

Lognormal-Rayleigh 信道中多跳 MIMO-OFDM 系统无线资源分配算法研究

刘俊

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要: 面向新一代无线通信网络, 研究基于 MIMO-OFDM 技术的多跳中继网络的容量及端到端吞吐量优化方案. 在 Lognormal-Rayleigh 阴影复合衰落信道环境中, 使用注水算法分配功率, 分析对系统容量和多跳中继系统端到端吞吐量的影响. 仿真结果表明: 使用注水算法对多跳 MIMO-OFDM 系统中各跳子载波对应的子信道进行功率分配, 可以显著提高系统吞吐量.

关键词: 多跳 MIMO-OFDM 中继系统; 拉格朗日乘法; 注水算法; 端到端吞吐量

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2015)05-0537-05

近些年, MIMO-OFDM 多跳中继无线网络已经成为无线通信领域中的研究热点^[1]. 影响多跳中继系统端到端吞吐量的一个重要因素是功率, 如何有效分配有限的功率, 从而达到端到端吞吐量的最大化是目前重要的研究课题. 本文作者在 MIMO 技术与 OFDM 技术的基础上推导注水算法, 研究比较在 MIMO-OFDM 系统中分别运用注水算法和传统的平均分配算法对子载波进行功率分配所得的信道容量, 以期得到更优的端到端系统吞吐量.

1 MIMO 系统的信道容量

1.1 平均功率分配法下 MIMO 系统的信道容量

根据 Foschini 和 Telatar 的 MIMO 信道容量公式^[2], 对于点到点窄带的每一个发射天线分支上平均发射功率相同的 MIMO 无线通信系统, 其信道容量可以表示为:

$$C_{EQ} = \log \det \left\{ \vec{I}_R + \left(\frac{P}{T \cdot \sigma^2} \right) \vec{H} \vec{H}^H \right\}. \quad (1)$$

其中 C_{EQ} 为信道容量, R 和 T 分别为接收端和发送端天线数量, P 为分配给 T 根天线的功率, σ^2 为噪声功率, \vec{H} 为 $R \times T$ 的信道矩阵, 其矩阵元素 h_{ij} 表示发射天线 j 到接收天线 i 的信道衰落系数.

对(1)式进行奇异值分解(SVD), 其容量公式也可表示为:

$$C_{SVD} = \sum_{i=1}^r \log \left(1 + \frac{P_i}{\sigma^2 \lambda_i} \right). \quad (2)$$

其中 P_i 表示发射天线 i 上的发射功率, 总的发射功率为 $P = \sum_{i=1}^r P_i$, $P_i = \frac{P}{T}$, λ_i 为信道矩阵 \vec{H} 的第 i 个奇异值, σ^2 为噪声的方差.

收稿日期: 2015-06-18

基金项目: 03 国家科技重大专项项目(2012ZX03001013-004)

通信作者: 刘俊, 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号, 复旦大学信息科学与工程学院, 邮编: 200433, E-mail: 10210720094@fudan.edu.cn

1.2 注水功率分配法下 MIMO 系统的信道容量

依据公式(2)利用拉格朗日乘子法推导出注水算法公式^[3-5],对信道状态较优的子信道分配更多的功率,从而达到总信道容量最大化,最优发射功率分配方法为:

$$P_i = \max\left(\frac{1}{\mu} - \frac{\sigma^2}{\lambda_i}, 0\right). \quad (3)$$

其中,

$$u = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{r\left(P + \sigma^2 \sum_{i=1}^r \frac{1}{\lambda_i}\right)}. \quad (4)$$

则信道容量为:

$$C_{\text{SVD}} = \sum_{i=1}^r \log\left(1 + \frac{\max\left(\frac{1}{\mu} - \frac{\sigma^2}{\lambda_i}, 0\right)}{\sigma^2} \lambda_i\right). \quad (5)$$

2 多跳中继系统容量

2.1 多跳 MIMO-OFDM 中继系统的信道容量

多跳 MIMO-OFDM 中继系统中,一种典型的传输机制为提出的 K 时隙传输策略^[6],将传输时间分割成 K 个时隙, $\Gamma_{\text{total}} = \sum_{i=1}^K \Gamma_i$,每一跳只占用 K 个时隙中的一个进行传送.文献[7]中所提出的双时隙的传输机制,即在第一个时隙 Γ_1 所有奇数跳进行信号传输,第二个时隙 Γ_2 所有偶数跳进行信号传输,能够在跳数较多情况下提高效率.

若系统中存在 N 个正交子载波用于承载信号,则在两个时隙中所有的子载波分别分配给所有的奇数跳或偶数跳进行传输,满足条件如下:

$$\sum_{k=1,3,5,\dots}^{K-1} N_k = N, \quad (6A)$$

$$\sum_{k=2,4,6,\dots}^K N_k = N. \quad (6B)$$

在第 k 跳中,有 $T^{(k)}$ 根发送天线, $R^{(k)}$ 根接收天线,可供调制信号子载波数为 $N^{(k)}$ 个,则每一个子载波对应一个 $R^{(k)} \times T^{(k)}$ 维度的 MIMO 信道衰落矩阵 $\vec{H}_{r,t,n}^{(k)}$, $n=1,2,\dots,N^{(k)}$,则子载波 n 所承载的容量为:

$$C_n^{(k)} = \sum_{i=1}^{I^{(k)}} \log_2\left(1 + \frac{P_{i,n} \cdot \lambda_{i,n}}{\sigma_{i,n}^2}\right). \quad (7)$$

第 k 跳的信道容量为:

$$C^{(k)} = \frac{1}{N^{(k)}} \left\{ \sum_{n=1}^{N^{(k)}} \left[\sum_{i=1}^{I^{(k)}} \log_2\left(1 + \frac{P_{i,n} \cdot \lambda_{i,n}}{\sigma_{i,n}^2}\right) \right] \right\}. \quad (8)$$

其中, $I^{(k)}$ 是对 MIMO 信道衰落矩阵进行 SVD 分解后所得特征值的个数. $P_{i,n}$ 表示分配给子载波 n 对应的第 i 个子信道的功率, $\sigma_{i,n}^2$ 为该子信道的噪声功率, $\lambda_{i,n}$ 则为表征该子信道的特征值.

2.2 多跳 MIMO-OFDM 中继系统的吞吐量

第 k 跳的信道吞吐量为: $T^{(k)} = \Gamma^{(k)} \cdot C^{(k)}$, 其中,

$$\Gamma^{(k)} = \begin{cases} \Gamma^{(1)}, & k = 1, 3, 5, \dots \\ \Gamma^{(2)}, & k = 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (9)$$

所以,多跳 MIMO-OFDM 中继系统的端到端吞吐量为:

$$T^{\text{end-to-end}} = \frac{1}{2} \cdot \min \{ T^{(1)}, T^{(2)}, \dots, T^{(k)}, \dots, T^{(K)} \}. \quad (10)$$

2.2.1 两跳 MIMO-OFDM 中继系统的吞吐量

两跳系统中使用双时隙传输策略,并且存在子载波数为 N ,第一跳的接收端天线数即第二跳的发送端天线数为 $R^{(1)} = T^{(2)}$. 在时隙 Γ_1 中,只有第一跳进行传输操作,所以所有的正交子载波都应用于传输,而在时隙 Γ_2 中,所有的子载波均用于第二跳传输.

在时隙 Γ_1 中,所有子载波为第一跳服务,每一个子载波对应一个 $T^{(1)} \times R^{(1)}$ 维的 MIMO 信道衰落矩阵 $\vec{H}_{r,t,n}$. 对 $\vec{H}_{r,t,n}$ 进行 SVD 分解,每一个矩阵可得 $I, I = \min \{ T^{(1)}, R^{(1)} \}$ 个特征值,即每子载波各自对应一个 SISO 子信道.

2.2.2 四跳 MIMO-OFDM 中继系统的吞吐量

考虑典型的四跳 MIMO-OFDM 中继系统. 设 N_1, N_2, N_3, N_4 分别表示四跳中各跳的子载波数, N 为 OFDM 总子载波数,且满足: $N_1 + N_3 = N_2 + N_4 = N$. Γ_1 和 Γ_2 为双时隙传输机制中的 2 个时隙参数,且满足: $\Gamma_1 + \Gamma_2 = 2$. 因为一个多跳中继系统的端到端吞吐量取决于各跳中最小的吞吐量,所以整个系统的端到端吞吐量最大的充要条件是系统的每一跳的吞吐量都相等,即 $T_1 = T_2 = T_3 = T_4$ 且 $T_1 = \Gamma_1 \cdot C_1$, $T_2 = \Gamma_2 \cdot C_2$, $T_3 = \Gamma_1 \cdot C_3$, $T_4 = \Gamma_2 \cdot C_4$. 整理得: $C_1 = C_3$, $C_2 = C_4$, $\Gamma_1 \cdot C_1 = \Gamma_2 \cdot C_2$. 可近似认为 C_1 和 C_3 (C_2 和 C_4) 相等. 由此,两时隙参数为: $\Gamma_1 = \frac{2 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$, $\Gamma_2 = \frac{2 \cdot C_1}{C_1 + C_2}$.

3 仿真结果

本文作者研究了在 Lognormal-Rayleigh 慢衰落独立同分布瑞利信道环境中,发射天线和接收天线数目相同,不同跳数和不同天线数目情况下,注水算法对 MIMO-OFDM 多跳系统容量的影响.

3.1 $2 \times 2 \times 2$ MIMO-OFDM 系统

发送端、中继点和接收端都有 2 根天线,设正交子载波数为 256 个,则在时隙 Γ_1 中,所有的子载波应用于第一跳承载信号,每一个子载波对应一个 2×2 的 MIMO 信道衰落矩阵,通过对该矩阵进行 SVD 分解后可以得到 2 个奇异值,由此可得到 2 个特征值,表示在第一跳中每个子载波都对应着 2 个并行传输子信道.

由图 1 仿真可知,注水法分配功率得到的信道容量明显优于平均法分配功率,而在信噪比大于 35 dB 时,两种方法下的吞吐量相差不多.

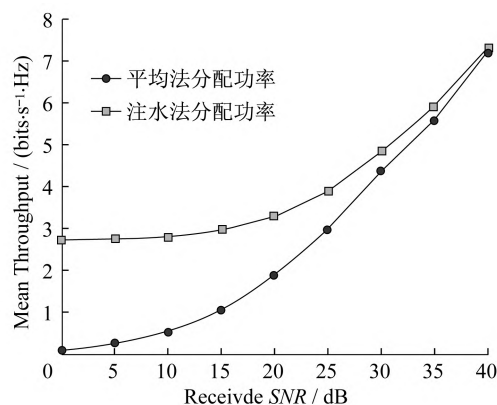


图1 $2 \times 2 \times 2$ MIMO-OFDM 系统容量

3.2 $4 \times 4 \times 4$ 和 $8 \times 8 \times 8$ MIMO-OFDM 系统

在使用了 4 和 8 根天线进行发送和接收时, MIMO-OFDM 系统的总吞吐量有了显著的提高. 如图 2~3 所示, 使用注水算法分配功率所得的吞吐量与平均分配功率所得的吞吐量之间的差别愈发明显.

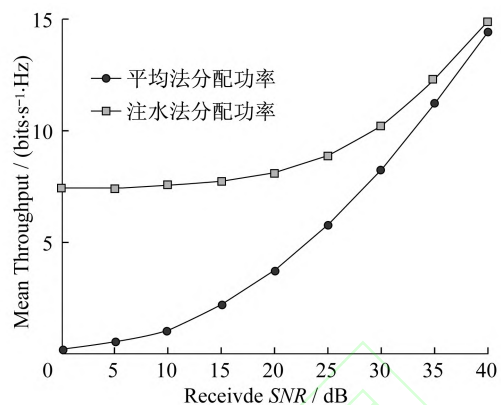


图 2 $4 \times 4 \times 4$ MIMO-OFDM 系统容量

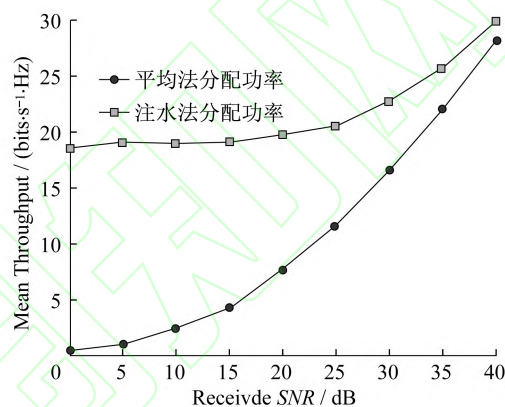


图 3 $8 \times 8 \times 8$ MIMO-OFDM 系统容量

4 总结

本文作者研究了下一代无线通信网络中基于 MIMO-OFDM 技术的多跳中继网络的容量及端到端吞吐量优化问题. 分析得到在 MIMO-OFDM 中继系统中, 天线的增多和跳数的增加都会带来端到端吞吐量的增加. 使用注水算法对多跳 MIMO-OFDM 系统中各跳子载波对应的子信道进行功率分配, 可以显著提高系统吞吐量.

参考文献:

- [1] KANG G H. MIMO principle and application of wireless communication[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2009.
- [2] TELATAR I E. Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels[J]. AT&T Bell Laboratories, Internal Tech. Memo, 1999, 10(6): 585 - 595.

- [3] JANKIRAMAN M. Space-Time Codes and MIMO Systems[M]. Boston: Artech House, 2004.
- [4] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory[M]. New York: John Wiley&Sons, 1991.
- [5] LV J G, LV Y H, ZHANG J L, et al. The effect of water flooding algorithm on the capacity of MIMO channel[J]. Journal of Binzhou University, 2005, 21(3): 29 – 32.
- [6] LI F, JAFARKHANI H. Resource allocation algorithms with reduced complexity in MIMO multi-hop fading channels[C]. 2009 IEEE ECNC Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, Budapest; IEEE, 2009.
- [7] ZHOU X, ARMSTRONG J, FANG Z, et al. Performance Analysis for a Multistage Radio Resource Allocation Scheme in MIMO-OFDMA Multi-hop System with Fairness Consideration [C]. Anchorage: Institute of Electronics Engineers Inc, 2009.

Study on a resource allocation scheme in multi-hop MIMO-OFDM systems over lognormal-rayleigh compound channels

LIU Jun

(School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: For new generation wireless communication networks, this paper studies the optimization of the capacity and end-to-end throughput of the MIMO-OFDM based multi-hop relay systems. A water-filling power allocation method is proposed to improve the channel capacity and the throughput of the MIMO-OFDM system based multi-hop relay system in the Lognormal-Rayleigh shadowing compound channels. Simulations on the capacity and throughput show that the water-filling algorithm can improve the system throughput effectively in the MIMO-OFDM multi-hop relay system.

Key words: MIMO-OFDM based multi-hop relay system; Lagrange multipliers; water-filling algorithm; end-to-end throughput

(责任编辑:包震宇)