

OFDM 协作通信中基于子载波映射的自适应传输策略

李富年^{1,2} 朱光喜¹ 王德胜¹

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉光电国家实验室(筹) 武汉 430074)¹

(武汉科技大学电子与信息工程系 武汉 430081)²

摘 要 在放大转发的 OFDM 协作通信网络中,由于第一跳传输(源节点到中继节点)与第二跳传输(中继节点到目的节点)的信道存在独立性,因此合适的子载波映射策略可以有效地提高信道容量,但存在着低信噪比情况下性能恶化的问题。提出了一种基于子载波映射的自适应传输策略,它利用信道状态信息来调整系统的传输策略,从而使得端到端的系统容量最大化。仿真结果表明,经自适应传输模式调整后,系统的中断概率和误符号率下降,同时信道容量的性能也得到提升。

关键词 协作通信,正交频分复用,子载波映射

中图法分类号 TN929 **文献标识码** A

Adaptive Transmission Scheme for Cooperative OFDM Networks Based on Subcarrier Mapping

LI Fu-nian^{1,2} ZHU Guang-xi¹ WANG De-sheng¹

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Department of Electronics and Engineering Information, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)²

Abstract In amplify-and-forward (AF) OFDM cooperative communication system, since the channel between the first hop (source-relay) and the second hop (relay-destination) varies independently, proper subcarrier mapping (SCM) strategy at the relay node has been shown to improve the average end-to-end capacity evidently. However SCM has a poor performance at the condition of low signal-to-noise-ratio (SNR), which is worse than direct transmission. To solve this issue, assuming that perfect channel knowledge is available at the destination node, an adaptive transmission scheme based on subcarrier mapping was proposed for the OFDM-based cooperative communications in this paper. The adaptive transmission scheme, which is based on instantaneous channel state information, was selected to offer maximum the end-to-end system capacity. The simulation results show that the proposed solution can evidently improve end-to-end system capacity and achieve better performance of outage probability and symbol error rate.

Keywords Cooperative communication, Orthogonal frequency division multiplexing, Subcarrier mapping

利用多个不同用户的天线组成虚拟天线阵,协作通信技术能够获得类似 MIMO 系统的性能增益,在抗信道衰落、增加无线覆盖范围、减小系统功率损耗等方面有很大的发展潜力^[1,2]。在协作通信中,两种主要的信号处理方式为大中继 (Amplify-and-forward, AF) 和解码中继 (Decode-and-forward, DF)。所谓放大转发就是指中继节点直接将接收到的信号进行模拟处理后再发送。而在解码转发中,中继节点先要对接收到的信号进行解调、解码,然后将数据进行编码调制后再发送。在放大转发的 OFDM 系统中,中继节点仅仅只需要做 FFT/IFFT 即可完成数据的转发,并不需要考虑源节点的编码策略。因此,整个通信系统需要升级时将会带来极大的方便。由此放大转发的 OFDM 协作通信系统更加受到研究人员的关注^[3,4]。

在放大转发的 OFDM 系统中,由于第一跳(源节点到中继节点)和第二跳(中继节点到目的节点)的信道之间的独立性,导致各个子载波在中继节点间的信道增益变化可能很大,因此根据前后两跳的信道增益的变化,动态调整中继节点子载波映射策略能够极大地提高系统性能。文献[5,6]给出了一种顺序子载波配对 (ordered subcarrier pairing, OSP) 的子载波映射算法,并通过仿真分析表明其可以极大提升系统容量。文献[7]提出了一种低复杂度的子载波映射算法。文献[8]提出了基于子带的子载波映射算法。文献[9]研究了多中继情况下的子载波映射策略。但是在低信噪比的情况下,子载波映射策略存在着对噪声的放大问题,因此其性能有时候比非协作的直接传输还要恶劣。为了解决此问题,本文提出了一种自适应传输策略,该策略根据瞬时信道状态来选择传

到稿日期:2009-11-26 返修日期:2010-01-20 本文受国家自然科学基金项目(60496315 和 60802009),国家 863 计划研究项目(2008AA01Z204 和 2009AA01Z205),国际科技合作计划(2008DFA11630)资助。

李富年(1979—),男,博士生,主要研究方向为无线网络中合作分集技术, E-mail: lifunian@gmail.com; 朱光喜(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线通信; 王德胜(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为宽带无线通信。

输方式,以达到最大的端到端传输容量。理论分析和仿真结果表明,该策略使得系统在中断概率和误符号率下降的同时,信道容量的性能也得到提升。

1 系统模型

本文考虑3节点的协作通信系统,源节点S通过中继节点R协作向目的节点D传输信息,每个节点使用OFDM方式传输,如图1所示。假设系统有N个子载波,且每个子载波信道上是平坦衰落的。

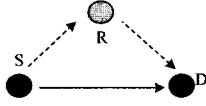


图1 3节点的系统模型

中继节点采用半双工的放大转发的方式,即整个协作通信过程分为两个过程。在第一个时隙,源节点S传输一个OFDM符号,假设每个子载波采用等功率分配,那么目的节点D和中继节点R在第k个子载波上接收到的信号分别为

$$y_{s,d,k} = h_{s,d,k}x_k + n_{s,d,k} \quad (1)$$

$$y_{s,r,k} = h_{s,r,k}x_k + n_{s,r,k} \quad (2)$$

式中, x_k 表示在第k个子载波上传输的符号; $h_{s,d,k}$ 和 $h_{s,r,k}$ 分别表示源节点到目的节点以及源节点到中继节点之间的信道增益; $n_{s,d,k}$ 和 $n_{s,r,k}$ 为对应的加性高斯白噪声,且假设其均值为0,方差分别为 $N_{s,d}$ 和 $N_{s,r}$ 。

在第二个时隙,中继节点R放大转发源节点的OFDM信息,则相应地由中继节点转发到达目的节点的信号可以表示为

$$y_{r,d,k} = g_{r,d,\alpha(k)}\beta y_{s,r,k} + \omega_{r,d,k} \quad (3)$$

式中, β 为中继节点的信号增益, $\alpha(k) \in [1, N]$ 为在中继节点端的子载波映射函数, $g_{r,d,\alpha(k)}$ 为对应中继节点到目的节点的信道增益。

根据中继节点对于第一跳和第二跳载波映射关系,系统存在不同的子载波配对传输策略。当 $\alpha(k) = k$ 时,为传统的放大转发OFDM协作传输,中继节点只需要进行FFT/IFFT操作。当 $\alpha(k) \neq k$ 时为子载波映射策略。由于第一跳和第二跳的信道之间的独立性,导致各个子载波在中继节点间的信道增益变化可能很大,则中继节点可根据前后两跳的信道状态信息的不同,来调整子载波的配对顺序,从而提高系统性能,如图2所示。例如第一跳的第k个子载波的信息可以通过载波映射后到第二跳的第j个子载波上传输。

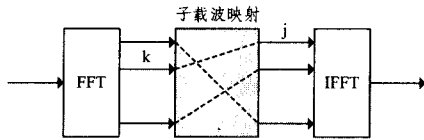


图2 中继节点的子载波映射

由此对于在子载波k上的传输信息,在 $k - \alpha(k)$ 的子载波配对映射的情况下,由源节点经过中继节点到达目的节点的等效信噪比(SNR)为

$$\gamma_{k,\alpha(k)} = \frac{|\beta|^2 |g_{r,d,\alpha(k)}|^2 |h_{s,r,k}|^2 E[|x_n|^2]}{|\beta|^2 |g_{r,d,\alpha(k)}|^2 N_{s,r} + N_{r,d}} \quad (4)$$

为了简化分析,假设所有的子载波信道为瑞利信道,则 $|g_{r,d,\alpha(k)}|^2$ 和 $|h_{s,r,k}|^2$ 服从指数分布。且假设所有子载波信

道的噪声功率谱密度相等,即 $N_{s,r} = N_{r,d} = N_0$ 。让 $\rho = \frac{E[|x_n|^2]}{N_0}$,则式(4)可简化为

$$\gamma_{k,\alpha(k)} = \frac{|\beta|^2 |g_{r,d,\alpha(k)}|^2 |h_{s,r,k}|^2 \rho}{|\beta|^2 |g_{r,d,\alpha(k)}|^2} \quad (5)$$

2 自适应传输策略

在高信噪比情况下,子载波映射可以提高端到端的信道容量^[5]。但是在低信噪比情况下,由于对噪声存在较大的放大,从而影响系统性能,因此为更好提高系统端到端的性能,可以根据瞬时的信道状态信息来调整系统的传输策略。

从系统传输模型可以看出,从源节点到目的节点之间存在可能的传输策略如图3所示,其中:

a)直接传输模式。该模式仅仅需要利用到直接传输链路(即SD链路),并不需要借助中继节点进行协作传输。直传路径不存在噪声放大的问题。

b)子载波映射模式。利用中继节点前后两跳信道的独立性,动态调整子载波映射关系,从而提高系统性能。本文采用文献[5]提出的顺序子载波配对策略,即在第一跳的子载波中,信道增益最大的子载波上的信息映射到第二跳信道增益最大的子载波上传输,相应的第一跳的次优的子载波对应第二跳次优的子载波,依此类推。当SR链路的信噪比较大的时候,这种子载波配对策略可以极大提高系统容量^[6],而在低信噪比情况下存在噪声放大的问题。

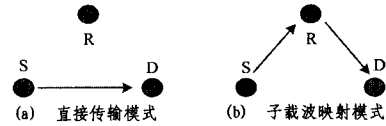


图3 系统可能的传输模式

对于系统存在的两种可能的传输模式,本文根据不同信道状态信息下的传输容量,自适应调整传输方式,以此提高系统性能。由此需要计算不同信道信息条件下的两种传输模式的传输容量。

对此直接传输模式,假设目的节点采用最大合并比(MRC)接收,则等效端到端(源节点S到目的节点D)的信噪比 γ_{DT} 为所有子载波的信噪比之和,即

$$\gamma_{DT} = \rho \sum_{k=1}^N |h_{s,d,k}|^2$$

因而直接传输模式下的信道容量为

$$C_{DT} = \log(1 + \gamma_{DT}) \quad (6)$$

对于子载波映射模式而言,文献[6]给出了在等功率条件下采用子载波配对 $k - \alpha(k)$ 方式的情况下,相应的源节点到目的节点链路信噪比的概率密度函数为

$$p_{r(k)}(\gamma) = \frac{2\eta}{\rho} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} a_j a_i \exp\left(-\frac{b_j \gamma}{\rho}\right) \times \left\{ \sqrt{\frac{b_i \gamma}{\eta \rho b_i}} K_1 \left(2\sqrt{\frac{\eta b_i b_j \gamma}{\rho}} \right) + K_0 \left(2\sqrt{\frac{\eta b_i b_j \gamma}{\rho}} \right) \right\} \quad (7)$$

式中, $a_i = N(-1)^i C_{N-1}^{i-1} C_{k-1}^{i-1}$, $b_i = i + N - k + 1$, $K_0(\cdot)$ 和 $K_1(\cdot)$ 分别为修正的零阶和一阶贝塞尔函数^[10]。则等效子载波配对 $k - \alpha(k)$ 方式的信道容量为

$$C_k = \frac{1}{2} \int_0^\infty \log_2(1 + \gamma) p_{r(k)}(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

其中由于采用半双工的传输方式,一个完整传输需要两个时隙,则传输容量需要 1/2。

因此子载波映射策略下的系统总容量为各个等效子载波容量之和,即

$$C_{SCM} = \sum_{k=1}^N C_k \quad (9)$$

由此根据上述不同传输模式的传输容量的分析,本文提出的自适应传输策略的传输模式的选择准则为

$$\arg \max \{C_{DT}, C_{SCM}\}$$

即根据式(6)和式(9)分别计算其传输容量,选择瞬时信道容量最大的传输路径模式进行传输。

在该自适应传输策略实现过程中,由目的节点 D 根据不同的信道状况来集中控制系统的传输模式。从选择的准则可以看出,目的节点必须知道前后两跳传输的各个子载波上的信道状态信息,以此来计算相应的各种不同传输模式下的信道容量。这些信道状态信息可以通过相应的 RD 链路信道估计和 SR 信道信息反馈来获得。但是随着子载波数目的增大,其相应的系统的信道反馈量将很大。

为解决反馈量较大的问题,可以采用文献[5]提出的基于子载波块映射的方式。此时在中继点的子载波映射操作是以子载波块为基础,而不是单独的子载波的映射。例如一个 1024 个子载波的 OFDM 系统若采用子载波块数 n_{dk} 为 16 的载波映射方式,则系统只需要对 64 个子载波块的平均信噪比做信息反馈,便可极大减少反馈量。其相应的第 i 跳、第 m 个子载波块的信噪比为该块内所有子载波的平均信噪比,即

$$\gamma_{i,l} = \frac{\rho}{n_{dk} k=1+(m-1)n_{dk}} \sum_{k=1+(m-1)n_{dk}}^{mn_{dk}} |h_{i,k}|^2$$

式中, $h_{i,k}$ 为对应的子载波信道增益。

3 性能分析

在本节中,用中断概率(outage probability)和误符号率(symbol error rate)参数来分析本文提出的自适应传输策略的性能。

3.1 中断概率

中断概率定义为 $P_{out} = P\{C < R\}$ 。从本文提出的自适应传输策略来看,由于选择瞬时信道容量最大的传输路径模式进行传输,则在直接传输模式和子载波映射模式都处于中断的情况下,本文提出的自适应传输策略才可能处于中断状态,即

$$P_{out}^{adaptive} < P_{out}^{DT} \text{ 和 } P_{out}^{adaptive} < P_{out}^{SCM}$$

由此在系统所有可能的传输模式中,本文提出自适应传输策略的中断概率最小。

3.2 误符号率

同样地,可以证明本文提出的自适应传输策略的误符号率为最小。根据文献[11]可以得到,如果系统采用非相关的信号调制方式,则相应的系统误符号率一般来说都是接收信噪比 γ 的单调增函数。例如采用 BPSK 调制,其相应的误符号率为 $Q(\sqrt{2\gamma})$,其中 $Q(\cdot)$ 为 Q 函数。由此目的节点已知完全的信道信息,使得接收信噪比最大,也就等效系统的误符号率最小。而系统的传输容量是接收信噪比的单调增函数,所以最大化系统吞吐量与最小化系统误符号率是等价的。而从本文提出的自适应传输策略来看,由于选择瞬时信道容量最大的传输路径模式进行传输,因此可以确认本文提出的策略的误符号率比直接传输和子载波映射两种传输模式的符号率要小。

4 仿真结果和分析

在本文的仿真环境中,设定所有信道为频率选择性信道,由 6 径的瑞利信道组成。其各径的功率延迟谱密度呈指数衰减,即 e^{-2l} (l 为多径的标识),则相应的归一化功率为 $[0, -8.69, -17.37, -26.06, -34.74, -43.43]$ dB。系统采用 32 个子载波的 OFDM 调制,每个子载波的带宽为 1MHz,采用 BPSK 调制。对于每个子载波的放大转发的信号增益设置为常数,即 $|\beta|^2 = 1$ 。

图 4 比较了 4 种不同策略下的平均吞吐量,分别是 1) 本文提出的自适应传输策略;2) 直接传输策略;3) 子载波映射策略;4) 传统(即非子载波映射)的放大转发的 OFDM 策略。从图上可以看出,自适应传输策略的平均信道容量最大。在低信噪比的情况下,存在着信道容量增益。此外,可以看出子载波映射策略在低信噪比的情况下由于噪声放大的问题比直接传输的性能要差。而当信噪比较大时,子载波映射策略的系统容量要高于直接传输模式。

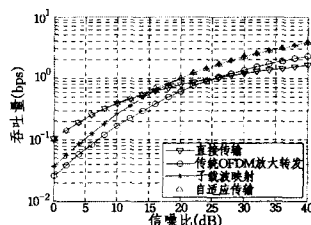


图 4 4 种策略的平均吞吐量

图 5 显示了上述 4 种不同策略下的中断概率变化的情况,可以看出经过自适应传输模式调整后的网络,其中断概率要比直接传输模式和子载波映射策略要小,这与理论分析相吻合。图 6 显示了系统误符号率性能。同样可以看出自适应传输模式系统的误符号率最低。

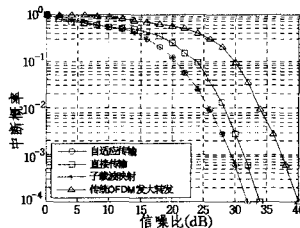


图 5 系统中断概率性能

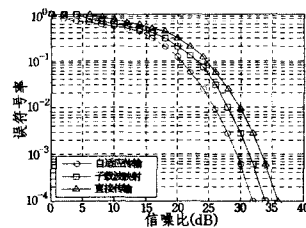


图 6 系统误符号率性能

结束语 协作通信技术在抗信道衰落、增加无线覆盖范围、减小功率损耗等方面有很大的发展潜力。在放大转发的 OFDM 协作通信网络中,由于中继节点的第一跳传输和第二跳传输的信道独立性,因此合适的子载波映射策略可以有效地提高端到端的信道容量。然而,在低信噪比的情况下存在性能恶化的问题。本文提出了一种基于子载波映射的自适应传输策略,即利用信道瞬时信噪比来调整传输的策略,从而使端到端的系统容量最大化。仿真结果表明,经传输模式调整后的网络,其系统信道容量的性能得到了提升。

参考文献

- [1] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks; Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080

(下转第 94 页)

处发生溢出,其他包长下均未溢出;当 $\lambda_{p,avg}$ 为350000个/s,包长1800byte时在0.05ms处发生溢出,包长600byte时在0.18ms处发生溢出,包长200byte时不溢出。

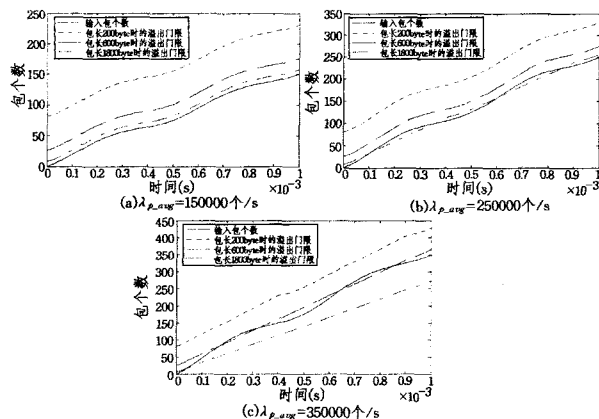


图4 溢出门限(缓存16kbyte)

综上可得,对于相同的缓存容量、相同的包长,平均包到达率越大,越容易溢出;对于相同的缓存容量、相同的平均包到达率,包长越大,越容易溢出。

(2)缓存容量要求

图5为在 $\lambda_{p,avg}$ 为350000个/s时,4种缓存容量下,发生溢出的时间随包长变化的关系曲线。可以看出,对于相同的平均包到达率、相同包长,缓存容量越小,越容易溢出,增大缓存容量能推迟发生溢出的时间,并能在一定程度上防止溢出。当包长超过一定值时,发生溢出的时间接近负指数分布。

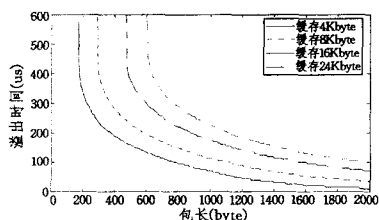


图5 溢出时间($\lambda_{p,avg}$ = 350000个/s)

图6(a)为在不溢出的前提下所需缓存容量与平均包到达率及包长变化的关系曲线,图6(b)为3种包长下所需缓存容量与平均包到达率的关系曲线。

可以看出,在处理速度一定时,系统所需缓存与包到达率和包长有关。当平均包到达率很小时,处理系统可实时处理,

所需缓存基本为0。随平均包到达率的增大,所需缓存不断增大。包长很小时,缓存增加幅度很小。随包长的增加,缓存增加幅度也随之变大,所需缓存基本接近指数分布。

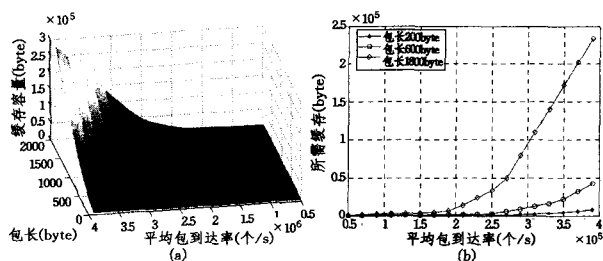


图6 缓存容量需求

结束语 本文通过分析包到达率、处理单元的处理速度、缓存容量、帧长和包长等影响系统性能的因素,建立了CCSDS发送端复用处理系统的性能模型及处理界限。仿真结果验证了包到达率和包长对系统性能的影响及对缓存容量的需求,可对CCSDS协议的包调度技术、包长、帧长及缓存的分析与设计提供理论依据,可为发送端数据处理系统的进一步研究提供理论和仿真验证基础。

参考文献

- [1] 巴勇. CCSDS协议及空间数据系统分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000
- [2] CCSDS. CCSDS 732. 0-B-2. AOS Space Data Link Protocol[S]. Recommendation for Space Data System Standard. 2006, 7
- [3] 谭维炽, 顾莹琦. 空间数据系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004
- [4] Bruce B. CCSDS Compatible High-rate Telemetry Formatter for Space Application[C] // Proceedings of the 1995 International Telemetry Conference. Las Vegas, USA, 1995: 550-557
- [5] Alex N. Integrated CCSDS, SGLES and STDN Telemetry, Tracking and Command Processing System[C] // Proceedings of the 1995 International Telemetry Conference. Las Vegas, USA, 1995: 535-540
- [6] 杜国明, 陈逢田. CCSDS 遥测包处理分析[J]. 航天器工程, 2007, 16(5): 110-114
- [7] CCSDS. CCSDS 133. 0-B-1. Space Packet Protocol[S]. Recommendation for Space Data System Standard. 2003, 9
- [8] 顾莹琦, 谭维炽. 分包数据系统的星上数据源及其模型[J]. 航天器工程, 2000, 9(4): 16-21
- [9] 2008
- [7] Eunsung J, Janghoon Y, Dong Ku K. A Low Complexity Subcarrier Pairing Scheme for OFDM Based Multiple AF Relay Systems[C] // Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology (ICCIT '08). 2008
- [8] 周明宇, 李立华, 张平, 等. 两跳 OFDM-AF 接力系统中的子载波配对技术[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(1)
- [9] Zhou M, et al. Sub-carrier Coupling for OFDM based AF Multi-relay Systems[C] // IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007). 2007
- [10] Gradshteyn I, Ryzhik I. Table of integrals, series, and products (6th ed)[M]. Jeffrey A, Zwillinger D, eds. Academic Press, 2000
- [11] Lizhong Z, Tse D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1073-1096

(上接第84页)

- [2] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks[J]. Communications Magazine, IEEE, 2004, 42(10): 74-80
- [3] Kaneko M, et al. Amplify-and-forward cooperative diversity schemes for multi-carrier systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1845-1850
- [4] Hammerstrom I, Wittneben A. On the Optimal Power Allocation for Nonregenerative OFDM Relay Links[C] // IEEE International Conference on Communications (ICC '06). 2006
- [5] Herdin M. A Chunk Based OFDM Amplify-and-Forward Relaying Scheme for 4G Mobile Radio Systems[C] // IEEE International Conference on Communications (ICC '06). 2006
- [6] Athaudage C R N, Saito M, Evans J. Performance Analysis of Dual-Hop OFDM Relay Systems with Subcarrier Mapping[C] // IEEE International Conference on Communications (ICC '08).