DOI：10.7652/xjtuxb201306001

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

殷勤业，张建国，郑通兴，穆鹏程，王勃，董柳青
(西安交通大学电子与信息工程学院，710049，西安)

摘要：针对正向训练模式下的0/1式跳空技术在跳空图案泄露后存在的安全隐患，提出了权值反馈型反向训练模式下的0/1式跳空技术。该技术在发射方和目标用户均使用多天线，双方采用反向训练技术，使目标用户获得与正向训练模式下一致的权值，而侦听方即使窃取了跳空图案，但由于无线信道的差异性，仍然无法正确解调，这一点完全不同于传统跳频扩频方案。反向训练技术以从根源上解决无线通信安全问题为出发点，充分利用无线信号丰富的时空谱资源，保证了物理层安全传输。仿真结果表明，在跳空图案和反馈权值都泄露的情况下，侦听方的误符号率始终极高，根本无法侦听信息。

关键词：无线通信；物理层安全；多天线；无线信道；跳空；时空谱；跳频扩频
中图分类号：TN914.42 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2013)06-0001-05

A Distributed Multi-Antenna Space Hopping Transceiver Technique: Part Ⅱ
0/1 Space Hopping Technique in Backward Training Mode with Weight-Feedback

YIN Qinye, ZHANG Jianguo, ZHENG Tongxing, MU Pengcheng, WANG Bo, DONG Liuqing
(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Since the 0/1 space hopping technique in forward training mode has security problems after the leak of space hopping pattern, a backward training technique with weight-feedback is proposed. Through backward training between the transmitter and the target user, the target user can obtain the weights that are equivalent with those generated from the forward training, while the eavesdropper, even if she steals the space hopping pattern, cannot correctly demodulate because of the diversity of the wireless channel. It is this technique that is completely different from the traditional frequency hopping spread spectrum technique. The proposed technique aims at solving the secure problem of wireless communications fundamentally, makes full use of the abundant space-time spectrum resources of the wireless signals, and ensures secure transmission in physical layer. Simulation results show that even when both the space hopping pattern and the feedback weights are leaked, the eavesdropper keeps a high symbol error rate and cannot intercept information.

Keywords: wireless communications; physical layer security; multi-antenna; wireless channel; space hopping; space-time spectrum; frequency hopping spread spectrum

近年来，无线通信物理层安全已成为通信领域的研究热点。跳频技术是目前无线通信中最常用的

收稿日期：2013-03-11。 作者简介：殷勤业(1950—)，男，教授，博士生导师。 基金项目：国家创新群体科学基金资助项目(61221063)；国家自然科学基金资助项目(61071125，61071216，61102081，61172093)。
网络出版时间：2013-03-18 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130318.1139.002.html

安全保密措施，很多研究都是基于跳频的思想并联合无线信道的部分特性来实现安全通信的[1-2]。但是，跳频技术由于受到锁相环路的惯性限制和天线物理尺寸变化的制约，其跳速和跳幅很难得以提高，无法实现较高的扩频增益，而且跳频机制本身又让日趋匮乏的频谱资源问题变得更为尖锐[3]。种种原因使得跳频技术在无线通信领域的实际应用中具有很大的局限性。目前，人们已经发现了无线通信中丰富的空间谱资源，并提出了一系列利用空间谱资源的无线信号收发技术[1-9]。

0/1 式跳空技术是一种典型的利用空间谱资源解决无线通信安全问题的无线传输方案。0/1 式跳空技术在收发端均配置多天线，发射端每次只接通一根天线，并且快速切换天线使空间信道时刻变换，大大地扩展了信号的时空谱，既保证目标用户正确通信，又防止侦听方截获信息。跳空技术可以轻松获得高扩空增益，类比扩频增益，扩空增益取决于跳空的跳速和跳幅：发射端通过高速电子开关切换天线，速度达到纳秒级别，可以获得极高的跳速；天线分布式排布，天线距离可以很远，保证了足够的跳幅。

1 0/1 式跳空无线信道模型

在无线安全传输系统中，发射方 Alice 有 J 根天线，目标用户 Bob 有 K 根天线，侦听用户 Eve 有 M 根天线。一般要求收发信道可以互易，当信道慢变时，这种互易性可以通过时分双工得到充分保证[4]。无线安全传输模型如图 1 所示。

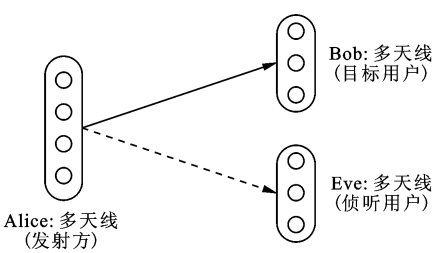


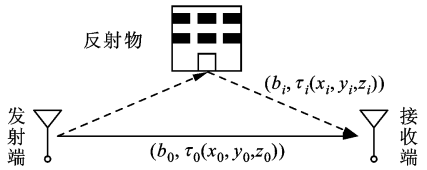
图 1 无线安全传输模型

通信双方使用相同的载波频率，采用窄带信号模型，解析化的发射信号可以表示为

$$s(t) = A_s e^{j(\omega_0 t+\theta_s)} \tag{1}$$

式中：A_s 和 θ_s 分别表示发射符号的幅度和初相；ω_0 为载波频率。

考虑到无线通信的多径特性，发射端第 j 根天线到接收端第 k 根天线的单发单收无线信道最简化模型如图 2 所示。



实线和虚线分别代表直射径和反射径；b_i 和 $\tau_i(x_i, y_i, z_i)$ 分别表示第 i($i=0$ 代表直射径)条路径的幅度衰减系数和路径时延；(x_i, y_i, z_i) 表示等效电波传输距离的三维空间分量

图 2 0/1 式跳空单发单收无线信道模型

针对信道模型作如下假设：①传播介质是均匀、线性、各向同性的；②各天线阵元间距大于一个波长，阵元间影响忽略不计；③接收噪声为零均值加性高斯白噪声，相互独立，且独立于信号；④信道慢变，即通信的一段时间内，信道特性认为是恒定的。

如果收发天线间共有 N 条路径(包括直射径和反射径)，则到达接收端的信号可以描述为

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{i=0}^{N-1} s(t) b_i e^{-j\omega_0 \tau_i(x_i, y_i, z_i)} + v(t) = \\ &\sum_{i=0}^{N-1} A_s b_i e^{j[\omega_0 t+\theta_s-\omega_0 \tau_i(x_i, y_i, z_i)]} + v(t) = \\ &A_s b_{j,k} e^{j[\omega_0 t+\theta_s+\theta_{j,k}(x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k})]} + v(t) \end{aligned} \tag{2}$$

式中：$b_{j,k} = \left| \sum_{i=0}^{N-1} b_i e^{-j\omega_0 \tau_i(x_i, y_i, z_i)} \right|$、$\theta_{j,k}(x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k}) = \text{angle}\left(\sum_{i=0}^{N-1} b_i e^{-j\omega_0 \tau_i(x_i, y_i, z_i)}\right)$ 和 $v(t)$ 分别表示收发天线间各条路径综合作用的等价幅度衰减系数、路径时延造成的等价相移和零均值加性高斯白噪声，其中 $(x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k})$ 表示等价电波传输距离的三维空间分量。

跳空技术利用数字通信有限码集的特点，通过训练方式获得接收权值，无需求解复杂的多径信道，不涉及矩阵求逆运算，大大降低了运算复杂度。为了有效消除噪声影响，可以增加符号持续时间，利用噪声之间的独立性和其独立于信号的特性，通过累积相关接收来实现，这是对付噪声最基本的手段。比如每个符号发送 P 个载波周期，对于每根接收天线，同一信号通过多径(包括直射径和反射径)到达该天线的时延不同，造成各路径到达的符号公共有效部分少于 P 个载波周期，假若收发天线间各路径的时延差均不超过 L 个载波周期，则对于每个符号，接收端可以截取 $Q=P-L$ 个载波周期进行数据处理。

文献[3]已经验证，通信双方按照跳空图案进行收发，目标用户 Bob 使用训练的权值解调能够得到规整星座图。可以预见，侦听方 Eve 一旦窃取了跳

空图案，而且掌握训练时机实时参与训练，就能够获得其与发射方 Alice 之间对应信道的权值，这样就完全可以同 Bob 一样正确解码了。为了避免这种情况，本文提出权值反馈型反向训练模式下的 0/1 式跳空技术，并且通过理论分析和实验仿真证明了该技术能达到与正向训练同等的解调性能，且具有优越的防侦听能力。

2　权值反馈型反向训练技术

权值反馈型反向训练技术如图 3 所示，其基本过程是：

(1)目标用户 Bob 依次切换天线向发射方 Alice 发送约定符号，Alice 训练得到 Bob 的接收权值；

(2)Alice 将权值反馈给 Bob，Bob 对应跳空图案选择权值，加权接收。

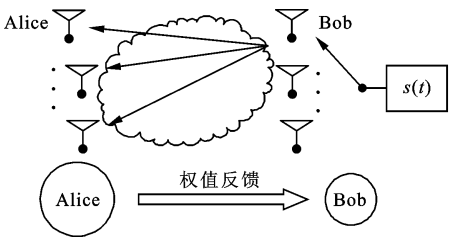


图 3　权值反馈型反向训练技术

反向训练阶段，当 Bob 导通第 k 根天线发送信号 $s(t)=A_s e^{j(\omega_0 t+\theta_s)}$ 时，Alice 端参考信号 $e^{j\omega_0 t}$ 取 Q 个载波周期进行相关检测接收，其作用相当于一个高阶极窄带匹配滤波器，它对噪声的抑制是非常显著的，以下讨论忽略噪声的影响。根据式(2)可得 Alice各天线的接收信号为

$$\boldsymbol{r}_k(t)=\begin{bmatrix} r_{1,k}(t) \\ r_{j,k}(t) \\ \vdots \\ r_{J,k}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} b_{1,k}A_s e^{j[\omega_0 t+\theta_s+\theta_{1,k}(x_{1,k},y_{1,k},z_{1,k})]} \\ b_{j,k}A_s e^{j[\omega_0 t+\theta_s+\theta_{j,k}(x_{j,k},y_{j,k},z_{j,k})]} \\ \vdots \\ b_{J,k}A_s e^{j[\omega_0 t+\theta_s+\theta_{J,k}(x_{J,k},y_{J,k},z_{J,k})]} \end{bmatrix} \tag{3}$$

接收数据跟本地参考信号做相关得

$$\boldsymbol{\xi}_k=\langle \boldsymbol{r}_k(t),e^{j\omega_0 t}\rangle=\frac{1}{QT}\int_0^{QT}\boldsymbol{r}_k(t)e^{-j\omega_0 t}dt=A_s\boldsymbol{b}_k e^{j\theta_s} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{b}_k=[b_{1,k}e^{j\theta_{1,k}},b_{2,k}e^{j\theta_{2,k}},\cdots,b_{J,k}e^{j\theta_{J,k}}]^{\mathrm{T}}$；$T$ 为信号载波周期。

双方约定发射符号 $A_s e^{j\theta_s}$，得到信道信息

$$\boldsymbol{g}_k=\frac{\boldsymbol{\xi}_k}{A_s e^{j\theta_s}}=\boldsymbol{b}_k \tag{5}$$

Bob 依次切换天线发射，Alice 可以训练得到 Bob 到 Alice 的 $J\times K$ 维信道矩阵

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{BA}}=[\boldsymbol{g}_1,\boldsymbol{g}_2,\cdots,\boldsymbol{g}_K] \tag{6}$$

根据信道互易性，易知 Alice 到 Bob 的信道矩阵 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{AB}}=\boldsymbol{H}_{\mathrm{BA}}^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_J]$，则对应 Alice 第 j 根发射天线，Bob 相应权值可以设计为

$$\boldsymbol{W}_j=\frac{\boldsymbol{h}_j^{\mathrm{H}}}{\|\boldsymbol{h}_j\|^2} \tag{7}$$

正式通信时，0/1 式跳空方案的传输过程如图 4 所示。考虑到实际通信中，同一信号到达各接收天线的时延不同，若同文献[3]中先将各路接收信号加权合并后做相关，则会导致符号有效部分减少。本文采取的措施是：各接收天线独立进行相关接收，之后根据跳空图案选择权值，加权合并解调，最后进行符号判决。

当 Alice 切换到第 j 根天线发射信号 $s(t)=A_s e^{j(\omega_0 t+\theta_s)}$ 时，Bob 各天线接收信号为

$$\boldsymbol{r}_j(t)=\boldsymbol{h}_j s(t)=\boldsymbol{h}_j A_s e^{j(\omega_0 t+\theta_s)} \tag{8}$$

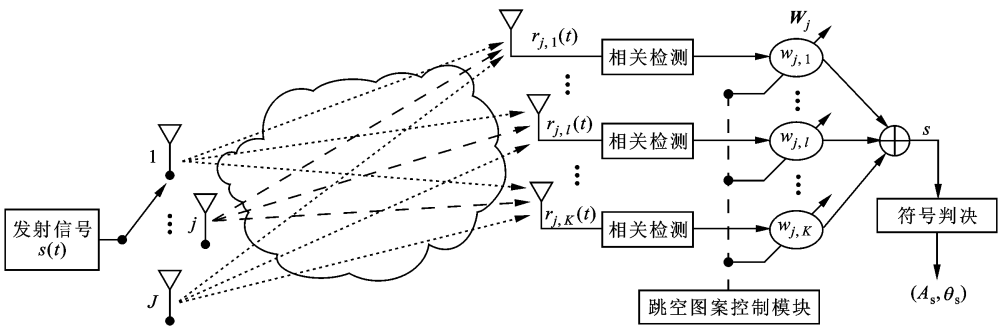
接收数据与 Bob 端参考信号 $\exp(j\omega_0 t)$ 做相关得

$$\boldsymbol{\xi}=\langle \boldsymbol{r}_j(t),e^{j\omega_0 t}\rangle=\frac{1}{QT}\int_0^{QT}\boldsymbol{r}_j(t)e^{-j\omega_0 t}dt=\boldsymbol{h}_j A_s e^{j\theta_s} \tag{9}$$

加权合并恢复信号为

$$y=\boldsymbol{W}_j\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{W}_j\boldsymbol{h}_j A_s e^{j\theta_s}=A_s e^{j\theta_s} \tag{10}$$

不难验证，反向训练得到的权值与文献[3]中正向训练的权值在无噪声情况下是相同的，反向训练



$w_{j,k}(j=1,2,\cdots,J;k=1,2,\cdots,K)$：第 j 根发射天线到第 k 根接收天线的权值

图 4　0/1 式跳空方案传输模型

同正向训练一样，不仅可以正确解调信息，也可以得到规整的星座图(A_s,θ_s)。

3 反向训练技术实现安全通信的原因及时空谱的论述

众所周知，跳频需要有跳频图案，通信双方必须严格按照跳频图案收发信号，才能正确传输信息。但是，侦听方一旦窃取跳频图案，便可进行侦听，究其原因，跳频图案是跳频技术唯一的密码本，其与无线信道无关，窃取唯一密钥便可解密，通信的安全性根本无法得到保证。

跳空机制与跳频存在本质区别，它依靠跳空图案和接收权值图案，并结合收发间的无线信道这 3 项内容共同作用保证安全通信。其中，无线信道是无线安全通信的关键，不同用户间的无线信道存在差异性，0/1 式跳空反向训练技术正是利用了无线信道的空域个性特征来保证通信安全的。图 5 描述了反向训练模式下的 0/1 式跳空技术对抗侦听方侦听的原理。

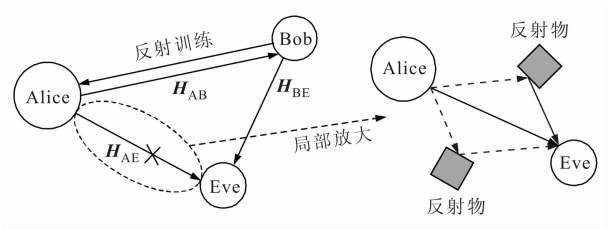


图 5 反向训练 0/1 式跳空技术对抗侦听方原理图

一方面，由于采用反向训练，侦听方 Eve 只能训练得到其与目标用户 Bob 间的信道 $\boldsymbol{H}_{BE}$，而无法获得其与发射方 Alice 间的信道 $\boldsymbol{H}_{AE}$，即便截获了 Alice 反馈给 Bob 的权值，由于信道的差异性，该权值与信道 $\boldsymbol{H}_{AE}$ 是不匹配的，因此不能用于正确解调；另一方面，Alice 实际上借鉴了“一次一密”的思想，采取快速切换发射天线的形式，使信道 $\boldsymbol{H}_{AE}$ 随着时间快速变化，即使出现 Eve 某次碰巧正确解调的情况，这种偶然性对于天线快速切换的跳空机制是毫无意义的，并且快速切换天线也提高了通信的扩空增益。图 5 左边大大简化了信道拓扑结构，实际由于反射物等影响，信道拓扑结构非常复杂，Alice、Bob 和 Eve 这 3 方不是简单的三角形结构，如右边局部放大所示，存在多条路径。Eve 在获取信道 $\boldsymbol{H}_{AB}$ 和 $\boldsymbol{H}_{BE}$ 的前提下，试图通过模拟拓扑结构，利用三角形关系求解信道 $\boldsymbol{H}_{AE}$ 的想法是不切实际的。可见，该反向训练技术对于防侦听是相当有效的。

0/1 式跳空反向训练技术完全可以公开跳空图案和接收权值图案，即便如此，由于无线信道这一关键因素，信息也不会被截获，这正体现了该技术在安全性能上要远优于传统的跳频技术。

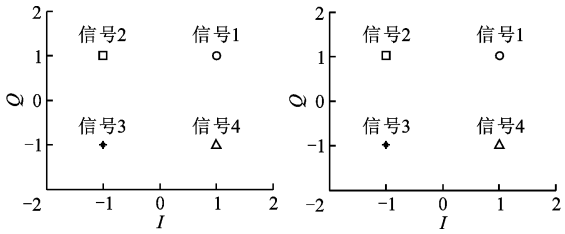
跳空技术和常规波束形成技术有所不同。波束形成技术在目标用户所在方向上形成波束，使该方向上的信号同相增强，若侦听方也在同一方向上，则同样处于波束范围内，信息将被截获；跳空技术无需形成波束，无需知道收发天线的阵列流型，它利用不同用户处于不同的空间位置这一基本特征，希望只在目标用户所在位置处将各路接收信号加权实现同相叠加并正确解调，而侦听方无法实现这点。目前，很多无线通信研究中，其信道模型并没有涉及空谱的概念[7-9]。文献[10]认为空谱是无线信号在空间传输时，其能量在空域的分布。不同空间位置的信号空谱是不同的，其分布不仅与收发天线的空间位置有关，更与收发天线间的反射物等复杂环境条件密切相关，可以将其视为空间维度的条件谱密度。这样一来，常规的波束形成技术将发射端各天线加权形成波束，其实是将信号的空谱信息平均化了，也即看到的实际上只是信号的边缘谱，其自由度已经大大降低了。0/1 式跳空技术则不同，它利用条件谱的谱信息远比边缘谱丰富这一特性，通过快速切换天线，不仅扩展了信号的空谱资源，而且使信号的空谱随时间快速变化，因为增加了时间这一维度，称之为时空谱，这是一种谱信息更为丰富的条件谱，表明收发用户间的信道随着时空条件而改变。0/1 式跳空技术正是充分利用了信号的时空谱资源，既保证目标用户正确接收，又防止信息被侦听方截获，从而实现了安全保密通信。

3 仿真实验和分析

下面仿真验证了反向训练模式下的 0/1 式跳空技术对目标用户接收的可行性及其安全性能。

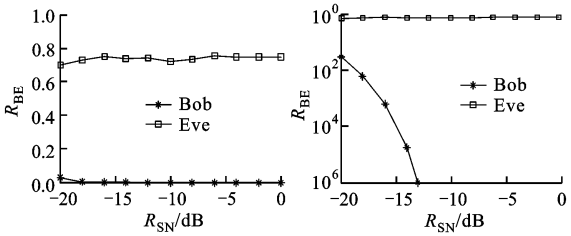
实验 1 反向训练技术对目标用户接收的可行性。仿真中，发射方 Alice 和目标用户 Bob 均配置 4 天线，阵元间距大于一个波长。Alice 与 Bob 间随机设置反射点，且满足各路径时延差不超过 20 个载波周期，接收端采用 4 倍过采样。仿真中发送 QPSK 符号，比较在相同信道场景的情况下，正反向训练技术的信息解调情况。图 6 给出了在理想情况，即没有噪声时，正反向训练的解调结果。

从图中可以看到，理想情况下，正反向训练都能解调得到规整的星座图，因为此时两者都可以训练



(a)正向训练　　(b)反向训练

图 6　理想情况下正反向训练解调结果

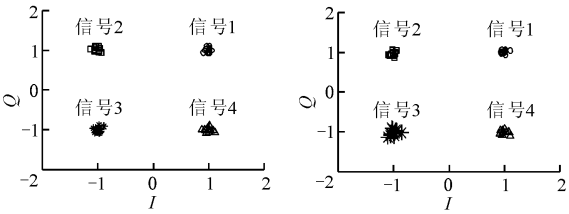


(a)线性坐标　　(b)对数坐标

图 9　反向训练技术的安全性曲线

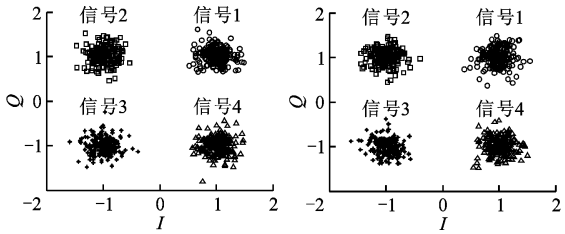
得到真实的信道信息，得到的接收权值是相同的，所以解调结果一致正确。

图 7、图 8 分别给出了信噪比为 −10 dB 和 −20 dB时的解调结果，可见，随着噪声增加，星座图的汇聚程度减弱，但即便在 −20 dB的信噪比下，目标用户仍可以通过训练加权有效地恢复原始信息。



(a)正向训练　　(b)反向训练

图 7　信噪比为 −10 dB 下正反向训练解调结果



(a)正向训练　　(b)反向训练

图 8　信噪比为 −20 dB 下正反向训练解调结果

实验表明对于目标接收，反向训练可以达到和正向训练同等的解调性能，从而验证了 0/1 式跳空反向训练技术对于目标通信的可行性。

实验 2　反向训练技术的安全性能分析。本实验仿真了在侦听方 Eve 通过某种途径窃取了跳空图案，甚至截获了发射方 Alice 反馈给目标用户 Bob 的权值的情况下的解调性能，并与 Bob 端接收性能做对比。Alice、Bob 和 Eve 均配置了 4 根天线，Eve 的天线安置在距 Bob 的天线 1/6 波长范围内。实验结果如图 9 所示。

从图 9 可以看到，Eve 的误符号率随着信噪比增加没有降低，而是逐渐维持恒定，而且高达 0.75，这正如凭空猜测 QPSK 符号也有 0.25 的正确概率，如此高的误符号率，Eve 根本无法侦听。这种现象与噪声无关，本质原因是 Eve 和 Bob 两者与Alice 之间的信道差异，即便 Eve 截获权值，也是与信道不匹配的，无法用于恢复原始信号。从对数坐标图可以清楚地看到，Bob 在 −13 dB 信噪比下可达到 1×10^{-6}的误符号率指标，而侦听方根本无法破解这种反向训练模式，该实验充分验证了 0/1 式跳空反向训练技术极其优越的安全性能。

4　结　论

本文在 0/1 式跳空正向训练模式的基础上，为了防止跳空图案泄露使侦听方侦听成为可能的情况发生，提出了权值反馈型反向训练技术，并通过理论分析和实验仿真验证了该技术的可行性和优越的安全性能。0/1 式跳空反向训练技术通过发射方Alice 快速切换天线，使无线信道随着时间快速变换，大大扩展了信号的时空谱资源，既保证了目标用户 Bob 按照跳空图案正确接收信息，又使得侦听方 Eve 无法截获信息，即便在无噪声情况下，Eve 也无法侦听，说明这种现象与噪声无关，其本质原因是无线信道的差异性。0/1 式跳空反向训练技术完全可以在公开跳空图案的情况下依然实现安全通信，从这一点而言，它对于传统密码学和跳频技术是个很大的突破，它从根源上去解决无线信道开放性导致的安全问题，直接在物理层实现无线安全通信。在频谱资源极度紧张的今天，跳空技术的研究无疑是非常有意义的。

参考文献：

[1]　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

(下转第 11 页)