

DOI: 10.7652/xjtuxb201702014

抗距离遮挡的雷达相位编码信号设计方法

张威^{1,2}, 杨明磊^{1,2}, 陈伯孝^{1,2}

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安;

2. 西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心, 710071, 西安)

摘要: 为了解决单基站雷达近距离或远距离回波信号接收不全造成的距离遮挡问题,设计了一种抗距离遮挡的新型相位编码信号——截短低旁瓣相位编码信号(TLS 序列)。首先,建立最小化更新序列自相关旁瓣峰值或能量的非线性码元映射关系;然后,随机产生一个短的初始相位编码序列;最后,在此基础上按照所建立的映射关系映射得到具有指定码元数的 TLS 序列,并估计出所得序列集的互相关峰值。仿真结果表明,与 m 序列等传统序列相比,等码元数截取后,TLS 序列在进行脉冲压缩处理后的平均自相关旁瓣峰值约低 5 dB,且所得序列集具有较低的互相关峰值,可用作正交波形。

关键词: 雷达;相位编码;距离遮挡;截短低旁瓣;脉冲压缩;正交波形;互相关峰值

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0084-07

A Design Method of Radar Phase Code Signals for Avoiding Range Eclipse

ZHANG Wei^{1,2}, YANG Minglei^{1,2}, CHEN Baixiao^{1,2}

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding at Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel design method of radar phase code signals truncated with low sidelobes (TLS sequence) for avoiding range eclipse is proposed to solve the range eclipse problem of single base station radars. The range eclipse is caused by the incompletely received echo signals from far or near. Firstly, a nonlinear code mapping relation is established to minimize the autocorrelative sidelobe peak or energy of the updated sequence. Then, a phase code signal with short code-length is randomly generated as an initial sequence. Finally, the established mapping relation is used to obtain the TLS sequence with any given code-length from the initial sequence, and the cross-correlation peak of the resulting sequence set is estimated. Simulation results and comparisons with m-sequence and other well-known sequences show that the average of autocorrelative sidelobe peak of the whole effective sub-signals truncated from a TLS sequence after pulse compression reduces by about 5 dB, and the resulting sequence set has a low cross-correlation peak, which can be used as an orthogonal waveform.

Keywords: radar; phase code; range eclipse; truncated with low sidelobes; pulse compression; orthogonal waveform; cross-correlative peak

在雷达、声呐和基站等无线设备的一些应用中,往往会存在无法利用全部的回波信号进行测距、干扰抑制和信号同步等问题。例如,“收时不发,发时不收”的单基站脉冲体制雷达,通常通过提高发射信号的占空比来增大发射功率,进而提高雷达的探测威力,但高占空比的发射信号会给接收信号带来部分遮挡,相当于对发射信号截短,所以在进行脉冲压缩处理时,会使原本具有良好自相关性能的发射信号的归一化自相关旁瓣迅速增大,非常不利于近距离或远距离目标的检测^[1],即造成距离遮挡。相位编码信号作为一种常用的脉冲压缩信号,具有抗干扰性强、测量精度高以及低截获概率等优点^[2-3]。因此,设计抗距离遮挡的低旁瓣相位编码信号对于提高雷达等无线设备的检测性能具有重要意义。

目前,一般采用3类方法来设计低旁瓣相位编码信号:①采用遗传算法、模拟退火算法等优化算法^[4-8]从随机序列或m序列^[9]、MAC(multimode arbitrary code)序列^[10]等伪随机序列中搜索,但此类序列截短后进行脉压旁瓣较高,即不具有截短低旁瓣特性,难以用于雷达抑制距离遮挡;②通过特殊的代数方法构造^[11-13],由于所用的代数式通常不具备一般性,码元数或码集大小会受到较大限制,该方法不具通用性;③利用相位取值任意的映射关系式逐一映射出序列的每个码元,得到P4序列、混沌序列^[14-15]等,但其相位不受约束,并不适用于要求发射波形相位固定(如二相码、四相码)的雷达系统。

针对上述问题,本文设计了一种相位固定的截短低旁瓣相位编码信号(truncated low sidelobes, TLS序列),将该序列截短后进行脉冲压缩处理仍具有较低的归一化自相关旁瓣,用于雷达系统时可以有效抑制近距离或远距离旁瓣,且相对于发射宽窄结合的脉冲组合信号抗距离遮挡的传统方法,大大降低了雷达系统的复杂度。本文通过推导非线性码元映射关系,将离散序列的多优化问题转化为码元映射问题,可快速映射出相位固定的TLS序列集。理论分析和仿真结果表明,该序列集不仅具有较低的自相关旁瓣,还具有较低的互相关峰值,可作为正交波形,用于多输入多输出雷达系统。

1 信号数学模型

假设一个单基站雷达系统,每个阵元发射相同的恒模相位编码信号 s ,且发射的子脉冲个数为 N ,则 s 可以表示为

$$s = [s_1, s_2, \dots, s_n, \dots, s_N]^T \quad (1)$$

$$s_n = \exp(j\varphi_n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: s_n 是第 n 个码元; φ_n 为 s_n 的相位。假设可用相位数为 M ,则相位取值范围为

$$\varphi_n \in \Phi = \left\{ 0, \frac{2\pi}{M}, 2\frac{2\pi}{M}, \dots, (M-1)\frac{2\pi}{M} \right\} \quad (3)$$

信号 s 的非周期自相关函数为

$$A(s, i, N) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{N-i} s_k s_{k+i}^*, & 0 \leq i < N \\ \sum_{k=1-i}^N s_k s_{k+i}^*, & -N < i \leq 0 \\ 0, & |i| \geq N \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(\cdot)^*$ 表示某复数的共轭。

理想的相位编码信号应具有冲激函数的形式,但实际上不可能达到。因此,设计相位编码信号时,只要求尽可能地降低自相关旁瓣。

本文设计TLS序列,要求该序列截短后仍具有低自相关旁瓣。因此,可分别建立基于最小化自相关旁瓣峰值或能量的优化模型式如下

$$\min \max_{i=1,2,\dots,n-1} |A(s, i, n)|, \quad n_0 \leq n \leq N \quad (5)$$

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} |A(s, i, n)|^2, \quad n_0 \leq n \leq N \quad (6)$$

式中: n_0 为截短序列码元数的最小值。

由式(5)、式(6)可知,要得到TLS序列,需要同时优化从 n_0 到 N 的 $N - n_0 + 1$ 个截短序列。如果采用现有算法^[4-10]同时优化这些截短序列,会大大增加算法复杂度,代价函数难以收敛。

2 TLS序列映射及性能分析

为了得到TLS序列,本文通过码元映射方法求解复杂的多优化问题。在映射过程中,逐一优化每一个有效的截短序列,使设计的目标序列具有截短低旁瓣特性。因此,该映射方法包括2个关键步骤:①推导出基于最小化自相关旁瓣峰值或能量的码元映射关系式;②选取一个合适的初始序列,根据推导的映射关系式,映射出具有任意指定码元数的TLS序列。下文首先将详细推导码元映射关系式;然后给出TLS序列的主要映射步骤,并分析初始序列选取对目标序列设计性能的影响;最后估计所得序列集的互相关峰值。

2.1 码元映射关系式推导

在映射过程中,本文以最小化自相关旁瓣峰值或能量为优化准则,下面推导基于这2种优化准则的非线性码元映射关系式。

为描述方便,将式(1)中 s 的 n 位截短序列记为

$s_n = [s_1, s_2, \dots, s_n]$, $n_0 \leq n \leq N$, 将 s 的 $n+1$ 位截短序列记为 s_{n+1} , 即 $s_{n+1} = [s_n, s_{n+1}]$ 。

按式(4)分别计算 s_n, s_{n+1} 的自相关函数 $A(s_n, i, n)$ 、 $A(s_{n+1}, i, n+1)$, 则存在递推关系式

$$A(s_{n+1}, i, n+1) = \begin{cases} A(s_n, i, n) + s_{n+1-i} s_{n+1}^*, & 1 \leq i \leq n \\ 0, & i > n \end{cases} \quad (7)$$

结合式(7)和自相关函数的共轭对称性, 可得 s_{n+1} 与 s_n 自相关旁瓣能量的递推关系式

$$F(s_{n+1}) = 2 \sum_{i=1}^n |A(s_n, i, n) + s_{n+1-i} s_{n+1}^*|^2 = F(s_n) + 2n + 4 |f(s_n)| \cos(\varphi_f + \varphi_{n+1}) \quad (8)$$

式中: $f(s_n) = \sum_{i=1}^n A(s_n, i, n) s_{n+1-i}^*$; φ_f 为 $f(s_n)$ 的相角; $F(s_n)$ 为当前序列 s_n 的旁瓣能量。当 $\varphi_f + \varphi_{n+1} = \pi$ 时, $F(s_{n+1})$ 取最小值。由于 $\varphi_{n+1} \in \Phi$, 需要对 φ_{n+1} 进行量化, 所以第 $n+1$ 个码元 s_{n+1} 的映射关系式为

$$s_{n+1} = \exp \left\{ j \frac{2\pi}{M} \text{int} \left(\frac{\text{mod}(\pi - \varphi_f, 2\pi)}{2\pi/M} \right) \right\} \quad (9)$$

式中: $\text{mod}(a, b)$ 表示 a 除以 b 取余; $\text{int}(\cdot)$ 表示四舍五入取整。同理可得, 基于最小化自相关旁瓣峰值的码元映射关系式为

$$s_{n+1} = \exp \left\{ j \frac{2\pi}{M} \text{int} \left(\frac{\text{mod}(\varphi_g + \varphi_{n+1-i_m}, 2\pi)}{2\pi/M} \right) \right\} \quad (10)$$

式中: φ_g 是 $g(s_n)$ 的相角; $g(s_n) = A(s_n, i_m, n)$; $|A(s_n, i_m, n)| = \max_{i=1, 2, \dots, n} |A(s_n, i, n)|$; φ_{n+1-i_m} 是 s_n 中第 $n+1-i_m$ 个码元的相位。

非线性码元映射关系式(9)、式(10)将 TLS 序列设计的多优化问题转化为了码元映射问题, 大大减小了计算复杂度, 可据此快速映射 TLS 序列。

2.2 TLS 序列设计步骤及初始序列选取原则

利用码元映射关系设计指定码元数(假设为 N)的 TLS 序列时, 具体的设计原理可以归纳为以下步骤。

(1)产生初始序列: 随机产生一个初始码元数为 n_0 、相位个数为 M 的初始序列, 并记为 s_{n_0} 。

(2)进行初始赋值操作: 将当前序列记为 s_n , 码元数记为 n , 然后令 $s_n = s_{n_0}$, $n = n_0$ 。

(3)映射下一个码元: 先根据当前序列 s_n 计算相角 φ_f 或 φ_g , 再按照式(9)或式(10)映射出 s_{n+1} , 即得到了当前序列的下一个码元。

(4)更新当前序列: 映射一个码元后, 更新当前

序列及其码元数, 令 $s_n = [s_n, s_{n+1}]$, $n = n+1$ 。

(5)终止判定: 如果 $n = N$, 结束映射过程, 并输出目标序列 s_N , 否则重复执行步骤 3~4。

由于映射关系对初始序列敏感^[15], 理论上可映射出大量不同的目标序列。利用该特性可降低目标序列陷入局部最优解的风险, 具体操作步骤为: ①将步骤 1~步骤 5 重复 $U(U \leq M^{n_0})$ 次, 得到 U 个 TLS 序列; ②从中选取自相关旁瓣峰值最小的序列作为最终设计的目标序列。该操作通过牺牲一定的设计效率来保证目标序列的自相关性能, 要求步骤 1 中得到数量大、相似度小的 TLS 序列。因此, 初始序列需要有足够大的取值空间, 才可以通过对初始序列的随机选取映射出大量互不相同的目标序列。可见, 初始序列的选取会影响设计性能, 下面进行具体分析。

初始序列的取值空间是 n_0 个相位码(相位数为 M)所有取值组合的集合, 其大小为 M^{n_0} 。实际上, M 的取值不小于 2, 通常取 2 或 4(分别对应二相码、四相码), 所以 M^{n_0} 的值会随着 n_0 的增长呈指数增长。因此, 初始序列的取值空间主要受 n_0 的影响, n_0 越大, 通过映射关系产生的 TLS 序列的个数也会越多。然而, n_0 的取值不宜过大, 否则单个 TLS 序列的优化次数($N - n_0$)会减少, 代价函数难以收敛, 影响其截短序列的自相关性能, 特别是码元数较少的截短序列。同时, n_0 的取值也不宜过小, 否则 s_{n_0} 的取值灵活度太小, 造成映射的目标序列数量有限, 容易使设计的目标序列陷入局部最优解, 并且难以通过重复搜索改善自相关性能。

因此, 利用映射关系设计 TLS 序列时, 对于初始序列的选取, 要根据目标序列的码元数合理设置 n_0 、 U 的值, 以兼顾设计性能和设计效率。

2.3 序列集互相关峰值估计

如果要将上述映射得到的低自相关旁瓣序列集作为近似正交码集, 还要求该序列集中的任意 2 个序列都具有较低的互相关峰值^[4-5]。

假设设计一个码元数为 N 、信号个数为 L 的 TLS 序列集 $S = [s_1, s_2, \dots, s_L]$, 则 S 的相关函数为

$$C_{p,q}(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{N-i} s_p(k) s_q^*(k+i), & 0 \leq i < N \\ \sum_{k=1-i}^N s_p(k) s_q^*(k+i), & -N < i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $p, q = 1, \dots, L$; $C_{p,q}(i)$ 在 $p \neq q$ 时为互相关函

数, $p=q$ 时为自相关函数。

任意 2 个具有相等码元数的相位编码序列(优化后)的自相关旁瓣能量(分别记为 δ_p, δ_q)近似相等^[16],即

$$\delta_p = \sum_{i=1-N, i \neq 0}^{N-1} |C_{p,p}(i)|^2 \approx \delta_q = \sum_{i=1-N, i \neq 0}^{N-1} |C_{q,q}(i)|^2 \quad (12)$$

并且,任意 2 个相位编码序列的自相关函数和互相关函数存在以下关系^[17]

$$\sum_{i=1-N}^{N+1} |C_{p,q}(i)|^2 = N^2 + \sum_{i=1-N, i \neq 0}^{N-1} C_{p,p}(i)C_{q,q}^*(i) \quad (13)$$

根据 Cauchy 不等式可知

$$\begin{aligned} & \pm \sum_{i=1-N, i \neq 0}^{N-1} C_{p,p}(i)C_{q,q}^*(i) \leq \\ & \left(\sum_{i=1-N, i \neq 0}^{N-1} |C_{p,p}(i)|^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1-N, i \neq 0}^{N-1} |C_{q,q}(i)|^2 \right)^{1/2} \\ & \approx \delta_p \end{aligned} \quad (14)$$

将式(12)、式(13)代入式(14)可得

$$N^2 - \delta_p \leq \delta_{p,q} \leq N^2 + \delta_p \quad (15)$$

式中: $\delta_{p,q} = \sum_{i=1-N}^{N-1} |C_{p,q}(i)|^2$ 。由于优化后的相位编码序列的能量主要集中在主瓣^[17],旁瓣能量较小,因此由式(15)可知, $\delta_{p,q} \approx N^2$ 。记 $c_{\max} = \max_{i=1-N \sim N-1} |C_{p,q}(i)|$,下面根据互相关能量的近似值估计互相关峰值 $c_{\max}$ 。

假设 $|C_{p,q}(i)|$ 服从 $0 \sim c_{\max}$ 的均匀分布^[18],则其分布概率 $P(|C_{p,q}(i)|) = 1/c_{\max}$,因此有

$$\begin{aligned} \delta_{p,q} &= (2N-1) \sum_{|C_{p,q}(i)|=0}^{c_{\max}} |C_{p,q}(i)|^2 P(|C_{p,q}(i)|) = \\ & (2N-1)/c_{\max} c_{\max}^3/3 \approx 2Nc_{\max}^2/3 \end{aligned} \quad (16)$$

因为 $\delta_{p,q} \approx N^2$,所以 $2Nc_{\max}^2/3 \approx N^2$,则可得互相关峰值的估计值

$$c_{\max} \approx (1.5N)^{1/2} \quad (17)$$

当 N 较大时, $(1.5N)^{1/2} \ll N$ 。可见,对于具有低自相关旁瓣能量的序列集,其互相关峰估计值较低,因此可以根据此特性设计近似正交码集。

实际上,自相关旁瓣能量并不能完全忽略,因

此,互相关能量在式(15)所给的范围内浮动,互相关峰值也随之浮动。所以可先设计 U 个($U \gg L$)低自相关旁瓣序列,再从中选取 L 个具有低互相关峰值的序列,作为最终设计的近似正交码集,以改善互相关性能。

3 仿真结果与分析

本文通过仿真实验来验证码元映射方法的有效性,并与遗传算法(genetic algorithm, GA)优化序列、m 序列、MAC 序列等常见序列进行对比。仿真参数:码元时宽为 $1 \mu\text{s}$,采样频率为 1 MHz ,则对信号进行采样后,相对时延的最小间隔为 $1 \mu\text{s}$ 。为了进行对比,在以下仿真实验中,各种序列的码元数、截短码元数、序列个数等参数设置相同,自相关和互相关函数的幅度值都进行了归一化。限于篇幅,现仅给出本文设计的码元数 $N=128$ 的单个 TLS 序列前 20 个码元:0,1,2,3,2,2,0,3,0,2,1,3,3,1,0,1,1,0,0,1。 $L=3, N=40$ 的正交码集见表 1。其中 0、1、2、3 分别表示相位 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, L_1, L_2, L_3$ 分别代表 3 个序列的序列号。

3.1 TLS 序列的自相关性能仿真

为了验证映射方法的有效性,本文设计了上述码元数为 128 的 TLS 序列。选取文献[4-5, 10]设计的等码元数最优序列,分别截取前 40 个码元构成截短序列。由于自相关函数具有共轭对称性,图 1 给出了本文与 3 种文献方法的各个截短序列单边自相关函数的比较结果,本文截短序列的归一化自相关旁瓣峰值(normalized autocorrelation sidelobe peak, NASP) R_{NASP} 为 0.146,相对文献[4-5, 10]的 R_{NASP} (分别为 0.320、0.226、0.300)约降低了 50%。

图 1 所给的 1 次实验结果并不能完全说明问题。为此,本文仿真了多种具有不同截短码元数的序列(原始序列码元数均为 1 500, R_{NASP} 均约为 29 dB),其中包括 TLS 序列、m 序列^[9]、Gold 序列(将任意 2 个等码元数 m 序列相加后模 2 取余)、GA 优化序列^[5]。进行 100 次随机实验,分别计算截短序列(码元数从 50 到 1 450)的 R_{NASP} ,并求得平均 R_{NASP} ,结果如图 2 所示。可知本文设计的 TLS 序列相对于传统序列,等码元数截取后有效截短序列

表 1 本文设计的正交码集($L=3, N=40$)

L_1	1	2	3	1	0	1	3	0	2	3	2	0	0	0	1	0	0	0	2	1	2	3	1	0	2	1	3	2	2	1	1	2	0	2	2	1	1	1	2	3
L_2	3	1	0	2	3	2	0	2	1	0	1	3	0	1	1	1	1	0	3	2	0	3	0	1	1	0	3	1	0	1	0	0	2	2	3	0	1	3	0	
L_3	3	3	1	1	0	3	2	2	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	1	3	2	2	3	0	2	1	0	2	0	1	3	0	2	0	3	1	2	1	0	0

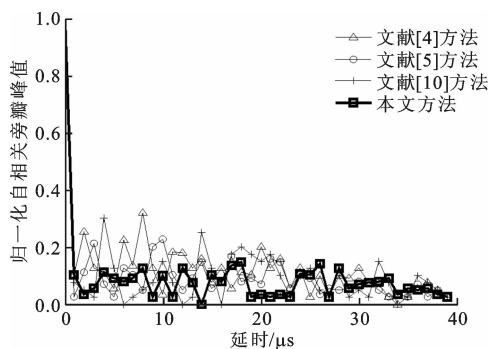


图1 本文与3种文献方法的截短序列单边自相关函数比较

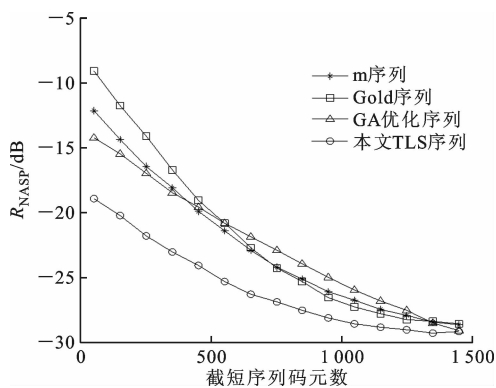


图2 不同序列截短后自相关旁瓣峰值比较

的平均 R_{NASP} 低 5 dB 左右。为了进一步验证映射方法的有效性,按照步骤 1~5 分别随机产生了 50 个不同码元数的 TLS 序列,编号 1~50,并求解其 R_{NASP} ,结果如图 3 所示。可知每次映射均可产生自相关性能较好的相位编码序列,其 R_{NASP} 的绝对差值在 5 dB 范围内。所以通常需要设计多个 TLS 序列,进行优选操作,以提高设计性能。为此,设计了不同码元数的 TLS 序列,分别计算其 R_{NASP} ,并取 1 000 次实验结果中的最好值,与 m 序列^[9]、MAC 序列^[10]、GA 优化序列^[5]中的最好值比较,如图 4 所示。

图 1~图 4 所示的结果说明,本文设计的 TLS 序列相比于现有优化序列,在相同参数条件下不仅

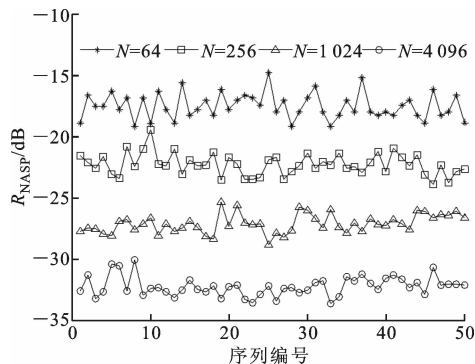


图3 不同码长 TLS 序列的 50 次随机实验结果

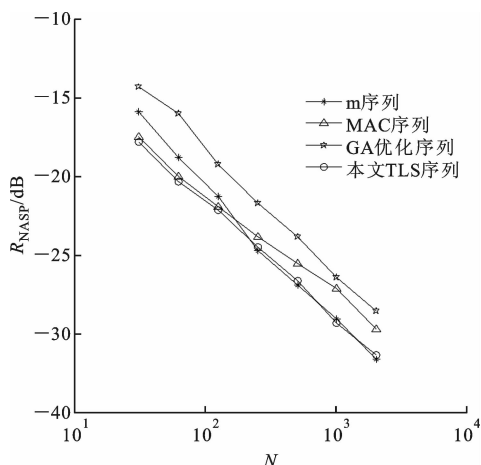


图4 TLS 序列与传统序列的自相关性能比较(未截短)

具有良好的截短低旁瓣特性,同时还具有更低的自相关旁瓣峰值。这是因为本文设计码元数为 N 的相位编码序列时,按式(5)或式(6)约束了包括原始序列在内的所有有效截短序列的旁瓣峰值或能量,而现有方法^[4-10]只考虑优化原始序列,导致所得序列一般不具有截短低旁瓣特性,仅其原始序列(未截短)具有较低的自相关旁瓣。

3.2 初始序列对 TLS 序列的性能影响仿真

初始序列码元数 n_0 是影响初始序列取值空间和目标序列优化性能的关键因素。为了验证 n_0 对整个相位码性能的影响,本文通过设置不同的 n_0 ($n_0=4\sim60$),分别设计了 1 000 个码元数为 512 的 TLS 序列,并通过截短,获得了 1 000 个其他码元数 ($N=32,64,128,256$) 的子序列。计算各序列集的平均 R_{NASP} ,结果如图 5 所示。

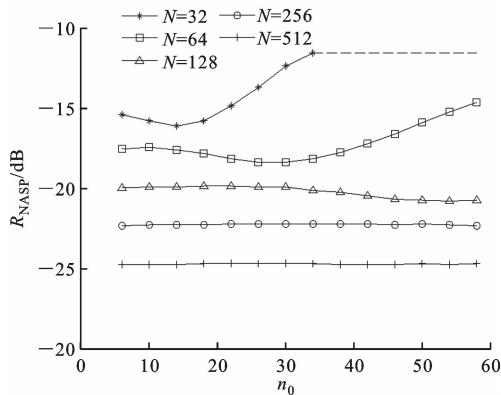


图5 初始序列码元数对自相关性能的影响

图 5 所示的仿真结果说明,短序列的自相关性受初始码元数影响较大,而长序列几乎不受影响。这是因为映射单个目标序列的等效优化次数为 $N-n_0$,映射短序列时,如果 n_0 设置过大,优化次数明显减小,造成优化强度不够,代价函数难以收敛,严

重影响自相关性能,而映射长序列时,由于 n_0 远小于码元数 N ,优化次数变化相对较小,其自相关性几乎不受影响。因此,设计任意码元数的截短低旁瓣序列时,为了保证所有有效截短序列均具有良好的自相关性能,需要合理设置 n_0 ,使之满足 $n_0 < 20$ 。

3.3 TLS 序列集互相关性能仿真

为验证 TLS 序列集具有较好的互相关性能,本文设计了多组 TLS 序列集,表 1 列出了其中一组。图 6 是表 1 中 3 个序列(L_1, L_2, L_3)的归一化自相关函数图(图 6a~图 6c)和归一化互相关函数图(图 6d~图 6f)。表 2 给出了本文与文献[4-6]设计的正交四相码集的 R_{NASP} 和归一化互相关峰值(normalized cross-correlation peak, NCP) R_{NCP} 的比较结果,可知本文所得码集的平均 R_{NASP} 比文献[4-6]的低 1 dB 左右,平均 R_{NCP} 与文献[4-6]的相当,正交性较好。为了避免偶然性,利用本文方法分别产生 1 000 个

表 2 $L=3, N=40$ 时本文与 3 种文献所得正交码集性能比较

方法	文献[4]	文献[5]	文献[6]	本文
R_{NASP}/dB	-16.2	-16.4	-16.1	-17.7
R_{NCP}/dB	-13.9	-13.5	-14.1	-13.8

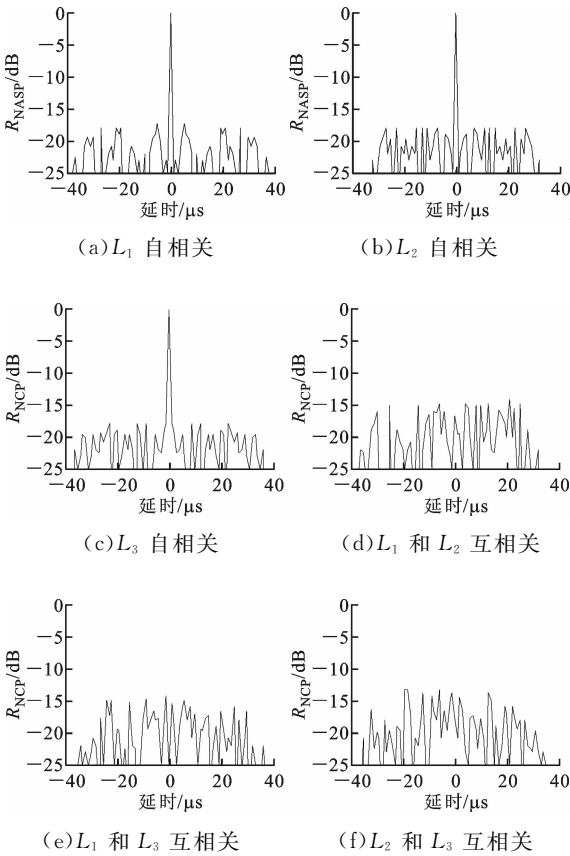


图 6 本文所得序列集的自相关函数和互相关函数图

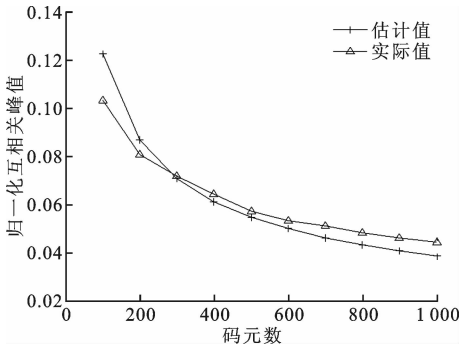


图 7 TLS 序列集的互相关性能仿真

不同码元数的 TLS 序列,并从中选取 3 个构成子序列集,图 7 给出了各个不同码元数的子序列集对应的最优平均 R_{NCP} 及其估计值(按式(17)计算),两者近似相等。

图 6~图 7 表明,本文所得序列集同样具有较低互相关性,可用作近似正交波形。这是因为本文映射得到的序列具有较低的自相关旁瓣,其能量主要集中在主瓣。由式(15)可知,2 个低自相关旁瓣序列的互相关能量近似收敛,根据式(17)可知,这 2 个序列理论上具有较低的互相关峰值。此外,通过在数量较大的 TLS 序列集中搜索低互相关的 TLS 子序列集,进一步降低了互相关峰值,因此,实际仿真值与理论估计值接近。

4 结 论

本文提出了一种新的截短低旁瓣相位编码序列(TLS 序列),分析了其应用场景,推导了非线性码元映射关系,并估计了低自相关序列集的互相关峰值。仿真结果验证了所提映射方法的有效性。相对于现有离散序列,本文设计的序列及其截短序列具有更低的自相关旁瓣,可用于脉冲雷达抗距离遮挡。此外,TLS 序列集还同样具有较好的互相关特性,可作为正交波形集用于多输入多输出雷达、正交组网雷达等。

参考文献:

[1] 王海青,张劲东,李彧晟,等. 准连续波雷达的抗距离遮挡波形优化[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(5): 531-535.
WANG Haiqing, ZHANG Jindong, LI Yusheng, et al. Anti range eclipse waveform optimization method for quasi-CW radar[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012, 26(5): 531-535.
[2] SANANDAJI N, SOLEIMANI M. Pulse compression security enhancement as an electronic protection tech-

- nique by exploiting a block cipher output as phase-code [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(4): 384-391.
- [3] AITTOMAKI T, KOIVUNEN V. Radar waveform sidelobe level optimality and sampling [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 32(3): 371-375.
- [4] DENG H. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(11): 3126-3135.
- [5] LIU B, HE Z S, ZENG J K, et al. Polyphase orthogonal code design for MIMO radar systems [C]// Proceedings of the CIE International Conference on Radar. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 1-4.
- [6] HE H, STOICA P, LI J. Unimodular sequence sets with good correlation for MIMO radar [C]// Proceedings of 2009 IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 1-6.
- [7] 杜晓林, 苏涛, 朱文涛, 等. 一种多输入多输出雷达相位编码信号的设计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 93-99.
DU Xiaolin, SU Tao, ZHU Wentao, et al. A design method for multi-input multi-output radar phase coding signal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 93-99.
- [8] 徐磊磊, 臧会凯, 周生华, 等. 一种相位编码信号及其失配滤波器设计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 54-59.
XU Leilei, ZANG Huikai, ZHOU Shenghua, et al. A design method of phase coded waveform and its mismatched filter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 54-59.
- [9] 何飞, 刘肃, 张立军, 等. 基于遗传算法搜索低旁瓣最大长度序列 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(10): 3629-3631.
HE Fei, LIU Su, ZHANG Lijun, et al. Searching low sidelobes maximal length sequence based on genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(10): 3629-3631.
- [10] 张登银, 王汝传, 王绍棣. MAC序列码雷达信号设计 [J]. 电子与信息学报, 2003, 25(12): 1634-1640.
ZHANG Dengyin, WANG Ruchuan, WANG Shaodi. Design of MAC-sequence-coded radar signal [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(12): 1634-1640.
- [11] 杜晓林, 王旭, 苏涛, 等. MIMO雷达正交相位编码信号的代数设计方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(2): 64-70.
DU Xiaolin, WANG Xu, SU Tao, et al. Orthogonal phase coding signal design for MIMO radar via an algebraic method [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(2): 64-70.
- [12] MA Xiuwen, KANG Baoyuan, CHEN Zhi, et al. New constructions of quaternary low correlation zone sequence sets [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2015, 22(5): 45-48.
- [13] WANG Longye, ZENG Xiaoli, WEN Hong. Families of asymmetric sequence pair set with zero-correlation zone via interleaved technique [J]. IET Communications, 2016, 10(3): 229-234.
- [14] SHEN Dong, ZHANG Linrang, LIU Xin, et al. Orthogonal discrete frequency-phase waveform design based on hybrid chaos for MIMO radar [J]. Advanced Materials Research, 2014, 989: 3621-3624.
- [15] 申东, 张林让, 刘昕, 等. 用混沌序列降低 MIMO 雷达波形自相关旁瓣和互相关 [J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(5): 42-46.
SHEN Dong, ZHANG Linrang, LIU Xin, et al. Reducing the waveform auto-correlation sidelobes and cross-correlation of MIMO radar by using chaotic sequences [J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(5): 42-46.
- [16] LEVANON N, MOZESON E. Radar signals [M]. New York USA: John Wiley & Sons, 2004: 100-160.
- [17] ZOU B, DONG Z, LIANG D N. Design and performance analysis of orthogonal coding signal in MIMO-SAR [J]. Science China Information Science, 2011, 54(8): 1723-1737.
- [18] SOMAINI U. Binary sequences with good auto-correlation and cross correlation properties [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1975, 11(6): 1226-1231.

(编辑 刘杨)