

# WCDMA 系统发送分集技术的性能分析

杨 馨,董霄剑,尤肖虎

(东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文针对 WCDMA 系统中的开环和闭环两类发送分集技术,给出了相干接收的算法模型、性能分析及仿真结果,进而揭示了这两类发送分集技术之间的关系.理论分析及仿真结果表明,在总发送比特能量相同的条件下,闭环发送分集模式在步行环境下能提供比开环分集模式更好的接收性能;开环分集模式的接收性能则在车载环境下比闭环模式有更好的稳定性.

关键词: WCDMA; 发送分集; 闭环; 空时编码

中图分类号: TN929.533 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2002)07-0986-04

## Performance of Transmit Diversity Schemes for WCDMA

YANG Xin, DONG Xiaojian, YOU Xiaohu

(NCRL, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: In the updated WCDMA proposal, the transmit diversity schemes can be classified as open loop mode and closed loop mode. This paper presents the performances of these two schemes based on WCDMA system. Analytic and simulation results show that the closed loop mode outperforms the open loop mode at pedestrian speeds, while the open loop mode performs better than the closed loop mode at vehicular speeds.

Key words: WCDMA; transmit diversity; closed loop; space time encoding

### 1 引言

在移动通信系统中,发送分集技术是抵抗衰落、提高链路性能及系统容量的一项有效技术<sup>[1,4]</sup>.发送分集技术可以分为两大类:开环模式和闭环模式.两者的主要区别在于基站发射机是否利用移动台的反馈掌握信道的状态<sup>[2]</sup>.在开环模式中,基站发送前馈信息或训练序列而无需知道信道的状态信息,移动台可以通过线性处理或最大似然译码获得发送数据.在闭环模式中,基站需要通过移动台的反馈路径获得信道的状态信息,以调整发送天线间的权重,使移动台的接收功率达到最大.

已有的文献一般只就某一类发送分集模式可能采用的技术进行研究,而对两类模式的统一研究,如它们在各种移动环境下的性能差异,还未见报道.本文以 WCDMA 系统为例,对这两类发送分集技术,给出了相干接收的算法模型、统一的性能分析及仿真结果,进而揭示了这两类发送分集技术之间的内在关系.理论分析及仿真结果表明,在总发送比特能量相同的前提下,在步行环境下,闭环发送分集模式能提供比开环分集模式更好的接收性能;而在车载环境下,开环分集模式的接收性能则比闭环模式有更好的稳定性.

### 2 系统及信道模型

本文考虑的是 WCDMA 系统的发送分集技术,基站双天线发送,移动台单天线接收.在发送分集时(无论开环模式或闭环模式),公共导频信道的结构如图 1 所示,其中导频符号  $a = 1 + j$ .

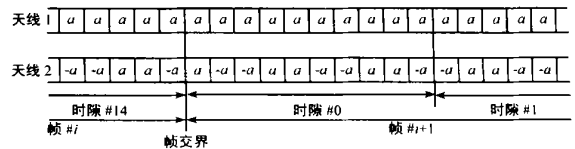


图 1 WCDMA 系统发送分集时的公共导频信道结构

发送信号经历的频率选择性信道可以用一个系数是时变且统计独立的抽头延时线模型来等效,由此得到 RAKE 接收机模型<sup>[5,6]</sup>.两个发送天线相隔足够远以保证两个天线上的信号衰落互不相关.采用两个强径搜索器分别对两根天线进行分支搜索,得到两个天线路径的可分辨的  $L$  个强径的 RAKE 接收机<sup>[7]</sup>,其接收信号的等效低通表示为:

$$r(t) = \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^L h_{il}(t) s_i(t - \tau_{il}) + n(t) \quad (1)$$

其中  $\{s_i(t)\}$  为两个天线的发送信号,  $\{h_{il}(t)\}$  为两个天线的  $L$  个强径的信道衰落参数, 其模和相位分别满足 Rayleigh 分布和均匀分布;  $\{\tau_{il}\}$  为两个天线的可分辨的  $L$  个强径的相对延迟;  $n(t)$  为其它用户的干扰和背景噪声构成的加性高斯白噪声, 单边功率谱密度为  $N_0$ .

### 3 WCDMA 系统的开环发送分集 STTD 方式及接收算法

WCDMA 系统开环 STTD (Space Time Transmit Diversity) 发送分集的发送结构如图 2 所示. 图中  $c_{ch}^D, c_{ch}^P$  分别是数据信道和公共导频信道的信道码,  $c_{scramb}^D$  和  $c_{scramb}^P$  分别是数据信道和公共导频信道的复扰码. STTD 编码器的结构如图 3 所示,  $d_1, d_2$  为两个连续的待发送数据符号,  $T$  为一个符号时间, \* 表示复共轭.

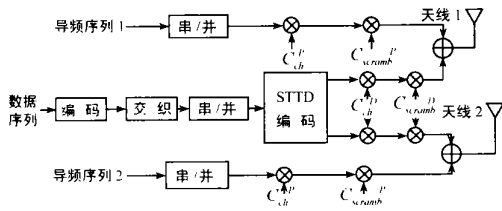


图 2 WCDMA 系统支持开环 STTD 发送分集的发送结构

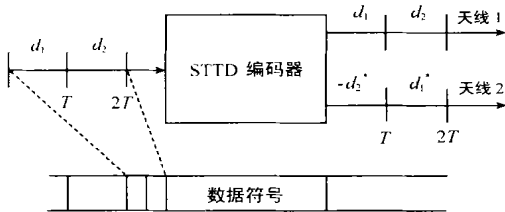


图 3 STTD 发送分集技术采用的空时编码结构

根据 WCDMA 系统的 STTD 发送结构, 设发送连续的两个数据符号  $d_1(m), d_2(m)$ , 则扩频加扰后的信号可表示为:

$$S(m) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} d_1(m) & d_2(m) \\ -d_2^*(m) & d_1^*(m) \end{bmatrix} \begin{matrix} c_{ch}^D \\ c_{scramb}^D \end{matrix} + \begin{bmatrix} p_{11}(m) & p_{12}(m) \\ p_{21}(m) & p_{22}(m) \end{bmatrix} \begin{matrix} c_{ch}^P \\ c_{scramb}^P \end{matrix} \quad (2)$$

矩阵的行、列分别对应两根天线和两个连续符号时刻的信号输出.  $1/\sqrt{2}$  保证了数据的总发送功率不随天线个数而改变;  $p_{11}(m), p_{12}(m), p_{21}(m), p_{22}(m)$  分别为两根天线上两个连续的公共导频符号.

假设接收中帧、时隙、chip 已完全同步, 且在连续的两个符号期间两个天线的信道参数均保持不变, 即

$$h_{il}(t) = h_{il}(t + T) = h_{il}(m), \quad i = 1, 2, \quad l = 1, \dots, L \quad (3)$$

其中  $h_{il}(m)$  为两个符号时间内第  $i$  根天线第  $l$  个强径的信道参数, 则 RAKE 接收机第  $l$  径解扩后的信号为:

$$\begin{aligned} & [r_{1l}(m) \quad r_{2l}(m)] \\ & = \frac{1}{\sqrt{2}} [h_{1l}(m) \quad h_{2l}(m)] \begin{bmatrix} d_1(m) & d_2(m) \\ -d_2^*(m) & d_1^*(m) \end{bmatrix} \\ & + [n_{1l}(m) \quad n_{2l}(m)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $n_{1l}(m), n_{2l}(m)$  分别为两个天线的信号在解扩中产生的噪声值. 以第  $l$  径为例, 经过线性处理后得到的可合并信号  $\tilde{d}_{1l}(m), \tilde{d}_{2l}(m)$  为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} [\tilde{d}_{1l}(m) \quad \tilde{d}_{2l}(m)] & = \frac{1}{\sqrt{2}} [(|h_{1l}(m)|^2 + |h_{2l}(m)|^2) d_1(m) \\ & \quad (|h_{1l}(m)|^2 + |h_{2l}(m)|^2) d_2(m)] \\ & \quad + Z_l(m) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z_l(m) & = [h_{1l}^*(m) n_{1l}(m) + h_{2l}(m) n_{2l}^*(m) \quad h_{1l}^*(m) n_{2l}(m) \\ & \quad - h_{2l}(m) n_{1l}^*(m)] \end{aligned} \quad (6)$$

合并  $\tilde{d}_{1l}(m), \tilde{d}_{2l}(m)$  得到关于发送符号的最优判决变量  $U_1(m), U_2(m)$ .

$$U_i(m) = \sum_{l=1}^L \tilde{d}_{il}(m) \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

对  $U_1(m), U_2(m)$  进行解交织和译码, 可得到信息符号  $d_1(m), d_2(m)$ .

### 4 WCDMA 系统的闭环发送分集方式及接收算法

WCDMA 系统闭环发送分集的发送结构如图 4 所示. 图中  $w_1, w_2$  分别为两根天线的复权重因子, 由移动台的接收机决定, 并经上行链路的 FBI (反馈信息) 域传给基站发射机. 移动台根据估计的信道参数, 每个时隙计算一次权重, 目的是使得在基站经加权发送的信号达到移动台时, 接收功率达到最大.

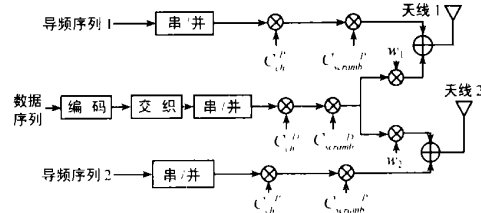


图 4 WCDMA 系统支持闭环发送分集的发送结构  
移动台的接收功率在非软切换时可表示为:

$$P = \mathbf{W}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{W} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{W} = [w_1 \quad w_2]^T$ , 为权重矢量, 满足  $\|w_1\|^2 + \|w_2\|^2 = 1$ ;  $\mathbf{H} = [h_1 \quad h_2]$ ,  $h_1, h_2$  分别是两根发送天线的信道冲激响应;  $()^H$  表示矩阵的共轭转置,  $[]^T$  表示矩阵的转置.

WCDMA 系统的闭环发送分集通过两种模式实现. 模式 1 只进行相位调整, 模式 2 进行相位和幅度双调整.

在模式 1 中,  $w_1$  恒定为 1,  $w_2$  只需含调整的相位信息. 移动台计算需调整的相位的量化值  $\phi_2 (\pi$  或  $0)$ , 映射为一位 bit ( $\pi$  对应“1”,  $0$  对应“0”) 传输给基站. 基站对相邻时隙接收到的相位进行滑动平均后作为  $w_2$ . 移动台在奇时隙时进行相位旋转, 与基站的滑动平均相结合, 目的是只占用反馈链路一位 bit 就能使  $w_2$  的相位调整精度达到  $\pi/4$ .

在模式 2 中, 移动台先在 16 个组合中选出最佳的四位 bit 调整值 (前三位为相位调整的编码, 后一位为幅度调整的编码), 并上传一位 bit 给基站. 此后每个时隙移动台都从剩余组合中选出最佳调整值并上传一位, 基站每个时隙刷新一次权重因子. 相位调整精度为  $\pi/4$ , 幅度调整只在  $\sqrt{0.8}$  和  $\sqrt{0.2}$  中进行选择.

根据 WCDMA 系统闭环分集发送结构, 在发送数据符号  $d(m)$  时, 其扩频加扰后的信号可表示为:

$$S(m) = \begin{bmatrix} w_1 d(m) \\ w_2 d(m) \end{bmatrix} c_{ch}^D c_{scramb}^D + \begin{bmatrix} p_1(m) \\ p_2(m) \end{bmatrix} c_{ch}^P c_{scramb}^P \quad (9)$$

矩阵的行对应两根天线的信号输出,  $p_1(m)$ 、 $p_2(m)$  分别为两根天线上的公共导频符号。

假设接收中帧、时隙、chip 已完全同步, 且在一个符号期间内信道参数不变, 则第  $l$  径解扩后的信号为:

$$r_l(m) = [h_{1l}(m)w_1 + h_{2l}(m)w_2]d(m) + n_l(m) \quad (10)$$

其中  $h_{1l}(m)$ 、 $h_{2l}(m)$  分别为第  $m$  个符号时刻两根天线第  $l$  个强径的信道参数,  $n_l(m)$  为解扩中产生的总噪声值。则可合并信号  $\tilde{d}_l(m)$  为:

$$\begin{aligned} \tilde{d}_l(m) &= r_l(m)[h_{1l}(m)w_1 + h_{2l}(m)w_2]^* \\ &= |h_{1l}(m)w_1 + h_{2l}(m)w_2|^2 d(m) + z_l(m) \end{aligned} \quad (11)$$

$$Z_l(m) = [h_{1l}(m)w_1 + h_{2l}(m)w_2]^* n_l(m) \quad (12)$$

发送符号的最优判决变量  $U(m)$  为:

$$U(m) = \sum_{l=1}^L \tilde{d}_l(m) \quad (13)$$

对  $U(m)$  进行解交织和译码, 可得到信息符号  $d(m)$ 。

## 5 开环及闭环发送分集模式的性能分析

对开环和闭环发送分集的 RAKE 接收机的输出信噪比进行数学分析, 可揭示出这两种发送分集技术的接收性能之间的关系。以下推导假设发送的符号能量为  $E_s$ , 并忽略解扩中产生的多径及多址干扰。

由式(5)、(6)和式(7), 开环分集 RAKE 接收机的输出符号信噪比为:

$$\gamma_{s, STTD} = \frac{E_s}{N_0} \cdot \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L (|h_{1l}(m)|^2 + |h_{2l}(m)|^2) \quad (14)$$

由式(11)、(12)和式(13), 闭环分集 RAKE 接收机的输出符号信噪比为:

$$\begin{aligned} \gamma_{s, \alpha} &= \frac{E_s}{N_0} \sum_{l=1}^L (|h_{1l}(m)w_1|^2 + |h_{2l}(m)w_2|^2 \\ &\quad + 2\text{Re}(h_{1l}(m)w_1 h_{2l}^*(m)w_2^*)) \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $\text{Re}(\cdot)$  表示取实部。

讨论:

(1) 式(8)中矩阵  $H^H H$  为 Hermite 阵, 特征根为:  $\lambda_0 = \|h_1\|^2 + \|h_2\|^2$ ,  $\lambda_1 = 0$ ; Rayleigh 商为:  $R(W) = \frac{W^H H^H H W}{W^H W} = P$ , for  $W^H W = 1, \forall W(\neq 0) \in C^2$ 。其中,  $\theta$  为零向量。因此, 接收功率  $P$  的最大(最小)值即为  $H^H H$  阵的最大(最小)特征根值; 使  $P$  达到最大(最小)的  $W$  即为  $H^H H$  阵最大(最小)特征根的标准化特征向量。取  $w_1$  为实数, 设  $w_2 = a e^{j\theta}$ , 则  $w_1 = \sqrt{1-a^2}$ 。使  $P$  达到最大的  $a$  和  $e^{j\theta}$  为:  $e^{j\theta} = \frac{h_2^H h_1}{\|h_2^H h_1\|}$ ,  $a = \frac{\|h_2\|}{\sqrt{\|h_1\|^2 + \|h_2\|^2}}$ 。

(2) 由讨论(1)及式(15)可见, 闭环模式中移动台接收功率的最大化即为其 RAKE 接收机的输出符号信噪比最大化。

(3) 由讨论(1)知闭环发送分集的最大接收功率为  $\|h_1\|^2 + \|h_2\|^2$ , 由式(5)知开环 STTD 分集接收功率为  $\frac{1}{2}(\|h_1\|^2 + \|h_2\|^2)$ , 所以闭环分集技术在运用最佳权重时应能够提供优于开环 STTD 技术 3dB 的接收性能。

(4) 由讨论(1)知闭环模式 1 的等效权重因子为  $w_1 = 1/\sqrt{2}$ ,  $w_2 = e^{j\theta}/\sqrt{2}$ 。则式(15)比式(14)多一项  $2\text{Re}(h_{1l}(m)w_1 \cdot h_{2l}^*(m)w_2^*)$ 。设  $h_{1l}(m) = |h_1| e^{j\phi_1}$ ,  $h_{2l}(m) = |h_2| e^{j\phi_2}$ , 则有  $2\text{Re}(h_{1l}(m)w_1 h_{2l}^*(m)w_2^*) = \text{Re}(|h_1| |h_2| e^{j(\phi_1 - \phi_2 - \theta)})$  (16)

可见, 当  $\phi_1 - (\phi_2 + \theta) \in (-\pi/2, \pi/2)$  时, 闭环分集模式 1 的接收性能好于开环分集模式。

(5) 闭环模式 2 在相位调整的基础上还根据各天线的衰落情况分配各天线的发射功率, 使移动台的接收功率比闭环模式 1 时更接近最大接收功率, 因而能提供优于模式 1 的接收性能。代价是处理延时更长, 适用于更慢衰落的信道。

(6) 开环 STTD 发送分集技术由于在发射端采用特殊的空时编码, 从而在信道参数基本不变的两个符号时间内, 使接收机在相位校正时抵销掉可能起削弱或增强作用的交叉干扰项  $h_{1l}(m)h_{2l}^*(m)$  和  $h_{1l}^*(m)h_{2l}(m)$ <sup>[8]</sup>, 保证了式(14)的 RAKE 接收机输出信噪比和级数为 2 的分集增益。

## 6 仿真结果与分析

基于以上的分析, 我们在 COSSAP 上建立了 WCDMA 系统的开环及闭环发送分集的 RAKE 接收仿真平台, 进行了数据仿真。信号调制方式为 QPSK, chip 速率为 3.84Mcps/s。仿真时, 信号传输速率为 240kbits/s, 交织器的交织块大小为  $32 \times 75$ , 信道编码为 1/3 卷积编码, 约束长度为 9, 信道模型为 M.1225 衰落信道模型, 假设理想的信道估计, 并假设在接收端 chip、符号及帧已完全同步。仿真时数据信号的总发送比特能量不随发送天线个数及发送分集模式改变。车载环境下 RAKE 合并级数为 3。下图中的  $E_b$  为发送的数据信号的比特能量,  $N_0$  为高斯白噪声的单边功率谱密度。

图 5 显示了步行环境下开环、闭环发送分集和单天线发送时 RAKE 接收误码率的性能曲线。从图中可以看出, 发送分集技术对误码率性能的改善相当显著。闭环分集模式的接收性能明显优于开环 STTD 模式, 闭环分集模式 2 相对于开环 STTD 的性能增益大于 2dB。这是由于在步行环境下, 信道的相

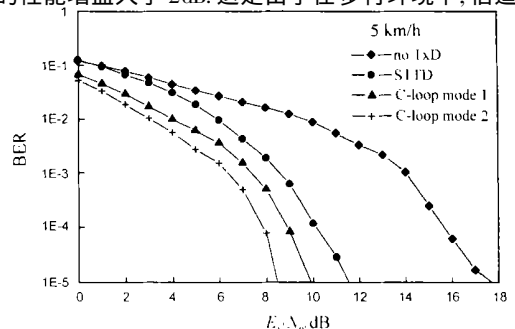


图 5 步行环境下各种发送分集技术的接收误码性能

干时间较长, 帧交织和  $1/3$  卷积编码起不到时间分集的作用; 同时信道的多径延迟过短, 移动台 RAKE 接收机能够获得的径数很少, 导致单天线发送的接收性能很差。双天线发送分集技术由于能够提供额外的完全不相关的路径, 使接收机获得分集增益, 从而极大地提高了接收性能。也正由于信道的相干时间较长, 闭环分集系统在进行信道估计、反馈及基站加权发射的整个时间段内, 信道参数基本不变, 因而能在接收端提供比开环 STTD 模式更高的性能增益。

图 6 为车速为 25 公里/小时的发送分集技术和单天线发送时 RAKE 接收机的误码率曲线。由图可见, 发送分集提供的接收性能增益依然相当明显, 但各种分集技术的性能增益已趋接近。闭环分集模式 2 由于需要较长相干时间的支持, 接收性能已劣于闭环模式 1。

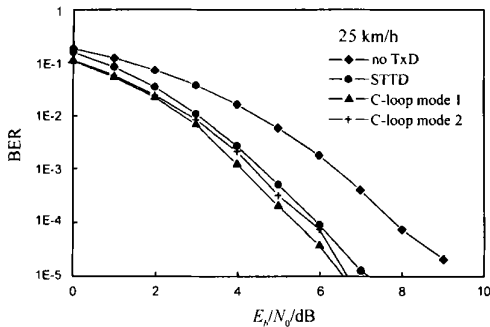


图 6 车速为 25 公里/小时的各种发送分集技术的接收误码性能

图 7 显示了不同车速时各种发送技术为使 RAKE 接收机获得  $10^{-3}$  误码率所需的发送信噪比 ( $E_b/N_0$ ) 的 dB 值。由图可见, 在步行环境及低车速移动环境下, 双天线发送分集能提供很大的性能增益, 尤其是闭环分集模式。但是随着移动台速度的增加, 发送分集获得的性能增益逐渐减小, 其中闭环分集模式的性能增益迅速缩小, 甚至劣于开环模式。这是由于移动速度的增加使信道的相干时间减小, 闭环分集模式利用前一个时隙估计的信道参数进行的相位及幅度调整不能起到使接收功率最大的作用, 而开环分集技术只要在连续的两个符号时间内信道参数不变, 就能获得级数为 2 的接收性能增益。所以, 相对于闭环分集模式, 开环分集技术的接收性能对移动速度变化的环境更具有稳定性。但是随着移动速度的进一步提高, 信道的相干时间更短, 信道的相干带宽变窄, 则由于交织

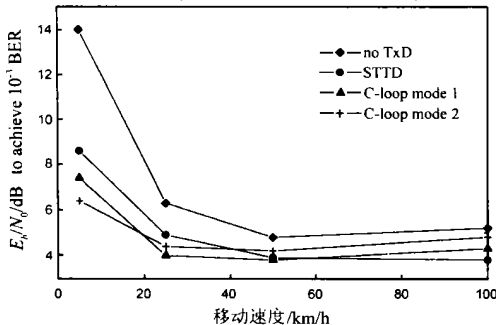


图 7 各种发送分集技术相对于单天线发送的性能增益

和信道编码的抗衰落的作用明显, RAKE 接收机分辨的路径数增加, 单双天线发送的 RAKE 接收性能趋于一致, 此时由双天线发送分集引起的发送端和接收端的额外的线性处理及增加的反馈链路都不能导致接收性能的改善。

## 7 结论

本文针对基于 WCDMA 系统的开环和闭环两类发送分集技术, 给出了相干接收的模型算法、统一的性能分析及仿真结果, 进而揭示了这两类发送分集技术之间的关系。理论分析及仿真结果表明, 在总发送比特能量相同的条件下, 闭环发送分集模式在步行环境下能提供比开环 STTD 模式更好的接收性能, 而开环 STTD 分集模式的接收性能则在车载环境下比闭环模式有更好的稳定性。

## 参考文献:

- [1] V Tarokh, N Seshadri, R Calderbank. Space time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1998, 44(3): 744-765.
- [2] 3GPP, TSG RAN, WG1, Physical Layer Procedures (FDD) [S].
- [3] 3GPP, TSG RAN, WG1, Physical Channels and Mapping of Transport Channels onto Physical Channels (FDD) [S].
- [4] S Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE Trans. JSA C, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [5] J G Proakis. Digital Communications [M]. New York: McGraw Hill, 1995.
- [6] T S Rappaport. Wireless Communications [M]. NJ: Prentice Hall, 1996.
- [7] K Chen. Performance of direct sequence spread spectrum RAKE receivers with random spreading sequences [J]. IEEE Trans. Comm., 1997, 45(9): 1130-1143.
- [8] 杨馨, 董霄剑, 尤肖虎. WCDMA 系统 STTD 发送分集 RAKE 接收机的性能分析 [J]. 电路与系统学报, 2001, 6(2): 29-33.

## 作者简介:



杨 馨 女, 1970 年生于江苏省南京市, 1994 年于东南大学自动控制工程系获硕士学位, 现在东南大学无线电工程系移动通信国家重点实验室攻读通信与电子学博士学位。



董霄剑 男, 1967 年生于陕西省, 现为东南大学无线电工程系通信与电子专业博士研究生。

尤肖虎 男, 1962 年出生, 博士生导师, 中国第三代移动通信系统研究开发项目总体组组长。