

7-3-2020

## CPCW Design and Performance Analysis for MIMO Radar

Shen Dong

1. *School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*

Li Qiang

1. *School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*

Liu Xin

2. *National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;*

Zhou Yu

2. *National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## CPCW Design and Performance Analysis for MIMO Radar

### Abstract

**Abstract:** Based on the good correlation and random property of chaotic phase coding waveform (CPCW), a method is proposed to increase the target detection performance of multiple-input multiple-output (MIMO) radar with CPCW. CPCW can be generated by uniform quantifying and quadriphase coding for chaotic sequences. *Comparing the correlation property of four kinds of CPCW, the longer Tent phase coding waveform is chosen to increase the target detection performance of MIMO radar, especially for the close small target. Meanwhile, signal processing model is built by CPCW, and multiple pulse compression accumulation can help to reduce the cross-correlation and auto-correlation sidelobes of chaotic waveforms effectively, and then the target detection performance of MIMO radar is increased, especially for the close small target.* Simulation results show the proposed method effectiveness.

### Keywords

MIMO radar, chaotic sequences, phase coding waveforms, targets detection

### Recommended Citation

Shen Dong, Li Qiang, Liu Xin, Zhou Yu. CPCW Design and Performance Analysis for MIMO Radar[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1206-1212.

## MIMO 雷达中的 CPCW 设计及性能分析

申东<sup>1</sup>, 李强<sup>1</sup>, 刘昕<sup>2</sup>, 周宇<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 基于混沌相位编码波形(chaotic phase coding waveform, CPCW)的良好相关性和随机性, 提出了用 CPCW 提高多发多收(multiple-input multiple-output, MIMO)雷达目标检测性能的方法。通过对混沌序列的均匀量化、四相编码得到 CPCW。比较 4 种 CPCW 的相关性, 选取较长的 Tent 相位编码波形提高 MIMO 雷达的目标检测性能, 特别是对相邻弱小目标的检测性能。同时, 基于 CPCW 建立多脉冲压缩累积信号处理模型。该模型能够有效降低混沌波形的互相关和自相关旁瓣, 提高 MIMO 雷达的目标检测性能, 特别是对相邻弱小目标的检测性能。最后的仿真结果表明了该方法的有效性。

**关键词:** MIMO 雷达; 混沌序列; 相位编码波形; 目标检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 05-1206-07

## CPCW Design and Performance Analysis for MIMO Radar

Shen Dong<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>1</sup>, Liu Xin<sup>2</sup>, Zhou Yu<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the good correlation and random property of chaotic phase coding waveform (CPCW), a method is proposed to increase the target detection performance of multiple-input multiple-output (MIMO) radar with CPCW. CPCW can be generated by uniform quantifying and quadriphase coding for chaotic sequences. Comparing the correlation property of four kinds of CPCW, the longer Tent phase coding waveform is chosen to increase the target detection performance of MIMO radar, especially for the close small target. Meanwhile, signal processing model is built by CPCW, and multiple pulse compression accumulation can help to reduce the cross-correlation and auto-correlation sidelobes of chaotic waveforms effectively, and then the target detection performance of MIMO radar is increased, especially for the close small target. Simulation results show the proposed method effectiveness.

**Keywords:** MIMO radar; chaotic sequences; phase coding waveforms; targets detection

## 引言

与标准的相控阵雷达在同一时刻发射单一波形不同, 多发多收(multiple-input multiple-output,

MIMO)雷达通过多个天线发射多个正交波形, 并且使用多天线接收目标回波。这些波形在接收端通过一组匹配滤波器进行提取, 所有匹配滤波器的输出融合在一起来获取想要的信息。

MIMO 雷达最重要的问题之一是如何设计和优化发射波形。有关 MIMO 雷达波形设计的研究一般来说主要针对 3 个方面: 1) 用信息论的方法进行波形优化<sup>[1]</sup>; 2) 发射方向图匹配设计<sup>[2]</sup>; 3) 正



收稿日期: 2014-11-19 修回日期: 2015-01-27;  
基金项目: 甘肃省科技计划(1308RJYA032); 甘肃省高等学校科研项目(2014A-048); 兰州交通大学校青年基金(2014007);  
作者简介: 申东(1980-), 男, 甘肃天水, 博士, 副教授, 研究方向为 MIMO 雷达波形设计。

<http://www.china-simulation.com>

• 1206 •

交波形设计及优化<sup>[3-4]</sup>。MIMO 雷达可以使用二相、多相编码波形, 离散频率编码波形等。文献[3]用模拟退火算法设计了具有低互相关和自相关旁瓣的多相码。基于自相关和互相关函数, 文献[4]用遗传算法设计了近似正交的四相编码波形。

混沌作为一种非线性动力系统, 具有高度的伪随机特性。混沌调相、调频信号具有尖锐的自相关和近似正交的互相关、图钉型的平均模糊函数、平坦的平均功率谱, 是理想的雷达信号。基于混沌信号的新体制雷达是混沌应用于雷达的一个主要方面。针对混沌序列的相关性, 文献[5]得出了一些很有参考价值的研究结论。文献[6-9]则通过常用混沌序列生成二相、四相编码信号、离散频率编码信号、连续调频信号、跳频信号; 同时, 分析研究了混沌信号的脉冲压缩特性、模糊函数、距离分辨率和多普勒分辨率。

文献[3-4]采用全局搜索的方法设计正交波形集, 其相关性优于文献[6-9]中的混沌波形集, 其中, 文献[4]中的波形性能优于文献[3]中的波形性能; 但当波形个数较多或者波形较长时, 往往需要耗费大量的时间。文献[6-9]的波形较文献[3-4]的波形具有良好的抗干扰特性且易于产生。本文比较了 4 种混沌相位编码波形 (chaotic phase coding waveform, CPCW) 的相关性, 通过选取较长的 Tent 相位编码波形提高 MIMO 雷达的目标检测性能; 同时, 建立基于 CPCW 的 MIMO 雷达多脉冲压缩累积信号处理模型。该模型能够有效降低混沌波形的互相关和自相关旁瓣, 从而提高 MIMO 雷达的目标检测性能。综上所述, 将 CPCW 与文献[4]中波形进行比较, 仿真结果表明, 在噪声和杂波背景下 CPCW 的目标检测性能优于文献[4]。

## 1 CPCW 设计及选取

### 1.1 CPCW 设计

CPCW 波形集可表示为:

$$\{s_l(n) = e^{j\phi_l(n)}, n=1, 2, 3, \dots, N\}, l=1, 2, 3, \dots, N_l.$$

其中:  $N_l$  为发射天线个数;  $N$  为子波脉冲个数;

$\phi_l(n)$  是信号集中第  $l$  个信号的第  $n$  个子波脉冲相位。假如每个子波脉冲可选相位个数为  $M$ , 子波脉冲的相位值从以下的相位集中选取:

$$\phi_l(n) \in \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_M\} = \left\{0, \frac{2\pi}{M}, 2 \cdot \frac{2\pi}{M}, \dots, (M-1) \cdot \frac{2\pi}{M}\right\}$$

假定混沌序列的状态空间为  $D=[a, b]$ , 给定初值  $x_l \in D$ ,  $l=1, 2, \dots, N_l$ , 其中,  $N_l$  为 MIMO 雷达系统中的发射天线个数。根据混沌映射  $x_{n+1}=T[x_n]$  可以产生混沌序列  $\{x_l, T(x_l), T^2(x_l), \dots, T^{N-1}(x_l)\}$ ,  $T^n(\cdot)$  表示第  $n$  次映射。在  $D$  内对序列进行均匀量化, 量化级为  $M$ 。根据混沌序列取值所在的区域, 选取相位集中相应的相位, 如式(1)所示:

$$\phi_l(n) = \begin{cases} \psi_1 & a < x_n \leq a + (b-a)/M \\ \psi_2 & a + (b-a)/M < x_n \leq a + 2(b-a)/M \\ \vdots & \\ \psi_M & a + (M-1)(b-a)/M < x_n \leq b \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2 CPCW 的选取

表 1~2 为混沌四相编码波形的自相关旁瓣峰值和互相关随  $B$  和  $N$  的变化特性统计表。由表 1~2 得以下几点结论:

- 1) 自相关旁瓣峰值和互相关峰值随  $N$  的增大而下降;
- 2) Tent, Logistic, Quadratic 四相编码波形的自相关旁瓣峰值随  $B$  值的增大而下降, Bernoulli 四相编码波形的自相关旁瓣峰值很高; 4 种混沌四相编码波形的互相关峰值随  $B$  值的增大而下降;
- 3) 当  $B$  的取值趋近于各自的最大值时, Tent, Logistic, Quadratic 四相编码波形的自相关旁瓣峰值趋于平稳; 而 Bernoulli 四相编码波形的自相关旁瓣峰值有较大波动, 且取值很高。4 种混沌四相编码波形的互相关峰值趋于平稳;
- 4) Tent, Logistic, Quadratic 混沌四相编码波形的自相关特性近似相同, 而 Bernoulli 四相编码波形的自相关特性很差。Tent, Logistic, Quadratic 四相编码波形的互相关特性近似相同, 而 Bernoulli 四相编码波形的互相关特性略差。

5) 总体来看, Tent, Logistic, Quadratic 四相编码波形的相关性较好。是较为理想的 MIMO 雷达发射波形;

6) 表 3 为文献[4]所设计波形的相关性统计表。对照表 3 看到, 当  $N \geq 256$  时, Tent, Logistic, Quadratic 四相编码波形的相关性好于文献[4]中的

波形。由于任意长度 CPCW 的产生非常容易, 而文献[4]中波形的得到需要长时间的搜索, 所以选取较长的混沌四相编码波形作为 MIMO 雷达发射波形, 不论在相关性还是易于产生性方面都优于文献[4]中波形。

表 1 混沌四相编码波形自相关旁瓣峰值随  $B$  和  $N$  的变化特性

$N$		32	64	128	256	512	1 024
序列	$B$						
Tent	1.89	0.281	0.224 3	0.176 2	0.140 2	0.116	0.099 03
	1.99	0.270 8	0.219 9	0.168 6	0.126 9	0.098 32	0.074 06
	1.990 9	0.266 1	0.217 2	0.170 7	0.127 7	0.098 42	0.073 6
	1.999 9	0.270 2	0.217 7	0.166 8	0.128 3	0.097 24	0.074 08
Logistic	3.91	0.326 3	0.292 2	0.259	0.249 8	0.236	0.225 5
	3.99	0.276 5	0.222	0.181	0.136 1	0.104 8	0.088 19
	3.990 9	0.274 4	0.220 6	0.178 7	0.137 4	0.105 4	0.086 6
	3.999 9	0.274 6	0.216 6	0.165 1	0.130 2	0.095 32	0.074 92
Quadratic	0.489	0.301 2	0.237 7	0.196 6	0.166 1	0.142 3	0.136
	0.499	0.271 9	0.218 7	0.169 5	0.129 3	0.101 3	0.074 91
	0.499 09	0.273 9	0.220 9	0.172	0.130 2	0.100 4	0.077 05
	0.499 99	0.277 8	0.212 8	0.165 3	0.129 4	0.095 81	0.073 37
Bernoulli	1.89	0.548 1	0.542 3	0.543 7	0.544 5	0.545 2	0.543 3
	1.99	0.522 6	0.514 9	0.515 1	0.505	0.509 3	0.51
	1.990 9	0.517 4	0.508 6	0.514 8	0.511 2	0.508 3	0.509 1
	1.999 9	0.506 4	0.508 1	0.504 8	0.502 2	0.501 8	0.502 1

表 2 混沌四相编码波形互相关峰值随  $B$  和  $N$  的变化特性

$N$		32	64	128	256	512	1 024
序列	$B$						
Tent	1.89	0.313 3	0.251 2	0.1913	0.149 3	0.114 9	0.089 72
	1.99	0.301 4	0.243 1	0.185 5	0.137 1	0.103 3	0.077 33
	1.990 9	0.307 3	0.238 5	0.184 4	0.139 1	0.104 5	0.077 97
	1.999 9	0.310 5	0.239 7	0.180 4	0.141 5	0.102 5	0.077 57
Logistic	3.91	0.357 5	0.296 4	0.239 4	0.193 3	0.158 5	0.133 5
	3.99	0.309 9	0.250 3	0.189 7	0.140 1	0.107 1	0.080 28
	3.990 9	0.318 1	0.249 4	0.187 6	0.14	0.105 2	0.078
	3.999 9	0.318 4	0.243 7	0.185 1	0.138 5	0.104 1	0.077 65
Quadratic	0.489	0.333 6	0.261 9	0.198 6	0.148 9	0.112 3	0.086 07
	0.499	0.318 3	0.246 9	0.183 5	0.140 1	0.106 9	0.078
	0.499 09	0.315 3	0.243 9	0.183 5	0.138 6	0.105 4	0.077 72
	0.499 99	0.313 7	0.243 3	0.184 1	0.138 4	0.104 4	0.077 08
Bernoulli	1.89	0.376 6	0.289 3	0.225 5	0.174 5	0.131 7	0.098 84
	1.99	0.371 5	0.299 5	0.232	0.173 2	0.130 5	0.100 8
	1.990 9	0.378 6	0.293 4	0.227 2	0.179 8	0.134 7	0.098 61
	1.999 9	0.377 9	0.297 2	0.224 9	0.173 8	0.129 5	0.099 51

表 3 文献[4]设计波形的自相关旁瓣峰值和互相关峰值

	Sequence1	Sequence2	Sequence3	Sequence4
Sequence1	0.145 8	0.223 6	0.182 0	0.213 6
Sequence2	0.223 6	0.150 0	0.201 6	0.195 3
Sequence3	0.182 0	0.201 6	0.134 6	0.230 5
Sequence4	0.213 6	0.195 3	0.230 5	0.158 1

## 2 基于多脉冲压缩累积的混沌信号处理模型

$N_t$  个发射天线,  $N_r$  个接收天线, 第  $i$  个接收天线在第  $j$  个脉冲重复周期的接收信号为:

$$\mathbf{r}_{i,j}^T = \mathbf{g}_i^T \mathbf{S}_j + \mathbf{n}_{i,j}^T \quad (2)$$

这里,  $\mathbf{g}_i^T$  表示目标对于第  $i$  个接收天线的增益矢量,  $\mathbf{g}_i = [g_{i,1}, g_{i,2}, \dots, g_{i,N_t}]^T$ ,  $g_{i,l}$  表示从发射天线  $l$  到接收天线  $i$  的传输增益。  $\mathbf{S}_j = [s_{j,1}^T, s_{j,2}^T, \dots, s_{j,N_t}^T]^T$  表示  $N_t \times P$  的发射波形矩阵。在第  $j$  个脉冲重复周期, 第  $l$  个发射天线发射的信号波形为  $s_l^j = [s_{l,1}^j, s_{l,2}^j, \dots, s_{l,P}^j]^T$ ,  $s_{l,m}^j$  表示  $s_l^j$  的第  $m$  个子脉冲波形,  $P$  表示子脉冲波形个数。  $\mathbf{n}_{i,j}$  表示第  $j$  个脉冲重复周期长度为  $P$  的噪声矢量。在杂波存在环境下, 考虑目标周围有  $C$  个散射点, 接收信号

记作:  $\mathbf{r}_{i,j}^T = \mathbf{g}_i^T \mathbf{S}_j + \sum_{c=1}^C \mathbf{g}_{i,c}^T \mathbf{S}_j + \mathbf{n}_{i,j}^T$ 。

定义  $P \times P$  的平移矩阵  $\mathbf{J}_p$  为<sup>[10]</sup>:

$$\mathbf{J}_p = \mathbf{J}_{-p}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(P-p) \times p} & \mathbf{I}_{P-p} \\ \mathbf{0}_{p \times p} & \mathbf{0}_{p \times (P-p)} \end{bmatrix}$$

同时定义  $(2P-1) \times 1$  的平移矩阵  $\mathbf{K}_p$  为:

$$\mathbf{K}_p = [\mathbf{0}_{1 \times (P-p-1)}, 1, \mathbf{0}_{1 \times (P+p-1)}]^T$$

为提高信噪比, 基于式(2)进行脉冲压缩, 结果为:

$$\mathbf{D}_{i,j}^T = \sum_{p=1-P}^{P-1} [(\mathbf{g}_i^T \mathbf{S}_j) \otimes \mathbf{K}_p] \mathbf{J}_p \mathbf{S}_j^H + \sum_{p=1-P}^{P-1} [\mathbf{n}_{i,j}^T \otimes \mathbf{K}_p] \mathbf{J}_p \mathbf{S}_j^H \quad (3)$$

需要说明的是: 为了简便, 以上忽略了杂波部分, 但这并不影响模型的建立。同时, 在进行仿真时, 杂波并没有被忽略。

对式(3)进行简化, 得到式(4):

$$\mathbf{D}_{i,j}^T = \sum_{l=1}^{N_t} (\mathbf{g}_{i,l} \mathbf{R}_l^j) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{D}_{i,j} = [d_{i,j}^1, d_{i,j}^2, \dots, d_{i,j}^{N_t}]^T$ ,  $d_{i,j}^n$  为匹配滤波器组中第  $n$  个滤波器的输出。需要说明的是: 在进行仿真时噪声并没有被忽略。这里,  $(2P-1) \times N_t$  的矩阵记作:

$$\mathbf{R}_l^j = \begin{bmatrix} R_{l,1}^j(P-1) & R_{l,2}^j(P-1) & \dots & R_{l,N_t}^j(P-1) \\ R_{l,1}^j(P-2) & R_{l,2}^j(P-2) & \dots & R_{l,N_t}^j(P-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{l,1}^j(0) & R_{l,2}^j(0) & \dots & R_{l,N_t}^j(0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{l,1}^j(1-P) & R_{l,2}^j(1-P) & \dots & R_{l,N_t}^j(1-P) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $R_{m,n}^j(p) = \begin{cases} \sum_{l=1}^{P-p} s_{m,l}^j (s_{n,l+p}^j)^*, & 0 \leq p \leq P-1 \\ \sum_{l=1}^{P+p} s_{m,l-p}^j (s_{n,l}^j)^*, & 1-P \leq p < 0 \end{cases}$

假设在  $K$  个脉冲重复周期内目标的雷达反射系数保持不变, 接收天线对  $K$  个脉冲压缩结果进行累积, 结合式(4)得:

$$\mathbf{y}_{i,K}^T = \sum_{j=1}^K \mathbf{D}_{i,j}^T = \sum_{l=1}^{N_t} (\mathbf{g}_{i,l} \sum_{j=1}^K \mathbf{R}_l^j) \quad (6)$$

根据结论: 不同初值混沌波形的自相关旁瓣是不相关的; 不同初值混沌波形的互相关也是不相关的<sup>[11]</sup>; 同时, 结合式(5), 式(6)可知, 累积  $K$  个脉冲压缩结果后, 输出具有较低的旁瓣峰值, MIMO 雷达的目标检测性能得到提高。

## 3 目标检测性能仿真与分析

### 3.1 点目标检测性能仿真与分析

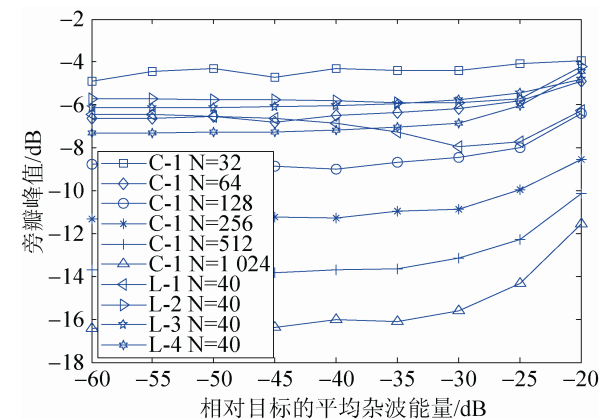
#### 3.1.1 用较长的 CPCW

假定目标场景中有 100 个散射点。定义目标以

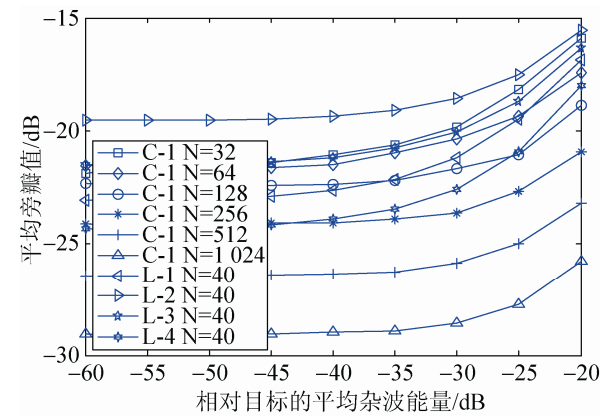
外距离单元散射平均功率和目标散射功率比为：

$$r = \frac{1}{K_\eta |\xi|^2} \sum_{i=1}^{K_\eta} |\eta_i|^2$$

这里， $\xi$  表示目标的散射系数， $\eta_i$  表示目标附近第  $i$  个距离单元散射系数， $K_\eta$  表示  $\eta_i$  的总数，加性噪声是均值为零的高斯白噪声。发射天线个数  $N_t = 4$ ，参照 1.2 中的结论 5)，这里选用 Tent 四相编码波形，图 1 表示文献[4]中波形和 Tent 四相编码波形输出的旁瓣峰值(PSL)的平均和平均旁瓣值(ASL)的平均(100 次蒙特卡罗试验)随  $r$  变化(-60dB 到 -20 dB)的图形，SNR = 30 dB。L- $i$  表示文献[4]中的第  $i$  个波形，C- $i$  表示本文的第  $i$  个波形。



(a) 点目标场景分别对文献[4]中波形和本文波形输出的 PSL 值



(b) 点目标场景分别对文献[4]中波形和本文波形输出的 ASL 值

图 1 4 个发射天线(SNR=30 dB)

仿真结果的说明和分析如下：

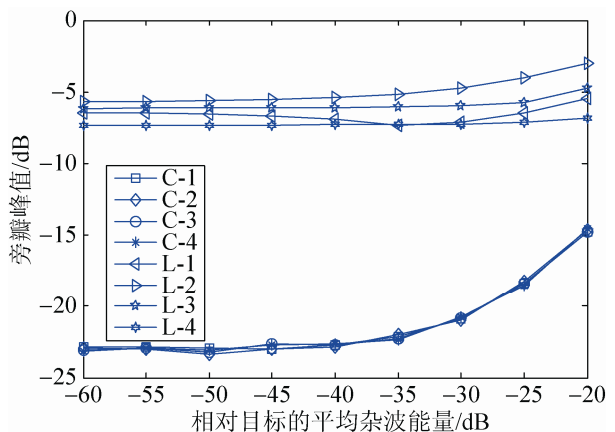
1) 图中只给出了对 C-1 在不同  $N$  取值下的输出(对 C-2, C-3 以及 C-4 的输出与 C-1 类似，为了清晰起见，这里没有列出所有的输出情况)；

2) 使用文献[4]中波形的输出具有较高的 PSL 和 ASL；

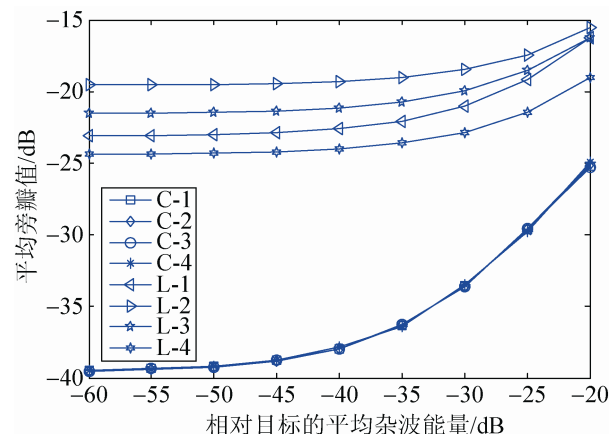
3) 当  $N \geq 128$  时，用 Tent 四相编码波形，其输出较使用文献[4]中波形具有较低的 PSL。当  $N \geq 512$  时，用 Tent 四相编码波形，其输出较使用文献[4]中波形具有较低的 ASL。

### 3.1.2 用多脉冲压缩累积

假定目标场景中有 100 个散射点。同上，这里选用 Tent 四相编码波形，波形长度  $N = 40$ ，与文献[4]中波形长度相同。图 2 表示文献[4]中波形和 Tent 四相编码波形两组波形输出的 PSL 的平均和 ASL 的平均(100 次蒙特卡罗试验)随  $r$  变化的图形， $r$  的变化范围为 -60 dB ~ -20 dB，SNR=30 dB， $K=64$ 。



(a) 点目标场景分别对文献[4]中波形和本文波形输出的 PSL 值



(b) 点目标场景分别对文献[4]中波形和本文波形输出的 ASL 值

图 2 4 个发射天线(SNR=30 dB, N=40, K=64)

图 3 表示文献[4]中波形对 L-1 和 Tent 四相编

码波形对 C-1 输出的 PSL 的平均(100 次蒙特卡罗试验)随  $K$  变化的图形。关于仿真结果的说明和分析如下:

- 1) 文献[4]中波形的输出具有较高的 PSL 和 ASL;
- 2) 混沌波形的输出具有较低的 PSL 和 ASL;
- 3) 当  $K \geq 2$  时,对 C-1 输出的 PSL 小于对 L-1 输出的 PSL 值。

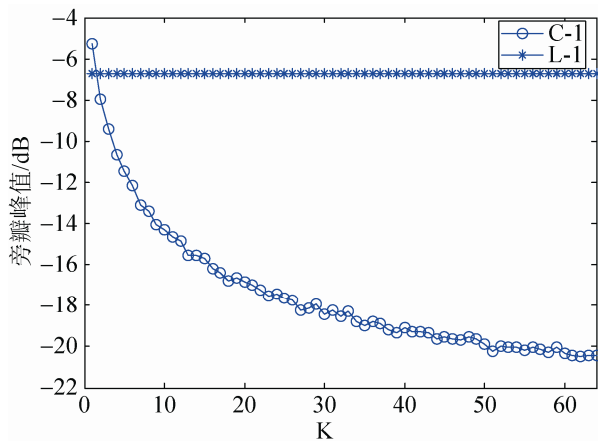


图 3 4 个发射天线,点目标场景分别对 L-1 和 C-1 输出的 PSL 值( $r=-30$  dB, SNR=30 dB,  $N=40$ )

### 3.2 相邻弱小目标的检测性能仿真及分析

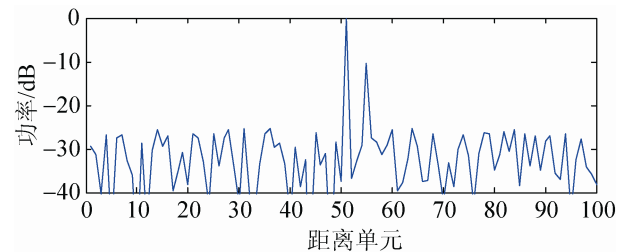
目标经常是成组出现的,具有不同的反射系数。处在大目标附近距离单元内,同时反射系数较大目标小的目标,被称之为相邻弱小目标。目标检测时,小目标有可能被大目标的旁瓣所掩盖,所以,能否分辨相邻弱小目标是衡量一个雷达系统性能的重要标准。本节将讨论用不同波形对相邻弱小目标进行检测时的性能。

#### 3.2.1 用较长的 CPCW

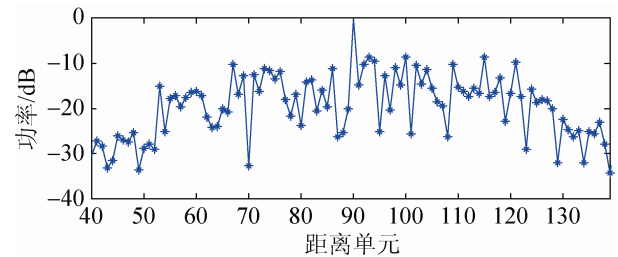
目标场景中有 100 个散射点,这里,小目标处在第 55 个距离单元,大目标处在第 51 个距离单元,二者的幅度增益比值定义为  $\mu$ ,  $r=-30$  dB, SNR = 30 dB。

参照 3.1.1 中的结论 3)和 1.2 中的结论 5), 6), 这里选用 Tent 四相编码波形,波形长度  $N=512$ 。图 4 为文献[4]中波形和 Tent 四相编码波形的目标

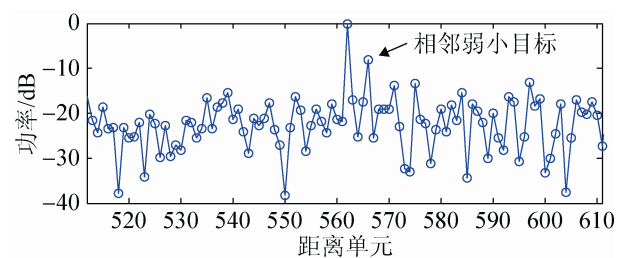
场景脉压输出结果。有以下结论:  $\mu=0.3$  时,文献[4]输出结果的 PSL 超过了小目标所在单元的输出值,而本文波形依然能够有效检测出小目标。弱小目标功率值和旁瓣峰值功率值如表 4 所示,可见,本文波形性能明显优于文献[4]中波形。



(a) 目标场景



(b) L-1 输出( $N=40$ )



(c) C-1 输出( $N=512$ )

图 4 4 个发射天线,相邻目标检测试验 ( $r=-30$  dB, SNR=30 dB,  $\mu=0.3$ )

表 4 弱小目标检测性能比较

输出功率/dB	使用文献[4]中波形	使用本文波形
弱小目标功率	-9.472	-8.014
旁瓣峰值功率	-8.576	-13.21
二者差值	-0.896	5.196

#### 3.2.2 用多脉冲压缩累积

同上,目标场景中有 100 个散射点,大目标处在第 51 个距离单元,另外一个小目标处在第 55 个距离单元。这里选用 Tent 四相编码波形,波形长度  $N=40$ ,与文献[4]中波形长度相同。



$r = -30 \text{ dB}$  ,  $\text{SNR} = 30 \text{ dB}$  ,  $K=64$ 。图 5 为文献[4]中波形和 Tent 四相编码波形的目标场景脉压输出结果。有以下结论： $\mu = 0.2$  时，文献[4]输出结果的 PSL 超过了小目标所在单元的输出值，而本文波形依然能够有效检测出小目标。弱小目标功率值和旁瓣峰值功率值如表 5 所示，可见，本文波形性能明显优于文献[4]中波形。

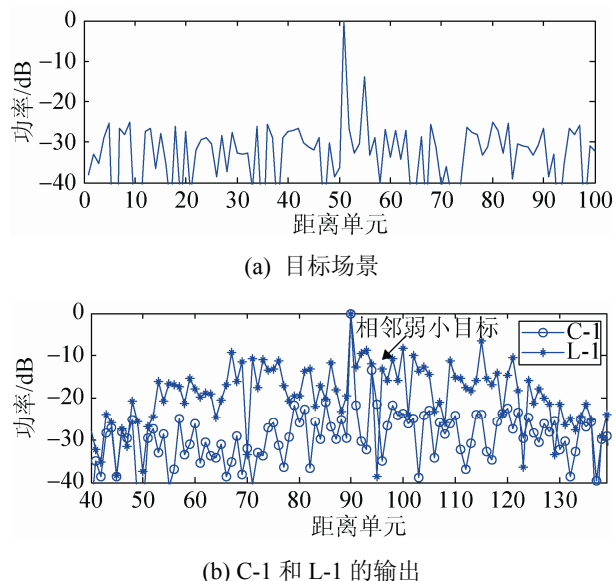


图 5 4 个发射天线，相邻目标检测试验  
( $r=-30 \text{ dB}$ ,  $\text{SNR}=30 \text{ dB}$ ,  $N=40$ ,  $\mu=0.2$ ,  $K=64$ )

表 5 弱小目标检测性能比较

输出功率/dB	使用文献[4]中波形	使用本文波形
弱小目标功率	-11.82	-13.29
旁瓣峰值功率	-6.463	-20.98
二者差值	-5.357	7.69

### 4 结论

本文对 4 种混沌四相编码波形的相关性做了研究：Tent, Logistic, Quadratic 四相编码波形的相关性较好，是较为理想的 MIMO 雷达发射波形。对于点目标和相邻弱小目标的检测，通过用较长的 Tent 四相编码波形，或者用多脉冲压缩累积，都能

够获得较文献[4]中波形更好的检测性能。

### 参考文献：

- [1] Yang Y, Blum R S. MIMO Radar Waveform Design Based on MI and MMSE [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2007, 43(1): 330-342.
- [2] Stoica P, Li J, Zhu X. Waveform Synthesis for Diversity-based Transmit Beam pattern Design [J]. IEEE Trans. on Signal Processing (S1053-587X), 2008, 56(6): 2593-2598.
- [3] Deng H. Polyphase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems [J]. IEEE Trans. on Signal Processing (S1053-587X), 2004, 52(11): 3126-3135.
- [4] Liu Bo, He Zishu, Zeng Jiankui, et al. Polyphase Orthogonal Code Design for MIMO Radar Systems [C]// Proceedings of CIE International Conference of Radar, Shanghai, China. USA: IEEE, 2006: 113-116.
- [5] 陈滨, 刘光祜, 唐军, 等. 相空间法对混沌序列的自相关特性研究 [J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(6): 859-863.
- [6] 蒋飞, 刘中, 胡文, 等. 任意频谱结构的连续混沌跳频雷达波形设计 [J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2195-2198.
- [7] 蒋飞, 刘中, 胡文, 等. 连续混沌调频雷达信号分析 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 559-563.
- [8] Zeng J K. The Application of Chaotic Signal in MIMO Radar [C]// 2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Wuhan, China. USA: IEEE, 2010: 214-216.
- [9] Willsey M S, Cuomo K M, Oppenheim A V. Quasi-orthogonal Wideband Radar Waveforms Based on Chaotic Systems [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2011, 47(3): 1974-1984.
- [10] Song X F, Zhou S L, Willett P. Reducing the Waveform Cross-correlation of MIMO Radar with Space Time Coding [J]. IEEE Trans. on Signal Processing (S1053-587X), 2010, 58(8): 4213-4224.
- [11] 申东, 张林让, 刘昕, 等. 基于混沌序列的MIMO雷达正交多相码波形设计 [J]. 兰州大学学报, 2011, 47(1): 100-105.