

混沌扩频测距方案研究

何世彪¹, 白洁¹, 罗冬梅¹, 肖利丽²

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆通信学院军事信息工程系, 重庆 400035)

(luodm841027@126.com)

摘要:混沌序列以其相关性好、对初值敏感、保密性强等特性成为直接扩频通信系统中理想的扩频码。为充分发挥混沌序列测距的优点,在分析伪码测距的基本原理基础上,设计了两种混沌扩频测距的方案,利用数字匹配滤波器进行混沌码捕获的方法实现测距,分析了其测距的工作过程、捕获时间和测距精度。通过理论与仿真分析结果表明,利用混沌码作为扩频码实现测距是可行的,且具有高保密性、低截获和适合多目标测距等优点。

关键词:混沌序列;扩频码;伪码测距;捕获时间;测距精度

中图分类号: TN914.4; TP393.01 **文献标志码:** A

Research of chaotic spread spectrum ranging schemes

HE Shi-biao¹, BAI Jie¹, LUO Dong-mei¹, XIAO Li-li²

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Department of Military Information Engineering, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: Chaotic sequence, with its good correlation performance, being sensitive to initial condition and hard to be decrypted, has been used as an ideal spread spectrum code in direct spread spectrum communication system. In order to take full advantages of the chaotic sequences ranging, based on the analysis of the basic principle of the pseudo code ranging and by using the digital matched filter to achieve the chaotic sequences acquisition, two chaotic spread spectrum ranging schemes were designed and their ranging processes, acquisition time and ranging accuracy were analyzed. The results show that taking the chaotic code as the spread spectrum code of ranging is feasible, with the strongpoint of high security, low interception, and it is also suitable for multi-target ranging, etc.

Key words: chaotic sequence; spread spectrum code; pseudo code ranging; acquisition time; ranging accuracy

0 引言

扩频通信的发展是在军事领域随着电子对抗发展起来的。测距是扩频技术最突出的应用。无线电测距在测量距离增大的情况下,反射信号变弱,造成接收困难,为克服这一困难,就必须加大发射信号的功率;增大脉冲雷达信号的峰值功率,会受到设备和器件的限制;加大信号的脉冲宽度,又会降低测距的分辨率;利用连续波雷达测距时,会出现距离模糊问题。而利用扩频技术测距,扩频码序列的长度(周期)决定了测距系统的最大不模糊距离;扩频码序列的速率(码元宽度)决定了测距系统的分辨率。

扩频测控系统的性能主要体现在扩频码上,如何找到理想的扩频码,以保证测控精度的情况下,提高抗干扰和保密性能,是扩频测控领域研究的重点问题。近十多年来,由于非线性理论的发展,混沌理论和应用不断成熟,利用混沌码作为测控尤其是深空测控的扩频码成为可能。混沌码对于初值极为敏感,不同的初值可产生不同的混沌序列,其数量巨大且具有非常高的保密性;同时,由于混沌序列具有类高斯白噪声的特性,其自相关函数具有 δ 函数的形式,而不同混沌序列基本上是互不相关的,其互相关系数非常小,因而有利于多址应用(多目标测控)^[1]。混沌码周期可以做得很长,相关特性尖锐,采用相关检测的方法,使测距抗干扰能力大大增强,测距

精度也得到提高,测量距离也大大增加,因此利用混沌码作为扩频测距的扩频码具有很大的优越性。本文提出了两种混沌扩频测距的方案,并进行了分析和仿真,证明了混沌扩频测距的可行性。

1 伪码测距的基本原理

伪随机序列结合直接序列扩频的思想,非常适合于远距离精确测量,其内在的测距原理是利用序列的优良自相关特性来测量时延^[2]。例如:双向测距系统利用自相关函数的显著峰值来标识伪随机序列传输的起始时刻,而通过处理从目标反射到接收机的信号来识别其终止时刻,假定信号在特定的传输媒介中的传播速度已知,则由时延的测量结果可以很容易地推算出距离。

双向测距系统的框如图1所示。测距站产生一个PN码,然后将该码调制到合适的射频上并向远程测距目标发送,目标接收到的测距信号又反射回测距站。为此,测距目标必须配备一个再生发射机应答器,或者是一个反向发射机应答器。在前一种情况下,接收到的PN码由相关接收机进行跟踪,然后再生并传回测距站。在实际应用中,再生发射应答器可以产生一个与原始测距信号无差错的信号原型。在后一种情况下,反向发射机应答器对接收到的PN信号进行完整的解调,将其带宽限制在码片速率 f_c 的70%左右,再将PN码重新调

收稿日期:2010-09-07;修回日期:2010-10-29。 基金项目:重庆市科委自然科学基金计划资助项目(2007ba2017)。

作者简介:何世彪(1963-),男,安徽安庆人,教授,博士,主要研究方向:宽带无线通信、飞行器测控;白洁(1982-),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:混沌扩频通信;罗冬梅(1984-),女,四川宜宾人,硕士研究生,主要研究方向:混沌扩频通信。

制到射频上并发回测距站。

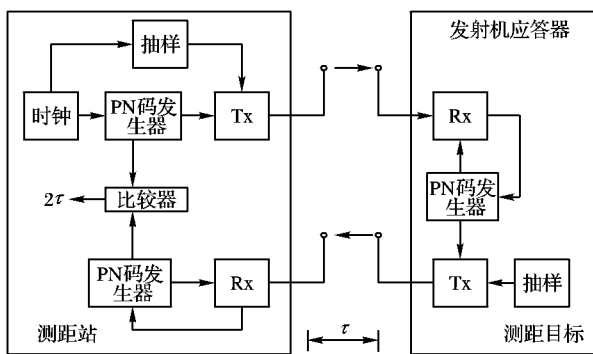


图 1 双向测距系统框图

假设传播速度已知, 则从测距目标到测距站的距离 d 可由 PN 码传播到测距目标并返回测距站的时延 $t_d = 2\tau$ 求得, 即:

$$d = (1/2)ct_d = c\tau \quad (1)$$

其中时延 t_d 可由启动—停止法或相位比较法求得。

对于伪码测距系统,最大的无模糊测量距离,取决于系统可识别的最大时延,它由伪码周期决定。设测距码的周期为 N ,码片时间为 T_c ,则最大无模糊测量距离为:

$$d_{\max} = (1/2)cNT_c \quad (2)$$

其中 c 为光速。最小的可测距离 (即测距精度) 取决于对发送和接收 PN 码之间的相位差的测量精度。假设捕获技术可以得到最小精度为 ΔT_c 的时延, 且 $\Delta T_c < T_c$, 则最小可测距离即误差距离为 $\pm d_{\min}$ 为:

$$d_{\min} = (1/2) c \Delta T_c \quad (3)$$

减小码片的持续时间 T_c 可以提高测量精度,其代价是增大信号的带宽 B 且延长捕获时间,其中 $B \approx 2/T_c$ 。为了使测距精度尽可能高,同时支持尽量大的可测距离,码片的持续时间 T_c 必须很小,而 PN 码的周期 N 必须足够大。

2 混沌序列的产生和同步捕获法

2.1 混沌序列的产生

混沌序列具有非周期、初值敏感、自相关函数尖锐、互相关函数平坦等特点。这里主要利用混沌序列的初值敏感和相关特性,即不同初值或同一初值产生序列的不同部分是不相关的。在工程上,混沌序列通常是通过一个非线性方程进行无数次迭代运算来产生。即根据初值的不同,产生不同的码字。目前常见的混沌序列主要是由 Logistic 映射、Chebyshev 映射、Tent 映射和改进型 Logistic 映射得到的^[3]。

1) Chebyshev 混沌映射, q 阶 Chebyshev 混沌映射定义为:

$$x_{k+1} = \cos (q \arccos x_k); \quad -1 \leq x_k \leq 1 \quad (4)$$

当 q 为 2 的整数次幂时, 系统处于混沌状态, 此时序列的均值为 0, 序列二值化的判决门限 $\varepsilon = 0$ 。

2) 改进型 Logistic 混沌映射定义为:

$$x_{n+1} = 1 - 2x_n^2; \quad -1 < x_n < 1 \quad (5)$$

此时,序列的均值为0,序列二值化的判决门限 $\varepsilon = 0$ 。

3) Logistic 混沌映射定义为:

$$x_{k+1} = rx_k(1 - x_k); \quad 0 < x_k < 1 \quad (6)$$

其中: $1 \leq r \leq 4$, r 为分形参数, 当 $3.5699 \cdots < r \leq 4$ 时, 系统处于混沌状态, 此时, 序列的均值为 0.5, 序列二值化的判决门限 $\varepsilon = 0.5$ 。

4) Tent 混沌映射,其定义为:

$$x_{k+1} = \begin{cases} x_k/a, & 0 < x_k < a \\ (1-x_k)/(1-a), & a \leq x_k \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

当 $0 < a < 1, 0 \leq x_0 \leq 1$ 时, 系统处于混沌状态, 序列的均值为 0.5, 序列二值化门限 $\varepsilon = 0.5$ 。

2.2 混沌扩频码的同步捕获法

混沌同步是目前混沌扩频应用的一个难点,因而在构建混沌测控系统时,主要考虑的是混沌同步的实现。目前较为有效的混沌同步方案有差分混沌键控(Differential Chaos Shift Keying, DCSK)方案^[4]、自同步方案^[5]和匹配滤波器方案^[6],但是前两种同步方案均不适于混沌测距的应用。

对于 DCSK 调制方式,将需要发送的信息分为两段:一段放置混沌序列;而另一段则放置用同一混沌调制序列的信息。此种方式效率低下,对于长码测距应用有相当的困难;另外,由于用于同步的混沌信号同样由发送端发送,经信道传输,两段均受到噪声和干扰的污染,抗干扰性能降低;此种方式对于扩频通信来说应用尚可,而应用于测距则要设计特定的信息结构和复杂的附加电路。

对于自同步方式,当进入接收电路的是混沌序列后,相关特性的增长始终是随着移入码元个数的增加而增长;码元结束时判决虽有最大值,但是当多接收几个伪码或少接收几个伪码对于相关峰值的影响非常小;因而无法准确判决相关峰值,或者说利用此方法进行混沌测距时,测距的误差相当大。

利用匹配滤波器方式实现同步捕获是一种有效的扩频码序列的同步捕获法。匹配滤波器同步捕获法又称为延迟相关捕获法,这种方法首先对接收到的扩频信号作放大、载波解调,解调后的信号被送入 M 级移位寄存器寄存。本地参考扩频码序列按某一相位状态存入另一 M 级寄存器中。因为对这两个寄存器对应位的数据进行模 2 求和后相加(求两序列的相关函数值),当两码序列的相位状态不一致时,所得到的相关值较低。接收扩频码序列再输入下一相位状态,作下一次相位的估值,即将接收扩频码序列在 M 级移位寄存器中作延迟移位,再求该相位状态下的相关值。这样对序列相位逐次延迟移位估值,并作相关求和,当相关求和值输出为最大时,接收扩频码序列的相位与本地参考扩频码序列寄存的相位状态一致,从而实现了扩频码序列的同步捕获。

3 混沌测控方案

本文基于利用数字匹配滤波器进行混沌码捕获的方法, 设计了两种混沌扩频测距的方案。

3.1 脉冲混沌扩频调制测距方案

脉冲混沌扩频调制测距系统如图2所示,图中,混沌产生电路产生非周期的无限长的混沌样值,经二值化后组成混沌序列。混沌序列与测距脉冲进行扩频运算,产生的扩频信号经调制后发往信道。测距脉冲如图3所示。

测距脉冲的宽度 T_B 为混沌序列单个码元宽度的整数倍 (此处假设为 N), 它的取值由两个因素决定: 一是系统所需的扩频增益 (此处为 N); 二是 T_B 取一个适当的值使系统码率受多普勒频移的影响可以忽略。测距脉冲的间隔 T_M 由最大无模糊测距距离决定。测距脉冲可以是周期性的, 也可以是非周期时变的, 总的原则是 T_M 大于最大无模糊距离时电波从测距站到目标一个来回的传输时间。

混沌序列是非周期的,每个测距脉冲内调制测距脉冲的序列(伪码, N 个码片)被存贮,用于匹配滤波器捕获由目标的测距站的脉冲。下一个脉冲到来时,重新存贮 N 个序列,用于下一个周期的匹配滤波器捕获与解调测距脉冲。

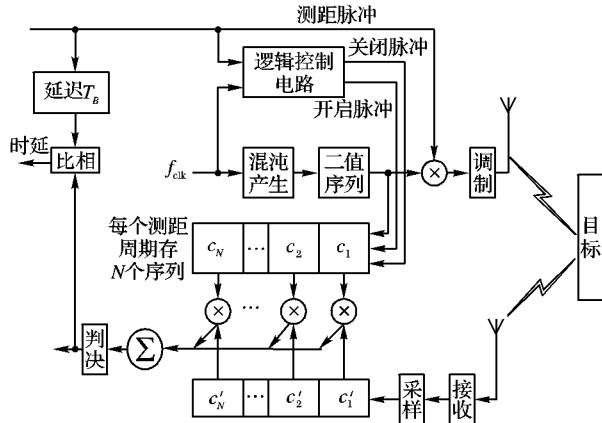


图2 脉冲混沌扩频调制测距方案

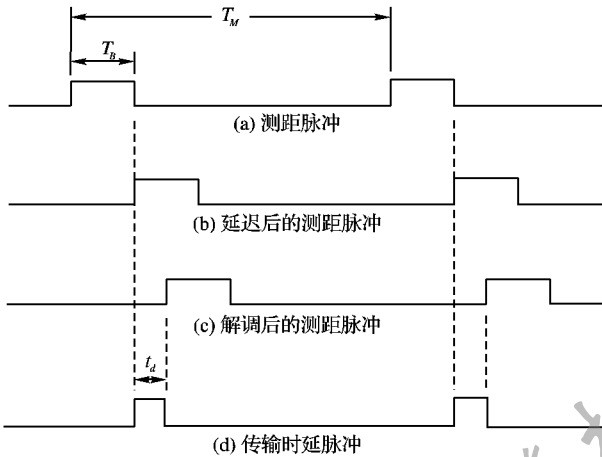


图3 脉冲混沌扩频调制测距工作过程波形示意图

假设混沌序列的码元宽度为 T_c ，每个测距脉冲内含 N 个混沌码片，即 $T_B = NT_c$ 。测距脉冲的周期也是混沌序列的整数倍，即 $T_M = MT_c$ ，要求 $T_M = T_B$ ， $M > N$ 。一般情况下， $M \gg N$ 。由于混沌同步比较困难，因此在每个测距脉冲开始的时候，发送端存储用于调制测距脉冲的 N 个混沌序列 (c_1, c_2, \dots, c_N)。并且在每个测距脉冲的下降沿清零并启动计数器（对混沌产生的驱动时钟计数）。每个测距周期内，采用匹配滤波结构捕获本测距周期内的 c_1, c_2, \dots, c_N 到来；捕获到 c_1, c_2, \dots, c_N 序列到来时，关闭计数器，此时计数器的输出就是这段码字在测距站和目标之间来回传输所耗费的时间。每个测距周期重复上述过程，便可连续跟踪目标的距离变化。

3.2 连续混沌发送测距方案

与脉冲扩频调制方案相类似的方案为连续混沌发送测距方案。该方案是不需要测距脉冲，发送端连续发送调制的混沌序列，用一个选码脉冲，每隔 M 个混沌序列，便存贮这 M 个序列开始的前 N 个混沌序列，使用匹配滤波器结构捕获返回的这 N 个混沌序列，如图4所示。

工作过程如下：混沌序列在码钟的驱动下连续产生混沌样值，经二值化后产生幅值为“+1”或“-1”的二值化序列。该混沌序列可以调制数据，也可不调制数据而直接由载波调制后发往信道。由码钟经选码脉冲产生电路产生一个选码脉冲（如图5(a)所示），其宽度为 $T_B = NT_c$ ，周期为 $T_M = MT_c$ ，一般情况下 $M \gg N$ 。选码脉冲的下降沿锁存移位寄存器，这样就将每周期选码脉冲所涵盖的 N 个混沌码锁存起来，每周期 T_M 换存一次。存贮的 N 个混沌码用于匹配接收。用该选码脉冲的下降沿触发翻转触发器，因而将其经过非门再来触发翻转触发器，触发器的输出如图5(c)所示。调制的混沌信号经目标转发后（透明转发）到达测距站，当发射的混沌码（与存贮的 N 个混沌码相同）全部到达接收的移位寄存器时，得到

相关峰值如图5(d)所示，该相关峰值触发翻转触发器，输出波形如图5(e)所示。两翻转触发器的输出进行异或，便得到一个周期的时延测量脉冲，如图5(f)所示。

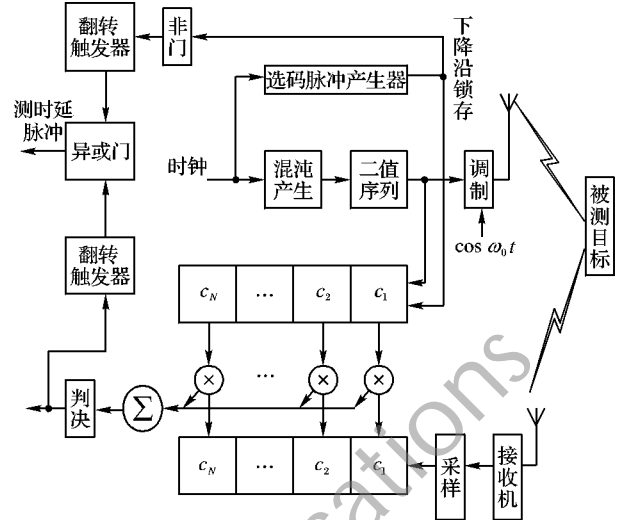


图4 连续混沌发送测距方案

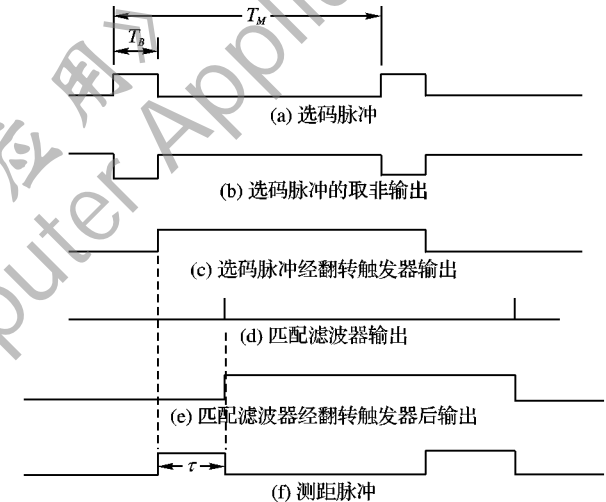


图5 连续混沌发送测距工作过程波形示意图

上述的两种方法在检测概率为1的情况下，最小的捕获时间为 NT_c ，最大的捕获时间为 $2NT_c$ ，而平均的捕获时间为 $1.5NT_c$ 。但这里应用的结构中，不存在从伪码中间接收的情况，因而平均的捕获时间就是 NT_c 。当码长为1023，而码钟为10.23 MHz时，捕获时间（单位为ms）为：

$$1023 \times [1/(10.23 \times 10^6)] \times 1000 = 10^{-4} \times 1000 = 0.1 \quad (8)$$

在同一码钟下，当码长为 2^{20} 时，捕获时间（单位为ms）为：

$$2^{20} \times [1/(10.23 \times 10^6)] \times 1000 = [1024 \times 1024 / (10.23 \times 10^6)] \times 1000 \approx 0.1 \times 1000 = 100 \quad (9)$$

虚警检测和漏检的情况可以根据测距信号的结构，由后端的信号处理算法中予以克服。如：在 MT_c 内没有捕获到接收信号，一定是漏检。而在一个 MT_c 内捕获到多个接收信号，则一定有虚警。根据前后帧的测距情况，结合目标的运动速度可以判断虚警检测的情况。

此方法的测距精度取决于伪码的码率和捕获精度，对于数字匹配滤波器而言，最差的捕获精度为 $T_c/2$ ，此时的测距精度为：

$$d_e = (1/2)c(1/2)T_c = (1/4)cT_c \quad (10)$$

若伪码的码率为10 MHz，则测距精度（单位为m）为：

$$d_e = (1/4) \times 3 \times 10^8 \times [1/(10 \times 10^6)] = 7.5 \quad (11)$$

一般情况下，通过过采样，可以将捕获误差缩短到伪码码元的1/5，则测距精度（单位为m）为：

$$d_e = (1/2) \times 3 \times 10^8 \times (1/5) \times [1/(10 \times 10^6)] = 3 \quad (12)$$

更高的测距精度需要更高的码率或采用其他的提高跟踪精度的方法。对于混沌测距而言,采用传统的伪码跟踪环路是不现实的,因而这方面的技术措施需要进一步研究。

4 方案仿真

为了验证混沌测距的可行性,对连续混沌发送测距方案进行了工作过程仿真,其结果如图6~9所示。仿真时,取 $N=1023$, $M=10\times 1023$,并假设第一个周期内传播时延为 $5115T_c$,第二个周期内传播时延为 $3069T_c$,第三个周期内的传播时延为 $1023T_c$ 。伪码速率取 10.23 MHz 。仿真过程中,考虑到计算量的问题,没有考虑载波调制,而是基带仿真。

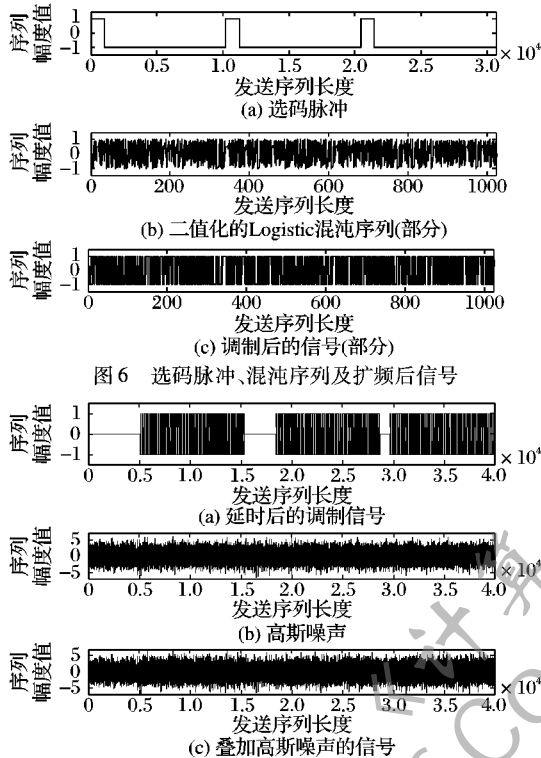


图6 选码脉冲、混沌序列及扩频后信号

发端每隔 MT_c 时间,取该周期的前 N 个混沌码,在选码脉冲的下降沿将此 N 个混沌码锁存在移位寄存器中,同时进行匹配接收,由于匹配接收是在 N 个码元结束时判决,因此将选码脉冲延时 NT_c 后触发翻转触发器,用于与该时刻接收到的伪码比相。当本周期的所有伪码均进入接收移位寄存器后,输出相关峰,此即接收到所发送伪码的时刻。将它经翻转触发器与发送端翻转触发器输出进行异或,得出的脉冲宽度即电波传输一个来回的时间 τ 。

5 结语

本文提出了两种混沌扩频测距方案,方案中扩频码长、检

测周期可灵活设置,从而提高了保密和抗截获性能;在码长特别长的情况下,进行多目标测距,采用数字匹配滤波器方式接收,只要满足扩频增益的要求,测距调制的伪码长度可任意设定(不一定要达到无模糊测距的要求),更方便易行。仿真结果表明利用混沌码作为扩频码实现测距是可行的,混沌扩频测距方案能够满足未来我国深空测距的需要,具有很好的应用前景。

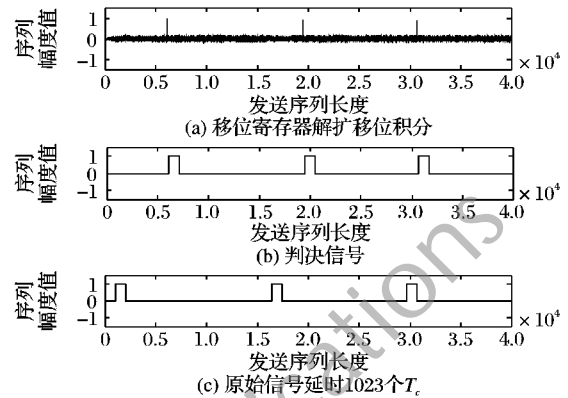


图8 匹配滤波器判决输出及用于比较的发端信号

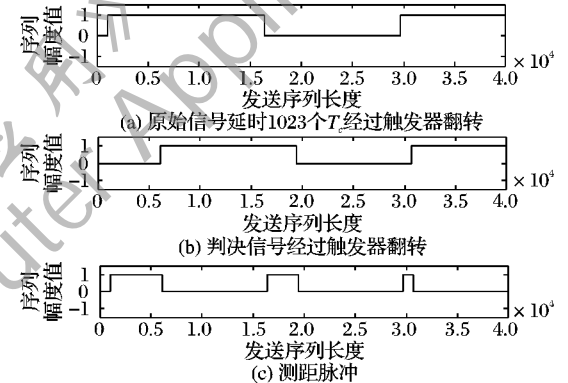


图9 测距脉冲形成过程

参考文献:

- [1] BERNER J B, BRYANT S H, KINMAN P W. Range measurement as practiced in the deep space network [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(11): 2202-2214.
- [2] 高英, 谢有才. 伪码精确测距与测距体制探讨[J]. 飞行器测控学报, 2001, 20(1): 30-35.
- [3] 基于 Chebyshev 映射的混沌序列研究[J]. 计算机工程, 2009, 35(24): 1-3.
- [4] LAU F C M, CHEONG K Y, TSE C K. Permutation-based DCSK and multiple-access DCSK systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2003, 30(50): 733-742.
- [5] PECORA M, CARROL L. Synchronization in chaotic systems [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-823.
- [6] 田日才. 扩频通信[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

(上接第624页)

- [8] HSU S-F, LIN Y-B. A key caching mechanism for reducing WiMAX authentication cost in handoff [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4507-4513.
- [9] PERKINS C E, JOHNSON D B. Route optimization in mobile IP [EB/OL]. [2010-06-20]. <http://ftp.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mobileip-optim-07.txt>.
- [10] TONG S-R, YANG S-H. Buffer control to support a seamless stream handoff in a WLAN that employs simulcast streaming [J]. IEEE

- Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(1): 260-268.
- [11] MAO WANDUI, HE ZHAOFENG, LIU NINGNING, et al. Study on the soft handoff simulation based on received signal strength in CDMA [C]// AICT09: Proceedings of the 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Shanghai: [s. n.], 2009: 145-149.
- [12] MISHRA A, SHIN M, ARBAUGH W. An empirical analysis of the IEEE 802.11 MAC layer handoff process [J]. ACM Computer Communications Review, 2003, 33(2): 93-102.