

基于能量价格的协作 OFDM 系统资源联合分配方案^①郭超平^{②*} 韩 鹏^{**} 李勇朝^{③*} 李晓艳^{*} 张海林^{*}

(* 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

(** 西安通信学院 西安 710106)

摘 要 为延长能量受限的使用解码转发协议的 OFDM 系统的寿命,利用能量价格构建了系统模型,提出了一个实用的资源联合分配方案。该方案有两个算法:算法 1 采用图论方法为源节点和中继节点的每个子载波对计算最优功率和总能量代价,算法 2 按照贪婪算法的思想进行子载波配对和模式选择;另外算法 2 从中继节点的所有子载波中找出总能量代价最小的子载波,接着从与这个子载波对应的中继模式和直传模式中选择总能量代价较小的模式作为源节点信号的传输模式。仿真分析表明,与典型资源分配方案相比,该方案不仅能够均衡节点之间的能量消耗,延长网络的寿命,还能发送更多的数据。

关键词 协作通信,OFDM,解码转发(DF),子载波配对,功率分配,中继选择

0 引 言

在无线网络中引入协作传输技术,构建虚拟可行的多输入多输出系统,不仅可以提高系统的数据速率和可靠性,而且还能延长网络寿命。通过有效的资源分配,还能进一步地提升这些性能。以延长协作系统寿命为目标的资源分配算法有模式切换算法,单载波系统的中继和功率等资源联合分配算法,多载波系统的中继、功率和子载波等资源联合分配算法。文献[1]提出了一种在直接传输模式和协作传输模式之间智能切换的方案,源节点和中继节点采用相等的功率,没有均衡节点之间的能量消耗。单载波协作系统的资源分配主要有三类方法:一类是文献[2-5]提出的优化某个目标(如总传输功率、节点剩余能量、中断率等)的分配算法,该算法没有考虑源节点的能量消耗,让所有中继参与协作,没有利用选择性中继带来增益,消耗更多中继的能量,这些都影响到系统寿命;另二类是文献[6,7]提出的基于能量代价的分配算法;第三类是文献[8,9]采用博弈论的方法进行资源分配,但其是为了达到一个非全局最优的均衡状态,需要较长时间的博弈。

文献[1-9]均没有考虑采用直接传输模式,且都是基于平坦衰落信道的,没有使用正交频分复用(OFDM)技术消除宽带通信系统中的频率选择性衰落。对于多载波系统的资源分配算法,文献[10]和[11]分别研究了单源多中继和多源多中继协作 OFDM 系统的网络寿命优化问题,源节点和中继节点使用相同子载波配对,没有利用不同子载波配对而带来的信道增益的提升。针对以上问题,本文首先利用价格理论构造协作 OFDM 系统的模型,然后提出了一种基于能量代价的功率、子载波和中继等资源联合分配方案。仿真结果表明,该方案能尽可能地均衡源节点和中继节点之间的能量消耗,延长网络的寿命和发送更多数据。

1 系统模型

考虑一个解码转发(decode-and-forward, DF)协议的协作 OFDM 系统,其由一个源节点 S 、一个参与协作的中继节点 R 和一个目的节点 D 组成。从逻辑上将总的频率带宽(如从 S 到 R 的信道,到 D 的信道,以及 R 到 D 的信道)分为 N 个平坦衰落的正交子载波。假设在模拟训练阶段, S 和 R 分别发

① 国家重大科技专项(2013ZX03003008-004),高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20120203110002),新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0918, 72131855)和国家 111 创新引智基地(B08038)资助项目。

② 男,1976 年生,博士生;研究方向:协作通信,资源分配,D2D 通信等;E-mail:chpguo@gmail.com

③ 通讯作者,E-mail:yzli@mail.xidian.edu.cn

(收稿日期:2013-02-23)

送模拟训练序列, D 分别测得 S 到 D 的信道状态信息和 R 到 D 的信道状态信息, R 通过控制信道将获得的 S 到 R 的信道状态信息传送给 D 。假设 D 在数据传输之前完成子载波、功率和中继等资源分配, 并通过控制信道将分配结果传送给 S 和 R 。 S 根据分配的结果发送数据, R 根据分配的结果决定是否参与协作。

传输分为两个时隙, 长度均为 T 。在时隙 1, S 在所有子载波上发送数据, R 和 D 接收; 在时隙 2, R 使用和 S 相同的码本对自己收到的数据进行解码, 编码以后转发, D 接收, S 既不发送数据也不接收数据。假设 D 对从 S 和 R 收到的信息采用最大比合并进行合并。假设在同一时隙内不同子载波上传送的数据是独立的。假设 S 在时隙 1 使用的子载波 k 和 R 在时隙 2 使用的子载波 m 配对传送数据, 构成了子载波对 $SP(k, m)$, 子载波 k 和 m 不必是同一子载波, 共有 N 个子载波对。 S 可能不使用 R 提供的协作, 而只用子载波 k 传输数据到 D , 此时用 $SP(k, 0)$ 表示子载波对。所以, 用 $m = 0$ 表示直传模式, 用 $m > 0$ 表示中继模式。

与 $SP(k, m)$ 关联的信道模型如图 1 所示, 分别用 $h_{sr}(k)$ 、 $h_{sd}(k)$ 和 $h_{rd}(m)$ 表示 S 到 R , S 到 D 以及 R 到 D 的链路增益。 W 为传输带宽, $\sigma_{sr}^2(k)$ 、 $\sigma_{sd}^2(k)$ 和 $\sigma_{rd}^2(m)$ 分别对应信道的加性高斯白噪声的方差, 相应的归一化信道增益分别为 $\gamma_{sr}(k) = |h_{sr}(k)|^2 / (\sigma_{sr}^2(k)W)$, $\gamma_{sd}(k) = |h_{sd}(k)|^2 / (\sigma_{sd}^2(k)W)$, 和 $\gamma_{rd}(m) = |h_{rd}(m)|^2 / (\sigma_{rd}^2(m)W)$ 。

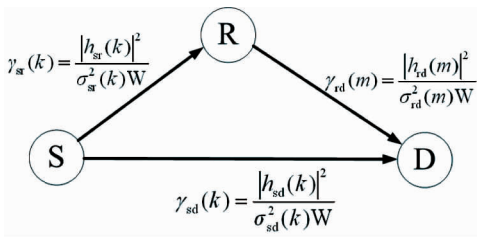


图 1 子载波对 $SP(k, m)$ 的信道模型

在 S 、 R 总功率受限下, 使用中继的条件是^[12]

$$\gamma_{sr}(k) \geq \gamma_{sd}(k) \quad (1)$$

$$\gamma_{rd}(m) \geq \gamma_{sd}(k) \quad (2)$$

令 $p_s(k)$ 为 S 在子载波 k 上的发送功率, $p_r(m)$ 为 R 在子载波 m 上的发送功率, $p(k, m) = p_s(k) + p_r(m)$ 为 $SP(k, m)$ 的归一化总功率。在中继模式下, $p_s(k)$ 和 $p_r(m)$ 满足^[13]

$$p_s(k) = \frac{\gamma_{rd}(m)p(k, m)}{\gamma_{sr}(k) - \gamma_{sd}(k) + \gamma_{rd}(m)} \quad (3)$$

$$p_r(m) = \frac{(\gamma_{sr}(k) - \gamma_{sd}(k))p(k, m)}{\gamma_{sr}(k) - \gamma_{sd}(k) + \gamma_{rd}(m)} \quad (4)$$

在直传模式下, $p_s(k)$ 和 $p_r(m)$ 满足^[11]

$$p_s(k) = p(k, 0) \quad (5)$$

$$p_r(0) = 0 \quad (6)$$

令 $R(k, m)$ 和 $\gamma(k, m)$ 分别为 $SP(k, m)$ 的归一化可达速率和归一化信道增益, 在直传模式下, 它们可写为

$$R(k, 0) = W \log_2(1 + \gamma_{sd}(k)p_s(k)) \quad (7)$$

$$\gamma(k, 0) = \gamma_{sd}(k) \quad (8)$$

在中继模式时, 它们可写为

$$R(k, m) = 0.5 W \log_2(1 + \gamma(k, m)p(k, m)) \quad (9)$$

$$\gamma(k, m) = \frac{\gamma_{sr}(k)\gamma_{rd}(m)}{\gamma_{sr}(k) - \gamma_{sd}(k) + \gamma_{rd}(m)} \quad (10)$$

为了均衡地使用每个节点的能量, 本文采用了基于能量价格的系统模型。将系统的节点建模为能量出售者。按照价格理论, 从买方和卖方角度出发, 一个节点能量较少时要价较高, 反之亦然^[7]。因而, S 和 R 的能量价格的定义分别如下

$$\rho_s = \rho_0 (E_s^{\text{tot}} / E_s^{\text{rem}})^{\tau} \quad (11)$$

$$\rho_r = \rho_0 (E_r^{\text{tot}} / E_r^{\text{rem}})^{\tau} \quad (12)$$

其中 ρ_0 为 S 和 R 的初始能量价格, E_s^{rem} 、 E_s^{tot} 、 E_r^{tot} 和 E_r^{rem} 分别为 S 的初始能量、 S 的剩余能量、 R 的初始能量和 R 的剩余能量, τ 为取 1 或 2 的能量指数。在发送功率为 P 时 S 和 R 的能量代价分别为 $\rho_s PT$ 和 $\rho_r PT$ 。因而, 归一化的能量价格在直传模式和中继模式下分别如下:

$$\rho(k, 0) = \rho_s \quad (13)$$

$$\rho(k, m) = \frac{\rho_s \gamma_{rd}(m) + \rho_r (\gamma_{sr}(k) - \gamma_{sd}(k))}{(\gamma_{sr}(k) - \gamma_{sd}(k) + \gamma_{rd}(m))} \quad (14)$$

本文的目标是通过子载波、中继和功率等资源联合分配, 使源和中继的总能量代价最小。所以, 系统模型可归纳如下:

$$\min_{p, t} \sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^N t(k, m) \rho(k, m) p(k, m) T \quad (15)$$

条件:

$$\sum_{m=0}^N W^* t(k, m) \log_2(1 + \gamma(k, m)p(k, m)) \geq R(k) \quad \forall k \quad (16)$$

$$\sum_{m=0}^N t(k, m) = 1 \quad \forall k \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^N t(k, m) \leq 1 \quad \forall m > 0 \quad (18)$$

$$t(k, m) = \{0, 1\} \quad \forall k, m \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^N p(k, m) \leq 2P \quad (20)$$

式中 $R(k)$ 为 S 在子载波 k 上最小速率, $p \in \mathbf{R}_+^{N \times N}$, $t \in \{0, 1\}^{N \times N}$, $t(k, m) = 1$ 表示子载波 k 和子载波 m 配对, 否则 $t(k, m) = 0$ 。其中式(16)表示对于 S 的任意子载波 k , 无论采用直传模式还是中继模式, 一定要满足其速率要求; 式(17)表示 S 的任意子载波 k 要么采用直接传输数据, 要么和 R 的一个子载波配对传输数据; 式(18)表示 R 的子载波 m 最多和 S 的一个子载波配对传输数据。协作时 $W^* = W$, 直传时 $W^* = 2W$ 。

2 模型求解

显然问题式(15)-(20)是一个非线性约束, 混合整数规划问题, 而非一个凸优化问题。鉴于此, 将求解问题最优解的方法分解为: 已知子载波配对的最优功率分配算法和已知功率分配的子载波配对和模式选择算法。通过分解, 减少了算法的参数, 得到了该优化问题的低复杂度近似解的求解方法。

2.1 已知子载波配对的最优功率分配算法

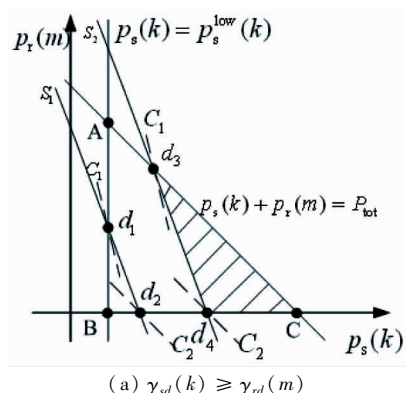
给定源的子载波 k 和中继的子载波 m 配对, 在总功率 P_{tot} 的限制下, 使总能量代价最小的功率分配的问题可以归纳如下:

$$\min \{C = \rho_s T p_s(k) + \rho_r T p_r(m)\} \quad (21)$$

$$\text{条件: } \gamma_{sd} p_s(k) + \gamma_{rd} p_r(m) \geq 2^{2R(k)/W} - 1 \quad (22)$$

$$p_s(k) \geq p_s^{\text{low}}(k) \quad (23)$$

$$p_s(k) + p_r(m) \leq P_{\text{tot}} \quad (24)$$

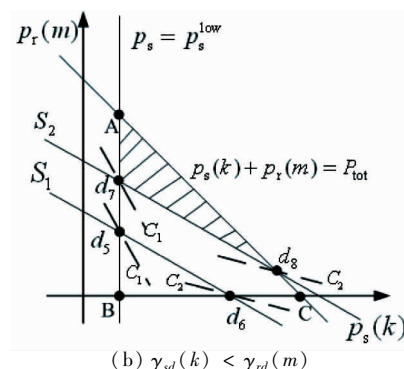


(a) $\gamma_{sd}(k) \geq \gamma_{rd}(m)$

$$p_s(k), p_r(m) \geq 0 \quad (25)$$

其中 $p_s^{\text{low}}(k) = \frac{(2^{2R(k)/W} - 1)}{\gamma_{sr}(k)} > 0$, 已经包括了

$p_s(k) \geq 0$ 的情况。令 $\eta = \frac{\rho_s}{\rho_r} - \frac{\gamma_{sd}(k)}{\gamma_{rd}(m)}$, 定义速率函数 $f(p_s(k), p_r(m)) = 0.5W \log(1 + \gamma_{sd}(k)p_s(k) + \gamma_{sd}(m)p_r(m))$ 。如果采用凸优化的方法求解问题式(21)-(25), 需要分析每种可能性和大量的运算时间。所以, 文中采用运算速度较快的图论法求解。问题式(21)-(25)的可行域由以下 4 个集合的交集构成: $\{p_s(k) | p_s(k) \geq p_s^{\text{low}}(k)\}$, $\{p_r(m) | p_r(m) \geq 0\}$, 和 $\{(p_s(k), p_r(m)) | \gamma_{sd} p_s(k) + \gamma_{sd} p_r(m) \geq 2^{2R(k)/W} - 1\}$, $\{(p_s(k), p_r(m)) | p_s(k) + p_r(m) \leq P_{\text{tot}}\}$ 。在 $p_s^{\text{low}}(k) < P_{\text{tot}}$ 时, 可行域不存在(此时无解); 在 $p_s^{\text{low}}(k) \leq P_{\text{tot}}$ 时, 分为 2 种情况: (1) 如果 $\gamma_{sd}(k) \geq \gamma_{sd}(m)$, 可行域如图 2(a) 中阴影所示; (2) 如果 $\gamma_{sd}(k) < \gamma_{sd}(m)$ 时, 可行域如图 2(b) 中阴影所示。所以, 当 $\eta \geq 0$ 时, 等高线 $C = \rho_s T p_s(k) + \rho_r T p_r(m)$ 变成图 2(a) 或 (b) 中 C_1 , 在 C_1 与阴影部分的所有交点中使其达到最小的点就是式(21)-(25)的最优解; 当 $\eta < 0$ 时, 等高线 $C = \rho_s T p_s(k) + \rho_r T p_r(m)$ 变成图 2(a) 或 (b) 中 C_2 , 在 C_2 与阴影部分的所有交点中使其达到最小的点就是式(21)-(25)的最优解。在图 2 中, 直线 S_1 和 S_2 代表 $R(k)$ 取不同值时的 SNR 直线: $\gamma_{sd}(k)p_s(k) + \gamma_{rd}(m)p_r(m) = 2^{2R(k)/W} - 1$, C_1 和 C_2 分别表示 $\eta \geq 0$ 和 $\eta < 0$ 对应的代价直线 $C_i = \rho_s p_s(k)T + \rho_r p_r(m)T$ ($i = 1, 2$)。令 $\delta = 10^{-4}$, 求解算法如下。



(b) $\gamma_{sd}(k) < \gamma_{rd}(m)$

图 2 获取 $SP(k, m)$ 最优功率分配的图论模型

算法 1 $SP(k, m)$ 的最优功率分配算法

- (1) 根据式(7)计算直传时功率 $p_s^{\text{dir}}(k)$ 和代价 $C^{\text{dir}}(k)$ 。
- (2) 如果 $p_s^{\text{low}}(k) > P_{\text{tot}}$, 最优解为 $p_s^{\text{dir}}(k) = (2^{2R(k)/W} - 1)/\gamma_{sd}(k)$; 否则转入下一步。
- (3) 如果 $R(k) \leq f(p_s^{\text{low}}(k), 0)$, 转入下一步, 否则转入步骤(5)。

(4) 如果 $(\rho_s p_s^{\text{low}}(k) + \rho_r \delta)T < C^{\text{dir}}(k)$, 最优解为图 2 中的 B 点, 否则最优解为 $p_s^{\text{dir}}(k)$ 。

(5) 如果 $\gamma_{sd}(k) \geq \gamma_{rd}(m)$, 转入下一步; 否则转入步骤(15)。

(6) 如果 $R(k) \in [f(p_s^{\text{low}}(k), 0), f(p_s^{\text{low}}(k), P_{\text{tot}} - p_s^{\text{low}}(k))]$, 转入下一步; 否则步骤(10)。

(7) 如果 $\eta > 0$, 最优解为图 2(a) 中 d_1 点, 转入步骤 24; 否则

转入下一步。

(8) 如果 $\eta < 0$, 最优解为图 2(a) 中 d_2 点, 转入步骤(24); 否则转入下一步。

(9) 最优解为图 2(a) 中 SNR 直线 S_1 上 d_1 与 d_2 之间任一点, 转入步骤(24)。

(10) 如果 $R(k) \in [f(p_s^{low}(k), P_{tot} - p_s^{low}(k)), f(P_{tot}, 0)]$, 转入下一步; 否则步骤(14)。

(11) 如果 $\eta > 0$, 最优解为图 2(a) 中 d_3 点, 转入步骤(24); 否则转入下一步。

(12) 如果 $\eta < 0$, 最优解为图 2(a) 中 d_4 点, 转入步骤(24); 否则转入下一步。

(13) 最优解为图 2(a) 中 SNR 直线 S_2 上 d_3 与 d_4 之间任一点, 转入步骤(24)。

(14) 最优解为 $p_s^{dir}(k)$, 转入步骤(24)。

(15) 如果 $R(k) \in [f(p_s^{low}(k), 0), f(P_{tot}, 0)]$, 转入下一步; 否则转入步骤(19)。

(16) 如果 $\eta > 0$, 最优解为图 2(b) 中 d_5 点, 转入步骤(24); 否则转入下一步。

(17) 如果 $\eta < 0$, 最优解为图 2(b) 中 d_6 点, 转入步骤(22); 否则转入下一步。

(18) 最优解为图 2(b) 中 SNR 直线 S_1 上 d_5 与 d_6 之间任一点, 转入步骤(24)。

(19) 如果 $R(k) \in [f(P_{tot}, 0), f(p_s^{low}(k), P_{tot} - p_s^{low}(k))]$, 转入下一步; 否则步骤(23)。

(20) 如果 $\eta > 0$, 最优解为图 2(b) 中 d_7 点, 转入步骤(24); 否则转入下一步。

(21) 如果 $\eta < 0$, 最优解为图 2(b) 中 d_8 点, 转入步骤(24); 否则转入下一步。

(22) 最优解为图 2(b) 中 SNR 直线 S_2 上 d_7 与 d_8 之间任一点, 转入步骤(24)。

(23) 最优解为 $p_s^{dir}(k)$, 转入下一步。

(24) 如果 $p_s(k) + p_r(m) > P_{tot}$, 输出 $p_s^{dir}(k)$ 以及 $C^{dir}(k) = \rho_s C^{dir}(k)T$, 否则输出 $p_s(k)$, $p_r(m)$ 以及 C 。

用算法 1 时, 在 d_1 、 d_5 和 d_7 点处的 $p_s(k) = p_s^{low}(k)$ 以及 $p_r(m) = (2^{2R(k)/W} - 1 - \gamma_{sd}(k))p_s^{low}(k) / \gamma_{rd}(m)$, 在 d_2 , d_4 和 d_6 点处的 $p_s(k) = (2^{2R(k)/W} - 1 - \gamma_{rd}(m)\delta) / \gamma_{sd}(k)$ 以及 $p_r(m) = \delta$, 在 d_3 和 d_8 点处的 $p_s(k) = (2^{2R(k)/W} - 1 - \gamma_{rd}(m)P_{tot}) / (\gamma_{sd}(k) - \gamma_{rd}(m))$ 以及 $p_r(m) = P_{tot} - p_s(k)$ 。在中继模式不可用时, 选择直传模式的功率分配, 如步骤(14), (23)和(24)。

2.2 已知功率分配的子载波配对和模式选择算法

算法的思路如下: 首先, 根据式(1)和(2)求出 S 的每个子载波的可用子载波集。然后, 从 S 的第 $k = 1$ 个子载波开始, 在总功率 $P_{tot} = 2P$ 限制下, 使用算法 1 分别求出与其可用子载波集中的每个子载波配对时的功率分配, 并从中选择一个总能量代价最小的中继子载波 m_{min} 。接着比较 m_{min} 对应的总

能量代价与直传能量代价的大小, 如果 m_{min} 对应的总能量代价较小, 将 m_{min} 与 k , 将 m_{min} 从 k 之后的每个子载波的可用子载波集中除去, 从 P_{tot} 中减去与 m_{min} 对应的分配给源和中继的功率; 否则, 从 P_{tot} 减去直传时分配给源的功率。接着, 按照相同的方法对 S 的第 $k + 1$ 个子载波进行资源分配, 一直到 S 的最后一个子载波。具体如下:

算法 2 已知功率分配的子载波配对和模式选择算法

输入: $\gamma_{sd} = \{\gamma_{sd}(k) | k = 1, 2, \dots, N\}$, $R_{car} = \{1, 2, \dots, N\}$, $\gamma_{sr} = \{\gamma_{sr}(k) | k = 1, 2, \dots, N\}$, $\gamma_{rd} = \{\gamma_{rd}(m) | m = 1, 2, \dots, N\}$, W , ρ_s , ρ_r , $P_{tot} = 2P$ 。

输出: $p_s = \{p_s(1), p_s(2), \dots, p_s(N)\}$, $p_r = \{p_r(1), p_r(2), \dots, p_r(N)\}$, $M = \{m(1), m(2), \dots, m(N)\}$ 。

(1) 初始化: $R^{temp}(k) = R_{car}$, $\gamma_{rd}^{temp} = \gamma_{rd}$, $E_s^{rem} = E_s$, $E_r^{rem} = E_r$ 。

(2) 从 $k = 1$ 开始, 分别从 γ_{sd} 和 γ_{sr} 中取出 $\gamma_{sd}(k)$ 和 $\gamma_{sr}(k)$, 依次从 γ_{rd} 中取出每个 $\gamma_{rd}(m)$, 判断它们是否满足式(1)和(2), 如果不满足, 将 m 从 $R^{temp}(k)$ 移出, 依此类推, 一直到 $k = N$ 。

(3) 从 $k = 1$ 开始, 分别从 γ_{sd} 和 γ_{sr} 中取出 $\gamma_{sd}(k)$ 和 $\gamma_{sr}(k)$, 从 γ_{rd} 中取出每个 $\gamma_{rd}(m)$ ($m \in R^{temp}(k)$), 调用算法 1, 分别计算第 k 个子载波和 $R^{temp}(k)$ 中每个子载波配对时的最优功率分配, 将结果存在 $(p_s^{temp}(m), p_r^{temp}(m), C^{temp}(m))$ 。

(4) 从 $\{C^{temp}(m) | m \in R^{temp}(k)\}$ 中找出最小值 C_{min}^{temp} 及其对应的序号 m_{min} 。

(5) 根据式(7)计算 $p_s^{dir}(k)$, $C^{dir}(k) = \rho_s C^{dir}(k)T$, 如果 $C_{min}^{temp} < C^{dir}(k)$, 从 $R^{temp}(k')$ (对所有 $k' > k$) 移出 m_{min} , $P_{tot} = P_{tot} - p_s^{temp}(m_{min}) - p_r^{temp}(m_{min})$, $p_s(k) = p_s^{temp}(m_{min})$, $p_r(k) = p_r^{temp}(m_{min})$, $m(k) = m_{min}$, $E_s^{rem} = E_s^{rem} - p_s(k)T$, $E_r^{rem} = E_r^{rem} - p_r(k)T$, 计算 ρ_s , ρ_r ; 否则 $P_{tot} = P_{tot} - p_s^{dir}(k)$, $p_s(k) = p_s^{dir}(k)$, $p_r(k) = 0$, $m(k) = 0$, $E_s^{rem} = E_s^{rem} - p_s(k)T$, 计算 ρ_s 。

(6) 若 $P_{tot} > 0$ 且 $k < N$, $k = k + 1$, 返回步骤(3); 否则算法结束。

其中步骤(3)为找出最小代价对应的中继子载波序号, 步骤(4)行将使用的中继子载波从可用子载波集中去除, 并更新最大功率和代价。 $m(k)$ 表示与 S 的子载波 k 配对的中继子载波序号, $p_s(k)$ 表示分配给 S 子载波 k 的功率, $p_r(k)$ 表示分配给 $m(k)$ 的功率。

2.3 复杂性分析

文中提出的方案是一个组合优化问题, 具有有限个组合。算法 1 需要 11 次运算去求解最优功率分配及其能量代价。算法 2 使用了穷尽搜索的方法, 需要的迭代次数为 N , 每次迭代最多需要 $O(N + 1)$ 次运算去寻找最优的子载波分配。因而, 算法总的计算复杂性为 $O(11N(N + 1))$ 。

3 仿真结果与分析

仿真中信道模型如下^[14]: 无线信道被建模成由

6 个独立瑞利多径组成的频率选择性信道,每个多径被建模成 Clarke 平坦衰落模型;假设功率延迟谱按指数 e^{-2l} 衰减, l 为多径因子,6 个多径的相对功率为 $[0, -8.69, -17.37, -26.06, -34.74, -43.43]$ dB;其它参数: $N = 64$, $\sigma^2 = 10^{-8}$ W,每个节点初始能量为 1J,数据块长度为 $T = 10^{-2}$ s, $W = 1$ MHz,定义了 1~6 共 6 个速率指数,对应总数据速率分别为 32Mbps 的 1~6 倍。能量代价参数^[7]: $\tau = 2$, $\rho_0 = 10$ 。定义网络寿命为运行到第一个节点能量耗尽为止^[7]。考虑对比的算法包括文献[2]中提出的最小功率(minimum transmission power, MTP)算法和最大剩余能量(maximum residual energy, MRE)算法。为了更好地理解本文所提方案的优势,还仿真了直传以及源和中继使用相同子载波的固定子载波配对算法的性能。重复仿真 1000 次,结果如图 3、图 4 和图 5 所示。

从图 3 和图 4 可以看出,这 4 种方案的系统寿命和发送数据总量都随着总数据速率的增加而减少,尤其是在总数据速率较高时减少得更快。原因在于,对于相同的信道增益,如果要求的数据速率越大,那么需要的功率越大,消耗的能量越多,那么系统的寿命就越短,发送的数据越少。从图 3 可以看出,在总速率为 32Mbps 时,文中提出的方案的系统寿命比直传方案提高近 131%,比固定子载波配对算法提高近 24%,比最小功率算法提高近 5%,比最大剩余能量算法提高近 3%;在其它速率下比直传方案提高近 25%,比固定子载波配对算法提高近 18%,比最小功率算法提高近 5%,比最大剩余能量算法提高近 2%。原因是在进行资源分配时,直传方案和固定子载波配对算法没有利用不同子载波之间的信道增益差异,最小功率算法和最大剩余能量算法分别只选择总功率最小的分配和剩余能量最大的分配,而文中提出的方案将功率和剩余能量都考

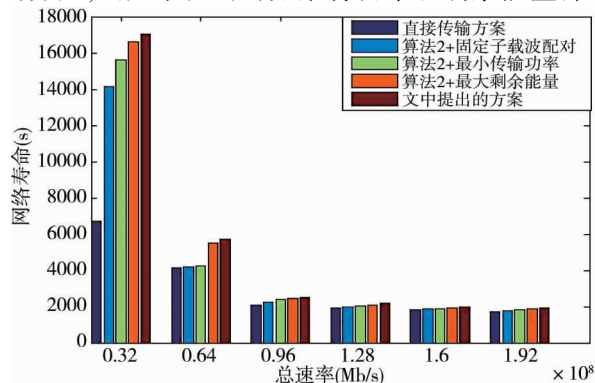


图3 5种方案的系统寿命比较

虑进去,使各个节点的能量消耗更加均衡,不会使个别节点的能量过早地消耗尽,因而延长了系统寿命。

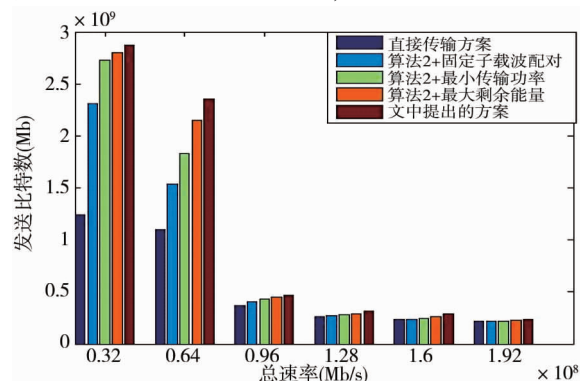


图4 5种方案的发送数据总量比较

从图 4 可以看出,在总速率为 32Mbps 时,文中提出的方案在发送数据总量上比直传方案提高近 110%,比固定子载波配对算法提高近 20%,比最小功率算法提高近 10%,比最大剩余能量算法提高近 5%;在其它速率下比直传方案提高近 20%,比固定子载波配对算法提高近 15%,比最小功率算法提高近 5%,比最大剩余能量算法提高近 2%。原因是与其它方案相比,文中提出的方案在每个节点能量的消耗方面更加均衡,在相同场景下使每个节点都能够保持尽可能多的剩余能量,因而发送的数据更多。

从图 5 可以看出,在节点最终剩余能量之差上,文中提出的方案比其它方案小,因而节点在能量消耗上更均衡,避免了节点的过早死亡。这解释了文中方案发送数据总量更多和延长系统寿命的原因。

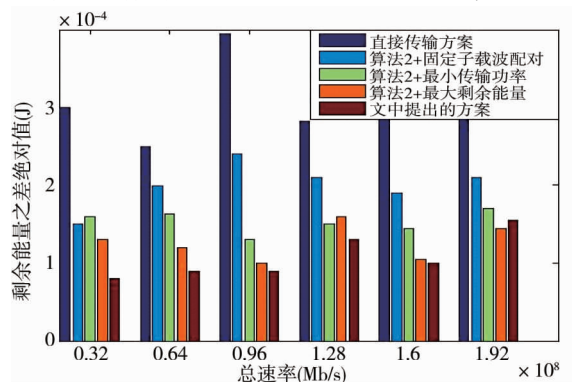


图5 5种方案的节点最终剩余能量之差比较

4 结 论

本文首先利用价格理论对能量受限的协作 OFDM 系统的中继、子载波和功率等资源的联合分配问题进行建模。接着提出了一个实用的资源联合分配方案。通过仿真和分析表明,文中提出的资源

联合分配方案不仅均衡能够节点之间的能量消耗,延长网络的寿命,而且还能够发送更多的数据量。

参考文献

- [1] Krikidis I, Thompson S J, Grant M P. Cooperative relaying with feedback for lifetime maximization. In: IEEE International Conference on Communications 2010, Cape Town, South Africa, 2010. 1-6
- [2] Huang W J, Hong Y W P, KUO C C J. Lifetime maximization for amplify-and-forward cooperative networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7 (5) : 1800-1805
- [3] Hui H, Zhu S H, Lv G M. Relay selection for lifetime extension in amplify-and-forward cooperative networks. In: IEEE International Conference on Communications 2010, Cape Town, South Africa, 2010. 1-5
- [4] Hajiachayi M, Dong M, Liang B. Maximizing lifetime in relay cooperation through energy-Aware power allocation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58 (8) : 4354-4366
- [5] Zuo F Z, DONG M. Prediction-based energy-Aware relay cooperation for lifetime maximization. *IEEE Communication Letters*, 2012, 1 (4) : 352-355
- [6] 柯峰,耿恒信,冯穗力等. 基于功率加权的延长网络寿命的机会中继策略. 华南理工大学学报, 2012, 40 (3) : 37-42
- [7] Ke F, Feng S L, Zhuang H H. Relay selection and power allocation for cooperative networks based on energy pricing. *IEEE Communication Letters*, 2010, 14 (5) : 396-398
- [8] Wu D, Cai Y M, Zhou L, et al. A cooperative communication scheme based on coalition formation game in clustered wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11 (3) : 1190-1200
- [9] Kandeepan S, Jayaweera S K, Fedrizzi R. Power-trading in wireless communications: A cooperative networking business model. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11 (5) : 1872-1880
- [10] 庞立华,李建东,张阳等. 基于能量定价的协作 OFDM 系统网络寿命优化算法. 电子学报, 2012, 4 (4) : 703-709
- [11] Pang L H, Li J D, Zhang Y. Lifetime optimization for multi-Source multi-relay cooperative OFDM systems. *Chinese Journal of Electronics*, 2012, 21 (3) : 571-574
- [12] Li Y, Wang W b, Kong J, et al. Subcarrier pairing for amplify-and-forward and decode-and-forward OFDM relay links. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13 (1) : 209-211
- [13] Hsu C H, Su H J, Lin P H. Joint subcarrier pairing and power allocation for OFDM transmission with decode-and-forward relaying. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59 (1) : 399-414
- [14] Shen Z K, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4 (6) : 2726-2737

An energy pricing-based joint resource allocation approach for cooperative OFDM systems

Guo Chaoping^{* **}, Han Kun^{**}, Li Yongchao^{*}, Li Xiaoyan^{*}, Zhang Hailin^{*}

(^{*} State Key Lab of Integrated Services Network, Xidian Univ. , Xi'an 710071)

(^{**} Xi'an Communication Inst. , Xi'an 710106)

Abstract

In order to prolong the lifetime of energy-constrained OFDM systems under the decode-and-forward protocol, a model for the systems based on energy pricing was formulated, and then a heuristic joint resource allocation scheme was presented. The presented scheme comprises of two algorithms: the first one uses a graphic method to compute the optimal power allocation and the total energy cost for each subcarrier pair between the source and the relay, and the second one makes subcarrier pairing and mode selection according to the greedy algorithm. When using the second algorithm, the relay's subcarrier with the lowest total energy cost is selected for each subcarrier of the source, and the mode used by the source to transmit signals is then selected from the direct mode and the relay mode corresponding with the selected subcarrier. The simulation and analysis show that compared with other algorithms the presented scheme can not only make better balanced use of the energy of the system and make the system's lifetime longer, but also transmit more data.

Key Words: cooperative communications, OFDM, decode-and-forward (DF), subcarrier pairing, power allocation, relay selection