

双向协作 OFDM 系统中基于能量定价的功率分配与中继选择算法

庞立华* 李建东 张阳 陈丹

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文研究双向两跳协作多中继正交频分复用(OFDM)系统的网络寿命优化问题。由于网络寿命最大化的问题无法直接求解, 该文提出一种基于对各节点能量定价的次优算法, 即将各子载波的功率分配, 中继及源节点选择进行分步优化。首先利用拉格朗日法求解两个方向上的源与各中继节点配对时的最优功率分配, 使得网络在满足一定吞吐量和发送功率限制的前提下, 消耗能量总价值最小; 然后在所有可能的配对中选择每个方向最优的中继节点; 最后选择损耗能量价值较小的数据流方向。分别考虑了源与目的节点间有无直接链路两种场景, 在有直接链路场景下分析了最大比值合并(MRC)和选择合并(SC)两种分集方式对功率优化的影响。仿真结果表明, 该文提出算法的网络寿命比已有算法有显著提高。

关键词: 正交频分复用(OFDM); 功率分配; 中继选择; 协作通信; 分集合并

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1525-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01312

Energy Pricing Based Power Allocation and Relay Selection Algorithm for Bidirectional Cooperative OFDM Systems

Pang Li-hua Li Jian-dong Zhang Yang Chen Dan

(State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The network lifetime optimization issue is investigated for bidirectional two-hop cooperative Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems recruiting multiple relays. Since direct treatment for the network lifetime maximization formulation is not feasible, a suboptimal strategy is proposed, which takes energy pricing concept for each node into account. Specifically, the power allocation for each subcarrier, relay, and source selection is optimized gradually rather than deriving jointly optimal solutions. Actually, by applying standard Lagrange technique, the optimal power assignment for each source/relay pair, which minimizes the total energy cost subject to limited transmission power and network throughput constraints, can be readily solved. An optimum relay is then selected out accordingly among all possible pairs, finally the direction of traffic flows can be determined by choosing the link with smaller price sacrifice. Two practical scenarios are considered, *i.e.*, a direct source-destination link is available or not while implementing the proposal. Moreover, when the direct link can be fully exploited, the impact of two diversity combining techniques including Maximal Ratio Combining (MRC) and Selective Combining (SC) on the power allocation optimization is theoretically derived. Simulation results indicate that, the network lifetime by utilizing the proposed algorithm outperforms the existing approaches significantly.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Power allocation; Relay selection; Cooperative communications; Diversity combining

1 引言

协作分集技术由于能够扩大传输半径及对抗衰落的影响, 成为近年来无线通信领域的研究热点。

多种协作机制已被提出^[1,2], 其中包括放大转发(Amplify and Forward, AF)和译码转发(Decode and Forward, DF)。AF模式由于不需要对接收信息进行检测和译码, 能缩短信息处理的时延并实现简单, 得到广泛关注。在协作分集网络的某些应用场景中, 两个节点可能需要在中继的帮助下交互信息, 这种双向的通信(bidirectional communication)最近受到普遍关注, 已有多位学者研究了双向协作分集网络协议^[3-5]。

2010-11-29 收到, 2011-03-28 改回

国家自然科学基金(60702057), 国家杰出青年科学基金(60725105), 长江学者和创新团队发展计划(IRT0852), 综合业务网国家重点实验室基金(ISN1003002)和高校基础科研基金(JY10000901030)资助课题

*通信作者: 庞立华 lhpang.xidian@gmail.com

另一方面,当前应用的无线网络,终端多依赖于电池供电,而电池电量有限,如何延长设备使用寿命成为保证信息传输及减轻电池补充负担的关键问题。在传统的点对点通信中,已有多种优化网络寿命的方法被提出^[6-8],如文献[6]提出了一种适用于 Ad hoc 网络的路由算法来延长网络寿命。文献[8]考虑通过寻找高效的能量树使网络寿命最大化。协作网络的寿命优化在近些年也开始受关注^[9-11],文献[9]提出了4种 AF 协议下的中继选择与功率分配策略,分别是基于最小化传输功率(MTP),最大化剩余能量(MRE),最大化能量效率(MEI)及最小化中断概率(MOP)准则,仿真证明,MEI的平均网络寿命性能最佳;文献[11]提出了DF模式下在发端和中继端分别对能量定价,接收端对信息最大比值合并(Maximum Ratio Combining, MRC),使价格函数最低来分配功率和选择中继。

上述研究成果均是基于平坦衰落信道的假设。然而在宽带通信系统中,系统带宽比相干带宽大得多导致频率选择性信道,被广泛应用消除信道频率选择性的技术为 OFDM。基于 OFDM 的中继系统已开始被研究^[12-14]。如文献[12]将 OFDM 系统子载波配对、中继选择、功率分配进行联合建模优化。文献[13]研究了 OFDM 多用户无线局域网(WLAN)的中继选择;文献[14]考虑两个用户相互作为对方的中继,将各自子载波分为两组来交互信息。就笔者所知,协作多中继 OFDM 系统网络寿命的优化依然是一个开放的问题。

本文研究双向两跳协作多中继 OFDM 系统网络寿命优化问题。首先试图对网络寿命最大化进行建模,由于与源和中继节点选择问题相互嵌套,从而无法通过一次计算得到联合最优解。因此笔者考虑将 OFDM 各子载波的功率分配、中继节点选择、源节点选择依次分步考虑得到网络寿命优化的次优解。其中功率分配策略基于对各节点能量的定价,建模为保证网络 QoS(Quality of Service)的前提下,每时间区间内所使用能量的总价值最小的优化问题。当得到各源与中继节点配对的最优功率后,选择消耗能量总价值最小的配对组合作为当前时间区间将要进行传输的链路。笔者同时考虑了源与目的节点间有无直接链路两种场景,并研究了有直接链路场景下接收信息最大比值合并(MRC)和选择合并(Selection Combining, SC)两种方式下的功率分配。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

考虑一个双向的协作分集网络,由两个互为源和目的节点及 L 个中继节点组成,每个节点都工

作在半双工模式。用 S_1 和 S_2 分别表示两个互为源和目的节点, $R_l, l = 1, \dots, L$ 表示第 l 个中继节点,工作在 AF 模式下。假定信道为频率选择性且为块衰落,即在多个时间区间内保持不变或缓变,采用 OFDM 技术并设子载波个数为 N 。每个方向上的传输都由两个时隙组成,每个时隙长为 $T_b/2$,其中 T_b 表示分配的时间区间长度。每个时间区间内仅选择一个方向传输数据。

令源节点在子载波 n 上的发送符号 x_n 满足 $E\{|x_n|^2\} = 1$,其中 $E\{\cdot\}$ 表示数学期望; $h_{s,l,n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{hs,l})$, $h_{l,d,n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{hd,l})$ 分别表示源到中继节点 R_l , R_l 到目的节点在子载波 n 上的信道增益, $h_{s,d,n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{hsd})$ 表示源与目的节点间存在直接链路时的信道增益。各节点处于子载波 n 的噪声功率标记为 N_0 。不失一般性,假定当前时间区间内 S_1 作为源节点, S_2 作为目的节点。在时隙 1 内, S_1 在子载波 $n = 1, \dots, N$ 以功率 $P_{S,n}$ 广播信息;在时隙 2,选定的中继节点 R_m 在相同子载波以功率 $P_{R_m,n}$ 将接收自源节点的信息归一化并转发给目的节点,归一化因子 $g_n = \sqrt{P_{R_m,n} / (P_{S,n} |h_{s,l,n}|^2 + N_0)}$ 。令 $\alpha_n = |h_{s,l,n}|^2 / N_0$, $\beta_n = |h_{l,d,n}|^2 / N_0$ 分别表示源与中继节点 R_l 间及 R_l 与目的节点间发送功率为 1 时的接收信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),将传输带宽归一化,则中继链路的等效接收 SNR 表示为

$$\text{SNR}_n^{\text{no-dc}} = \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{R_l,n} \beta_n}{P_{S,n} \alpha_n + P_{R_l,n} \beta_n + 1} \quad (1)$$

时隙 1 内直接链路的接收 SNR 为 $\text{SNR}_n^{\text{dc}} = P_{S,n} \gamma_n$,其中 $\gamma_n = |h_{s,d,n}|^2 / N_0$ 。

2.2 问题描述

假定网络中各节点依赖于电池供电,且节点 j 电池总电量为 E_j^{tot} , $j = 1, \dots, L+2$,其中 $j = 1, \dots, L$ 表示 L 个中继节点, $j = L+1, L+2$ 表示两个源或目的节点。每个节点慢慢消耗其电量来参与消息的传输。当网络中任意方向上的源节点或所有的中继节点在某时间区间的剩余电量都不足以支持当次通信所需,此网络将不能继续生存。为了保证网络的 QoS 需求,定义网络寿命为直到任一方向上的所有链路都不满足传输速率要求前的网络运行时间^[10,15]

$$LT = \max \{t : \text{Cap}(S_i, t') \geq R_b, i = 1, 2, 0 < t' \leq t\} \quad (2)$$

其中 $\text{Cap}(S_i, t')$ 表示 t' 时刻源节点为 S_i 时的系统容量, R_b 表示目标速率。可将网络寿命表示为离散形式 $LT = m \cdot T_b$,令 $P_j(n, t)$ 表示节点 j 在 t 时刻子载波 n 上所分配的功率,则网络寿命最大化的问题可以被建模为

$$\max_{S_i, R_l, P_j(n, t)} m \quad (3a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t=1}^m \sum_{n=1}^N P_j(n,t) T_b / 2 \leq E_j^{\text{tot}}, \quad j = 1, \dots, L+2 \quad (3b)$$

$$\text{Cap}(S_i(t), R_i^*(t), P_j(n,t)) \geq R_b, \quad j = S_i(t), R_i^*(t), \\ t = 1, \dots, m, \quad n = 1, \dots, N \quad (3c)$$

$$P_j(n,t) \geq 0, \quad \sum_{n=1}^N P_j(n,t) \leq P_{\max}, \quad j = 1, \dots, L+2, \\ t = 1, \dots, m, \quad n = 1, \dots, N \quad (3d)$$

其中 $i = 1, 2$, $R_i^*(t) = \arg \max_{S_i, P_j(n,t)} \{m\}$ 表示各时间区间 S_i 作为源节点时所选的中继节点, P_{\max} 表示各节点发送功率限制。可见网络寿命最大化同时包含功率分配、中继及源节点选择 3 个问题, 它们相互嵌套, 无法通过一次计算得到联合最优解, 因此本文提出一种次优算法, 考虑在各时间区间分步优化。

注意到, 当网络到达了它的寿命, 有些节点可能依然会有电量剩余。所以, 网络寿命不仅依赖于每次传输实际所用能量, 还依赖于各节点的剩余能量。为了平衡的使用网络中各节点的能量, 基于对节点电量的定价提出一种功率分配和中继及源节点选择机制。令 $E_{S,n} = P_{S,n} T_b / 2$ 及 $E_{R_i,n} = P_{R_i,n} T_b / 2$ 分别表示此时间区间内的源节点 S_i 及中继节点 R_i 在其发送时隙内子载波 n 上消耗的能量, 当源节点 S_i 与中继节点 R_i 共同完成一次通信时, 称此源节点与此中继节点配对。首先考虑在某时刻每个方向上的源节点与各中继节点配对时的功率分配, 为使两个时隙内消耗能量的总价值最小, 目标函数可定义为

$$C_{SR_i}(P_{S,n}, P_{R_i,n}) = \rho_S \sum_{n=1}^N E_{S,n} + \rho_{R_i} \sum_{n=1}^N E_{R_i,n} \\ = \left(\rho_S \sum_{n=1}^N P_{S,n} + \rho_{R_i} \sum_{n=1}^N P_{R_i,n} \right) T_b / 2 \quad (4)$$

这里 ρ_S 和 ρ_{R_i} 表示此时间区间内的源节点 S_i 及中继节点 R_i 的能量价格。限定条件仍然考虑网络的 QoS 需求及各节点的发送功率限制。令 $(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*) = \arg \min \{C_{SR_i}(P_{S,n}, P_{R_i,n})\}$ 表示此方向上当 R_i 作为中继节点时的最优功率分配, 则此方向上最优的中继即为 $R^* = \arg \min_{R_i} C_{SR_i}(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*)$, 之后再比较两个方向上消耗能量价值的大小来确定此时间区间由 S_1 还是 S_2 作为源节点。

本文将 3 个问题分步优化, 当仅有其中一个或两个问题的条件满足时, 提出的算法仍适用。例如当网络中仅有一个源(中继)节点时, 只需考虑功率分配和中继(源)选择; 若为 3 节点单向网络, 则只需考虑功率分配。

3 功率分配算法

本节分别考虑源节点与目的节点间有无直接链

路两种场景下的功率分配及最优价格因子的选取问题。

3.1 无直接链路

由式(1), S_1 与 S_2 之间不存在直接链路时子载波 n 的互信息表示为

$$I_n^{\text{no-dc}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{R_i,n} \beta_n}{P_{S,n} \alpha_n + P_{R_i,n} \beta_n + 1} \right) \quad (5)$$

式(5)不是 $P_{S,n}$ 与 $P_{R_i,n}$ 的联合凹函数, 因此我们对 $\text{SNR}_n^{\text{no-dc}}$ 应用高 SNR 近似^[3,16]

$$\text{SNR}_n^{\text{no-dc}} = \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{R_i,n} \beta_n}{P_{S,n} \alpha_n + P_{R_i,n} \beta_n + 1} \approx \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{R_i,n} \beta_n}{P_{S,n} \alpha_n + P_{R_i,n} \beta_n} \quad (6)$$

此 SNR 表达式是 $P_{S,n}$ 与 $P_{R_i,n}$ 的联合凹函数, 从而可得到唯一解。求解任意源节点与中继节点配对时的最优功率分配 $(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*)$ 可以被建模为优化问题

$$(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*) = \arg \min_{P_{S,n}, P_{R_i,n}} \left(\rho_S \sum_{n=1}^N P_{S,n} + \rho_{R_i} \sum_{n=1}^N P_{R_i,n} \right) \quad (7a)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{R_i,n} \beta_n}{P_{S,n} \alpha_n + P_{R_i,n} \beta_n} \right) \geq R_b \quad (7b)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{S,n} \leq P_{\max}, \quad \sum_{n=1}^N P_{R_i,n} \leq P_{\max} \quad (7c)$$

$$P_{S,n} \geq 0, \quad P_{R_i,n} \geq 0 \quad (7d)$$

应用 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[17] 求解可得

$$P_{S,n} = \left[\left(\rho_S \left(1 + \sqrt{(\alpha_n \rho_{R_i}) / (\beta_n \rho_S)} \right) \right)^{-1} (\lambda - \zeta_n) \right]^+ \quad (8a)$$

$$P_{R_i,n} = \left[\left(\rho_{R_i} \left(1 + \sqrt{(\beta_n \rho_S) / (\alpha_n \rho_{R_i})} \right) \right)^{-1} (\lambda - \zeta_n) \right]^+ \quad (8b)$$

其中 $\zeta_n = \left(\sqrt{\alpha_n} + \sqrt{\beta_n \rho_S / \rho_{R_i}} \right)^2 / (\alpha_n \beta_n)$, $[x]^+ = \max\{0, x\}$, λ 是拉格朗日乘子, 可代入式(7b)取等号求得。

3.2 有直接链路

本节考虑 S_1 与 S_2 间存在直接链路时的功率分配。根据接收端对信息的分集合并方式分为 MRC 与 SC 两种情况讨论。

3.2.1 最大比值合并 由 2.1 节的描述, 目的节点在子载波 n 上 MRC 的接收 SNR 为

$$\text{SNR}_n^{\text{MRC}} = P_{S,n} \gamma_n + \text{SNR}_n^{\text{no-dc}} \quad (9)$$

若在子载波 n 不采用协作, 而是由源节点在两个时隙内向目的节点直接传输相同的信息, 假定两时隙内信道衰落慢变化, 则此时在子载波 n 上的等效接收 SNR 为 $\text{SNR}_n^{\text{dir}} = 2P_{S,n} \gamma_n$, 为保证 MRC 的有效性, 需满足 $P_{S,n} \alpha_n P_{R_i,n} \beta_n / (P_{S,n} \alpha_n + P_{R_i,n} \beta_n + 1) > P_{S,n} \gamma_n$ 即 $P_{R_i,n} \beta_n (\alpha_n - \gamma_n) > \gamma_n (P_{S,n} \alpha_n + 1)$ 则

$$\gamma_n < \alpha_n \quad (10)$$

是保证 MRC 比两时隙内直接传输相同信息获得更大增益的必要条件。若各子载波均满足式(10), 则如何找到任意 S_i 与 R_i 配对的最优功率分配方案 $(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*)$ 按式(6)近似后建模为

$$(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*) = \arg \min_{P_{S,n}, P_{R_i,n}} \left(\rho_S \sum_{n=1}^N P_{S,n} + \rho_{R_i} \sum_{n=1}^N P_{R_i,n} \right) \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + P_{S,n} \gamma_n + \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{R_i,n} \beta_n}{P_{S,n} \alpha_n + P_{R_i,n} \beta_n} \right) \geq R_b \quad (11b)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{S,n} \leq P_{\max}, \quad \sum_{n=1}^N P_{R_i,n} \leq P_{\max} \quad (11c)$$

$$P_{S,n} \geq 0, \quad P_{R_i,n} \geq 0 \quad (11d)$$

应用 KKT 条件, 求得可进行功率分配的前提是各子载波需满足

$$\rho_{R_i} / \beta_n < \rho_S / \gamma_n \quad (12)$$

即中继链路单位 SNR 代价比直接链路小。综合考虑, 当各子载波同时满足式(10)和式(12)时, 可进行功率分配:

$$P_{S,n} = \left[\frac{\lambda \cdot \beta_n (\sigma_n + \gamma_n)^2 - \rho_{R_i} \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R_i}} \beta_n \right)}{\rho_{R_i} \cdot \sigma_n (\sigma_n + \gamma_n) \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R_i}} \beta_n \right)} \right]^{2^+} \quad (13a)$$

$$P_{R_i,n} = \left[\frac{\lambda \cdot \beta_n (\sigma_n + \gamma_n)^2 - \rho_{R_i} \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R_i}} \beta_n \right)}{\rho_{R_i} \cdot \sigma_n (\sigma_n + \gamma_n) \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R_i}} \beta_n \right)} \cdot \alpha_n \left(\frac{\rho_S}{\rho_{R_i}} - \frac{\gamma_n}{\beta_n} \right) \right]^{2^+} \quad (13b)$$

其中 $\sigma_n = \sqrt{\rho_S \alpha_n \beta_n / \rho_{R_i} + \rho_S \beta_n \gamma_n / \rho_{R_i} - \alpha_n \gamma_n}$, λ 是拉格朗日乘子, 可代入式(11b)取等号求得。

3.2.2 选择合并 由上节的描述可知, MRC 场景下仅在各子载波均满足式(10)和式(12)两条件时才可进行式(13)所示的功率分配。然而当子载波数 N 较大时, 可能存在某些子载波不满足此两条件, 则式(13)将不再适用。若在接收端对信息进行 SC 可解决此问题。其基本思想是: 时隙 1 由源节点广播信息, 在时隙 2 根据链路状况选择由源节点重复发送或由中继节点转发时隙 1 内源节点的信息。此时的功率优化可描述为计算 $\min \{ C_{SR_i}^{\text{mo-dc}}(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*), C_s^{\text{dir}}(P_{S,n}^*) \}$ 并以小者确定本时间区间由直接链路还是中继链路进行传输, 其中 $C_{SR_i}^{\text{mo-dc}}(P_{S,n}^*, P_{R_i,n}^*)$ 表示仅用中继协作时的能量价格, 可由式(8)得到;

$C_s^{\text{dir}}(P_{S,n}^*) = T_b \rho_S \sum_{n=1}^N P_{S,n}^*$, 其中 $P_{S,n}^*$ 表示两时隙都由源节点直接发送相同信息给目的节点时的最优功率分配, 可建模为

$$P_{S,n}^* = \arg \min_{P_{S,n}} \left(\sum_{n=1}^N P_{S,n} \right) \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2 (1 + 2P_{S,n} \gamma_n) \geq R_b \quad (14b)$$

$$\sum_{n=1}^N P_{S,n} \leq P_{\max}, \quad P_{S,n} \geq 0 \quad (14c)$$

求得

$$P_{S,n} = \left[\lambda - \frac{1}{2\gamma_n} \right]^+ \quad (15)$$

其中 λ 是拉格朗日乘子, 可代入式(14b)取等号求得。

3.3 价格因子的选取

如何选取最优的能量价格因子是非常复杂困难的问题, 可在将来的工作中考虑。由 2.2 节的描述, 网络寿命不仅依赖于每次传输实际所用能量, 还依赖于各个节点的剩余能量。因此本文假定网络中各节点能量价格与本节点剩余能量的 m 次幂成反比^[11]

$$\rho_j = \left(\frac{E_j^{\text{tot}}}{E_j^{\text{rem}}} \right)^m, \quad j = 1, \dots, L+2 \quad (16)$$

其中 E_j^{rem} 表示节点 j 的剩余能量。变量 m 用来保证网络中各节点的能量可以被平衡地使用, 大量仿真结果表明, 在不同场景下, 网络寿命均随 m 取值的增大而增加。然而当 m 取值较大时, 随着各节点剩余能量的减少, 其价格因子取值迅速变大, 使得式(8)或式(13)中 λ 的取值变化剧烈, 导致求解最优功率分配极其困难。为了方便功率求解, 将在仿真中取 $m = 2$ ^[11]。

4 仿真结果与分析

考虑一个 6 节点的网络, 包括两个互为源和目的节点及 $L = 4$ 个中继节点。参考文献[10,11], 取 $\sigma_{\text{hsl}} = \sigma_{\text{hld}} = 1$, 噪声方差 $N_0 = 10^{-4}$, 时间区间 $T_b = 10^{-3}$ s, 各节点总能量 $E_j^{\text{tot}} = 10$ J, 节点最大发送功率 $P_{\max} = 64$ W, 子载波数 $N = 64$ 。考虑 4 种对比算法: (1)功率分配时不考虑能量定价即文中算法的能量价格因子取 $\rho_j = 1, j = 1, \dots, L+2$, 中继及源节点选择与文中方法相同(表示为 CS1); (2)随机选择源和中继节点, 功率分配时用文中算法(表示为 CS2); (3)随机选择源和中继节点, 功率分配时文中算法的能量价格因子取 $\rho_j = 1, j = 1, \dots, L+2$ (表示为 CS3); (4)文献[9]的 MEI 算法在其提出的 4 种网络寿命优化算法中性能最佳, 基本思想是以一次通信过程中消耗能量占本节点剩余能量比例最小为目

标进行功率分配与中继选择。为公平比较，在原算法思想的基础上考虑多载波及源节点选择(表示为 MEI)。

表 1 比较了各算法的开销。不失一般性，假定由节点 S_1 处理数据，本文算法及 MEI 算法中其它各节点需要在通信初始阶段将各自初始能量信息发送给节点 S_1 , S_1 根据获取的信道增益信息作 $2L$ 次(SC 场景下作 $2L+2$ 次)功率计算后选择最优的源与中继节点对，传输结束后，根据传输中所分配的功率值可得到各节点的剩余能量。可见，与其他算法相比，本文算法及 MEI 算法所需开销最大，可在将来的工作中考虑低开销的算法。

下面对本文算法及比对算法作仿真，进行性能评估。其中有直接链路 MRC 场景下，每个样本的产生均满足式(10)与式(12)。

图 1 显示了 S_1 与 S_2 之间不存在直接链路时，本文算法与几种比对方法在不同目标速率下的网络寿命性能。从图中可以看出，本文考虑能量定价的算法性能最佳，尤其在低目标速率下优势更为明显，这是因为目标速率较低时，会有多条链路满足 QoS 要求，当对节点能量定价，会更均衡地使用网络中各节点的能量，从而增长网络寿命。MEI 算法的开销虽与本文算法相同，性能却次于本文算法，如目标速率为 3.4 bps 时其性能比本文算法损失了 6.3%。开销最小的 CS3 算法性能最差，目标速率为 3.4 bps 时其网络寿命性能比本文算法损失了 33.3%。同时可以看到，虽然 CS2 算法随机选择源和中继节点，性能却优于考虑源和中继节点选择的 CS1，这充分证明了能量定价的优越性。

图 2 仿真了 S_1 与 S_2 之间存在直接链路且 $\sigma_{\text{hsd}} = 1$ ，接收端对信息 MRC 时，本文所提算法与几种比对方法在不同目标速率下的网络寿命性能。与无直接链路时相比，由于此时接收 SNR 的增大，相同目标速率下的网络寿命明显增长，如目标速率为 4.2 bps 时，本文算法在无直接链路时的网络寿命大概为 0.65×10^4 个时间区间，而有直接链路时的网络寿

命大概是 2.2×10^4 个时间区间。图中其它各曲线的趋势与图 1 类似。图 3 演示了 S_1 与 S_2 之间存在直接链路且 $\sigma_{\text{hsd}} = 1$ ，接收端对信息 SC 时，几种功率分配与中继选择算法在不同目标速率下的网络寿命性能。从图中明显可以看出，本文算法与 MEI 算法的性能曲线基本重合，CS1 的网络寿命性能在目标速率为 3.6 bps 时比本文算法仅损失了 3%，随着目标速率的增大也逐渐逼近于本文算法，这是因为此时直接链路信道状况与中继链路信道状况相当，而直接链路的信息是两次传输的叠加，也就是此时两个时隙内直接链路等效 SNR 比中继链路等效 SNR 大得多，从而直接链路传输效果好，接收端对信息选择合并时基本都是只选择直接链路，使得定价的优势无法发挥。下面我们看一下，当直接链路信道状况变差时，接收端 MRC 及 SC 的网络寿命性能是否有所改变。

图 4 显示了 S_1 与 S_2 之间存在直接链路且 $\sigma_{\text{hsd}} = 0.5$ ，接收端 MRC 时，几种算法在不同目标速率下的网络寿命性能。可以看出，目标速率为 4.2 bps 时，此时本文算法的网络寿命约为 1.5×10^4 个时间区间，优于图 1 的结果，但低于图 2，这与我们的直观理解是吻合的。图 5 表示 S_1 与 S_2 之间存在直接链路且 $\sigma_{\text{hsd}} = 0.5$ ，接收端 SC 时的网络寿命性能。与图 3 相比，此时本文所提算法的优势在低目标速率下非常明显，这是因为此时直接链路的性能比图 3 中变差，中继链路被选择的机会增多，从而定价的优势显现。

另外，从图中我们还发现，考虑能量定价的曲线总是在低目标速率较下性能较好，随着目标速率的增大，曲线下降很快，而不考虑定价的曲线下降趋势则较平缓。因此，本文提出的算法更适用于有多条链路满足 QoS 要求的网络。

5 结束语

在双向通信的场景下，本文基于对网络节点能量的定价提出了一种优化网络寿命的次优算法。首

表 1 算法开销比较

	CS1		CS2		CS3		MEI		本文算法	
是否需要初始能量信息交互	否		是		否		是		是	
是否需要获取所有信道增益信息	是		仅需 h_{s_i, r_n} , $i = 1, 2$, R_i 为随机选择的中继节点		同 CS2		是		是	
一次通信过程中计算功率次数	no_dc/MRC	SC	no_dc/MRC	SC	no_dc/MRC	SC	no_dc/MRC	SC	no_dc/MRC	SC
	2L	2L+2	1	2	1	2	2L	2L+2	2L	2L+2

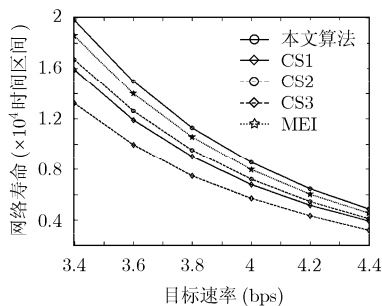


图 1 没有直接链路时, 各算法网络寿命与目标速率关系

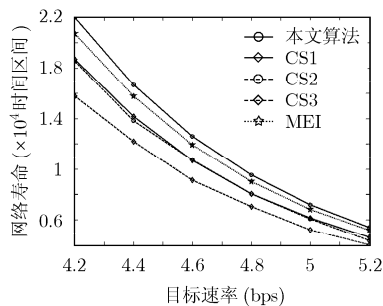


图 2 $\sigma_{\text{hsd}} = 1$, 接收端 MRC 时各算法网络寿命与目标速率关系

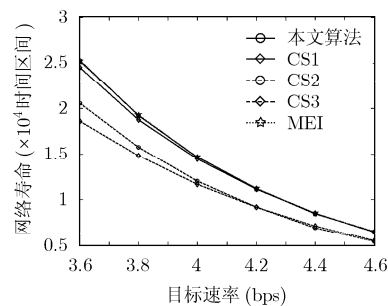


图 3 $\sigma_{\text{hsd}} = 1$, 接收端 SC 时各算法网络寿命与目标速率关系

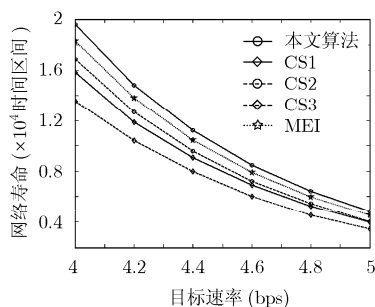


图 4 $\sigma_{\text{hsd}} = 0.5$, 接收端 MRC 时各算法网络寿命与目标速率关系

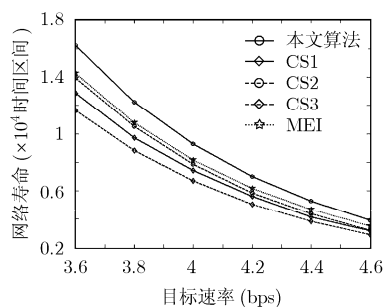


图 5 $\sigma_{\text{hsd}} = 0.5$, 接收端 SC 时各算法网络寿命与目标速率关系

先对各源与中继节点配对时的功率分配建模, 目标是满足一定 QoS 及节点发送功率限制的条件, 使一个时间区间内所消耗能量的总价值最小, 可将其转化为凸优化问题; 然后对两个源节点, 分别以一个时间区间内所消耗能量的总价值最小为目标选择最佳中继节点; 再比较两个源节点与各自最佳中继节点配对时消耗能量的总价值, 选择价值小者作为本时间区间将要进行传输的链路。由于将 3 个问题分步考虑, 当仅有其中一个或两个问题的条件满足时, 提出的算法仍适用。分别考虑了源与目的节点间有无直接链路两种场景, 及有直接链路场景下目的节点对接收信息 MRC 及 SC 两种分集方式下的功率优化。仿真表明, 本文提出算法的网络寿命在各场景中比已有算法都有所提高, 尤其在目标速率不太高, 网络中有多条链路满足 QoS 要求时, 本文算法的性能优势更明显。同时, 仿真中可以看出, 有直接链路接收端 MRC 场景下的性能最好, 这与我们的直观理解吻合, 然而当所使用的子载波数较多, 接收端 MRC 时可能会有某些子载波不满足式 (10) 和式 (12) 的功率分配条件, 使得算法的适用场景受限。此外, 本文算法信息交互的开销较大。因此, 笔者将来会考虑各子载波独立选择中继节点时的功率分配, 子载波配对及如何降低算法开销等问题。

参考文献

[1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation

diversity. Part I, II. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927–1948.

- [2] Laneman J, Tse D, and Wornell G. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062–3080.
- [3] Yi Z and Kim I. An opportunistic-based protocol for bidirectional cooperative networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(9): 4836–4847.
- [4] Ju M and Kim I. Joint relay selection and opportunistic source selection in bidirectional cooperative diversity networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(6): 2885–2897.
- [5] 唐伦, 刘通, 陈前斌, 曾孝平. Two-way 中继系统协作节点选择及功率分配策略. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2077–2082. Tang Lun, Liu Tong, Chen Qian-bin, and Zeng Xiao-ping. Cooperative node selection and power allocation strategy in two-way relay system. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2077–2082.
- [6] Varaprasad G. Lifetime enhancement routing algorithm for mobile Ad hoc networks. *IET Communications*, 2011, 5(1): 119–125.
- [7] Bicakci K, Ibrahim E, and Tavli B. Lifetime bounds of wireless sensor networks preserving perfect sink unobservability. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 205–207.
- [8] Marks R, Das A, and El-Sharkawi M. Maximizing lifetime in

- an energy constrained wireless sensor array using team optimization of cooperating systems. Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks, Hawaii, USA, 2002: 371-376.
- [9] Huang W, Hong Y, and Kuo C. Lifetime maximization for amplify-and forward cooperative networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1800-1805.
- [10] Haijiaghayi M, Dong M, and Liang B. Maximizing lifetime in relay cooperation through energy-aware power allocation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(8): 4354-4366.
- [11] Ke F, Feng S, and Zhuang H. Relay selection and power allocation for cooperative network based on energy pricing. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(5): 396-398.
- [12] Dang W, Tao M, Mu H, and Huang J. Subcarrier-pair based resource allocation for cooperative multi-relay OFDM systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(5): 1640-1649.
- [13] Siriwongpairat W, Sadek A, and Liu K. Cooperative communications protocol for multiuser OFDM networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2430-2435.
- [14] Yatawatta S and Petropulu A. A multiuser OFDM system with user cooperation. Conference Record of the Thirty-eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, California, Nov. 2004: 319-323.
- [15] Zhou Z, Zhou S, Cui J, and Cui S. Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(8): 3066-3078.
- [16] Hammerstrom I and Wittneben A. Power allocation schemes for amplify-and-forward MIMO-OFDM relay links. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 2798-2802.
- [17] Boyd S and Vandenberghe L. Convex Optimization. United Kingdom, Cambridge University Press, Seventh Printing, 2009, Chapter 5.
- 庞立华：女，1985年生，博士生，研究方向为协作通信技术、通信信号处理。
- 李建东：男，1962年生，博士，教授，博士生导师，从事移动通信、软件无线电、认知无线电、自组织网络、宽带无线IP技术等方面的研究。
- 张阳：男，1984年生，博士生，研究方向为多天线正交频分复用系统中的信道估计、干扰消除与检测技术。
- 陈丹：男，1984年生，博士生，研究方向为多天线自组织网络中的多址接入技术。