DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.221206004

# 基于射频能量收集的无线中继网络资源分配\*

## 钮金鑫

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:针对现有射频能量收集网络资源分配研究局限于单个数据源场景,无法适配于多数据源网络的问题,提出了一种适用于多数据源场景的射频能量收集中继网络传输协议框架,在该框架内节点可作为源节点或中继节点传输自身数据或转发数据,并在其他节点的数据传输过程中完成射频能量收集。以协议框架为基础,分别以系统吞吐量及用户公平性为优化目标设计两种资源分配方案。 仿真表明,两种方案可有效改善网络吞吐量及资源分配公平性。

关键词:无线中继网络;资源分配;射频能量收集

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TN925 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)01-0098-08

# Resource Allocation in RF Energy Harvesting Based Wireless Relay Networks

## NIU Jinxin

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract**: The majority researches on resource allocation in radio frequency (RF) energy harvesting networks are limited in single data source scenarios, which are not suitable for multiple data sources networks. To solve this problem, a resource allocation framework is proposed for multiple data sources in RF energy harvesting based wireless relay networks. By using this framework, each node can transmit data as source or relay node, and get energy from the transmission of other nodes. Based on this resource allocation framework, two schemes are designed with system throughput and user fairness as optimization objectives respectively. Simulation shows the proposed schemes can effectively improve network throughput and resource allocation fairness.

Key words: wireless relay networks; resource allocation; RF energy harvesting

## 0 引 言

射频能量收集是指节点可将无线空间中传输的 部分射频信号转化为能量,从而提升节点续航时间 及网络工作时间,改善网络吞吐量。射频能量收集 技术已成为下一代无线通信系统的重要技术 之一<sup>[1-2]</sup>。

现有关于射频能量收集网络传输技术的研究

中,大部分集中于如何利用射频能量收集提升网络 传输性能。其中,文献[3]提出了 TSR(Time Switching based Relaying)协议与 PSR(Power Splitting based Relaying)协议,两类协议分别利用部 分时间资源和功率资源通过放大转发(Amplify and Forward,AF)技术实现了射频能量收集网络中数据 传输过程与能量收集过程的资源调度。以文献[3]

收稿日期:2022-12-06;修回日期:2023-01-17
 基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1511800)
 通信作者:钮金鑫 Email:njx\_666@ 126. com

为基础,文献[4]以网络吞吐量为优化目标,研究了 NOMA(Non-orthogonal Multiple Access)系统中 PSR 协议与波束形成因子的联合设计问题。文献[5]以 链路中断概率及吞吐量为优化目标,研究了 NOMA 系统中基于 TSR 协议的传输资源分配问题。文献 [6] 对比了 TSR 协议与 PSR 协议在 NOMA 系统下 的吞吐量、传输时延等性能。为考察采用射频能量 收集技术后通信链路在不同信道模型下的传输性 能,文献「7]分析了 TSR 协议在莱斯信道模型下的 链路中断概率,文献[8-9]分别在 Log-Normal 与 Nakagami-m 信道模型下分析了 TSR 协议与 PSR 协 议的链路中断概率。为分析除放大转发技术之外的 其他中继传输技术如何应用于射频能量收集网络, 文献 [10-11] 研究了采用解码转发 (Decode and Forward, DF) 技术后 TSR 协议与 PSR 协议的传输 性能。

上述研究仅考虑了源节点存在数据传输需求的 情况,然而实际通信网络中,中继节点也可利用射频 能量收集技术提升传输能力,尤其是在分布式组网 场景下,网络中各节点地位平等,每个节点均可作为 数据源节点产生业务数据。因此,多数据源场景下 如何在数据传输、数据转发、能量收集过程之间合理 地调度传输资源以提升网络整体传输性能值得深入 研究。

本文旨在研究多数据源场景下基于射频能量收 集技术的中继网络资源分配问题。其中,源节点与 中继节点地位平等,均具备数据传输需求;源节点与 中继节点采用放大转发技术完成数据中继,并在此 过程中收集射频能量用于后续数据传输。为保障系 统能够在数据传输、数据转发、能量收集过程之间为 各节点合理地分配传输资源,本文提出了一种适用 于多数据源场景的射频能量收集网络协作传输与能 量收集协议框架,并分别以系统吞吐量与用户公平 性为优化目标所提出的两种资源分配方案。仿真结 果表明,在该协议框架下,文中所提出的资源分配方 案可有效改善系统吞吐量及用户公平性。

#### 1 场景模型

考虑包含两对通信节点的场景,如图 1 所示。 其中, $s_1$ 和 $s_2$ 为源节点, $d_1$ 和 $d_2$ 分别为 $s_1$ 和 $s_2$ 对应 的目的节点。 $s_1$ 与 $s_2$ 除了采用直传方式将数据直 接传输至各自目的节点外,还可利用放大转发技术 通过协作方式完成数据传输。以 $s_1 \cong d_1$ 的数据传输过程为例, $s_1 向 d_1$  传输数据的过程中, $s_2$  接收到该数据, $s_2$  在随后的传输过程采用放大转发技术将收到的数据转发至 $d_1$ ; $d_1$  根据源节点 $s_1$  的直传数据与中继节点 $s_2$  的转发数据采用最大比合并技术<sup>[12]</sup>获得源节点 $s_1$  传输的原始数据。 $s_2 \cong d_2$  的协作数据传输与 $s_1 \cong d_1$  的传输过程相同。除采用协作传输方式外, $s_1$  与 $s_2$ 之间还可利用对方的数据传输过程完成射频能量收集。例如, $s_2$  为 $s_1$  向 $d_1$ 转发数据时, $s_1$ 利用该转发信号完成射频能量收集。尽管本文考虑的场景模型仅包含两对通信节点,但提出的传输协议框架及资源分配策略可按照相同的方法扩展至多对通信节点场景。



Fig. 1 Scenario illustration of double sources

# 2 射频能量收集及协作传输协议框架

本文提出的射频能量收集及协作传输协议框架 如图 2 所示。以时分多址接入为基础,节点 s1 与 s, 各占用一个数据帧用于发送自身数据或作为中继节 点转发对方数据,每个数据帧包含 N 个时隙。在  $s_1$  $和 s_2$ 的发送数据帧中, $n_1$ 和 $n_2$ 个时隙用于为对方 转发数据,N-n1和 N-n2个时隙用于传输自身数 据。在 $s_1$ 与 $s_2$ 传输自身数据的过程中, $s_2$ 与 $s_1$ 分 别在自身数据帧的前 n<sub>2</sub> 和 n<sub>1</sub> 个时隙接收对方数 据,在剩下的 N-n1-n, 个时隙中利用对方信号进行 射频能量收集。此外,在s1 与s2 转发对方数据的过 程中,s, 与 s, 可利用收到的转发信号完成射频能量 收集。因此, $s_1$ 与 $s_2$ 在对方的发送数据帧内分别有  $n_1$ 和 $n_2$ 个时隙接收对方数据,  $N-n_1$ 和 $N-n_2$ 个时 隙收集射频能量。 $s_1 = s_2$ 在射频能量收集过程对 应的时隙中,N-n<sub>1</sub>-n<sub>2</sub>个时隙利用对方的源信号进 行能量收集,n2和n1个时隙利用对方的转发信号进 行能量收集。







根据上述协议框架,在对称信道(即前向、返向 信道增益相同)条件下  $s_1 = s_2$  传输源节点信号时,  $s_2 = s_1, d_1 = d_2$  收到的信号分别为

$$y_{s_1s_2}(t) = \frac{1}{\sqrt{l_{s_1s_2}^m}} \sqrt{P_{s_1}g_{s_1s_2}} x_1(t) + n_{s_1s_2}(t)$$
(1)

$$y_{s_2s_1}(t) = \frac{1}{\sqrt{l_{s_1s_2}^m}} \sqrt{P_{s_2}g_{s_1s_2}} x_2(t) + n_{s_1s_2}(t)$$
(2)

$$y_{s_1d_1}(t) = \frac{1}{\sqrt{l_{s_1d_1}^m}} \sqrt{P_{s_1}g_{s_1d_1}} x_1(t) + n_{s_1d_1}(t)$$
(3)

$$y_{s_{2}d_{2}}(t) = \frac{1}{\sqrt{l_{s_{2}d_{2}}^{m}}} \sqrt{P_{s_{2}}g_{s_{2}d_{2}}} x_{1}(t) + n_{s_{2}d_{2}}(t)$$
(4)

式(1)~(4)中: $l_{s_1s_2}$ 表示  $s_1 = s_2$ 之间的距离; m 表示路径损耗指数;  $P_{s_1} \approx P_{s_2}$ 分別表示  $s_1 = s_2$ 的传输 功率;  $g_{s_1s_2}$ 表示  $s_1 = s_2$ 之间的信道增益;  $x_1(t) \approx x_2(t)$ 分別表示  $s_1 = s_2$ 传输的单位功率源信号;  $n_{s_1s_2}(t)$ 表示  $s_1 = s_2$ 的均值为 0、方差为  $\sigma_{s_1s_2}^2$ 的加性 高斯白噪声。

 $s_1 = s_2$ 作为中继节点为对方转发信号时, $d_1 = d_2$ 收到的信号分别为

$$y_{s_2d_1}(t) = \frac{1}{\sqrt{l_{s_2d_1}^m}} \sqrt{P_{s_2}g_{s_2d_1}} b_2 r_2(t) + n_{s_2d_1}(t) \quad (5)$$

$$y_{s_1d_2}(t) = \frac{1}{\sqrt{l_{s_1d_2}^m}} \sqrt{P_{s_1}g_{s_1d_2}} b_1 r_1(t) + n_{s_1d_2}(t) \quad (6)$$

式(5)~(6)中: $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别为 $s_1$ 、 $s_2$ 转发信 号,且 $r_1(t) = y_{s_2s_1}(t)$ , $r_2(t) = y_{s_1s_2}(t)$ ; $b_1$ 和 $b_2$ 表示中 继转发信号的功率标准化参数,定义如下:

$$b_1 = \left(\frac{P_{s_2}g_{s_1s_2}}{l_{s_1s_2}^m} + \sigma_{s_1s_2}^2\right)^{-1/2}$$
(7)

$$b_2 = \left(\frac{P_{s_1}g_{s_1s_2}}{l_{s_1s_2}^m} + \sigma_{s_1s_2}^2\right)^{-1/2}$$
(8)

在一个传输周期(即 $s_1$ 与 $s_2$ 各传输一帧)内, $s_1$ 与 $s_2$ 通过射频能量收集过程获得的能量为

$$E_{eh1} = \frac{n_2}{N} T \eta \frac{P_{s_2} g_{s_1 s_2} b_2^2}{l_{s_1 s_2}^m} \cdot \frac{P_{s_1} g_{s_1 s_2}}{l_{s_1 s_2}^m} + \frac{N - n_2 - n_1}{N} T \eta \frac{P_{s_2} g_{s_1 s_2}}{l_{s_1 s_2}^m}$$
(9)

$$E_{eh2} = \frac{n_1}{N} T \eta \frac{P_{s_1} g_{s_1 s_2} b_1^2}{l_{s_1 s_2}^m} \cdot \frac{P_{s_2} g_{s_1 s_2}}{l_{s_1 s_2}^m} + \frac{N - n_1 - n_2}{N} T \eta \frac{P_{s_1} g_{s_1 s_2}}{l_{s_1 s_2}^m}$$
(10)

式(9)~(10)中:η表示能量转化效率。

考虑到节点自私性,s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub> 为对方转发数据占 用的时隙数量应小于传输自身数据时占用的时隙数 量。此外,为保证系统正常运行,s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub> 为对方转 发数据时占用的时隙数量之和应小于每个数据帧包 含的时隙总数量。综合考虑上述两点可得

$$n_1 + n_2 \leqslant N \tag{11}$$

#### 3 吞吐量最优资源分配策略

对于源节点 s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub>,目的节点 d<sub>1</sub> 与 d<sub>2</sub> 在直传 方式下的接收信噪比可表示为

$$\gamma_{s_1d_1} = \frac{P_{s_1}g_{s_1d_1}}{l_{s_1d_1}^m + \sigma_{s_1d_1}^2}$$
(12)

$$\gamma_{s_2 d_2} = \frac{P_{s_2} g_{s_2 d_2}}{l_{s_3 d_2}^m + \sigma_{s_3 d_2}^2}$$
(13)

在采用协作传输方式时,源节点 s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub> 采用放 大转发,目的节点 d<sub>1</sub> 与 d<sub>2</sub> 采用最大比合并技术,接 收端信噪比可表示为

$$\Gamma_{s_1d_1} = \gamma_{s_1d_1} + \gamma_{s_1s_2d_1}$$
(14)

· 100 ·

$$\Gamma_{s_2 d_2} = \gamma_{s_2 d_2} + \gamma_{s_2 s_1 d_2} \tag{15}$$

式中:

$${}_{2^{d_2}} = \gamma_{s_2 d_2} + \gamma_{s_2 s_1 d_2} \tag{15}$$

$$\gamma_{s_1s_2d_1} = \frac{\frac{P_{s_1}g_{s_1s_2}}{l_{s_1s_2}^m \cdot \sigma_{s_1s_2}^2} \cdot \frac{P_{s_2}g_{s_2d_1}}{l_{s_2d_1}^m \cdot \sigma_{s_2d_1}^2}}{\frac{P_{s_1}g_{s_2d_1}}{r_{s_2d_1}^m \cdot \sigma_{s_2d_1}^2}}$$
(16)

$$\gamma_{s_{2}s_{1}d_{2}} = \frac{\frac{P_{s_{2}}g_{s_{1}s_{2}}}{l_{s_{1}s_{2}}^{m} \cdot \sigma_{s_{1}s_{2}}^{2}} + \frac{P_{s_{2}}g_{s_{2}d_{1}}}{l_{s_{2}d_{1}}^{m} \cdot \sigma_{s_{2}d_{1}}^{2}} + 1$$

$$\gamma_{s_{2}s_{1}d_{2}} = \frac{\frac{P_{s_{2}}g_{s_{1}s_{2}}}{l_{s_{1}s_{2}}^{m} \cdot \sigma_{s_{1}s_{2}}^{2}} + \frac{P_{s_{1}}g_{s_{1}d_{2}}}{l_{s_{1}d_{2}}^{m} \cdot \sigma_{s_{1}d_{2}}^{2}} + 1$$
(17)

在单位带宽条件下,节点 s1 与 s2 在一个传输周 期内采用直传方式获得的吞吐量 R<sup>d</sup><sub>s1</sub> 和 R<sup>d</sup><sub>s2</sub> 以及采 用协作传输方式获得的吞吐量 R<sup>e</sup><sub>s1</sub> 和 R<sup>e</sup><sub>s2</sub> 分别为

$$R_{s_1}^{d} = \frac{1}{2} \operatorname{lb}(1 + \gamma_{s_1 d_1})$$
(18)

$$R_{s_2}^{d} = \frac{1}{2} \ln(1 + \gamma_{s_2 d_2})$$
(19)

$$R_{s_1}^{c} = \frac{1}{2N} \left[ n_2 \text{lb} (1 + \Gamma_{s_1 d_1}) + (N - n_1 - n_2) \text{lb} (1 + \gamma_{s_1 d_1}) \right]$$
(20)

$$R_{s_2}^{c} = \frac{1}{2N} \left[ n_1 \text{lb} (1 + \Gamma_{s_2 d_2}) + (N - n_1 - n_2) \text{lb} (1 + \gamma_{s_2 d_2}) \right]$$
(21)

令 $K_1$ 和 $K_2$ 表示网络运行期间 $s_1$ 与 $s_2$ 的理论 传输次数,T表示时帧长度, $E_1$ 和 $E_2$ 表示 $s_1$ 与 $s_2$ 的 初始能量,则在采用射频能量收集与协作传输协议 框架内,K<sub>1</sub>和K<sub>2</sub>可分别表示为

$$K_{1} = \frac{E_{1} + K_{1} E_{eh1}}{P_{s_{1}} T}$$
(22)

$$K_2 = \frac{E_2 + K_2 E_{eh2}}{P_{s_2} T}$$
(23)

在射频能量收集与协作传输协议框架下,假定 只要有任一节点耗尽能量,网络停止运行,因此 s<sub>1</sub> 与s2的实际传输次数为

$$K = \lfloor \min(K_1, K_2) \rfloor$$
 (24)

公式(24)中,K 表示 s1 与 s2 在任意一方能量耗 尽之前的传输次数,取值为 s1 或 s2 传输次数的最小 值。由于 K<sub>1</sub> 和 K<sub>2</sub> 按公式(22) 及公式(23) 计算时 取值可能为非整数,因此计算传输次数 K 时需对  $K_1$ 及K,的最小值进行向下取整。

网络运行期间,s1 与s2 可获得的吞吐量为

$$C_{s_1}^{\rm c} = K R_{s_1}^{\rm c} \tag{25}$$

$$C_{s_2}^c = KR_{s_2}^c \tag{26}$$

令 KDTEH 表示采用基于射频能量收集的直传方

式(Directed Transmission with RF Energy Harvesting, DTEH)下节点的传输次数,在此传输方式下,s<sub>1</sub>与 s,仍采用直传方式,但在 s1 与 s,的传输时帧内,s, 与 s<sub>1</sub> 进行射频能量收集。在 s<sub>2</sub> 与 s<sub>1</sub> 各自的传输时 帧内,s<sub>1</sub>与s<sub>2</sub>收集的能量分别为

$$E_{\rm eh1}^{\rm DTEH} = \eta T P_{s_2} g_{s_1 s_2} / l_{s_1 s_2}^m$$
(27)

$$E_{\rm eh2}^{\rm DTEH} = \eta T P_{s_1} g_{s_1 s_2} / l_{s_1 s_2}^m$$
 (28)

令  $K_1^{\text{DTEH}}$  和  $K_2^{\text{DTEH}}$  分别表示节点  $s_1 = s_2$  在采用 基于射频能量收集的直传方式的传输次数,计算公 式为

$$K_{1}^{\text{DTEH}} = E_{1} / (P_{s_{1}}T - E_{\text{eh1}}^{\text{DTEH}})$$
 (29)

$$K_2^{\text{DTEH}} = E_2 / (P_{s_2} T - E_{\text{eh2}}^{\text{DTEH}})$$
 (30)

根据公式(27)、(28)可得出  $s_1 与 s_2$  采用基于 射频能量收集的直传方式下的传输次数 KDTEH 为

$$K^{\text{DTEH}} = \min(K_1^{\text{DTEH}}, K_2^{\text{DTEH}})$$
(31)

若要最大化网络吞吐量,应在数据传输、数据转 发、能量收集三个过程中合理分配时隙资源。在节 点传输功率相同的条件下,最大化网络吞吐量的资 源分配过程可表示为如下优化问题:

$$\begin{cases} \max_{n_{1},n_{2}} K(R_{s_{1}}^{c} + R_{s_{2}}^{c}) \\ \text{s. t.} \\ C_{s_{1}}^{c} + C_{s_{2}}^{c} \ge K^{\text{DTEH}}(R_{s_{1}}^{d} + R_{s_{2}}^{d}) \\ 0 \le n_{1} \le N \\ 0 \le n_{2} \le N \\ 0 \le n_{1} + n_{2} \le N \end{cases}$$
(32)

上述优化问题中,目标函数表示网络总吞吐量; 第一个约束条件表示 s1 与 s, 采用协作传输与能量 收集传输协议时的网络吞吐量需大于采用基于射频 能量收集的直传方式对应的网络吞吐量;第二和第 三个约束条件表示节点 s1 与 s2 在一个时帧内为对 方转发数据时占用的时隙数量应小于时帧内的时隙 总数:第四个约束条件为公式(11)。

优化问题(32)为非线性整数规划问题,直接求 解较为复杂。考虑到每个数据帧内仅包含 N 个时 隙,采用直接配对搜索法时的复杂度仅为 $O(N^2)$ , 且搜索过程仅需考虑 $0 \leq n_1 + n_2 \leq N$ 的情况,搜索复 杂度将进一步减小。因此对于智能电话、智能传感 器等数据处理能力较高的设备,可采用直接搜索法

· 101 ·

求解上述优化问题<sup>[13]</sup>,从而得出最优资源分配 方案。

#### 4 公平性最优的资源分配策略

若节点存在自私性,则每个节点希望对方能够 "贡献"较多时隙为自身转发数据及收集能量。在 此场景下,如何在有限的时隙数量下使自私节点之 间达到资源分配平衡状态是应考虑的主要问题。该 过程可建模为自私节点间的"议价"过程,节点通过 协商过程确定自身应贡献多少时隙用于为对方转发 数据及收集射频能量。本文采用纳什议价理 论<sup>[13-14]</sup>解决自私节点之间的时隙分配问题,具体可 表示为

$$\begin{cases} \max_{n_{1},n_{2}} (KR_{s_{1}}^{e} - K^{DTEH}) (KR_{s_{2}}^{e} - K^{DTEH}) \\ \text{s. t.} \\ C_{s_{1}}^{e} + C_{s_{2}}^{e} \ge K^{DTEH} (R_{s_{1}}^{d} + R_{s_{2}}^{d}) \\ C_{s_{1}}^{e} \ge K^{DTEH} R_{s_{1}}^{d} \\ C_{s_{2}}^{e} \ge K^{DTEH} R_{s_{2}}^{d} \\ 0 \le n_{1} \le N \\ 0 \le n_{2} \le N \\ 0 \le n_{1} + n_{2} \le N \end{cases}$$
(33)

上述优化问题中,目标函数为纳什议价理论的标准目标函数;第一个约束条件与优化问题(32)的第一个约束条件含义相同;第二和第三个约束条件 表示 s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub> 采用协作传输与能量收集传输协议获得的单节点吞吐量应大于采用基于射频能量收集的 直传方式对应的单节点吞吐量,保证"议价"过程有效;其余约束条件义与优化问题(32)的对应条件含 义相同。

利用纳什议价理论将自私用户间的时隙分配问题建模为上述优化问题,可最终得出满足比例公平性与帕累托最优(Pareto Optimal)性质的时隙分配方案<sup>[14-15]</sup>。优化问题(33)仍为非线性整数规划问题,复杂度仍为 O(N<sup>2</sup>),在小规模网络下可采用直接搜索方法<sup>[13]</sup>确定满足上述优化模型的最优解,从而获得满足公平性要求的时隙分配方案。

#### 5 仿真与分析

仿真过程假定各节点可通过公共控制信道获取 与自身相关链路的信道增益<sup>[15]</sup>。为分析方便,令网 络中各条链路的信道增益为1<sup>[3,16]</sup>。其他仿真参数 设置如表1所示。

表 L 16 具 参 数 设 直	
Tab. 1 Simulation parameter settings	
仿真参数	取值
路径损耗指数	4 <sup>[15]</sup>
带宽/kHz	1
时帧长度/s	1
时隙数量	20
节点传输功率/W	1
节点初始能量/J	100
能量转换效率/%	50

仿真过程将本文提出的以最大化网络吞吐量及 资源分配公平性为优化目标的资源分配方案分别命 名为 MT (Maximum Throughput)和 MF (Maximum Fairness)。为充分考察文中提出的资源分配方案的 性能,将以下方案作为对比方案:

直传方案(Directed Transmission, DT): $s_1 = s_2$ 采用直传模式,在各自传输时帧内向目的节点传输 数据,即 $s_1 = s_2$ 轮流占用一个时帧进行传输,双方 在传输过程中不进行能量收集。

加入 RF 能量收集的直传方案(DTEH):参见公式(27)~(31)。

为考察网络吞吐量及资源分配公平性与各节点 间距离之间的关系,仿真场景设置中,目的节点 d<sub>1</sub> 与 d<sub>2</sub> 固定,坐标分别为(5,0)和(0,0);s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub> 横坐 标固定,分别为1和3,纵坐标同时朝相反方向以相 同速率变化,如图3所示。



Fig. 3 Simulation scenario

为考察系统的公平性性能,采用公平性指数 (Jain's fairness index)<sup>[17]</sup>分析方式。公平性指数  $\beta$  计算公式如下:

$$\beta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{K} R_{i}\right)^{2}}{K \cdot \sum_{i=1}^{K} R_{i}^{2}}$$
(34)

不同方案下的吞吐量性能对比情况如图 4 所 示,纵轴表示网络运行时间内的总吞吐量(单位: b/s), 横轴表示节点  $s_2$  的纵坐标  $y_2$  变化。当  $s_2$  从 (3,-4)运动至(3,4)时,s1从(1,4)运动至(1,-4)。 图 4 表明,当 y<sub>2</sub><-1.5 时,4 种方法的吞吐量性能相 同。原因是在距离相对较远时,s<sub>1</sub>或s<sub>2</sub>采用 MT 或 MF 方案获得的吞吐量小于 DT 方式,不满足协作传 输方式下对单用户吞吐量或网络总吞吐量的约束条 件。在此情况下, $s_1$ 与 $s_2$ 采用 DTEH 方式,每个节 点轮流占用一帧时间进行数据传输,另一帧时间进 行能量收集。另一方面,在 s1 与 s2 距离相对较远情 况下,能量收集较少,因此 DTEH 方案获得的吞吐量 与 DT 方案基本相同。当-1.5≤y<sub>2</sub><0 时, MT 方案 可获得最大网络吞吐量, MF 方案次之, DT 方案获 得网络吞吐量最小。首先,在 DTEH 方式下, $s_1$  与  $s_2$ 分别在对方的传输时帧内进行能量收集用于自身数 据传输,因此吞吐量性能优于 DT 方式;其次,本文 提出的两种资源分配方案 MT、MF 在协作传输过程 中兼顾能量收集,因此可获得较高的吞吐量增益。 当 $y_{2}=0$ 时, $s_{1}$ 与 $s_{2}$ 距离最近,MT及MF方案通过 协作传输及射频能量收集过程获得的收益最高。 MT 方案以最大吞吐量作为优化目标,因此相比于 MF方案, MT 方案在网络吞吐量方面可提升约 13%,相比于 DTEH 方案可提升约 75%。γ<sub>2</sub>>0 时, 网络吞吐量性能与 γ,<0 相同。





不同方案下的公平性指数对比情况如图 5 所示。公平性指数为 1 代表  $s_1$  与  $s_2$  的吞吐量相等。 当  $y_2 < -1.5$  时,由于不满足单用户吞吐量或网络总 吞吐量约束条件,且  $s_1$  与  $s_2$  距离相对较远时能量收 集较少,因此四种方法的公平性性能相同。在  $s_1$  与  $s_2$ 轮流占用一帧进行数据传输的情况下,由于  $s_1$  距 离目的节点  $d_1$  较远,因此公平性指数低于 1。当 -1.5  $\leq y_2 < 0$ 时, MT 方案的公平性指数迅速降低至 0.5, 原因是该方案以牺牲用户间公平性为代价提升 了网络总吞吐量,由于  $s_1$ 至目的节点  $d_1$ 的距离相 对远,信道条件较差,因此  $s_1$ 贡献自身的全部时隙 为  $s_2$ 进行数据转发,如图 6 所示。而当-1.2  $\leq y_2 < 0$ 时, $s_1 = s_2$ 距离相对较近,采用 MF 方案时, $s_1 = s_2$ 分别贡献部分传输时隙为对方进行数据转发,如图 7 所示。当-0.2  $\leq y_2 < 0$ 时, $s_1 = s_2$ 距离最接近,与 各自目的节点间的信道条件差别最小,公平性达到 最大。 $y_2 > 0$ 时,系统公平性性能与 $y_2 < 0$ 相同。



MT及MF方案下, $s_1$ 与 $s_2$ 的单用户吞吐量性能 对比分别如图 8 和图 9 所示。MT 方案下,当 -1.5 $\leq y_2 < 0$ 时,由于 $s_1$ 与 $d_1$ 之间的信道条件相对 较差,为保证网络总吞吐量性能, $s_1$ 将自身的全部时 隙用于为 $s_2$ 转发数据,因此 $s_1$ 的单用户吞吐量为  $0,s_2$ 获得了较高吞吐量,如图 8 所示。MF 方案下, 当-1.5 $\leq y_2 < 0$ 时,双方采用协作方式进行数据传输 及能量收集,单用户吞吐量均大幅上升;当-0.2 $\leq$  $y_2 < 0$ 时, $s_1$ 与 $d_1$ , $s_2$ 与 $d_2$ 的距离相差较小,信道衰 落条件相近, $s_2$ 牺牲小部分吞吐量提高了 $s_1$ 的吞吐 量,使用户公平性及网络吞吐量得到改善,如图 9 所 示。 $y_2 > 0$ 时,单用户吞吐量性能与 $y_2 < 0$ 相同。



图 8 MT 方案下的单节点吞吐量对比 Fig. 8 Single node's throughput comparison in MT scheme



图 9 MF 方案下的单节点吞吐量对比 Fig. 9 Single node's throughput comparison in MF scheme

DTEH 方式下的单用户吞吐量对比如图 10 所示。对比图 9 与图 10 可得出, MF 方案将时隙资源 在数据传输、中继转发、能量收集之间进行了合理分 配,分配过程兼顾了用户间公平性, s<sub>1</sub> 与 s<sub>2</sub> 的单用 户吞吐量均得到提升,因此 MF 方案是一种帕累托 (Pareto)最优方案。



图 10 DTEH 方案下的单节点吞吐量对比 Fig. 10 Single node's throughput comparison in DTEH scheme

## 6 结 论

本文设计了一种适用于多数据源场景的射频能 量收集中继网络传输协议框架,可将数据传输、中继 转发、射频能量收集过程占用的传输资源进行有效 分配。以该框架为基础,本文分别以网络吞吐量及 资源公平性为优化目标,提出了两种资源分配策略。 仿真结果表明,相比于普通直传方式以及直传结合 能量收集方式,文中提出的资源分配方案可有效改 善系统吞吐量及用户间公平性。

#### 参考文献:

- [1] ULLAH M A, KESHAVARZ R, ABOLHASAN M, et al. A review on antenna technologies for ambient RF energy harvesting and wireless power transfer: designs, challenges and applications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 17231-17267.
- [2] ALWIS C D, KALLA A, PHAM Q V, et al. Survey on 6G frontiers: trends, applications, requirements, technologies and future research [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2:836–886.
- [3] NASIR A A, ZHOU X, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7):3622-3636.
- XU Y, SHEN C, DING Z, et al. Joint beamforming and power-splitting control in downlink cooperative SWIPT NOMA systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(18):4874-4886.
- [5] ZAIDI S K, HASAN S F, GUI X. Time switching based relaying for coordinated transmission using NOMA[C]// Proceedings of the Eleventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network. Auckland: IEEE, 2018:1-5.
- [6] TRAN H Q, PHAN C V, VIEN Q T. Power splitting

versus time switching based cooperative relaying protocols for SWIPT in NOMA systems [ J ]. Physical Communication, 2020, 41:1-38.

- [7] NGUYEN T N, QUANG MINH T H, TRAN P T, et al. Energy harvesting over Rician fading channel: a performance analysis for half-duplex bidirectional sensor networks under hardware impairments [J]. Sensors, 2018,18(6):1781.
- [8] RABIE K M, SALEM A, ALSUSA E, et al. Energyharvesting in cooperative AF relaying networks over lognormal fading channels[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications. Kuala Lumpur:IEEE,2016:1-7.
- [9] NGUYEN T N, TRAN M, NGUYEN T L, et al. Performance analysis of a user selection protocol in cooperative networks with power splitting protocol-based energy harvesting over Nakagami-m/Rayleigh channels [J]. Electronics, 2019,8(4):448-457.
- [10] YE Y, LI Y, ZHOU F, et al. Power splitting-based SWIPT with dual-hop DF relaying in the presence of a direct link [J]. IEEE Systems Journal, 2018, 13 (2): 1316-1319.
- YE Y, LI Y, WANG D, et al. Optimal transmission schemes for DF relaying networks using SWIPT [J].
   IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (8):7062-7072.
- [12] IQBAL M, SUWADI, WIRAWAN, et al. Comparison of

selection and maximal ratio combining in cooperative network coding with AF and DF [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite. Surabaya:IEEE,2016:18-23.

- [13] ZHANG G, ZHANG H, ZHAO L, et al. Fair resource sharing for cooperative relay networks using Nash bargaining solutions [J]. IEEE Communications Letters, 2009,13(6):381-383.
- [14] YAICHE H, MAZUMDAR R R. A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000,8(5):667-678.
- [15] ZHANG G, YANG K, LIU P, et al. Joint channel bandwidth and power allocation game for selfish cooperative relaying networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(9):4142-4156.
- [16] CHEN Y, RUI S, WEI F, et al. AF relaying with energy harvesting source and relay [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1):874-879.
- [17] JAIN R, CHIU D, HAWE W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems [EB/OL]. (1998 - 09 - 24) [2022-11-25]. https://arxiv.org/pdf/cs/9809099.pdf.

#### 作者简介:

**钮金鑫** 男,1987 年生于黑龙江牡丹江,2017 年获博士 学位,现为工程师,主要研究方向为通信系统设计。