

# 基于延迟相乘-相关及谱分析的直扩信号检测与符号周期、码片时宽估计分析

董占奇 胡捍英 于宏毅

(信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

**摘要:** 该文基于直扩信号经过延迟相乘处理后表现出的周期性, 提出了一种对直扩信号检测的有效方法——基于延迟相乘-相关及谱分析的直扩信号检测法。计算机仿真显示该方法不但能够适应直扩信号检测的低信噪比要求, 而且能方便地实现对直扩信号符号周期和码片时宽的估计。特别地, 该方法能够在数据采样速率不变的情况下通过增加算法所处理的采样数据长度来提高对符号周期估计的精度, 这在对直扩信号的检测中是非常重要的。

**关键词:** 直扩信号; 延迟相乘; 相关与谱分析; 符号周期; 码片时宽; FFT 增强检测

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0840-03

## The Detection, Symbol Period and Chip Width Estimation of DSSS Signals Based on Delay-Multiply, Correlation and Spectrum Analysis

Dong Zhan-qi Hu Han-ying Yu Hong-yi

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Based on the periodicity that the signals which are gotten by doing delay-multiply with the Direct Sequence Spread Spectral (DSSS) signals, the paper proposes an efficient method for the detection of DSSS signals: the detection, symbol period and chip width estimation of DSSS signals based on delay-multiply, correlation and spectrum analysis. The computer simulations show that it can not only fit the need of the low signal to noise ratio which is quite common in the detection of DSSS signals, but also can give the estimations of the symbol period and chip width in a simple way. Especially, the method proposed in the paper can enhance the precision of the symbol period estimation by increasing the processed sampling data when the sampling rate is fixed, which is very important for the detection of DSSS signals.

**Key words:** DSSS signals; Delay-multiply; Correlation and spectrum analysis; Symbol period; Chip width; Enhancing detection based on FFT

### 1 引言

直扩信号由于具有伪噪声、功率谱密度低、截获概率低等优点而在军事通信和现代商用通信领域得到广泛的应用。一直以来对于直扩信号的检测都是通信信号检测中的一项重要内容, 为了很好地实现对直扩信号的检测, 本文在对直扩信号的延时相乘信号的周期性进行深入分析的基础上, 提出了一种可用于直扩信号检测的好方法——基于延迟相乘-相关及谱分析的直扩信号检测法。

### 2 基本原理

一般地, 直扩信号的基带形式<sup>[1]</sup>可以写为

$$s(t) = d(t)c(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_j \sum_{k=0}^{N-1} c_k g(t - jT_s - kT_c) \quad (1)$$

其中  $d_j, c_k \in \{1, -1\}$ ,  $d_j$  是随机数据序列,  $T_s$  为符号周期,  $c_k (k = 0, 1, \dots, N-1)$  是扩频码的第  $k$  个码片(chip), 其持续时间为  $T_c$ ,  $T_c = T_s / N$ ,  $N$  为直扩系统所用的扩频伪随机序列长,  $g(t)$  为码片波形, 假设为方波。

在式(1)中  $d(t)$  具有随机性, 而扩频码  $c(t)$  是伪随机码, 呈现出周期性, 如果将式(1)所示信号延时  $T_c$  (假设  $T_c$  已知) 与原信号相乘, 则有

$$u_s(t) = d(t)d(t - T_c)c(t)c(t - T_c) \quad (2)$$

对于式(2)来说, 由于在每个数据符号中除了第 1 个码片外其它位置都有  $d(t) = d(t - T_c)$ , 因此  $u_s(t)$  可以视为是扩频伪随机序列的一种相对变换序列串(在这一序列串中对于各个符号周期来说, 除了第 1 个码片外其它元素完全相同)所对应的基带信号。

具体地, 设扩频伪随机序列的相对变换序列为

$$\mathbf{C}_{u_0} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}] \quad (3)$$

其中  $x_0 = c_0$ ,  $x_k = c_k \cdot c_{k-1}$ ,  $1 \leq k \leq N-1$ 。

对应于各个数据符号的相对变换序列为

$$\mathbf{C}_{u_0} = [(d_{j-1} \cdot c_{N-1}) \cdot (d_j \cdot c_0), x_1, \dots, x_{N-1}] \quad (4)$$

此时, 式(2)所示的  $u_s(t)$  即为  $\mathbf{C}_{u_0}$  的周期性重复所得到的信号。对于如此的周期性信号, 考虑到  $T_s \gg T_c$ , 如果忽略每个符号在起始处的随机变化, 那么  $u_s(t)$  将成为一个周期为  $T_s$  的周期信号。由于周期信号的自相关在  $\tau$  等于信号周期

的整数倍时会出现明显的相关峰，因此可以依据此特征通过对式(2)所示信号做自相关处理实现对直扩信号的检测和估计其符号周期<sup>[2]</sup>。

在以上的分析处理中假定  $T_c$  已知，考虑到在实际的直扩信号检测中  $T_c$  一般没有先验知识，此时对式(1)所示的直扩信号作延时相乘处理 ( $0 < t_d$ )，有

$$u'_s(t) = \begin{cases} d(t)d(t-t_d)c(t)c(t-t_d), & (jN+k)T_c < t \leq (jN+k)T_c + t_d \\ 1, & (jN+k)T_c + t_d < t \leq (jN+k)T_c + T_c \end{cases} \quad (5)$$

实际上式(4)所示的相对变换序列和长为  $N$  的全 1 序列的相互交错所组成的序列串，也是一个周期信号(只在  $jNT_c < t \leq jNT_c + t_d$  对应的范围内呈现随机性)。

当  $T_c < t_d \leq 2T_c$  时，

$$u'_s(t) = d(t)d(t-t_d)c(t)c(t-t_d) = \begin{cases} d_j d_{j-1} c_k c_{\text{mod}(N,k-2)}, & (jN+k)T_c < t < (jN+k-1)T_c + t_d, k \leq 1 \\ d_j d_{j-1} c_0 c_{N-1}, & (jN-1)T_c + t_d < t < (jN+1)T_c, k = 0 \\ c_1 c_0, & jNT_c + t_d < t < (jN+2)T_c, k = 1 \\ c_k c_{k-2}, & (jN+k)T_c < t < (jN+k-1)T_c + t_d, k \geq 2 \\ c_k c_{k-1}, & (jN+k-1)T_c + t_d < t < (jN+k+1)T_c, k \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)所示信号也为扩频伪随机序列的一种相对变换序列所对应的基带信号，虽然相对于式(2)所示的信号来说显得复杂，但是它也是一个准周期信号(相对于每个数据符号来说，只在第 1 个码片和第 2 个码片的前  $t_d - T_c$  范围内呈现随机性，其它位置完全相同；特别地，当  $t_d = 2T_c$  时，在前两个码片范围内呈现随机性，此时  $u'_s(t)$  对应的相对变换序列为  $C_{u'_s} = [(d_{j-1}c_{N-2})(d_j c_0), (d_{j-1}c_{N-1})(d_j c_1), x'_2, \dots, x'_{N-1}]$ ， $x'_k = c_k c_{k-2}$ ， $k \geq 2$ 。对之做自相关处理也可实现对直扩信号的检测和估计其符号周期。

当  $2T_c < t_d \leq (N-1)T_c$  时，式(1)所示信号的延时相乘信号也具有一定的周期性，并且其构成特征在一定程度上也和式(6)所示的信号相似，但是其具体情况相对于式(2)，式(5)，和式(6)所示情况来说要复杂些，周期性也随着  $t_d$  的增大而变弱；特别地，在一定意义上讲，只有当  $(N-1)T_c < t_d$  时式(1)所示信号的延时相乘信号才算是具有完全的随机性(当  $t_d = NT_c$  时，对信号做延时相乘处理所得的信号可视为原始数据序列的某种相对变换序列所相应的信号)。因此从理论上讲对直扩信号做延时相乘处理( $t_d$  相对于  $T_s = NT_c$  来说较小)可以得到具有一定周期特性的信号，而对于周期性信号可以

通过自相关分析来发现其基本特征<sup>[2, 3]</sup>。基于此，对于直扩信号的检测可以考虑采用延时相乘-相关分析法。

### 3 噪声环境下延时相乘信号的特征

在第 2 节的分析中，从理论上证明通过对直扩信号做延时相乘和自相关处理实现对直扩信号检测的可行性，在实际的信号检测中由于检测的信号不可避免地含有噪声，所以欲通过延时相乘与自相关处理来检测直扩信号需要对噪声环境下直扩信号的延时相乘信号的相应特性进行研究。

一般地，噪声(加性)环境下的直扩信号可以近似表示为

$$r(t) = d(t)c(t) + n(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_j \sum_{k=0}^{N-1} c_k g(t - jT_s - kT_c) + n(t) \quad (7)$$

其中  $n(t)$  为与  $d_j, c_k$  不相关的零均值噪声。

对式(7)所示的信号做延时相乘(一般地， $t_d \ll T_s$ )有：

$$\begin{aligned} u(t) &= d(t)d(t-t_d)c(t)c(t-t_d) + n(t)d(t-t_d)c(t-t_d) \\ &\quad + n(t-t_d)d(t)c(t) + n(t)n(t-t_d) \\ &= d(t)d(t-t_d)c(t)c(t-t_d) + r'_n(t) \\ &= u'_s(t) + r'_n(t) \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $r'_n(t) = n(t)d(t-t_d)c(t-t_d) + n(t-t_d)d(t)c(t) + n(t)n(t-t_d)$ 。对于式(8)所示的信号  $u(t)$  来说，首先，根据第 2 节的分析知道  $u'_s(t)$  为(准)周期信号；其次，由于信号与噪声互不相关，在前端滤波器带宽不小于  $1/t_d$  时，噪声  $n(t)$  与  $n(t-t_d)$  也不相关，因此  $r'_n(t)$  是均值为 0 的带限白噪声过程，它与  $u'_s(t)$  不相关；所以  $u(t)$  仍为一个周期性信号，可以通过自相关分析来发现其基本特征<sup>[2, 3]</sup>。

### 4 仿真试验

为了验证以上理论分析的可操作性，这里针对以本原多项式  $p(x) = x^5 + x + 1$  所生成的  $m$  序列(-1,-1,-1,-1, 1,-1, 1,-1, 1, 1, 1,-1, 1, 1,-1,-1,-1, 1, 1, 1, 1, 1,-1,-1, 1, 1,-1, 1,-1,-1, 1)为扩频伪随机序列的直扩通信信号，在信噪比为 -10dB 的低信噪比情况下用 Matlab 进行了仿真分析，具体分析结果如图 1 所示。

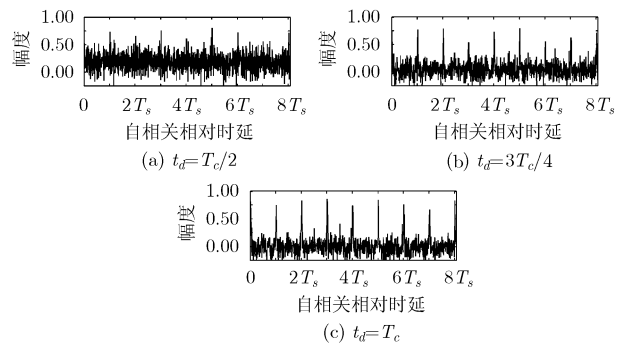


图 1 直扩信号的延时相乘-相关处理结果

由以上的仿真结果可见，通过对直扩信号做延时相乘-相关处理能够在自相关函数的时延参数等于直扩信号的符

号周期的整数倍处获得明显的相关峰,在对直扩信号的检测中可以通过检测此相关峰的存在来实现对直扩信号的检测,并可同时实现对直扩信号符号周期的估计。

特别地,通过对图1所示的3种不同情况进行对比可以发现:对直扩信号做延时相乘处理时时延 $t_d$ 取值的选择对算法的性能有重要的影响,当 $T_c/2 < t_d < T_c$ 时随着 $t_d$ 的增加,算法的检测性能迅速提高,同时自相关函数的取值的“中线”(  $T_s$  的整数倍处除外)逐渐向下偏移并最终停留在“0”线之下的某个位置(这些特征与式(5)所预示的结果一致)。

另外,通过对 $0 < t_d < T_c/2$ 和 $T_c < t_d < NT_c = T_s$ 的情况进行仿真分析,结果发现对于 $T_c/3 < t_d < T_c/2$ 和 $T_c < t_d \leq T_s/2$ 范围内的 $t_d$ 算法基本上都能在不同程度上实现对直扩信号的检测,不过总的来说其性能当 $t_d$ 在 $T_c$ 附近取值时最好。

## 5 基于FFT变换的增强检测与符号周期、码片时宽估计分析

基于本文第4节的分析知道在用延迟相乘-相关分析法来检测直扩信号时只有当 $t_d$ 在 $T_c$ 附近取值时才能得到最好的性能,为了增强本文所提算法对于直扩信号检测的鲁棒性,最大限度地降低算法对于 $t_d$ 取值的依赖性和实现对码片时宽的估计,可以考虑通过对直扩信号的延迟相乘信号的相关执行傅里叶变换的方法来进一步提高算法的性能。图2给出的是对上述直扩信号的延时相乘-相关处理结果的FFT变换的情况。

注:图2中的 $F_c$ 为对式(8)所示信号的采样速率, $F_c = 1/T_c$ 为码片速率, $F_s = 1/T_s$ 为符号速率。

由图2所显示的结果可见:(1)直扩信号的延时相乘信号在经过相关处理和FFT变换后能够在频域得到明显的离散谱线,特别重要的是这些离散谱线分别位于频率等于符号速率的整数倍(相互之间的频率间隔恰好等于符号周期的倒数)以及码片速率(包含可能的整数倍)处,因此可以通过检测这些谱线的有无实现对直扩信号的检测和完成对直扩信号重要参数——符号周期和码片时宽的估计;(2)和对直扩信号进行延时相乘-相关处理一样,时延 $t_d$ 取值的选择对通过延时相乘-相关和FFT变换来检测直扩信号来说影响重大,不过

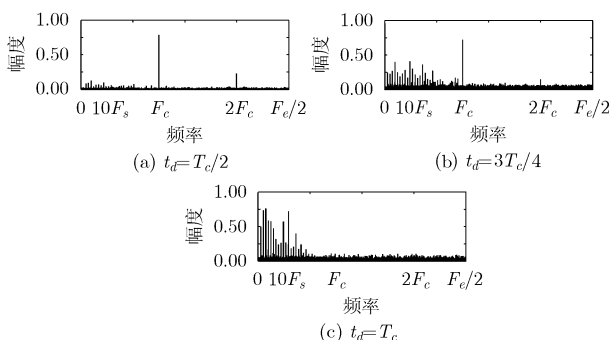


图2 对直扩信号的延时相乘-相关处理结果的FFT变换

不同的是当 $0 < t_d \leq T_c$ 时随着 $t_d$ 的减小,虽然算法对于针对直扩信号符号周期的检测来说性能逐渐变差,但是通过仿真发现在 $t_d < T_c/2$ 的相当范围内算法可以在FFT变换之后的频域中频率等于码片速率处得到明显的离散谱线(在 $T_c/2 \leq t_d < T_c$ 范围内同样也可以得到,只不过是相对应离散谱线的强度随 $t_d$ 的增大而变弱,而这正与图2所显示的及式(5)所预示的结果一致),因此在对直扩信号的检测中即使 $t_d$ 的取值相对于 $T_c$ 来说较小,仍旧可以成功地实现对直扩信号的检测。特别地,将图2所示的结果与图1的结果作比较可以发现,在经过FFT变换处理后,和直扩信号有关的重要特征得到了加强(尤其是和码片时宽有关的信息被凸现),不希望噪声得到了进一步的抑制,这使得对直扩信号的检测和有关参数的估计更易于实现。

顺便地,也是需要着重指出的是,这里所提出的对直扩信号检测的方法——延时相乘-相关与FFT变换法能够在数据采样速率 $F_c$ 不变的情况下通过增加算法处理的采样数据长度来提高对符号周期 $T_s$ 估计的精度,而这在对直扩信号的检测中是非常重要的。

## 6 结束语

本文提出的直扩信号盲检测方法充分利用直扩信号自身的特点,具有对噪声环境中直扩信号检测的鲁棒性,可以在低信噪比环境下实现对直扩信号的检测和完成对直扩信号关键参数——符号周期和码片时宽的估计,它的使用对非协作条件下成功实现对直扩信号的检测具有相当的意义。

## 参考文献

- [1] Viterbi. J. CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication[M]. New York: Addison-Wesley, 1995, Chap.2.
- [2] 林可祥, 汪一飞. 伪随机码的原理与应用[M]. 人民邮电出版社, 北京, 1978, 第4.4节.
- [3] 孟建, 胡来招. 直扩信号检测的相关积累技术[J]. 电子对抗技术, 2001, 16(2): 1-5.
- [4] Kuehls J F and Geraniots E. Presence detection of binary-phase-shift-keyed and direct-sequence spread-spectrum signals using a prefilter-delay-and-multiply device [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8(5): 915-933.
- [5] Hill D A and Bodie J B. Carrier detection of PSK signals [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(3): 487-496.

董占奇: 男, 1973年生, 博士生, 主要研究方向为扩谱技术与低概率信号截获。

胡捍英: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 长期从事移动通信与扩谱技术方面的教学与研究。

于宏毅: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 长期从事数字通信、通信信号处理方面的教学与研究。