DOI：10.7652/xjtuxb201506004

发射聚焦式的多天线跳空安全通信技术

俱莹[1,2]，殷勤业[1]，陈媛[1]，杨骞[1]
（1.西安交通大学电子与信息工程学院，710049，西安；2.国家无线电监测中心陕西监测站，710200，西安）

摘要：为了提高无线通信的安全保密性，针对前向训练模式下的 0/1 式跳空技术训练机制和跳空图案泄露后存在的泄密问题，以及权值反馈型的 0/1 式跳空技术信息反馈造成的实时性和可靠性不高的问题，提出了一种发射聚焦式的跳空收发技术。该技术由合法接收用户发射训练信号，发射端通过相关检测和处理，加载信息后使信号原路返回并在合法接收用户的发射天线处同相叠加，从而使能量聚焦于合法接收用户处，合法接收用户无需信息交换过程即可正确接收信息，而窃听者则因快速切换天线形成的空间信道迅速变化难以解调信号。仿真结果表明，在 −15 dB 的低信噪比下，合法接收用户的误符号率低于 10^{-2}，而窃听者的误符号率随着信噪比的变化始终很高，维持在 0.75 左右，说明该技术既保证了合法接收用户的通信质量，又使窃听者无法正确接收和截获信息。

关键词：无线通信；安全通信；跳空；发射聚焦；训练
中图分类号：TN918.91 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2015)06-0022-05

A Multi-Antenna Space Hopping Secure Communication Technique with Transmission Focusing

JU Ying[1,2], YIN Qinye[1], CHEN Yuan[1], YANG Qian[1]
(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Monitoring Station, State Radio Monitoring Center, Xi'an 710200, China)

Abstract: Since there exists security problem in the 0/1 space hopping technique in forward training mode when both the training scheme and the space hopping pattern are leaked, and the feedback process in the 0/1 space hopping technique with weight feedback results in low real-time performance and low reliability, a space hopping transceiver technique with transmission focusing is proposed to improve the security of wireless communication. The legitimate user firstly transmits training signals. Then the transmitter sends a mixture of information signals and correlation detection results of the received signals and makes the signals return along the original path, and in-phase stacking is accomplished in the transmitting antenna of the legitimate user so that energy is focused on the legitimate user. Thus the legitimate user can correctly demodulate the signal without any information exchange process. Furthermore, since the transmitter quickly switches antennas to make channels change rapidly, the eavesdropper can hardly demodulate the signal. Simulation results show that the symbol error rate of the legitimate user is lower than 10^{-2} at the low signal to noise ratio of −15 dB, while the symbol error rate of the eavesdropper always maintains a high level of about 0.75, even when the signal to noise ratio varies. The

收稿日期：2014-12-01。 作者简介：俱莹(1986—)，女，博士生；殷勤业(通信作者)，男，教授，博士生导师。 基金项目：国家自然科学基金资助项目(61172093,61171108)；国家创新群体科学基金资助项目(61221063)；教育部博士学科点专项基金资助项目(20130201130003)。
网络出版时间：2015-03-19 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150319.1153.005.html

results illustrate that the proposed technique guarantees the communication quality of legitimate user while eavesdroppers are unable to intercept.

Keywords: wireless communication; secure communication; space hopping; transmission focusing; training

近年来，无线通信给人们的生活带来了便利，但电磁波的广播特性和无线信道的开放性却使通信的安全性面临着挑战，因而无线安全通信成为了通信领域研究的热点[1-2]。跳频技术是一种常用的安全通信的方法，但是跳频通信存在一些难以克服的缺点，如占用大量的频谱资源、天线尺寸需要随着频率的变化而改变、跳速受到锁相环路以及天线尺寸变化速度的限制等[3-4]。另外，窃听者一旦窃取跳频图案，在任何位置都能正确解调信息，其根本原因是频率和位置无关，跳频技术并没有利用无线通信的特性。无线信道具有时频域之外的空域特性[5]，若能将空谱资源合理利用，既能解决频谱资源日渐匮乏的问题，又能利用空谱的多样性来最大化合法接收用户和窃听者信道之间的差异性，就能在保证合法接收用户的通信质量的前提下实现通信的安全性[6-9]。

0/1 式跳空技术是一种利用空谱资源来提高通信的保密性的方法，发射端电子开关在发射天线间快速切换，每次根据跳空图案选择不同的天线发射信号，使得信道随着天线的变化而不断变化。基于前向训练的 0/1 式跳空技术的工作模式是发射端发送训练序列，接收端使用训练得到权值在正式通信时进行解调，就能得到规整的星座图，但是一旦窃听者知道了跳空图案并能掌握时机与合法接收用户一起参与训练，那么窃听者也能正确解调[10]。权值反馈型的 0/1 式跳空技术采用反向训练的方法，由接收端发射训练序列，发射端得到收发天线间的信道信息后反馈给接收端，接收端利用信道的互易性设计权值，通过跳空图案正确加权来解调，但是需要一个反馈信道信息的过程，不仅降低了效率，而且反馈信道信息的过程中有可能会出错，使得通信的可靠性难以保证[11]。针对以上问题，本文提出了一种发射聚焦式跳空技术，先由接收端发送一个信号作为基准，发射端加载信息后，使几根天线发射的信号原路返回到达接收端并同相叠加。另外前几种 0/1 式跳空模型中，发射端每次只有一根天线发射信号，而本文提出的发射聚焦式的跳空技术，发射端每次随机选取多根天线同时发射信号，不仅使随机性增大，窃听者难以破译，而且接收端收到的几路信号同相叠加，在接收端处聚焦，使信噪比显著提高。

本文提出的发射聚焦不同于传统的波束形成技术，波束形成是增强某个方向上的信号，几个天线发出的是平行波束，如果窃听用户将天线架设在与合法接收用户相同的方向上，那么窃听用户也会收到增强的信号，而本文提出的发射聚焦是点聚焦，只在合法接收用户的位置上几路信号才同相叠加，在同一方向上的其他位置不能实现同相叠加，即使在很近的位置也可能会反向抵消，相较于传统的波束形成安全性显著提高。

1　系统模型

发射端 Alice 配置 M 根天线，合法接收用户 Bob 配置 K 根天线，窃听用户 Eve 配置 F 根天线，天线间距大于一个波长，系统工作在半双工模式下。窃听用户 Eve 只进行被动接收，不做主动发射。假设信道慢变，即通信的一段时间内信道特性认为是恒定的。系统模型如图 1 所示。

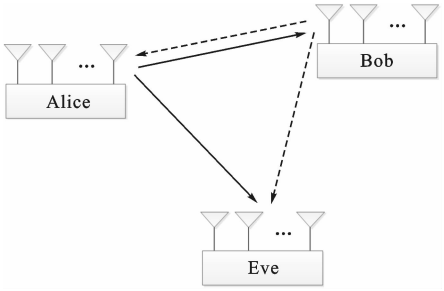

图 1　发射聚焦式安全通信技术系统模型

通信双方使用相同的载波频率，采用窄带信号模型，则解析化的发射信号为

$$s(t) = s_0 \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi_0)} p(t) \tag{1}$$

式中：s_0 和 φ_0 分别为发射信号的幅度和初相；ω 为载波频率；$p(t)$ 是调制信号的包络。

由于多径是无线通信最重要的特征，所以下面讨论发射信号经多径后到达接收端的信号表达式，路径越长，到达接收端越晚，所以接收端的信号相当于发射信号经过不同的延时和衰减后的叠加。假设有 J 条路径（包括直射径和反射径），那么接收端的信号为

$$x(t) = \sum_{i=1}^{J} b_i s[t-\tau_i(x_i, y_i, z_i)] + n(t) =$$

$$\sum_{i=1}^{J} b_i \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau_i(x_i,y_i,z_i)} s_0 \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi_0)} p[t-\tau_i(x_i,y_i,z_i)]+n(t) \tag{2}$$

式中：b_i 和 $\tau_i(x_i,y_i,z_i)$ 分别表示第 i 条多径的幅度衰减和延时，其中 (x_i,y_i,z_i) 为等价电波传输距离的三维空间分量；$n(t)$ 为零均值的加性高斯白噪声。

对于第 i 条路径，信号延时 $\tau_i(x_i,y_i,z_i)$ 后到达接收端，在此之前，第 i 条路径的到达信号为 0。当码元时间大于多径时延扩展时，所有路径的信号都到达后，会有一段所有路径信号相叠加的平稳阶段，检测时，只考虑这段平稳的正弦信号，对各个天线分别检测，则第 m 根天线接收到的平稳阶段的信号可表示为

$$x(t)=b_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_m(x_m,y_m,z_m)} s(t)+n(t)= h_m s(t)+n(t) \tag{3}$$

式中：$b_m=\left|\sum_{i=1}^{J} b_i \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau_i(x_i,y_i,z_i)}\right|$、$\theta_m(x_m,y_m,z_m)=\mathrm{angle}\left(\sum_{i=1}^{J} b_i \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau_i(x_i,y_i,z_i)}\right)$ 分别表示收发天线间所有路径综合作用的等价幅度衰减系数和等价相移；$h_m=b_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_m(x_m,y_m,z_m)}$。

2 发射聚焦式安全通信技术

2.1 训练阶段

首先 Bob 的第 k 根天线发送式(1)所示的训练信号，其中初相 φ_0 随机选取，发送训练信号的天线 k 也为随机选取。此时，Alice 接收到的信号为

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}}(t)=\boldsymbol{h}_k s_0 \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi_0)}+\boldsymbol{n}_{\mathrm{A}}(t) \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{h}_k=[h_{k1},h_{k2},\cdots,h_{kM}]^{\mathrm{T}}=[b_{k1}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{k1}},b_{k2}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{k2}},\cdots b_{kM}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{kM}}]^{\mathrm{T}}$，其中 h_{ki} 代表 Bob 的第 k 根天线到 Alice 的第 i 根天线的信道；$\boldsymbol{n}_k(t)=[n_{\mathrm{A1}}(t),n_{\mathrm{A2}}(t),\cdots,n_{\mathrm{AM}}(t)]^{\mathrm{T}}$ 为高斯白噪声。

假设 Alice 使用 N 倍过采样，采样后的信号为

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{A}}(n)=\boldsymbol{h}_k s_0 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}+\boldsymbol{n}_{\mathrm{A}}(n) \tag{5}$$

Alice 用 L 个周期长的初相为 0 的相关序列 $r_{\mathrm{A}}(n)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}$ 对采样后的信号进行相关检测，相当于一个 $L\times N$ 点的匹配滤波器。为了消除噪声的影响以及加强相关检测的可靠性，用来做相关的序列应尽可能长，但由于信号经过多径到达天线的时延不同，符号的公共部分会少于发射的周期数，假设各路径到达符号的公共部分为 P 个周期，那么相关序列的长度必须满足 $L\leqslant P$。

假设噪声与信号不相关，则 Alice 第 i 根天线收到的信号通过匹配滤波器的输出为

$$R_i(m)=<x_{\mathrm{A}i}(n),r_{\mathrm{A}}(n)>= <h_{ki}s_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0},r_{\mathrm{A}}(n)>+<n_{\mathrm{A}i}(n),r_{\mathrm{A}}(n)>= E[h_{ki}s_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(n+m)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}r_{\mathrm{A}}^{*}(n)]= \frac{1}{LN}\sum_{n=0}^{LN-1} h_{ki}s_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(n+m)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_0}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}=b_{ki}s_0\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_{ki}+\varphi_0)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}m} \tag{6}$$

式中：$<\cdot,\cdot>$ 表示相关运算；$E[\cdot]$ 为数学期望。

由上式可知，训练阶段得到了相位值 $\theta_{ki}+\varphi_0$。

2.2 发射信号阶段

发射聚焦技术的目的是让 Alice 的多根天线发出的信号在 Bob 的第 k 根天线处同相叠加。Alice 的多根天线收到的是 Bob 发出的同一个信号，如果能够原路返回，那么到达 Bob 端时必然会同相叠加，相当于 Bob 发给 Alice 一把尺子。Alice 收和发可以相差整数个周期，不影响同相叠加。在实际的硬件中，Alice 端收发信机使用同一个晶振，由晶振频率控制的收发采样点时刻是可以精确保证的。

对 Alice 的每根天线分别进行相关检测，并根据跳空图案选取 G 根天线发射信号，将这 G 根天线序号的集合记为 S_{T}。其中，发射天线的切换顺序和切换时序可由收发双方事先约定，称为跳空图案，而跳空图案是随机生成的，在发射天线所有可能组合中随机选取。本文采用相移键控(PSK)调制方式，对这 G 根天线上检测到的相位取反，加载信息 $y=A_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{\mathrm{s}}}$ 后发给 Bob，Alice 的发射信号如下

$$\boldsymbol{s}_{\mathrm{A}}(t)=[A_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\theta_{\mathrm{s}})}]\mathrm{diag}\{\boldsymbol{a}\}\boldsymbol{c} \tag{7}$$

式中：$\mathrm{diag}\{\cdot\}$ 表示对角线元素为 $\{\cdot\}$ 的对角阵；$\boldsymbol{c}=[\mathrm{e}^{-(\varphi_0+\theta_{k1})},\mathrm{e}^{-(\varphi_0+\theta_{k2})},\cdots,\mathrm{e}^{-(\varphi_0+\theta_{kM})}]^{\mathrm{T}}$ 表示将 Alice 检测到的相位取反；$\boldsymbol{a}=[a_1,a_2,\cdots,a_M]^{\mathrm{T}}$ 是根据跳空图案产生的开关向量，Alice 选择第 i 根天线发射时 $a_i=1$，Alice 不选择第 i 根天线发射时 $a_i=0$。

假设信道互易，Bob 的第 k 根和第 $l(l\neq k)$ 根天线收到的信号分别为

$$x_{\mathrm{B}k}(t)=\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_{\mathrm{A}}(t)+n_{\mathrm{B}k}(t)=A_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\theta_{\mathrm{s}})}\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{T}}\mathrm{diag}\{\boldsymbol{a}\}\boldsymbol{c}+ n_{\mathrm{B}k}(t)=\sum_{i\in S_{\mathrm{T}}} b_{ki}A_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\theta_{\mathrm{s}})}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi_0}+n_{\mathrm{B}k}(t) \tag{8}$$

$$x_{\mathrm{B}l}(t)=\boldsymbol{h}_l^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_{\mathrm{A}}(t)+n_{\mathrm{B}l}(t)=A_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\theta_{\mathrm{s}})}\boldsymbol{h}_l^{\mathrm{T}}\mathrm{diag}\{\boldsymbol{a}\}\boldsymbol{c}+ n_{\mathrm{B}l}(t)=\sum_{i\in S_{\mathrm{T}}} b_{li}A_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\theta_{\mathrm{s}})}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi_0}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_{li}-\theta_{ki})}+n_{\mathrm{B}l}(t) \tag{9}$$

由于相位 φ_0 是训练阶段由 Bob 发出的，所以 Bob 端已知此相位，并用 $r_{\mathrm{B}}(k)=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi_0}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}n}$，即初相为 $-\varphi_0$ 的相关序列进行相关检测，第 k 根和第 $l(l\neq k)$ 根天线的相关检测结果分别为

$$\xi_{\mathrm{B}k}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_{\mathrm{s}}}\sum_{i\in S_{\mathrm{T}}} A_{\mathrm{s}}b_{ki} \tag{10}$$

$$\xi_{Bl}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_s}\sum_{i\in S_T}A_s b_{li}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_{li}-\theta_{ki})}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_s}B_l\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta_l}\quad(11)$$

式中：$\sum_{i\in S_T}A_s b_{li}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_{li}-\theta_{ki})}$ 为一个复数，可将其写为 $B_l\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta_l}$ 的形式。

至此，用来发射训练信号的 Bob 的第 k 根天线得到了信号相位 θ_s，并且从以上两式可以看出，Alice的 G 根天线发来的信号在 Bob 的第 k 根天线处具有相同的相位，从而实现了同相叠加。除发射训练信号的天线 k 之外，其余天线解调后信号的星座图均发生了旋转，第 $l(l\neq k)$根天线可根据第 k 根天线检测出的相位求得自己的相位偏差 β_l，通过消除偏差，就能正确解调。每次当跳空图案变化时，求解一次天线 $l(l\neq k)$的相位偏差值，后续收到的符号根据此偏差值解调。平均所有接收天线上解得的相位得到最终相位值。

3　发射聚焦技术实现安全通信的原因

本文采用的安全传输方法的核心思想是发射聚焦，由于发射端多根天线收到的是合法接收用户发出的同一个信号，原路返回必然会在合法接收用户的发射天线处同相叠加。合法接收用户的其他天线能根据发射训练信号的天线得到的相位值调整相位偏差，将所有接收天线上的相位全部调整到正确的相位上，又相当于接收聚焦。由于发射端采用多天线发射，且不同的发射天线到合法接收用户的传播路径是不同的，窃听者和合法接收用户的位置要在所有传播路径上都相差整数个接收周期的可能性是微乎其微的。另外，考虑到传播环境中存在多径的影响，位置不同相应的多径也是不一样的，直达径和反射径综合作用后，要在传播路径上找到相差整数个传播周期的点本身就是相当困难的，所以窃听者收到的信号就不能保证同相叠加，即使在距离较近的地方，也有可能会反向抵消。通过发射聚焦，合法接收用户的接收信噪比显著提高，而窃听用户的接收信噪比并未改善，使得合法接收用户的信噪比明显优于窃听用户的信噪比，增加了安全性。另外，有了发射聚焦的技术，就能采用多根天线同时发射的跳空模式，较前几种每次只能一根天线发射的跳空技术的安全性更高。

另外，合法接收用户 Bob 发出的信号只有合法接收用户自己知道，无需告知发射端 Alice，Alice 只负责加载信息后发回 Bob 端，避免了交换信息过程中被窃听者截获的风险。即使 Eve 收到信号并掌握时机参与了训练，但不知道 Bob 端发出的原始信号，也不能解调出正确的信息。Bob 端每次发出信号的初始相位是随机选取的，即使 Eve 偶然一次解调正确，但当 Bob 端换了发射信号后 Eve 便不能解调了，相当于“一次一密”。

跳空技术通过切换电子开关实现发射天线的切换，天线的快速切换使信道迅速变化，使窃听者难以截获信息。跳空技术的扩空增益取决于天线的跳速和跳幅，电子开关切换可使跳速达到很高的水平，远高于跳频技术可达到的跳速，且天线呈分布式排布，距离可以很远，又能获得很大的跳幅，因此跳空技术可获得高扩空增益，在保证通信质量的同时又能提高通信的安全性。另外，跳空技术利用了无线信道的特性，即不同用户信道存在差异，其安全性不仅依赖于跳空图案，还与收发用户间的无线信道密切相关，即使 Eve 窃取了跳空图案，也无法正确解调信号。

4　仿真实验

仿真条件如下，Alice、Bob 和 Eve 均配置 4 根天线，阵元间距大于一个波长，接收时均为 8 倍采样。仿真采用 QPSK 信号，符号长度为 100 个载波周期，相关序列的长度为 40 个载波周期。假设存在多径，反射点随机设置，且反射径和直达径之间的延时不超过 20 个载波周期。Alice 端每次随机选取 2 根天线发射。将本文的发射聚焦方法和文献[11]中的权值反馈方法进行对比，得到的误符号率曲线如图 2 所示。

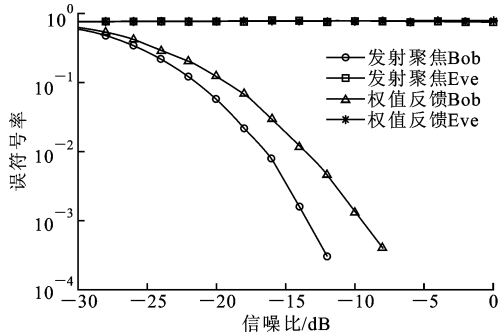

图 2　合法接收用户和窃听用户在不同信噪比下的误符号率

从图 2 中可以看出，采用本文方法 Bob 的误符号率在−15 dB 以上时都非常小，并且低于文献[11]方法。对 Eve 来说，两种方法的误符号率均在 0.75 左右。这么高的误符号率使得 Eve 根本无法窃取到任何信息，而且 Eve 的误符号率与信噪比无关，主要是 Eve 和 Bob 的信道差异造成的，跳空的传输机

制正是利用了空谱的多样性来最大化这种差异。

下面仿真了 Alice 端每次随机选取 1～4 根天线发射时 Bob 的误符号率，仿真结果如图 3 所示。

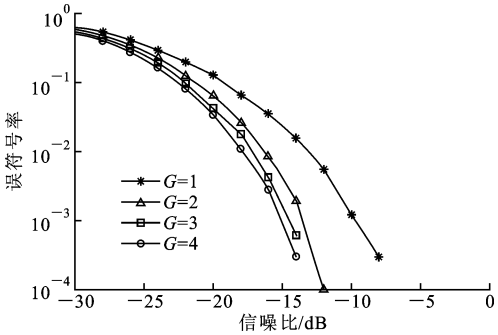

图 3 Alice 不同发射天线数下的误符号率

观察图 3 可知，Alice 选取 1 根天线发射时的性能明显不如选取多根天线时的发射性能，因而发射聚焦技术使得多根天线发射的信号在 Bob 端同相叠加提高了安全性，优于之前每次只能用 1 根天线发射的跳空技术。

5 结 论

本文提出了一种发射聚焦式的跳空安全通信技术，经过训练阶段和发射阶段的信号传输，合法接收用户的误符号率非常小，而窃听者的误符号率在信噪比较高时仍然很大。不同于传统的发射平行波束的波束形成技术，发射聚焦技术使信号在合法接收用户处点聚焦，能量集中于合法接收用户处，不仅保证了通信质量，又增加了安全性。

跳空技术是通过快速切换天线使得信道迅速变化，在无线通信中充分利用了空域资源，使通信的可靠性和安全性得到了保障，而跳频技术是通过使用频谱资源来提高通信的保密性，没有利用到无线通信的特性，使得频谱匮乏的问题更加严峻。因此，研究利用空谱资源的安全通信技术如跳空技术是非常有意义的。

参考文献：

[1] RENZO M, DEBBAH M. Wireless physical-layer security: the challenges ahead [C]// Proceedings of 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 313-316.

[2] SHIN M, MA J, MISHRA A, et al. Wireless network security and interworking [J]. Proceedings of IEEE, 2006, 94(2): 455-466.

[3] 洪涛，宋茂忠，刘渝. 切换天线发射的低截获率通信信号物理层安全传输 [J]. 应用科学学报，2011，29(4)：368-373.
HONG Tao, SONG Maozhong, LIU Yu. Signal transmitted from switched antenna array with low interception probability for physical layer security [J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 29(4): 368-373.

[4] 洪涛，宋茂忠. 一种基于天线虚拟运动的跳空扩频调制方法 [J]. 南京航空航天大学学报，2011，43(4)：481-485.
HONG Tao, SONG Maozhong. Space hopping spread spectrum modulation based on a virtual motion antenna [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(4): 481-485.

[5] LI Xiaohua, HWU J, RATAZZI E P. Array redundancy and diversity for wireless transmissions with low probability of interception [C]// Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 525-528.

[6] JOHNSON D H, DUDGEON D E. Array signal processing, concepts and techniques [M]. Upper Saddle Rover, NJ, USA: Prentice Hall, 1993.

[7] LI Xiaohua, HWU J. Using antenna array redundancy and channel diversity for secure wireless transmissions [J]. Journal of Communications, 2007, 2(3): 24-32.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 殷勤业，贾曙乔，左莎琳，等. 分布式多天线跳空收发技术：I [J]. 西安交通大学学报，2013，47(1)：1-6.
YIN Qinye, JIA Shuqiao, ZUO Shalin, et al. A distributed multi-antenna space hopping transceiver technique: I [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(1): 1-6.

[11] 殷勤业，张建国，郑通兴，等. 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 [J]. 西安交通大学学报，2013，47(6)：1-6.

(下转第 52 页)