i}^0, \bar{P}_{2,i}^0)$ , 通过计算得到  $C$  的值; 然后判断  $C$  的值是否满足注水过程结束条件。如果  $C \geq \text{sum}$ , 说明不满足注水过程的停止条件, 则重复循环过程, 继续更新计算  $\bar{P}_{11,i}, \bar{P}_{21,i}, \bar{P}_{2,i}$  的值和  $C$  的值; 如果  $C < \text{sum}$ , 则结束循环, 停止注水过程, 并依据此时的  $\bar{P}_{11,i}, \bar{P}_{21,i}, \bar{P}_{2,i}$  的值计算得到最优的中继速率  $\bar{r}_{1,i}$  和  $\bar{r}_{2,i}$ 。

## 5 仿真实验结果及性能分析

实验是在 MATLAB 仿真环境下完成的。实验环境设置在一台 PC 机上, 操作系统为 Windows 10, CPU 为 Pentium4 3.0 GHz, 运行内存为 8 GB。运行环境为 VSCode, MATLAB 版本为 R2018b\_win64。仿真实验的目的是验证对于不同的时间  $T$ , 最大分离域都是凸的, 所以一定存在端到端吞吐量的最大值。

考虑源节点到中继节点的信道和中继节点到目的节点的信道都是加性白高斯噪声信道, 其带宽设置为  $W=1$  MHz, 噪声功率频谱密度为  $N_0=10^{-19}$  W。假设源节点与更强的中继节点间的路径损失是 100 dB, 源节点与较弱中继节点间的路径损失是 105 dB, 中继节点与目的节点间的路径损失为 130 dB。则有

$$r_1 = W \text{lb} \left( 1 + \frac{\alpha P h_1}{N_0 W} \right) = \text{lb} \left( 1 + \frac{\alpha P}{10^{-3}} \right)$$

$$r_2 = W \text{lb} \left( 1 + \frac{(1-\alpha) P h_2}{\alpha P h_2 + N_0 W} \right) = \text{lb} \left( 1 + \frac{(1-\alpha) P}{\alpha P + 10^{-2.5}} \right)$$

$$\bar{r}_1 = W \text{lb} \left( 1 + \frac{(1-\beta) \bar{P}_1 \bar{h}_1}{N_0 W} \right) = \text{lb} \left( 1 + (1-\beta) \bar{P}_1 \right)$$

$$\bar{r}_1 + \bar{r}_2 =$$

$$W \text{lb} \left[ 1 + (N_0 W)^{-1} \left( \bar{P}_1 \bar{h}_1 + \bar{P}_2 \bar{h}_2 + 2\sqrt{\beta \bar{P}_1 \bar{h}_1 \bar{P}_2 \bar{h}_2} \right) \right] =$$

$$\text{lb} \left( 1 + \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + 2\sqrt{\beta \bar{P}_1 \bar{P}_2} \right)$$

假设源节点电池容量最大值  $E_{\max}=10$  mJ。图 6 给出了  $T=9, 10, 12$  s 时菱形信道中多址信道侧  $D(T)$

的最大分离域, 其中,  $B_1^*$  表示中继节点  $R_1$  到目的节点的吞吐量,  $B_2^*$  表示中继节点  $R_2$  到目的节点的吞吐量。首先找到总功率序列, 然后通过改变截止功率水平  $P_{c,i}$  得到源节点到中继节点的传输数据的区域, 再根据数据量的到达迭代计算中继节点到目的节点的分离域。从图 6 中可以看出, 对于每个时间  $T$ , 最大分离域都是凸的, 所以一定存在端到端吞吐量的最大值。随着时间  $T$  的增加, 最大分离域单调递增, 即端到端的最大吞吐量单调递增。这就验证了本文所提出的传输策略的可行性。

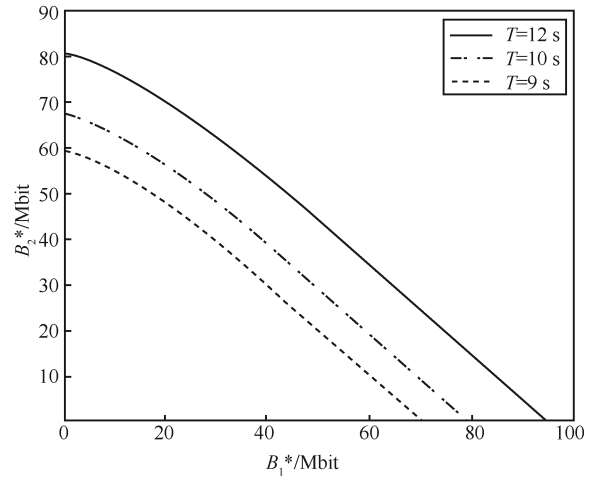


图 6 系统在不同固定时间的最大吞吐量

第二个实验是验证在相同时隙  $T=12$  s 时, 在源节点收集能量的最大值不断增大的条件下, 采用源节点电池容量不受限制的策略<sup>[19-20]</sup>、源节点电池容量受限但不允许能量溢出的策略、源节点电池容量受限但允许能量溢出策略这 3 种策略时, 菱形信道端到端吞吐量的变化情况。实验中, 假设源节点电池容量最大值  $PE_{\max}=10$  mJ, 取一个固定的截止功率电平  $P_{c,i}$ , 且假设中继节点收集的能量足够多, 中继节点都能够同一时隙把源节点传输过来的数据转发给目的节点。图 7 给出了实验的结果, 其中, 横坐标表示源节点能量收集的最大值, 纵坐标表示系统中端到端的吞吐量。

从图 7 可以看出, 在固定的时间内, 3 种传输方案的吞吐量都会随着源节点能量收集的最大值而增加。当源节点收集能量的最大值较小时, 不用考虑能量的溢出, 所以 3 种传输方案的端到端的最大吞吐量相同。随着源节点能量收集最大值的增大, 源节点电池容量不受限制的策略的吞吐量会不断地增大, 直到数据量的到达趋于平稳, 说明这种

策略的最大吞吐量优于源节点电池受限的传输策略。这是因为没有能量的溢出，传输节点就能将更多的能量存储起来用于传输数据；对于电池容量受限的 2 种策略来说，能量限制的传输节点当收集的能量足够多时，没有数据的到达，将导致能量直接溢出，使一部分能量没有用于数据的传输，所以吞吐量要较小一些。在电池容量受限条件下，不允许能量溢出策略的吞吐量要大于允许能量溢出策略的吞吐量。这是因为随着源节点能量收集最大值的增加，能量受限的策略会在当前时隙传输更多的数据，分享给未来时隙的能量最多不能超过电池最大容量减去未来时隙收集的能量。但是，如果收集的能量足够多，且没有数据到达，未来时隙收集的能量将达到最大，且会造成能量的溢出。在这种情况下，吞吐量将根据数据量的到达趋于平稳。允许能量溢出的策略在转移能量给未来时隙时没有考虑电池的容量。为了使吞吐量最大化，如果当前时隙收集的能量多于未来时隙收集的能量，允许能量溢出的策略就会将能量流向未来时隙，直至能量水平相同，这样就会导致未来时隙能量的溢出。当能量收集的足够多，而数据未到达时，当前时隙和未来时隙都会溢出。但是当能量收集较少时不用考虑能量的溢出，3 种策略的吞吐量是相同的。当能量收集较多，使数据到达时都能有足够的能量用于传输，则 3 种策略的吞吐量也是相同的。

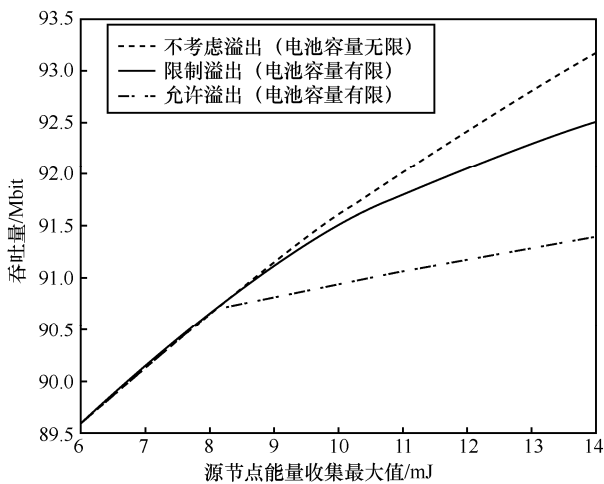


图 7 菱形系统在固定时间传输策略比较

基于上述算法的有效性验证，下面 2 个实验将对如下 4 种策略进行实验对比，进一步验证本文最优化传输策略在系统吞吐量提升方面的性能。

策略 1 是本文提出的最优传输策略，且源节点电池容量受限，即  $PE_{max}=10 \text{ mJ}$ ，时隙  $T=10 \text{ s}$ 。

策略 2 是文献[19]提出的基于对偶分解法的菱形信道传输方案，其中假设源节点与中继节点的电池容量无穷大，且节点间无能量传输。

策略 3 是文献[20]提出的基于注水算法的菱形信道传输策略，其中假设源节点与中继节点的电池容量无穷大且源节点与中继节点间存在双向的能量传输。

策略 4 是将菱形信道的双中继视为多中继选择方案，即采用文献[26]提出的中继选择策略，且将其无线携能通信中的功率切割比设置为 1，即无线携能通信过程全部传输的是数据，无能量传输，中继节点的能量收集与策略 1 中的收集过程相同。

图 8 给出了 4 种策略下，1 000 次能量收集过程所实现的吞吐量累计分布函数（CDF, cumulative distribution function），假设此时源节点电池容量为 10 mJ。CDF 用于描述不同策略下能实现的系统最大吞吐量的概率分布。

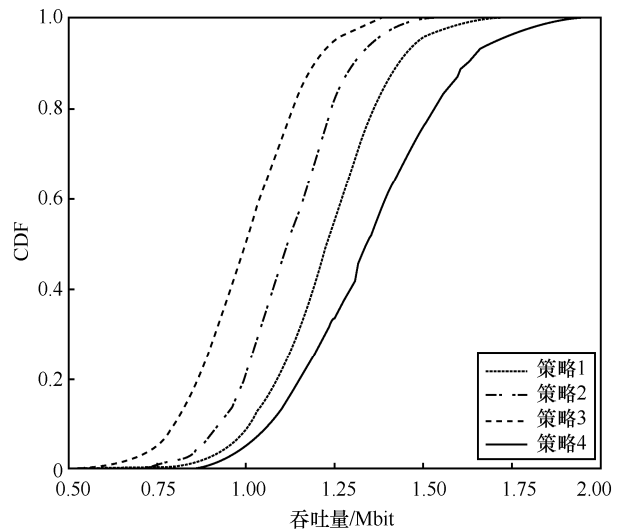


图 8 4 种策略所实现的吞吐量的 CDF

从图 8 中可以看出，策略 3 相较于其他策略能够实现最大的吞吐量，这是由于其他节点均假设了电池容量无穷大继而放松了能量溢出约束，同时节点间的能量传输实现了理想情况下的能量均衡。策略 1 优于策略 4 的原因在于本文所设计的菱形信道通信策略能够实现较传统的最优中继选择更好的系统增益。策略 1 实现的吞吐量低于策略 2 的原因在于本文所构建模型更接近真实情况，即节点的有限容量电池增加了系统模型的最大能量收集约

束, 从而降低了系统规划的自由度。

图9是策略1和策略4在不同源节点收集能量最大值下所实现的吞吐量对比, 由于策略2和策略3的电池容量无穷大, 因此图9中不考虑这两种情形。从图9的实验对比结果来看, 策略1和策略4在源节点收集能量最大值较小的情况下所实现的吞吐量相差不大。随着源节点收集能量最大值的增加, 策略4很快出现系统吞吐量饱和的情况, 这是由于策略4受限于所选择的最优中继方式, 无法实现策略1所选择的中继协作方式达到的吞吐量不断增加的效果。这说明策略1在一定程度上能突破单一中继的约束, 提升源节点的能量利用率。

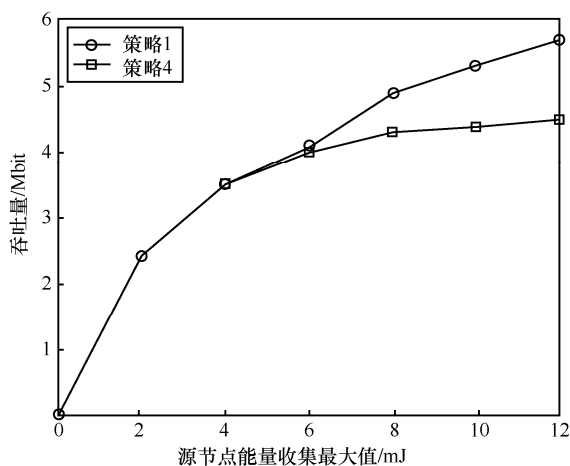


图9 策略1和策略4在不同源节点收集能量最大值下所实现的吞吐量对比

综合分析上述实验结果可以看出, 与文献[19-20]中节点配备无限容量电池情形下的菱形信道模型相比, 本文提出的基于电池容量受限的菱形信道模型下的传输策略虽然网络吞吐量有所降低, 但本文的场景更接近实际情况, 因而本文的传输策略更具有实际价值。与文献[26]中最优中继选择策略相比, 本文的传输策略能够突破单一中继的系统性能约束, 实现更高的系统吞吐量和能量利用率。在电池容量受限的情况下, 本文所述的菱形信道模型传输策略在一定程度上通过多中继之间的协作提升了系统性能, 与传统的点对点模型相比, 网络的吞吐量有较明显的提升。

## 6 结束语

本文研究源节点电池容量有限条件下, 基于能量收集菱形信道通信系统的最优传输问题。假设源节点传输给目的节点的数据是提前准备好的, 并且

已知能量到达的时间和数量, 提出一种最优的传输功率和速率的策略, 使在固定的时间内传输的数据量最大。针对两跳的菱形信道通信网络中存在的需要协调源节点和中继节点数据的传输、约束条件比较多、比较难求解等问题, 将最优传输问题转化为求解左侧广播信道的最优传输问题, 通过定向注水算法求解源节点到中继节点的最优总传输功率; 然后根据凸优化问题分析求解源节点到中继节点的最优传输速率, 并根据中继节点数据到达迭代中继节点的电池能量求解中继节点到目的节点最优传输功率; 最后, 通过扩展多址接入信道最优速率满足条件求解最优速率。仿真实验结果表明, 本文所提出的策略和相应的算法是可行和正确的。

需要指出的是, 本文研究的系统中的节点都是在离线状态下, 假设能量收集和数据到达都是可以提前预知的, 但在实际的系统中, 节点收集到的能量都是随机的, 数据也是随机到达的。所以, 本文的研究还存在着一定的局限性。下一步的工作将研究在线状态下的基于能量收集和能量协作的双中继通信网络的最优功率分配和能量转移策略, 使之能够根据实际情况来确定收集到的能量和需要传输的数据, 采取优化的传输策略有效地实现吞吐量最大化。

## 参考文献:

- [1] PRASAD R V, DEVAENAPATHY S, RAO V S, et al. Reincarnation in the ambiance: devices and networks with energy harvesting[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 195-213.
- [2] SUDEVALAYAM S, KULKARNI P. Energy harvesting sensor nodes: survey and implications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 443-461.
- [3] SIRDESHPANDE N, UDUPI V. Data delivery scheme using RF-energy harvesting for wireless sensor networks[C]//International Conference on Circuits, Communication, Control and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2014: 285-290.
- [4] 王哲, 李陶深, 叶进, 等. 基于不确定理论的能量收集可靠性建模及规划[J]. 通信学报, 2018, 39(5): 166-176.  
WANG Z, LI T S, YE J, et al. Reliability modeling and planning of energy harvesting based on uncertainty theory[J]. Journal on Communications, 2018, 39(5): 166-176.
- [5] 王哲, 李陶深, 叶进, 等. 能量收集网络技术研究与发展[J]. 广西科学, 2019, 26(3): 253-266, 355.  
WANG Z, LI T S, YE J, et al. Energy harvesting networks: a review of recent advances[J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(3): 253-266, 355.
- [6] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189.
- [7] 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.
- [8] OZEL O, YANG J, ULUKUS S. Broadcasting with a battery limited energy harvesting rechargeable transmitter[C]//2011 International Symposium of Modeling and Optimization of Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Piscataway: IEEE Press, 2011: 205-212.
- [9] OZEL O, YANG J, ULUKUS S. Optimal broadcast scheduling for an energy harvesting rechargeable transmitter with a finite capacity battery[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(6): 2193-2203.
- [10] ORHAN O, ERKIP E. Optimal transmission policies for energy harvesting two-hop networks[C]//2012 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [11] QIAN L P, FENG G N, LEUNG V C M. Optimal transmission policies for relay communication networks with ambient energy harvesting relays[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3754-3768.
- [12] SHAFIEIRAD H, ADVE R S, SHAHBAZPANAHI S. Throughput maximization with an energy outage constraint for energy harvesting links[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [13] GURAKAN B, OZEL O, YANG J, et al. Energy cooperation in energy harvesting communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(12): 4884-4898.
- [14] GURAKAN B, OZEL O, YANG J, et al. Energy cooperation in energy harvesting two-way communications[C]//2013 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 3126-3130.
- [15] GURAKAN B, OZEL O, ULUKUS S. Optimal energy routing in networks with energy cooperation[C]//2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1683-1687.
- [16] GURAKAN B, OZEL O, ULUKUS S. Optimal energy and data routing in networks with energy cooperation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(2): 857-870.
- [17] AMMAR A, REYNOLDS D. Energy harvesting networks: energy versus data cooperation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(10): 2128-2131.
- [18] MAMPILLY A V, BHASHYAM S. On the capacity of the half-duplex MIMO Gaussian diamond channel[C]//2016 International Symposium on Information Theory and Its Applications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 728-732.
- [19] GURAKAN B, ULUKUS S. Cooperative diamond channel with energy harvesting nodes[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(5): 1604-1617.
- [20] 孙莉, 李陶深, 王哲. 能量收集和能量协作菱形信道的功率分配策略[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(3): 569-574.
- SUN L, LI T S, WANG Z. Power allocation strategy for energy harvesting and energy cooperation diamond channels[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(3): 569-574.
- [21] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Energy harvesting networks with energy cooperation: procrastinating policies[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(11): 4525-4538.
- [22] NI W H, DONG X D. Energy harvesting wireless communications with energy cooperation between transmitter and receiver[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(4): 1457-1469.
- [23] SHIN D K, CHOI W, KIM D I. The two-user Gaussian interference channel with energy harvesting transmitters: energy cooperation and achievable rate region[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(11): 4551-4564.
- [24] DONG Y Q, CHEN Z C, FAN P Y. Capacity region of Gaussian multiple-access channels with energy harvesting and energy cooperation[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 1570-1578.
- [25] SU N M, KAYA O, KOCA M. Energy harvesting cooperative multiple access under energy storage losses[C]//2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [26] GAUTAM S, LAGUNAS E, SHARMA S K, et al. Relay selection strategies for SWIPT-enabled cooperative wireless systems[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.

## [作者简介]



李陶深 (1957- ), 男, 广西南宁人, 博士, 广西大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络、云计算与大数据、网络与信息安全等。



孙莉 (1992- ), 女, 河南商丘人, 广西大学硕士生, 主要研究方向为能量收集无线网络。



王哲 (1991- ), 男, 河南南阳人, 博士, 广西民族大学讲师, 主要研究方向为能量收集无线网络、边缘计算。