



反向散射辅助的无线供能通信网络的节点间通信

陶杰¹, 葛海江^{2,3}, 吴旻媛³, 邵奇可³, 池凯凯³

(1. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310051;

2. 杭州职业技术学院信息工程学院, 浙江 杭州 310018;

3. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 目前几乎没有无线供能通信网络节点间的信息传输方案设计, 研究了反向散射辅助无线供能通信网络节点间的高传输速率信息传输, 节点有储能容量且可工作于反向散射通信和主动通信。提出了由节点反向散射/能量传输阶段和节点主动通信阶段构成的方案, 并将总传输速率最大化建模为凸优化问题。然后基于反向散射总时长与节点能量捕获时长阈值的关系, 将该问题分解为多个仅需优化两个反向散射时长的子问题, 并设计高效的两层黄金分割搜索算法求解子问题, 从子问题最优解得到原问题最优解。仿真结果表明, 与纯主动通信方案和纯反向散射通信方案相比, 所提出的方案能有效地提高传输速率。

关键词: 无线供能通信网络; 节点间通信; 反向散射通信; 传输速率最大化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021120

Communication between nodes in backscatter-assisted wireless powered communication network

TAO Jie¹, GE Haijiang^{2,3}, WU Minyuan³, SHAO Qike³, CHI Kaikai³

1. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

2. Institute of Information Engineering, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China

3. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: At present, there is almost no design on information transmission between the nodes in wireless powered communication network. The high-throughput information transmission between the nodes in backscatter assisted wireless powered communication network was studied. A scheme was proposed which consisted of backscattering/energy transmission phase and active communication phase. The maximum throughput was modeled as a convex optimization problem. Then, based on the relationship between the total backscatter communication duration and the threshold of node energy capture duration, the problem was decomposed into several sub problems that only need to

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-06-11

通信作者: 葛海江, gehaijiang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61872322); 浙江省自然科学基金杰出青年科学项目 (No.LR20F020003); 杭州职业技术学院企业经历工程项目 (反向散射辅助的无线供能网络的关键技术研究)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61872322), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (No.LR20F020003), Enterprise Experience Project of Hangzhou Vocational and Technical College (Research on Key Technology of Backscatter-Assisted Wireless Powered Communication Network)



optimize two backscatter durations. An efficient two-level golden section search algorithm was designed to solve the sub problems, and the optimal solution of the original problem was obtained from the optimal solutions of the sub problems. Simulation results show that, compared with pure active communication scheme and pure backscatter communication scheme, the proposed scheme can effectively improve the throughput.

Key words: wireless powered communication network, communication between nodes, backscatter communication, throughput maximization

1 引言

近年来,无线供能技术在无线网络领域越来越受到关注。由专用射频能量源进行大范围的无线射频供能,可以为多个无线传感节点提供稳定、可控的能量,节点通过捕获能量源发送的射频能量工作,这是一种非常有潜力的物联网节点能量捕获技术^[1-2],可以应用于智能交通(如高速公路感知节点)、智能家居(如烟雾感知节点)等物联网应用。

截至目前,已有很多关于无线供能网络的研究工作。无线供能网络有两种工作模式:信息与能量同传模式 SWIPT (simultaneous wireless information and power transfer)、信息与能量分开传输的模式 WPCN (wireless powered communication network)。前者能达到更高的通信效率,后者具有更简单的硬件实现。本文考虑信息与能量分开传输的模式。

参考文献[3]中,Ju 等研究基站在半双工模式下如何协调节点无线供能和节点信息传输,提出了“先捕获能量后发数据”的协议,节点首先在下行链路中收集由基站辐射的能量,然后在上行链路中利用所捕获的能量。

基于 TDMA (time division multiple access) 模式将信息传输到基站,并通过最优化供能时长和各个节点的信息发送时长最大化吞吐量。参考文献[4]中,Ju 等研究基站在全双工模式下如何协调节点无线供能和节点信息传输的问题,达到带权重节点吞吐量总和最大化。Kang 等^[5]考虑 H-AP (hybrid access point) 的能量发送功率固定的场景

并假设能量信号对数据信号的干扰被完全消除,分别研究了节点吞吐量总和最大化问题和数据收集总时间最小化问题。在参考文献[6]中,研究了 TDMA 和 NOMA (non-orthogonal multiple access) 两种模式下满足网络吞吐量需求的供能最小化问题。

大多数已有的 WPCN 研究工作采用了先捕获能量后信息传输的模式,因此无论半双工还是全双工模式,都需要系统分配一段时间专门用于无线供能,由于供能和通信通常使用同一个频段,这段供能时长内不能进行节点的主动通信,从而减少了数据传输的时长。

反向散射通信是一种节点利用环境中的电磁波而非自己产生的电磁波来通信的技术,而且发送节点几乎不消耗能量^[7-8],但反向散射通信速率通常较低。近年来,一些研究工作将反向散射辅助通信应用于无线供能通信网络^[9-15],网络节点可工作于反向散射通信或主动通信这两种通信方式。在无线供能网络中使用反向散射通信技术的好处是在能量源进行无线供能时,节点可以进行反向散射通信,从而提高节点吞吐量和网络吞吐量。Ramezani 等^[11]考虑了由一个射频能量源、一个仅工作于反向散射模式的节点、一个仅工作于主动通信模式的节点、一个网关组成的无线通信网络。仅工作于反向散射模式的节点先进行反向散射,在这段时间内,仅工作于主动通信模式下的另一个节点同时进行能量捕获,再将捕获的能量用于后续剩余时间下的主动通信。参考文献[12]考虑了由一个既进行无线供能又进行数据收集的 H-AP 和多个节点的无线供能网络,其中一部分节

点只能进行反向散射,一部分节点只能主动通信。提出了先由反向散射节点依次进行反向散射通信,再由主动通信节点利用捕获的能量进行通信。Lyu 等又在参考文献[13]中研究了包含全双工 H-AP 和多个既有反向散射模块又有主动通信模块节点的无线供能网络,提出了先进行一段时间的无线供能,然后由各个节点依次工作,每个节点先进行能量捕获,再进行反向散射,最后进行主动通信。参考文献[14]研究了包含 H-AP 和多个既可以反向散射通信又可以主动通信的节点的无线供能网络, H-AP 与节点间进行双向数据通信。分别研究了无后向散射无功率分流 (power splitting, PS)、无后向散射有功率分流、有后向散射有功率分流 3 种方案的吞吐量最大化问题。参考文献[15]考虑了由一个泛在能量源、一个专用能量源、多个节点以及一个数据接收网关组成的无线供能网络,提出了以下通信方案:在主信道忙的时间段内,各个节点依次进行反向散射,并安排一段时间给所有节点进行能量捕获;在主信道空闲的时间段内,各个节点依次进行反向散射,然后安排一段时间给所有节点进行能量捕获,最后各个节点依次进行主动通信。

以上研究工作都假设节点储能容量足够大。与上述工作不同,本文研究有储能容量约束的反向散射辅助无线供能通信网络。另外,本文考虑的是节点间的通信。目前几乎没有反向散射辅助无线供能通信网络节点间通信方案设计的研究工作。

2 反向散射辅助无线供能网络系统模型

本文所考虑的反向散射辅助无线供能通信网络模型如图 1 所示,它由一个射频能量源、多个双天线节点组成。本文研究两个邻近节点间的通信,两个节点用 U_i 表示, $i=1,2$, 节点 U_i 的储能容量是 C_i 。节点均配有反向散射通信模块和主动通信模块, U_i 的反向散射速率表示为 B_i^b 。

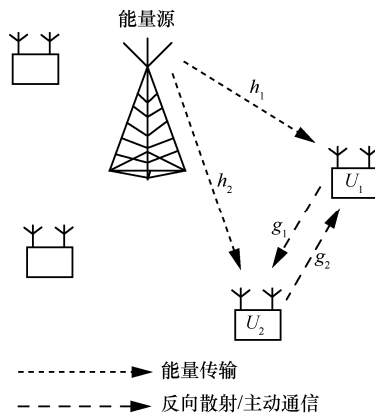


图1 反向散射辅助无线供能网络模型示意图

从能量源到 U_i 的信道增益记为 h_i 。从节点 U_i 到另一个节点的信道增益记为 g_i 。假设 h_i 和 g_i 是准静态衰落,当网络系统分配时长 T 给节点 U_1 和 U_2 使用时,由于 T 不会很长, h_i 和 g_i 在整个时间块 T 内保持恒定。

本文研究系统分配给 U_1 和 U_2 总可用时长 T 的情况,如何进行无线供能和数据发送,使得 U_1 和 U_2 总信息传输量最大。

本文设计如图 2 所示的无线供能和数据发送方案。整个时间块 T 被分为两个阶段,即反向散射通信/无线供能阶段和主动通信阶段。在第一阶段,能量源以发送功率 P_A 广播射频信号, U_1 和 U_2 分别进行 α_1 和 α_2 时长的反向散射辅助通信, U_1 将信息发送给 U_2 , U_2 将信息发送给 U_1 。由于节点具有双天线,第一阶段中, U_1 和 U_2 同时进行能量捕获,节点的能量达到储能容量就停止能量捕获,捕获时长分别记为 τ_1 和 τ_2 。 $\tau_1 \leq \alpha_1 + \alpha_2$ 且 $\tau_2 \leq \alpha_1 + \alpha_2$ 。在第二阶段,能量源不发送射频能量, U_1 和 U_2 利用第一阶段采集的能量将信息以主动通信方式进行双向节点间通信,时长记为 β 。假设节点能有效消除自干扰。

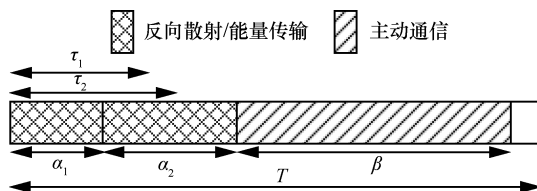


图2 反向散射/能量传输和主动通信



U_i 在 τ_i 时长内捕获到的能量可以表示为:

$$E_i = \eta_i P_A h_i \tau_i, i=1,2 \quad (1)$$

其中, η_i 是能量收集效率, $0 < \eta_i < 1$ 。

每个节点 U_i 的储能容量是 C_i , 因此能量捕获时长 τ_i 满足:

$$E_i = \eta_i P_A h_i \tau_i \leq C_i \quad (2)$$

即:

$$\tau_i \leq \frac{C_i}{\eta_i P_A h_i} \quad (3)$$

因此节点 U_i 的最长能量采集时长 $\bar{\tau}_i$ 为:

$$\bar{\tau}_i = \frac{C_i}{\eta_i P_A h_i} \quad (4)$$

在反向散射模式下, U_i 的传输速率表示为:

$$R_i^b = \alpha_i B_i^b, i=1,2 \quad (5)$$

U_i 在主动通信 β 时长内使用捕获的能量 E_i 将信息进行传输, 即发送功率为 E_i/β , 节点对中另一节点的接收功率为 $g_i E_i/\beta$ 。因此, U_i 的主动通信所达到的传输速率表示为:

$$R_i^h = \beta W \ln \left(1 + \frac{g_i E_i}{\beta \sigma^2} \right) = \beta W \ln \left(1 + \gamma_i \frac{\tau_i}{\beta} \right) \quad (6)$$

其中, W 为信道带宽, γ_i 如下所示:

$$\gamma_i = \frac{\eta_i P_A g_i h_i}{\sigma^2}, i=1,2 \quad (7)$$

其中, σ^2 为高斯白噪声功率。

综上, U_1 和 U_2 在时长 T 内的总传输速率为:

$$R_{\text{sum}} = \sum_{i=1,2} (R_i^b + R_i^h) = \sum_{i=1,2} \left[\alpha_i B_i^b + \beta W \ln \left(1 + \gamma_i \frac{\tau_i}{\beta} \right) \right] \quad (8)$$

此外, 反向散射/能量采集阶段和主动通信阶段的持续时间之和不能超过系统所分配的时长, 即必须满足:

$$\sum_{i=1,2} \alpha_i + \beta \leq T \quad (9)$$

3 节点间传输速率最大化

这一节, 通过最优化反向散射时长、能量捕获时长和主动通信时长等时间分配来最大化总传输速率 R_{sum} , 该传输速率最大化问题建模如下:

$$(P1): \max_{\{\alpha_i\}, \beta, \{\tau_i\}} R_{\text{sum}} \quad (10a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1,2} \alpha_i + \beta \leq T \quad (10b)$$

$$\tau_i \leq \sum_{i=1,2} \alpha_i, \tau_i \leq \sum_{i=1,2} \alpha_i \quad (10c)$$

$$0 \leq \tau_i \leq \bar{\tau}_i, i=1,2 \quad (10d)$$

$$\alpha_i \geq 0, \alpha_2 \geq 0, \beta \geq 0 \quad (10e)$$

定理 1 问题 (P1) 是凸优化问题。

证明 由于约束函数都是线性约束, 目标函数 R_{sum} 的表达式中, $\alpha_i B_i^b$ 是线性函数,

$\beta W \ln \left(1 + \gamma_i \frac{\tau_i}{\beta} \right)$ 是 $\ln(1 + \gamma_i \tau_i)$ 的透视函数, 容易知道 $\ln(1 + \gamma_i \tau_i)$ 是 τ_i 的凹函数, 而透视运算具有保凹性, 因此 $\beta W \ln \left(1 + \gamma_i \frac{\tau_i}{\beta} \right)$ 是多变量的联合凹函数。

综上, 问题 (P1) 是凸优化问题。证毕。

将问题 (P1) 的最优 α_i 、 β 和 τ_i 的最优取值分别用符号 α_i^* 、 β^* 和 τ_i^* 来表示。

引理 1 对于问题 (P1), $\beta^* > 0$ 。

证明 由于当节点将捕获的能量在足够短的时间内以足够大的发送功率使用时, 可以达到足够大的接收端信噪比, 从而达到比反向散射速率更大的主动通信速率, 因此问题 (P1) 的 β^* 一定不会为 0。证毕。

引理 2 问题 (P1) 的最优解满足:

$$\sum_{i=1,2} \alpha_i^* + \beta^* = T \quad (12)$$

证明 可以看出 R_i^b 和 R_i^h 分别是相对于 α_i 和 β 的递增函数, 因此应该利用整个时间块 T 的时间, 即要满足 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* + \beta^* = T$ 以使总传输速率最大化。证毕。

本文已证所考虑的优化问题为凸问题，因此可以采用经典的凸优化技术进行求解，例如内点法，然而为了更高效地求解优化问题，本文设计更高效的方法。

通过将 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^*$ 与 $\bar{\tau}_i$ 进行大小比较，把问题 (P1) 分成以下 4 种可能的情况分别进行各种情况下的最优解求解，最后得到原问题 (P1) 最优解。

情况 1 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_2$ ，即两个节点都是充不满电或恰好充满电。

情况 2 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_2$ ，即两个节点都充满电。

情况 3 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_2$ ，即节点 U_1 充满电而节点 U_2 不一定。

情况 4 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_2$ ，即节点 U_2 充满电而节点 U_1 不一定。

不难知道，最优解一定在这 4 种情况中。根据 $\bar{\tau}_1$ 和 $\bar{\tau}_2$ 与 T 的大小关系，可知：

- 如果 $\bar{\tau}_1 \geq T$ 且 $\bar{\tau}_2 \geq T$ ，由于 $\beta^* > 0$ ， $\alpha_1^* + \alpha_2^* < T$ ，最优解 α_1^* 和 α_2^* 一定属于情况 1，即两个节点都充不满电，因此无须再求解其他 3 种情况下的最优解。
- 如果 $\bar{\tau}_1 \geq T$ 且 $\bar{\tau}_2 < T$ ，由于 $\beta^* > 0$ ， $\alpha_1^* + \alpha_2^* < T$ 和 $\tau_1^* \leq \alpha_1^* + \alpha_2^* < \bar{\tau}_1$ ，则节点 U_1 充不满电，最优解 α_1^* 和 α_2^* 一定不属于情况 2 和情况 3，可能属于情况 1、情况 4。
- 如果 $\bar{\tau}_1 < T$ 且 $\bar{\tau}_2 \geq T$ ，由于 $\beta^* > 0$ ， $\alpha_1^* + \alpha_2^* < T$ 和 $\tau_2^* \leq \alpha_1^* + \alpha_2^* < \bar{\tau}_2$ ，则节点 U_2 充不满电，则最优解 α_1^* 和 α_2^* 不可能属于情况 2 和情况 4，可能属于情况 1、情况 3。
- 如果 $\bar{\tau}_1 < T$ 且 $\bar{\tau}_2 < T$ ，则最优解 α_1^* 和 α_2^* 可能出现在 4 种情况中的任意一种情况。

下面针对每种情况来设计方案，找出该情况下的最优解，真正的最优解是这 4 种情况下最好的最优解中。

3.1 最优总后向散射时长较小的情况

本节分析 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_2$ 该最优总后向散射时长较小的情况。该情况下，两个节点的能量捕获量小于其储能容量。容易知道 R_{sum} 是相对于 τ_i 的递增函数，因此该情况下的最优能量捕获时长为：

$$\begin{cases} \tau_1^* = \alpha_1 + \alpha_2 \\ \tau_2^* = \alpha_1 + \alpha_2 \end{cases} \quad (13)$$

由引理 2 可得 $\beta = T - \sum_{i=1,2} \alpha_i$ 。

于是，优化问题 (P1) 简化为：

(P2)：

$$\max_{\alpha_1, \alpha_2} \sum_{j=1,2} \left[\alpha_j B_j^b + \left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right) \text{Mb} \left(1 + \gamma_j \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{T - \sum_{i=1,2} \alpha_i} \right) \right] \quad (14a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1,2} \alpha_i \leq T \quad (14b)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq \bar{\tau}_1, \quad \alpha_1 + \alpha_2 \leq \bar{\tau}_2 \quad (14c)$$

$$\alpha_i \geq 0, i=1,2 \quad (14d)$$

问题 (P2) 的约束条件均为仿射函数，且已证问题 (P1) 为凸优化问题，同理可得问题 (P2) 为凸优化问题，可以采用经典的凸优化技术来解决，比如内点法。然而，为了更高效地得到 α_i 最优值，将 (P2) 分解成主问题和子问题。子问题是对于给定的 α_1 ，得到最优的 α_2 取值。主问题是找到最优的 α_1 取值。

关于子问题，对于给定的 α_1 ，通过分析式 (14b) ~ 式 (14d) 可知 α_2 的可行区间 $[0, \min(\bar{\tau}_1 - \alpha_1, \bar{\tau}_2 - \alpha_1, T - \alpha_1)]$ ，由于传输速率函数是 α_2 的凸函数，采用黄金分割搜索算法在该可行区间上找到使 R_{sum} 达到最大的 α_2 值。

关于主问题，由于传输速率函数是 α_1 的凸函数，同样采用黄金分割搜索算法在其可行区间 $[0, \min(\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, T)]$ 中找到使 R_{sum} 达到最大的 α_1 值。



综上, 对求解最优时间分配的算法进行了如下形式化描述。

输入 $\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \gamma_i, B_i^b, i=1, 2$

输出 α_1^*, α_2^*

(1) 初始化 $\alpha_1^L = 0, \alpha_1^U = \min(\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, T)$, 以及初始化精度要求参数 tol ;

(2) while ($\alpha_1^U - \alpha_1^L > \text{tol}$)

(3) $\alpha_1' = \alpha_1^L + 0.382 \times (\alpha_1^U - \alpha_1^L)$,

$\alpha_1'' = \alpha_1^L + 0.618 \times (\alpha_1^U - \alpha_1^L)$;

(4) 初始化 $\alpha_2^L = 0$,

$\alpha_2^U = \min(\bar{\tau}_1 - \alpha_1', \bar{\tau}_2 - \alpha_1', T - \alpha_1')$,

(5) while ($\alpha_2^U - \alpha_2^L > \text{tol}$)

(6) $\alpha_2' = \alpha_2^L + 0.382 \times (\alpha_2^U - \alpha_2^L)$,

$\alpha_2'' = \alpha_2^L + 0.618 \times (\alpha_2^U - \alpha_2^L)$;

(7) 若 $R_{\text{sum}}(\alpha_1 = \alpha_1', \alpha_2 = \alpha_2')$

$> R_{\text{sum}}(\alpha_1 = \alpha_1', \alpha_2 = \alpha_2'')$, $\alpha_2^U = \alpha_2'$, 否则 $\alpha_2^L = \alpha_2''$;

(8) end while

(9) $R_1 = R_{\text{sum}}(\alpha_1 = \alpha_1', \alpha_2 = (\alpha_2^U + \alpha_2^L) / 2)$

(10) 初始化 $\alpha_2^L = 0$,

$\alpha_2^U = \min(\bar{\tau}_1 - \alpha_1'', \bar{\tau}_2 - \alpha_1'', T - \alpha_1'')$

(11) while ($\alpha_2^U - \alpha_2^L > \text{tol}$)

(12) $\alpha_2' = \alpha_2^L + 0.382 \times (\alpha_2^U - \alpha_2^L)$,

$\alpha_2'' = \alpha_2^L + 0.618 \times (\alpha_2^U - \alpha_2^L)$;

(13) 若 $R_{\text{sum}}(\alpha_1 = \alpha_1'', \alpha_2 = \alpha_2')$

$> R_{\text{sum}}(\alpha_1 = \alpha_1'', \alpha_2 = \alpha_2'')$, $\alpha_2^U = \alpha_2'$, 否则 $\alpha_2^L = \alpha_2''$;

(14) end while

(15) $R_2 = R_{\text{sum}}(\alpha_1 = \alpha_1'', \alpha_2 = (\alpha_2^U + \alpha_2^L) / 2)$

(16) 若 $R_1 \geq R_2$, $\alpha_1^U = \alpha_1''$, 否则 $\alpha_1^L = \alpha_1'$

(17) end while

3.2 最优总后向散射时长较大的情况

本节分析 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_2$ 该最优总后向散射时长较大的情况。对于该情况下的最优方案, 两个节点的能量捕获量都等于其储能容

量, 即:

$$\begin{cases} \tau_1^* = \bar{\tau}_1 \\ \tau_2^* = \bar{\tau}_2 \end{cases} \quad (15)$$

由此, R_i^h 重新表示为:

$$R_i^h = \left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right) \text{Mlb} \left(1 + \frac{c_i}{\left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right)} \right), i=1,2 \quad (16)$$

其中, $c_i = \frac{g_i C_i}{\sigma^2}$ 。

可将优化问题 (P1) 简化为:

(P3):

$$\max_{\alpha_1, \alpha_2} \sum_{i=1,2} \left[\alpha_i B_i^b + \left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right) \text{Mlb} \left(1 + \frac{c_i}{T - \sum_{i=1,2} \alpha_i} \right) \right] \quad (17a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1,2} \alpha_i \leq T \quad (17b)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \geq \bar{\tau}_2, \quad \alpha_1 + \alpha_2 \geq \bar{\tau}_1 \quad (17c)$$

$$\alpha_i \geq 0, i=1,2 \quad (17d)$$

问题 (P3) 为凸优化问题。采用与解决问题 (P2) 一样的方法, 即两层黄金分割搜索算法进行求解, 对于任意给定的 α_1 值, 采用黄金分割搜索算法在该可行区间 $[\max(\bar{\tau}_1 - \alpha_1, \bar{\tau}_2 - \alpha_1), T - \alpha_1]$ 上找到使 R_{sum} 达到最大的 α_2 值。同样采用黄金分割搜索算法在其可行区间 $[0, T]$ 中找到使 R_{sum} 达到最大的 α_1 值。

3.3 最优总后向散射时长适中的情况

仅以情况 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \geq \bar{\tau}_1$ 且 $\sum_{i=1,2} \alpha_i^* \leq \bar{\tau}_2$ 为例来说

明问题 (P1) 的求解方法。

对于该情况下的最优方案, 节点 U_1 会充满电, 即:

$$\begin{cases} \tau_1^* = \bar{\tau}_1 \\ \tau_2^* = \alpha_1 + \alpha_2 \end{cases} \quad (18)$$

由此, R_1^h 重新表示为:

$$R_1^h = \left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right) W \log \left(1 + \frac{c_1}{\left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right)} \right) \quad (19)$$

R_2^h 重新表示为:

$$R_2^h = \left(T - \sum_{i=1,2} \alpha_i \right) W \log \left(1 + \gamma_2 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{T - \sum_{i=1,2} \alpha_i} \right) \quad (20)$$

可将优化问题 (P1) 简化为:

$$(P4): \max_{\alpha_1, \alpha_2} R_1^h + R_2^h + \sum_{i=1,2} \alpha_i B_i^b \quad (21a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1,2} \alpha_i \leq T \quad (21b)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \leq \bar{\tau}_2, \quad \alpha_1 + \alpha_2 \geq \bar{\tau}_1 \quad (21c)$$

$$\alpha_i \geq 0, i=1,2 \quad (21d)$$

问题 (P4) 为凸优化问题。采用与解决问题 (P2) 一样的方法, 即两层黄金分割搜索算法进行求解, 对于任意给定的 α_1 值, 采用黄金分割搜索算法在该可行区间 $[\bar{\tau}_1 - \alpha_1, \min(\bar{\tau}_2 - \alpha_1, T - \alpha_1)]$ 上找到使 R_{sum} 达到最大的 α_2 值。同样采用黄金分割搜索算法在其可行区间 $[0, \min\{\bar{\tau}_2, T\}]$ 中找到使 R_{sum} 达到最大的 α_1 值。

4 实验及仿真结果

在本节中, 将本文所提方案与纯主动通信、纯反向散射通信和时间三等分分配 3 种基准方案进行比较, 评估本文方案的性能。纯主动通信方案最优化能量捕获时长和通信时长以最大化其传输速率; 纯后向散射通信方案让后向散射速率较高的节点在整个时长内以后向散射来发送数据; 时间三等分分配方案给 U_1 的反向散射辅助通信、 U_2 的反向散射辅助通信和主动通信分配相同的时长, 即 $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta = T/3$ 。

仿真参数设置如下, 信道功率增益 $h=10^{-3}D^{-2}$ 和 $g=10^{-3}D^{-2}$, 节点 U_1 和 U_2 到 H-AP 的距离分别

是 5 m 和 6 m, 节点 U_1 和 U_2 之间的距离为 4 m。 T 为 1 s, 信道带宽 $W=1$ MHz, 噪声功率谱密度为 -110 dBm/Hz, 捕获能量的收集效率 $\eta=0.75$ 。在没有特殊说明的情况下, 以下仿真中, 反向散射速率为 $B_1^b = 40$ kbit/s, $B_2^b = 60$ kbit/s。

先针对所提出的方案, 衡量储能容量大小对传输速率的影响。有限储能容量和无限储能容量下系统总传输速率与发射功率的关系如图 3 所示。有限储能容量为 $C=30 \mu\text{J}$ 。从图 3 可以得到以下结论。首先, 随着功率的不断提升, 两种情况下的系统总传输速率均不断提高, 这是由于越大的能量源发送功率会导致越多的能量捕获, 从而使主动通信的传输速率更大。另外, 当能量源发送功率低时, 两种情况的传输速率完全相同, 这是由于有限储能容量 $C=30 \mu\text{J}$ 也足够存储最优方案下捕获的能量, 没有发生储能溢出。当随着能量源发送功率的增大, 比如当发射功率到达 40 dBm 时, 有限储能容量情况的节点受容量约束, 所达到的传输速率小于无限储能容量的情况, 同时, 可以看到无限储能容量下的系统总传输速率远大于有限储能容量。

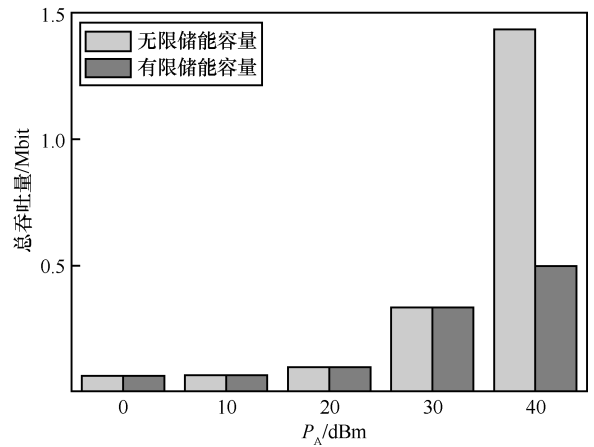


图3 不同能量源发射功率下的总传输速率, 有限储能容量 $C_1 = C_2 = 30 \mu\text{J}$

所提方案在无限储能容量和有限储能容量 $C=30 \mu\text{J}$ 下, 不同发射功率下的反向散射时长和主动通信时长如图 4 (a) 和图 4 (b) 所示。首先,



在能量源发射功率较小时, 节点只捕获极少量的能量, 系统会将大量时间分配给反向散射通信, 节点间主要进行反向散射通信, 例如在发射功率为 0 dBm 和 10 dBm 时, 主动通信时长非常小。随着能量源发射功率不断增大, 节点单位时间内捕获的能量不断增加, 所提方案会分配更多时间给主动通信, 因此主动通信传输速率和总传输速率都不断增大。

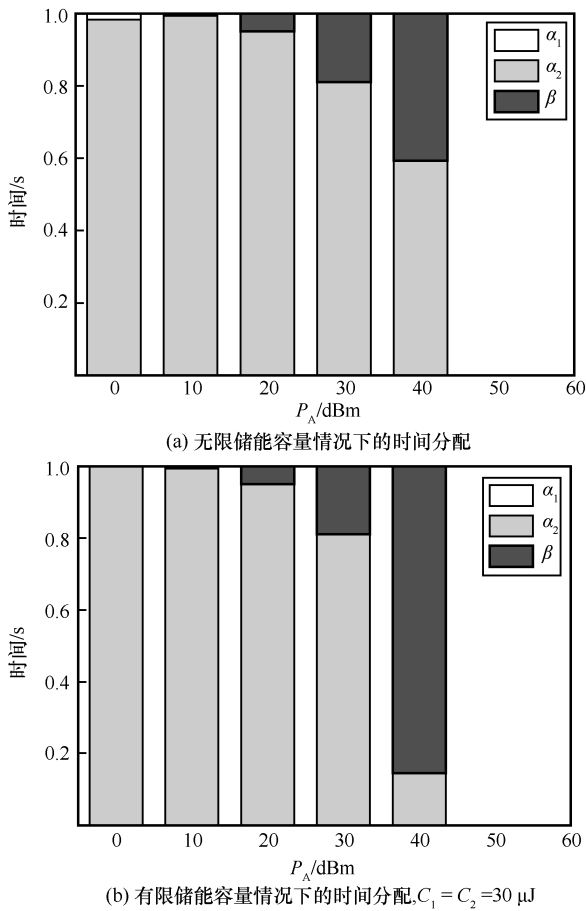


图4 反向散射、能量捕获和主动通信时间分配示意图

另外, 反向散射速率较低的节点 U_1 , 其反向散射通信时长为零。这是因为与其分配一段时长给 U_1 进行反向散射, 还不如把这个时长给 U_2 进行反向散射, 从而在不影响节点能量捕获时长、主动通信时长的同时获得更高的传输速率。

最后, 当能量源发射功率足够大时, 例如在发射功率为 40 dBm 时, 相比于无限储能容量的情况

($\alpha_1=0$ s, $\alpha_2=0.592$ 954 s, $\tau_1=0.592$ 954 s, $\tau_2=0.592$ 954 s), 对于有限储能容量的情况 ($\alpha_1=0$ s, $\alpha_2=0.144$ s, $\tau_1=0.1$ s, $\tau_2=0.144$ s), 由于节点 U_i ($i=1,2$) 只需一定的能量采集时长 $\bar{\tau}_i$ 就能充满电, 分配远大于 $\bar{\tau}_i$ 的时间进行反向散射, 虽然能使反向散射传输速率增加, 但不会使节点捕获的能量增加, 不如适当降低反向散射时长而提高主动通信时长(因为这时的主动通信速率比反向散射速率更高), 因此所提方案会将较多时间分配给主动通信。

图 5 (a) 和图 5 (b) 分别显示了无限储能容量情况和有限储能容量情况, 所提的方案与基准方案在不同发射功率下所能达到的最大传输速率对比。首先, 随着发射功率的增大, 本文提出的方案、纯主动通信方案和时间三等分分配方案的

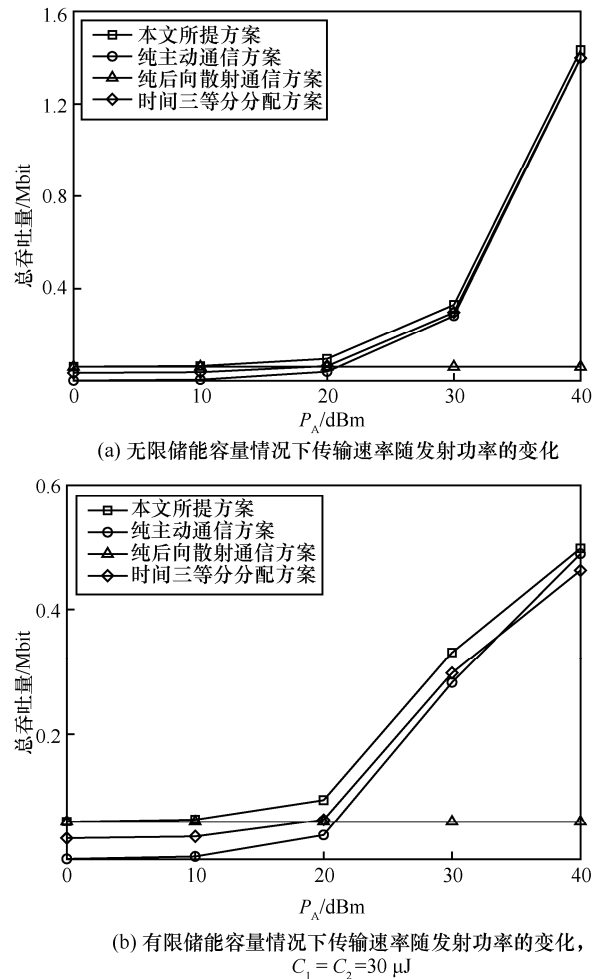


图5 3种方案传输速率随能量源发射功率的变化

总传输速率均不断提高,而反向散射通信不受发射功率的影响。原因如下,对于所提的方案、传统的纯主动通信方案和时间三等分分配方案,越高的能量捕获功率会带来越高的主动通信传输速率,而纯反向散射通信方案中的节点不进行能量捕获,因此与能量源的发送功率无关。其次,可以看出,所提的方案能获得更高的传输速率。最后,随着能量源发送功率高到一定程度,所提方案与纯主动通信方案的性能比较接近,当能量源发送功率很大时,两种方案都由于捕获功率较大,节点用相对较少时间进行能量捕获,用相对较长时间进行主动通信,因此所提方案中反向散射的传输速率远远低于主动通信的传输速率,从而仅比纯主动通信方案的传输速率高一点。

接着研究储能容量大小对系统总传输速率的影响,在发射功率 $P_A=30$ dBm 时进行评估。系统总传输速率随储能容量的变化如图 6 所示,可以看出,本文所提的方案、纯主动通信方案和时间三等分分配方案的总传输速率均先会随着储能容量的增大而增大,因为随着储能容量的增大,有更多的能量可以用于主动通信,以此得到高传输速率。用 E_1 和 E_2 表示本文方案在无限储能容量情况的节点 U_1 和 U_2 的能量捕获量。当储能容量大于或等于 $\max\{E_1, E_2\}$ 时,总传输速率将保持不变。同样,可以看出,反向散射通信不受储能容量大小的影响,且所提方案展示了比基准方案更好的传输速率性能。

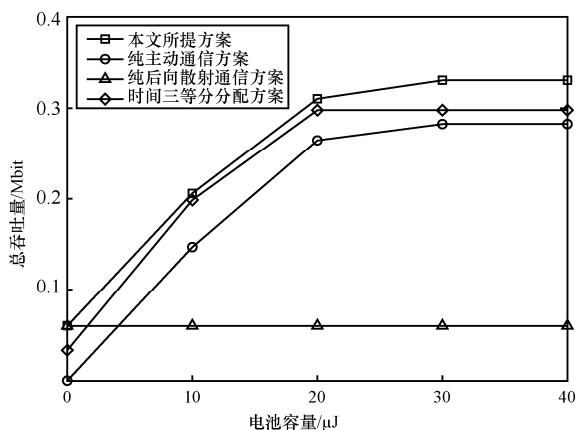


图6 系统总传输速率随储能容量的变化

最后研究反向散射速率对传输速率的影响。

由于涉及两个节点反向散射速率的变化,因此以 X 轴上的反向散射速率 B 为基准,一个节点的反向散射速率为 $B+10$ kbit/s,另一个节点的反向散射速率为 $B-10$ kbit/s。系统总传输速率反向散射速率的变化如图 7 所示,可以看到随着反向散射速率的增大,本文的方案、纯反向散射方案和时间三等分分配方案的总传输速率均会不断增大,而主动通信方案由于不涉及反向散射通信,因此不受反向散射速率影响。并且,随着反向散射速率的增大,本文的方案相比于纯主动通信方案的传输速率提高量越来越大,因为随着反向散射速率的增加,所提方案中反向散射通信方式起到越来越大的作用。

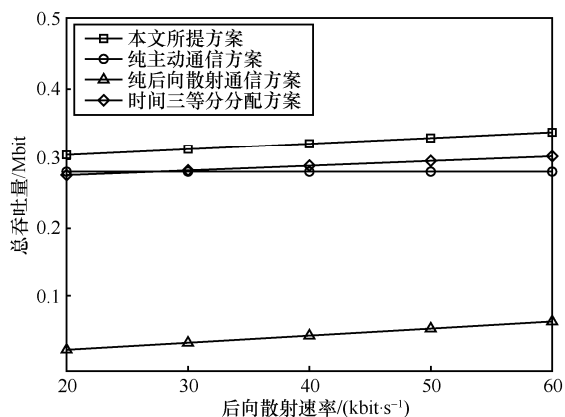


图7 系统总传输速率反向散射速率的变化

5 结束语

本文研究反向散射辅助无线供能网络中两个节点间的信息传输,节点均具有储能约束且可工作于反向散射通信模式和主动通信模式。提出了高效的算法来最优化反向散射时长和主动通信时长,从而最大化总传输速率。与纯主动通信方案和纯反向散射通信方案相比,所提出的方案能有效地提高传输速率。

参考文献:

- [1] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF

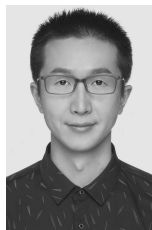


- energy harvesting: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.
- [2] NIYATO D, KIM D I, MASO M, et al. Wireless powered communication networks: research directions and technological approaches[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(6): 88-97.
- [3] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 418-428.
- [4] JU H, ZHANG R. Optimal resource allocation in full-duplex wireless-powered communication network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3528-3540.
- [5] KANG X, HO C K, SUN S M. Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5539-5551.
- [6] CHI K K, CHEN Z B, ZHENG K C, et al. Energy provision minimization in wireless powered communication networks with network throughput demand: TDMA or NOMA? [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(9): 6401-6414.
- [7] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 39-50.
- [8] KELLOGG B, PARKS A, GOLLAKOTA S, et al. Wi-Fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices[C]//Proceedings of the 2014 ACM conference on SIGCOMM. New York: ACM Press, 2014.
- [9] HOANG D T, NIYATO D, WANG P, et al. Ambient backscatter: a new approach to improve network performance for RF-powered cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 3659-3674.
- [10] LU X, NIYATO D, JIANG H, et al. Ambient backscatter-assisted wireless-powered relaying[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(4): 1087-1105.
- [11] RAMEZANI P, JAMALIPOUR A. Throughput maximization in backscatter assisted wireless powered communication networks[C]//Proceedings of ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [12] LYU B, YANG Z, GUI G, et al. Throughput maximization in backscatter assisted wireless powered communication networks[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2017, 100(6): 1353-1357.
- [13] LYU B, YANG Z, GUI G, et al. Wireless powered communication

networks assisted by backscatter communication[J]. IEEE Access, 2017(5): 7254-7262.

- [14] KWAN J C, FAPOJUWO A O. Sum-throughput maximization in wireless sensor networks with radio frequency energy harvesting and backscatter communication[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(17): 7325-7339.
- [15] LYU B, GUO H Y, YANG Z, et al. Throughput maximization for hybrid backscatter assisted cognitive wireless powered radio networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 2015-2024.

[作者简介]



陶杰 (1981-), 男, 浙江省机电设计研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为无线网络。



葛海江 (1980-), 男, 博士, 浙江工业大学计算机科学与技术学院副教授, 主要研究方向为无线供能通信网络。



吴旻媛 (1995-), 女, 浙江工业大学计算机科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为无线供能网络中的节点间通信。

邵奇可 (1977-), 男, 博士, 浙江工业大学计算机科学与技术学院副教授, 主要研究方向为无线传感器网络。

池凯凯 (1980-), 男, 博士, 浙江工业大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络。