

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.09.006

引用格式:郭鹏程,姚富强,关胜勇,等.天线映射规则伪随机变化的新型空移键控系统[J].电讯技术,2015,55(9):978-983.[GUO Pengcheng, YAO Fuqiang, GUAN Shengyong, et al. A New Space Shift Keying System Based on Pseudo-random Antenna Mapping Rule[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(9):978-983.]

# 天线映射规则伪随机变化的新型空移键控系统\*

郭鹏程<sup>1</sup>,姚富强<sup>2</sup>,关胜勇<sup>2,\*\*</sup>,张超<sup>3</sup>

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471001; 2. 南京电讯技术研究所, 南京 210007;  
3. 第二炮兵指挥学院 通信系, 武汉 430012)

**摘要:**在传统的空移键控技术基础上,对天线映射规则进行伪随机改变,旨在探索一种新的抗截获通信方式。重点分析了所提方案的实现原理及天线映射结构,并计算了其误码率联合上界;接收端采用最大似然算法,确保了天线位置序号能被正确检测。性能仿真表明,该方案的传输性能取决于发送与接收天线数目,而与所选取天线映射规则的个数无关。最后,从窃听方破译天线序列复杂性的角度出发,证明了系统具有很好的反侦察、抗截获性能。

**关键词:**空移键控;抗截获通信;最大似然算法;天线映射规则;伪随机变化

**中图分类号:**TN918 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)09-0978-06

## A New Space Shift Keying System Based on Pseudo-random Antenna Mapping Rule

GUO Pengcheng<sup>1</sup>, YAO Fuqiang<sup>2</sup>, GUAN Shengyong<sup>2</sup>, ZHANG Chao<sup>3</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471001, China;  
2. Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China;  
3. Communication Department, The Second Artillery Command College, Wuhan 430012, China)

**Abstract:** Based on the traditional Space Shift Keying (SSK) technology, this paper changes the antenna mapping rule pseudo-randomly in order to explore a new anti-interception communication way. The principle of the proposed scheme and antenna mapping structure are emphatically analyzed, and the upper bounds of bit error rate (BER) of the proposed scheme are calculated. The Maximum-Likelihood (ML) algorithm adopted by the receiver ensures that the antenna position can be detected correctly. Performance simulation shows the transmission performance depends on the numbers of sending and receiving antennas, and has nothing to do with the numbers of selected antenna mapping rules. Finally, it is proved that the system has good counter-reconnaissance and anti-interception performance from the aspect of complexity of eavesdroppers deciphering antenna sequences.

**Key words:** space shift keying; anti-interception communication; maximum-likelihood algorithm; antenna mapping rule; pseudo-random change

### 1 引言

在现代信息化战争的背景下,制电磁频谱权在军用通信中占据着越来越重要的地位。由于电磁空

间的开放性,通信信号容易被侦察和截获,军用通信的隐蔽性与安全性面临巨大隐患。基于此现状,本文探索实现一种具备在空域上反侦察、抗截获能力

\* 收稿日期:2015-01-19;修回日期:2015-06-03 Received date:2015-01-19;Revised date:2015-06-03

\*\* 通讯作者:kaka\_pc@163.com Corresponding author:kaka\_pc@163.com

的通信方式。

现有的反侦察、抗截获手段主要集中在时频域,如通信加密、直扩通信<sup>[1]</sup>等技术,而对空域上探索较少。空间调制(Spatial Modulation, SM)<sup>[2-3]</sup>是一种利用空间信道差异传输的通信方式,如果采用与伪随机跳频相类似的方法实现空间信道的伪随机变化,形成空间跳变序列,在一定程度上能够保证通信的隐蔽性与保密性,实现安全通信。

空移键控技术(Space Shift Keying, SSK)<sup>[4]</sup>与空间调制近年来发展迅速,通过发送天线序号携带部分信息,可以解决多输入多输出(Multiple-input Multiple-output, MIMO)系统中信道间干扰与天线同步等问题,增加系统的频谱利用率。在 SM 中,发送端将一组待发送信息分为两部分,一部分进行传统的数据调制,如 PSK、QAM 等;另一部分通过固定的天线映射规则选择相应的发送天线,天线序号也承载了部分发送信息。SM 是基于信道差异传输的通信方式,不同空间信道的差异性对应天线序号之间的区分程度,这是 SM 存在的基础。而 SSK 在 SM 基础上取消了传统数字调制解调环节,将所有发送信息映射到天线序列上,具有比 SM 更低的系统复杂度<sup>[4]</sup>。

在 SSK 基础上,本文基于伪随机天线映射提出了一种新型空移键控系统,为了方便比较分析,称之为 ASSK。该系统一方面通过天线映射传递信息,保证了信号的可传输性;另一方面通过伪随机地改变 SSK 天线映射规则,形成类似常规跳频系统中“跳频图案”的天线跳变图案,通信双方利用约定好的天线跳变图案完成信号的调制与解调。但在信号传输上又与跳频通信具有很大的区别:跳频通信的出发点在于利用射频频率在跳频图案内的跳变来躲避干扰,信号仍是通过常规调制传输,只是载波频率的变化;而 ASSK 是基于 SSK 的传输方式,与 SSK 相同,发送端只是发送用来标记天线序号的脉冲符号,因此,可以说信息本身蕴含在天线跳变图案中,这种天线跳变图案可以看作是一种通信加密的手段,使窃听方难以破译天线序列所携带信息,从而提高系统的抗截获能力。

此外,ASSK 利用了伪随机的天线跳变来传输信息,不同的天线选择意味着不同的无线空间信道,如果空间信道分布在宽广的空间范围,通过大范围快速切换传输信道,让窃听方难以发现通信正在使用的空间信道,这样可以保证系统的反侦察能力。

## 2 ASSK 原理

ASSK 利用丰富的空间信道进行通信,如图 1 所示,发送方 A 在不同时刻按照与接收方 B 约定好的天线跳变图案选择发射天线,每次天线选择后,收发双方之间会形成不同的无线空间信道。由于双方共享天线跳变图案,可以及时有效地通信,而窃听方 E 难以实时侦察空间信道变化,同时难以破译复杂的空间信道跳变规律。

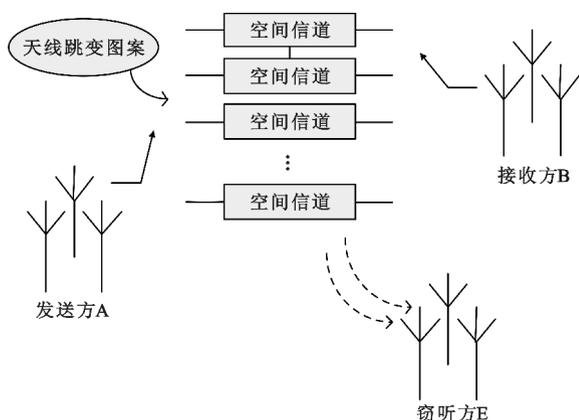


图 1 ASSK 通信原理示意图  
Fig. 1 Principle diagram of ASSK

图 2 为 ASSK 的系统模型,其核心思想在于天线序列映射结构的变化。在 SSK 中,发送信息经过天线映射规则选择相应的发送天线,其天线映射规则是固定的,即发送信息经过 SSK 映射后得到的天线序列是唯一的, $M$  维 SSK 映射可以表示的有效信息位为  $\log_2(M)$ ,此时发送天线数  $N_t$  须满足  $N_t = M$ 。而在 ASSK 中,发送比特流  $s$  首先进行天线调制,调制规则是伪随机变化的 SSK 映射,即通过伪随机序列来控制 SSK 映射方式的改变,对于固定的发送信息,经过 ASSK 调制后,得到的天线序列不是唯一的,由相应的伪随机序列决定。

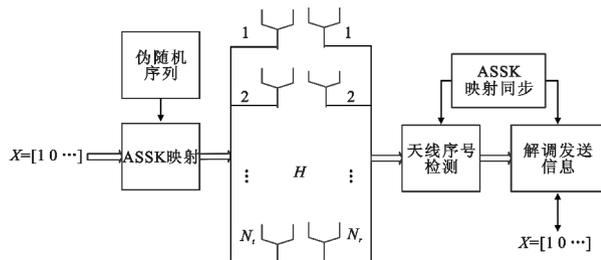


图 2 ASSK 系统模型  
Fig. 2 System model of ASSK

当发送天线数目一定时,SSK 映射规则可以有多种。举例说明,表 1 为频带利用率为  $2 \text{ b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$  以及 4 根发送天线下两种不同的 SSK

映射规则,天线组每秒只需进行一次天线切换就可以传输2 b信息,这样使得天线的驻留时间得到控制。不同天线位置序号代表不同的信息, $X$ 表示发送端4根天线状态。不难发现,发送比特与天线序号之间可以存在很多的对应关系,如当 $N_t=4$ 时,根据排列组合知识,共有 $A_4^4=24$ 种映射规则,且 $N_t$ 越大对应有的映射规则数 $L$ 越多。在所有天线映射规则中选取一定数目的映射,通过伪随机地控制其出现的顺序就形成了ASSK调制,因此,ASSK映射规则的大小由SSK映射及伪随机序列的选取决定。

表1 不同SSK映射规则  
Table 1 Different mapping rules of SSK

发送比特	天线序号	$X=[x_1 \cdots x_4]$	发送比特	天线序号	$X=[x_1 \cdots x_4]$
00	1	$[1\ 0\ 0\ 0]^T$	10	1	$[1\ 0\ 0\ 0]^T$
01	2	$[0\ 1\ 0\ 0]^T$	11	2	$[0\ 1\ 0\ 0]^T$
11	3	$[0\ 0\ 1\ 0]^T$	01	3	$[0\ 0\ 1\ 0]^T$
10	4	$[0\ 0\ 0\ 1]^T$	00	4	$[0\ 0\ 0\ 1]^T$

本文主要采用多进制 $m$ 序列<sup>[5]</sup>来控制天线映射的伪随机变化。与SSK相比,ASSK最大的区别在于发送端天线映射方式的变化。SSK映射是固定的映射模式,每根发送天线固定对应一定的发送信息,而在ASSK映射中,天线序号与发送信息不再是一一对应关系,而是由伪随机序列控制映射规则的变化。相应地,在接收端,ASSK相比于SSK增加了伪随机序列同步,需要收发双方同步天线映射规则才能保证天线序号能正常解调。

信息序列进入ASSK后,发送符号矢量可表达为矢量形式: $x_\ell = [0 \cdots 0 \cdots \underset{\ell_{th}}{1} \cdots 0]$ ,"1"所处的位置代表被激活的天线位置 $\ell$ ,"0"表示天线静默,说明每个时刻只有一根天线处于激活状态,被激活的天线尽管发送的符号不包含信息,只是显示处于工作状态的发送天线的位置索引。

无线信道为 $\mathbf{H}$ , $\mathbf{H}$ 是一个 $N_r \times N_t$ 复数矩阵,矩阵中元素代表相应发送天线到接收天线的信道增益。经过调制的信号进入无线信道 $\mathbf{H}$ ,接收端信号为<sup>[6]</sup>

$$y = \sqrt{\rho} \mathbf{H}x + \eta. \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为每根接收天线的平均信噪比(SNR), $\eta$ 为在加性高斯白噪声(AWGN)信道条件下 $N_r$ 维噪声信号,满足复高斯分布 $CN(0,1)$ 。

在通信开始前,接收方需要获取控制SSK映射的 $m$ 序列,同步天线跳变图案,才能正确实现信号解调,而正确的天线检测是恢复发送信息的前提。

### 3 检测算法及复杂度分析

在SM中,部分发送信息由激活的天线序号携带,经过无线信道传输时,由于天线阵列中不同天线位置的差异以及无线链路中环境因素的互相作用,不同天线传输信号时会经历不同的信道传输条件,而相同的调制符号由不同的天线传输时,信道脉冲响应是彼此信道相互区分的标准。此时,信道脉冲响应属于发送信息的一部分,这种信道的特征响应可以称作“信道指纹”<sup>[6]</sup>,不同天线对应的“信道指纹”差异越大,接收端天线检测会越容易。

同SM一样,在SSK中,不同发送天线所对应无线信道之间的差异对信号恢复尤为重要。此外,区别于SM,由于SSK只是发送脉冲符号,而取消了数据调制,因此发送脉冲波形的设计也可以优化传输,使接收端更容易检测到天线位置序号。

由于ASSK天线序号检测与SSK相似,本文采用最大似然译码算法(ML)<sup>[7]</sup>。记传输符号为 $x$ ,天线预测序号为 $\hat{\ell}$ ,则

$$\hat{\ell} = \underset{\ell}{\operatorname{argmax}} \rho_Y(y|x, H) = \underset{\ell}{\operatorname{argmin}} \|y - \sqrt{\rho} h_\ell\|_F^2 = \underset{\ell}{\operatorname{argmax}} \operatorname{Re} \left\{ \left( y - \frac{\sqrt{\rho}}{2} h_\ell \right)^H h_\ell \right\}. \quad (2)$$

式中, $1 \leq \ell \leq N_t$ ,

$$\rho_Y(y|x, H) = \frac{\exp(-\|y - \sqrt{\rho} \mathbf{H}x_\ell\|_F^2)}{\pi^{N_t}}. \quad (3)$$

式中, $\|\cdot\|_F^2$ 表示F范数平方,是指其中所有元素的平方和。从式(3)可以看出,信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的每一列都可以看成一个随机星座点,将发送天线组分成不同的组合。最大似然检测是通过遍历发射天线,从所有天线位置中找出与接收向量之间欧式距离最小的一组数据,从而确定发送天线位置。

在天线序号检测后,需要解调出发送信息。由于发送端对映射规则进行伪随机控制,天线序号与信息不再是一一对应关系。因此,在ASSK中,接收端需要获取控制SSK映射的伪随机序列并与发送端同步,准确同步是信号正确解调的前提。

在信息解调上,ASSK相对于SSK,除了进行天线位置序号检测外,增加了伪随机序列的同步,因此解调复杂度上会有一定增加。为了比较ASSK与SSK的解调复杂度,从复数乘法和复数加法整体进行分析。从复数乘法的角度出发,ASSK与SSK具有相同的运算量,由式(3)可知,

$$\delta_{\text{ASSK}} = \delta_{\text{SSK}} = N_r M. \quad (4)$$

式中,  $N_r$  表示接收天线数目,  $M$  表示 SSK 调制星座, 数值上等于发送天线数目  $N_t$ 。考虑复数加法, SSK 的运算量为<sup>[4]</sup>

$$\zeta_{SSK} = 2N_r M - M + 1. \quad (5)$$

而对 ASSK 系统, 天线位置序号与发送信息不再是一一对应关系, 是通过伪随机序列来控制天线映射规则, 对于接收端检测出的每个天线序号, 每次解调时都需要遍历所有的天线映射规则, 通过同步的伪随机序列找到当前时刻采用的天线映射规则, 因此, 复数加法运算量可以表示为

$$\zeta_{ASSK} = 2N_r M - M + L. \quad (6)$$

式中,  $L$  表示 ASSK 中选取 SSK 映射的数目。可以看出, ASSK 较 SSK 复杂度增加了  $(L-1)$ , 通过增加复杂度来换取系统的抗截获性能。

## 4 性能分析

### 4.1 误比特性能推导

对于 ASSK 系统, 收发双方需要同步天线跳变图案, 区别于直扩通信中伪码同步, 天线跳变图案的同步不是表现在发送码片序列中, 而是隐藏在天线映射之中, 控制发送天线的选择及接收天线的信息恢复。通信开始前, 可由发送方向接收方发送训练序列进行天线跳变图案的同步, 因此在对 ASSK 的误比特率进行分析时, 可以假设收发双方能在时间上完全同步。

接收端信息解调分为两步: 一是天线位置序号检测, 二是根据天线跳变图案恢复信息序列。分析其误比特率时, 天线检测环节出现差错概率为  $P_a$ , 信息恢复过程出错概率为  $P_b$ , 则 ASSK 的误比特率可以表示为

$$P_{ASSK} = 1 - (1 - P_a)(1 - P_b) = P_a + P_b - P_a P_b. \quad (7)$$

SSK 调制误比特率上界<sup>[8]</sup>可以表示为

$$P_{SSK} \leq \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{\hat{j}=j+1}^{N_t} \frac{2N(j, \hat{j})}{N_t} P(x_j \rightarrow x_{\hat{j}}). \quad (8)$$

式中,  $P(x_j \rightarrow x_{\hat{j}})$  表示发送信号  $x_j$  被判决成  $x_{\hat{j}}$  的成对错误概率,  $N(j, \hat{j})$  表示发送信号  $x_j$  与判决信号  $x_{\hat{j}}$  所对应比特信息之间的汉明距离。

SSK 只有一种映射规则, 在  $x_j$  与  $x_{\hat{j}}$  确定的情况下  $N(j, \hat{j})$  基本为定值; 而在 ASSK 中, 天线映射规则随时在变化, 因此  $N(j, \hat{j})$  也是个变量。由于式(8)中  $P_{SSK}$  上界的计算遍历了  $N_t$  内所有可能的情况, 此时可以认为  $P_a = P_{SSK}$ 。

由式(2), 考虑信道矩阵  $\mathbf{H}$ , 此时成对错误概率

可以表示为

$$P(x_j \rightarrow x_{\hat{j}} | \mathbf{H}) = Q\left(\sqrt{\frac{\rho}{2}} \|h_j - h_{\hat{j}}\|_F^2\right). \quad (9)$$

从上式中可以看出, 信道矩阵  $\mathbf{H}$  对信号传输的影响主要体现在列向量之间的欧式距离上。令  $\lambda = \frac{\rho}{2} \|h_j - h_{\hat{j}}\|_F^2$ , 随机变量  $\lambda$  满足  $\chi^2$  分布, 即<sup>[8]</sup>

$$P_\lambda(v) = v^{N_r-1} \exp(-v/\rho) / (\rho^{N_r} \Gamma(N_r)), v > 0, \quad (10)$$

此时,

$$P(x_j \rightarrow x_{\hat{j}}) = \int_{v=0}^{\infty} Q(\sqrt{v}) P_\lambda(v) dv. \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)并化简<sup>[8]</sup>, 得

$$P(x_j \rightarrow x_{\hat{j}}) = \gamma^{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+k}{k} [1-\gamma]^k. \quad (12)$$

式中,  $\gamma = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\rho}{2+\rho}}\right)$ 。将式(12)代入式(8), 可得

$$P_a \leq \frac{N_t \gamma^{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+k}{k} [1-\gamma]^k}{N_t}. \quad (13)$$

式中,  $N' = \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{\hat{j}=j+1}^{N_t} 2N(j, \hat{j})$ 。

再来考虑信息恢复过程的出错概率  $P_b$ 。ASSK 与 SSK 的区别在于天线序号与信息比特对应关系的差异。在 SSK 解映射中, 每个天线位置只对应一种信息, 属于一一映射, 如表 1, 2 号天线对应信息 [0 1]。而在 ASSK 中, 根据天线跳变图案, 不同时刻下天线序号可能对应不同的信息比特。因此, 在考虑其出错概率时, 将天线跳变图案看作映射  $f, f$  作用在天线检测序号  $\ell$  上, 输出为信息比特  $s$ , 此时  $s = f(\ell, t)$ , 反映在 ASSK 解映射中如图 3 所示。

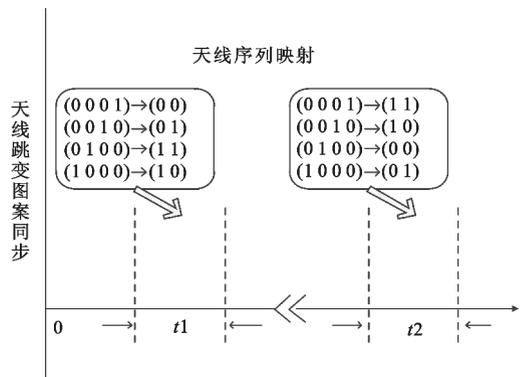


图 3 ASSK 解映射示意图

Fig. 3 Demapping diagram of ASSK

图 3 中, 通信开始前收发双方同步天线跳变图案, 解调开始时刻 0, 可以看出,  $t_1$  和  $t_2$  时刻分别对

应不同的解映射规则,这种对应关系由天线跳变图案来决定,与前后天线序号无关。在确定时刻  $t$ , 天线状态与信息比特仍为一一映射关系,因此  $P_b \approx 0$ , 代入式(7),则

$$P_{\text{ASSK}} = P_a \leq \frac{N' \gamma^{N_r N_r - 1}}{N_i} \sum_{k=0}^{N_r - 1 + k} \binom{N_r - 1 + k}{k} [1 - \gamma]^k. \quad (14)$$

#### 4.2 仿真结果分析

ASSK 是一种天线映射规则伪随机变化的空移键控系统,而 SSK 可以看作是 ASSK 在  $L=1$  时的传输模式。在 SSK 中,不同发送天线与接收天线的数目会对其误码性能产生很大的影响。在 ASSK 中,将通过仿真来分析影响其基本传输性能的主要因素。假设接收端已知信道状态信息,并能正确同步  $m$  序列。

仿真条件: AWGN 信道, 仿真点数  $\text{num} = 131\ 072$ , 接收天线数目  $N_r = 4$ ,  $m$  序列控制 SSK 映射选择, 总映射数目应小于  $\text{num}$ , 取 12 级, 序列长度为  $s = 4095$ 。映射规则数目  $L$  与发送天线数目  $N_i$  存在一定的约束关系:  $L \leq A_{N_i}^{N_i}$ , 为了保证天线选择的随机性, 当  $N_i = 2$  时, 取  $L = 2$ ; 当  $N_i = 4$  时, 取  $L = 2$  和  $L = 4$ ; 当  $N_i = 8$  时, 取  $L = 4$  和  $L = 8$ 。不同发送天线数目  $N_i$  与  $L$  下 ASSK 的误码性能曲线如图 4 所示。

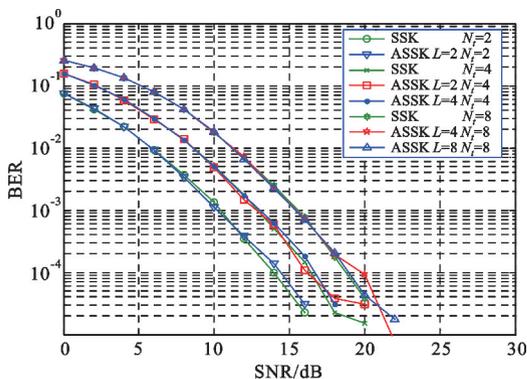


图 4 不同  $L$  时 ASSK 性能比较

Fig. 4 Basic transmission performance of ASSK

由图 4 可以看出: 相同的接收天线数目  $N_r$  下, ASSK 的性能基本取决于发送天线数  $N_i$ ,  $N_i$  越小传输性能越好; 当发送天线数  $N_i$  与接收天线  $N_r$  均相同时, 不同  $L$  下的 ASSK 与 SSK 误码率曲线接近, 说明 ASSK 传输性能与选取 SSK 映射规则的数目  $L$  无关, 主要受发送天线与接收天线相对数目影响。ASSK 系统在保证可传输性的同时, 目的是提高通信的隐藏性与保密性, 增加天线序列破译难度, 提高系统反侦察、抗截获能力。

## 5 ASSK 抗截获性能

ASSK 的设计主要目的是使窃听方侦察及截获发送信息付出很大的代价。本节将从破译天线序列携带信息的复杂性出发, 分析系统具有的反侦察、抗截获能力。

窃听方试图识别天线序列映射规则, 以便借助直接的天线跳变图案破译后续的信息, 这里将破译复杂性作为衡量 ASSK 抗截获能力的一个方面。在破译过程中, 假定窃听方已知除了特定天线跳变图案外的有关天线序号的一切信息, 分析复杂性属于密码学中的计算问题, 即从可行解集中搜索出最优解。在计算复杂性分析上, 由于无法知道窃听方破译天线序列所采取的计算算法, 且 ASSK 天线序列复杂性更多取决于 SSK 天线映射的选取, 而并非完全基于  $m$  序列的构造, 因此, 文中并未从线性非线性角度出发, 只是考虑 ASSK 天线序列解调过程中所有可能存在的情况, 并将其作为破译运算量进行比较分析。

由于 ASSK 映射中存在  $m$  序列以及选取 SSK 映射的随机性, 窃听方难以把握 ASSK 中天线跳变的统计规律。在通信过程中, 窃听方需要获取一段足够长的天线序列  $s'$  作为输入, 输入长度必须大于  $m$  序列的长度  $s$ , 同时对截获的天线序列尝试所有可能的天线跳变图案。考虑算法的时间复杂性, SSK 为 ASSK 在  $L=1$  时候的特例, 当发送天线数目为  $N_i$ , 对应 SSK 映射数目为  $g = A_{N_i}^{N_i}$ , 表示  $N_i$  的全排列。窃听方需要将天线序列  $s'$  遍历完所有映射才能破译信息, 此时, 破译 SSK 的运算量为

$$T = s' A_{N_i}^{N_i}. \quad (15)$$

由于发送天线数有限且易得到, 可以认为发送天线数目  $N_i$  已知。ASSK 调制存在两个变量:  $m$  序列级数  $n$  和选取的 SSK 映射数  $L$ , 若将两变量整体看作一个新的 SSK 映射进行破译, 此时存在的可能性太多导致无法破译, 因此需要分别考虑这两个变量, 对其组合的所有可能性进行试译。

$m$  序列长度为  $s = 2^n - 1$ , 已知级数  $n$  时, 可能存在的  $m$  序列个数设为  $A(n)$ 。  $A(n)$  的取值与级数  $n$ 、寄存器初值以及寄存器的连接方式均有关, 近似有  $A(n) = 2^{2n}$ 。此时, 破译 ASSK 所需要的运算量为

$$T' = \sum \sum A(n) A_g^L s', 1 \leq L \leq g. \quad (16)$$

式中,  $g = A_{N_i}^{N_i}$ ,  $g$  可以当作常量,  $A_g^L$  为所有 SSK 映射  $g$  中选取  $L$  的排列。通过对比式(15)和式(16)可以看出, ASSK 相比于 SSK, 在破译运算量上会大大增

加,窃听方破译发送信息会付出很大的代价,因此,一定程度上可以说明 ASSK 系统具有很好的反侦察、抗截获性能。同时,天线跳变图案是通过伪随机序列来控制 ASSK 映射规则,跳变图案越复杂,系统随机性越强,窃听方就越难以截获发送信息。ASSK 的设计注重信号传输的隐蔽性与安全性,在实际中考虑将天线分布在宽广的空间范围上,以增加接收端天线序号检测准确率及躲避干扰,因此采用全向天线更能保证信息的发送与接收。

天线跳变图案是通过伪随机序列来控制 SSK 映射规则,跳变图案越复杂,系统随机性越强,窃听方就越难以截获发送信息。文中采用的  $m$  序列作为一种构造序列,也可以有其他实现,如 Gold 序列、混沌序列等。此外,还可以节约天线资源,并进一步增强抗截获能力。

## 6 结束语

本文提出了一种天线映射规则伪随机变化的空移键控系统 (ASSK),通过天线跳变图案发送信息。仿真表明,天线跳变图案不会对系统的基本传输性能造成影响。由于收发双方共享天线跳变图案,可以保证发送信息的正常接收,而窃听方不知道天线变化规律,难以侦察及截获发送信息。从窃听方破译天线序列携带信息的复杂度出发,证明了 ASSK 具有很好的反侦察、抗截获性能。以广义空移键控 (GSSK) 映射伪随机变化的形式来构造 ASSK,是下一步需要研究的问题。

## 参考文献:

- [1] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践 [M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2012.  
YAO Fuqiang. Communication Anti-jamming Engineering and Practice [M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2012. (in Chinese)
- [2] Mesleh R,Haas H,Ahn C W,et al. Spatial Modulation-OFDM[C]//Proceedings of 11th International OFDM-Workshop(InOw'06). Hamburg, Germany:IEEE,2006:288-292.
- [3] Mesleh R,Haas H,Sinanovic S,et al. Spatial Modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2008,57(4):2228-2241.
- [4] Jeganathan J,Ghrayeb A,Szczecinski L,et al. Space Shift Keying Modulation for MIMO Channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication,2009,8(7):3692-3703.
- [5] 高强,闫华,方舟. 基于移位寄存器的多进制扩频序列研究[J]. 信息通信,2012,122(6):8-10.

GAO Qiang,YAN Hua,FANG Zhou. Spread Spectrum Sequence Research of Multi-band Based on Shift Register [J]. Information & Communication,2012,122(6):8-10. (in Chinese)

- [6] Renzo M D. Spatial Modulation for Generalized MIMO: Challenges, Opportunities, and Implementation [J]. Proceedings of the IEEE,2014,102(1):56-103.
- [7] Jeganathan J,Ghrayeb A,Szczecinski L. Spatial Modulation: Optimal Detection and Performance Analysis [J]. IEEE Communication Letters,2008,12(8):545-547.
- [8] Renzo M D,Leonardis D,Graziosi F,et al. Space Shift Keying(SSK) MIMO with Practical Channel Estimates [J]. IEEE Transactions on Communications,2012,60(4):998-1012.
- [9] 薛睿,魏强,徐锡超. 混沌序列测码性能研究[J]. 西安电子科技大学学报,2014,42(3):114-120.  
XUE Rui,WEI Qiang,XU Xichao. Performance research on raming codes based on the chaotic sequence[J]. Journal of Xidian University,2014,42(3):114-12. (in Chinese)

## 作者简介:



郭鹏程(1991—),男,河南济源人,2015 年获硕士学位,主要研究方向为无线通信抗干扰与编码调制;

GUO Pengcheng was born in Jiyuan,Henan Province,in 1991. He received the M. S. degree in 2015. His research concerns wireless communication anti-jamming and code modulation.

姚富强(1957—),男,安徽枞阳人,分别于 1990 年和 1993 年获西安电子科技大学工学硕士学位和博士学位,现为研究员、博士生导师,主要研究方向为宽带通信系统、高可靠性通信技术、频谱管理等;

YAO Fuqiang was born in Zongyang, Anhui Province, in 1957. He received the M. S. degree and the Ph. D. degree from Xidian University in 1990 and 1993, respectively. He is now a senior engineer of professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns broadband communication systems, high reliability communication theory and techniques, spectrum management techniques, etc.

关胜勇(1967—),男,安徽合肥人,博士,高级工程师,主要研究方向为纠错编码、通信抗干扰与信号处理;

GUAN Shengyong was born in Hefei, Anhui Province, in 1967. He is now a senior engineer with the Ph. D. degree. His research concerns error correcting coding, communication anti-jamming and signal processing.

Email:kaka\_pc@163.com

张超(1977—),女,河北唐山人,硕士,现为讲师,主要研究方向为军事信息学。

ZHANG Chao was born in Tangshan, Hebei Province, in 1977. She is now a lecturer with the M. S. degree. Her research concerns military informatics.