

基于子载波选择配对及功率优化分配的多跳中继系统研究

冯 亮

(西北工业大学管理学院 西安 710072)

摘 要 为了提升 OFDM 协作通信系统的网络覆盖率及网络容量,提出了一种基于子载波选择配对及功率优化分配的多跳中继 OFDM 系统优化算法。首先,通过在 OFDM 的系统模型上进行中继配对和非中继配对的性能分析,将子载波选择配对转换为一个整数规划问题,并采用基于匈牙利算法的规划方法进行配对矩阵的计算。接着,根据 OFDM 系统的功率分配问题,通过 KKT 条件对中继功率及电源功率进行优化,从而实现中继系统的功率优化分配。最终的仿真结果表明,与统计质量 QoS 保证的资源分配方案以及 OFDM 中继系统异构服务的资源分配算法相比,所提出的方法在提高网络覆盖率和容量上均表现出更好的效果。

关键词 中继 OFDM 系统,子载波选择配对,功率优化分配,网络覆盖率,物联网

中图分类号 TN913 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.020

Multi-hop Relay OFDM System Based on Subcarrier Selection Pairing and Optimal Power Allocation

FENG Liang

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In order to improve network coverage and network capacity of OFDM cooperative communication systems, a multi-hop relay OFDM system based on subcarrier selection pairing and optimal power allocation was proposed. Performance analysis of matching pair of relay and non-matching pair of relay was performed on OFDM relay system model the sub-carrier selection paired was converted to an integer programming problem, and pairing matrix was calculated using a matrix-based planning approach based on Hungarian algorithm. Then, according to the power allocation problem of OFDM systems, under KKT conditions optimized relay power and power allocation method were used. The final simulation results show that compared to the program resource allocation with QoS statistical quality assurance and resource allocation algorithm of OFDM relay system of heterogeneous services, the proposed method improves network coverage and capacity with better results.

Keywords Relay OFDM system, Subcarrier selection pairing, Optimal power allocation, Network coverage, Network capacity

为了扩大协作通信网络的覆盖范围以及容量,结合中继技术的 OFDM 系统逐渐受到广泛的关注。正交频分复用(OFDM)是一种优良的技术^[1],克服了频率选择性衰落以及无线信道的多径效应,通过引入无线蜂窝系统的中继站(RS),可以增加覆盖范围,提高抗衰落能力,并降低系统的功率消耗。中继技术主要包括了放大转发中继技术以及解码转发中继技术^[2,3]。基于放大转发和解码转发中继的 OFDM 系统可以根据用户的 QoS 需要来联合中继选择,进行自适应功率分配来实现最小能耗^[4]。本文针对 OFDM 调制的频率选择性信道,考虑了功率的分配,使用 DF 选择性中继,进行子载波选择配对及功率优化分配。物联网是通信网络的延伸,其以通信网络为重要载体实现物物互感互联,物联网技术的应用和发展对现有通信系统也提出了很多新的要求,如何最大限度地利用现有通信网络拓展物联网业务,如何降低物联网通信对现有通信网络运营维护的影响,如何增强通信网络未来的竞争力,这些都是各网络运营商需要面对的重要问题。

黄高飞等^[5]提出一种具有时延 QoS 保证的 OFDM 中继系统子载波配对与功率分配算法,在满足业务时延 QoS 要求的前提下最大化系统容量,并将子载波配对与功率分配问题转为混合整数规划问题,利用凸优化方法得到原问题的最优解,有效地提高了系统容量。陈煜等^[6]提出一种基于能效的解码转发中继 OFDM 链路自适应功率分配方案,该方案分析了速率和功率限制对能效的影响,基于解码转发(DF)中继 OFDM 频率选择性链路,提出最优能效功率分配方法,在保证较高速率的同时获得最好的系统能效。赵晓晖等^[7]提出一种多中继 OFDM 系统选择性子载波中继和功率分配算法,其利用空闲中继节点的功率提高系统容量,并通过削减中继节点数目,在降低系统复杂度的同时提高功率效率。Gaofei Huang 等^[8]提出了统计质量的服务(QoS)保证的资源分配方案用于无线 OFDM 放大转发(AF)中继系统,首先制定了无线 OFDM 的 AF 中继系统具有 QoS 保证的非凸问题以及资源分配问题;然后通过定义 OFDM 的 AF 中继系统的适当的

到稿日期:2014-11-19 返修日期:2015-01-23 本文受国家自然科学基金项目(11371003),陕西省教育厅项目(14JK1057)资助。

冯 亮(1970-),男,博士生,主要研究方向为物联网技术、通信网络、管理科学与工程等。

放大器增益,把非凸问题转化为凸的问题,从而提出了次优的资源分配方案。Qingtao Wan等^[9]提出一种基于物联网解调和转发的OFDM中继系统异构服务的资源分配算法,旨在最大化非实时服务(NRT)及满足实时服务(RTS)要求的数据速率,将要解决的问题分解成两个子问题:RTS和NRT的功率分配问题。通过拉格朗日方法解决RTS问题,通过一种两步算法解决NRT问题。

1 系统模型与问题描述

由于无线OFDM网络在频率选择性信道上运行,考虑到源端需在中继的协助下将数据发送到目的地,假设信道的带宽 ψ 被划分为 N 个副载波,且一个传输周期持续两个时隙^[10,11],定义在信号源和目的地之间的第 i 个副载波的信道增益为 SD_i ,信号源和中继之间的第 i 个副载波的信道增益为 SR_i ,中继和目的地之间的第 i 个副载波的信道增益为 RD_i 。假设在时隙期间这些信道增益不会改变^[12,13]。在第一时隙,数据在所有子载波上通过信号源广播到中继和目的地,采用的功率为 $P_{S,1}$ 。在第二时隙,有 M 个副载波被选择用于中继译码、变换,并采用功率 P_R 转发数据。在其余的副载波上,信号源采用功率 P_R 发射新的数据。因此,对于某个给定的消息,中继可能会使用不同的副载波作为使用的一个来源。

定义一个 $N \times N$ 中继配对矩阵 H_R ,在第一时隙排序发生于子载波 i 直到第二时隙的子载波 j ,如果它们是成对的,其被表示为元素 $\zeta_{i,j}=1$;类似地,如果该子载波 j 被用于发送来自源端的新信息,非中继配对 $N \times N$ 矩阵 H_R^N 具有元素 $\zeta_{i,j}=1$,所有其他元素 $\zeta_{i,j}=0$ 并且 $\zeta_{i,i}^N=0$ 。接着,在两个时隙周期之后,目的地利用最大比组合检索到中继消息。

假设在一个OFDM子载波内中继的噪声方差为 ψ_R 且在目的地的噪声方差为 ψ_D 。在中继配对和非中继配对上的性能分别为:

$$G_R(i,j) = \frac{\sqrt{2}}{2} \min\left\{ \frac{\lg(1 + \eta P_S(i))}{2\pi}, \frac{\lg(1 + \beta P_S(i) + \kappa_i P_R(j))}{2\pi} \right\} \quad (1)$$

$$G_D(i,j) = \frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \beta P_S(i)) + \frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \kappa_i P_R(j)) \quad (2)$$

其中 $\eta = \frac{|SR_i|}{\psi_R}$, $\kappa_i = \frac{|RD_i|}{\psi_D}$, $\beta = \frac{|SD_i|}{\psi_D}$ 。

本研究的目的是要解决以下优化问题,其涉及在第一时隙子载波的配对、选择和源端的功率分配,以及在第二时隙分配功率到中继和源端:

$$\begin{aligned} & \minimize \\ & P_{S,1}, P_{S,2}, P_R, \zeta_{i,j}, \zeta_{i,j}^N \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\zeta_{i,j} \times (G_R(i,j)) + \zeta_{i,j}^N G_D(i,j)) \\ & \text{s. t. } \sum_{j=1}^N (\zeta_{i,j} + \zeta_{i,j}^N) = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \\ & \sum_{j=1}^N (\zeta_{i,j} + \zeta_{i,j}^N) = 1, \forall j \in \{1, 2, \dots, N\} \\ & \zeta_{i,j} + \zeta_{i,j}^N \in \{0, 2\} \end{aligned} \quad (3)$$

2 子载波选择配对

配对和选择等同于确定最佳的 H_R 和 H_R^N 矩阵,这是一个整数规划问题。为了解决这个问题,采用基于匈牙利算法的规划方法。

首先,定义下面的矩阵:

$$S(i,j) = \begin{cases} G_R(i,j), & G_R(i,j) > G_D(i,j) \\ G_D(i,j), & G_R(i,j) \leq G_D(i,j) \end{cases} \quad (4)$$

将整数规划问题转换为一个分配问题 $S(i,j)$,给定 $H^* = H_R + H_R^N$,并且可以通过应用匈牙利算法^[14]来解决,能够通过使用预先计算的标志矩阵 $B(i,j)$ 从矩阵 H^* 中提取 H_R 和 H_R^N 矩阵。

标志矩阵 $B(i,j)$ 的计算公式为:

$$B(i,j) = \begin{cases} \sqrt{2}, & G_R(i,j) > G_D(i,j) \\ -\sqrt{2}, & G_R(i,j) \leq G_D(i,j) \end{cases} \quad (5)$$

命题1 一对 (i,j) 被选择作为中继,满足 $\eta_i > \beta_i$ 。

证明:如果一对 (i,j) 被匈牙利算法选中,它遵循 $G_R(i,j) \geq G_D(i,j)$,因此:

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \min(\eta_i P_S(i), \beta_i P_S(i) + \kappa_i P_R(j))) - \\ & \frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \beta_i P_S(i)) - \frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \kappa_i P_R(j)) > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

可以得到:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \eta_i P_S(i)) > \frac{\sqrt{2}}{2} \lg(1 + \beta_i P_S(i)) \quad (7)$$

因此 $\eta_i > \beta_i$ 。

配对和选择后,第二个问题是进行功率分配的定义。

3 功率优化分配的多跳中继OFDM系统

配对和选择的问题解决后,用所得到的 H_R 和 H_R^N 矩阵来定义两组 (i,j) 指数对,如下:

$$\begin{aligned} W_R &= \{(i,j) | \zeta_{i,j} = 1\} \\ W_D &= \{(i,j) | \zeta_{i,j}^N = 1\} \end{aligned} \quad (8)$$

现在,优化问题可以改写如下:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & P_{S,1}, P_{S,2}, P_R \\ & \sum_{(i,j) \in W_R} \min\{\lg(1 + \eta_i P_S(i)), \lg(\beta_i P_S(i) + \kappa_i P_R(j))\} \\ & \sum_{(i,j) \in W_D} \min\{\lg(1 + \beta_i P_S(i)), \lg(1 + \beta_i P_S(i))\} \\ & \text{s. t. } P_{S,1} > 0, P_{S,2} > 0, P_R > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

可以将目标函数(9)分成两个子问题^[16]。

子问题1:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & P_{S,1}, P_R \\ & \sum_{(i,j) \in W_R} \min\{\lg(1 + \eta_i P_S(i)), \lg(\beta_i P_S(i) + \kappa_i P_R(j))\} - \\ & \sum_{(i,j) \in W_D} \min\{\lg(1 + \eta_i P_S(i))\} \\ & \text{s. t. } P_{S,1} > 0, P_R > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

子问题2:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & P_{S,2} \\ & \sum_{(i,j) \in W_D} \min\{\lg(1 + \eta_i P_S(i))\} \\ & \text{s. t. } P_{S,2} > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

利用KKT条件^[15]的解决方案如下:

$$P_{S,2} = \begin{cases} \max\left(1 + \frac{1}{\nu_{S,2}} - \frac{1}{\beta_i}\right), & (i,j) \in W_R \\ 1, & (i,j) \in W_D \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\nu_{S,2}$ 表示 $P_{S,2}$ 的约束值。

由于目标函数是一个求和凸函数,并且约束是针对仿射和线性问题^[6],因此采用以下两个步骤来解决问题。

第1步 设置电源功率是恒定的并且通过 KKT 条件来优化中继功率:

$$P_R = \max\{\min\{0, \frac{1}{U_R} - \frac{\beta_i P_S(i)+1}{\kappa_i}\}, \frac{\eta_i - \beta_i}{\kappa_i} P_S(i)\} \quad (13)$$

$$\text{s. t. } (i, j) \in W_R$$

$$P_R = \min\{\max\{\frac{1}{U_R} - \frac{\beta_i P_S(i)+1}{\kappa_i}\}\} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } (i, j) \in W_D$$

第2步 设定中继功率是恒定的并且通过 KKT 条件优化电源功率:

$$P_S = \max\{\min\{0, \frac{1}{U_R} - \frac{1}{\eta_i}\}, \frac{\kappa_i}{\eta_i - \beta_i} P_S(j)\} \quad (15)$$

$$\text{s. t. } (i, j) \in W_R$$

$$P_R = \min\{\max\{\frac{1}{U_R} - \frac{1}{\beta_i}\}\} \quad (16)$$

$$\text{s. t. } (i, j) \in W_D$$

最后,这两个步骤可以交替进行,直到收敛。该方法能快速收敛到最佳点。

4 实验仿真结果

对于本文算法所选择的 DF 子载波配对和功率优化分配方法所表现出的性能,通过模拟在不同的源节点与中继节点距离、中继节点与目的节点距离以及不同的源节点与中继节点功率预算下的实验情况进行验证。假设源节点和目的节点的距离是保持不变的为 1000m,并且中继节点的位置由 $\frac{d(R,S)}{d_s}$ 表示, d_s 表示初始距离, $d(R,S)$ 表示中继节点与源节点的距离。定义 OFDM 调制的子载波数 $N=20$,子载波的间隔为 10kHz,并且 $\psi_R = \psi_D = 4.0 \times 10^{-17}$,信道复增益 φ 通过采用下面的分布规律从瑞利衰落信道获取:

$$\varphi = \Psi(1 + \frac{1}{F(1+d)^n})$$

其中, d 表示距离,路径损耗指数 $n=4$,阈指数 $F=3$ 。

为了验证本文提出的基于子载波选择配对及功率优化分配的多跳中继 OFDM 系统在提高网络覆盖率上的性能,在实验中与文献[8]的统计质量的服务(QoS)保证的资源分配方案以及文献[9]的 OFDM 中继系统异构服务的资源分配算法进行了对比,如图 1 所示。 $\frac{d(S,R)}{d(S,D)}$ 表示源节点与中继节点的距离对源节点与目的节点的距离的比值。从图 1 中可以看出,在比值为 0.6 左右时算法的迭代过程收敛到最优解,本文提出的算法的网络覆盖率达到到了 92%,而文献[8]算法则为 85%,文献[9]算法为 83%,因此相比之下本文的方法在提高网络覆盖率上表现出了更加良好的性能。

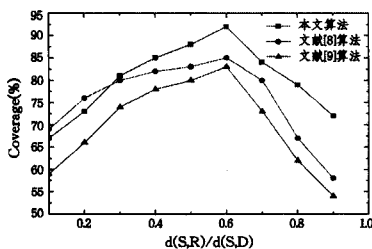


图 1 覆盖率性能

考虑到 OFDM 系统子载波选择配对以及功率优化分配下网络容量的提升效果,以 $\frac{d(S,R)}{d(S,D)}$ 作为变量,通过实验仿真得到了算法的网络容量测量结果,如图 2 所示。从中可以看出,处在源节点与目的节点之间的中继节点的位置的变动会影响到网络容量大小,因为中继节点承担着数据的解码和转发任务,并且影响着子载波的选择配对。当 $\frac{d(S,R)}{d(S,D)}$ 接近于 0.7 时,算法的网络容量达到最大,之后 $\frac{d(S,R)}{d(S,D)}$ 的值增大时网络容量开始逐渐减小。本文算法的网络容量最高达到了 2.13B/s/Hz,而文献[8]最高达到了 1.57B/s/Hz,仅为本文算法的 74%。而文献[9]的网络容量最高达到了 1.78B/s/Hz,仅为本文算法的 84%。

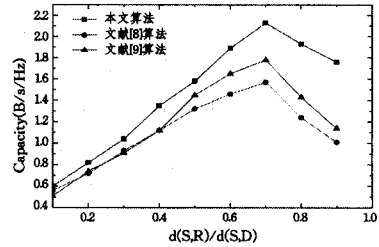


图 2 不同距离占比下的网络容量

图 3 显示了在不同的功率分配情况下算法所得到的网络容量,以 $\frac{2P(R)}{P(S)+P(D)}$ 作为横坐标,以网络容量作为纵坐标, $P(R)$ 表示中继节点分配的功率, $P(S)$ 、 $P(D)$ 分别表示源节点和目的节点分配的功率。从图 3 中的数据分布情况来看, $\frac{2P(R)}{P(S)+P(D)}$ 的值接近于 0.5 时网络容量达到最大,其中本文算法的网络容量为 2.32B/s/Hz,文献[8]为 2.21B/s/Hz,文献[9]为 1.89B/s/Hz,且在比值变化的过程中本文算法的网络容量相比这两种对比算法来说仍然占据优势。结合图 2 和图 3 的结果来看,本文提出的 OFDM 系统在提高网络容量上具有更好的性能。

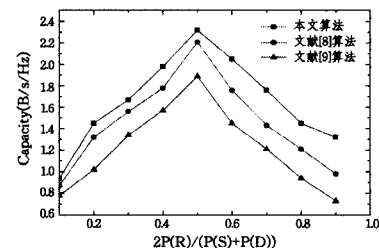


图 3 不同功率占比下的网络容量

结束语 本文提出了一个基于子载波选择性配对及功率优化算法的 OFDM 协作通信系统,其根据系统模型进行中继配对联合优化及功率分配分析,采用基于匈牙利算法的规划方法来进行子载波选择配对,在功率分配上通过将目标函数转换为一个求和凸函数,并利用 KKT 条件来优化中继功率。在实验中使用了类似的解决方案及算法进行对比,从数据分析的结果来看,本文提出的算法在提高网络覆盖率和网络容量上优于其他方法。今后将对 OFDM 协作通信系统的功率消耗问题展开进一步研究,尽可能地减少 OFDM 协作通信系统的能量消耗。

(下转第 100 页)

Algorithm with Traffic Prediction for LEO Satellite Network [J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2013, 6(3): 67-84

- [6] Mohorcic M, Svigelj A, Kandus G. Traffic class dependent routing in ISL networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1160-1172
- [7] Rao Y, Wang R. Performance of QoS routing using genetic algorithm for Polar-orbit LEO satellite networks[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(6): 530-538
- [8] Long F, Sun F, Yang Z. A Novel Routing Algorithm Based on Multi-Objective Optimization for Satellite Networks[J]. Journal of Networks, 2011, 6(2): 238-246

- [9] Werner M, Delucchi C, Vogel H J. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with inter-satellite links[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1): 69-82
- [10] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO Satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147
- [11] Mohorcic M, Svigelj A, Kandus G. Demographically weighted traffic flow models for adaptive routing in packet-switched non-geostationary satellite meshed networks [J]. Computer Networks, 2003(43): 113-131
- [12] Liao T, Stützle T, Montes de Oca M A, et al. A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 234(3): 597-609

(上接第 94 页)

参 考 文 献

- [1] Li S, Murch R D. Realizing Cooperative Multiuser OFDMA Systems with Subcarrier Resource Allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4): 1923-1935
- [2] Ng D W K, Lo E S, Schober R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with hybrid energy harvesting base station[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3412-3427
- [3] Xu Z, Yang C, Li G Y, et al. Energy-efficient configuration of spatial and frequency resources in MIMO-OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(2): 564-575
- [4] Navarro-Ortiz J, Ameigeiras P, Lopez-Soler J M, et al. A QoS-Aware Scheduler for HTTP Progressive Video in OFDMA Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(4): 677-680
- [5] 黄高飞, 罗丽平, 张广驰, 等. 具有时延 QoS 保证的 OFDM 中继系统子载波配对与功率分配算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 335-339
- Huang Gao-fei, Luo Li-ping, Zhang Guang-chi, et al. Subcarrier pairing and power allocation algorithm for the OFDM relay system with delay QoS guarantees [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 335-339
- [6] 陈煜, 方旭明, 赵越. 基于能效的解码转发中继 OFDM 链路自适应功率分配方案研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 285-290
- Chen Yu, Fang Xu-ming, Zhao Yue. Adaptive power allocation scheme for a decode-and-forward OFDM relay link based on energy efficiency[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 285-290
- [7] 赵晓晖, 杨伟伟, 金晓光. 多中继 OFDM 系统选择性子载波中继和功率分配算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(2): 478-484
- Zhao Xiao-hui, Yang Wei-wei, Jin Xiao-guang. Selective subcarrier relaying and power allocation algorithm for multirelay-assisted OFDM systems[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(2): 478-484
- [8] Huang G, Zhang G, Zheng H, et al. QoS-driven resource allocation scheme for the OFDM amplify-and-forward relay system [C]//2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). IEEE,

- 2011: 1-4
- [9] Wan Q, Ma G. Resource allocation algorithm for heterogeneous services in decode-and-forward OFDM relay system[C]//General Assembly and Scientific Symposium, 2011. URSI, IEEE, 2011: 1-4
- [10] Koshimizu Y, Okamoto E. An efficient channel estimation scheme using Walsh pilots in bi-directional wireless OFDM relay systems with analog network coding[J]. IEICE Transactions on Communications, 2013, 96(8): 2119-2130
- [11] Sanguinetti L, D'Amico A A, Rong Y. On the design of amplify-and-forward MIMO-OFDM relay systems with QoS requirements specified as Schur-convex functions of the MSEs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1871-1877
- [12] Simmons D, Halls D, Coon J P. OFDM-based nonlinear fixed-gain amplify-and-forward relay systems; SER optimization and experimental testing[C]//2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). IEEE, 2014: 1-5
- [13] Shah R A, Rajatheva N, Ji Y. Analysis of BER and capacity for dual-hop OFDM relay system with subcarrier mapping in Nakagami-m fading [C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2014: 5089-5094
- [14] Yang W, Cai Y, Yang W, et al. OFDM-based selective decode-and-forward relay systems with ordered subcarrier pairing[C]//2013 International Conference on Information Science and Technology (ICIST). IEEE, 2013: 1268-1271
- [15] Jia N, Feng W, Gafai N B, et al. Adaptive Modulation Based Relay Selection and Power Allocation in Cooperative OFDM Wireless Networks [C]//Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems. Springer International Publishing, 2014: 763-771
- [16] Hasan Z, Bhargava V K. Relay Selection for OFDM Wireless Systems under Asymmetric Information; A Contract-Theory Based Approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 3824-3837
- [17] 刘圣恩, 肖霖, 杨鼎成. MIMO-OFDM 双向多中继选择的网络资源优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 20-25
- Liu Sheng-en, Xiao Lin, Yang Ding-cheng. Resource optimizing for MIMO-OFDM two-way multi-relay selecting[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2015, 27(1): 20-25