

一种基于天线虚拟运动的跳空扩频调制方法

洪涛 宋茂忠

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要: 为了加强无线通信物理层的传输安全, 提出了一种基于天线虚拟运动的跳空扩频调制信号, 采用天线的切换发射仿真天线运动, 并且天线的切换方式由扩频码控制。利用天线开关函数产生的谐波分量构成一个空间扩频信号, 这样发射的扩频信号不仅与发射信号使用的扩频码有关, 而且与接收机相对于发射机的空间方位信息有关, 是一种多天线跳空方式产生的扩频信号。最后给出了跳空扩频信号的频谱扩展性能、自相关性能、互相关性能、安全性能和多用户的通信性能, 仿真结果表明跳空扩频信号为信息提供了一种更加安全的无线传输方法。

关键词: 扩频调制; 安全通信; 虚拟运动, 跳空

中图分类号: TP92

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)04-0481-05

Space Hopping Spread-Spectrum Modulation Based on a Virtual Motion Antenna

Hong Tao, Song Maozhong

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A space hopping spread-spectrum modulation signal transmitted by a virtual motion antenna is proposed to guarantee the information security at the physical layer. A switched antenna array is employed to simulate antenna motion, and the switching mode is controlled by a spread-spectrum sequence. In this way, a spread-spectrum modulation signal is formed by the fundamental components and the harmonic components which are generated by the switching function of the antenna array. Therefore the transmit signal is associated with not only the spread-spectrum sequence but also the azimuth angle information of the receiver. Finally, the performances of spectrum spread, autocorrelation, cross-correlation, security and multi-user communication are investigated. Simulation results show that the proposed signal offers a security transmission method for wireless communication.

Key words: spread spectrum modulation; secure communication; virtual motion; space hopping

扩频通信系统由于抗干扰能力强, 信号功率谱密度低有利于信号隐蔽, 信息被扩频码隐藏有利于防止窃听等优点在电子对抗系统中具有广泛的应用。目前主要的扩频技术有直接序列扩频系统、频率跳变扩频系统和时间跳变扩频系统, 以及这3种基本方式组合的混合扩频系统, 传统扩频信号由于信号辐射方式的原因难以避免波束范围内(包括旁瓣)的信息窃听。关于安全通信的研究在数据链路层上主要集中在对信息加密和安全通信协议两个

方面^[1-2], 物理层的研究主要集中在扩频通信系统和混沌通信系统^[3-6], 以及利用空间冗余度实现物理层无线传输安全的多天线发射多天线接收系统^[7]或多节点协作通信系统^[8-9]。本文的目的就是结合扩频信号和多天线发射信号的优点, 采用天线虚拟运动的方式设计一种新的扩频信号, 为信息的无线传输提供一种更加安全的方法。

天线虚拟运动即通过天线快速切换仿真天线运动, 在天线快速切换方式上类似于时间调制阵。

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009367)资助项目; 航空科学基金(20095152026)资助项目。

收稿日期: 2010-11-17; **修订日期:** 2011-01-04

通讯作者: 宋茂忠, 男, 教授, 博士生导师, 1962年生, E-mail: sm2108@nuaa.edu.cn。

时间调制阵在天线阵方向图综合方面有过报道^[10-11],利用时间这个天线阵的第四维变量降低辐射方向图的旁瓣电平,但使用时间调制来综合方向图存在谐波分量,影响发射信号能量有效利用,方向图综合算法都在力求减小谐波分量,并在接收机中需要采用滤波器滤除谐波分量^[12]。文献[13,14]提出了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,这也仅仅将两个一次谐波分量应用到测向功能中。这些谐波分量中包含了与基频分量相同的信息,本文的目的就是利用天线的快速切换产生的谐波分量和基频分量一起在空间构成一个空间扩频信号,接收机解调接收信号时需要同时知道发射信号的扩频码信息和自身相对于发射机的相对方位信息,增加了窃听接收机解调通信信息的难度。

1 跳空扩频通信系统原理

(1) 发射阵列设计

跳空扩频信号发射系统如图1所示,信号发射阵列为包含 R 个全向辐射天线的直线阵,阵元分别用序号 $1, 2, \dots, R$ 表示,阵元间距为 $d = \frac{\lambda}{2}$,其中 λ 为发射信号的波长,并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,对于每一段时间开关控制只有一个天线在辐射信号,利用切换天线实现发射天线的虚拟运动。阵元的激励信号为 $b_{k,n}e^{j\omega t}$,其中 $b_{k,n} \in \{+1, -1\}$ 为第 k 个用户待发送的二进制比特信息, $n=1, 2, \dots, N$ 为第 k 个用户待发送的二进制比特信息序号, ω 为发射信号的角频率。

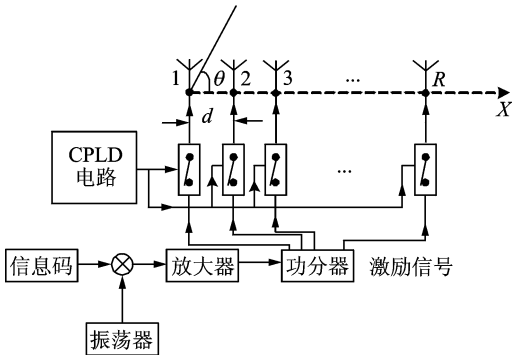


图1 跳空扩频信号发射系统

(2) 跳空图案设计

天线阵中发射天线的虚拟运动方式是由扩频码控制完成的,如果第 k 个用户选择使用的扩频码记为 $q_{k,m} \in \{+1, -1\}$,扩频码周期为 M ,其中 $m=1, 2, \dots, M$,每一个二进制比特信息都在阵元总数为 R 的切换天线直线阵中选择 M 个阵元进行发

射,第 m 个扩频码片对应的发射天线序号为 $L_{k,n,m}$,阵元切换方法如下:

第1步:当 $q_{k,1}=1$ 时, $L_{k,n,1}=1$,当 $q_{k,1}=-1$ 时, $L_{k,n,1}=2$;

第2步:对于 $m=2, 3, \dots, M$,计算 $L_{k,n,m} = L_{k,n,m-1} + 0.5(3 + q_{k,m} \cdot q_{k,m-1})$,得到的集合 $\{L_{k,n,m}\}, m=1, 2, \dots, M$ 就是第 k 个用户的信息码 $b_{k,n}$ 对应的发射天线序号集合。

(3) 发射信号的时域形式

远区场接收信号为

$$E(t, \theta, k, n) = \sum_k b_{k,n} U_{k,m}(t) e^{j[L_{k,n,m-1}\beta d \cos\theta]} \cdot s_{k,m}(t - m\tau_{k,m} - \mu_k) e^{j(\omega t + \phi_k)} \quad (1)$$

式中: $L_{k,n,m}$ 为第 k 个用户选择的扩频码对应的发射天线序号; θ 为接收机所在的方位角; ω 为发射信号的角频率,对应的频率为 $f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为传播常数; ϕ_k 为第 k 个用户信号的载波相位滞后; $s_{k,m}$ 为第 k 个用户第 m 个码片的特征波形; μ_k 为第 k 个用户信号的相对时延; $U_{k,m}(t)$ 为第 k 个用户天线的开关函数,具体表达式如式(2),示意图如图2所示。

$$U_{k,m}(t) = \begin{cases} 1 & t_{k,0m} \leq t \leq (t_{k,0m} + \tau_{k,m}) \\ 0 & 0 \leq t \leq t_{k,0m}, (t_{k,0m} + \tau_{k,m}) \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_{k,0m}$ 为第 k 个用户第 m 个码片对应的发射天线开始导通时刻; $\tau_{k,m}$ 为第 k 个用户第 m 个码片对应的发射天线总的导通时间; $T = \frac{1}{f_p}$ 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, $\tau_{k,m} = \tau = \frac{1}{M}T$ 。

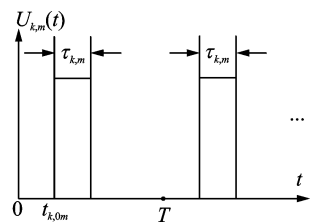


图2 开关函数示意图

如果第 k 个用户扩频码为周期 $M=7$ 的 m 序列, $\{q_{k,m}\} = \{+1, -1, -1, +1, +1, +1, -1\}$,对应的跳空时空矩阵图如图3所示。

(4) 发射信号的频域分析

对于所有用户的天线开关函数 $U_{k,m}(t)$ 为周期信号,所以可以将第 k 个用户的开关函数进行傅里叶级数展开

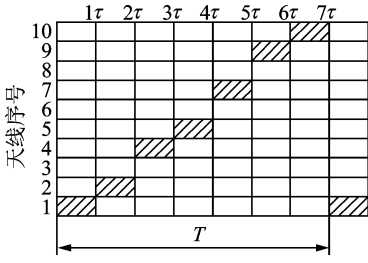


图3 跳空时空矩阵图

$$E(t, \theta, k, n) = b_{k,n} \cdot e^{j[L_{k,n,m-1}\beta d \cos\theta] + \phi_k} \cdot$$

$$s_{k,m}(t - m\tau - \mu_k) \sum_{i=-\infty}^{+\infty} a_i e^{j2\pi(f_0 + if_p)} \quad (3)$$

式中: a_i 为开关函数的傅里叶级数, 可以由式(5)得到

$$a_i = \frac{1}{T} \int_0^T U_{k,m}(t) \exp[-j\omega t] dt = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin(i\pi f_p \tau)}{i\pi f_p \tau} \cdot e^{-j\pi f_p \tau} \quad (4)$$

由式(3)可以看出, 第 k 个用户的二进制信息码 $b_{k,n}$ 如果采用传统的单天线发送的方式辐射信号, $b_{k,n}$ 的功率谱就被搬移到载波频率 f_0 上。采用本文的天线切换发射的方式辐射信号, 由于周期的开关函数的作用, 信息码 $b_{k,n}$ 的功率谱不仅仅搬移到载波频率 f_0 上, 而且会在 $f_0 \pm f_p, f_0 \pm 2f_p, \dots, f_0 \pm if_p$ 这些频率上出现谐波分量, 如果二进制信息码 $b_{k,n}$ 的信号带宽 B_s 小于天线的切换频率 f_p , 谐波分量之间以及谐波分量与基频分量之间不会发生重叠, 各个分量中都包含了全部的通信信息, 各分量之间的区别在于由于各分量对应的傅里叶展开级数的不同, 各谐波分量包含的发送信号能量不同。在文献[10~12]中认为谐波分量浪费了发射信号能量, 在方向图综合算法中应该力求减小谐波分量的发射能量, 本文利用这些谐波分量构成一个空间扩频信号用于安全通信系统。图4给出了采用天线虚拟运动辐射信号的功率谱搬移示意图。

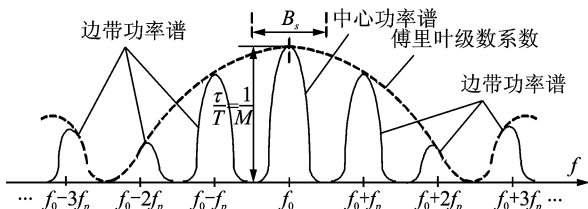


图4 功率谱搬移示意图

2 系统性能分析

(1) 信号的频谱扩展特性

设系统第 k 个用户的二进制比特信息 $b_{k,n}$ 的速率 R_b , 信号的带宽 $R_s = 2R_b$, 扩频码为周期 $M = 31$ 的 Gold 码, 扩频码速率 $31R_b$, 根据式(3)发射信号的

基频分量 $|E_{i=0}| = \frac{1}{M} = \frac{1}{31}$, 相比于直接发射的信号能量下降了 29.8 dB, 一次谐波分量 $|E_{i=\pm 1}| = \frac{1}{M} \cdot \frac{\sin(\pi/M)}{\pi/M} = \frac{1}{31} \times 0.9983$, 相比于基频分量能量下降了 0.015 dB, n 次谐波分量 $|E_{i=\pm n}| = \frac{1}{M} \cdot \frac{\sin(n\pi/M)}{n\pi/M}$, 相比于基频分量能量下降了 $-10 \times \log_{10} \left[\frac{\sin(n\pi/M)}{n\pi/M} \right]^2$ dB, 而信号带宽扩展为 $(1 + 2n) \cdot R_s$ 。

(2) 信号的相关特性

跳空扩频信号不仅与跳空图案有关还与接收机相对于发射机的相对空间方位信息有关, 发射信号的自相关函数可以用式(5)表示

$$I(k, g) = \sum_{m=1}^M \left\{ e^{j[L_{k,m,n-1}\beta d \cos\theta]} \cdot \text{conj} \left(e^{j[L_{k,m-g,n-1}\beta d \cos\theta]} \right) \right\} = \sum_{m=1}^M e^{j[L_{k,m,n-1}\cos\theta - (L_{k,m-g,n-1})\cos\theta]\beta d} \quad (5)$$

式中: $\hat{L}_{k,n,m}$ 为第 k 个用户使用的扩频码根据切换天线选择方法本地产生的跳空图案; $\hat{\theta}$ 为本地产生的接收机相对于发射机的方位信息; g 代表码片的偏移量。由于发送的信号形式相当于 BPSK 扩频信号, 所以只有相关值的实部对于信息码的判决是有用信号:

$$\text{当 } g=0, \theta=\hat{\theta} \text{ 时, } \text{Real}[I(k, g=0)] = M;$$

$$\text{当 } g \neq 0, \theta=\hat{\theta} \text{ 时, } \text{Real}[I(k, g \neq 0)] =$$

$$\sum_{m=1}^M \cos[\pi \cos\theta (L_{k,m,n} - \hat{L}_{k,m-g,n})] < M。$$

图5(a)给出了接收机在空间不同的方位和不同码片偏移条件下, 信号的自相关性能图, 仿真中使用的扩频码为周期长度 $M = 31$ 的 Gold 码, 可以看出在方位角 30° 到方位角 60° 范围内, 信号具有较好的自相关特性。信号互相关函数由式(6)表示

$$I(k_1, k_2, g) = \sum_{m=1}^M \left\{ e^{j[L_{k_2,m,n-1}\beta d \cos\theta]} \cdot \text{conj} \left(e^{j[L_{k_1,m-g,n-1}\beta d \cos\theta]} \right) \right\} = \sum_{m=1}^M e^{j[L_{k_2,m,n-1}\cos\theta - (L_{k_1,m-g,n-1})\cos\theta]\beta d} \quad (6)$$

$$\text{当 } g=0, \theta=\hat{\theta} \text{ 时, } \text{Real}[I(k_1, k_2, g=0)] =$$

$$\sum_{m=1}^M \cos[(L_{k_2,m,n} - L_{k_1,m,n})\pi \cos\theta];$$

$$\text{当 } g \neq 0, \theta=\hat{\theta} \text{ 时, } \text{Real}[I(k_1, k_2, g \neq 0)] =$$

$$\sum_{m=1}^M \cos[(L_{k_2,m,n} - L_{k_1,m-g,n})\pi \cos\theta]。$$

图5(b)给出了接收机在空间不同的方位时, 不同码片偏移条件下, 信号的互相关性能图。图5(c)给出了在使用相同的 Gold 码条件下, 直序

听接收机只知道发射信号使用的扩频码,由于发送的通信信号是一种扩频信号,发射信号功率可以隐藏在噪声中,不易被窃听接收机侦测到,即使窃听接收机在用高增益的多天线阵列接收信号测定发射机所在的方位信息,测得的方位信息也不是信号解调需要的接收机自身相对于发射机之间的方位信息。由图可以看出期望接收机在不同方位下可以正确捕获发射信号,而窃听接收机无法捕获发射信号。

(3)信号的通信性能

仿真条件为系统共有3个用户,采用的扩频码为 $M=31$ 的 Gold 码,对应的扩频增益为 15 dB,3个用户信号的发射功率相同,接收机与用户1同步,用户1分别在方位角为40和35°两个条件下,另外的两个用户和窃听接收机所在的方位角为30°到60°内的随机值,每次仿真数据量为1000个符号,仿真次数为2000次,由图6可以看出采用本文提出的跳空扩频方式当接收机在空间不同的方位时误码性能差距不大,相比于采用直接序列扩频信号提高了近5 dB,原因是跳空扩频信号的互相关性能是优于直序扩频信号的,在信号的相关特性这一小节中已经详细说明,并且窃听接收机无法解调通信信息。

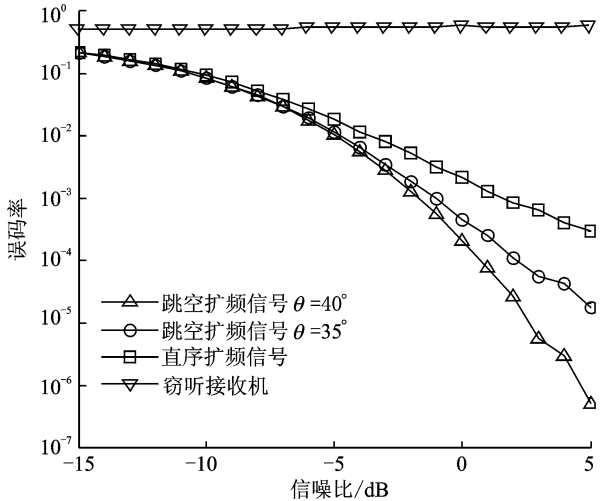


图6 误码性能对比图

图7给出了系统中某个用户误码性能随着系统用户数变化的曲线图,用户所在的方位角在30°到60°范围内随机分布,信噪比为0 dB。可以看出在相同的误码性能要求下,跳空扩频系统比直序扩频系统能够容纳更多的用户。

(4)存在角度误差时跳空扩频信号误码性能

发射信号与接收机所在的相对方位信息有关,用于解调信号的方位信息会存在角度误差,图8给出了系统的误码性能随着角度误差变化的曲线图,仿真扩频码为 $M=31$ 的 Gold 码,系统中只有一个用户,信噪比为-5 dB。可以看出角度误差在0.1°

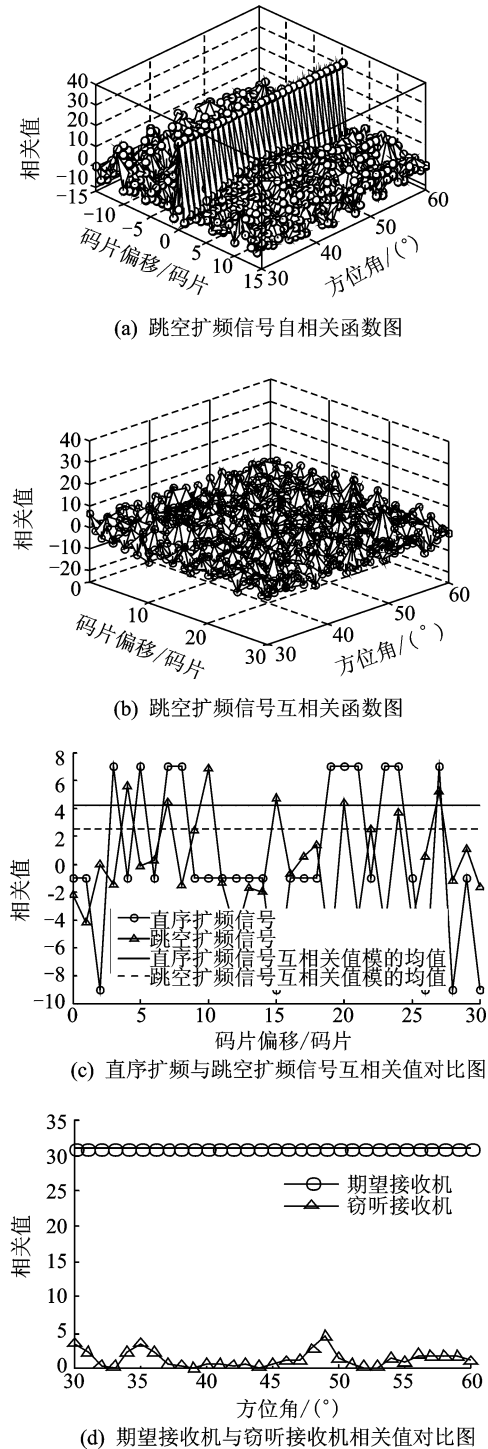


图5 跳空扩频信号相关性

扩频信号与跳空扩频信号互相关值的对比图,可以看出跳空扩频信号破坏了Gold码的三值互相关特性,但从一个周期的互相关值模的平均值可以看出跳空扩频信号的互相关特性是优于直序扩频信号的,原因是跳空扩频信号不仅与发送信号使用的扩频序列有关而且与接收机所在的空间方位有关,接收机所在的方位角使接收信号矢量在信号空间中发生旋转,导致互相关实部值减小。图5(d)给出了期望接收机与窃听接收机信号相关值的对比图,窃

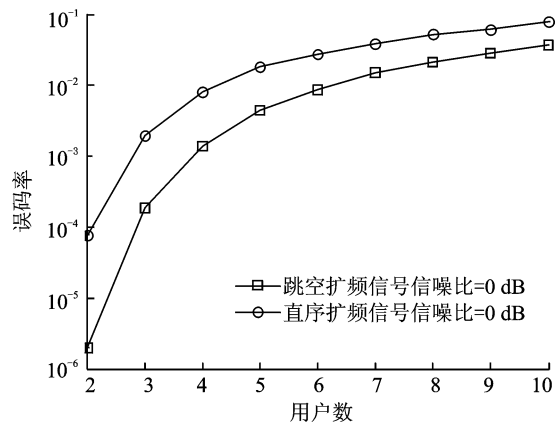


图7 误码性能随着系统用户数变化曲线图

以内时,系统误码性能几乎不变,当误差角度达到 0.3° 时误码性能相差近一个数量级。

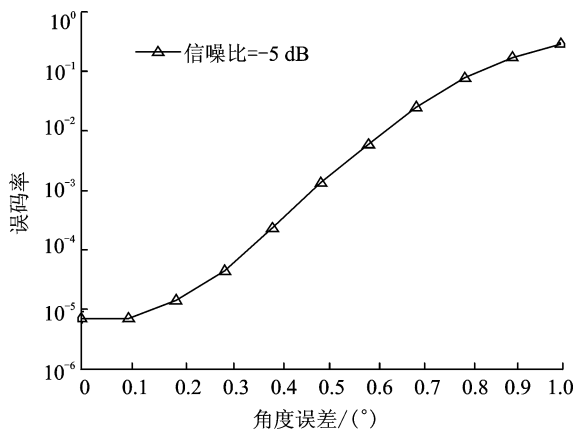


图8 系统误码性能随着角度误差变化曲线图

3 结束语

本文提出了一种基于虚拟运动天线的跳空扩频信号,天线的切换方式由扩频序列控制,这种控制方式与跳频信号的频率选择方式类似,随机切换天线的目的是扩展信号频谱。这样发射的空间扩频信号不同于其他3种基本的扩频信号,发射信号不仅与使用的扩频序列有关,而且与接收机相对于发射机的空间方位信息有关,是一种多天线跳空方式产生的空间域扩频信号,相比于普通扩频信号和多天线发射这两种在物理层保障信息的安全传输方式,本文提出的跳空扩频信号不仅具有发射信号功率可以隐藏在噪声中不易被窃听接收机侦测的特点,还利用了多天线发射信号提供的空间方位信息的冗余度,增加了通信信息的解调难度,为通信信息的无线传输提供了一种更加安全的传输方式。

参考文献:

[1] Wu Shuhua, Zhu Yuefei, Pu Qiong. Security analysis of a cocktail protocol with the authentication and key agreement on the UMTS[J]. IEEE Communica-

tions Letters, 2010, 14(4):366-368.

- [2] Cheon J H, Hopper N, Kim Y. Provably secure timed-release public key encryption [J]. ACM Transactions on Information and Systems Security, 2008, 11(2):1-44.
- [3] Pereira M, Postolache O, Girao P. Spread spectrum techniques in wireless communication[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2009, 12(6):21-24.
- [4] Pereira M. Spread spectrum techniques in wireless communication Part 2: Transmission issues in free space [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2010, 13(1):8-14.
- [5] Jovic B, Unsworth C P. Fast synchronisation of chaotic maps for secure chaotic communications[J]. Electronics Letters, 2010, 46(1):49-50.
- [6] Li Kezan, Zhao Mingchao, Fu Xinchu. Projective synchronization of driving-response systems and its application to secure communication [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 56(10):2280-2291.
- [7] Li Xiaohua, Juite H. 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] Zhu Jingge, Mo Jianhua, Tao Meixia. Cooperative secret communication with artificial noise in symmetric interference channel [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(10):885-887.
- [10] Yang Shiwen, Yeow B G, 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.
- [11] Aksoy E, Afacan E. Thinned nonuniform amplitude time-modulated linear arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9):514-517.
- [12] Bregains J C, Fondevila-Gomez J, Franceschetti G, et al. Signal radiation and power losses of time-modulated arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(6):1799-1804.
- [13] Tennant A, Chambers B. A two-element time-modulated array with direction-finding properties [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007(6):64-65.
- [14] Tennant A. Experimental two-element time-modulated direction finding array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(3):986-988.