

一种正交调制协作系统的功率分配方法

李靖, 葛建华, 王勇, 祁丽娟

(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, 710071, 西安)

摘要: 针对正交调制协作系统中本地和中继信号采用等功率分配(EPA), 导致系统资源利用率低的问题, 提出了一种正交调制功率优化分配(QM-OPA)方法. QM-OPA方法以最小化系统误码率为目标, 根据用户上行信道和用户间信道的平均信噪比来计算本地和中继信号的功率优化分配因子, 并利用反馈信道将功率分配信息发送给协作用户, 从而实现了功率的自适应分配, 提高了系统的资源利用率. QM-OPA方法能降低系统误码率, 且实现复杂度较低. 仿真结果表明, 在实际的非理想协作场景下, 与EPA方法相比, QM-OPA方法在误码率为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 时最大可提供约7 dB的信噪比增益.

关键词: 协作通信; 正交调制; 误码率; 功率优化分配

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0081-05

Optimal Power Allocation for Cooperative Systems Utilizing Quadrature Modulation

LI Jing, GE Jianhua, WANG Yong, QI Lijuan

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

Abstract: Since the equal power allocation (EPA) between the local and relayed signals in cooperative system utilizing quadrature modulation results in resource inefficiency, a quadrature modulation optimal power allocation (QM-OPA) algorithm is proposed. An optimal power allocation factor is obtained to minimize the end-to-end bit error rate (BER) of the system using the average signal-to-noise ratios (SNRs) between uplink and inter-user channels, and then the optimal power allocation data is transmitted to cooperative users through feedback channels so that the system resource utilization can be improved. The proposed algorithm is effective in reducing the BER performance and has low implementation complexity. Theoretical and simulation results show that in practical non-ideal cooperation scenarios, the QM-OPA algorithm outperforms the EPA algorithm by a maximum SNR benefit of 7 dB when the BER is in the range $[10^{-4}, 10^{-2}]$.

Keywords: cooperative communication; quadrature modulation; bit error rate; optimal power allocation

协作分集技术使多用户环境下的单天线终端通过共享彼此的资源, 形成虚拟的多天线发射机, 从而获得空间分集增益, 提高系统传输性能^[1-2]. 协作分集系统有多种分类方式^[3], 如按照中继的信号处理方式可分为译码转发和放大转发系统, 按照中继的

信道自适应性又可以分为固定式和选择式系统.

功率是无线通信系统中的重要资源. 如何针对特定的协作分集系统, 以不同的性能优化为目标进行功率分配, 从而充分利用有限的系统资源, 是系统设计中的关键问题^[4-6]. 基于正交调制的构架与处理

方法,文献[7-8]提出了一种固定式译码转发协作系统,可在不扩展系统带宽的条件下完成协作通信.该系统采用等功率分配(EPA)算法,即协作用户分配给本地和中继信号的发射功率相等.EPA算法虽然相对简单,但是没有考虑用户在网络中的各异性,缺乏对信道的自适应性,极大地降低了系统资源的利用率.为此,本文针对基于正交调制的选择式译码转发协作系统,以降低系统平均误码率为目标,提出了一种最优功率分配(OPA)算法.

1 系统模型

考虑一个两用户无线协作系统,用户A和B互相协作向目的端D发送信息.用户采用半双工传输,即不能同时发送和接收信息.将用户发送的数据帧序列表示为 $S_i(k)$, $i \in \{A, B\}$, $k \in \{1, \dots, N\}$,其中N是总帧数.以用户A的数据发送和接收为例,协作通信的实现过程如图1所示.

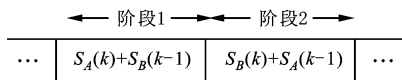


图1 协作通信的实现过程(用户A)

传输过程分为2个阶段:①用户A发送本地数据 $S_A(k)$ 和伙伴B的前一帧数据 $S_B(k-1)$;②用户B发送本地数据 $S_B(k)$ 和伙伴A在第1阶段发送的数据帧 $S_A(k)$.采用含循环冗余校验(CRC)的选择式译码转发协议,且将每个用户的发射功率归一化为1,按如下方式调整本地和伙伴数据的功率,如果用户解码的伙伴数据经CRC校验正确,则用户利用系统误码率最小准则下的功率因子 β ($0 < \beta \leq 0.5$)在本地和伙伴数据间进行功率分配;否则,用户以全部功率发送本地数据.

用户间信道和用户至目的端信道的衰落系数用 h_{ij} , $i \in \{A, B\}$, $j \in \{A, B, D\}$ 表示, h_{ij} 均服从均值为0的复高斯分布,方差为 σ_{ij}^2 . h_{ij} 相互独立,且在一帧内保持不变. $n_i^{(j)}$, $i \in \{A, B, D\}$, $j \in \{1, 2\}$ 表示接收机i在阶段j的加性白噪声,服从均值为0的复高斯分布,每维的方差为 $N_0/2$.每条链路的瞬时信噪比 $\gamma_{ij} = |h_{ij}|^2 E_b / N_0$,其平均值 $\bar{\gamma}_{ij} = E[|h_{ij}|^2] \cdot E_b / N_0$, E_b 表示每比特能量.假定系统完全同步,接收端完全已知信道状态信息.

第1阶段,用户B和目的端接收的信号分别为

$$y_B^{(1)}(k) = h_{AB}((1-\beta)^{\theta_1/2} S_A(k) + j\beta^{1/2} \theta_1 S_B(k-1)) + n_B^{(1)}(k) \quad (1)$$

$$y_D^{(1)}(k) = h_{AD}((1-\beta)^{\theta_1/2} S_A(k) + j\beta^{1/2} \theta_1 S_B(k-1)) + n_D^{(1)}(k) \quad (2)$$

式中: θ_1 是一个二进制随机变量.根据是否成功对伙伴B的数据 $S_B(k-1)$ 解码,用户A以功率 $1-\beta$ ($\theta_1=1$)或者功率 1 ($\theta_1=0$)发送本地数据 $S_A(k)$.根据式(1)和最大似然(ML)译码规则,在阶段1用户B对用户A发送数据的检测估值可表示为 $\hat{S}_A(k) = \text{sgn}\{((1-\beta)^{\theta_1/2} \text{Re}[h_{AB}^* y_B^{(1)}(k)])\}$, $\text{Re}(\cdot)$ 表示信号的实部.

在第2阶段,目的端接收的信号为

$$y_D^{(2)}(k) = h_{BD}((1-\beta)^{\theta_2/2} S_B(k) + j\beta^{1/2} \theta_2 S_A(k)) + n_D^{(2)}(k) \quad (3)$$

θ_2 的含义与 θ_1 相同.经过协作传输,将式(2)和(3)中的同相和正交分量进行最大比合并(MRC)后送入ML判决器,可得到目的端对用户A发送数据的检测估值 $\hat{S}_A(k)$ 为

$$\hat{S}_A(k) = \text{sgn}((1-\beta)^{\theta_1/2} \text{Re}[h_{AD}^* y_D^{(1)}(k)] + \beta^{1/2} \theta_2 \text{Im}[h_{BD}^* y_D^{(2)}(k)]) \quad (4)$$

式中: $\text{Im}(\cdot)$ 表示信号的虚部.

2 系统性能分析

假设每个用户均采用二进制移相键控(BPSK)调制.本节推导瑞利衰落信道下用户A的端到端误码率性能.将式(2)和(3)代入式(4)可得

$$\hat{S}_A(k) = \text{sgn}(|h_{AD}|^2(1-\beta)^{\theta_1} + |h_{BD}|^2\beta^2 S_A(k) + n_R(k) + n_I(k)) \quad (5)$$

式中: $n_R(k)$ 和 $n_I(k)$ 为等效的加性噪声,服从均值为0、方差分别为 $\frac{|h_{AD}|^2(1-\beta)^{\theta_1} N_0}{2}$ 和 $\frac{|h_{BD}|^2\beta^2 N_0}{2}$ 的高斯分布.假设输入比特等概率,则用户A的瞬时误码率为

$$R_{\text{BE},A}^c = P(\hat{S}_A(k) = 1 | S_A(k) = -1) = \sum_{\theta_1=0}^1 \sum_{\theta_2=0}^1 P(\theta_1, \theta_2) P(\hat{S}_A(k) = 1 | S_A(k) = -1, \theta_1, \theta_2) = \sum_{\theta_1=0}^1 \sum_{\theta_2=0}^1 P(\theta_1, \theta_2) P(n_R(k) + n_I(k) > |h_{AD}|^2(1-\beta)^{\theta_1} + |h_{BD}|^2\beta^2) = \sum_{\theta_1=0}^1 \sum_{\theta_2=0}^1 P(\theta_1, \theta_2) Q((2((1-\beta)^{\theta_1} \gamma_{AD} + \beta^2 \gamma_{BD}))^{1/2}) \quad (6)$$

式中:函数 $Q(\cdot)$ 表示高斯概率密度函数(pdf)的尾部面积.根据瞬时信噪比 γ_{AD} 和 γ_{BD} 的pdf对式(6)

求平均,即可得到用户 A 的平均误码率 $\bar{R}_{\text{BE},A}$.

2.1 协作场景的概率

根据用户 A 和 B 之间的对称性,两者协作时存在 4 种场景:①两用户均发送中继信号,此时 $\theta_1=1, \theta_2=1$;②只有用户 B 发送中继信号,此时 $\theta_1=0, \theta_2=1$;③只有用户 A 发送中继信号,此时 $\theta_1=1, \theta_2=0$;④两用户均不发送中继信号,此时 $\theta_1=0, \theta_2=0$. 每种协作场景的概率即为式(6)中的 $P(\theta_1, \theta_2)$.

令 η_A 和 η_B 分别表示用户 A 和 B 发送中继信号的概率. 由于用户 A 只有在对用户 B 的数据帧成功译码时,才进入协作模式(反之亦然),因此

$$1 - \eta_A = \eta_B \bar{R}_{\text{FE},BA}^P + (1 - \eta_B) \bar{R}_{\text{FE},BA}^F \quad (7)$$

$$1 - \eta_B = \eta_A \bar{R}_{\text{FE},AB}^P + (1 - \eta_A) \bar{R}_{\text{FE},AB}^F \quad (8)$$

式中: $\bar{R}_{\text{FE},BA}^P$ 和 $\bar{R}_{\text{FE},BA}^F$ 分别表示用户 B 以部分(用上标 P 表示)和全部(用上标 F 表示)功率向用户 A 发送本地数据时的平均误帧率(FER), $\bar{R}_{\text{FE},AB}^P$ 和 $\bar{R}_{\text{FE},AB}^F$ 的含义类似. 假定协作用户间信道是对称的,即 $\bar{R}_{\text{FE},BA}^P = \bar{R}_{\text{FE},AB}^P, \bar{R}_{\text{FE},BA}^F = \bar{R}_{\text{FE},AB}^F$, 解式(7)和(8)可得

$$\eta_A = \eta_B = \frac{1 - \bar{R}_{\text{FE},AB}^F}{1 + \bar{R}_{\text{FE},AB}^P - \bar{R}_{\text{FE},AB}^F} \quad (9)$$

在瑞利慢衰落信道条件下,当用户 A 以功率 $(1 - \beta)^{\theta_1}$ 发送 BPSK 调制信号时,用户 B 接收的平均误码率为^[9]

$$\bar{R}_{\text{FE},AB} = 1 - (1 - a)^{N_f} (1 +$$

$$\sum_{k=1}^{N_f} \prod_{l=1}^k \frac{ab(N_f + 1 - l)}{(1 - a)(1/(2(1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AB}) + lb)}) \quad (10)$$

式中: N_f 表示帧长; $a=0.18, b=0.55$ 是 Prony 表达式^[10] $Q((x)^{1/2}) \approx ae^{-bx}$ 中的近似值. 因此, $\bar{R}_{\text{FE},AB}^P$ 和 $\bar{R}_{\text{FE},AB}^F$ 可表示为

$$\bar{R}_{\text{FE},AB}^P = \bar{R}_{\text{FE},AB}(\theta_1 = 1); \bar{R}_{\text{FE},AB}^F = \bar{R}_{\text{FE},AB}(\theta_1 = 0) \quad (11)$$

基于本节分析,每种协作场景的概率 $P(\theta_1, \theta_2)$ 为

$$P(\theta_1 = 1, \theta_2 = 1) = \eta_A(1 - \bar{R}_{\text{FE},AB}^P) \quad (12)$$

$$P(\theta_1 = 0, \theta_2 = 1) = (1 - \eta_A)(1 - \bar{R}_{\text{FE},AB}^F) \quad (13)$$

$$P(\theta_1 = 1, \theta_2 = 0) = \eta_A \bar{R}_{\text{FE},AB}^P \quad (14)$$

$$P(\theta_1 = 0, \theta_2 = 0) = (1 - \eta_A) \bar{R}_{\text{FE},AB}^F \quad (15)$$

将式(11)代入式(9)和式(12)~式(15)即可求出 $P(\theta_1, \theta_2)$.

2.2 协作场景下的平均误码率

在式(6)中,根据信噪比 γ_{AD} 和 γ_{BD} 的 pdf 对瞬

时误码率 $Q((2((1 - \beta)^{\theta_1} \gamma_{AD} + \beta^2 \gamma_{BD}))^{1/2})$ 求平均,可得到每种协作场景下的平均误码率 $\bar{R}_{\text{BE},A}(\theta_1, \theta_2)$. 根据 2 路上行信道接收信噪比 $(1 - \beta)^{\theta_1} \gamma_{AD}$ 和 $\beta^2 \gamma_{BD}$ 的取值可分为 2 种情况来讨论.

(1) $(1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD} = \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}$. 将对称的 2 路上行信号进行 MRC 合并,得^[11]

$$\bar{R}_{\text{BE},A}(\theta_1, \theta_2) = (2 + (\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{1 + \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}})^{1/2}) \cdot (\frac{1}{2} (1 - (\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{1 + \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}})^{1/2}))^2 \quad (16)$$

(2) $(1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD} \neq \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}$. 将不对称的 2 路上行信号进行 MRC 合并,得^[8]

$$\begin{aligned} \bar{R}_{\text{BE},A}(\theta_1, \theta_2) = & \frac{1}{2} \left(\frac{(1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD}}{(1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD} - \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}} \cdot \right. \\ & \left. (1 - (\frac{(1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD}}{1 + (1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD}})^{1/2}) \right) + \\ & \frac{1}{2} \left(\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD} - (1 - \beta)^{\theta_1} \bar{\gamma}_{AD}} (1 - (\frac{\beta^2 \bar{\gamma}_{BD}}{1 + \beta^2 \bar{\gamma}_{BD}})^{1/2}) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

给定用户间和上行信道平均信噪比时,用户 A 的平均误码率为

$$\bar{R}_{\text{BE},A} = P(\theta_1, \theta_2) \bar{R}_{\text{BE},A}(\theta_1, \theta_2) \quad (18)$$

误码率最小准则下的最优功率分配因子为

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\text{opt}} = & \arg \min_{\beta} \bar{R}_{\text{BE},A} \\ \text{s. t. } & 0 < \beta < 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

β_{opt} 可通过数值仿真方法得到. 目的端将 β_{opt} 反馈至用户,可使用户根据实际信道条件对分配给本地和中继信号的功率行自适应调整,从而降低系统误码率,提高系统资源利用率.

3 仿真实验与分析

在对称和非对称上行信道条件下,研究本文系统分别采用 EPA 和 OPA 算法时的性能. 仿真条件: BPSK 星座调制,信道间互相独立,且均服从平坦瑞利衰落;用户间信道对称 ($\bar{\gamma}_{AB} = \bar{\gamma}_{BA} = \gamma_0$); 帧长为 128 b, 帧数为 10^6 .

图 2 给出了对称上行信道条件下且 γ_0 变化时,用户 A 在 EPA 算法下的误码率性能. 从图 2 可看出,当 γ_0 足够大时,用户 A 能获得二阶完全分集增益. 与文献[7,8]中的固定式系统相比,即使在用户

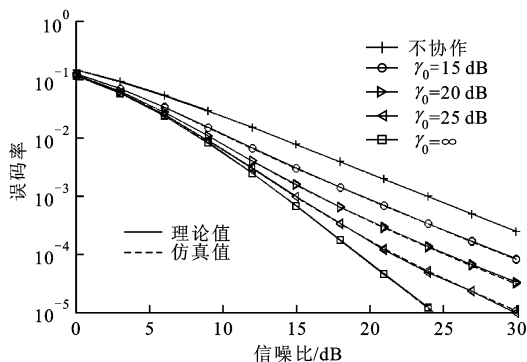


图2 对称信道下采用EPA算法时用户A的误码率

间信道质量劣于上行信道的场景下,本文系统也能获得性能增益,如 $\gamma_0 = 15$ dB,上行信道信噪比在15~30 dB范围内变化时,有3~4 dB的增益.由图2可以看出理论值与仿真值相吻合.图3给出了非对称上行信道条件下, γ_0 分别为15 dB和25 dB时,用户A和B的误码率性能.在仿真中, $\bar{\gamma}_{AD}$ 固定为14 dB, $\bar{\gamma}_{BD}$ 从0 dB变化到30 dB.图3说明,无论哪个用户的上行信道质量更好,协作时两用户均能获得性能增益,且增益大小与用户间信道质量相关.

图4和图5分别给出了对称和非对称上行信道条件下且 γ_0 变化时,EPA和OPA算法下的功率因子对用户A误码率性能的影响.图4和图5表明:当 γ_0 足够大时,OPA算法和EPA算法是等价的;当 γ_0 分别为15 dB和25 dB时,在2种上行信道条件下采用OPA算法求出的最优功率因子分别为0.18、0.35和0.24、0.32.与EPA算法相比,采用OPA算法在误码率为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 时最大可获得约2.5 dB、1 dB和7 dB、2 dB的信噪比增益.图5中的上行信道条件与图3相同.

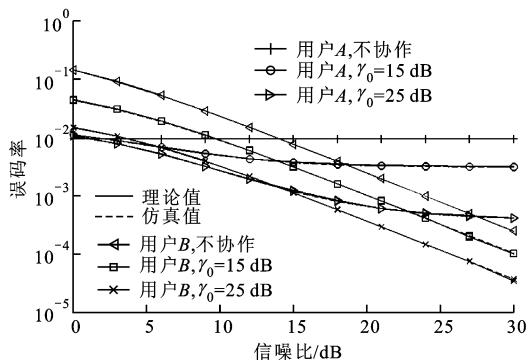


图3 非对称信道下采用EPA算法时用户A和B的误码率

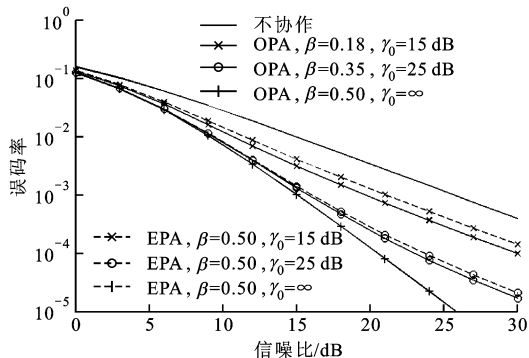


图4 对称信道下采用2种算法时用户A的误码率

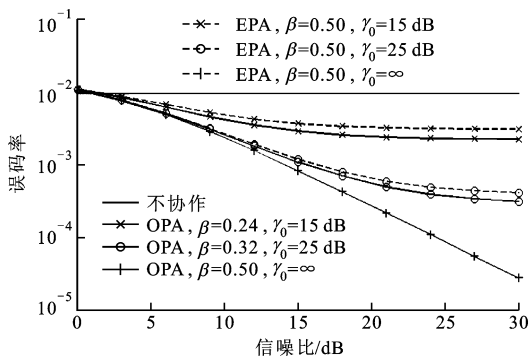


图5 非对称信道下采用2种算法时用户A的误码率

4 结论

本文提出了一种基于正交调制的选择式译码转发协作系统,推导了系统误码率性能的闭式解,并提出了误码率最小准则下的功率分配方法.研究表明:在理想协作场景下,等功率分配最优,且本文系统能获得完全分集增益;在非理想协作场景下,采用功率优化分配可以获得额外的性能增益.下一步研究将考虑在所提系统中引入信道编码技术以获得编码增益.

参考文献:

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Co-operative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50 (12): 3062-3080.
- [2] HUNTER T E, NOSRATINIA A. Diversity through coded cooperation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 5(2): 283-289.
- [3] 殷勤业,张莹,丁乐,等.协作分集:一种新的空域分集技术[J]. 西安交通大学学报,2005, 39(6): 551-557.
YIN Qinye, ZHANG Ying, DING Le, et al. Coopera-

tive diversity: a new spatial diversity technique [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 551-557.

[4] ANNAVAJJALA R, COSMAN P C, MILSTEIN L B. Statistical channel knowledge based optimum power allocation for relaying protocols in the high SNR regime [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 292-305.

[5] HOST-MADSEN A, ZHANG J S. Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(6): 2020-2040.

[6] SU Weifeng, SADEK A K, RAY LIU K J. Cooperative communication protocols in wireless networks: performance analysis and optimum power allocation [J]. Wireless Personal Communication, 2008, 44(2): 181-217.

[7] MAHINTHAN V, MARK J W. A simple cooperative diversity scheme based on orthogonal signaling [C]//Proc IEEE WCNC'05. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 13-17.

[8] MAHINTHAN V, MARK J W, SHEN X S. A cooperative diversity scheme based on quadrature signaling [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 6(1): 41-45.

[9] LI Jing, GE Jianhua, TANG Yunshuai, et al. Cooperative diversity based on Alamouti space-time code [C]//Proc IEEE ICCSIT. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 642-646.

[10] LOSKOT P, BEAULIEU C N. Average error rate evaluation of digital modulations in slow fading by pro-ny approximation [C]//Proc IEEE ICC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 3353-3357.

[11] PROAKIS J G. Digital communications [M]. 4th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2003.

(编辑 刘杨)

张心湜院士受聘为西安交通大学教授

2008 年 12 月 15 日下午,台湾阳明大学前校长、著名泌尿外科专家张心湜院士受聘为西安交通大学教授,西安交通大学党委书记、校务委员会主任王建华教授为张院士颁发聘任证书并佩戴校徽。副校长闫剑群主持聘任仪式。

校党委书记王建华在讲话中对张院士接受我校的聘任表示感谢。他指出,半年来张院士在促进我校医学院建设方面做了大量的工作,功不可没。2008 年 12 月 15 日是“大三通”正式开始的第一天,在这样一个具有纪念意义的时刻,相信张教授作为我校教师队伍中的一员,作为医学学科的带头人,一定能使我校的医学教育获得快速发展。

张心湜院士在答谢辞中表示,这是他再次获得我校聘书,最早的一次是 11 年前获得原西安医科大学荣誉教授聘书。西安交通大学的医学教育具有很好的基础,阳明大学的医学教育在台湾地区有很好的成就,希望两校之间更深入地开展交流合作。

随后,张心湜教授为医学校区各院领导、学科系主任及教师做了题为《阳明大学医学教育改革》的报告。由张心湜教授率领的阳明大学教授访问团带来了《阳明大学课程介绍》、《美国密苏里大学课程介绍》、《为什么要问题导向小组学习》、《如何进行问题导向小组学习》、《PBL 教案与大课堂的整合》、《如何作小组及学生评量》及《小组引导的经验分享》等精彩报告。

(来源:交大新闻网 <http://xjtunews.xjtu.edu.cn>)