

基于能量定价的协作 OFDM 系统 网络寿命优化算法

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及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文研究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. 为使网络寿命最大化, 基于对节点能量的定价提出一种穷举算法, 即首先列举所有的子载波配对与中继选择联合决策; 在每种决策下利用拉格朗日法求解最优功率分配, 使得网络在满足一定吞吐量的前提下消耗能量总价值最小; 然后选择损耗能量价值最小的联合决策. 由于穷举算法受到计算复杂度的限制, 进而基于子载波的单位信噪比(SNR)代价将中继选择与子载波配对分步优化, 提出两种低复杂度算法. 仿真结果表明, 本文各算法的网络寿命性能比已有算法均有显著提高.

关键词: 正交频分复用 (OFDM); 功率分配; 中继选择; 子载波配对; 协作通信

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 04-0703-0

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.04.013

Energy Pricing Based Network Lifetime Optimization Algorithm for Cooperative OFDM Systems

PANG Li-hua, LI Jian-dong, ZHANG Yang, CHEN Dan

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

Abstract: This paper investigates the network lifetime optimization issue for two-hop cooperative Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems recruiting multiple relays. In order to maximize the network lifetime, we propose an exhaustive algorithm which takes energy pricing concept into account. Specifically, all possible combinatorial strategies of subcarrier pairing and relay selection are firstly formulated and by applying standard Lagrange technique, the optimal power assignment which minimizes the total energy consumption subject to network throughput constraints, can be theoretically derived. Accordingly, the candidate with smaller energy sacrifice is designated as the optimum solution. Since the real world applications of the proposed approach are restricted by prohibitively high computational complexity, two low complexity alternatives are consequently designed based on the price of unit Signal-to-Noise Ratio (SNR). The essence of these methods is that relay selection and subcarrier pairing are optimized in two steps. Simulation results indicate that, the network lifetime performance of the proposed algorithms significantly outperforms the existing schemes.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); power allocation; relay selection; subcarrier pairing; cooperative communication

1 引言

协作中继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. 被广泛应用的中继策略^[1,2]包括放大转发 (Amplify and Forward, AF) 和译码转发 (Decode and Forward, DF), 前者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.

为使协作中继技术的优势得以充分发挥, 对系统功率的合理分配是必要的. 文献[3~7]均考虑通过优化发送功率提高系统性能, 如最大化系统瞬时速率或最小化误比特率等. 在无线网络的某些应用中, 节点依赖于电池供电, 而电池电量有限, 属于稀缺资源, 此时除提高系统性能外, 如何节省能量, 使得网络生存的时间更长成

为保证信息传输及减轻电池补充负担的关键问题. 电池供电网络的寿命优化问题已开始被关注^[8-12], 文献[8]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; Hajiaghayi等^[9]研究了AF协议下所有中继节点均被使用且仅对中继节点作功率分配时的网络寿命优化; Ke等^[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.

上述网络寿命优化的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正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). 基于OFDM的中继系统已开始被研究^[13-15]. 在传统的协作OFDM系统中, 源节点在某子载波发送的信息将会被中继节点在相同子载波转发, 这种策略实现简单, 却没有充分利用不同子载波间的信道增益差异. 文献[3]和[16]考虑了子载波的配对, 其基本思想是: 源节点在信道增益大(小)的子载波发送的信息将会被中继节点在信道增益大(小)的子载波转发. 受到以上工作的启发, 本文沿用子载波配对的思想研究网络寿命优化问题. 就笔者所知, 基于子载波配对的协作多中继OFDM系统网络寿命的优化依然是一个开放的问题.

为使网络寿命最大化, 网络资源的分配必须使得网络寿命耗尽时的剩余能量及每次通信所使用的能量最小. 笔者首先基于对节点能量的定价提出一种EALM+MEC算法, 即穷举所有子载波配对与中继选择联合决策, 在每种决策下求解最优功率分配, 然后选择最优的联合决策. 其中功率分配建模为保证网络QoS(Quality of Service)的前提下, 使每时间区间内所使用的能量总价值最小的优化问题. 由于EALM+MEC算法的计算复杂度较高, 笔者进而基于子载波的单位信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)代价将中继选择与子载波配对分步优化, 提出两种低复杂度算法, 称为JRSSP+MEC算法与SPRS+MEC算法, 它们分别考虑各子载波独立选择中继节点与所有子载波选择同一中继节点时的功率分配.

2 问题描述

考虑一个多中继的协作OFDM系统, 如图1所示, 源节点S通过L个中继节点的协作与目的节点D通信, 中继节点 R_l 采用AF协议并工作在半双工模式. 每跳的信道都由N个近似平坦衰落的子信道组成. 信息

的传输分为两个时隙, 每个时隙长为 $T_b/2$, 其中 T_b 表示一个时间区间长度. 在时隙1, 源节点S在子载波 $n=1, \dots, N$ 以功率 $P_{S,n}$ 广播信息; 在时隙2, 我们引入二进制的 μ_n 表示第一跳的子载波n是否选择中继节点的协助, $\mu_n=0$ 表示子载波n不选择中继节点的协助而是由源节点以相同功率在子载波 n' 重复传输时隙1的信息, $\mu_n=1$ 表示子载波n选择一个中继节点帮助源节点完成传输, 被选择的中继节点对接收自子载波n的信息归一化并在子载波 n' 以功率 $P_{l,n'}$ 转发给目的节点, n' 与n可能并不相同, 称子载波n与 n' 配对. 令 $p_{n,n'} \in \{0, 1\}$ 表示子载波的配对方式, $p_{n,n'}=1$ 表示子载波n与 n' 相配对而 $p_{n,n'}=0$ 表示n与 n' 未配对. 类似的, 令 $q_{l,n} \in \{0, 1\}$ 表示中继选择决策. 为避免干扰, 模型必须满足以下两个条件:

(1) 在两个时隙内, 仅允许一对一的子载波配对, 满足

$$\sum_{n=1}^N p_{n,n'} = 1 \quad \forall n', \quad \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} = 1 \quad \forall n$$

(2) 子载波n仅能选择由源节点重复传输或由一个中继节点协助完成通信,

$$(1 - \mu_n) + \mu_n \sum_{l=1}^L q_{l,n} = 1 \quad \forall n$$

令 $h_{s,l,n}$, $h_{s,d,n}$ 与 $h_{l,d,n'}$ 分别表示链路 $S \rightarrow R_l$, $S \rightarrow D$ 在子载波n及链路 $R_l \rightarrow D$ 在子载波 n' 的循环对称复高斯信道系数. 不失一般性, 假定各子载波上的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)相互独立并令功率谱密度均为 N_0 . 目的节点对各子载波对上的接收信息MRC. 为方便表示, 我们将传输带宽归一化. 对于子载波n, 若 $\mu_n=0$, 其互信息表示为

$$I_{S,n} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{S,n} |h_{s,d,n}|^2}{N_0} + \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} \frac{P_{S,n} |h_{s,d,n'}|^2}{N_0} \right) \quad (1)$$

其中因子1/2表示每符号的传输占用两个时隙. 若 $\mu_n=1$, 其互信息由式(2)表示.

将式(1)与式(2)结合起来, 则各子载波独立决策中继选择的互信息可以表示为式(3).

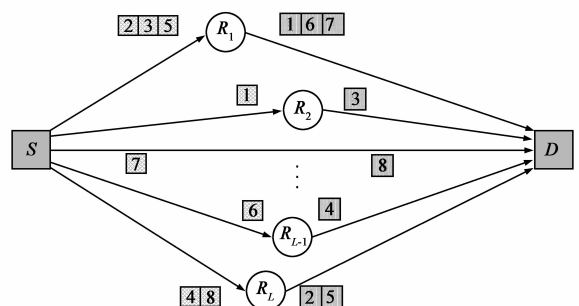


图1 多中继协作OFDM系统模型

$$I_{R,n} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{S,n} |h_{s,d,n}|^2}{N_0} + \frac{\sum_{l=1}^L q_{l,n} \frac{P_{S,n} |h_{s,l,n}|^2}{N_0} \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} q_{l,n} \frac{P_{l,n'} |h_{l,d,n'}|^2}{N_0}}{\left(1 + \sum_{l=1}^L q_{l,n} \frac{P_{S,n} |h_{s,l,n}|^2}{N_0} + \sum_{l=1}^L \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} q_{l,n} \frac{P_{l,n'} |h_{l,d,n'}|^2}{N_0} \right)} \right) \quad (2)$$

$$I_n = (1 - \mu_n) I_{S,n} + \mu_n I_{R,n} \quad (3)$$

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} , $j \in \{S\} \cup \{R_l\}$. 每个节点慢慢消耗其电量来参与消息的传输. 当网络中源或所有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链路均不满足传输速率要求前的网络运行时间^[9]

$$LT = \max \{ t : C(t') \geq R_b, 0 < t' \leq t \} \quad (4)$$

其中 $C(t')$ 表示源节点 S 在时间 t' 的传输速率. R_b 表示系统的传输速率要求. 可将网络寿命表示为离散形式 $LT = \rho \cdot T_b$. 若以 $\Delta = \{P_{S,n}(t), P_{l,n'}(t), p_{n,n'}(t), \mu_n(t), q_{l,n}(t)\}$ 表示未知集合,网络寿命最大化的问题可以被描述为

$$\begin{aligned} & \max_{\Delta} \rho \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \frac{1}{2} T_b \sum_{t=1}^{\rho} \sum_{n=1}^N [1 + (1 - \mu_n(t))] P_{S,n}(t) \leq E_S^{tot} \\ \frac{1}{2} T_b \sum_{t=1}^{\rho} \sum_{n'=1}^N P_{l,n'}(t) \leq E_{R_l}^{tot} \\ \sum_{n=1}^N C(\Delta) \geq R_b \\ P_{S,n}(t) \geq 0, P_{l,n'}(t) \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

这里一个新的变量 t 被引入 $P_{S,n}, P_{l,n'}, p_{n,n'}, \mu_n$ 和 $q_{l,n}$ 来表示它们对时间的依赖性. 可见,为了求解式(5)所示的优化问题,需要获知整个网络存活期内所有链路的信道状态信息(Channel State Information, CSI). 而对于时变信道而言,将来的 CSI 是不可获知或不可估计的. 而且严格来讲,式(5)是一个混合整数规划问题并已被证明为 NP-hard^[17]. 因此,我们必须致力于寻找不依赖于时间的次优算法.

3 网络寿命优化算法

3.1 EALM+MEC 算法

仔细分析我们的问题发现,如果获知了 $\{p_{n,n'}\}$, $\{\mu_n\}$ 与 $\{q_{l,n}\}$, 原问题即可简化为以 $\{P_{S,n}\}$ 与 $\{P_{l,n'}\}$ 为未知量的近似凸优化问题. 因此网络寿命的优化可通

$$\begin{aligned} & \min_{\{P_{S,n}, \{P_{l,n'}\}} \sum_{n=1}^N \left[2(1 - \mu_n) \rho_S P_{S,n} + \mu_n \left(\rho_S P_{S,n} + \rho_{R_l} \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} P_{l,n'}^* \right) \right] \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \left((1 - \mu_n) I_{S,n} + \mu_n \log_2 \left(1 + P_{S,n} \gamma_{1,n} + \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{l,n'}^* \beta_{n'}}{P_{S,n} \alpha_n + P_{l,n'}^* \beta_{n'}} \right) \right) \geq R_b \\ P_{S,n} \geq 0, P_{l,n'}^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

过分步完成. 令 $\gamma_{1,n} = |h_{s,d,n}|^2 / N_0$ 表示时隙 1 源节点发送功率为 1 时目的节点在子载波 n 的接收 SNR, $\gamma_{2,n'} = \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} \gamma_{1,n'}$ 表示时隙 2 源节点发送功率为 1 时目的节点在与子载波 n 配对子载波上的接收 SNR, 则 $\mu_n = 0$ 时的互信息式(1)可简化为

$$I_{S,n} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + P_{S,n} (\gamma_{1,n} + \gamma_{2,n'})) \quad (6)$$

令 $l_n^* = \{R_l : q_{l,n} = 1, l = 1 \cdots L\}$ 表示第一跳的子载波 n 所选择的中继节点, $\alpha_n = |h_{s,l_n^*,n}|^2 / N_0$ 表示源节点发送功率为 1 时子载波 n 所选中继节点 $R_{l_n^*}$ 在此子载波的接收 SNR, $\beta_{n'} = \sum_{n'=1}^N p_{n,n'} |h_{l_n^*,d,n'}|^2 / N_0$ 表示子载波 n 所选中继节点 $R_{l_n^*}$ 发送功率为 1 时目的节点在与 n 配对子载波上的接收 SNR, 则 $\mu_n = 1$ 时的互信息式(2)可简化为

$$I_{R,n} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + P_{S,n} \gamma_{1,n} + \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{l_n^*,n'} \beta_{n'}}{P_{S,n} \alpha_n + P_{l_n^*,n'} \beta_{n'} + 1} \right) \quad (7)$$

为了使 $I_{R,n}$ 成为 $P_{S,n}$ 与 $P_{l_n^*,n'}$ 的联合凹函数,我们对式(7)中各子载波中继链路的等效接收 SNR 应用高 SNR 近似^[7,18]

$$\frac{P_{S,n} \alpha_n P_{l_n^*,n'} \beta_{n'}}{P_{S,n} \alpha_n + P_{l_n^*,n'} \beta_{n'} + 1} \approx \frac{P_{S,n} \alpha_n P_{l_n^*,n'} \beta_{n'}}{P_{S,n} \alpha_n + P_{l_n^*,n'} \beta_{n'}} \quad (8)$$

由上节的描述可知,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. 受文献[11]能量定价思想的启示,我们也将网络中各节点建模为能量售卖者,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

$$\rho_j = \rho_0 (E_j^{tot} / E_j^{rem})^m, j \in \{S\} \cup \{R_l\} \quad (9)$$

其中 E_j^{rem} 表示网络寿命耗尽时节点 j 的剩余能量, ρ_0 表示网络中各节点最初的能量价格.

我们首先研究一种 EALM (Exhaustive Approach for Lifetime Maximization) + MEC (Minimum Energy Cost) 算法,即,先穷举所有可能的子载波配对与中继选择联合决策 $\{p_{n,n'}, \mu_n, q_{l,n}\}$, 获知 $\{p_{n,n'}, \mu_n, q_{l,n}\}$ 后的网络寿命优化问题可以被重新建模为式(10).

其中目标函数表示的是在一个时间区间内各节点所耗费的能量的价格 (Energy Cost, EC). 可以证明, 式(10)为经典的凸优化问题, 其求解可分为两步:

(1) $\mu_n = 1$ 时, 应用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[19], 求得: 各子载波对满足

$$\frac{\rho_{R'_i}}{\beta_{n'}} < \frac{\rho_S}{\gamma_{1,n}} \quad (11)$$

即中继链路单位 SNR 代价比直接链路小时, 可进行如式(12)所示的功率分配.

$$P_{S,n} = \left[\frac{\lambda \cdot \beta_{n'} (\sigma_n + \gamma_{1,n})^2 - \rho_{R'_i} \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R'_i}} \beta_{n'} \right)^2}{\rho_{R'_i} \cdot \sigma_n (\sigma_n + \gamma_{1,n}) \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R'_i}} \beta_{n'} \right)} \right]^+,$$

$$P_{l,n',n'}^* = \left[\frac{\lambda \cdot \beta_{n'} (\sigma_n + \gamma_{1,n})^2 - \rho_{R'_i} \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R'_i}} \beta_{n'} \right)^2}{\rho_{R'_i} \cdot \sigma_n (\sigma_n + \gamma_{1,n}) \left(\sigma_n + \frac{\rho_S}{\rho_{R'_i}} \beta_{n'} \right)} \cdot \alpha_n \left(\frac{\rho_S}{\rho_{R'_i}} - \frac{\gamma_{1,n}}{\beta_{n'}} \right) \right]^+ \quad (12)$$

其中 $\sigma_n = \sqrt{(\alpha_n + \gamma_{1,n}) \beta_{n'} \rho_S / \rho_{R'_i} - \alpha_n \gamma_{1,n}}$, $[x]^+ = \max\{0, x\}$, λ 是拉格朗日乘子, 可与式(13)同时代入式(10)的限制条件取等号求得. 而当子载波 n 不满足式(11)时可重新令 $\mu_n = 0$;

(2) $\mu_n = 0$ 时, 应用 KKT 条件求得

$$P_{S,n} = \left[\frac{\lambda}{\rho_S} - \frac{1}{(\gamma_{1,n} + \gamma_{2,n'})} \right]^+ \quad (13)$$

若网络中的 N 个子载波对均可在时隙 2 独立选择 L 个中继节点或源节点, EALM + MEC 算法需要根据式(12)与式(13)计算 $N! (L+1)^N$ 次功率才能找到最佳策略. 而由于 $\mu_n = 1$ 时当子载波 n 不满足式(11)即会令其在时隙 2 选择源节点重复传输, 若所有子载波均不满足式(11)则仅需计算 $N!$ 次功率即可找到最佳策略, 因此 EALM + MEC 算法在一次通信中需要计算 $N! \leq d \leq N! (L+1)^N$ 次功率. 则当网络中的中继节点或子载波数较多时, 其计算复杂度将处于不可忍受的范围, 因此迫切需要寻求能降低复杂度的算法.

3.2 低复杂度算法

3.2.1 JRSSP + MEC 算法

值得注意的是, EALM + MEC 算法的高复杂度是由于其先分配发送功率再选择子载波配对与中继选择决策导致的. 如果能首先优化 $\{p_{n,n'}, \mu_n, q_{l,n}\}$ 再考虑功率分配即可减少功率计算次数. 由式(11)的限制条件可见, 在基于能量定价的协作网络中, 单位 SNR 代价是选择中继节点时需要考虑的因素, 同时文献[20~22]中避

免链路瓶颈的思想也将被沿用. 我们将 JRSSP (Joint Relay Selection and Subcarrier Pairing) + MEC 算法描述如下:

- S1 令 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{L \times N}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{L \times N}$ 分别表示发送功率为 1 时 L 个中继节点在 N 个子载波第一跳与第二跳链路的接收 SNR. 令 $\mathbf{E} = [E_1, E_2, \dots, E_L]^T$ 与 $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_L]^T$ 分别表示矩阵 \mathbf{A} 各行的最大值及其在 \mathbf{A} 中所对应的子载波. $\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_L]^T$ 与 $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_L]^T$ 表示矩阵 \mathbf{B} 的相应值*. $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{L \times N}$ 表示矩阵 \mathbf{B} 每行元素由大到小排序后的结果. 初始化 $\mathbf{C} = [C_1, \dots, C_N] = [\gamma_{1,1}, \dots, \gamma_{1,N}]$, $\mathbf{D} = \{1, 2, \dots, N\}$, $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \dots, \mu_N] = \mathbf{0}$.
- S2 若 $\mathbf{D} \neq \emptyset$, 继续执行; 否则, 转向 S7;
- S3 由于选择每个中继节点的平均子载波数为 $\lceil N/L \rceil$, 其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整, 可在此假定第一跳的子载波 n 与第二跳的子载波 $n' = \lceil N/(2L) + 1 \rceil$ 相配对, 则对于 $n = 1, \dots, N$, $l = 1, \dots, L$, 计算 $\theta_{l,n} = \max\{\rho_S/\mathbf{A}(l, n), \rho_{R'_i}/\mathbf{W}(l, n')\}^{**}$, 子载波 n 选择的中继节点即为 $l_n^* = \arg \min_{i=1, \dots, L} \{\theta_{i,n}\}$.
- S4 令 $n = U_{l_n^*}$, $n' = V_{l_n^*}$, 则 $\alpha_n = \mathbf{A}(l_n^*, n)$, $\beta_{n'} = \mathbf{B}(l_n^*, n')$, 分别计算 $\rho_{R'_i}/\beta_{n'}$ 与 $\rho_S/\gamma_{1,n}$ 并判断是否满足式(11). 若满足, 令 $\mu_n = 1$ 继续执行; 否则, 转向 S6;
- S5 令 $p_{n,n'} = 1$, $q_{l,n}^* = 1$. 对于 $l = 1, \dots, L$, 令 $\mathbf{A}(l, n) = 0$, $\mathbf{B}(l, n') = 0$, $C_n = 0$. 更新 $\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}, \mathbf{D} = \mathbf{D} - \{n\}$, 转向 S2.
- S6 令 $\mu_n = 0$, $n' = \arg \max_{\eta=1, \dots, N} C_\eta$, 则 $\gamma_{2,n'} = \gamma_{1,n'}$. 转向 S5.
- S7 根据式(12)和式(13)计算功率.

可见, JRSSP + MEC 算法在求解过程中仅需一次功率优化, 与 EALM + MEC 算法相比极大降低了计算复杂度.

3.2.2 SPRS + MEC 算法

根据上节的描述, JRSSP + MEC 算法需要各子载波独立选择中继节点, 若子载波数较多, 可能导致网络中的所有节点均参与信息传输. 为使通信在网络的局部范围内完成, 本节考虑所有 $\mu_n = 1$ 的子载波选择同一个中继节点, 子载波配对后作 L 次功率计算, 再选择消耗能量价格最小的中继. 我们将 SPRS (Subcarrier Pairing and then Relay Selection) + MEC 算法描述如下:

- S1 令 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{L \times N}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{L \times N}$ 分别表示发送功率为 1 时 L 个中继节点在 N 个子载波第一跳与第二跳链路的接收 SNR. 令 $\mathbf{E} = [E_1, E_2, \dots, E_L]^T$ 与 $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_L]^T$ 分别表示矩阵 \mathbf{A} 各行的最大值及其在 \mathbf{A} 中所对应的子载波. $\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_L]^T$ 与 $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_L]^T$ 表示矩阵 \mathbf{B} 的相应值. 初始化 $\mathbf{C} = [C_1, \dots, C_N] = [\gamma_{1,1}, \dots, \gamma_{1,N}]$, $\mathbf{D} = \{1, 2, \dots, N\}$, $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{0}^{L \times N}$, $l = 1$.
- S2 若 $l \leq L$, 继续执行; 否则, 转向 S8;
- S3 若 $\mathbf{D} \neq \emptyset$, 继续执行; 否则, 转向 S7;
- S4 令 $n = U_l$, $n' = V_l$, 则 $\alpha_n = \mathbf{A}(l, n)$, $\beta_{n'} = \mathbf{B}(l, n')$, 分别计算 $\rho_{R'_i}/\beta_{n'}$

* 根据文献[16]的结论, 子载波的最佳配对方式是根据信道增益由大到小的顺序进行匹配.

** $\theta_{l,n}$ 可以看作是中继节点 R_l 在子载波 n 与 n' 两跳链路基于单位 SNR 代价的瓶颈.

与 $\rho_S/\gamma_{1,n}$ 并判断是否满足式(11). 若满足, 令 $\mu(l, n) = 1$ 继续执行; 否则, 转向 S6;

S5 令 $p_{n,n'}^l = 1, \mathbf{A}(l, n) = 0, \mathbf{B}(l, n') = 0, C_n = 0$. 更新 $E_l, F_l, U_l, V_l, \mathbf{D} = \mathbf{D} - \{n\}$, 转向 S3.

S6 令 $\mu(l, n) = 0, n' = \arg \max_{\eta=1, \dots, N} C_\eta$, 则 $\gamma_{2,n'} = \gamma_{1,n'}$. 转向 S5.

S7 根据式(12)和式(13)优化功率 $\{P_{S,n}^l, P_{l,n'}^l\}$ 并计算选择当前中继节点 R_l 的能量代价 EC_l . 重新赋值 $\mathbf{C} = [C_1, \dots, C_N] = [\gamma_{1,1}, \dots, \gamma_{1,N}]$, $\mathbf{D} = \{1, 2, \dots, N\}$, 令 $l = l + 1$ 并转向 S2.

S8 $l^* = \arg \max_{l=1, \dots, L} EC_l$ 即为所选择的中继节点, 则对于子载波 $n = 1, \dots, N$, $\mu_n = \mu(l^*, n)$, $p_{n,n'}^* = p_{n,n'}^{l^*}$, 最优功率值为 $\{P_{S,n}^*, P_{l^*,n'}^*\}$.

4 仿真结果与分析

构建一个无线网络, 包括 1 个源节点, 1 个目的节点及 L 个中继节点. 参数选择参考文献[9, 11], 令时间区间 $T_b = 10^{-3}$ s, 各节点间的噪声功率 $N_0 = 10^{-3}$, 信道系数 $h_{s,l,n}, h_{l,d,n'}$ 与 $h_{s,d,n}$ 是均值为零方差分别为 $[1, 1, 0.5]$ 的随机变量, $\rho_0 = 1$. 无特别说明时, 取 $L = 4$, 各节点初始能量 $E_j^{tot} = 1$ Joule, 子载波数 $N = 64$. 通过仿真评估文中算法的性能并分析各参数对性能的影响. 考虑的比对算法包括文献[8]中提出的 MTP (Minimum Transmission Power) 与 MEI (Maximum energy-efficient index) 算法. 另外, 为了更好的理解本文所提算法的优势, 我们还仿真了不进行子载波配对并随机选择中继节点时的性能*.

图 2 首先比较了本文 3 种算法在 $m = 2$ 时不同目标速率下的网络寿命性能, 由于 EALM + MEC 算法的计算复杂度受 L 或 N 取值的严格限制, 仿真时取 $L = 2, N = 2$. 由图可见, 与高计算复杂度的 EALM + MEC 算法相比, JRSSP + MEC 及 SPRS + MEC 算法的网络寿命性能在目标速率为 $R_b = 1.6$ bps/Hz 时分别仅损失了 7.3% 及 12.8%, 而且随着目标速率的增大, 满足 QoS 需求的链路减少, JRSSP + MEC 与 SPRS + MEC 算法的性能损失也随之减小. 为了提高仿真效率, 在后续仿真中将不再研究 EALM + MEC 算法的性能.

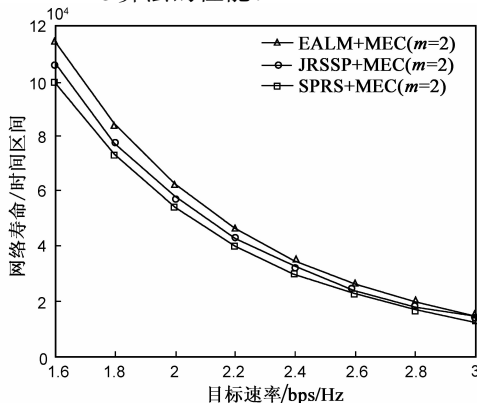


图2 本文3种算法在不同目标速率下的网络寿命性能比较

图 3 演示了不同 m 取值时本文算法与比对算法的网络寿命性能曲线. 可见, JRSSP + MEC 算法由于各子载波可独立选择信道增益大的传输链路, 网络寿命性能最佳, 目标速率 $R_b = 1.6$ bps/Hz, $m = 3$ 时的网络寿命约为 6.3×10^3 个时间区间; 而 JRSSP + MEI, JRSSP + MTP 与 SPRS + MEC 算法在相同目标速率和 m 值下性能比 JRSSP + MEC 算法分别损失了 16.5%, 35.8% 及 44.3%, 这体现了对节点能量定价思想的优越性. 而与 $m = 2$ 时的 RRS + MEC 算法相比, JRSSP + MEC 与 SPRS + MEC 算法的网络寿命性能分别提升了 131% 和 28.5%, 这证明了本文提出的 JRSSP 和 SPRS 算法在进行子载波配对和中继选择时的有效性. 此外可见, $m = 1$ 时 JRSSP + MEC, SPRS + MEC 分别与 JRSSP + MEI, SPRS + MEI 算法的性能曲线基本重合, 这是因为当网络中各节点初始能量相等时 MEC 算法的定价因子 $\rho_j = E_j^{tot}/E_j^{em}$ 与 MEI 算法的能效指标 (energy-efficient index) 具有相同的物理意义. 因此, 我们可以将 MEI 算法看作是 MEC 算法的一种特殊形式. 事实上, MTP 算法也可以看作是 $m = 0$ 时的 MEC 算法. 这说明 MEC 算法在优化网络寿命时更具一般性. 同时从仿真图中可以看出, 随着 m 取值的增大 MEC 算法的性能是越来越好的. 但是当 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(12)中 λ 的取值变化剧烈, 从而导致求解最优功率极其困难. 因此 m 的取值存在性能与求解间的权衡取舍问题. 本文为了求解功率方便, 在随后仿真中均取 $m = 2$.

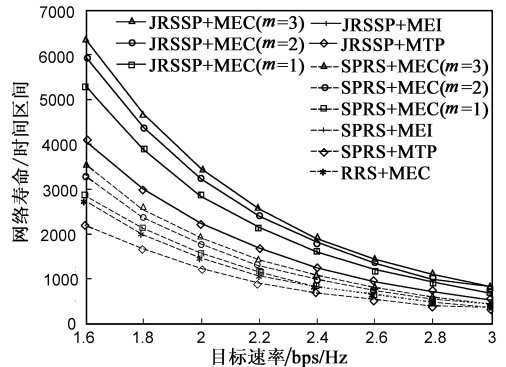


图3 本文算法与比对算法在不同目标速率下的网络寿命性能比较

图 4 展示了网络中初始总能量固定时, 各节点不同的能量配置对两种低开销算法网络寿命性能的影响, 其中总能量为 5 Joule. 能量配置策略包括: (a) L 个中继节点的初始能量分别为 $E_1^{tot} = 0.5$ Joule, $E_2^{tot} = 1.2$ Joule, $E_3^{tot} = 0.8$ Joule, $E_4^{tot} = 1$ Joule, 源节点能量 $E_5^{tot} = 1.5$ Joule;

* 称为 RRS (Random Relay Selection)

(b)各节点初始能量相同,为 $E_j^{tot} = 1\text{Joule}$; (c) L 个中继节点的初始能量分别为 $E_1^{tot} = 1.5\text{Joule}$, $E_2^{tot} = 1.2\text{Joule}$, $E_3^{tot} = 0.8\text{Joule}$, $E_4^{tot} = 1\text{Joule}$, 源节点能量 $E_5^{tot} = 0.5\text{Joule}$. 从图中可以看出,相同算法在能量配置策略(a), (b), (c)下的网络寿命性能依次下降,这是因为三种策略源节点的能量依次递减,而网络中仅存在唯一的源节点,当其能量耗尽时,此网络将不能继续生存.

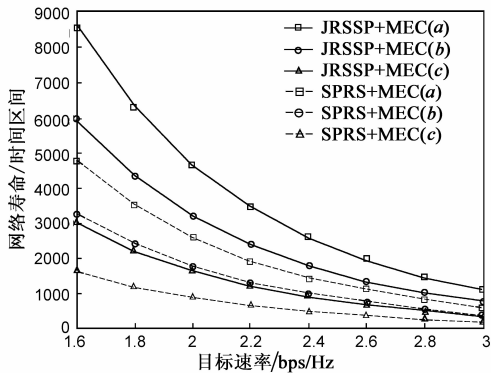


图4 算法在不同能量配置下的网络寿命与目标速率关系

图5仿真了两种低开销算法的网络寿命性能随中继节点数 L 的变化情况. 图中算法名称后的小写字母表示初始能量配置策略:(a)表示网络初始总能量固定为5Joule,各节点能量满足 $E_j^{tot} = 5/(L+1)$ Joule;(b)表示网络中各节点的初始能量满足 $E_j^{tot} = 1\text{Joule}$. 可见,当网络初始总能量固定时,两种低复杂度算法均在仅有一个中继节点时性能最佳,而且随着中继节点数的增加,SPRS+MEC算法性能的下陷速率较JRSSP+MEC算法快;而当网络中各节点初始能量均为1Joule时,中继数越多,两种算法的网络寿命越长,且JRSSP+MEC算法性能的增长速率较SPRS+MEC算法快.

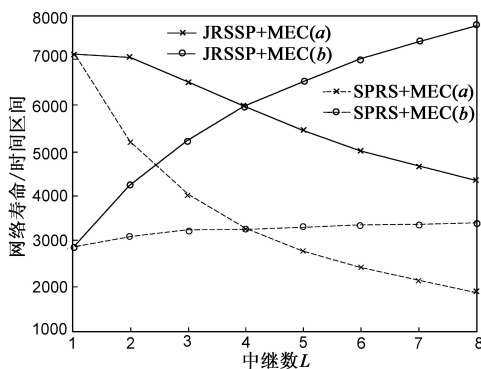


图5 算法的网络寿命性能随中继数变化曲线

5 结束语

本文基于文献[11]对节点能量定价的思想,研究了两跳协作多中继 OFDM 系统的网络寿命优化问题. 首先

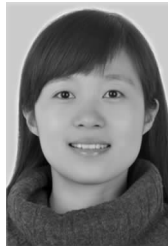
提出了一种穷举算法,即列举所有的子载波配对与中继选择联合决策;在各决策下进行功率分配建模,目标是满足一定 QoS 条件下,使一个时间区间内消耗能量总价值最小,可通过高 SNR 近似转化为凸优化问题解决;然后选择在一个时间区间内消耗能量总价值最小的联合策略,称为 EALM+MEC 算法. 由于 EALM+MEC 算法的计算复杂度受到中继节点或子载波数的严格限制,笔者进而基于各子载波的单位 SNR 代价提出了两种低复杂度算法,分别称为 JRSSP+MEC 与 SPRS+MEC 算法. 前者考虑各子载波独立选择中继节点,然后按照信道增益由大到小的顺序进行子载波配对,最后计算一次功率;后者考虑所有满足 $\mu_n = 1$ 的子载波选择相同的中继节点,需要作 L 次功率计算. 仿真表明,本文提出的3种算法比已有算法网络寿命性能都有提高,尤其在目标速率不太高,网络中有多条链路能满足 QoS 要求时,本文算法的性能优势更为明显. 同时可以看出,两种低复杂度算法尤其是 JRSSP+MEC 算法与穷举算法相比网络寿命性能损失较小,实用性较强.

参考文献

- [1] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity (Part I, II) [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [2] J N Laneman, D Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [3] W Dang, M Tao, H Mu, J Huang. Subcarrier-pair based resource allocation for cooperative multi-relay OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1640-1649.
- [4] 屈春河, 杨景, 张国清. 一种针对协作分集的分布式功率分配算法 [J]. 电子学报, 2010, 38(1): 60-67.
QU Chun-he, YANG Jing, ZHANG Guo-qing. Distributed power allocation algorithm for cooperative diversity [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 60-67. (in Chinese)
- [5] S Kaddoor, R Adve. Relay selection and power allocation in cooperative cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 9(5): 1676-1685.
- [6] O Duval, Z Hasan, E Hossain, F Gagnon, V Bhargava. Subcarrier selection and power allocation for amplify-and-forward relaying over OFDM links [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1293-1297.
- [7] I Hammerstrom, A Wittneben. Power allocation schemes for amplify-and-forward MIMO-OFDM relay links [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2798-2802.

- [8] W Huang, Y Hong, C Kuo. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1800 – 1805.
- [9] M Hajiaghayi, M Dong, B Liang. Maximizing lifetime in relay cooperation through energy-aware power allocation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(8): 4354 – 4366.
- [10] T Himsoon, W Siriwongpairat, Z Han, K J Ray Liu. Lifetime maximization via cooperative nodes and relay deployment in wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 306 – 317.
- [11] F Ke, S Feng, H Zhuang. Relay selection and power allocation for cooperative network based on energy pricing [J]. IEEE Communication Letters, 2010, 14(5): 396 – 398.
- [12] 王俊波, 曹哲, 陈明, 焦媛. 无线并行放大转发中继传输中基于信噪比的功率分配研究 [J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1663 – 1667.
WANG Jun-bo, CAO Zhe, CHEN Ming, JIAO Yuan. SNR-based power allocation in wireless parallel amplify-and-forward relay transmissions [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1663 – 1667. (in Chinese)
- [13] L Dai, B Gui, L J Cimini. Selective relaying in OFDM multihop cooperative networks [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communication and Networking Conference [C]. Hong Kong, China: IEEE Press, 2007. 963 – 968.
- [14] S Yatawatta, A P Petropulu. A multiuser OFDM system with user cooperation [A]. Proceedings of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C]. Pacific Grove, California, 2004. 319 – 323.
- [15] W Siriwongpairat, A Sadek, K J R Liu. Cooperative communications protocol for multiuser OFDM networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2430 – 2435.
- [16] W Wang, S Yan, S Yang. Optimally joint subcarrier matching and power allocation in OFDM multihop system [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008: 1 – 8.
- [17] B Korte, J Vygen. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms [M]. Third edition, Germany, Springer Press, 2005. 91 – 112.
- [18] Z Yi, I M Kim. An opportunistic-based protocol for bidirectional cooperative networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4836 – 4847.
- [19] S Boyd, L Vandenberghe. Convex Optimization [M]. New York: Cambridge University Press, Seventh printing, 2009. 215 – 253.
- [20] M Fareed, M Uysal. On relay selection for decode-and-forward relaying [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3341 – 3346.
- [21] H Suraweera, D Michalopoulos, G Karagiannidis. Performance of distributed diversity systems with a single amplify-and-forward Relay [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2603 – 2608.
- [22] I Krikidis, J Thompson, S Mclaughlin, N Goertz. Max-min relay selection for legacy amplify-and-forward systems with interference [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6): 3016 – 3027.

作者简介



庞立华 女, 1985 年 10 月生于山东日照. 西安电子科技大学在读博士生, 主要研究方向为协作通信中的资源管理及通信信号处理.

E-mail: lhpang_xidian@gmail.com



李建东 男, 1962 年生于江苏省阜宁县. 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事移动通信、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.

E-mail: jldi@mail.xidian.edu.cn

张阳 男, 1984 年 10 月生于陕西西安. 2011 年 6 月获得西安电子科技大学博士学位, 主要研究内容包括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等.

陈丹 男, 1984 年 1 月生于陕西商洛. 西安电子科技大学在读博士生, 主要研究方向为多天线自组织网络中的多址接入技术.