

# MIMO 雷达正交混沌调频波形集设计

牛朝阳 李小波

(解放军电子工程学院, 合肥, 230037)

**摘 要:** 正交波形设计是实现 MIMO 雷达的关键技术之一, 目前正交波形设计方法主要多采用统计优化算法, 如模拟退火、遗传算法等, 此类方法主要缺点是算法耗时长、效率低, 且所设计的波形集性能随着波形个数的增加而下降, 针对此问题, 提出一种基于混沌调频的 MIMO 雷达正交波形集设计方法, 采用混沌调频信号作为 MIMO 雷达的发射波形, 利用混沌序列良好的统计特性, 无需寻优处理即可得到性能优越的正交波形集, 且理论上可以得到任意数目的波形而不损失波形集性能, 因此, 该方法在算法效率和波形多样性方面具有优势, 计算机仿真实验验证了设计方法的有效性。

**关键词:** 多输入多输出雷达; 混沌; 频率调制; 正交波形

**中图分类号:** TN95    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2013)03-0394-06

## Design of Orthogonal Waveforms Set for MIMO Radar Based on Chaos Frequency Modulation

NIU Zhao-yang LI Xiao-bo

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The design of orthogonal waveform was one of key technology to realize MIMO radar. Presently, some statistical optimization arithmetic, such as SA (Simulated Annealing) and GA (Genetic Algorithms), was often used to design orthogonal waveforms for MIMO radar. The common flaws of before-mentioned methods were low efficiency and the performance of waveform set should descend along with the increase of the waveform number. So a new method based on chaos frequency modulation signal was proposed to design orthogonal waveform set for MIMO radar. Because of the well statistic characteristic, the good orthogonal waveform set is gotten without using optimization arithmetic. Moreover, the waveform number would not affect the performance of waveform set. So the proposed method has advantage at arithmetic efficiency and waveform diversity. The simulations indicated the validity of the method.

**Key words:** multiple input multiple output radar; chaos; frequency modulation; orthogonal waveform

### 1 引言

MIMO (multiple input multiple output) 雷达采用正交发射波形来实现波形分集, 在发射端不会形成波束, 具有全空域覆盖和低截获概率的优点, 并可在接收端实现信号分离和数字波束形成, 从而获得分集增益, 提

升了 MIMO 雷达性能。正交波形设计是实现 MIMO 雷达的关键技术之一, 成为 MIMO 雷达技术一个研究热点<sup>[1-3]</sup>。对于正交波形设计, 可以通过频分正交来实现, 也可以通过各种编码波形实现。目前对于正交编码波形设计的主要方法有模拟退火算法<sup>[1]</sup>、遗传算法<sup>[2]</sup>以及正交矩阵扰动法<sup>[3]</sup>等。上述基于统计优化算

收稿日期: 2012-08-28; 修回日期: 2012-12-12

法的正交波形集设计方法,虽然可以得到一些性能较好的波形,但是其主要缺点是算法效率低,优化耗时长,而且随着波形数量的增加,波形集相关性能随之变差,因此,研究高效快速的正交波形集设计方法具有现实意义。

正交波形集需要具备两个条件,一是具有良好的脉冲压缩性能,即自相关函数近似于冲击函数,二是波形间应具有尽量低的互相关性。众所周知,噪声具有强随机性,不同噪声的互相关函数接近于零,因此如果用噪声作为 MIMO 雷达发射波形,则只要找到自相关性能好的噪声即可,而不需要考虑波形间的互相关性。实际应用中,为了实现的方便,一般可采用伪随机噪声调制波形,而混沌序列具有较好的随机性能,为此,本文提出一种基于混沌调频(chaos frequency modulation, CFM)的 MIMO 雷达正交波形集设计方法,理论上分析了采用混沌序列频率调制信号作为 MIMO 雷达发射波形的可行性及波形集设计方法,仿真实验表明,本文方法在设计效率和波形多样性方面具有优势。

## 2 信号模型及特性分析

### 2.1 CFM 波形的数学表示

首先给出一般频率调制信号的表达式,令调制信号为  $x(t)$ ,调制系数为  $K$ ,载波为  $A \exp(j\omega_0 t)$ ,则频率调制信号可表示为:

$$s(t) = A \exp [j2\pi f_0 t + j2\pi K \int_0^t x(u) du] \quad (1)$$

调频信号的复包络为:

$$S(t) = A \exp [j2\pi K \int_0^t x(u) du] \quad (2)$$

由于调频波形的相关性能主要与其复包络有关,所以为简化问题,只讨论其复包络部分。对(2)式进行离散化得到:

$$S(n\Delta t) = A \exp [j2\pi K \sum_{u=0}^n x(u) \Delta t] \quad (3)$$

其中  $x(u) = x(u\Delta t)$ ,  $\mu = 0, 1, 2, \dots$  为调制信号的离散采样,  $\Delta t$  为采样间隔。由式(1)可知,调频信号频率范围为:

$$Kx_{\min} + f_0 \leq f \leq f_0 + Kx_{\max} \quad (4)$$

其中  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为调制信号  $x(t)$  的最小值和最大值。根据采样定理,对基带信号进行采样,采样频率应满足:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \geq 2Kx_{\max} \quad (5)$$

将一般离散采样序列  $x(u)$  用混沌序列代替,即得到混沌调频信号,由混沌序列取值范围  $x(u) \in [-1, 1]$  取采用频率为:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = 2K \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{1}{2K} \quad (7)$$

将(7)式代入(3),并令  $S(n) = S(n/2K)$ ,得到离散化 CFM 信号复包络为:

$$S(n) = A \exp [j\pi \sum_{u=0}^n x(u)] \quad (8)$$

### 2.2 CFM 波形相关特性分析

根据模糊函数的定义,CFM 波形的模糊函数为:

$$\chi(m, \nu) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} S(n) S^*(n+m) e^{j2\pi\nu n}, & 0 \leq m < (N-1) \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-m}^{N-1} S(n) S^*(n+m) e^{j2\pi\nu n}, & -(N-1) \leq m < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\nu = f_d \Delta t$  定义为相对多普勒频率。根据模糊函数,容易得到 CFM 波形的距离自相关函数和速度模糊函数分别为:

$$\chi(m, 0) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} S(n) S^*(n+m), & 0 \leq m < (N-1) \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-m}^{N-1} S(n) S^*(n+m), & -(N-1) \leq m < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\chi(0, \nu) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(n) S^*(n) e^{j2\pi\nu n} \quad (11)$$

图 1 给出了两种典型混沌序列即 Logistic 序列和 Tent 序列的 CFM 的模糊函数,序列长度为 200,可以看出,基于两种典型混沌序列的 CFM 波形具有近似图钉型的模糊函数,因而具有较好的速度分辨力和距离分辨力,是一种性能良好的脉冲压缩信号。

混沌调频波形要作为 MIMO 雷达正交发射波形,还要考虑不同波形间的互相关性,令  $S_1(n)$  和  $S_2(n)$  分

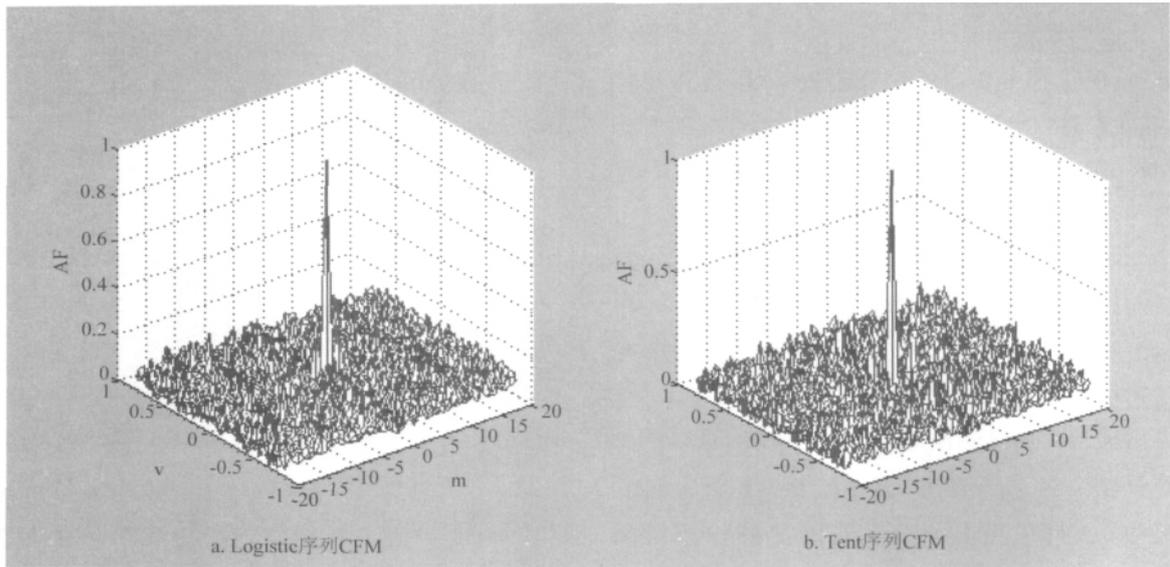


图1 典型混沌序列 CFM 波形模糊函数

Fig. 1 Ambiguity Function of the CFM waveforms

别为某一典型混沌系统取不同初值时产生的两个混沌序列所形成的 CFM 波形, 则根据互模糊函数的定义,  $S_1(n)$  和  $S_2(n)$  的互模糊函数为:

$$\chi_{12}(m, \nu) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} S_1(n) S_2^*(n+m) e^{j2\pi\nu n} & 0 \leq m < (N-1) \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-m}^{N-1} S_1(n) S_2^*(n+m) e^{j2\pi\nu n} & -(N-1) \leq m < 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\nu = f_d \Delta t$  定义为相对多普勒频率。根据互模糊函数, 容易得到 CFM 波形的互相关函数为:

$$\chi_{12}(m, 0) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} S(n) S^*(n+m) & 0 \leq m < (N-1) \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-m}^{N-1} S(n) S^*(n+m) & -(N-1) \leq m < 0 \end{cases} \quad (13)$$

图2给出了两种典型混沌序列取不同初值时 CFM 波形的互相关函数, 序列长度为 1024, 可以看出, 无需特殊设计, 由不同初值混沌序列产生的 CFM 波形就具有较好的互相关性能, 因此 CFM 波形可以应用于正交波形 MIMO 雷达。

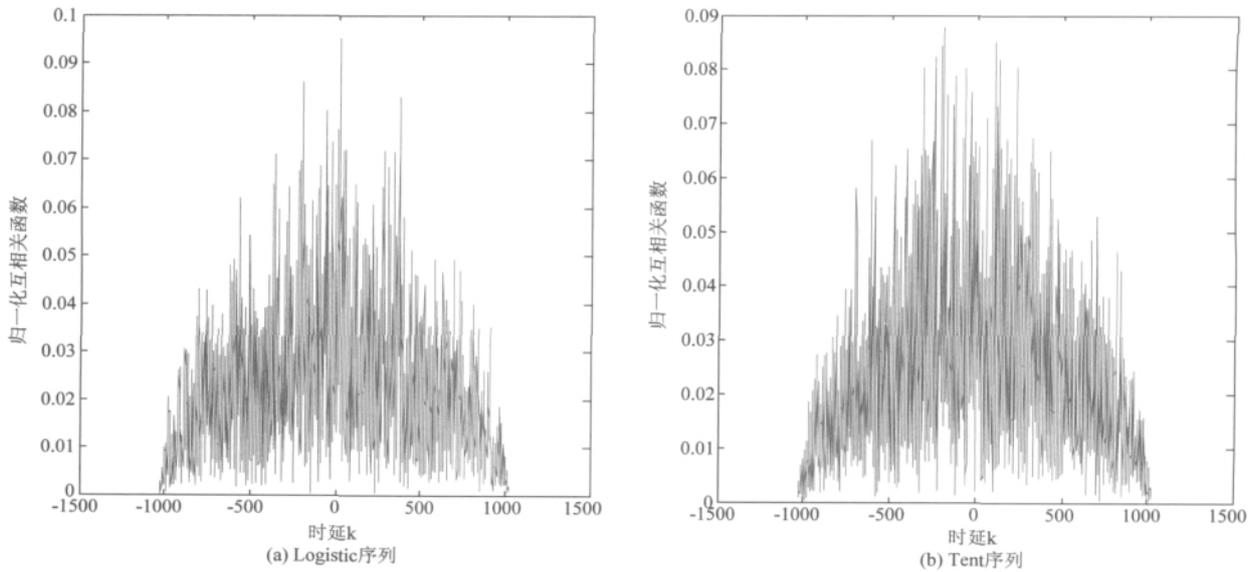


图2 不同初值混沌序列 CFM 互相关函数

Fig. 2 Cross Correlation Function of the CFM waveform

### 3 MIMO 雷达正交 CFM 波形集设计方法

根据前面分析,任选几个初值不同的混沌序列,生成几个 CFM 波形,都可以作为 MIMO 雷达的正交波形集。这种设计几乎是实时的,可以应用在具有波形实时捷变功能的雷达中,从而具有强抗干扰和抗截获性能。如果对波形设计实时性没有要求,允许有充分的离线设计时间,则可以用优选方法进行波形选择,可进一步提高波形集的相关性能。

设波形集中波形数目  $P$ ,每个波形的码长为  $N$ ,基于 CFM 的 MIMO 雷达正交波形集设计方法如下:

(1) 选取某一典型混沌映射,如 Logistic 序列或 Tent 序列;

(2) 随机选择  $P$  个不同初值生成  $P$  个码长  $L_c = 10000$  的混沌序列;

(3) 把(2)中得到的每个混沌序列划分成  $\frac{L_c}{N}$  (取整数)个长度为  $N$  的子序列,并利用(8)式将每个子序列

转换为 CFM 波形的离散复包络序列;

(4) 对每个初值混沌序列所产生的  $\frac{L_c}{N}$  个 CFM 波形,选取其中自相关函数主旁瓣比最大的作为一个优选波形,从而得到  $P$  个 CFM 波形作为 MIMO 雷达正交波形集。

### 4 计算机仿真

仿真 1: 基于 Logistic 序列的 CFM 正交波形集。

Logistic 序列是一种典型的混沌序列<sup>[4]</sup>,本文采用其改进形式设计 CFM 正交波形集,其递推公式为:

$$x(n+1) = 1 - 2x^2(n), x(n) \in [-1, 1]$$

设波形数为  $P=4$ ,码长为  $N=1024$ ,  $L=10240$ 。图 3 和图 4 分别为

波形集自相函数和互相关函数曲线。可以看出,波形集平均自相关峰值旁瓣  $-21.4$  dB,平均互相关峰值为  $-20.1$  dB,波形集相关性能良好,在设计中,如果对单个波形的自相关峰值旁瓣要求不高,则可以不必进行波形优选,这时的设计几乎是实时的,可见,采用 CFM 波形

可以快速高效地设计出性能优越的 MIMO 雷达正交集。

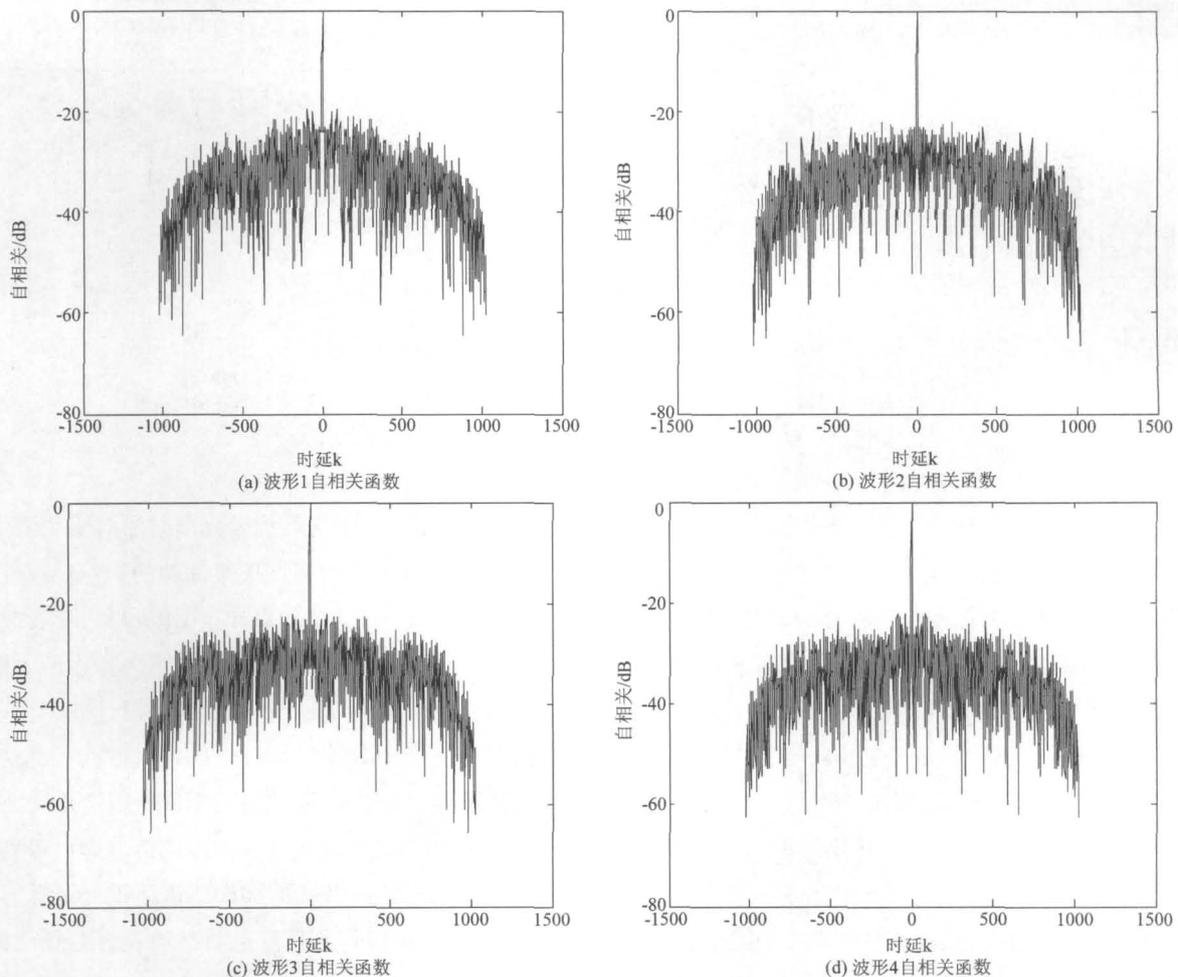


图 3 正交波形集自相关特性

Fig. 3 Autocorrelation of the waveform set

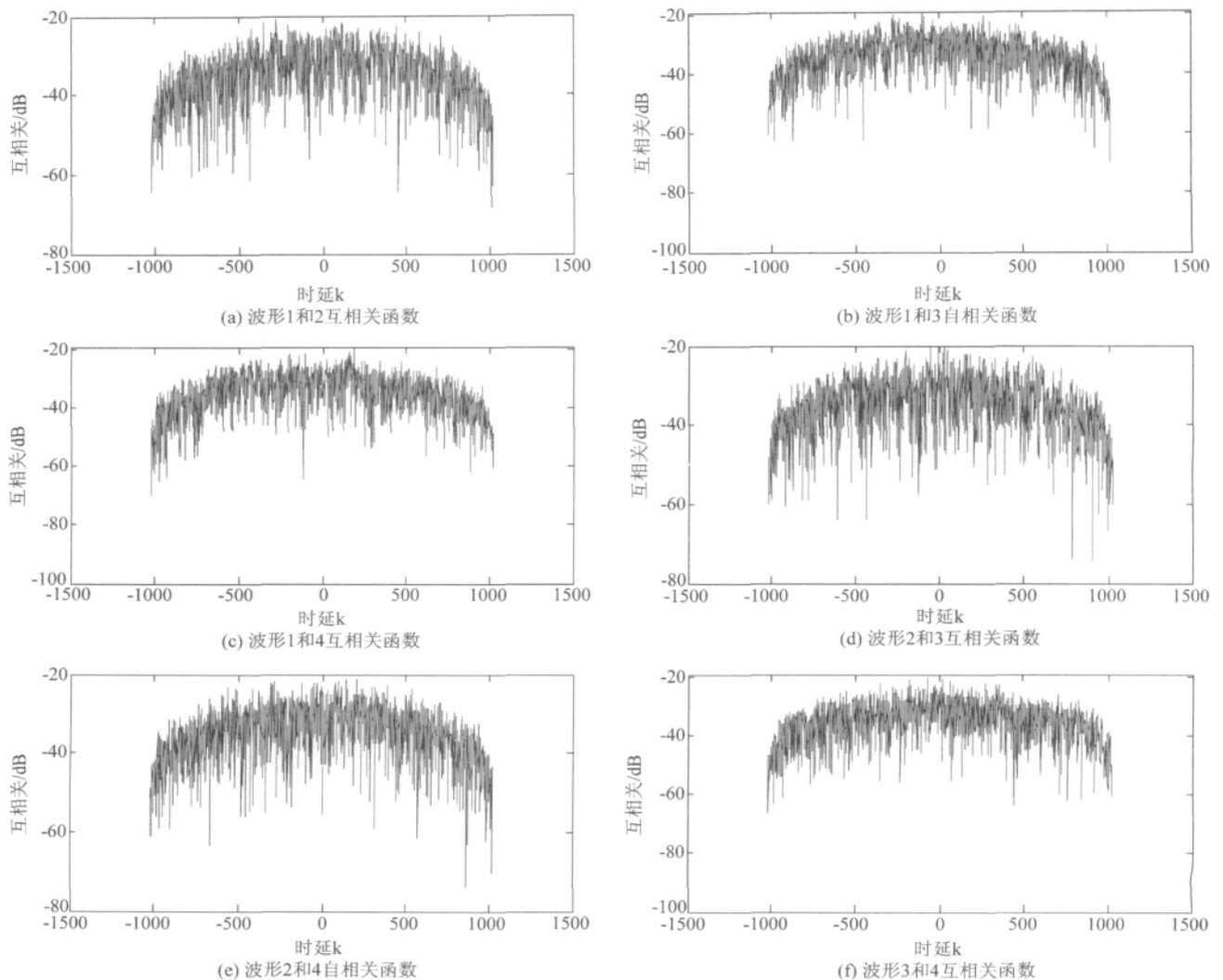


图4 正交波形集互相关特性

Fig. 4 Cross correlation of the waveform set

### 仿真 2: CFM 波形集多普勒性能分析

MIMO 雷达正交波形集中每个波形均属于脉冲压缩波形,当回波信号中有多普勒频移时,脉冲压缩性能会急剧恶化,甚至完全不能实现脉压,此时需要进行多普勒处理。图 5 给出了文献 [1] (DENG 码)、文献 [2] (LIU 码) 和 CFM 波形脉压多普勒损失与相对多普勒频率关系曲线,其中  $T_p$  为脉冲宽度,可见,CFM 波形的多普勒容忍性要好于 DENG 码和 LIU 码。同样,多普勒频移会对波形正交性产生影响,图 6 给出了上述三种波形正交性损失随相对多普勒频移变化曲线,由图可见,多普勒频移对 CFM 波形正交性影响最小,也就是说 CFM 波形正交性对多普勒频移不敏感,这在 MIMO 雷达接收

端利用匹配滤波器组进行信号分离时具有重要意义。

### 仿真 3: 波形个数对波形集性能的影响。

利用随机寻优算法的设计正交波形集,随着波形集中波形个数的增加,波形集相关性能将会逐渐下降<sup>[5]</sup>,且算法耗时会急剧增加,降低了波形设计效率,其根本原因在于波形个数越多,优化自由度就越多,也就越难找到最优解。采用 CFM 波形的 MIMO 雷达正交波形集不存在这种现象,通过改变混沌序列初值即可得到一个新波形,因此,基于 CFM 的 MIMO 雷达正交波形集设计方法,理论上可以得到任意数目性能良好的正交波形,且设计时间不会明显增加。图 7 给出了波形集相关性随波形个数变化曲线,验证了上述结论的正确性。

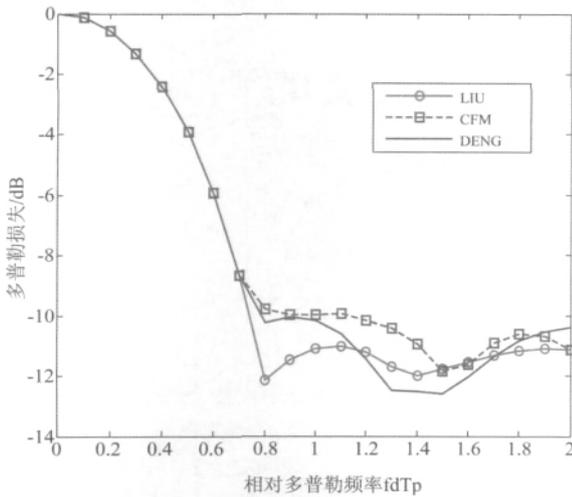


图 5 脉冲压缩多普勒损失  
Fig. 5 Doppler Loss of pulse compressing

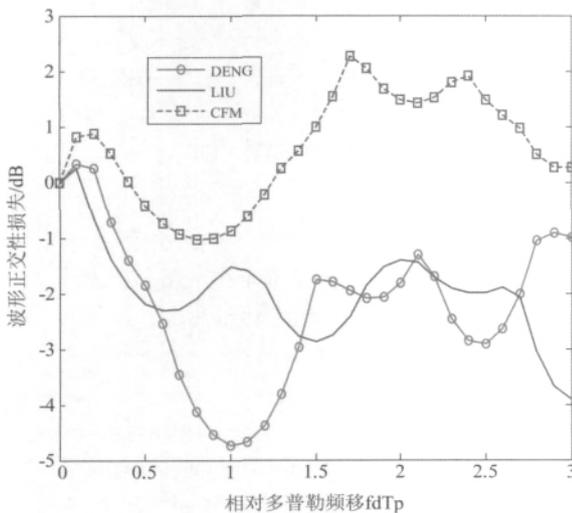


图 6 正交性多普勒损失  
Fig. 6 Doppler Loss of orthogonality

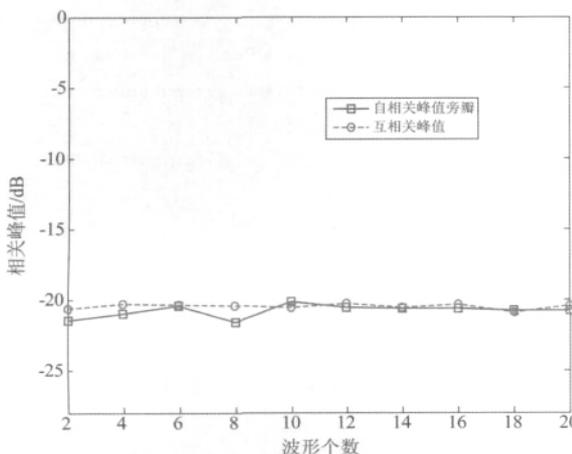


图 7 波形个数与波形集性能关系  
Fig. 7 Relation curve of size vs performance

### 5 结论

针对利用统计寻优算法设计 MIMO 雷达正交波形集存在的算法效率低、耗时长及波形多样性差的问题, 本文提出一种基于混沌调频的 MIMO 雷达正交波形集设计方法, 计算机仿真表明, 该方法利用混沌序列良好的统计特性, 可快速设计出含有任意波形个数的正交波形集, 因此该方法在算法效率和波形多样性方面具有优势, 另外, 本文所设计的 CFM 正交波形集具有更好的多普勒性能。

### 参考文献

- [1] H. Deng. Polyphase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, vol. 52: 3126-3135.
- [2] L. Bo, H. Zishu, Z. Jiankui, L. Benyong. Polyphase orthogonal code design for MIMO radar systems [C]. In Proceedings of 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006, vol. 111: 113-116.
- [3] Namyoon Lee, Joohwan Chun. Orthogonal Pulse Compression Code Design for Waveform Diversity in Multistatic Radar Systems [C]. In IEEE Radar Conference 2008.
- [4] 陈滨, 周正欧, 刘光祜等. 混沌噪声源在噪声雷达中的应用 [J]. 现代雷达, 2008, 5(30): 24-28.  
CHEN Bin, ZHOU Zheng ou, LIU Guang hu, etc. Application of Chaos Series as Noise Source in Noise Radar [J]. Modern Radar 2008, 5(30): 24-28. (in Chinese)
- [5] 刘波. MIMO 雷达正交波形设计及信号处理研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.  
Liu Bo. Research on Generation of Orthogonal Waveform and Signal Processing for MIMO Radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007. (in Chinese)

### 作者简介

牛朝阳 (1977-), 博士, 讲师, 研究方向为 MIMO 雷达相关技术. E-mail: nzy\_2046@yahoo.com.cn  
李小波 (1971-), 博士, 副教授, 研究方向为雷达信号处理。