

一种基于方向调制的双波束扩频安全通信系统

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: 为了提高通信信息在无线传输过程中的窃听难度, 该文提出了一种基于方向调制的双波束扩频信号。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, 是一种扩频序列和空间方位信息共同调制的空间扩频信号。仿真结果表明相比于传统的扩频信号, 双波束方向调制扩频信号为通信信息在信息传输层面上提供了一种更加安全的无线传输方法。

关键词: 扩频通信; 双波束; 方向调制; 安全通信

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2317-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01240

A Dual-beam Spread Spectrum Signal Based on Directional Modulation for Secure Communication

Hong Tao Song Mao-zhong Liu Yu

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

Abstract: A dual-beam spread spectrum signal based on directional modulation is proposed to increase the difficulty of the wireless communication tapping. The transmitted signal is not only associated with the spread spectrum sequence but also with the azimuth angle of the receiver. Therefore, this signal is a space spread spectrum signal modulated by the azimuth angle. Simulation results show that the proposed signal offers a safety method for the data transmission compared with the traditional spread spectrum signal.

Key words: Spread spectrum communication; Dual-beam; Directional modulation; Secure communication

1 引言

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, 时间跳变扩频系统, 以及这3种基本方式组合的混合扩频通信系统。传统扩频信号保密性是建立在扩频序列安全的前提下的, 这点在计算能力日益增强的计算机面前是难以保证的。对于保密通信的研究在数据链路层上主要集中在对通信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上^[3-6], 上述的研究并不涉及通信信息的无线传输过程。由于信息无线传输的特点是向空间辐射电磁波, 具有一定的开放性, 现有的关于信息无线传输过程中的安全技术都是采用空域滤波来保证信息无

线传输的安全性, 如采用窄主瓣和低旁瓣的天线技术, 但受限于发射天线的体积, 电磁波的辐射并不能具有很好的定向性, 难以避免波束范围内(包括旁瓣)的信息窃听。本文提出了一种基于双波束的方向调制技术, 为通信信息提供了一种更加安全的无线传输方法。

方向调制技术^[7-9]或近场天线直接调制技术^[10]是一种在射频端综合出数字基带调制信号的调制技术, 这种调制技术可以实现空间不同的方位发射具有不同信号星座图的方向调制信号。在期望方向发射信号星座图与传统的基带数字调制信号相同, 接收机可以正常解调接收信号, 在其它方向接收信号在幅度与相位上产生畸变, 导致接收机误码性能恶化。文献[8, 9]提出了一种利用遗传算法控制相移器在射频端综合出基带数字调制信号实现方向调制的方法。但受限于相移器的速率, 无法综合出扩频信号, 这样发射的方向调制信号具有低截获概率, 不具有低侦测概率和一定的抗干扰能力, 无法与传统的扩频系统兼容。文献[10]提出一种基于发射波束与发射波束的方向调制技术, 这种利用波束干涉实现方向调制的技术在发射面的设计上存在一定的复

2010-11-15 收到, 2011-06-24 改回

江苏省自然科学基金资助项目(BK2009367)和航空基金资助项目(20095152026)资助课题

*通信作者: 洪涛 hongtao@nuaa.edu.cn

杂度，并且同样存在与传统扩频通信系统兼容的问题。本文提出一种双波束方向调制技术，利用正交调制信号的同相分量和正交分量同时激励双波束覆盖期望通信目标，在期望通信目标所在的方位接收信号星座图与传统的基带调制信号相同，在偏离期望接收机的方位接收信号的星座图产生畸变，利用双波束之间的干涉实现方向调制。双波束方向调制技术与扩频通信系统兼容，在基带调制部分采用扩频序列调制通信信息，在射频端利用双波束同时传输通信信息实现方向调制，这样发射的信号同时被扩频码和空间方位信息调制，为信息的无线传输提供了一种更加安全的方法。

2 双波束方向调制扩频信号原理

图 1 给出了双波束方向调制扩频信号发射机框图，发射阵列方向图主瓣指向期望接收机所在的方位，窃听接收机在偏离期望接收机的方位， $F_1(\theta)$ 和 $F_2(\theta)$ 为在空间中同时覆盖期望接收机的同相位中心双波束，根据文献[8]中的式(4)，远区场接收信号可以表示成如下形式：

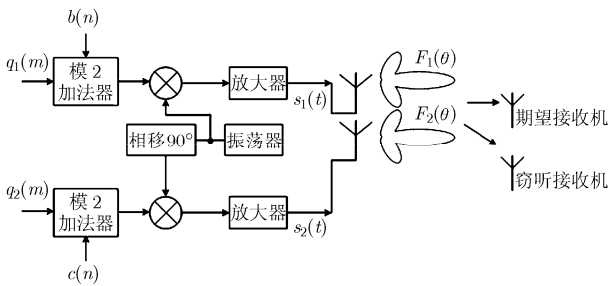


图 1 双波束方向调制扩频信号发射机

$$\begin{aligned}
 E(t, \theta) &= \begin{bmatrix} F_1(\theta) & F_2(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} = F_1(\theta)q_1(m)b(n) \\
 &\quad \cdot \cos(\omega t + \phi) + F_2(\theta)q_2(m)c(n)\sin(\omega t + \phi) \\
 &= A(\theta)\cos(\omega t - \psi(\theta) + \phi)
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别为 I 通道和 Q 通道发射天线的激励信号， $q_1(m)$ 与 $q_2(m)$ 分别为发射机 I 通道和 Q 通道使用的扩频序列， $b(n)$ 和 $c(n)$ 分别代表 I 通道和 Q 通道发送的比特信息， ϕ 为载波相位滞后量， ω 为载波角频率， $A(\theta) = \sqrt{F_1(\theta) + F_2(\theta)}$ 和 $\psi(\theta) = \arctan \frac{q_2(m)c(n)F_2(\theta)}{q_1(m)b(n)F_1(\theta)}$ 分别为合成信号的包络和相位。对于不同的 $q_1(m)b(n)$ 和 $q_2(m)c(n)$ 取值集合，接收矢量和矢量的合成方式可以分别由表 1 和图 2 表示。

由表 1 可以看出相比于普通的扩频信号，双波束方向调制扩频信号接收信号矢量还与接收机相对于发射机的相对方位信息有关，接收信号矢量相位值取决于双波束幅值的比值，当在空间某个方位双波束幅值相等时，双波束方向调制扩频信号接收矢量与普通扩频信号只存在能量大小方面的差异，在包含通信信息的相位方面是相同的。图 2 给出了信号矢量合成对比图，当双波束幅值相等时，双波束方向调制扩频信号星座图蜕变为普通扩频信号星座图，在空间的其他方位，双波束方向调制扩频信号星座图是一个畸变的星座图，使误码性能恶化。

在期望接收机与窃听接收机都知道信道信息和星座图的解调信息的条件下，系统的误码性能是关于噪声能量和接收信号星座图中星座点的空间欧式距离的函数，根据文献[8]中的结论，对于畸变的星座图系统误码性能可以用式(2)表示：

$$\begin{aligned}
 P_{\text{error}} &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Q \left(\frac{d_i/2}{\sqrt{N_0/2}} \right) = \frac{1}{2} Q \left(\sqrt{\frac{F_1(\theta)^2}{N_0/2}} \right) \\
 &\quad + \frac{1}{2} Q \left(\sqrt{\frac{F_2(\theta)^2}{N_0/2}} \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $d_i = \{|\mathcal{A}_i - \mathcal{A}_j|\}$, $i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j$ 为第 i 个星座点到其他星座点的空间欧式距离， $N_0/2$ 为噪声功率谱密度， $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 为误差函数。可以看出星座点之间的空间欧式距离与

表 1 接收信号矢量

$q_1(m)b(n)$	$q_2(m)c(n)$	普通扩频信号	双波束扩频信号
1	1	$F(\theta)(1 + j)$	$\mathcal{A}_1 = A(\theta)\angle \arctan \frac{F_2(\theta)}{F_1(\theta)}$
1	-1	$F(\theta)(1 - j)$	$\mathcal{A}_2 = A(\theta)\angle \arctan \frac{-F_2(\theta)}{F_1(\theta)}$
-1	1	$F(\theta)(-1 + j)$	$\mathcal{A}_3 = A(\theta)\angle \arctan \frac{F_2(\theta)}{-F_1(\theta)}$
-1	-1	$F(\theta)(-1 - j)$	$\mathcal{A}_4 = A(\theta)\angle \arctan \frac{-F_2(\theta)}{-F_1(\theta)}$

注：矢量相角区分可以采用 Matlab 中的 atan2 四项反正切函数

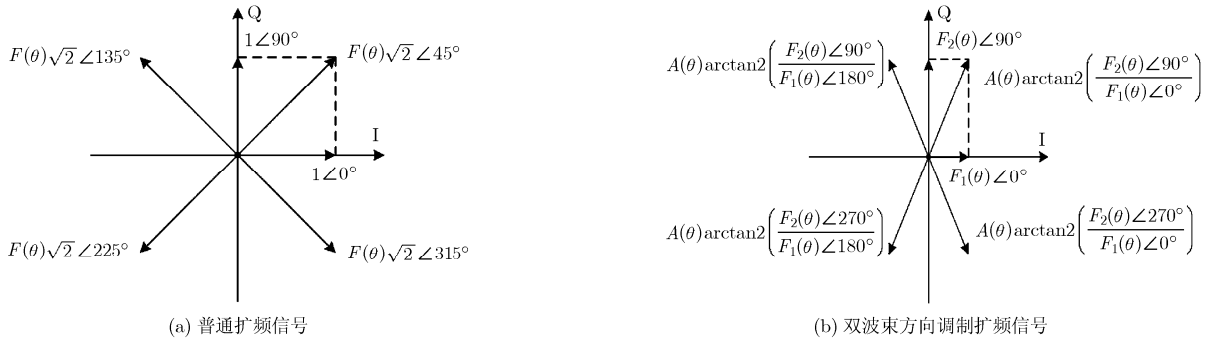


图 2 信号矢量合成图

接收信号矢量有关，可以通过设计双波束方向图在期望接收机方位得到最大的空间欧式距离使误码性能与普通的扩频信号相同，在其他的方位尽量减小空间欧式距离使误码性能恶化，在下一小节的双波束方向图设计中就是要达到这样的目的。

3 双波束发射阵列设计

双波束扩频调制信号星座图与双波束方向图函数密切相关，在期望方向设计方向图函数需要等增益合成，使合成信号星座图与普通的扩频信号相同，期望接收机可以正常解调接收信号，而在其它方位设计方向图函数增益相差很大，使合成信号星座图在相位上产生畸变，窃听接收机解调接收信号的误码性能迅速恶化。根据这个原则本文设计了如图 3 所示的发射阵列，两个半波阵子放置在 90° 角型反射器中，天线 1 与天线 2 距角型反射器顶点的距离 $D_1 = D_2 = 2.2\lambda$ ，与 X 轴的夹角 $\theta_1 = 16^\circ$ ， $\theta_2 = -16^\circ$ ，则天线 1 与天线 2 之间的距离 $D_{12} = 1.2128\lambda$ ，天线 1 与天线 2 的激励信号分别为 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 。

根据镜像理论，辐射方向图可以分别由式(3)和式(4)表示：

$$F_1(\theta) = |\cos[kD_1 \cos(\theta - \theta_1)] - \cos[kD_1 \sin(\theta + \theta_1)]| \quad (3)$$

$$F_2(\theta) = |\cos[kD_2 \cos(\theta - \theta_2)] - \cos[kD_2 \sin(\theta + \theta_2)]| \quad (4)$$

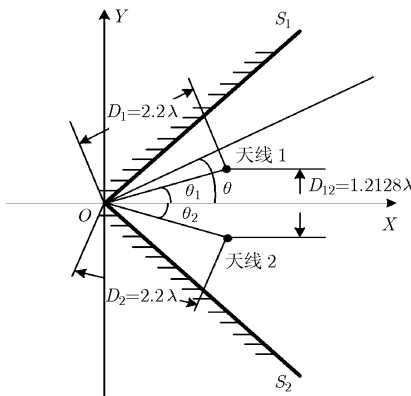


图 3 双波束方向调制扩频信号发射阵列

其中 $k = (2\pi)/\lambda$ 为电磁波自由空间传播常数， θ 为方位角。图 4 给出了辐射方向图 $F_1(\theta)$ ， $F_2(\theta)$ 和空间合成方向图，合成方向图的主瓣最大值在方位角 0° 方位，旁瓣最大值在方位角 $\pm 30^\circ$ 方位，为了能与普通的扩频信号误码性能作对比，在仿真中普通扩频信号以合成方向图辐射信号。此外，对于期望通信目标的跟踪可以采用转动角型天线轴线的指向方式实现，本文的目的是设计发射信号，这里不做进一步讨论。

3.1 性能仿真

仿真条件：

(1)为了比较双波束方向调制扩频信号与普通扩频信号的误码性能，普通扩频信号以图 4 中的合成方向图辐射信号。

(2)在计算加性噪声信噪比时，以主瓣的最大值方向为标准信号，其他方位所加的噪声方差与主瓣的最大值方向相同。

(3)扩频码选择周期 $M = 15$ 的 m 序列，扩频增益 $G = 11.8 \text{ dB}$ 。

图 5 给出了普通扩频信号与双波束方向调制扩频信号理论限和蒙特卡洛仿真两种方式下误码性能随着方位变化的性能曲线对比图，系统接收信号信噪比为 -4 dB ，可以看出合成方向图主瓣范围内在期望接收机所在的方位，双波束方向调制扩频信号误码性能与普通的扩频信号相同，在偏离期望接收机的方位双波束方向调制扩频信号误码性能恶化速度超过普通的扩频信号。在合成方向图旁瓣范围内双波束方向调制扩频信号误码性能恶化更为严重，几乎无法解调信号。图 6 给出了合成方向图主瓣最大值方向(方位角 0°)，旁瓣最大值方向(方位角 30°)和主瓣内方位角 5° 的方位这 3 种情况下，普通扩频信号与双波束方向调制扩频信号误码性能随着信噪比变化的对比曲线图，可以看出在方位角 0° 方位，双波束方向调制扩频信号与普通扩频信号误码性能相同，可以实现与期望接收机的通信。在主瓣内方

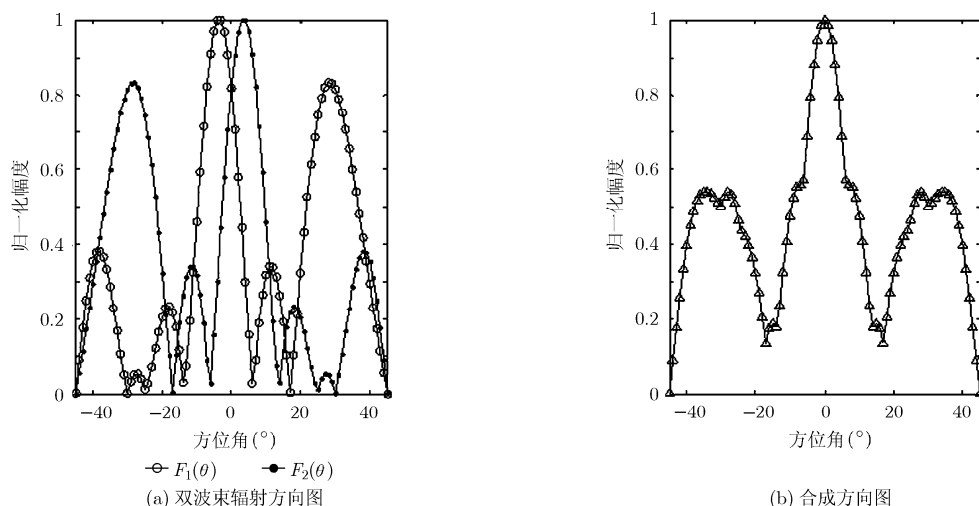


图4 双波束辐射方向图和空间合成方向图

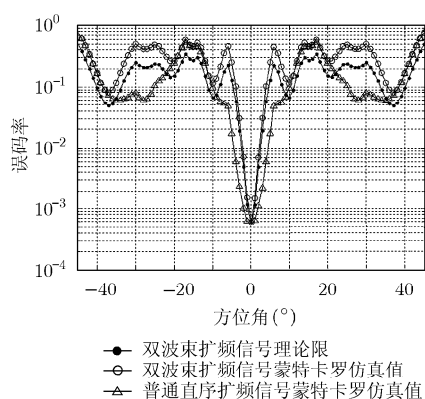


图5 误码性能随着方位角变化曲线图

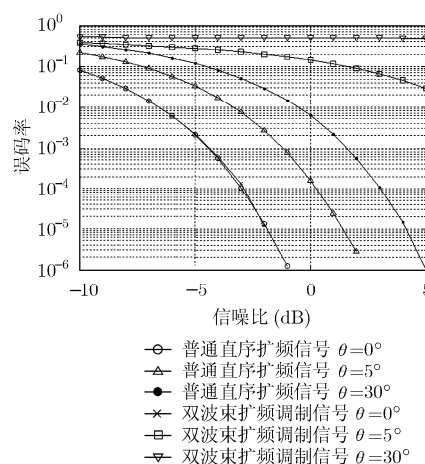


图6 误码性能随着信噪比变化曲线图

方位角 5° 方位信噪比为 0 dB 时, 误码性能相比与普通扩频信号相差了3个数量级, 并且随着信噪比的提高差距在逐渐拉大。在旁瓣最大辐射方向(方位角 30°), 对于普通的扩频信号在高信噪比条件下信号还是可以解调的, 而双波束方向调制扩频信号已经无法解调出有用的通信信息, 并且误码率不随着信噪比而变化, 窃听接收机无法从旁瓣最大辐射方向窃听通信信息。

4 结束语

本文提出了一种双波束方向调制扩频信号, 相比于采用相控阵结合遗传算法实现的方向调制方法, 实现方法更简单, 并且能与普通的扩频通信系统兼容, 在基带调制部分采用扩频序列调制通信信息, 在射频端利用双波束同时传输通信信息实现方向调制, 这样期望接收机接收信号与传统的基带调制信号相同, 不同方位窃听接收机接收到的是幅度

与相位畸变的信号星座图, 导致误码性能恶化, 为通信信息在信息传输层面上提供了一种更加安全的无线传输方法。

参考文献

- [1] Wu Shu-hua, Zhu Yue-fei, and Pu Qiong. Security analysis of a cocktail protocol with the authentication and key agreement on the UMTS [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(4): 366-368.
- [2] Cheon J H, Hopper N, and 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, and 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 and Unsworth C P. Fast synchronisation of chaotic maps for secure chaotic communications [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(1): 49-50.
- [6] Li Ke-zan, Zhao Ming-chao, and Fu Xin-chu. 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] Daly M P and Bernhard J T. Beamsteering in pattern reconfigurable arrays using directional modulation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(7): 2259-2265.
- [8] Daly M P and Bernhard J T. Directional modulation technique for phased arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(9): 2633-2640.
- [9] Daly M P, Daly E L, and Bernhard J T. Demonstration of directional modulation using a phased array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(5): 1545-1550.
- [10] Babakhani A, Rutledge D B, and Hajimiri A. Transmitter architectures based on near-field direct antenna modulation [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2008, 43(12): 2674-2692.
- 洪 涛：男，1982 年生，博士生，研究方向为数字通信、调制技术、多天线收发系统。
- 宋茂忠：男，1962 年生，教授，博士生导师，研究方向为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。
- 刘 渝：男，1945 年生，教授，博士生导师，研究方向为信号处理、信号检测与估计、电子侦察和电子智能化系统。