

## 基于混沌脉冲开关键控的超宽带通信方案

杨 华<sup>①</sup> 蒋国平<sup>②</sup> 邓 萍<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学无线通信与电磁兼容实验室 南京 210003)

<sup>②</sup>(南京邮电大学自动化学院 南京 210003)

**摘 要:** 该文基于混沌脉冲位置调制(CPPM)提出了一种新型可用于超宽带冲击无线电(UWB-IR)的通信方案——混沌脉冲开关键控。该方案克服了混沌脉冲位置调制方法存在的问题,具有保密性好、可靠性高、设备的实现更加简单等优点。分析和仿真表明,在非理想定时情况下,该文提出的新系统具有比 CPPM 更好的解码性能。

**关键词:** 混沌脉冲开关键控; 混沌脉冲位置调制; 扩频; 超宽带

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0677-04

## Chaotic Pulse On-Off-Keying Modulation Scheme for Ultra-wide Bandwidth Communications

Yang Hua<sup>①</sup> Jiang Guo-ping<sup>②</sup> Deng Ping<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Lab. of Wireless Comm., and EMC, Nanjing University of Posts and Telecomm., Nanjing 210003, China)

<sup>②</sup>(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Based on the Chaotic Pulse Position Modulation (CPPM) method, a novel communication scheme is proposed for Ultra-Wide Bandwidth Impulse radio Communication System (UWB-ICS) in this paper. The proposed scheme can overcome the disadvantages existing in CPPM, having the desired features of communication privacy, reliability and lower design complexity. It is shown by the analysis and simulation results that Chaotic Pulse On-Off-Keying (CPOOK) has better performance than CPPM in the case of non-ideal timing.

**Key words:** Chaotic pulse on-off-keying; Chaotic pulse position modulation; Spread spectrum; UWB

### 1 引言

近年来,随着人们对短距离无线高速数据通信需求的增加,一种称之为超宽带(UWB)的个人无线通信技术受到了广泛的关注<sup>[1,2]</sup>。超宽带通信系统拥有巨大的商业和军事应用前景,它不但要满足传统通信系统中对比特误码率、传输速率、带宽和成本的要求,而且还要确保通信的保密性和低的截获率。此外,UWB系统要灵活地工作在室内、户外等恶劣的环境中,所以它必须能够有效地消除多径干扰、对抗其它设备的干扰。为此,Scholtz等<sup>[3]</sup>提出了一种适合短距离无线通信的脉冲无线电(IR)技术。与传统的扩频通信系统相比,基于超宽带的脉冲通信系统(UWB-ICS)有许多优点:发送信号功率谱密度低、可以容纳多用户使用、收发设备成本低等等。同时由于UWB-ICS相关的高功率放大器可以在非线性区工作,设备整体的DC-RF效率也得到很大提高。所有这些都激发人们致力于利用混沌信号的特殊性质来提高它的工作性能。

两个耦合的混沌系统能够实现同步并且产生相同的混沌轨迹,这就为恢复调制在混沌载波上的信息提供了可能<sup>[4]</sup>。考虑到混沌信号良好的非周期性和保密性,人们开始

将混沌用于通信并提出了一系列基于混沌的通信方案<sup>[5]</sup>,遗憾的是其中有许多系统对信道失真、滤波和噪声都非常敏感。鉴于UWB-ICS在这方面的良好表现,文献[1]将其与混沌有机结合在一起,提出了一种全新的混沌脉冲位置调制方法(Chaotic Pulse Position Modulation, CPPM)。一方面, CPPM借鉴了UWB-ICS中的脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)思想,将信息隐藏在相邻脉冲的时间间隔内,有效地降低了滤波和失真对系统的不利影响。另一方面,混沌的引入使信息更加不易被截获从而增强了系统的保密性,消除了多径干扰。除此之外,混沌脉冲信号比连续的混沌信号更易实现复用<sup>[6]</sup>。

但是, CPPM将延时环节放在反馈环内<sup>[1]</sup>,引入了信息序列对混沌系统动态性能的影响,将原来混沌脉冲再生器(Chaotic Pulse ReGenerator, CPRG)中的混沌映射 $F(x)$ 变为一个新的调制过的混沌映射 $F(x, s_n)$ 。在某些信息序列的作用下新映射很可能丧失混沌特性甚至发散,从而使 CPPM失去混沌调制的意义,这是 CPPM系统潜在的一个问题。同时由于 CPPM将混沌同步信息与要发送的二进制信息结合起来对脉冲进行 PPM,因此接收机必须引入一个从判决输出端到 CPRG 的反馈环来获得混沌同步信息。反馈环的存在使得接收机判决输出的正确与否严重影响通信双方的同步性能。判决错误将导致接收机的 CPRG 与发射机的 CPRG 失步,产生严重的误差传播,甚至会使接收机停止工作。基

2005-07-04 收到, 2005-12-12 改回

国家自然科学基金重点项目(60432040),江苏省高校“青蓝工程”计划项目(JS200407)和江苏省高校自然科学基金重点项目(04KJA517092)资助课题

于上述研究, 本文提出一种 CPOOK(Chaotic Pulse On-Off-Keying)技术。该方法有效地克服了 CPPM 方案的不足, 具有广阔的应用前景。

本文安排如下: 第 2 节提出 CPOOK 方法, 详细描述其工作原理, 并且给出一个具体的实现方案; 第 3 节分析新系统的误码性能, 通过对系统的仿真给出在有噪声和滤波器的情况下 CPOOK 的比特误码率(Bit Error Rate, BER)与比特信噪比( $E_b/N_0$ )之间的关系曲线, 并与 CPPM 方案进行比较; 最后是结束语。

## 2 混沌脉冲开关键控

CPOOK 是一种基于动态反馈调制思想<sup>[7]</sup>的混沌编码方法, 其工作原理如图 1 所示。对应于每个比特信息, 发射机产生一个同步脉冲和一个载波脉冲。同步脉冲和载波脉冲出现的位置由两个不同混沌动态系统的输出分别控制。要发送的二进制信息通过开关键控(On-Off-Keying, OOK)调制到载波脉冲上, 即用信息序列来控制每个比特时间内对应载波脉冲的有无。接收方通过同步脉冲完成双方混沌系统的同步并获得提取载波脉冲的参考时间, 通过检测对应的时间内是否出现脉冲就可以恢复出二进制信息。

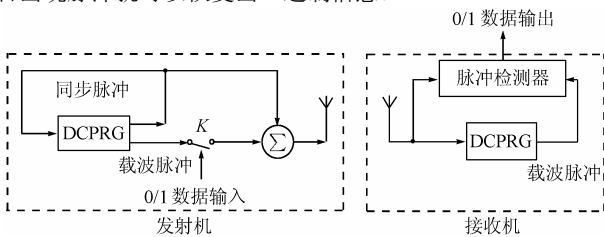


图 1 CPOOK 的工作原理图

作为 CPOOK 的核心部分, 双混沌脉冲重建器(Double Chaotic Pulse ReGenerator, DCPRG)的工作原理如图 2 所示。当一个脉冲间隔为  $T_i$  的脉冲序列输入 DCPRG, 假定序列中第  $n$  个输入脉冲出现的时刻为  $t$ , DCPRG 将在  $t + T_{n+1}^*$  时刻输出一个新的载波脉冲, 在  $t + T_{n+1}$  时刻输出一个新的同步脉冲。其中, 延迟的时间间隔  $T_{n+1}$  和  $T_{n+1}^*$  由前面  $k-1$  个输入的脉冲间隔决定, 即  $T_{n+1} = F(T_n, \dots, T_{n-(k-2)})$ ,  $T_{n+1}^* = G(T_n, \dots, T_{n-(k-2)})$ , 其中  $F(\bullet)$  和  $G(\bullet)$  是两个不同的非线性映射。应当指出,  $k=2$  时该系统的实现最简单, 在图中相当于将 DCPRG 的一路输出直接返回自己的输入端, 构成一个反馈环。此时 DCPRG 输出两路未经调制的脉冲间隔混沌的脉冲序列。

图 2 中非线性映射  $F(\bullet)$  和  $G(\bullet)$  输出的混沌信号分别作

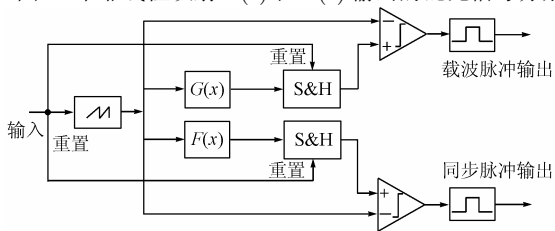


图 2 DCPRG 的工作图

为两个采样-保持(S&H)电路的输入。当有脉冲输入时, 线性递增信号发生器由输入脉冲重置为零。清零前瞬间的信号值经过非线性变换  $F(\bullet)$  和  $G(\bullet)$  后的输出值分别保存在两个采样-保持电路中。当线性递增信号发生器的输出值达到某个采样-保持电路中的值时, DCPRG 就会在相应输出端产生一个脉冲。将 DCPRG 输出的同步脉冲序列直接返回输入端, 选择合适的  $F(\bullet)$  和  $G(\bullet)$  就可以产生两路不同的混沌脉冲序列。文献[6]给出了一个产生单路混沌脉冲序列的系统。

CPPM 方案通过在反馈环内加入一个延时模块——传输‘0’的时候对 CPRG 输出的脉冲序列不做任何处理直接输出, 传输‘1’的时候将 CPRG 的输出脉冲延时一定时间后输出——使 CPRG 输出的脉冲序列包含要传送的二进制信息<sup>[1]</sup>。由于 CPPM 中完成信息调制的延时模块位于 CPRG 的反馈环内, 输入 CPRG 的脉冲间隔时间不但与 CPRG 内混沌映射  $F(\bullet)$  的状态有关, 而且还与信息序列  $S_n$  有关。这样就引入了信息序列  $S_n$  对 CPRG 内混沌系统的不良影响, 例如, 连续发‘1’可能破坏 CPRG 输出脉冲序列间隔的无规则性而导致发散。

为了避免这种发散现象的出现, 本文提出的 CPOOK 方案用两个脉冲来分别表征同步信息和二进制信息。混沌同步信息以 PPM 的方式隐藏在相邻同步脉冲的间隔内, 而二进制信息则通过开关键控的方式调制到载波脉冲序列上。从图 1 可以看出, CPOOK 通过一个开关  $K$  控制 DCPRG 输出载波脉冲的通断来实现信息调制。当传输‘0’的时候, 开关打开, 即当前比特时间内发送的信号仅仅包含同步脉冲而不包含载波脉冲; 当传输‘1’的时候, 开关闭合, 当前的载波脉冲和同步脉冲都将经天线发射出去。经过开关键控调制的载波脉冲序列与同步脉冲序列的叠加构成了信道中传输的信号。

对接收方而言, 接收到的同步脉冲被加载在一个相同的 DCPRG 上, 使得接收方 DCPRG 的输出就与发送方 DCPRG 的输出相同。通过检测接收信号在 DCPRG 输出的预测载波脉冲时间段内是否存在脉冲, 接收机可恢复出数字信息。当收发双方的 DCPRG 不够匹配时就会产生大量误码, 因此 DCPRG 中参数的作用就像是私人密钥。如果一个未经授权的接收机不知道 DCPRG 输出同步脉冲序列的间隔信息, 它就不可能判定某个接收到的脉冲是同步脉冲还是载波脉冲, 因此也就不能判决当前比特对应时间段内接收到的信号是否包含载波脉冲, 无法解调出此刻传送的信息是‘1’还是‘0’。

在收发双方同步的情况下, 接收方知道同步脉冲以及对应的载波脉冲所期望出现的时间或者时间窗。这就允许接收方的输入在除期望脉冲出现的时刻之外所有的时间内均处于锁定状态。因此其它用户就可以利用这段锁定的时间传输各自的信息。为了解码一个比特的信息, 接收机必须从接收到的信号中判决是否有脉冲落在载波脉冲时间窗( $W_c$ )内, 这可以通过在对应的载波脉冲期望出现位置附近的时间窗内

对收到的信号进行积分来实现。图 3 给出了一种适用于 CPOOK 的接收机实现方案。基于收发双方 DCPRG 的同步, 接收机的输入在除同步脉冲和载波脉冲期望出现位置附近的时间窗外的所有时间内都被锁定。载波脉冲时间窗(Wc)内的信号被加载在一个峰值检测器(PD)上。峰值检测器的输出经过一个门限判决器就可以确定发射机发送的信息是‘0’或‘1’。从图 3 可见, 本接收机中不包含 CPM 接收机中的反馈环, 这样就克服了双方混沌系统的同步对解调器判决准确与否的依赖性, 避免了误判决引起的失步, 消除了误差传播, 提高了系统的性能, 增强了系统的实用性。

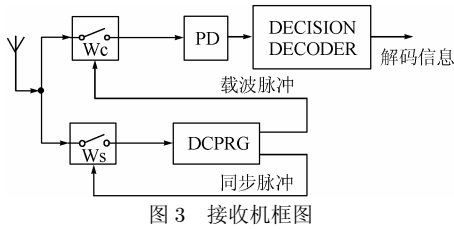


图 3 接收机框图

选择不同的非线性映射  $F(\bullet)$  和  $G(\bullet)$  可以生成完全不同的双路混沌脉冲序列。根据混沌系统对参数和初值的极端敏感性, 在实用中可以选择不同参数的映射或不同初始值的相同映射进行多用户通信。

本文 DCPRG 内的  $F(\bullet)$  和  $G(\bullet)$  是带偏置的 Tent 映射, 即

$$F(t_{n-1}): t_n = \alpha |0.5 - |0.5 - (t_{n-1} - 0.56)| + 0.56$$

$$G(t_{n-1}): c_n = \beta |0.5 - |0.5 - (t_{n-1} - 0.56)| + 0.2$$

式中  $t_n$  表示第  $n-1$  个与第  $n$  个同步脉冲之间的时间间隔,  $c_n$  表示第  $n$  个载波脉冲与第  $n-1$  个同步脉冲之间的间隔。其中取  $\beta \leq \alpha$ , 使得  $c_n < t_n$ , 以保证所有的载波脉冲都位于相邻的同步脉冲之间。当然也可以在满足上述条件的前提下选择其它类型的混沌映射, 诸如 logistic 映射, sine-square 映射等。

### 3 系统性能分析

在理想的条件下(定时精确, 双方混沌系统完全同步), 新系统发射的脉冲序列经接收机窗口  $W_c$  截取后获得的是二元的单极性 PAM 信号。由其误码率性能<sup>[8]</sup>可知, 经最佳接收机解调后 CPOOK 的误码率为  $P_E$ ,  $P_E = Q(E_b/(2N_0))$ 。这比理想条件下 CPM 的误码率差 3dB。

由于在实际情况下 CPM 很难达到精确的定时和双方混沌系统的完全同步(CPM 的接收机存在误判决对同步的破坏和严重的差错传播), 而 CPOOK 则因同步脉冲的引入使双方混沌系统在非理想条件下也几乎完全同步, 所以 CPOOK 的实际误码性能要比 CPM 好很多。

为了便于对 CPM 与 CPOOK 系统在理想和非理想条件下的性能进行比较, 本文对两个系统分别进行了仿真, 具体实现如下。

(1) 通过在发射机的输出端加上高斯白噪声并用一个 FIR 滤波器对信号进行线性预测滤波来模拟信道、发射机和

接收机。仿真中选用的是一个 51 阶的切比雪夫滤波器。

(2) SNR 和比特信噪比用下式测量  $(E_b/N_0)$ <sup>[9]</sup>:  $E_b/N_0 = (S/N)(W/R)$ 。式中  $S/N$  代表 SNR,  $W$  为信道带宽,  $R$  为比特率。由于发射同步脉冲只是为了提高双方混沌系统的同步性能, 即要传输的二进制信息全部包含在载波脉冲上, 所以这里计算的信号功率不包含同步脉冲的功率。

(3) CPOOK 系统中 DCPRG 产生的同步混沌脉冲之间的时间间隔正比于  $t_n = \alpha |0.5 - |0.5 - (t_{n-1} - 0.56)| + 0.56$ ,  $\alpha = 1.76$ , 一个比特时间内同步脉冲与载波脉冲之间的时间间隔正比于  $c_n = \beta |0.5 - |0.5 - (t_{n-1} - 0.56)| + 0.2$ ,  $\beta = 1.31$ , 由 Mikhail 等提出的 CPM 产生的混沌脉冲序列中脉冲间的间隔时间正比于  $x_{n+1} = \gamma |0.5 - |0.5 - x_n || + s_n$ ,  $\gamma = 1.3$ 。

(4) 仿真中使用的参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真实验中的参数设置

参数	CPM		CPOOK	
滤波器截止频率(GHz)	5		10	
脉冲持续时间(ps)	100		50	
窗口大小(ps)	理想情况下	100	理想情况下	Wc: 50 Ws: 50
	非理想情况下	~400	非理想情况下	Wc: 50 Ws: 100
判决门限	脉冲峰值电压的一半		脉冲峰值电压的一半	
平均比特率(Gb/s)	~0.5		~1	
平均符号时间(ns)	~2		~1	
实际符号时间波动范围(%)	50		44	

(5) 图 4 给出的曲线是 20 次仿真结果的平均值。

图 4 给出了 CPM 和 CPOOK 这两个系统在理想 / 非理想条件下仿真得到的误码性能曲线, 从图中不难得到以下结论。

(1) 在理想条件下, 仿真得到的 CPOOK 的 BER 性能(用“理想 CPOOK”表示)比 CPM(用“理想 CPM”表示)差 3dB。这与理论上的分析结果大体一致。

(2) 在非理想的条件下(定时欠精确, 双方混沌系统存在

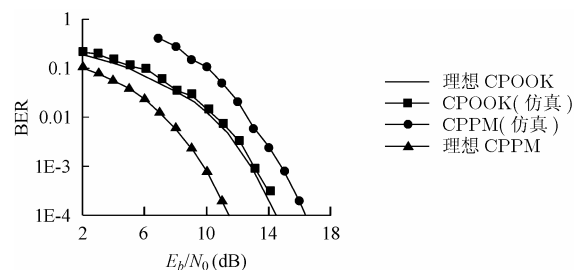


图 4 在理想 / 非理想条件下仿真得到的 CPM 及 CPOOK 的 BER 性能曲线

同步误差), CPPM 系统的仿真性能曲线(用“CPPM(仿真)”表示)比理想 CPPM 差 5dB, 这主要是因为 CPPM 系统很容易受到误码的影响, 存在严重的误差传播。由于 CPOOK 改进了 CPPM 的诸多不足并引入了同步脉冲, 接收机中峰值检测器前窗口  $W_c$  的宽度可以不必取得很大, 等于脉冲持续时间即可。所以图中 CPOOK 的 BER 性能(用“CPOOK(仿真)”表示)与理想 CPOOK 的 BER 性能相差无几, 这显然比 CPPM 要好很多。

实验中还发现, 对于一般在系统中遇到的同步误差, 基于峰值检测的解码器表现很好。而且, 在比特信噪较低的恶劣条件下适当地加大同步脉冲的功率可以提高 CPOOK 双方的同步能力, 从而改善其在非理想条件下的性能, 使其更加接近理想性能。

#### 4 结束语

本文针对 CPPM 系统存在的问题, 提出了 CPOOK 方案, 讨论了该方案的具体实现, 通过仿真对两种系统进行了性能分析和比较。结果表明, 本文提出的方案的实际性能要优于 CPPM 系统。而且新的调制方式降低了传输信号被截获的概率, 进一步提高了通信双方的保密性。同时从电子设计的角度出发, CPOOK 系统在没有太大增加发射机设计复杂性的基础上简化了接收机的实现, 这对于要在户外及室内灵活移动使用的 UWB 设备来说是极具竞争力的。

作者下一步的研究重点将集中在本方案的硬件(FPGA)实现。

#### 参考文献

- [1] Sushchik M, Rulkov N, Larson L, Tsimring L, Abarbanel H, Yao K, and Volkovskii A. Chaotic pulse position modulation: A robust method of communication with chaos. *IEEE Commun. Lett.*, 2000, 4(4): 128-130.
- [2] Porcino D and Hirt W. Ultra-wideband radio technology: Potential and challenges ahead. *IEEE Communication Magazine*, 2003, 41(7): 66-74.
- [3] Win M Z and Scholtz R A. Impulse radio: How it works. *IEEE Commun. Lett.*, 1998, 2(2): 36-38.
- [4] Wu C W and Chua L O. A simple way to synchronize chaotic systems with applications to secure communication systems. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 1993, 3(6): 1619-1627.
- [5] Hasler M. Synchronization of chaotic systems and transmission of information. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 1998, 8(4): 647-659.
- [6] Torikai H, Saito T, and Schwarz W. Multiplex communication scheme based on synchronization via multiplex pulse-trains. in Proc.1998 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Monterey, CA, 1998, vol.4: 554-557.
- [7] Volkovskii A R and Rul'kov N F. Synchronous chaotic response of a nonlinear oscillator system as a principle for the detection of the information component of chaos. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1993, 19(2): 97-99.
- [8] Proakis J G. *Digital Communication*. NY: McGraw-Hill Companies, Inc., 2001, chapter 5.
- [9] Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988, chapter 3.

杨 华: 女, 1980年生, 硕士生, 研究方向为混沌UWB通信技术.

蒋国平: 男, 1966年生, 博士, 教授, 院长, 目前主要研究方向为混沌同步、控制和混沌通信.

邓 萍: 女, 1979年生, 硕士生, 研究方向为CSK和DCSK中的关键技术.