



网络编码系统中基于天线选择的安全传输技术研究

邓 单¹, 赵 明², 简贵胄³

(1. 广州番禺职业技术学院信息工程学院 广州 511483;

2. 中国科学技术大学信息科学技术学院 合肥 230027; 3. 北京微电子技术研究院 北京 100076)

摘 要: 为提高模拟网络编码系统的安全传输容量, 提出一种基于天线选择物理层安全传输方案; 研究在准静态慢衰落信道条件下, 源结点与中继结点的天线选择策略及其性能分析。该方案分别以最大信道容量和最大信道增益为目标, 在最优选择准则基础上, 提出简化的天线选择方法。数值仿真表明: 联合主信道容量最大化 (CMCCM) 准则具有最优的性能曲线, 但其运算复杂度也最大。相比于固定选择策略, CMCCM 方案提供系统增益约 5 dB。特别地, 简化的独立信道增益最大化 (ICGM) 方案与 CMCCM 方案表现出接近的性能曲线。

关键词: 天线选择; 物理层安全; 模拟网络编码; 安全容量

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015041

Secure Transmission Based on Antenna Selection for Network Coding System

Deng Dan¹, Zhao Ming², Jian Guizhou³

(1. School of Information Engineering, Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou 511483, China;

2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

3. Beijing Microelectronic Technology Research Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to improve the secrecy capacity of analog network coding system, antenna selection based transmission scheme was investigated. The selection criteria for the source nodes and relay nodes were proposed over a slowly varying channel. The optimal selection criterion for maximum secrecy capacity and the suboptimal selection criterion for maximum channel gain were investigated. Simulation results show that the selection scheme of combined main channel capacity maximum (CMCCM) outperforms other schemes with the most computation burden. Compared with the fixed selection, the proposed scheme shows about 5 dB gain in ergodic secrecy capacity. Specifically, the independent channel gain maximum (ICGM) scheme holds the similar performance compared with CMCCM scheme, while ICGM scheme can release the computation burden.

Key words: antenna selection, physical-layer security, analog network coding, secrecy capacity

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61172088), 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 基金资助项目 (No. 2012AA011402)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61172088), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA011402)



1 引言

物理层网络编码 (physical-layer network coding, PNC) 的基本概念和技术方案是 Zhang^[1] 与 Popovski^[2] 分别独立提出的。经典的网络编码技术应用于网络层, 将不同源结点的数字比特流进行异或处理后再向目标结点转发。而 PNC 技术直接在物理层接收信号上叠加, 以达到等效的异或运算目的。PNC 应用于无线通信系统中可有效提高系统容量。由于 PNC 技术天然的优势, 很快成为无线通信研究的热点领域, 并被不断扩展。Katti^[3] 提出一种更为通用的网络编码方案: 模拟网络编码 (analog network coding, ANC)。在模拟网络编码系统中, 中继 (relay) 结点将接收到的合法用户信号直接混合相加, 放大, 再向合法结点进行转发。ANC 系统由于其简单易实现, 已在卫星通信实验中得到有效验证。

无线通信系统传输介质天然的广播特性导致窃听者可以轻易接收到网络中的发射信号。针对全向 MIMO 点对点中继信道, 参考文献 [4~7] 深入研究窃听节点的影响及其应对策略; Mukherjee^[8] 还分析了多天线配置条件下 ANC 系统在物理层攻击节点下的脆弱性。参考文献 [9~11] 则着眼于研究在窃听信道下, 基于发射天线选择的物理层安全传输方案。然而, 针对物理层网络编码系统, 分析天线选择对物理层安全传输影响的文献较少。

针对模拟网络编码系统, 本文提出一种基于天线选择物理层安全传输方案; 研究在准静态慢衰落信道条件下, 源节点与中继节点的天线选择策略及其性能分析。数值仿真表明: 联合主信道容量最大化 (combined main channel capacity maximum, CMCCM) 准则具有最优的性能曲线, 但其运算复杂度也最大。相比于无选择策略, CMCCM 方案提供系统增益约 5 dB。特别地, 简化的独立信道增益最大化 (independent channel gain maximum, ICGM) 方案与 CMCCM 方案表现出接近的性能曲线, 而其运算复杂度可有效降低。

2 系统模型与假设

如图 1 所示, 考虑具有 4 个结点的网络编码系统。系统中包括两个合法结点: Alice 与 Bob, 以及中继 Relay 结点和窃听 (eavesdropper, Eve) 结点。合法结点 Alice 与 Bob 无直接通信链路, 但可以通过 Relay 结点进行双向通信。Alice、Bob 与 Relay 结点配置多天线, 其天线数目分别为: N_A , N_B , N_R 。Eve 结点只配置单天线, 即 $N_E=1$ 。在模拟网络

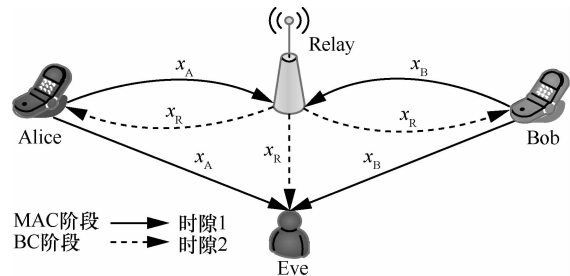


图 1 模拟网络编码系统模型

编码系统发射过程中, 系统可按照发射特点分为两个阶段: 多址接入 (multiple access, MAC) 阶段与广播 (broadcast phase, BC) 阶段。

在 MAC 阶段, 两个合法结点 Alice 与 Bob 同时向 Relay 结点发送信号。在 BC 阶段, Relay 结点经过线性合并与简单放大后, 将信号向两个源结点广播。随后, 两个源结点首先从接收信号中将自身发射信号抵消, 并从抵消后的信号中恢复出对方结点的信息。由于无线通信系统的开放性, 在两个阶段中, 窃听结点可以接收到所有信号, 但不会主动发射任何信号。

假设 ANC 系统发射信号带宽远小于信道相干带宽, 即准静态平坦衰落信道模型。Alice、Bob 到 Relay 结点的 MIMO 信道模型分别为: $H_{AR} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_A}$, $H_{BR} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_B}$ 。信道矩阵元素均为循环对称复高斯随机变量, 并且其分布满足标准复高斯分布, 即 $CN(0,1)$, 并且信道矩阵之间相互独立不相关; 信道衰落矩阵在一次 ANC 发射周期中保持恒定, 且各发射周期之间对应的信道矩阵独立。

为简化系统复杂性, 不失一般性, 本文做如下假设:

- 任意两个结点之间的信道衰落矩阵满足互易原则, 即 $H_{AR}=H_{RA}^T$;
- 为减少射频功率, 任何发射过程只允许使用一根天线;
- Alice/Bob 结点在 MAC 阶段发射过程中, 已知到 Relay 结点的信道衰落矩阵, 但对 Eve 结点的信道未知; 同样的假设也适用于 Relay 结点。

3 MAC 阶段天线选择准则

在 MAC 阶段, 假设 j_A 表示 Alice 结点所选定的发射天线序号。最简单的天线选择准则是以信道增益最大化 (channel gain maximum, CGM) 为目标, 即:

$$j_A^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_A} \|h_{AR, j_A}\| \quad (1)$$

式(1)中,定义 $h_{AR,j_A} = [h_{AR,j_A,1}, h_{AR,j_A,2}, \dots, h_{AR,j_A,N_R}]^T$ 表示从 Alice 结点的第 j_A 根天线向 Relay 结点的信道衰落向量。换言之, h_{AR,j_A} 是信道矩阵 H_{AR} 的第 j_A 个列向量。符号 $\|\cdot\|$ 表示向量的二次模。定义 $x_A = [x_A(1), \dots, x_A(i), \dots, x_A(n)]^T$ 表示 Alice 的发射信号向量。Alice 结点的发射信号必须满足功率限制:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E[|x_A(i)|^2] \leq P_A \quad (2)$$

类似的假设也适用于 Bob 结点,其天线选择的序号与功率限制分别为 j_B 和 P_B 。为简单起见,并不失一般性,本文后续的描述将删除时间序号 i 。MAC 阶段 Relay 结点的接收信号可表示为:

$$y_R = h_{AR,j_A} x_A + h_{BR,j_B} x_B + n_R \quad (3)$$

式(3)中, n_R 表示 Relay 结点在 MAC 阶段接收到的加性高斯白噪声向量,其分布满足 $n_R \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_R^2 I_{N_R})$ 。 σ_R^2 表示 Relay 结点每根天线上接收噪声的平均功率。定义 k_R^* 表示由 Relay 结点优选后的天线序号,则 Relay 结点在 BC 阶段的发射信号可表示为:

$$y_{R,k_R^*} = y_{R,k_R^*} \quad (4)$$

式(4)中, y_{R,k_R^*} 表示 Relay 结点接收信号向量 y_R 中的第 k_R^* 个元素。对于 Relay 结点,以接收信号功率最大化为目标,其天线选择准则可表示为:

$$k_R^* = \arg \max_{1 \leq k \leq N_R} \|y_{R,k}\| \quad (5)$$

基于以上分析,式(4)中 Relay 结点经优选后的接收信号可重写为:

$$y_{R,k_R^*} = h_{AR,j_A,k_R^*} x_A + h_{BR,j_B,k_R^*} x_B + n_{R,k_R^*} \quad (6)$$

式(6)中, $h_{AR,j_A,k}$ 表示 Alice/Relay 链路信道衰落系数矩阵 H_{AR} 中第 j 列第 k 行的元素,即从 Alice 结点的第 j 个发射天线到 Relay 结点的第 k 个接收天线之间的信道衰落系数。类似地,对 Bob 结点有同样的定义 $h_{BR,j_B,k}$ 。此阶段 Eve 结点的接收信号可表示为:

$$y_E = h_{AE,j_A} x_A + h_{BE,j_B} x_B + n_{E1} \quad (7)$$

式(7)中, n_{E1} 表示 Eve 结点在 MAC 阶段接收到的高斯白噪声,且功率为 σ_{E1}^2 。考虑到 Eve 只配置单天线, h_{BE,j_B} 表示从 Alice 的第 j_A 个发射天线到 Eve 结点的信道衰落系数。类似地,对 Bob 结点有 h_{BE,j_B} 。

4 BC 阶段天线选择准则

在广播阶段,Relay 结点使用其选定的天线序号(式(5)),将上述优选信号(式(6))重新向 Alice/Bob 发送。此时, Alice 结点的接收信号可表示为:

$$\begin{aligned} z_A &= h_{RA,k_R^*} y_{R,k_R^*} + n_A \\ &= h_{RA,k_R^*} (h_{AR,j_A,k_R^*} x_A + h_{BR,j_B,k_R^*} x_B + n_{R,k_R^*}) + n_A \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, n_A 表示 Alice 结点在 BC 阶段接收到的 AWGN 向量,其分布满足 $n_A \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_A^2 I_{N_A})$,其中 σ_A^2 表示 Alice 结点每根天线上接收到的平均噪声功率。考虑到 Alice 结点具有与 Relay 结点信道衰落矩阵的先验信息,式(8)中第一部分可通过干扰抵消技术进行扣减。则抵消后的接收信号可重写为:

$$z_A = h_{RA,k_R^*} h_{BR,j_B,k_R^*} x_B + (h_{RA,k_R^*} n_{R,k_R^*} + n_A) \quad (9)$$

假设系统中每次收发只允许使用一根天线(式(1)),则 Alice 结点在 BC 阶段的最终接收信号可从优选天线 j_A^* 中提取,即:

$$z_{A,j_A^*} = z_{A,j_A^*} = h_{RA,k_R^*,j_A^*} h_{BR,j_B,k_R^*} x_B + (h_{RA,k_R^*,j_A^*} n_{R,k_R^*} + n_{A,j_A^*}) \quad (10)$$

基于此,对于 Alice 结点,其 SNR 可表示为:

$$\gamma_A = \frac{P_B}{\left(\left| h_{RA,k_R^*,j_A^*} \right|^2 \sigma_R^2 + \sigma_A^2 \right)} \left| h_{BR,j_B,k_R^*} h_{RA,k_R^*,j_A^*} \right|^2 \quad (11)$$

由于 Alice/Bob 结点的对称性,易知对于 Bob 结点的 SNR 可表示为:

$$\gamma_B = \frac{P_A}{\left(\left| h_{RB,k_R^*,j_B^*} \right|^2 \sigma_R^2 + \sigma_B^2 \right)} \left| h_{BR,j_B,k_R^*} h_{RA,k_R^*,j_A^*} \right|^2 \quad (12)$$

主信道的系统容量为:

$$C_M = C_A + C_B = \text{lb}(1 + \gamma_A) + \text{lb}(1 + \gamma_B) \quad (13)$$

BC 阶段, Eve 结点的接收信号为:

$$z_E = h_{AR,j_A,k_R^*} h_{RE,j_R^*} x_A + h_{BR,j_B,k_R^*} h_{RE,j_R^*} x_B + (h_{RE,j_R^*} n_{R,k_R^*} + n_{E2}) \quad (14)$$

式(14)中, n_{E2} 表示 BC 阶段 Eve 结点接收到的噪声信号,其均值为零,功率为 σ_{E2}^2 。由于 Eve 为单天线配置, h_{RE,j_R^*} 表示从 Relay 结点的第 j_R^* 根天线到 Eve 天线的信道衰落系数。

联合式(7)与式(14),Eve 结点两个阶段的接收信号联合整理为:



$$y_E = H_E x + n_E \quad (15)$$

式(15)中,定义联合接收信号: $x \triangleq \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix}$, 联合噪

声向量: $n_E \triangleq \begin{bmatrix} n_{E1} \\ h_{RE,k_R^*} n_{R,k_R^*} + n_{E2} \end{bmatrix}$ 联合等效信道矩阵:

$$H_E \triangleq \begin{bmatrix} h_{AE,j_A^*} & h_{BE,j_B^*} \\ h_{RE,k_R^*} h_{AR,j_A^*} & h_{RE,k_R^*} h_{BR,j_B^*} \end{bmatrix}.$$

基于联合信道模型,Eve结点的信号容量可表示为:

$$C_E = \text{lb det}[P_A H H^\dagger (K^n)^{-1} + I_{N_R}] \quad (16)$$

式(16)中,定义噪声相关矩阵: $K^n \triangleq E[n_E n_E^\dagger]$. 为简化系统分析复杂性,假定 Alice/Bob 配置相同数目的天线,并且其功率限制相同; Alice/Bob/Relay 结点的噪声功率也相同,即:

$$\sigma_{E1} = \sigma_{E2}; \sigma_A = \sigma_B = \sigma_R; P_A = P_B; N_A = N_B \quad (17)$$

定义 Relay 结点各天线的平均信噪比 $\bar{\gamma} = \frac{P_A}{\sigma_A^2}$ 以及 Eve

结点的平均信噪比 $\bar{\gamma}_E = \frac{P_A}{\sigma_E^2}$. ANC 系统的安全容量可表示为:

$$C_S = [C_M - C_E]^+ = \left\{ \text{lb} \frac{(1 + \gamma_A)(1 + \gamma_B)}{\text{det}[P_A H H^\dagger (K^n)^{-1} + I_{N_R}]} \right\}^+ \quad (18)$$

式(18)中,定义截断函数: $[x]^+ \triangleq \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$. 特别地,另

外两种评估物理层安全的指标为安全容量截断概率和安全容量归零概率。两个指标的定义分别如下:

$$P_{\text{out}} \triangleq P[C_S < C_{\text{TH}}] \quad (19)$$

$$P_0 \triangleq P[C_S = 0] \quad (20)$$

其中, C_{TH} 表示预定义的安全容量门限。以安全容量最大化(maximum of secrecy capacity)为目标,则最优的天线选择准则可表示为:

$$(j_A^*, j_B^*, k_R^*) = \arg \max_{(j_A, j_B, k_R)} \left\{ \text{lb} \frac{(1 + \gamma_A)(1 + \gamma_B)}{\text{det}[P_A H H^\dagger (K^n)^{-1} + I_{N_R}]} \right\}^+ \quad (21)$$

考虑到 Alice/Bob 对 Eve 信道无先验知识,上述选择准则可退化为:

$$(j_A^*, j_B^*, k_R^*) = \arg \max_{(j_A, j_B, k_R)} [C_M] \quad (22)$$

最优选择准则需要把所有可能的天线遍历比较,其运算复杂度过于庞大。为减少系统复杂度,提高其可实现性,提出几种简化的选择准则。

准则 1: Alice/Bob/Relay 均为固定选择(或总是选择第一根天线)。

准则 2: Alice/Bob 选择信道增益最大天线 $j_A^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_A} \|h_{AR,j_A}\|$, $j_B^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_B} \|h_{BR,j_B}\|$, Relay 不选择。

准则 3: Alice 不进行选择, Relay 选择信道增益最大天线 $k_R^* = \arg \max_{1 \leq k \leq N_R} \|y_{R,k}\|$ 。

准则 4: Alice/Bob/Relay 均按照独立信道增益最大化进行选择 $j_A^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_A} \|h_{AR,j_A}\|$, $j_B^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_B} \|h_{BR,j_B}\|$,

$$k_R^* = \arg \max_{1 \leq k \leq N_R} \|y_{R,k}\|.$$

准则 5: Alice/Bob 按照信道增益最大化选择, Relay 按照独立主信道容量最大化选择 $j_A^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_A} \|h_{AR,j_A}\|$,

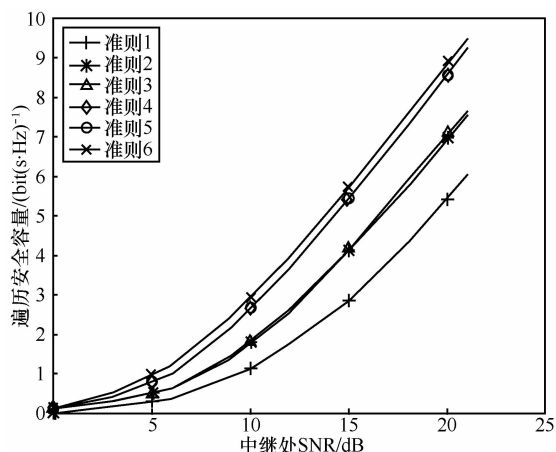
$$j_B^* = \arg \max_{1 \leq j \leq N_B} \|h_{BR,j_B}\|, k_R^* = \arg \max_{1 \leq k \leq N_R} C_{M_0}.$$

准则 6: Alice/Bob/Relay 进行联合主信道容量最大化选择 $(j_A^*, j_B^*, k_R^*) = \arg \max_{(j_A, j_B, k_R)} [C_M]$ 。

5 仿真与分析

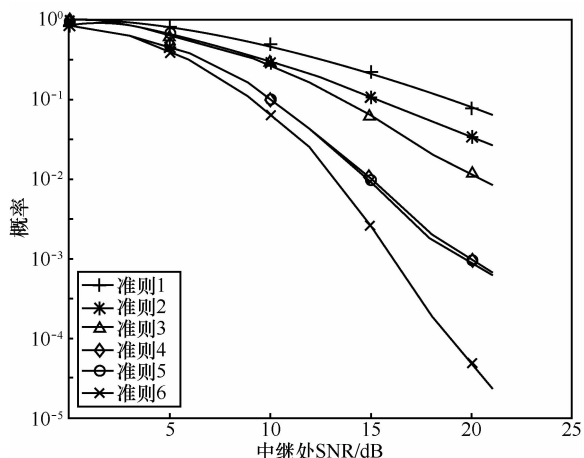
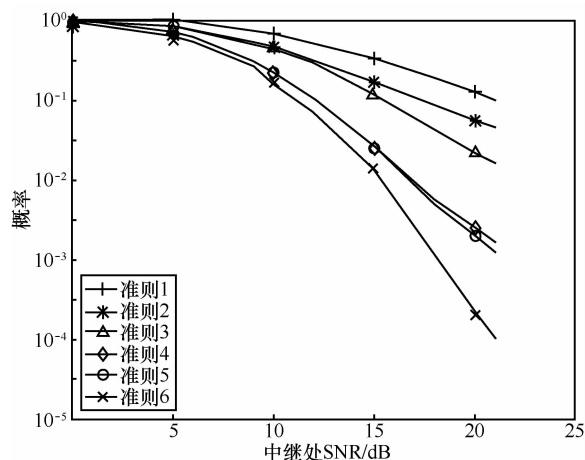
为详细分析各选择准则的性能,本节将在不同系统配置环境下对各种天线选择算法进行数值仿真分析。仿真验证系统采用图 1 中的拓扑结构。系统各个结点之间的信道为准静态块衰落,即在一次发射时隙中保持不变,不同发射时隙之间的信道相互独立。首先考虑 ANC 系统中天线数目配置为: $N_A = N_B = N_R = 2$ 。不失一般性,将 Eve 结点的 SNR 固定: $\bar{\gamma}_E = 10$ dB。

第 4 节中介绍的 6 种选择准则将会在仿真系统中应用。ANC 系统中基于天线选择的遍历安全容量曲线如图 2 所示。图中共比较了 6 种不同的选择准则,分别标注为“准则 1”~“准则 6”。从图中易知,准则 6 所代表的联合主信道容量最大化(CMCCM)性能最优,但其计算复杂度也最大。相比于固定选择方案准则 1,CMCCM 方案提供系统增益约 5 dB。特别地,准则 4 所代表的独立信道增益最大化(ICGM)方案与准则 5/准则 6 方案具有接近的性能曲线。而 ICGM 方案只需要各个结点独立进行天线增益比较,运算复杂度可有效降低。


 图 2 ANC 系统遍历安全容量曲线, $N_R=2$

由于 CMCCM 准则直接以联合主信道容量最大化为准则,可间接地使系统的安全容量达到最大,故其遍历安全容量相比于其他方法为最优。而独立主信道容量最大化准则,则分别在 Alice/Bob/Relay 结点上各自独立地按照信道增益或者容量最大化原则进行天线选择,其显然是一种次优的搜索方法。独立信道增益最大化则分别在 Alice/Bob/Relay 结点上独立地按照信道增益最大化原则进行天线选择。这种方法只能保持单向链路的信道增益最大化,但从前述分析易知,信道容量/信噪比是由 3 个结点的信道衰落系数联合决定,故信道增益最大化并不能完全保证容量最大化。所以其安全容量性能曲线劣于联合主信道容量最大化准则。

相同系统配置下的安全容量归零概率曲线与安全容量截断概率曲线分别如图 3 和图 4 所示。在图 4 中,安全容量门限定义为 1 bit/s/Hz。从性能对比图中可看出,相比于无选择方案,归零容量概率和截断容量概率为 0.1 时,天线选择方案准则 6 提供的系统增益约为 10 dB。


 图 3 ANC 系统安全容量归零概率曲线, $N_R=2$

 图 4 ANC 系统安全容量截断概率曲线, $N_R=2$, 截断容量为 1 bit/s/Hz

6 结束语

天线选择技术能够有效提高无线通信系统的安全传输性能。针对模拟网络编码系统,本文提出基于天线选择的物理层安全传输方案,并基于最优选择方案提出简化的天线选择准则。次优的天线选择准则只需要各结点独立地搜索其信道增益最大化的天线,即可达到与最优选择方案接近的安全容量性能。通过数值仿真方法,本文对天线选择准则进行了性能分析对比。仿真结果显示联合主信道容量最大化(CMCCM)性能最优,但其计算复杂度也最大。独立信道增益最大化(ICGM)方案与 CMCCM 方案具有接近的性能曲线;ICGM 方案只需要各个结点独立进行天线增益比较,运算复杂度可有效降低。

参考文献

- 1 Zhang S, Liew S C, Lam P P. Hot topic: physical-layer network coding. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Los Angeles, CA, USA, 2006: 358~365
- 2 Popovski P, Yomo H. Physical network coding in two-way wireless relay channels. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'07), Glasgow, Scotland, UK, 2007: 707~712
- 3 Katti S, Gollakota S, Katabi D. Embracing wireless interference: analog network coding. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007,37(4): 397~408
- 4 Chen L, Yang Y, Wei G. Physical layer security enhancement with generalized selection diversity combining. Proceedings of IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013: 518~521

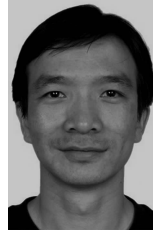


- 5 Fakoorian S A A, Swindlehurst A L. On the optimality of linear precoding for secrecy in the MIMO broadcast channel. *IEEE Journal on Selected Areas in communication*, 2013, 31 (9): 1701~1713
- 6 Geraci G, Couille R, Yuan J, *et al.* Large system analysis of linear precoding in MISO broadcast channels with confidential messages. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(9): 1660~1671
- 7 Li Q, Hong M, Wai H T, *et al.* Transmit solutions for MIMO wiretap channels using alternating optimization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(9): 1714~1727
- 8 Mukherjee A, Swindlehurst A L. Securing multi-antenna two-way relay channels with analog network coding against eavesdroppers. *Proceedings of 2010 IEEE Eleventh International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2010: 1~5
- 9 Yang N, Yeoh P, Elkashlan M, *et al.* MIMO wiretap channels: secure transmission using transmit antenna selection and receive generalized selection combining. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(9): 1754~1757
- 10 Yang N, Yeoh P L, Elkashlan M, *et al.* Transmit antenna

selection for security enhancement in MIMO wiretap channels. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(1): 144~154

11 Alves H, Souza R D, Debbah M, *et al.* Performance of transmit antenna selection physical layer security schemes. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(6): 372~375

[作者简介]



邓单,男,博士,广州番禺职业技术学院高级工程师,主要研究方向为 MIMO、物理层安全。



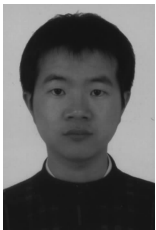
赵明[通信作者],男,博士,中国科学技术大学讲师,主要研究方向为无线通信技术、无线信道研究。

2015041-6

(上接 2015011-6)

- 12 Li J, He C, Jiang L G. An proportional fair resource allocation in OFDM-based cognitive radio networks under imperfect channel-state information. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, China*, 2013: 1814~1818
- 13 Yu W, Cioffi J M. FDMA capacity of Gaussian multiple-access channels with ISI. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(1): 102~111
- 14 Jain R, Chiu D, Hawe W. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems. *DEC Research, Tech Rep TR-301*, 1984
- 15 Palomar D P, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(8): 1439~1451

[作者简介]



吴耀辉,男,宁波大学博士生,浙江万里学院讲师,主要研究方向为 OFDM 系统资源分配。



李有明,男,宁波大学通信技术研究博 士生导师、教授,主要研究方向为无线和有线宽带通信技术中的干扰抑制、动态资源分配、MIMO-OFDM、协作中继、认知无线电等。



金丽萍,女,宁波大学博士生,浙江万里学院讲师,主要研究方向为无线和有线宽带通信技术中的系统性能分析、干扰抑制和动态资源分配。



邵鹏飞,男,浙江万里学院副教授,主要研究方向为通信网络技术。

2015011-7