

一种降低垂直分层空时码球解码 复杂度的自适应调制

龚政委¹, 张太镒¹, 张璟¹, 汪烈军^{1,2}

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 新疆大学信息学院, 830046, 乌鲁木齐)

摘要: 针对垂直分层空时码球解码算法复杂度高的问题, 提出了一种新的基于部分信息反馈的自适应调制算法. 该算法首先根据每个发送天线总功率增益, 选择该天线所用星座图大小, 保持每次传输的总码率恒定, 然后调整码元解码顺序, 减少球解码总的搜索结点数, 对于不同调制方式的复信号点球解码算法, 给出了不同的结点搜索方法. 由于球解码查找树根结点的减少, 避免了低自由度信道系数引起的额外搜索, 因此降低了迭代搜索次数. 仿真结果表明, 对于3天线垂直分层码, 3 bit 反馈信息使球解码的迭代次数降低了50%, 而且提高了系统性能.

关键词: 球解码; 解码复杂度; 部分反馈; 自适应调制

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)06-0655-05

Novel Adaptive Modulation Reducing Sphere Decoding Complexity of Vertical Bell Labs Layered Space-Time

Gong Zhengwei¹, Zhang Taiyi¹, Zhang Jing¹, Wang Liejun^{1,2}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830046, China)

Abstract: Focusing on the high sphere decoding (SD) complexity of vertical Bell labs layered space-time (VBLAST), a novel adaptive modulation (AM) algorithm based on partial feedback is proposed. According to the total power gain of each transmit antenna, the corresponding constellation size is selected and the invariant transmit rate is kept. Then, the symbol decoding sequence is adjusted to cut down the total searching nodes. Decreasing the root nodes helps to reduce the iterative searching of SD by avoiding some extra searching caused by the low freedom degree of channel coefficient. For different modulations (e. g. QAM and PSK) of complex-signal SD, different node searching schemes are derived. Simulation results demonstrate that for VBLAST over three transmit antennas, a three-bit feedback reduces a half of the iteration number of SD and enhances the system performance.

Keywords: sphere decoding; decoding complexity; partial feedback; adaptive modulation

基于多输入多输出(MIMO)系统的垂直分层空时码(VBLAST)^[1-2]结构可有效提高系统频谱利用率. 目前, 针对 VBLAST 的研究主要集中在解码方面. 文献[3]中的球解码是一种获得近似最大似然性能的解码算法, 但解码复杂度仍然较高. Shamsi

Mehrdad^[4]等人采用混合星座图调制虽降低了球解码复杂度, 但却牺牲了部分系统性能.

近来提出的自适应调制算法^[5]使发送端利用信道信息能自适应地选择星座图和发送功率等参数, 进一步提高了系统性能. 然而, 反馈MIMO系统的

全部信道信息比较困难. Ko Youngwook 等人^[6-7]提出的码率自适应调制(RAM), 只需反馈单个星座图的大小信息, 实现简单, 但并不适合球解码算法.

结合球解码算法和自适应调制各自的优点, 本文提出了一种基于部分信息反馈的自适应调制算法. 和 RAM 不同, 发送端采用和文献[4]类似的多星座图调制, 保持总的传输码率不变, 降低了球解码复杂度, 并且自适应地调整各天线的调制星座图, 提高了 VBLAST 的误码性能. 发送端所需反馈信息只包含各个发送天线所用星座图的大小, 容易实现. 另外, 本文算法针对不同的调制方式, 给出了不同复信号点球解码的结点搜索方法, 降低了搜索复杂度.

1 信道模型

考虑一个收发天线数分别为 M 和 N 的 MIMO 系统. 在平坦慢衰落信道下, 从发射天线 $m(1, 2, \dots, M)$ 到接收天线 $n(1, 2, \dots, N)$ 之间的信道增益系数为 h_{mn} , 各收发天线信道之间相互独立, 增益系数服从均值为 0、实部和虚部的方差都为 0.5 的独立一致分布复高斯随机变量.

在某一个时刻, 接收天线 n 上的输出信号为

$$r_n = \sum_{m=1}^M h_{nm} c_m + w_n \quad (1)$$

式中: c_m 为天线 m 发送的码元信息; w_n 为加性白噪声, 它服从独立一致的复高斯分布, 均值为 0、实部和虚部的方差均为 $\sigma^2/2$. 接收信号向量为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{c} + \mathbf{w} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T$; $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_M]^T$ 和 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 分别为发送信号向量和加性噪声向量; $\mathbf{H}$ 为 $N \times M (N \geq M)$ 维的信道信息矩阵.

2 球解码算法

2.1 实信号点球解码算法

假设接收端已知信道信息, 则码元向量 $\mathbf{C}$ 的最大似然(ML)解码 $\hat{\mathbf{c}}$ 满足条件

$$\hat{\mathbf{c}} = \underset{\mathbf{c} \in \Xi}{\operatorname{argmin}} \{ \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{c}\|_{\text{F}}^2 \} = \underset{\mathbf{c} \in \Xi}{\operatorname{argmin}} \{ (\mathbf{s} - \mathbf{c})^* \mathbf{H}^* \mathbf{H} (\mathbf{s} - \mathbf{c}) \} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{s} = (\mathbf{H}^* \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^* \mathbf{r}$; $\|\cdot\|_{\text{F}}$ 表示 Frobenius 范数; Ξ 为包括所有可能发送码元向量 $\mathbf{c}$ 的集合; $(\cdot)^*$ 表示复共轭转置.

球解码(SD)算法^[3]思想: 在一个初始半径为

d , 以点 $\mathbf{s}$ 为球心的超球体内搜索信号点, 如果半径缩小, 更新半径和球心, 通过迭代搜索, 直到超球内只有一个信号点, 作为 $\mathbf{c}$ 的最佳解码.

对信道矩阵 $\mathbf{H}$ 作 QR 分解, 使 $\mathbf{H}^* \mathbf{H} = \mathbf{R}^* \mathbf{R}$, 其中 $\mathbf{R}$ 为上三角阵, 则式(3)变为

$$\hat{\mathbf{c}} = \underset{\mathbf{c} \in \Xi}{\operatorname{argmin}} \{ \|\mathbf{R}(\mathbf{s} - \mathbf{c})\|_{\text{F}}^2 \} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{i,j=1}^M$; $\hat{\mathbf{c}} = [\hat{c}_1 \ \hat{c}_2 \ \dots \ \hat{c}_M]^T$ 的各个分量按照下标的逆序逐步解得, 且 $\hat{\mathbf{c}}$ 的第 i 层分量 $\hat{c}_i (i=1, 2, \dots, M)$ 满足

$$|r_{ii}(s_i - \hat{c}_i) + \rho_i| < d_i \quad (5)$$

其中 s_i 为信号向量 $\mathbf{s}$ 的第 i 层分量, $\rho_i = \sum_{j=i+1}^M r_{ij}(s_j - \hat{c}_j)$, $d_i^2 = d^2 - \sum_{l=i+1}^M \left| \sum_{j=l}^M r_{lj}(s_j - \hat{c}_j) \right|^2$. 逐层解码的思想表明, SD 算法的本质是一个查找树算法.

传统的 SD 算法把 QAM 码元的实部和虚部分开检测, 使式(5)的约束条件转为

$$s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}} - \frac{d_i}{|r_{ii}|} < \hat{c}_i < \frac{d_i}{|r_{ii}|} + s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}} \quad (6)$$

避免了穷尽搜索整个星座图, 降低了每层结点搜索的复杂度. 然而, 分离检测只适用于 QAM 调制方式, 且查找树的层数增加了一倍, 增加了总的结点数, 对于大小为 $L=2^b (b \in \mathbb{Z})$ 的复星座图, 查找树层数为 $2M$, 每个结点对应实星座图大小为 $l=L^{1/2}$, 查找树总的结点数为

$$N_r = \sum_{k=1}^{2M} l^k = \frac{l^{2M+1} - 1}{l - 1} - 1 \quad (7)$$

可见, SD 算法的复杂度随查找树的结点总数增加而提高, 减少结点总数可降低解码复杂度.

2.2 复信号点球解码算法

为了提高 SD 算法的通用性, 减少查找树结点总数, 利用复信号点直接进行球解码, 结点总数变为

$$N_c = \sum_{k=1}^M l^k = \frac{l^{M+1} - 1}{l - 1} - 1 \quad (8)$$

比较式(8)和式(7), 可得

$$N_r - N_c = \sum_{k=1}^M l^{2k-1} = \frac{l^{M+1/2} - l^{1/2}}{l - 1} > 0 \quad (9)$$

从上式明显看出, 复信号点 SD 算法可以减少查找树结点总数.

复信号 SD 算法的结点搜索约束条件为式(5), 需要搜索整个 QAM 星座图得出该结点的集合. 为了避免这种过程, 我们采用方形区域代替圆形区域作为约束条件, 式(5)变为

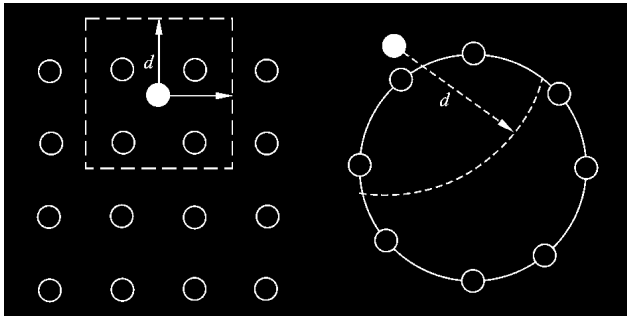
$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}\left\{s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}}\right\} - \frac{d_i}{|r_{ii}|} &< \operatorname{Re}\{\hat{c}_i\} < \frac{d_i}{|r_{ii}|} + \operatorname{Re}\left\{s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}}\right\} \\ \operatorname{Im}\left\{s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}}\right\} - \frac{d_i}{|r_{ii}|} &< \operatorname{Im}\{\hat{c}_i\} < \frac{d_i}{|r_{ii}|} + \operatorname{Im}\left\{s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}}\right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ 和 $\operatorname{Im}\{\cdot\}$ 分别为取实部和虚部. 尽管约束范围的扩大会引入一些不满足条件式(5)的星座点, 但解码采用的近距优先准则^[3]使这些错误点不参与解码, 并不增加额外搜索.

对于 PSK 调制方式, 令 $\hat{c}_i = e^{j\theta}$, $s_i + \frac{\rho_i}{r_{ii}} = r_0 e^{j\theta_0}$, 星座点的搜索转变为相角搜索, 约束条件 $1 + r_0^2 - 2r_0 \cos(\theta_0 - \theta) < \frac{d_i^2}{r_{ii}^2}$ 可简化为

$$\theta_0 - \theta_1 < \theta < \theta_0 + \theta_1 \quad (11)$$

式中: $\theta_1 = \arccos\left\{\left(1 + r_0^2 - \frac{d_i^2}{r_{ii}^2}\right)/2r_0\right\} \in (0, \pi)$. 图 1 给出了两种调制方式的球解码结点搜索示意图.



(a) QAM 复星座点搜索 (b) PSK 复星座点搜索

图 1 QAM 和 PSK 球解码的星座点搜索示意图

2.3 自适应调制球解码算法

由复信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的正交-三角(QR)分解可知, 式(4)中上三角矩阵 $\mathbf{R}$ 的各对角元互相独立, 第 i 层对角元 r_{ii} 服从自由度为 $2(M-i+1)$ 的 χ^2 分布, 非对角元 r_{ij} ($i \neq j$) 服从独立复高斯分布. 因此, i 值越大, r_{ii} 自由度越小, 均值越小, 取小值的概率越大. 在查找树的搜索过程中, 特别是根结点, 即使当前搜索到一个信号点使得超球半径已经达到最小值, 但当对角元系数比较小的时候, 该层满足条件式(5)的星座点集合仍然很大, 超球内信号点并不单一, 需要返回上层结点进行搜索, 造成了浪费. 对于树顶结点, 即使该层的星座图很大, 每次搜索完也都只剩下一个最佳星座点. 因此, 要尽量减小根结点的星座图, 增大树顶结点的星座图, 即不同的发射天线自适应地调整星座图大小, 但每次传输总的码率保持不变. 在接收端按照星座图大小的升序排列, 把对应的码

元分别放在查找树的第 $M, M-1, \dots, 1$ 层上, 这种方式使查找树的结点总数最少.

证明: 令第 i ($i=M, M-1, \dots, 1$) 层的星座图大小为 l_{M-i+1} , 不失一般性, 经过排序后, 自适应调制之前, 由根结点至树顶结点的对应星座图大小分别为 $l_1, l_2, \dots, l_M$ ($l_1 \leq l_2, \dots, \leq l_M$), 则查找树总结点数目为

$$N_p = \sum_{p=1}^M \prod_{q=1}^p l_q \quad (12)$$

假设经过一次自适应调整后, l_i 和 l_k 分别变为 l'_i 和 l'_k , $l_i l_k = l'_i l'_k$ ($l'_i < l_i < l'_k$) 确保码率不变, 则重新排序后星座图大小序列重排为 $l_1, l_2, \dots, l_{i-1}, l'_i, l_{i+1}, \dots, l_{k-1}, l'_k, l_{k+1}, \dots, l_M$, 这时的查找树结点总数可分段表示为

$$N_a = \sum_{p=1}^{i-1} \prod_{q=1}^p l_q + l'_i \left(\prod_{q=1}^{i-1} l_q \right) \left(\sum_{p=i+1}^{k-1} \prod_{q=i+1}^p l_q + 1 \right) + \left(\prod_{q=1}^k l_q \right) \left(\sum_{p=k+1}^M \prod_{q=k+1}^p l_q + 1 \right) \quad (13)$$

比较式(12)和式(13)可以得到

$$N_p - N_a = (l_i - l'_i) \left(\prod_{q=1}^{i-1} l_q \right) \left(\sum_{p=i+1}^{k-1} \prod_{q=i+1}^p l_q + 1 \right) > 0 \quad (14)$$

式(14)证明了自适应调制调整解码顺序后可以使 SD 算法查找树的结点总数达到最少, 从而降低搜索复杂度.

3 自适应准则

对于每一次具体的传输, 可以根据成对错误概率(PEP)来衡量 VBLAST 的性能. 在接收端已知信道信息 $\mathbf{H}$ 的条件下, 发送端码元向量 $\mathbf{c}$ 解码为 $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_M]^T$ 的成对错误概率最小的条件是使误差量

$$D = \|\mathbf{H}(\mathbf{c} - \mathbf{e})\|_F^2 = (\mathbf{c} - \mathbf{e})^* \mathbf{H}^* \mathbf{H} (\mathbf{c} - \mathbf{e}) \quad (15)$$

最大化.

信道矩阵元素的独立性使得矩阵 $\mathbf{H}^* \mathbf{H}$ 对角占优, 因此误差量 D 可近似表示为

$$D = (\mathbf{c} - \mathbf{e})^* \operatorname{diag}\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\} (\mathbf{c} - \mathbf{e}) = \sum_{i=1}^M \alpha_i |c_i - e_i|^2 \quad (16)$$

式中: $\alpha_i = \sum_{j=1}^N |h_{ji}|^2$ 表示第 i 个发送天线到所有接收天线总的功率增益; $\operatorname{diag}\{\cdot\}$ 表示向量的对角化.

由式(16)可以看出,由于发送信号的随机性,系统的误码性能主要由欧氏距离最小的两个码元向量决定.即两个码元向量 $\mathbf{c}$ 和 $\mathbf{e}$ 中只有第 i 个码元不同,且为星座图上的相邻码元,这时误差量 D 最小,为

$$d_i = \alpha_i q_i \quad (17)$$

式中: q_i 为第 i 个码元所对应的星座图最小欧氏距离,则

$$D_{\min} = \min\{d_1, d_2, \dots, d_M\} \quad (18)$$

由式(18)可见, VBLAST 的性能主要由 $D_{\min}$ 决定.因此,根据具体的信道信息,计算得到 α_i , 调整每层所对应星座图的 q_i , 使得 $D_{\min}$ 最大化,从而提高分层空时码的性能.

由于本算法在发送端只需自适应地调整每个天线上的星座图大小,每个天线的发送功率相同,因此发送端只需知道比特信息在每个天线上的分配控制信息.假设每次传输的总比特数为 $P(P > \gamma)$, 其中 γ 为所有天线上必须发射的最少比特数,则剩余 $P - \gamma$ 个比特信息在 M 个天线上分配的方案共有 $M^{P-\gamma}$ 种,相应地系统需要反馈至少 $(P - \gamma) \lg M$ 个比特信息.对于实际的传输,可以在反馈链路的开支、性能改进、搜索复杂度降低之间折中考虑.最简单的自适应调制方案是将功率总增益最小的发射天线上的 1 个比特信息,转移到功率总增益最高的天线上发送.此时,发送端总共有 P_M^2 种不同的星座图选择方案,反馈链路至少需要传输 $\lg P_M^2$ 个比特信息,其中 P_M^2 表示 M 取 2 的全排列.

4 仿真结果

本文通过计算机 Monte-Carlo 仿真实验,验证了两种不同传输码率 ($B=6, 9$ b/s) 下的 VBLAST 性能.发送天线和接收天线数目相同, $M=N=3$. 发送端用到的几种基带调制方式为 BPSK, 4QAM, 8QAM, 16QAM. 系统性能用误符号率 (R_s) 随信噪比 (S_{NR}) 变化的曲线来衡量.

图 2 给出了 VBLAST 分别采用 QAM 和自适应 QAM (AQAM) 调制方式的球解码误码性能.由图可知,在传输码率 $B=6$ b/s 时, AQAM 调制并没有明显提高解码性能,这是因为低阶调制使自适应调制并没有明显增大式(18)中的 $D_{\min}$. 在 $B=9$ b/s 时, AQAM 方式在 $R_s = 10^{-2}$ 时,能获得大约 1 dB 的性能增益.为了减少反馈信息,仿真采用前面介绍的简单自适应调制方案,1 个 3 天线发射系统只需反馈 3 个比特信息,与已知信道信息的传统自适应

调制算法相比^[5],系统实现更加容易.

图 3 给出了两种不同调制方式下 SD 解码迭代次数 I_N (Iteration Number) 随信噪比 (S_{NR}) 变化的曲线.实验中 SD 算法的初始半径选择和每层结点的搜索排序准则都和文献[3]完全一样.尽管在 $B=6$ b/s 时, AQAM 并不提高 VBLAST 性能,但由图 3 可以看出,解码的迭代次数减少了一半.在 $B=9$ b/s 时,本文算法不但提高了解码性能,而且把迭代次数减少为原来的一半.因此,利用少量信息反馈的球解码算法,降低了解码复杂度,获得了接近最大似然的解码性能.

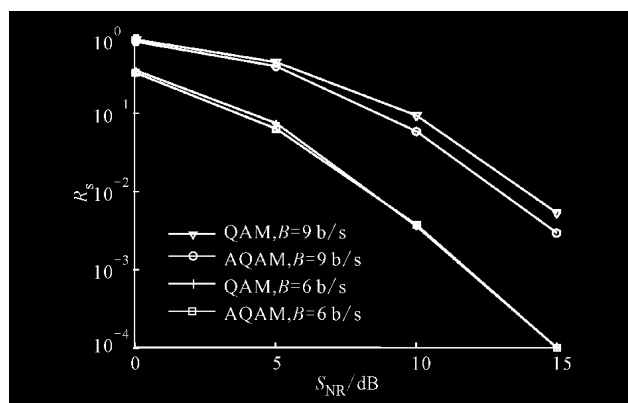


图2 不同调制方式的 VBLAST 误码性能比较

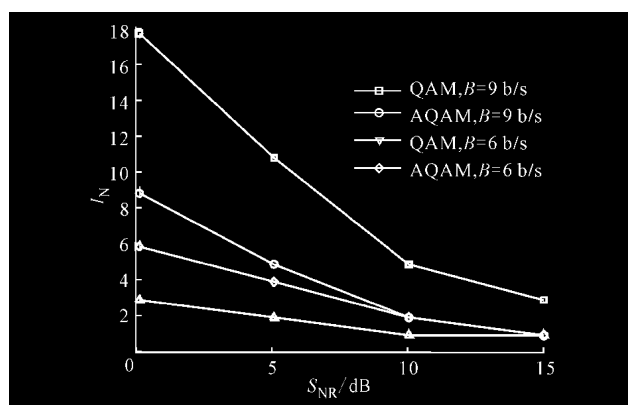


图3 不同调制方式下 SD 算法的迭代次数比较

5 结论

本文提出了一种降低 VBLAST 球解码复杂度的自适应调制算法.利用接收端已知的信道信息,计算每个发送天线的功率总增益,调整该天线所对应的星座图大小,使增益低的天线使用低阶调制,增益高的使用高阶调制,保持总的传输码率不变.在接收端按照星座图大小重新调整解码顺序,不但减少了 SD 解码的查找树结点总数,而且减少了由信道系数自由度低引起的冗余搜索,降低了搜索复杂度.针对

不同调制方式的复星号点 SD 算法,给出了不同的结点搜索方法. Monte-Carlo 仿真实验表明,利用很少的信息反馈,自适应星座图调制不但提高了垂直分层空时码的性能,而且使获得近似最大似然性能的球解码算法复杂度大大降低.

参考文献:

- [1] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Bell Labs Tech J, 1996, 1 (2): 41-59.
- [2] Golden G D, Foschini G J, Valenzuela R A, et al. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. Electronics Letters, 1999, 35(1):14-16.
- [3] Vikalo H, Hassibi B. On sphere decoding algorithm I: expected complexity [J]. IEEE Trans Signal Process, 2005, 53(8):2806-2818.
- [4] Shamsi M, Ardakani M, Blake I F. Mixed-Q linear space-time codes [J]. IEEE Trans on Commun, 2006, 54(5): 849-857.
- [5] Zhou Zhendong, Vucetic B. MIMO systems with adaptive modulation [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1828-1842.
- [6] Ko Y, Tepedelenlioglu C. Rate control using antenna selection for closed-loop spatial multiplexing [C] // Proc IEEE Globecom 2005. Piscataway, USA: IEEE Press, 2005:3608-3612.
- [7] Ko Y, Tepedelenlioglu C. Orthogonal space-time block coded rate-adaptive modulation with outdated feedback [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2006, 5 (22): 290-295.

(编辑 刘杨)

中国工程院外籍院士 Tom Bell 教授来我校工作

4月9日,英国皇家工程院院士、中国工程院外籍院士、国际材料表面学科的创始人 Tom Bell 教授接过校党委书记王建华的聘书,正式成为我校教授.根据协议,Bell 教授从 2007 年起的 4 年间,每年至少在我校工作 6 个月以上,并担任新近成立的西安交通大学表面工程国际研究开发中心主任.这是一个新的里程碑,是我校吸引国际大师长期来校工作的良好开端.

聘任仪式由副校长卢天健主持.教育部、国家外专局、英国驻中国大使馆分别发来贺信,祝贺 Tom Bell 教授来我校工作.王建华书记在致词中说,西安交大正处于快速发展的时期,地处西部的高校更应该努力吸引国际大师来担任学科带头人, Tom Bell 教授出任实职教授是我校做出的新尝试,学校将创造更好的条件,不断推进学科建设和科学研究.陕西省科技厅副厅长邱义路、西安市科技局局长徐可为等有关人员参加了聘任仪式.

西安交大表面工程国际研究开发中心挂靠金属材料强度国家重点实验室,由中英双方教师和研究生 30 余人组成. Bell 教授将带领团队紧密跟踪国际学科前沿方向,以国家重大目标需求为牵引,在金属表面改性技术、薄膜材料、生物材料、表面喷涂等方面积极争取重大基础和应用研究计划及国际重大合作项目,力争取得国际先进或领先水平的科研成果;主办系列国际学术会议;开办研究生和青年学者学术讲座;并在适当时候创办国际学术杂志,大力提升我国材料学科在国际学术界的竞争力和影响力.

Tom Bell 教授 1941 年出生于英国利物浦,1961 年利物浦大学冶金专业毕业,1965 年获利物浦大学冶金专业博士学位.先后在利物浦大学冶金工程与材料学系和伯明翰大学冶金工程与材料学系工作.他在国际上首创材料表面工程学科方向,现任国际表面工程(Surface Engineering)杂志主编.他领导的课题组在离子束表面改性、表面摩擦学、生物材料以及薄膜结构与力学性能评价等研究方面享有盛誉,发表学术论文 300 余篇. Bell 教授 2001 年当选中国工程院外籍院士.

(来源:交大新闻网)