

切换天线发射的低截获率通信信号物理层安全传输

洪涛, 宋茂忠, 刘渝

南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016

摘要: 为了提高通信信号在无线传输过程中的物理层安全性, 提出一种低截获率物理层安全通信信号. 发射机根据接收机发送的训练符号估计信道, 并随机选取信道质量较好的天线加权发射信号. 各天线的权系数由天线的信道信息和通信双方约定使用的扩频序列决定. 由于发射天线的快速切换, 发射信号是一种与发射天线信道信息和扩频序列相关的空间扩频信号. 期望接收机可采用与普通扩频信号接收机相同的方法解调接收信号, 而窃听接收机由于信道的快速切换无法正常解调接收信号. 仿真结果表明, 相比于参考方法发射信号, 该文提出的信号不仅具有相同的物理层防窃听能力, 而且还具有防侦测和一定的抗干扰能力, 是一种更好的基于多天线发射的物理层安全通信信号.

关键词: 切换天线阵; 低截获概率; 安全通信; 物理层安全

中图分类号: TN929.5

文章编号: 0255-8297(2011)04-0368-06

Signal Transmitted from Switched Antenna Array with Low Interception Probability for Physical Layer Security

HONG Tao, SONG Mao-zhong, LIU Yu

College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China

Abstract: A signal transmitted from a switched antenna array with low probability of interception is proposed to ensure information security in the physical layer transmission. The main idea is that the transmitter estimates channel information from a training sequence transmitted by the mobile terminal and randomly selects several antennas for fast switching transmission. Weighting coefficients of each antenna are calculated according to channel information and the spread-spectrum sequence. Therefore, the signal is a space-spread-spectrum signal associated with the spread-spectrum sequence and the channel information of each antenna. In this way, the desired receiver with a single antenna can demodulate the received signal as traditional spread-spectrum signals, while eavesdroppers cannot extract any useful information from the received signal even if eavesdroppers know the spread-spectrum sequence of the transmit signal because of the fast switching of the transmit antenna. Simulation results show that the signal has the same ability of anti-eavesdropping, and has anti-jamming capability with low probability of detection compared to a reference method.

Keywords: switched antenna array, low probability of interception, secure communication, physical layer security

随着无线通信技术的高速发展, 无线通信物理层安全越来越受到人们的关注, 并已成为安全通信的新热点. 目前, 物理层安全通信研究可以分为两

类: 第1类是从信息论的观点出发研究如何在物理层实现信息的安全传输, 起源于Wyner关于窃听信道的研究^[2]. 文献^[2]还给出了物理层安全通信信道容

收稿日期: 2010-12-13; 修订日期: 2011-04-03

基金项目: 江苏省自然科学基金(No.BK2009367); 航空基金(No.20095152026)资助

作者简介: 洪涛, 博士生, 研究方向: 多天线系统、数字通信、调制技术, E-mail: hongtao@nuaa.edu.cn; 宋茂忠, 教授, 博导, 研究方向: 调制信号设计与接收、多天线通信跟踪定位综合化技术、卫星导航, E-mail: smz108@nuaa.edu.cn; 刘渝, 教授, 博导, 研究方向: 信号处理、信号检测与估计、电子侦察和电子智能化系统, E-mail: liuyu_nuaa@yahoo.com.cn

量的定义. 文献[3]给出了一般广播信道的物理层安全通信信道容量, 证明了可以在广播信道中实现物理层安全传输. 文献[4-6]给出了MIMO安全通信信道容量. 文献[7-9]给出了不同协作方式下的安全通信信道容量. 第2类是设计实际的物理层安全通信系统. 文献[10]设计了一种分布式差分编码OFDM无线通信系统. 文献[11-12]提出了一种方向调制技术, 利用相移器在射频端综合出基带数字调制信号, 这种信号在空间不同的方位具有不同的信号星座图. 在期望方位接收信号星座图与普通基带数字调制信号相同, 期望接收机可以正常解调通信信息; 而在其他方位接收信号星座图发生畸变, 窃听接收机无法正常解调通信信息. 文献[13]提出了一种近场直接调制技术, 利用双波束或多波束的干涉调制实现通信信息在物理层的安全传输. 文献[14-15]提出了一种在窃听信道中加入人工噪声的方法破坏窃听信道, 虽然这种方法浪费了发射能量, 但仍可应用于一些对于无线通信安全性能要求较高的场合. 文献[16]提出了一种采用随机发送天线阵的物理层安全通信系统, 根据发射天线的信道信息随机设置发射天线的权系数, 窃听接收机无法采用恒模算法等盲均衡算法解调通信信息. 文献[17]改进了随机天线阵权系数的设计方法, 提高了期望用户的功率利用率.

对于物理层安全无线通信信号的设计, 发送信号应具有低截获概率、低侦测概率和一定的抗干扰能力^[18]. 扩频通信信号作为传统的物理层安全通信信号具备以上要求, 但使用扩频信号实现物理层安全通信的前提是发射信号扩频序列的安全性, 这在实际情况中难以保证. 文献[16-17]提出的安全通信信号虽有低截获概率, 但没有低侦测概率和抗干扰能力. 本文采用切换天线阵设计一种空间扩频信号, 为无线通信信息提供一种更好的物理层安全传输方法.

快速切换天线阵在方向图综合中称为时间调制阵, 它利用天线阵列的第4维变量“时间”来降低辐射方向图的旁瓣电平^[19-20], 但时间调制阵综合方向图存在谐波分量, 降低了发射信号的能量利用率. 因此, 方向图综合算法中都力求减小谐波分量电平或在接收机中滤除谐波分量^[21]. 文献[22]采用两个一次谐波分量和基频分量构成一个单脉冲测向系统; 文献[23]将一次谐波分量用于波束扫描, 这两种一次谐波的应用也仅仅将一次谐波分量用于测向功能和波束扫描功能. 考虑到谐波分量包含与基频分量相同的信息, 本文利用切换天线阵产生的谐波分量和基频分量构成一个空间扩频信号. 这种发射信号不仅与使用的扩频序列有关, 而且与发射天线的信道信息相关, 是一种利用多天线切换发射方式产生的具有低截获概

率特性的空间扩频信号. 对比文献[16-17]提出的物理层安全通信信号, 本文采用的切换天线发射的空间扩频信号结合了扩频信号和文献[16-17]中提出信号的特点, 且切换阵列只需要一个射频通道, 从而降低了系统的硬件成本.

1 多天线无线传输物理层安全问题模型

图1给出了多天线无线通信系统物理层安全传输的系统模型. Alice作为发射机可以配置多天线的发射系统, 把通信信息安全传输给期望用户; Bob作为期望的移动接收用户, 受限于移动接收设备的大小, 只能配置单天线接收机; Eve作为窃听者, 为了更好地窃听通信信息, 采用多天线接收信号; Jammer作为通信干扰者, 发送干扰信号来干扰Bob的通信, 且本文假设干扰者与窃听者是合作方, 干扰者发射的干扰信号对窃听者没有影响.

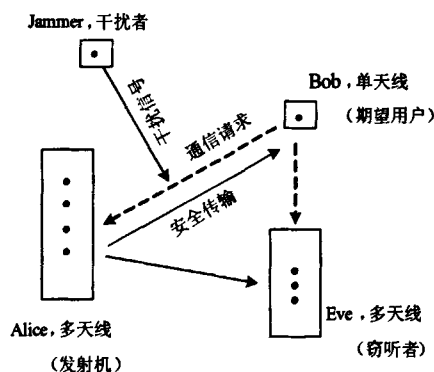


图1 无线安全传输系统模型

Figure 1 Secure wireless transmission model

文献[16-17]中提出了一种基于多天线传输信道的物理层安全传输方法: 1) 在通信过程中, Bob先向Alice发送通信请求信息, 请求信息包含用于信道估计的训练序列; 2) Alice采用多天线接收信号, 并估计出每根发射天线与Bob接收天线之间的信道信息; 3) 对每根天线进行加权发送, 以保证各天线到达Bob的信号为同相叠加. 这种物理层安全传输方法的核心是Alice与Bob之间的信道信息慢变, 可以通过时分双工保证信道的互易性. 当Bob与Eve之间的距离大于半个波长时, 这两者之间的信道信息是不相关的. 训练序列由Bob发送给Alice, 信道估计由Alice完成, 这样Eve就不能估计出自身与Alice之间的信道信息, 即使Eve窃听到Bob发送的通信请求信息也只能估计出Eve与Bob之间的信道信息, 这种信道信息对于Eve解调Alice发送的通信信息是无用的. 为了防止Eve使用恒模算法等盲均衡算法进行信号解调,

当Alice发送每一信息比特时,都随机选取发射天线,造成Alice与Eve之间的信道快速变化,使盲均衡算法无法收敛,达到通信信息能够安全传输给Bob的目的。

上述研究都是建立在无线传输系统中只存在窃听者Eve而不存在通信干扰者Jammer的前提下的,窃听者在上述发送模型下虽不容易解调接收信号,但很容易侦测到Alice与Bob是否进行通信。Jammer可以在侦测到的通信信号中心频率发射大功率单频干扰信号影响Bob。而Bob作为移动台,不可能配置多天线接收系统和复杂的运算设备,也就无法采用波束成型算法和复杂的干扰消除算法消除干扰信号的影响。用低截获概率作为通信信号的衡量指标不仅要考虑到信号的抗窃听能力还要考虑到信号的防侦测能力和抗干扰能力^[18],本文综合考虑这些要求,提出一种基于多天线切换发射的低截获概率安全通信信号。

2 改进的多天线物理层安全传输方法

2.1 多天线切换发射信号的频谱扩展原理

本文采用多天线切换的方式发送通信信息,发射机Alice发射阵列中包含相同的全向辐射阵元,分别用序号1,2,...,R来表示;与Bob单天线之间对应的信道矢量信息为 $H_{AB} = [h_{AB,1}, h_{AB,2}, \dots, h_{AB,R}]^T$ 。各个信道信息互不相关,且所有的阵元都由高速的射频开关控制阵元的导通和关闭。各阵元按时间次序依次导通,以切换发射的方式辐射信号。发射阵元采用的激励信号为 $b_n e^{j\omega_0 t}$,其中 $b_n \in \{+1, -1\}$ 为待发送的二进制比特信息, $n = 1, 2, \dots, N$ 。激励信号是中心频率为 ω_0 、带宽为 ω_b 的BPSK调制信号。远区场接收信号的时域可表达为

$$E(t, n) = b_n U_m(t) H_{AB}(m) e^{j\omega_0 t} \quad (1)$$

式中, ω_0 为发射信号的载波角频率,对应的载波频率为 $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, $U_m(t)$, $m = 1, 2, \dots, M$ 为第 m 根天线开关函数,开关函数的表达式为

$$U_m(t) = \begin{cases} 1, & t_{0m} \leq t \leq (t_{0m} + \tau_m) \\ 0, & 0 \leq t < t_{0m}, (t_{0m} + \tau_m) \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

式中, t_{0m} 为第 m 根发射天线的开始导通时刻, τ_m 为发射天线的导通时间, $T = \frac{1}{f_p}$ 为切换天线的切换周期,对应的 f_p 为切换频率。本文中取切换天线的切换周期与待发送的信息码周期相等,并且所有天线的导通时

间相同,即 $\tau_m = \tau = \frac{1}{M}T$ 。开关函数的示意图如图2所示:

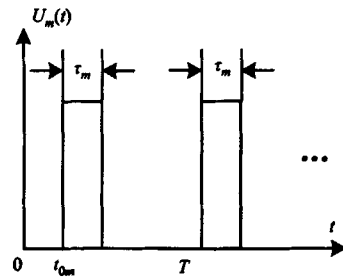


图2 开关函数示意图

Figure 2 Schematic diagram of switching function

开关函数 $U_m(t)$ 为周期函数,对应的幅度谱为一系列的冲击函数,表达式为

$$S(j\omega) = \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} \pi \dot{A}_i \delta(\omega - i\omega_p) \quad (3)$$

$$\dot{A}_i = \frac{2\tau}{T} S_a\left(\frac{i\omega_p \tau}{2}\right) \quad (4)$$

$$\omega_p = 2\pi f_p = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

式中, $\dot{A}_i$ 为第 i 次谐波的幅度, ω_p 为切换角频率, $S_a(x) = \frac{\sin x}{x}$ 。根据频域卷积定理和式(1)可得到接收信号的频域表达式

$$R(j\omega) = \frac{1}{2\pi} E(j\omega) * S(j\omega) = \frac{\tau}{T} \sum_{i=-\infty}^{i=+\infty} S_a\left(\frac{i\omega_p \tau}{2}\right) E[j(\omega - i\omega_p)] \quad (6)$$

式中, $E(j\omega)$ 表示激励信号的幅度谱函数。图3给出了切换天线发射信号的幅度谱函数,可以看出激励信号的基频分量被开关函数搬移到 $\omega_0 \pm \omega_p, \omega_0 \pm 2\omega_p, \dots$,和 $\omega_0 \pm i\omega_p$ 这些谐波角频率点。谐波分量包含与基频分量相同的信息,谐波分量的幅度服从 $S_a(x)$ 函数分布。图4为接收信号的基频分量和谐波分量能量分布示意图,图中0代表基频分量,激励信号 $b_n e^{j\omega_0 t}$ 能量归一化为0 dB。当切换天线数目分别为 $M = 15$ 和 $M = 63$ 时,可以看出基频分量的能量分别下降为-23.52 dB和-35.99 dB,于是通过天线的快速切换发射信号可以隐藏在噪声中,不易被窃听者侦测到通信过程。

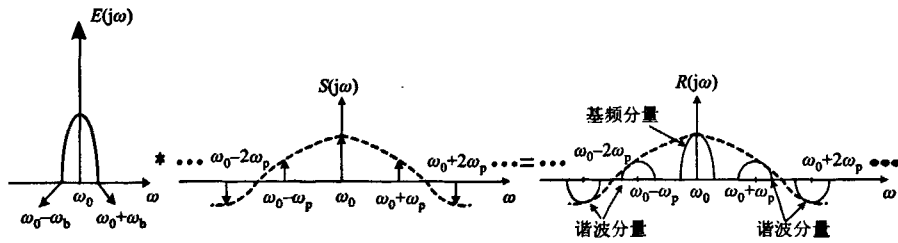


图3 接收信号幅度谱

Figure 3 Amplitude spectrum of the receive signal

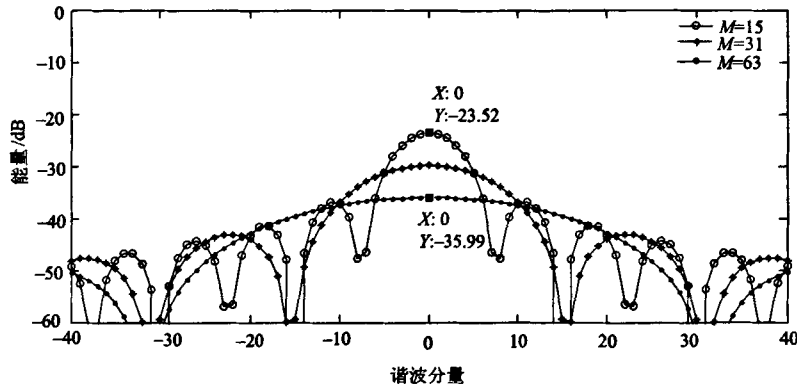


图4 基频分量和谐波分量能量分布示意图

Figure 4 Power of the fundamental and harmonic components for the receive signal

2.2 改进的多天线发射方法

由2.1节多天线切换发射信号的频谱扩展原理可知接收信号是一个与多天线信道信息相关的空间扩频信号, 因此基于这种信号本文提出了以下的多天切换发射安全通信方法:

步骤1 Bob向Alice发送通信请求信息, 请求信息中包含用于信道估计的训练序列;

步骤2 用Alice估计出各根天线与Bob之间的信道, 并设定门限 μ , 发送每一比特的二进制信息都随机选择出 M 根信道增益大于 μ 的天线作为切换发射天线, 其中 M 为通信双方事先预定好使用的扩频序列周期;

步骤3 根据扩频序列和步骤2中选定的发射天线的信道信息综合设定 M 根天线的权系数, 以切换发射的方式辐射信号, 保证Bob能够通过本地产生的扩频序列相关接收信号. Eve由于信道信息与Bob信道信息不相关, 导致接收信号相位随机变化, 即使Eve知道发射信号的扩频码信息, 也无法从接收信号中解调出通信信息.

Alice从 R 根天线中选取信道质量较好的 M 根天线作为切换发射天线, Eve使用 L 根天线窃听信息, 则Alice与Bob之间的信道可以用 $M \times 1$ 维向量表示为

$$\mathbf{h}_{AB} = [h_{AB,1}, h_{AB,2}, \dots, h_{AB,M}]^T \quad (7)$$

而Alice与Eve之间的信道可以表示为

$$\mathbf{h}_{AE} = \begin{bmatrix} h_{AE,1,1} & \dots & h_{AE,1,L} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{AE,M,1} & \dots & h_{AE,M,L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, h_{AB} 和 h_{AE} 均为标准的复高斯分布. 为了保证Bob能够使用本地产生的扩频序列对接收信号相关接收, 依次切换发射的天线权系数可用式(9)来计算

$$w_m = \frac{h_{AB}^*(m)}{\|h_{AB}(m)\|^2} \cdot c_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

式中, c_m 为Alice与Bob约定使用的扩频序列. 期望接收机Bob与窃听接收机Eve接收基带信号分别可以表示为

$$x_{Bob}(m) = b_n U_m(t) h_{AB} w_m + v_{Bob}(m) + J_{Bob}(m) = b_n U_m(t) c_m + v_{Bob}(m) + J_{Bob}(m) \quad (10)$$

$$x_{Eve}(m) = b_n U_m(t) h_{AE} w_m + v_{Eve}(m) = b_n U_m h_{AE} \frac{h_{AB}^*(m)}{\|h_{AB}(m)\|^2} \cdot c_m + v_{Eve}(m) \quad (11)$$

式中, $v_{Bob}(m)$ 和 $v_{Eve}(m)$ 分别是Bob和Eve接收的均值为0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声, $J_{Bob}(m)$ 为Bob接收到的单频干扰信号. Jammer与Eve为合作

方, 干扰信号对Eve没有影响. 由于Bob接收到的通信信息号为扩频信号, 其本身具有一定的抗干扰能力, 并且可以通过简单的频域削峰处理来减小干扰信号的影响; 文献[16-17]中发送的信号为窄带信号, 信号本身不具有抗干扰能力, 也不能采用简单的频域削峰的方法减小干扰信号的影响. 发射信号为基于相位调制的BPSK扩频信号, 信息包含在发射符号的相位中, 信息码的判决可以表示为

$$\hat{b}_n = \arg \min_{b_n} |b_n - \sum_{m=1}^M x_{\text{Bob}}(m) \cdot \hat{c}_m| \quad (12)$$

式中, $\hat{c}_m$ 为Bob本地产生的扩频序列. 当Alice发送每比特信息时, 都随机选取 M 根天线作为切换发射天线, 导致Eve无法使用恒模算法等盲均衡算法解调信号.

3 仿真结果

仿真条件:

- 1) 发送10 000数据包, 每个数据包随机生成100个二进制比特信息用于仿真误码性能;
- 2) 信道信息在每个数据包发送时间内保持不变, 而在不同的数据包之间随机变化;
- 3) 天线的切换频率 $f_p = 1$ MHz, 每一比特的二进制信息由 M 根天线切换发射, 且比特之间随机改变选取的天线和天线发送的次序;
- 4) Jammer发送的干扰信号为单频干扰, 干扰信号频率与通信信号中心频率差值在 $-100 \sim 100$ Hz 之间随机变化, 相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间随机变化;
- 5) 期望接收机是简单的单天线接收机, 不采用任何信号处理算法, 且在仿真中把本文提出的方法与文献[17]提出的参考方法作对比.

在Alice使用 $M = 15$ 根发射天线和无干扰信号的情况下, 本文提出方法与参考方法误码性能随着信噪比变化的对比见图5, 仿真中通用误码率用 P_e 表示. 从图5中可以看出, 参考方法在无干扰信号情况下的误码性能略优于本文提出的方法, 这是因为本文的权系数计算方法与参考方法不同, 而接收信号的信噪比与权系数相关. 本文方法的优点是: 发送信号是一种空间扩频信号, 不易被窃听接收机侦测通信过程; 参考方法在通信双方进行通信时很容易被窃听接收机侦测通信过程. 发送天线的随机变化, 导致Eve接收信号的相位随机变化, 即使窃听接收机获得使用的扩频序列也无法解调接收信号, 因此本文方法与参考方法具有相同的防窃听能力. 当系统存在干扰者时, 本文提出方法与参考方法的误码性能随着信噪比的变化如图6所示. 从图6中可以看出, 参考方法的Bob无法解调通信信息, 与无干扰者

时相比, 本文方法的Bob解调性能虽有一定的下降但仍然可以解调通信信息. 原因是本文所提方法的发送信号是一种空间扩频信号, 具有一定的抗干扰能力, 且本文方法中接收机可以采用简单的频域削峰算法减小干扰信号的影响. 在信噪比 -10 dB 条件下, 本文方法与参考方法的误码性能随着发射天线数的变化如图7所示. 在无干扰信号条件下, 本文方法和参考方法

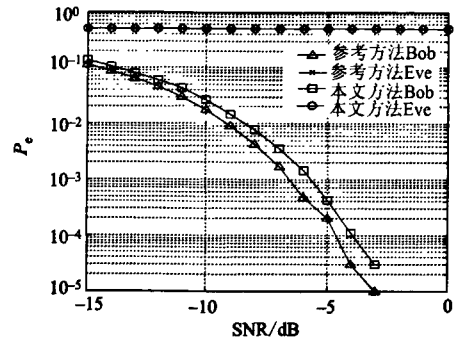


图5 误码性能随着信噪比变化曲线图

Figure 5 Bit error rate performance versus signal to noise rate

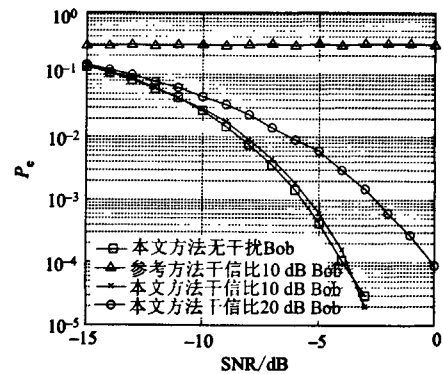


图6 存在干扰时误码性能随着信噪比变化曲线图

Figure 6 Bit error rate performance versus signal to noise rate under the condition of interference signal

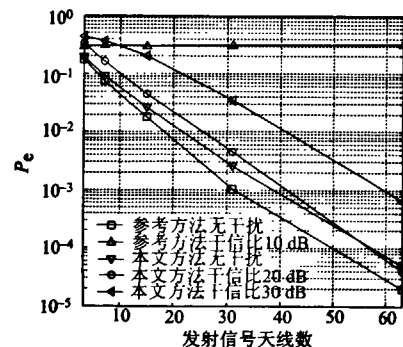


图7 误码性能随着发射信号天线数变化曲线图

Figure 7 Bit error rate performance versus transmit antenna number

的误码性能都随着发射天线数的增加而降低。在有干扰信号条件下, 本文方法的抗干扰性能随着天线数的增加而增强; 参考方法即使增加发射天线数目也无法解调信号。

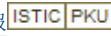
4 结 语

本文提出了一种采用多天线快速切换发射的低截获率通信信号, 根据各天线的信道质量随机选取信道质量较好的天线作为发射天线, 且发射天线的权系数取决于发射信号使用的扩频序列和天线的信道信息。这样发射的信号是一种空间扩频信号, 期望接收机可以正确地解调通信信息, 而窃听接收机由于信道的随机快速切换无法解调通信信息。相比于普通的扩频信号, 本文提出的空间扩频信号不仅与使用的扩频序列有关, 而且与发射天线的信道信息相关, 窃听接收机即使知道通信双方使用的扩频序列也无法解调信号; 与多天线发射的方式相比, 本文的发射信号可以隐藏在噪声中, 不但不易被窃听接收机侦测, 而且信号本身具有一定的抗干扰能力。因此, 本文提出的这种低截获率通信信号为通信信息无线传输提供了一种更加安全的传输方式。

参考文献:

- [1] DEBBAH M, EI-GAMAL H, POOR H V, SHAMAI S. Editorial: wireless physical layer security [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009, 2009: 1-2.
- [2] WYNER A. The wire-tap channel [J]. *Bell System Technical Journal*, 1975, 54(8): 1355-1387.
- [3] CSISZAR I, KORNER J. Broadcast channels with confidential messages [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1978, 24(3): 339-348.
- [4] HERO A O. Secure space-time communication [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(12): 3235-3249.
- [5] KHISTI A, WORNELL G W. Secure transmission with multiple antennas I: the MISOE wiretap channel [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(7): 3088-3104.
- [6] KHISTI A, WORNELL G W. Secure transmission with multiple antennas-Part II: the MIMOME wiretap channel [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(11): 5515-5532.
- [7] KRIKIDIS I, THOMPSON J, MCLAUGHLIN S. Relay selection for secure cooperative networks with jamming [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(10): 5003-5011.
- [8] LUN Dong, ZHU Han, PETROPULU A P, POOR H V. Improving wireless physical layer security via cooperating relays [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(3): 1875-1888.
- [9] SIMEONE O, POPOVSKI P. Secure communications via cooperating base stations [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(3): 188-190.
- [10] Li Zheng, XIA Xianggen. A distributed differentially encoded OFDM scheme for asynchronous cooperative systems with low probability of interception [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(7): 3372-3379.
- [11] DALY M P, BERNHARD J T. Directional modulation technique for phased arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(9): 2633-2640.
- [12] DALY M P, DALY E L, BERNHARD J T. Demonstration of directional modulation using a phased array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(5): 1545-1550.
- [13] BABAKHANI A, RUTLEDGE D B, HAJIMIRI A. Transmitter architectures based on near-field direct antenna modulation [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, 43(12): 2674-2692.
- [14] GOEL S, NEGI R. Guaranteeing secrecy using artificial noise [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 2180-2189.
- [15] HONG Tao, SONG Maozhong, LIU Yu. Directional sensitive modulation signal transmitted by monopulse cassegrain antenna for physical layer secure communication [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2011, 17: 167-181.
- [16] Li Xiaohua, HWU J, RATAZZI E P. Using antenna array redundancy and channel diversity for secure wireless transmissions [J]. *Journal of Communications*, 2007, 2(3): 24-32.
- [17] 穆鹏程, 殷勤业, 王文杰. 无线通信中使用随机天线阵列的物理层安全传输方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(6): 62-66.
Mu Pengcheng, Yin Qinye, Wang Wenjie. A security method of physical layer transmission using random antenna arrays in wireless communication [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(6): 62-66. (in Chinese)
- [18] LIAO C H, TSAY M K, LEE Z S. Secure communications system through concurrent AJ and LPD evaluation [J]. *Wireless Personal Communications*, 2009, 49(1): 35-54.
- [19] YANG Shiwen, GAN Y B, QING Anyong. Sideband suppression in time-modulated linear arrays by the differential evolution algorithm [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2002, 1: 173-175.
- [20] AKSOY E, AFACAN E. Thinned non-uniform amplitude time-modulated linear arrays [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, 9: 514-517.
- [21] BREGAINS J C, FONDEVILA-GOMEZ J, ARES F, FRANCESCHETTI G. Signal radiation and power losses of time-modulated arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(6): 1799-1804.
- [22] TENNANT A. Experimental two-element time-modulated direction finding array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(3): 986-988.
- [23] Li Gang, YANG Shiwen, CHEN Y, NIE Z P. A novel electronic beam steering technique in time modulated antenna array [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 97: 391-405.

(编辑: 秦 巍)

作者: 洪涛, 宋茂忠, 刘渝, HONG Tao, SONG Mao-zhong, LIU Yu
作者单位: 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京, 210016
刊名: 应用科学学报 
英文刊名: Journal of Applied Sciences
年, 卷(期): 2011, 29(4)
被引用次数: 3次

参考文献(23条)

1. DEBBAH M;EI-GAMAL H;POOR H V;SHAMAI S Editorial:wireless physical layer security[外文期刊] 2009
2. WYNER A The wire-tap channel 1975(08)
3. CSISZAR I;KORNER J Broadcast channels with confidential messages 1978(03)
4. HERO A O Secure space-time communication[外文期刊] 2003(12)
5. KHOSTI A;WORNELL G W Secure transmission with multiple antennas I:the MISOME wiretap channel[外文期刊] 2010(07)
6. KHOSTI A;WORNELL G W Secure transmission with multiple antennas-Part II:the MIMOME wiretap channel[外文期刊] 2010(11)
7. KRIKIDIS I;THOMPSON J;MCLAUGHLIN S Relay selection for secure cooperative networks with jamming[外文期刊] 2009(10)
8. LUN Dong;ZHU Han;PETROPULU A P;POOR H V Improving wireless physical layer security via cooperating relays[外文期刊] 2010(03)
9. SIMEONE O;POPOVSKI P Secure communications via cooperating base stations[外文期刊] 2008(03)
10. LI Zheng;XIA Xianggen A distributed differentially encoded OFDM scheme for asynchronous cooperative systems with low probability of interception[外文期刊] 2009(07)
11. DALY M P;BERNHARD J T Directional modulation technique for phased arrays[外文期刊] 2009(09)
12. DALY M P;DALY E L;BERNHARD J T Demonstration of directional modulation using a phased array[外文期刊] 2010(05)
13. BABAKHANI A;RUTLEDGE D B;HAJIMIRI A Transmitter architectures based on near-field direct antenna modulation[外文期刊] 2008(12)
14. GOEL S;NEGI R Guaranteeing secrecy using artificial noise[外文期刊] 2008(06)
15. HONG Tao;SONG Maozhong;LIU Yu Directional sensitive modulation signal transmitted by monopulse cassegrain antenna for physical layer secure communication 2011
16. LI Xiaohua;HWU J;RATAZZI E P Using antenna array redundancy and channel diversity for secure wireless transmissions 2007(03)
17. 穆鹏程;殷勤业;王文杰 无线通信中使用随机天线阵列的物理层安全传输方法[期刊论文]-西安交通大学学报 2010(06)
18. LIAO C H;TSAY M K;LEE Z S Secure communications system through concurrent AJ and LPD evaluation[外文期刊] 2009(01)
19. YANG Shiwen;GAN Y B;QING Anyong Sideband suppression in time-modulated linear arrays by the differential evolution algorithm 2002
20. AKSOY E;AFACAN E Thinned non-uniform amplitude time-modulated linear arrays 2010
21. BREGAINS J C;FONDEVILA-GOMEZ J;ARES F;FRANCESCHETTI G Signal radiation and power losses of time-modulated arrays [外文期刊] 2008(06)
22. TENNANT A Experimental two-element timemodulated direction finding array[外文期刊] 2010(03)
23. LI Gang;YANG Shiwen;CHEN Y;NIE Z P A novel electronic beam steering technique in time modulated antenna array[外文期刊] 2009

引证文献(3条)

1. 殷勤业, 张建国, 郑通兴, 穆鹏程, 王勃, 董柳青 分布式多天线跳空收发技术(II)——权值反馈型反向训练模式下的0/1式跳空技术[期刊论文]-西安交通大学学报 2013(6)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>