

## 基于子脉冲 LFM 的 PFES 距离模糊函数栅瓣抑制研究

李雅凤, 贺知明, 陈金梅, 宋江, 陈松林  
(电子科技大学, 成都 611731)

**摘要:** 子脉冲频率编码信号(PFES)在子脉冲宽度大于最小跳频间隔倒数的情况下,其距离模糊函数在中心模糊带内主瓣周围会产生栅瓣。栅瓣不仅影响单目标自身的准确检测,并且强目标栅瓣会对落入其中的弱目标主瓣造成掩盖,使得弱目标漏检。在原有子脉冲频率编码信号的基础上引入了子脉冲线性调频,深入研究并给出了该复合信号参数选取准则,从而达到消除子脉冲频率编码信号距离模糊函数栅瓣的目的,最后仿真验证了此效果。

**关键词:** 雷达; 目标探测; 子脉冲频率编码; 模糊函数; 线性调频; 栅瓣抑制

**中图分类号:** TN951      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)03-0019-05

## Eliminating Grating Lobe of Distance Ambiguity Function for PFES Based on Sub-pulse LFM

LI Ya-feng, HE Zhi-ming, CHEN Jin-mei, SONG Jiang, CHEN Song-lin  
(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The distance ambiguity function of Pulse Frequency Encoding Signal (PFES) has grating lobes around the main lobe, under the circumstance that the width of sub-pulses is larger than reciprocal of minimal frequency hopping gap. Grating lobes not only have bad effect on accurate detection of single target, but also hide the main lobe of weak target when it locates in grating lobes of others, leading to miss detection. In order to eliminate the grating lobes of distance ambiguity function of frequency-coded sub-pulses signal, sub-pulses Linear Frequency Modulation (LFM) was introduced based on the original signal, then parameter choice rules of the composite signal were discussed to achieve that purpose. The effect of the method was verified by using Matlab simulation.

**Key words:** radar; target detection; frequency-coded sub-pulse; ambiguity function; LFM; grating lobe elimination

### 0 引言

雷达是现代战争中重要的目标探测装备,如何充分发挥其作用并保证自身生存是其发展的重点。而低截获概率(LPI)雷达<sup>[1]</sup>作为一种利用特殊发射波形来防止被敌方截获的雷达,在保证自身于电子对抗中生存的同时,又具有主动探测能力,能从本质上使雷达在电子对抗中取得优势<sup>[2-4]</sup>。

子脉冲频率编码信号是一种脉内由跳频图案控制子脉冲载频的雷达波形,具有大时宽带宽特点,峰值功率和功率谱密度较低,是一种脉压 LPI 信号,同时具有

LPI 性质和较好的探测能力。

雷达信号分析和波形设计主要通过模糊函数进行,在低截获雷达中,常采用子脉冲频率编码信号,这种信号传统的设计是子脉冲宽度等于最小跳频间隔倒数,这种情况下其距离模糊函数在中心模糊带内主瓣周围不会产生栅瓣,但是子脉冲宽度必须和最小跳频间隔倒数相等,其约束性较强导致设计性较弱,灵活性较差。

子脉冲频率编码信号在子脉冲宽度大于最小跳频间隔倒数时,两者之间的相关性减弱,约束性减弱,子脉冲宽度的选择性增强,从而提高系统的设计性和灵活性。但是其模糊函数零多普勒切割(距离模糊函数)在主瓣周围出现栅瓣,影响目标检测,因此需要对其进行抑制。2003年,NADAV L 通过引入脉内线性调频(LFM)来抑制步进频率脉冲信号模糊函数栅瓣<sup>[5-6]</sup>,

收稿日期:2015-03-16      修回日期:2015-04-21

基金项目:装备预研基金(9140A07030213DZ02097)

作者简介:李雅凤(1989—),女,河北衡水人,硕士生,研究方向为信号与信息处理。

具有较好效果。

针对这种情况,本文先研究了子脉冲频率编码信号距离模糊函数栅瓣的产生机理,然后尝试在原子脉冲频率编码信号的基础上引入脉内 LFM,研究复合信号的距离模糊函数,提出能够消除栅瓣的复合信号参数选取方法,最终通过模糊函数原始定义对该方法的效果进行了仿真验证。

### 1 子脉冲频率编码信号距离模糊函数栅瓣产生机理

子脉冲频率编码信号是指脉内由跳频图案控制子脉冲的频率雷达波形。一个周期的脉间捷变子脉冲频率编码波形,假设其幅度为 1,其复基带表达式为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t - nT) \exp(j2\pi k_n \Delta F t) \quad (1)$$

式中:

$$u_c(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < T \\ 0 & \text{others} \end{cases}; \quad (2)$$

$n$  表示第  $n$  个子脉冲; $k_n$  表示第  $n$  个子脉冲的频率编码; $\Delta F$  表示跳频间隔; $T$  为子脉冲宽度。子脉冲频率编码形式如图 1 所示。

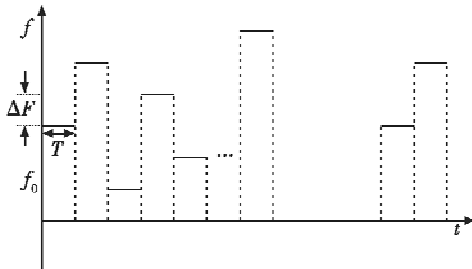


图 1 子脉冲频率编码信号时频图

Fig. 1 Time-frequency figure of sub-pulse frequency coded signal

由模糊函数定义,省去化简过程可以得到子脉冲频率编码信号的二维自相关函数

$$\begin{aligned} \chi(\tau, \xi) &= \sum_{n=m=0}^{N-1} e^{-j2\pi k_n \Delta F \tau} e^{j2\pi k_m \Delta F \tau} \chi_c(\tau, \xi) + \\ &\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0, m \neq n}^{N-1} e^{-j2\pi k_n \Delta F \tau} e^{j2\pi [k_m + (k_n - k_m) \Delta F] nT} \cdot \\ \chi_c(\tau + (n - m)T, \xi + (k_n - k_m) \Delta F) &= \\ \chi_{(1)}(\tau, \xi) + \chi_{(2)}(\tau, \xi) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\chi_c(\tau, \xi)$ 是指单载频矩形脉冲信号  $u_c(t)$  的时频二维自相关函数,即

$$\begin{aligned} \chi_c(\tau, \xi) &= \\ \begin{cases} \exp[j\pi\xi(T - |\tau|)] \frac{\sin[\pi\xi(T - |\tau|)]}{\pi\xi(T - |\tau|)} \frac{T - |\tau|}{T} & |\tau| \leq T \\ 0 & |\tau| > T \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\chi_{(1)}(\tau, \xi)$ 是指  $\chi(\tau, \xi)$  的中心模糊带,它决定波

形的距离分辨力和多普勒分辨力,即

$$|\chi_{(1)}(\tau, \xi)| = |\chi_c(\tau, \xi)| \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi(\xi n T - k_n \Delta F \tau)} \right| \quad (5)$$

令式(5)中  $\xi = 0$ ,得距离模糊函数为

$$|\chi_{(1)}(\tau, 0)| = |\chi_c(\tau, 0)| \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi k_n \Delta F \tau} \right| \quad (6)$$

如果跳频编码序列  $\{k_n\}$  是全频段非重复序列,即频点集合中的每个频点在序列中都出现了并且只出现一次,有  $k_n \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ ,则对于式(6)来讲,不管  $k_n$  的取值如何变化,经加和后的值始终不变,故根据式(7),式(6)可改写成式(8),即

$$\sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi n AB} = e^{-j\pi(N-1)AB} \frac{\sin(N\pi AB)}{\sin(\pi AB)} \quad (7)$$

$$|\chi_{(1)}(\tau, 0)| = |\chi_c(\tau, 0)| \cdot \left| \frac{\sin(\pi N \Delta F \tau)}{\sin(\pi \Delta F \tau)} \right| = \begin{cases} \frac{T - |\tau|}{T} \cdot \left| \frac{\sin(\pi N \Delta F \tau)}{\sin(\pi \Delta F \tau)} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & |\tau| > T \end{cases} \quad (8)$$

由式(8),当  $\tau = k/\Delta F$ ,  $k$  为非零整数,且  $|\tau| < T$  时,  $|\chi_{(1)}(\tau, 0)|$  有极点,此时对应位置将会出现栅瓣。因此,当  $T > 1/\Delta F$  时,信号的距离模糊函数必然会出现栅瓣。

设  $\Delta f = 1$  Hz, 频率编码序列为  $C = \{3, 2, 6, 4, 5, 1\}$ , 子脉冲宽度  $T$  分别为 3 s, 1 s 时,仿真该子脉冲频率编码信号的模糊函数,其模糊函数的零多普勒切割分别如图 2、图 3 所示。

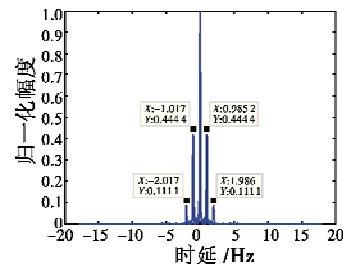


图 2  $T = 3$  s 时子脉冲频率编码信号距离模糊图

Fig. 2 Sub-pulse frequency coded signal distance ambiguity figure when  $T = 3$  s

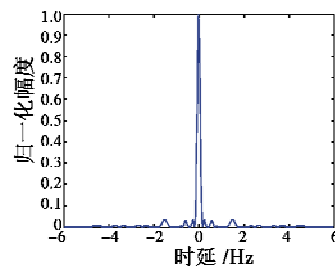


图 3  $T = 1$  s 时子脉冲频率编码信号距离模糊图

Fig. 3 Sub-pulse frequency coded signal distance ambiguity figure when  $T = 1$  s

由图 2 和图 3 可知,  $T = 1$  s 时,子脉冲频率编码信

号距离模糊函数没有栅瓣,  $T=3\text{ s}$  时, 在  $\tau$  为  $1/\Delta f$  整数倍时出现峰值, 当  $\tau=0$  时, 出现主瓣, 当  $\tau \neq 0$  时出现的峰值为栅瓣, 其中栅瓣个数为 4, 分别大致出现在  $\pm 1, \pm 2$  处, 与理论分析一致, 栅瓣的出现会影响目标的检测。

## 2 子脉冲 LFM 的子脉冲频率编码信号距离模糊函数栅瓣抑制方法

周期子脉冲频率编码信号表达式为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t-nT) \exp(j2\pi k_n \Delta F t) \quad (9)$$

根据前面分析, 若子脉冲宽度  $T > 1/\Delta F$ , 则  $s(t)$  模糊函数中心模糊带的零多普勒切割将会在时延  $-T \sim T$  的范围内每隔  $1/\Delta F$  出现一个栅瓣。这个性质限制了子脉冲宽度的选取。为了使子脉冲宽度  $T > 1/\Delta F$  的时候不出现栅瓣, 本文考虑在原来子脉冲频率编码信号子脉冲内引入 LFM, 组成子脉冲频率编码-LFM 复合信号来解决这个问题, 其信号的时频图如图 4 所示。

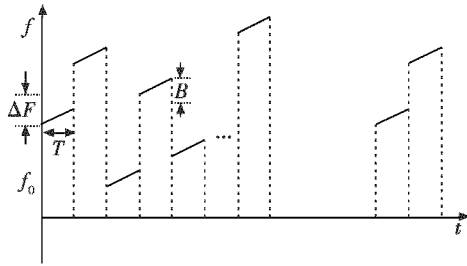


图4 子脉冲频率编码-LFM 复合信号时频图

Fig. 4 Time-frequency figure of sub-frequency pulse frequency coded map-LFM composite signal

子脉冲频率编码-LFM 复合信号的数学表达式为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t-nT) \exp(j2\pi k_n \Delta F t) \cdot \exp[j\pi\mu(t-nT)^2] \quad (10)$$

式中:  $\mu$  为引入的子脉冲 LFM 的调频斜率;  $s(t)$  可以进一步表示为

$$s(t) = \exp(j\pi\mu t^2) \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t-nT) \exp(j2\pi k_n \Delta F t) \cdot \dots \cdot \exp(-j2\pi\mu n T t) \exp(j\pi\mu n^2 T^2) = \exp(j\pi\mu t^2) s_1(t) \quad (11)$$

其中,

$$s_1(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t-nT) \exp(j2\pi k_n \Delta F t) \cdot \dots \cdot \exp(-j2\pi\mu n T t) \exp(j\pi\mu n^2 T^2) \quad (12)$$

先求  $s_1(t)$  的模糊函数

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) s_1^*(t+\tau) \exp(j2\pi\xi t) dt = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \exp(j\pi\mu n^2 T^2) \exp(-j\pi\mu m^2 T^2) \cdot$$

$$\exp(-j2\pi k_m \Delta F \tau) \exp(j2\pi\mu m T \tau) \cdot \dots \cdot$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u_c(t-nT) u_c^*(t-mT+\tau) \exp[j2\pi(k_n-k_m) \cdot \Delta F \tau] \cdot \dots \cdot \exp[j2\pi\mu(m-n)Tt] \exp(j2\pi\xi t) dt \quad (13)$$

令  $x=t-nT$ , 则  $t=x+nT$ , 将这两个关系代入式(13)得

$$\chi(\tau, \xi) = \chi_{1(1)}(\tau, \xi) + \chi_{1(2)}(\tau, \xi) \quad (14)$$

其中,  $s_1(t)$  中心模糊带为

$$\chi_{1(1)}(\tau, \xi) = \sum_{n=m=0}^{N-1} \exp(-j2\pi k_n \Delta F \tau) \exp(j2\pi\mu \cdot n T \tau) \cdot \dots \cdot \exp(j2\pi\xi n T) \chi_c(\tau, \xi) \quad (15)$$

$\chi_c(\tau, \xi)$  是指单载频矩形脉冲信号  $u_c(t)$  的时间频率二维自相关函数, 即

$$\chi_c(\tau, \xi) = \begin{cases} e^{j\pi\xi(T-\tau)} \frac{\sin[\frac{\pi\xi(T-|\tau|)}{\pi\xi(T-|\tau|)}] \cdot \frac{T-|\tau|}{T}}{\pi\xi(T-|\tau|)} & |\tau| < T \\ 0 & |\tau| > T \end{cases} \quad (16)$$

因为  $s(t) = \exp(j\pi\mu t^2) s_1(t)$ , 由信号理论<sup>[7]</sup>性质有

$$\chi(\tau, \xi) = \exp(-j\pi\mu\tau^2) \chi_1(\tau, \xi - \mu\tau) \quad (17)$$

所以

$$|\chi(\tau, \xi)| = |\chi_1(\tau, \xi - \mu\tau)| \quad (18)$$

得到  $s(t)$  模糊函数的中心模糊带表达式

$$|\chi_{(1)}(\tau, \xi)| = |\chi_{1(1)}(\tau, \xi - \mu\tau)| = |\chi_c(\tau, \xi - \mu\tau)| \cdot \dots \cdot \left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j2\pi k_n \Delta F \tau) \cdot \exp(j2\pi\mu n T \tau) \exp[j2\pi(\xi - \mu\tau) n T] \right| \quad (19)$$

讨论  $s(t)$  模糊函数的中心模糊带的零多普勒切割

$$|\chi_{(1)}(\tau, 0)| = |\chi_{1(1)}(\tau, -\mu\tau)| = |\chi_c(\tau, -\mu\tau)| \cdot$$

$$\left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j2\pi k_n \Delta F \tau) \exp(j2\pi\mu n T \tau) \cdot \exp(-j2\pi\mu n T \tau) \right| = |\chi_c(\tau, -\mu\tau)| \cdot$$

$$\left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j2\pi k_n \Delta F \tau) \right| \quad (20)$$

因为

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j2\pi k_n \Delta F \tau) = \exp[-j\pi(N-1)\Delta F \tau] \cdot \frac{\sin(N\pi\Delta F \tau)}{\sin(\pi\Delta F \tau)} \quad (21)$$

所以

$$|\chi_{(1)}(\tau, 0)| = \begin{cases} \frac{T-|\tau|}{T} \cdot \left| \frac{\sin[\frac{\pi\mu\tau(T-|\tau|)}{\pi\mu\tau(T-|\tau|)}] \right| \left| \frac{\sin(N\pi\Delta F \tau)}{\sin(\pi\Delta F \tau)} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $(T-|\tau|)/T$  为  $[-T, T]$  的三角窗,  $\left| \frac{\sin[\frac{\pi\mu\tau(T-|\tau|)}{\pi\mu\tau(T-|\tau|)}] \right|$  为 LFM 带来的 sinc 窗函数,

$\left| \frac{\sin(N\pi\Delta F\tau)}{\sin(\pi\Delta F\tau)} \right|$  由子脉冲频率编码信号带来,它在时延  $-T \sim T$  的范围内每隔  $1/\Delta F$  出现一个栅瓣,通过  $\mu, T, \Delta F$  的选取使 sinc 窗函数的零点对齐栅瓣,从而达到引入子脉冲 LFM 来消除原有子脉冲频率编码信号中心模糊带零栅瓣的目的。令

$$|R_1(\tau)| = \frac{T - |\tau|}{T} \cdot \left| \frac{\sin[\pi\mu\tau(|\tau| - T)]}{\pi\mu\tau(|\tau| - T)} \right| \quad (23)$$

$$|R_2(\tau)| = \left| \frac{\sin(\pi N\tau\Delta F)}{\sin(\pi\tau\Delta F)} \right| \quad (24)$$

设  $q, r$  为  $|R_2(\tau)|$  的第  $q, r$  个栅瓣,那么对应栅瓣出现的位置分别为  $\tau = \frac{q}{\Delta F}, \tau = \frac{r}{\Delta F}, r > q > 0$ 。要将  $|R(\tau)|$  的栅瓣消除,需要  $|R_1(\tau)|$  的零点刚好出现在  $|R_2(\tau)|$  的栅瓣位置。设  $\tau = \frac{q}{\Delta F}, \tau = \frac{r}{\Delta F}$  处对应  $|R_1(\tau)|$  第  $m, n$  个零点,  $n \geq m > 0$ 。则

$$\pi\mu \frac{q}{\Delta F} \left( T - \left| \frac{q}{\Delta F} \right| \right) = m\pi \quad (25)$$

且

$$\pi\mu \frac{r}{\Delta F} \left( T - \left| \frac{r}{\Delta F} \right| \right) = n\pi \quad (26)$$

所以

$$\frac{r}{n} \left( \frac{r}{\Delta F} - T \right) = \frac{q}{m} \left( \frac{q}{\Delta F} - T \right) \quad (27)$$

假设需要消除  $|R_2(\tau)|$  的第 1、第 2 个栅瓣,令  $q = 1, r = 2$ , 那么

$$T\Delta F = \frac{4m - n}{2m - n} \quad (28)$$

将式(28)代入式(25)有

$$TB = \frac{(4m - n)^2}{2(2m - n)} \quad (29)$$

$$\frac{B}{\Delta F} = \frac{4m - n}{2} \quad (30)$$

当  $m, n$  取不同值时,由式(29)、式(30)可以得到子脉冲频率编码-LFM 复合信号的距离模糊函数无 1, 2 栅瓣时参数的关系。表 1 为满足式(29)、式(30)的参数取值举例。

表 1 子脉冲频率编码-LFM 复合信号参数关系表

Table 1 Sub-pulse frequency coding-LFM composite signal parameter relation

$m$	$n$	$T\Delta F$	$TB$
1	1	3	4.5
2	2	3	9
2	3	5	12.5
3	3	3	13.5
3	4	4	16
4	4	3	18
4	5	3.667	20.1667

根据式(29)、式(30)确定的  $T, B, \Delta F$  的约束关系,是以保证消除原子脉冲频率编码信号距离模糊函数的第 1、第 2 个栅瓣为前提来推导的,本文继续研究按照式(29)、式(30)的约束关系是否可以消除其他的栅瓣。

假设  $T = \frac{k}{\Delta F}$ , 根据前面的关系,  $|R_2(\tau)|$  的栅瓣出

现在  $\tau = \frac{k_1}{\Delta F}$  的地方,且  $|k_1| < |k|$ , 将  $\tau = \frac{k_1}{\Delta F}$  代入

$|R_1(\tau)|$  的  $\pi\mu\tau(|\tau| - T)$ , 有

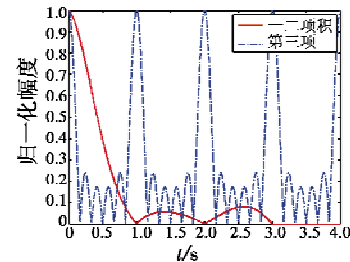
$$\pi\mu\tau(|\tau| - T) = \pi \frac{B}{T} \cdot \frac{k_1}{\Delta F} \left( \frac{k_1}{\Delta F} - \frac{k}{\Delta F} \right) \quad (31)$$

由式(28)、式(30)可将式(31)化简为

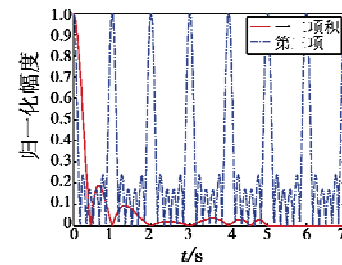
$$\pi\mu\tau(|\tau| - T) = \frac{\pi(4m - n)k_1 k (k_1 - k)}{2} = l\pi \quad (32)$$

式中:  $l$  恒为整数,因此  $|R_2(\tau)|$  栅瓣对应处的  $|R_1(\tau)|$  恒为 0, 所以满足式(29)、式(30)的  $T, B, \Delta F$  也能消除原子脉冲频率编码信号距离模糊函数的所有栅瓣。

图 5 的仿真条件为  $\Delta f = 1$  Hz, 频率编码序列为  $C = \{3, 2, 6, 4, 5, 1\}$ , 子脉冲宽度分别为  $T = 3$  s,  $T = 5$  s, 根据表 1 中第 1 组和第 3 组参数, 确定调频带宽  $B = 1.5$  Hz 和  $B = 2.5$  Hz, 蓝色虚线为  $|R_2(\tau)|$  项, 红色实线为  $|R_1(\tau)|$  项, 可以看到  $|R_2(\tau)|$  项在每隔 1 个单位时间的位置出现了栅瓣, 通过满足式(29)、式(30)参数的选择,  $|R_1(\tau)|$  的零点位置刚好与  $|R_2(\tau)|$  栅瓣对准, 从而达到了消除所有栅瓣的效果,  $|R_2(\tau)|$  项和栅瓣消除前后的效果分别如图 6、图 7 所示。



a  $T=3$  s 时子脉冲线性调频信号自相关函数一二项之积与第三项对比



b  $T=5$  s 时子脉冲线性调频信号自相关函数一二项之积与第三项对比

图 5 满足参数约束关系的  $|R_1(\tau)|$  和  $|R_2(\tau)|$  图

Fig. 5  $|R_1(\tau)|$  and  $|R_2(\tau)|$  satisfied with parameters constraint relations

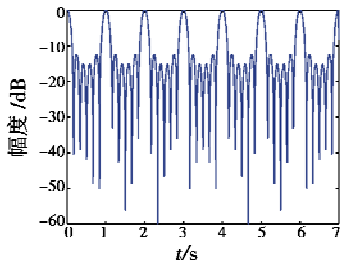


图6 脉冲频率编码-LFM 复合信号  $|R_2(\tau)|$

Fig. 6 Pulse frequency coding-LFM composite signal  $|R_2(\tau)|$

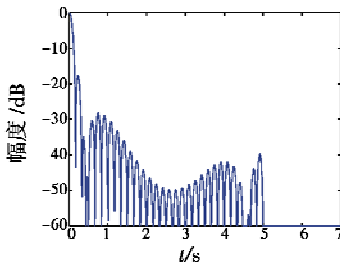


图7 子脉冲频率编码-LFM 复合信号  $x_{(1)}(t,0)$

Fig. 7 Pulse frequency coding-LFM composite signal  $x_{(1)}(t,0)$

### 3 频率编码子脉冲信号自相关函数栅瓣抑制仿真分析

仿真参数选取设： $\Delta f=1$  Hz, 频率编码序列为  $C = \{3,2,6,4,5,1\}$ , 子脉冲宽度  $T=3$  s, 根据表 1 中第 1 组参数, 确定调频带宽  $B=1.5$  Hz。

第 2 组仿真参数选取设： $\Delta f=1$  Hz, 频率编码序列为  $C = \{3,2,6,4,5,1\}$ , 子脉冲宽度  $T=5$  s, 根据表 1 中第 3 组参数, 确定调频带宽  $B=2.5$  Hz。

从图 8 ~ 图 11 仿真结果对比中可以看出, 按照式 (29)、式(30) 约束关系参数设计的子脉冲频率编码-LFM 复合信号相对于子脉冲频率编码信号能够有效抑制距离模糊函数中的所有的栅瓣。

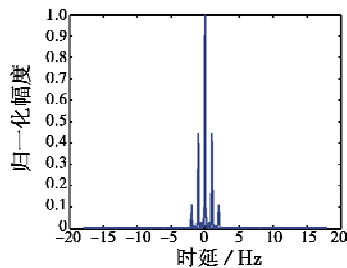


图8 子脉冲频率编码信号距离模糊函数

Fig. 8 Distance ambiguity function of sub-pulse frequency coded signal

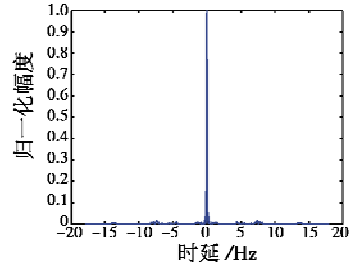


图9 子脉冲频率编码-LFM 复合信号距离模糊函数

Fig. 9 Distance ambiguity function of sub-pulse frequency coding-LFM composite signal

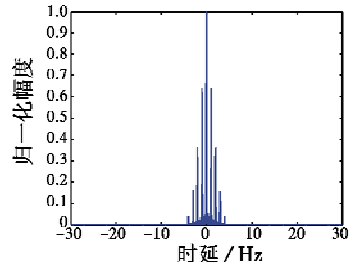


图10 子脉冲频率编码信号距离模糊函数

Fig. 10 Distance ambiguity function of sub-pulse frequency coded signal

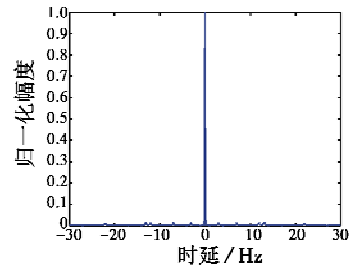


图11 子脉冲频率编码-LFM 复合信号距离模糊函数

Fig. 11 Distance ambiguity function of sub-pulse frequency coding-LFM composite signal

### 4 结束语

若子脉冲频率编码信号子脉冲宽度  $T > 1/\Delta F$ , 其距离模糊函数会在延时  $[-T, T]$  内每隔  $1/\Delta F$  地方出现栅瓣。在原子脉冲频率编码信号的基础上, 通过在每个子脉冲内部引入相同的 LFM 调制, 并且按照约束关系适当地选取信号子脉冲宽度、跳频间隔、LFM 调频带宽等参数, 可以达到抑制原来子脉冲频率编码信号距离模糊函数所有栅瓣的效果, 从而有效提高雷达的检测性能。

### 参考文献

[1] SCHLEHER D C. Low probability of intercept radar[C]// IEEE International Radar Conference, 1985:346-349.

(下转第 44 页)

2616. (YU C Q, GUO J, LI Y, et al. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (10): 2610-2616. )
- [2] 李朝荣,李永,乐洪宇. 战术激光武器技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(2): 13-16. (LI C R, LI Y, LE H Y. Development trend and analysis of the tactical laser weapons technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(2): 13-16. )
- [3] 张乐,赵威,邵铭,等. TDI-CCD 相机的 1.06  $\mu\text{m}$  激光饱和干扰实验研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 41(s1): 38-42. (ZHANG L, ZHAO W, SHAO M, et al. Experiment study on saturation effect of 1.06  $\mu\text{m}$  laser jamming TDI-CCD camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 41(s1): 38-42. )
- [4] 邹前进,陈前荣,黄振宇,等. 激光干扰 CCD 规律圆形条纹作用机理研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2017-2021. (ZOU Q J, CHEN Q R, HUANG Z Y, et al. Mechanism analysis of regular concentric rings on laser disturbing CCD detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2017-2021. )
- [5] 张东来,李小将,杨成伟. 美军激光反导关键技术及作战样式探讨[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 121-127. (ZHANG D L, LI X J, YANG C W. Discussion on key technology and battle mode of US army's anti-missile laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 121-127. )
- [6] 马翔,肖立志,戴杰. 机载激光定向红外干扰效能研究[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(4): 50-53. (MA X, XIAO L Z, DAI J. Research into the effectiveness of airborne laser direction infrared jamming[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 33(4): 50-53. )
- [7] 刘延武,李楠,吕俊伟. 激光对成像制导系统的干扰[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(5): 23-25. (LIU Y W, LI N, LYU J W. Laser disturbing imaging guidance system [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(5): 23-25. )
- [8] 杨希伟,童忠诚,汪亚夫,等. 激光干扰光电成像导引头的建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1243-1248. (YANG X W, TONG Z C, WANG Y F, et al. Modeling and simulation of laser jamming for electro-optical imaging guided seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1243-1248. )
- [9] 李海燕,胡云安,刘旭东. 激光干扰远场光电探测器能量估算方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1038-1043. (LI H Y, HU Y A, LIU X D. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1038-1043. )
- [10] 刘延武. 激光破坏红外制导反舰导弹探测系统研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2): 161-164. (LIU Y W. Research on laser damage to IR guidance anti-ship missile detectors[J]. Journal of CAEIT, 2011, 6(2): 161-164. )
- [11] 高卫. 激光致盲干扰效果评估方法研究[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 468-471. (GAO W. Study on evaluation of high energy laser blinding jamming effectiveness [J]. Optical Technique, 2006, 32(3): 468-471. )
- [12] 李海燕. 激光主动干扰系统作用距离的估算方法[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 416-420. (LI H Y. Operation range estimation for laser active jamming system [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 416-420. )
- [13] 邵立,汪亚夫,宋伟. 连续激光干扰 CCD 成像研究[J]. 激光杂志, 2012, 33(2): 38-40. (SHAO L, WANG Y F, SONG W. Research on CW laser jamming CCD imaging [J]. Laser Journal, 2012, 33(2): 38-40. )
- [14] 谭伟,何友金,毛剑英. 烟幕干扰效能评估系统设计[J]. 光电技术应用, 2010, 25(5): 65-69. (TAN W, HE Y J, MAO J Y. Design of smoke jamming effectiveness system [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(5): 65-69. )

(上接第 23 页)

- [2] 张锡祥. 21 世纪雷达的“四抗”[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(1): 1-6. (ZHANG X X. 21st century radar four antis [J]. Radar Science and Technology, 2003, 1(1): 1-6. )
- [3] DAVID L J. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳, 桑建华, 译. 西安:西北工业大学出版社, 2009. (DAVID L J. Introduction to RF stealth [M]. Translate by SHEN Y F, SANG J H. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2009. )
- [4] STOVE A G, HUME A L, BAKER C J. Low probability of intercept radar strategies [J]. IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation, 2004, 151(5): 249-260.
- [5] PHILLIP E P. 截获概率雷达的检测与分类[M]. 陈祝明, 段锐, 江朝抒, 译. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2011. (PHILLIP E P. LPI radar detection and classification [M]. Translate by CHEN Z M, DUAN R, JIANG C S. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. )
- [6] LEVANON N, MOZESON E. Nullifying ACF grating lobes in stepped-frequency train of LFM pulses [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronics System, 2003, 39(2): 694-703.
- [7] 汪学刚, 张明友. 现代信号理论[M]. 北京:电子工业出版社, 2005: 211-214. (WANG X G, ZHANG M Y. Modern signal theory [J]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 211-214. )