



# 一种基于友好干扰者协助的区别信道估计机制

张 蓉, 谢显中, 雷维嘉

(重庆邮电大学个人通信研究所 重庆 400065)

**摘 要:**在物理层安全中,可以通过抑制窃听者信道估计的准确性间接提高合法接收者和窃听者间的接收信号质量差距,从而提高信号传输安全性。给出一种基于友好干扰者协助的区别信道估计机制,该方案借助于友好干扰者发送人工噪声来干扰窃听者的信道估计过程。进一步,基于窃听者的信道估计误差最大化给出了训练序列和人工噪声之间的最优功率分配,更好地抑制了窃听者信道估计的质量。仿真结果表明,新方法能有效地抑制窃听者信道估计的性能,提高合法接收者和窃听者间的接收信号质量差距。

**关键词:**物理层安全;区别信道估计机制;友好干扰者;最优功率分配

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2015072

## A Discriminatory Channel Estimation Scheme Based on the Aid of Friendly Jammer

Zhang Rong, Xie Xianzhong, Lei Weijia

(Institute of Personal Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In the physical layer security, that inhibiting the accuracy of channel estimation at eavesdropper can indirectly enhance the received signal quality difference between the legitimate receiver and the eavesdropper, thus improving signal transmission security. The proposed discriminatory channel estimation scheme was based on the help of friendly jammer, which was based on artificial noise emitted by friendly jammer to interfere the channel estimation process of the eavesdropper. Further, the optimal power allocation was given between training sequence and artificial noise by maximizing the channel estimation error of the eavesdropper, which can suppress the channel estimation quality of the eavesdropper more effectively. Simulation results show that this method can effectively restrain the channel estimation performance of the eavesdropper, and it can improve the received signal quality gap between the legitimate receiver and the eavesdropper.

**Key words:** physical layer security, discriminatory channel estimation scheme, friendly jammer, optimal power allocation

收稿日期:2014-10-30;修回日期:2015-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61271259, No.61301123),重庆市自然科学基金资助项目(No.CTSC2011jjA40006),重庆市教委科学技术研究基金资助项目(No.KJ120501, No.KJ110530)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61271259, No.61301123), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.CTSC2011jjA40006), The Science and Technology Research Foundation Affiliated to The Education Department of Chongqing (No.KJ120501, No.KJ110530)

论文引用格式:张蓉,谢显中,雷维嘉.一种基于友好干扰者协助的区别信道估计机制.电信科学,2015072

Zhang R, Xie X Z, Lei W J. A Discriminatory Channel Estimation Scheme Based on the Aid of Friendly Jammer. Telecommunications Science, 2015072



## 1 引言

由于无线通信是天然的广播信道,其通信过程容易被潜在的未经授权的接收者窃听,因此,无线网络中的安全性问题变得格外突出,物理层安全已成为学术界研究的热点问题之一。在物理层安全研究中,一些利用无线信道的特性来获得所需的性能差异的方法得到重视,目前大多数工作的重点是数据传输阶段,并假设完整的信道状态信息<sup>[1-3]</sup>。实际上,MIMO(multiple-input multiple-output,多输入多输出)信道信息是通过训练序列和信道估计获得,并且信道估计的准确性对信号接收质量有显著影响<sup>[4-7]</sup>。

如果窃听者比合法接收者的信道估计性能差,那么在窃听保密信息的传输时,窃听者检测错误概率会更高。所以,改善保密容量从而提高物理层安全的性能可以从信道估计环节着手,通过某种手段干扰窃听者的信道估计过程,抑制其信道估计的性能,从而间接地抑制窃听者的接收质量来增加合法接收者和窃听者间的接收信号质量差距,该机制称为区别信道估计(discriminatory channel estimation, DCE)<sup>[8]</sup>。

基于区别信道估计机制,参考文献[8,9]针对MIMO信道提出了一种多阶段的反馈训练机制,这种方案需要在训练序列中注入人工噪声来干扰窃听者的信道估计,同时为了最小化对合法接收者的影响,人工噪声被安排在发送者和合法接收者信道的零空间中。因此,合法接收者需要把每阶段获得的信道估计信息反馈给发送者,为了获得较好的性能,需要进行多次反馈—重发训练序列这个过程,这将会导致训练序列的开销大且设计的复杂度要求高。参考文献[10,11]给出了一种双向信道估计方法。如果源端到目的端的信道具有互易性,信道估计分为两个阶段(当源端和目的端间的信道不具有互易性时需要增加一个阶段):先由目的端向发送端发送训练信号,源端进行信道估计;第二阶段,源端发送训练信号,并根据第一阶段的信道估计结果安排一个人工噪声同时发送,用于干扰潜在窃听者的信道估计;目的端根据该信号进行信道估计,而人工噪声则对窃听者进行干扰。此外,参考文献[12]研究了数据传输阶段基于人工噪声的训练序列和波束成形的联合设计,分析了信道的辨识性能和最优功率分配问题,但仅直接利用参考文献[8~11]的区别信道估计结果,而没有从区别信道估计的机制方面进行改进。

本文给出一种新的基于友好干扰者协助的区别信道

估计机制,这种方案借助于友好干扰者发送人工噪声来干扰窃听者的信道估计过程,而不是在训练序列中注入人工噪声;相对于参考文献[8,9]提出的多阶段的反馈—重发训练序列机制,本文给出的这种区别信道估计机制减少了训练序列的开销和设计的复杂度。另外,本文基于窃听者信道估计的归一化均方误差(NMSE)最大化给出了训练序列和人工噪声之间的最优功率分配,与参考文献[9~11]中的最小化合法接收者的NMSE比较,可更好地抑制窃听者信道估计的质量。MATLAB仿真结果表明,本文方法能有效地抑制窃听者的信道估计性能,从而增加合法接收者和窃听者间的接收信号质量差距。

## 2 系统模型

本文考虑如图1所示的无线系统模型。一个天线数目为 $N_t$ 的发送者(transmitter)、一个天线数目为 $N_j$ 的友好干扰者(friendly jammer)和两个单天线的接收者,包括合法接收者和窃听者。

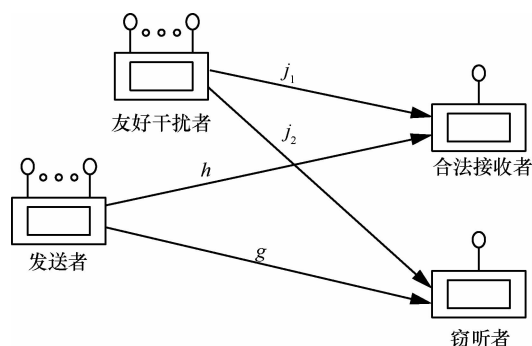


图1 系统模型

为实现区别信道估计,设发送者发送的训练序列为 $X_t$ ,友好干扰者同时发送的人工噪声为 $X_j$ ,发送者到合法接收者的信道向量为 $h$ ,发送者到窃听者的信道向量为 $g$ ,友好干扰者到合法接收者的信道向量为 $j_1$ ,友好干扰者到窃听者的信道向量为 $j_2$ 。这样,合法接收者接收到的信号 $y$ 和窃听者接收到的信号 $z$ 分别如下:

$$y = X_t h + X_j j_1 + w \quad (1)$$

$$z = X_t g + X_j j_2 + v \quad (2)$$

其中, $w, v \in \mathbb{C}^T$ 分别表示合法接收者和窃听者的加性高斯白噪声向量,功率分别为 $\sigma_w^2$ 和 $\sigma_v^2$ ;  $h, g \in \mathbb{C}^{N_t}$ ,且 $h$ 和 $g$ 中的元素是独立同分布的复高斯变量,均值为0,方差为1;  $j_1, j_2 \in \mathbb{C}^{N_j}$ ,且 $j_1$ 和 $j_2$ 中的元素是独立同分布的复高斯变量,均值为0,方差为1。

发送者发送的训练序列信号  $X_t$  可表示为:

$$X_t = \sqrt{\frac{PT}{N_t}} C_t \quad (3)$$

其中,  $C_t \in \mathbb{C}^{T \times N_t}$  是训练序列矩阵, 并满足  $C_t^H C_t = I_{N_t}$ ,  $I_{N_t}$  是  $N_t \times N_t$  的单位矩阵;  $T$  是训练序列长度,  $P$  是平均发送功率。

### 3 区别信道估计机制设计

为了干扰窃听者的信道估计过程, 本文给出的区别信道估计机制如下。

#### (1) 人工噪声信号 $X_j$ 设计

假设友好干扰者到合法接收者的信道向量  $j_1$  已被估计出, 友好干扰者已知  $j_1$ , 设计适合人工噪声信号  $X_j$  为:

$$X_j = A N_j^H \quad (4)$$

这里,  $A \in \mathbb{C}^{T \times (N_j-1)}$  是人工噪声矩阵, 其中的元素是独立同分布的复高斯变量, 均值为 0, 方差为  $\sigma_a^2$ ;  $N_j \in \mathbb{C}^{N_j \times (N_j-1)}$  表示友好干扰者到合法接收者的信道向量  $j_1$  的零空间, 并满足  $N_j^H N_j = I_{N_j-1}$ 。

这样, 可以把噪声信号安排在  $j_1$  的零空间中, 所以合法接收者不受噪声信号的影响, 而窃听者要受到友好干扰者发送的噪声信号的影响, 式(1)成为:

$$y = X_h h + w \quad (5)$$

#### (2) 合法接收者信道估计误差

根据最佳线性无偏估计方法<sup>[3]</sup>, 合法接收者利用接收到的信号  $y$  和训练序列  $X_t$  可进行相应的信道估计。由式(5)可知, 发送者到合法接收者的信道向量  $h$  的估计值  $\hat{h}$  表示为:

$$\hat{h} \triangleq (X_t^H X_t)^{-1} X_t^H y = h + \Delta h \quad (6)$$

其中,  $\Delta h \in \mathbb{C}^{N_t}$  是估计误差向量。然后可得到:

$$E\{\Delta h (\Delta h)^H\} = \sigma_w^2 (X_t^H X_t)^{-1} = \left( \frac{N_t \sigma_w^2}{PT} \right) I_{N_t} \quad (7)$$

因此, 可以获得  $\Delta h$  相关的归一化均方误差 (NMSE) 为:

$$NMSE_r \triangleq \frac{Tr(E\{\Delta h (\Delta h)^H\})}{N_t} = \frac{N_t \sigma_w^2}{PT} \quad (8)$$

其中,  $Tr(\cdot)$  表示方阵的迹,  $E\{\cdot\}$  表示期望算子。

#### (3) 窃听者信道估计误差

在窃听者方面, 同样根据最佳线性无偏估计方法进行信道估计。由于式(2)和式(4), 窃听者接收到的信号为:

$$z = X_t g + A N_j^H j_2 + v = X_t g + v_1 \quad (9)$$

这里,  $v_1 = A N_j^H j_2 + v$  为新的噪声项。那么  $v_1$  的协方差矩阵表示为:

$$C_{v_1} = E\{v_1 (v_1)^H\} = ((N_j - 1) \sigma_a^2 + \sigma_v^2) I_T \quad (10)$$

因此, 可获得窃听者的归一化均方误差为:

$$NMSE_e \triangleq \frac{Tr(((X_t)^H (C_{v_1})^{-1} X_t)^{-1})}{N_t} = \frac{N_t ((N_j - 1) \sigma_a^2 + \sigma_v^2)}{PT} \quad (11)$$

#### (4) 窃听者信道估计误差最大化的最优功率分配

为使窃听者信道估计误差最大化, 通过解决下面的优化问题能得到训练序列功率  $P$  和人工噪声功率  $\sigma_a^2$  的最优功率分配:

$$\begin{aligned} \max_{P, \sigma_a^2 \geq 0} \quad & NMSE_e \\ \text{s.t.} \quad & NMSE_r \leq \gamma \\ & \frac{E\{\|X_t\|_F^2\} + E\{\|X_j\|_F^2\}}{T} \leq P_{ave} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\|\cdot\|_F$  表示 F 范数,  $\gamma$  是合法接收者预先分配的 NMSE 上界, 且  $0 < \gamma < 1$ ;  $P_{ave}$  是最大平均功率, 且  $P_{ave} > 0$ 。

从式(8)和式(11)可以看出, 此优化问题可以转化为:

$$\begin{aligned} \min_{P, \sigma_a^2 \geq 0} \quad & \frac{PT}{N_t ((N_j - 1) \sigma_a^2 + \sigma_v^2)} \\ \text{s.t.} \quad & \frac{N_t \sigma_w^2}{PT} \leq \gamma \\ & P + (N_j - 1) \sigma_a^2 \leq P_{ave} \end{aligned} \quad (13)$$

易知优化问题式(13)满足 KKT 条件<sup>[14]</sup>, 因此, 可通过求解 KKT 问题得到  $P$  和  $\sigma_a^2$  的最优功率分配为:

$$P = \frac{N_t \sigma_w^2}{T\gamma}, \quad \sigma_a^2 = \frac{P_{ave} - P}{N_j - 1} \quad (14)$$

## 4 仿真结果和分析

为了检验该区别信道估计机制的性能, 本文采用 MATLAB 软件进行仿真实验。假设信道向量  $h$  和  $g$  中的元素是独立同分布的复高斯变量, 均值为 0, 方差为 1; 同样, 信道向量  $j_1$  和  $j_2$  中的元素是独立同分布的复高斯变量, 均值为 0, 方差为 1。进一步, 假设  $j_1$  已知, 训练序列矩阵  $C_t$  是  $T \times N_t$  的矩阵, 并满足  $C_t^H C_t = I_{N_t}$ ; 人工噪声矩阵  $A$  中的元素是独立同分布的复高斯变量, 均值为 0, 方差为  $\sigma_a^2$ 。

仿真中, 令发送者的天线数目  $N_t=3$ , 友好干扰者的天线数目  $N_j=5$ , 训练序列长度  $T=400$ , 平均功率预算  $P_{ave}=1$ , 合法接收者预先分配的 NMSE 上界  $\gamma=0.0001$ 。合法接收者和窃听者处的信噪比分别为  $SNR_r$  和  $SNR_e$ , 假设窃听者比合法接收者更靠近发送者, 即  $SNR_e \gg SNR_r$ , 仿真时取



$SNR_e = SNR_r + 20$  dB, 其中:

$$SNR_r = \frac{P_{ave}}{\sigma_w^2}, SNR_e = \frac{P_{ave}}{\sigma_v^2} \quad (15)$$

每个仿真结果是平均每 500 次信道实现获得的。

合法接收者和窃听者的归一化均方误差性能的仿真结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 中可以看出,合法接收者和窃听者的 NMSE 性能有明显的差异,随着信噪比的增加,这种差异性随之增加。在图 3 中,考虑了合法接收者和窃听者的 NMSE 下界,它表示在没有发送人工噪声信号的情况下,即  $\sigma_v^2=0$  时,合法接收者和窃听者可获得的最佳 NMSE 性能。其中,合法接收者的 NMSE 下界可表示为:

$$NMSE_{r\_lower\ bound} = \frac{N_t \sigma_w^2}{P_{ave} T} \quad (16)$$

窃听者的 NMSE 下界可表示为:

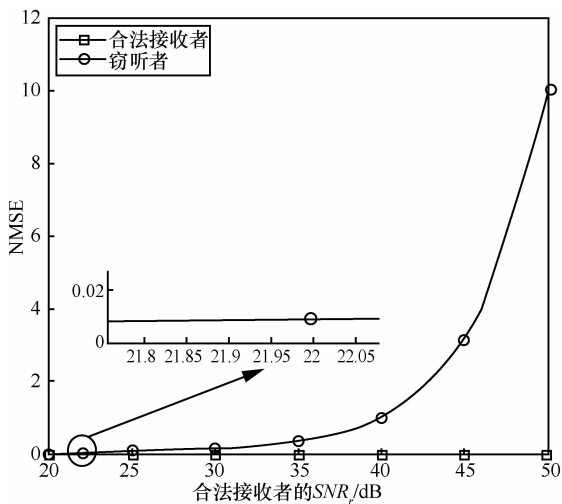


图 2 合法接收者和窃听者的 NMSE 性能的仿真放大

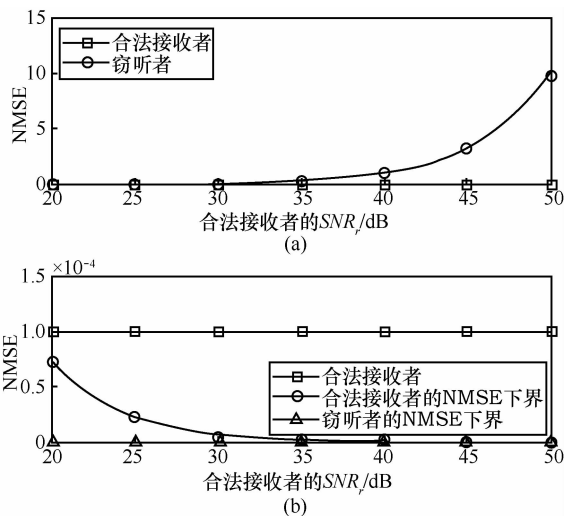


图 3 合法接收者和窃听者的 NMSE 性能的仿真对比

$$NMSE_{e\_lower\ bound} = \frac{N_t \sigma_v^2}{P_{ave} T} \quad (17)$$

从图 3 可以看出,由于友好干扰者发送的人工噪声的协助以及  $\gamma$  的限制,虽然合法接收者的 NMSE 性能受到了一定的影响,但使得窃听者的 NMSE 性能越来越差。

训练序列和人工噪声信号的功率分配如图 4 所示,由于  $\gamma$  的约束限制,随着信噪比的增加,训练序列所需的功率随之减少,而人工噪声的功率随之增加,使得人工噪声对窃听者的信道估计的干扰增大。这样,更好地抑制了窃听者信道估计的性能,有效提高了合法接收者和窃听者间的接收信号质量差距。

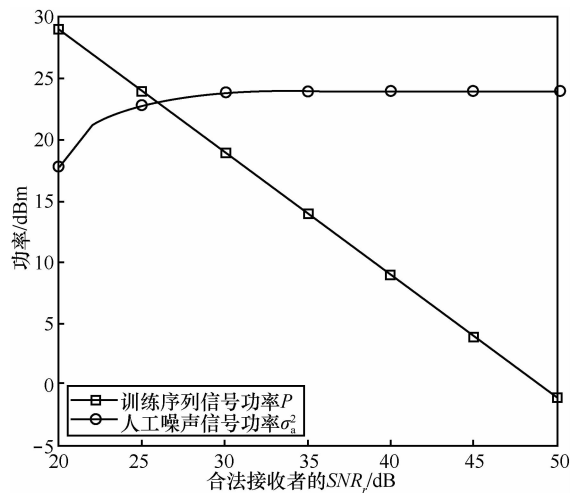


图 4 训练序列和人工噪声信号的功率分配

## 5 结束语

为了提高物理层安全的性能,从信道估计环节着手,本文给出了一种基于友好干扰者协助的区别信道估计机制,基于窃听者的信道估计误差最大化给出了训练序列和人工噪声之间的最优功率分配。利用 MATLAB 软件进行仿真验证,结果表明,本文方案能有效地抑制窃听者信道估计的性能,从而增加合法接收者和窃听者间的接收信号质量差距,改进物理层安全性。

## 参考文献

- Shiu Yi-Sheng, Chang Shih Yu, Wu Hsiao-Chun, *et al.* Physical layer security in wireless networks: a tutorial. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(2): 66~74
- Hong Y-W P, Lan Pang-Chang, Kuo C-C J. Enhancing physical-layer secrecy in multiantenna wireless systems: an overview of signal processing approaches. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(5): 29~40

- 3 Bassily R, Ekrem E, Xiang H, *et al.* Cooperative security at the physical layer: a summary of recent advances. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(5): 16~28
- 4 Hassibi B, Hochwald B M. How much training is needed in multiple-antenna wireless links. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(4): 951~963
- 5 Yoo Taesang, Goldsmith A. Capacity and power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(5): 2203~2214
- 6 Khisti A, Wornell Gregory W. Secure transmission with multiple antennas I: the MISOME wiretap channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(7): 3088~3104
- 7 Khisti A, Wornell Gregory W. Secure transmission with multiple antennas-part II: the MIMOME wiretap channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(11): 5515~5532
- 8 Chang Tsung-Hui, Hong Y-W P, Chi Chong-Yung. Training signal design for discriminatory channel estimation. *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Honolulu, USA, 2009:1~6
- 9 Chang Tsung-Hui, Chiang Wei-Cheng, Hong Y-W P, *et al.* Training sequence design for discriminatory channel estimation in wireless MIMO systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(12): 6223~6237
- 10 Huang C W, Chang T H, Zhou X Y, *et al.* Two-way discriminatory channel estimation for non-reciprocal wireless MIMO channels. *Proceedings of 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, USA, 2011: 202~206
- 11 Huang C W, Chang T H, Zhou X Y, *et al.* Two-way training for discriminatory channel estimation in wireless MIMO systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(10): 2724~2738
- 12 Chang T H, Chiang W C, Hong Y-W P, *et al.* Joint training and beamforming design for performance discrimination using artificial noise. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kyoto, Japan, 2011: 1~5
- 13 Kay S M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. NJ: PTR Prentice-Hall, 1993
- 14 Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. UK: Cambridge University Press, 2004

## [作者简介]



张蓉,女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为物理层安全。



谢显中,男,博士,重庆邮电大学个人通信研究所教授、硕士生导师,主要从事移动通信技术、通信信号处理和通信应用软件方面的研究。

雷维嘉,男,博士,重庆邮电大学个人通信研究所教授、硕士生导师,主要从事无线通信技术、嵌入式系统的研究及开发,并担任研究生教学工作。

2015072-5

(上接 2015071-6)

- 7 Saleet H, Langar R, Naik K, *et al.* Intersection-based geographical routing protocol for VANETs: A proposal and analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(9): 4560~4574
- 8 Saleet H, Basir O, Langar R, *et al.* Region-based location-service-management protocol for VANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(2): 917~931

## [作者简介]



蔡蓉,女,南通大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为车载自组织网络。



章国安,男,博士,南通大学电子信息学院教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信网络理论与技术。



吴月波,男,南通大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为无线通信。

2015071-7