

频率分组编码信号的相参积累算法

王家东¹, 张伟科², 张盼³

(1. 西安电子科技大学前沿交叉研究院, 西安 710071; 2. 中国人民解放军 96901 部队, 北京 100094; 3. 西安电子科技大学雷达信号处理全国重点实验室, 西安 710071)

摘要: 针对捷变频信号的相参积累处理进行研究, 提出了一种基于频率分组编码信号的相参积累算法。以线性调频(Linear frequency modulation, LFM)信号为基础, 构建了频率分组编码信号, 使得发射信号的脉冲载频序列具有一定随机性, 保证了波形的抗干扰能力。同时针对频率捷变信号相位非相参带来的主瓣展宽和旁瓣抬高问题, 设计了对应编码信号的相参处理方法。首先对回波脉压后的信号进行高分辨距离补偿, 然后通过速度遍历插值和距离一致性校正实现脉组内相参处理, 最后利用编码信号载频序列的优势实现脉组间相参处理。在仿真实验中, 对构建的编码信号相较于 LFM 信号在抗干扰方面的优越性进行了验证, 同时验证了所提相参处理方法相较于基于压缩感知的稀疏重构算法的有效性。

关键词: 捷变频; 频率分组编码; 相参积累; 抗干扰; 目标检测

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A

Coherent Accumulation Algorithm for Frequency Group Coding Signal

WANG Jiadong¹, ZHANG Weike², ZHANG Pan³

(1. Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Unit 96901, PLA, Beijing 100094, China; 3. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, a method based on frequency group coding signal is proposed. Based on the linear frequency modulation (LFM) signal, the frequency group coding signal is constructed, which makes the pulse carrier frequency sequence of the transmitting signal a certain randomly. The anti-interference ability of the waveform is guaranteed. At the same time, a coherent processing method for the corresponding encoded signal is designed to address the issues of main lobe broadening and side lobe lifting problems caused by non coherent phase of frequency agile signals. Firstly, high-resolution distance compensation is applied to the compressed signal of the echo pulse, and then intra pulse coherence processing is achieved through velocity interpolation traversal and distance consistency correction. Finally, the advantages of the coding signal carrier frequency sequence are used to realize the intergroup coherent accumulation of the pulse group. In the simulation experiment, the coding signal of the building is verified compared with the advantages of LFM signal in the anti-interference, and the validity of the proposed method is compared to the sparse reconstruction algorithm based on compressive sensing.

Key words: frequency agility; frequency group coding; coherent accumulation; anti-jamming; target detection

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2202500); 国家自然科学基金(62171337, 62101396); 陕西省重点研发计划(2017KW-ZD-12); 陕西省杰出青年科学基金(S2020-JC-JQ-0056)。

收稿日期: 2023-03-23; **修订日期:** 2023-06-19

引 言

随着现代电子信息的飞速发展,电子干扰日益复杂,对被干扰方产生了严重威胁,极大削弱了被干扰方雷达的探测能力,在电子战中发挥出巨大作用^[1]。特别是数字射频存储(Digital radio frequency memory, DRFM)干扰机^[2],该类干扰机能够快速截获雷达发射信号,并对截获的信号调制载频、重频、相位和幅度等参数,从而产生灵活多样的干扰信号。DRFM干扰机产生的干扰信号与雷达发射信号高度相似,因此具有极强的欺骗性,严重影响了雷达在现代战场中的有效应用。频率捷变是现有雷达抗干扰技术中极为有效且易于工程实现的技术之一,由于其优异的抗干扰能力和目标检测能力,目前已被广泛应用于军用雷达系统的设计中^[3]。然而,频率捷变雷达由于其脉冲载频以特定规律捷变或随机跳变,导致回波信号相位不再相参,从而使得目标检测等信号处理变得困难^[4]。因此,针对捷变频雷达信号的相参积累研究具有重大应用价值。

近几年,关于捷变频信号相参积累的研究逐渐增多,多数学者通过研究特定频率变化规律或利用相位补偿的方式使得非相参相位具有相参性,从而实现回波信号的相参积累。文献[5]针对随机步进频信号,提出对其回波信号进行频率重排,重排后的信号其相位项与顺序步进频信号相位项相同,可利用离散傅里叶逆变换(Inverse discrete Fourier transform, IDFT)直接积累。但步进频信号频率编码规律固定,易被干扰机预测,因此抗干扰性能较差。文献[6]在对回波信号进行同频抽取后进行动目标检测,然后对不同频率的回波信号进行非相参积累,提高了目标的识别能力。文献[7]通过分析杂波对随机步进频信号相参处理的影响,提出了一种自适应距离-多普勒杂波抑制算法,有效提高了杂波环境下随机步进频信号的相参积累性能。文献[8]针对脉间跳频脉冲信号,提出一种基于稀疏重构的目标信息提取方法,基于压缩感知理论实现目标信息的提取。文献[9]在脉间频率捷变雷达的稀疏重构模型的基础上进一步研究推导,针对脉间载频-重频联合跳变波形信号构建了对应的稀疏重构模型,完成了脉间载频-重频联合跳变波形回波信号的目标信息提取。之后,文献[10]将抗干扰波形改进为脉间载频、重频、相位和极化同时编码的多参数联合捷变波形,并基于压缩感知理论构建了对应的稀疏重构模型,实现了多参数联合捷变波形的相参处理。文献[11]针对频率捷变雷达信号,提出了一种基于矩阵补全的距离-多普勒频谱估计方法,该方法克服了基于压缩感知方法的网格失配问题,提高了距离-多普勒频谱估计性能。文献[12]则先抽取同频信号进行相参积累获得目标速度信息,然后对异频频率重排结果采用傅里叶变换实现距离高分辨。这两种捷变频信号处理算法均针对多组频率捷变规律相同的脉冲串信号,该类捷变频信号规律性极强、相参处理所需帧周期长,且同频抽取后将会存在较大的速度模糊,因此该类信号不利于雷达的抗干扰和信号处理。文献[13]针对脉间跳频波形提出两种相参积累方法,分别为变周期法和变因子离散傅里叶变换(Discrete Fourier transform, DFT)法。变周期法的主要思想是结合参差重频对回波信号相位进行“预先”补偿,通过公式计算使得频率和重频耦合的相位项满足相参条件,然后采用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)算法直接进行积累;变因子DFT法则是根据频率跳变序列修改DFT变换因子,采用修改后的变换因子进行脉冲相参积累。这两种方法都聚焦于回波信号的多普勒域处理,没有对捷变频信号的距离高分辨进行研究分析。

针对上述问题,本文提出了一种频率分组编码信号的相参积累算法。该算法首先对雷达发射脉冲的中心频率进行分组编码,然后对各组回波信号采用补偿、校正、脉组间积累等处理实现目标信号的相参积累。在频率分组编码调制下,雷达发射信号的频率捷变序列具有一定的随机性,保证了雷达的抗干扰性能。同时,利用该相参积累算法能够获取目标的高分辨距离信息和速度信息,充分发挥了捷变频信号合成大带宽的优势。

1 频率分组编码回波信号模型

假设脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)雷达在一个相参处理间隔(Coherent processing interval, CPI)

内发射 M 组脉冲串,其中每组脉冲串中又分别包含 N 个脉冲,也就是说PD雷达在一个CPI内发射长为 $M \times N$ 的脉冲串。对发射脉冲串的中心频率进行编码,脉冲重复频率固定不变。令第 m 组第 n 个脉冲的中心频率表示为

$$f_{mn} = f_0 + a_{mn} \Delta f \tag{1}$$

式中: f_0 为基准载频, a_{mn} 为第 m 组第 n 个脉冲的频率编码值, Δf 为最小跳频间隔。以线性调频(Linear frequency modulation, LFM)信号为基础构建频率分组编码信号,则PD雷达发射第 m 组第 n 个脉冲后接收到的目标回波信号模型可表示为

$$s_r(\hat{t}, t_{mn}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{mn}}{T_p}\right) \exp\left(j\pi\gamma(\hat{t} - \tau_{mn})^2\right) \exp(-j2\pi f_{mn}\tau_{mn}) \tag{2}$$

式中: \hat{t} 为快时间, $t_{mn} = ((m-1)N + n)T_r$ 为慢时间, $\tau_{mn} = 2(R_0 - v_0 t_{mn})/c$ 为回波延时, T_r 为脉冲重复时间, R_0 为目标到雷达的初始距离, v_0 为目标与雷达之间的相对径向速度, c 为光速, T_p 为脉宽, γ 为调频率, $\text{rect}(\cdot)$ 为窗函数,且

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq 1/2 \\ 0 & |u| > 1/2 \end{cases} \tag{3}$$

为使得多组回波信号之间能够满足累加要求,需要对雷达发射脉冲串的频率编码 a_{mn} 进行分组编码设计,频率分组编码示意图如图1所示。图中,相同颜色的脉冲表示各脉组中相同次序发射的脉冲,为保证多组回波信号之间的相位相参性,令各脉组中第 n 次发射的脉冲频率编码序列满足

$$\{a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{mn}\} \in \{0, 1, 2, \dots, M-1\} \tag{4}$$

式中: $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 表示脉组中的脉冲序号。可以看出,频率分组编码使得各脉组中相同次序发射的脉冲的中心频率在经过频率重排后是均匀连续的,那么其回波相位也具有相参性。假设雷达发射12个脉冲,将其分为4组,每组内包含3个脉冲,按照上述频率分组编码方式对雷达发射脉冲串的中心频率进行编码,则经过编码后的信号时频域示意图如图2所示。由图2可以看出,虽然各组相同次序发射的脉冲遵从一定的规律,但由于单组内频率编码随机,因此对于整个雷达发射脉冲串,其频率编码也近似随机,不易被干扰机提前预测,从而保证了相关雷达的抗干扰性能。

2 相参积累算法

在对捷变频信号进行频率分组编码的基础上,提出一种频率分组编码信号的相参积累算法,算法流程如图3所示。首先分别对每个脉组中的 N 个脉冲信号依次进行脉压、高分辨距离补偿、速度插值遍历、距离一致性校正处理操作,再对经过处理的 M 个脉组进行脉组间的相参积累,由于 M 个脉组中相同次序位置的脉冲的频率编码值完整遍历 $0 \sim M-1$ 的 M 个整数,所以经过处理的 M 个脉组间的信号在目标点处具有相参性,最终只有目标点处可以积累

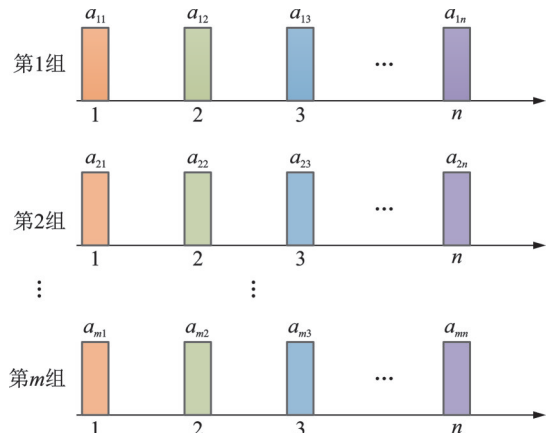


图1 频率分组编码示意图

Fig.1 Frequency grouping coding diagram

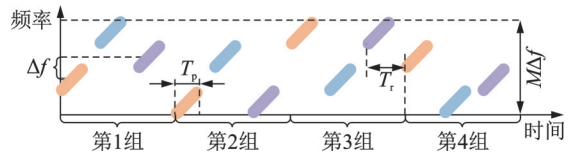


图2 频率分组编码信号时频域示意图

Fig.2 Frequency grouping coding signal diagram in time-frequency domain

出峰值,而非目标点处由于脉组间信号非相参故无法积累,从而达到目标检测的目的。

(1) 脉冲压缩

首先分别对每个脉组内的 N 个脉冲信号进行脉冲压缩操作,则第 m 组第 n 个脉冲回波信号的脉压结果可以表示为

$$s_{com}(\hat{t}, t_{mn}) = A_{mn} \text{sinc} \left[B(\hat{t} - \tau_{mn}) \right] \exp(-j2\pi f_{mn} \tau_{mn}) \quad (5)$$

式中 A_{mn} 为回波幅值。

将目标回波延时 $\tau_{mn} = 2(R_0 - v_0 t_{mn})/c$ 和慢时间 $t_{mn} = ((m-1)N + n)T_r$ 代入到式(5)中,第 m 组第 n 个脉冲回波信号的脉压结果可进一步表示为

$$s_{com}(\hat{t}, t_{mn}) = A_{mn} \text{sinc} \left[B(\hat{t} - \tau_{mn}) \right] \exp \left(-j4\pi f_{mn} \frac{R_0}{c} \right) \times \exp \left(j4\pi f_{mn} \frac{v_0 n T_r}{c} \right) \exp \left(j4\pi f_{mn} \frac{v_0 (m-1) N T_r}{c} \right) \quad (6)$$

将距离向脉压峰值处的速度列回波信号取出,则第 m 组第 n 个脉冲回波信号的速度列向量可表示为

$$s_{com}'(\hat{t}, t_{mn}) = \exp \left(-j4\pi f_{mn} \frac{R_0}{c} \right) \exp \left(j4\pi f_{mn} \frac{v_0 n T_r}{c} \right) \exp \left(j4\pi f_{mn} \frac{v_0 (m-1) N T_r}{c} \right) \quad (7)$$

可以看出,回波信号的速度列向量中包含 3 个相位项,分别为距离项、脉组内速度项以及脉组间速度项。

(2) 高分辨距离补偿

由于距离项中脉冲载频与距离耦合,该耦合项将会随着频率的变化而变化,因此会影响目标信号在多普勒域的有效积累,需要先对其进行补偿。

捷变频雷达的单点不模糊距离可表示为^[14]

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f} \quad (8)$$

将单点不模糊距离 ΔR 划分为 D 个高分辨距离单元,高分辨距离单元的大小可表示为 $\Delta R/D$ 。为了使得高分辨距离单元的划分更加贴合捷变频理论分辨率,在设置 D 的大小时要在达到理论最佳分辨率的同时节约计算资源。捷变频信号的高分辨距离分辨率为

$$\Delta r = \frac{c}{2\Delta f N} \quad (9)$$

则高分辨距离单元总数 $D \geq \frac{\Delta R}{\Delta r} = N$ 。

根据频率编码序列和高分辨距离单元构建对回波信号的速度列向量的高分辨距离补偿项,则第 m 组第 n 个脉冲回波信号的速度列向量对应的补偿项表达式为

$$H_m(n, d) = \exp \left(j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{\Delta r}{c} d \right) \quad (10)$$

式中 $d = 1, 2, \dots, D$ 为高分辨距离单元索引。

利用式(10)对回波信号的速度列向量实施高分辨距离补偿,则第 m 个脉组中第 n 个脉冲信号的补

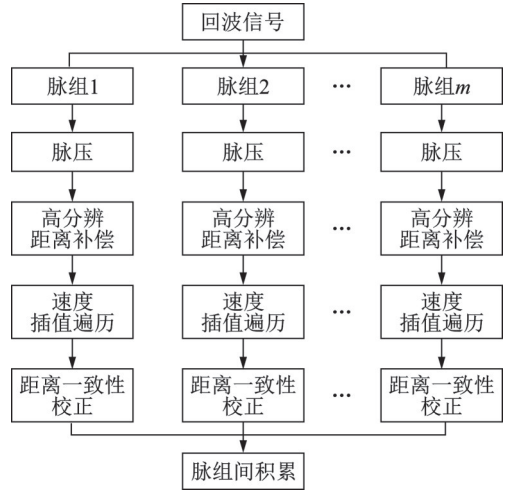


图3 频率分组编码信号的相参积累算法流程图
Fig.3 Flow chart of coherent accumulation of frequency grouping coding signal

偿结果表示为

$$s_m(n, d) = \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp\left(-j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{(R_0 - d\Delta r)}{c}\right) \times \exp\left(j4\pi f_{mn} \frac{v_0 n T_r}{c}\right) \exp\left(j4\pi f_{mn} \frac{v_0(m-1)NT_r}{c}\right) \quad (11)$$

(3) 脉组内速度插值遍历

以中心频率 f_0 为基准计算最大不模糊速度^[15] 区间 ΔV , 可得

$$\Delta V \in \left[0, \frac{c}{2f_0 T_r}\right] \quad (12)$$

将最大不模糊速度区间均匀划分为 Q ($Q \geq MN$) 个速度单元, 则每个速度单元大小可表示为 $\Delta v = c/(2f_0 Q T_r)$ 。将各个脉组内的高分辨距离补偿结果补 0 至长度为 Q 后进行方位向 DFT 处理, 其处理结果为

$$s'_m(k, d) = \sum_{n=0}^{N-1} s_m(n, d) \exp\left(-j \frac{2\pi n k}{Q}\right) = \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp\left(j4\pi f_0 \frac{v_0(m-1)NT_r}{c}\right) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{(R_0 - d\Delta r + v_0(m-1)NT_r)}{c}\right) \times \exp\left(j4\pi f_0 \frac{n T_r}{c} \left(v_0 - \frac{ck}{2Qf_0 T_r}\right)\right) \exp\left(j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right) \quad (13)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, Q$ 为速度单元索引。

可以看出, 若雷达发射脉冲串的载频固定, 则经过方位向 DFT 处理后目标信号将被积累于 (r_t, v_t) 处, 其中

$$r_t = \frac{R_0 + v_0(m-1)NT_r}{\Delta r} \quad (14)$$

$$v_t = \frac{2v_0 Q f_0 T_r}{c} = \frac{v_0}{\Delta v} \quad (15)$$

但由于频率分组编码使得每个脉组内的脉冲载频随机变化, 其回波信号相位非相参, 式(13)中目标信号将无法得到良好的相参积累结果, 其主瓣展宽, 积累能量降低, 从而导致主瓣被淹没在旁瓣中。因此需要联合多个脉组内的信号处理结果, 使得目标点处得以积累出更高的峰值, 从而达到目标检测的目的。

(4) 距离一致性校正

由式(14)可以看出, 对于不同的脉组, 其目标积累峰值的距离坐标由于速度的影响而不同, 无法直接进行脉组间的联合处理。因此, 首先需要对不同脉组内的相参积累结果进行距离一致性校正。

令 $\frac{d\Delta r}{c} = t_r$ 表示重写后的快时间, 将 t_r 代入式(13)中, 得到重写后的信号

$$S_m(k, t_r) = \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp\left(j4\pi f_0 \frac{v_0(m-1)NT_r}{c}\right) \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j4\pi a_{mn} \Delta f \left(t_r - \frac{R_0}{c} - \frac{v_0(m-1)NT_r}{c}\right)\right) \times \exp\left(j4\pi f_0 \frac{n T_r}{c} (v_0 - k\Delta v)\right) \exp\left(j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right) \quad (16)$$

然后对 $S_m(k, t_r)$ 做关于变量 t_r 的 FFT 变换,即将回波信号从距离快时间域变换到距离频域

$$S_m(k, f_r) = \text{FFT}[S_m(k, t_r)] \quad (17)$$

式中 f_r 表示距离频率。

为消除由速度带来的影响,在距离频域构建与每个速度单元相对应的补偿相位对 $S_m(k, f_r)$ 进行距离校正,则第 k 个速度单元对应的距离校正补偿项可表示为

$$\varphi_m^1(k, f_r) = \exp\left\{j4\pi f_r \frac{k\Delta v(m-1)NT_r}{c}\right\} \quad (18)$$

另外,为使回波信号在脉组间积累时具有更好的相参性,将式(16)中的第 2 个相位项 $\exp\left(j4\pi f_0 \frac{v_0(m-1)NT_r}{c}\right)$ 也进行补偿。由于速度未知,同样构建与每个速度单元对应的补偿项,则第 k 个速度单元对应的速度补偿项可表示为

$$\varphi_m^2(k, f_r) = \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{k\Delta v(m-1)NT_r}{c}\right) \quad (19)$$

将距离频域回波信号 $SS_m(k, f_r)$ 与距离校正补偿项 $\varphi_m^1(k, f_r)$ 和速度补偿项 $\varphi_m^2(k, f_r)$ 相乘,然后变换到距离时域,可得到各脉组的距离校正结果,其中第 m 组回波信号的距离一致性校正结果可表示为

$$\begin{aligned} S'_m(k, t_r) &= \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp\left(j4\pi f_0 \frac{(v_0 - k\Delta v)(m-1)NT_r}{c}\right) \times \\ &\quad \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j4\pi a_{mn} \Delta f \left(t_r - \frac{R_0}{c} - \frac{v_0(m-1)NT_r}{c} + \frac{k\Delta v(m-1)NT_r}{c}\right)\right) \times \\ &\quad \exp\left(j4\pi f_0 \frac{nT_r}{c}(v_0 - k\Delta v)\right) \exp\left(j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

可以看出,对于每一个脉组,其组内回波信号经相参积累及距离一致性校正之后的目标能量均位于 (r'_i, v_i) 处,其中 $r'_i = R_0/\Delta R, v_i = v_0/\Delta v$,且第 m 组回波信号在目标处的回波表达式为

$$S'_m(k, t_r) = \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j4\pi a_{mn} \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right) \quad (21)$$

(5) 脉组间积累

由于在对雷达发射信号进行频率分组编码时令各组间位于相同次序的脉冲信号(即每组中的第 n 个脉冲)的频率编码乱序遍历 $0 \sim M-1$,因此当组内相参积累和距离一致性校正之后的各组回波信号相加时,其相同次序的脉冲信号对应的相位具有相参性。则各组回波信号经组间积累后,目标信号所在位置的脉组间积累结果可表示为

$$\begin{aligned} S_{t,\text{sum}} &= \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left(j4\pi m \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right) = \\ &\quad \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(j2\pi(M-1)\Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right) \frac{\sin\left(2\pi M \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right)}{\sin\left(2\pi \Delta f \frac{v_0 n T_r}{c}\right)} \end{aligned} \quad (22)$$

而非目标位置的脉组间积累结果为

$$\begin{aligned}
S_{t,\text{sum}} = & \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp\left(j4\pi f_0 \frac{(v_0 - k\Delta v)(m-1)NT_r}{c}\right) \times \\
& \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left(j4\pi a_{mm} \Delta f \left(\hat{t} - \frac{R_0}{c} - \frac{v_0(m-1)NT_r}{c} + \frac{k\Delta v(m-1)NT_r}{c}\right)\right) \times \\
& \exp\left(j4\pi f_0 \frac{nT_r}{c}(v_0 - k\Delta v)\right) \exp\left(j4\pi a_{mm} \Delta f \frac{v_0 nT_r}{c}\right) \quad (23)
\end{aligned}$$

可以看出,经脉组间积累后,目标位置处将会积累出较大峰值,而非目标处由于信号相位非相参,在脉组间积累时可能会出现相互抵消的情况,因此非目标处的积累幅值将会趋近于0,从而使目标峰值更加突出。

3 复杂度分析

假设PD雷达在一个CPI内发射 M 组脉冲串,其中每组脉冲串中又分别包含 N 个脉冲,即雷达在一个CPI内发射 $M \times N$ 个脉冲信号。同时假设单个脉冲距离向采样点数为 L 。

本文提出的相参积累算法各步骤的计算复杂度如表1所示。其中为方便计算算法复杂度,设定高分辨距离单元个数 D 等于单脉组内脉冲数,划分速度单元个数 Q 等于1个CPI内发射脉冲总数 $M \times N$ 。可以看出,相较于传统动目标检测(Moving target detection, MTD)算法,所提方法在计算复杂度上有所增加,但编码波形在抗干扰方面有着显著优势,同时在低信噪比环境下也有良好的探测性能,后续在仿真实验中也充分对此进行了验证。

表1 算法计算复杂度

Table 1 Algorithm computational complexity

项目	计算复杂度
脉冲压缩	$O(MNL \log_2 L)$
高分辨距离补偿	$O(MN^2)$
脉组内速度插值遍历	$O(M^2 N^2)$
距离一致性校正	$O(M^2 N^3)$
脉组间积累	$O(MN)$

4 仿真结果与分析

本节主要通过仿真实验对频率分组编码信号的抗干扰性能以及本文所提相参积累算法的有效性进行分析验证。

在本次仿真实验中,雷达系统的部分仿真参数如表2所示。对雷达发射脉冲串按照频率分组编码方式进行调制,各个脉冲的时宽与带宽不变,采用第2节介绍的相参积累算法对雷达接收机接收的回波信号进行处理。在该仿真实验中,干扰信号以距离-速度联合欺骗干扰为例。另外,以固定参数LFM信号在距离-速度联合欺骗干扰环境中的相参积累作对比实验,验证本文所设计的分组编码波形的干扰对抗性能;以基于压缩感知的稀疏重构算法作为对比实验,说明本文所提相参积累算法的优越性。

表2 雷达系统部分仿真参数

Table 2 Simulation parameters of radar system

仿真参数	数值	仿真参数	数值
脉组数	64	组内脉冲数	16
基准载频/GHz	10	最小跳频间隔/MHz	40
脉冲重复频率/kHz	20	带宽/MHz	20
信噪比/dB	0	干信比/dB	20
目标径向距离/m	500	目标径向速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	100
干扰径向距离/m	700	干扰径向速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	90

图4所示为固定参数LFM信号在距离-速度联合欺骗干扰环境中的相参积累结果。如图4所示,由于干扰信号产生的虚假目标能量远远大于真实目标能量,迫使雷达对虚假目标进行检测跟踪,从而形成有效的欺骗干扰效果。

图5所示为雷达发射脉冲的频率编码序列,其中图5(a)为第5个脉组内各脉冲信号的频率编码序列,图5(b)为由各个脉组中第1个脉冲的频率组成的频率编码序列,图5(c)为雷达在一个CPI内发射的脉

冲串的频率编码序列。由图5可以看出,虽然频率分组编码方式使得各组之间位于相同次序上的频率遵循一定的规律,但对于整个雷达发射脉冲串来说其频率编码仍然可以看作是伪随机的,因此该编码方式并不会降低捷变频信号的抗干扰性能。

图6所示为第7个脉冲回波信号在射频滤波前后的频谱对比图,其中图6(a)所示为射频滤波前的频谱图,图6(b)所示为射频滤波后的频谱图。由于雷达发射信号频率捷变,并且跨脉冲转发式欺骗干扰往往延迟一个或多个脉冲重复间隔(Pulse repetition interval, PRI),从图6(a)可以看出,虽然雷达回波信号受到了较强的干扰,但在频域中,干扰信号的频谱与目标信号的频谱是分离的。因此,在频域通过射频滤波便可将目标信号段截取出来,如图6(b)所示。

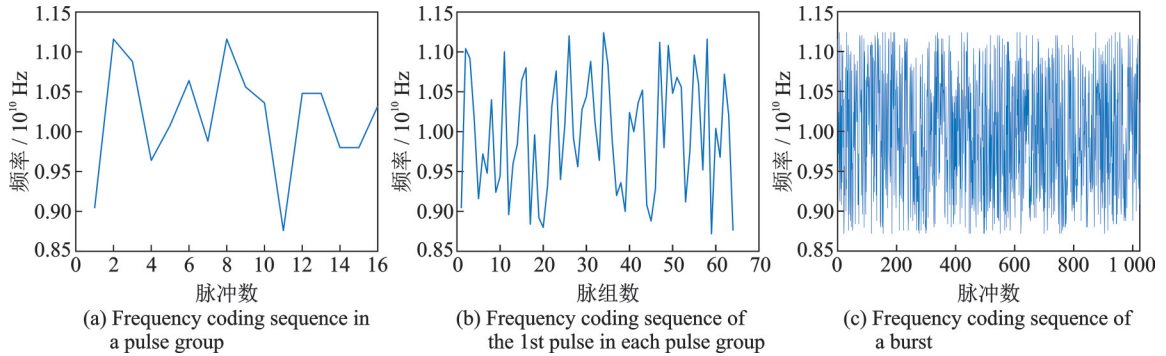


图5 频率编码序列

Fig.5 Frequency coding sequence

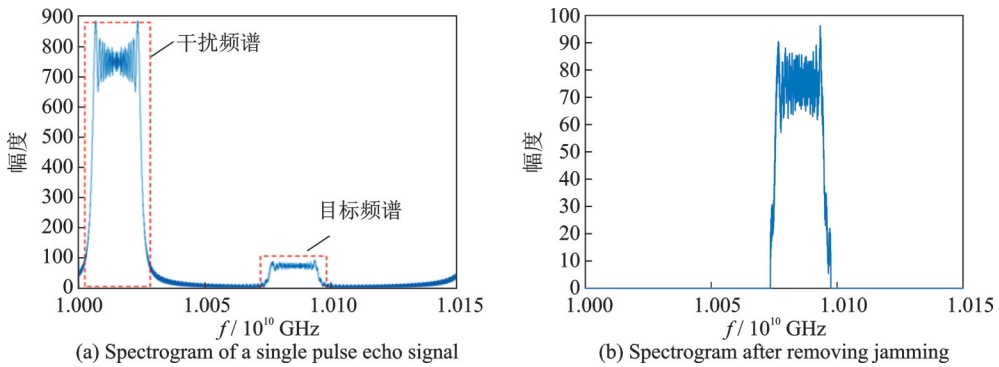


图6 射频滤波前后单个脉冲回波信号频谱对比图

Fig.6 Comparison of the echo signal spectrum of a single pulse before and after RF filtering

图7所示为第1个脉组中包含的16个脉冲回波信号经脉压、高分辨距离补偿和速度插值遍历之后的相参积累结果图。由图7可以看出,由于一个脉组内的不同脉冲信号的载频不同,导致其回波信号相位非相参,因此单个脉组信号在组内相参积累之后其目标峰值没有明显突出,需要对各个脉组的回波信号做进一步的脉组间积累。

图8所示为多个脉组相参积累后经距离一致性校正和组间积累得到的脉组积累结果图。由图8可以看出,经脉组间积累后,目标信号得到了积累,证明了本文所提相参积累算法的有效性。

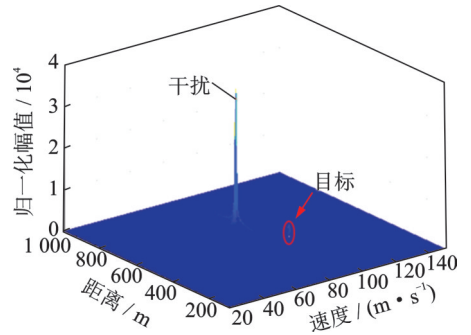


图4 固定参数LFM信号相参积累结果

Fig.4 Coherent accumulation result of LFM signal with fixed parameter

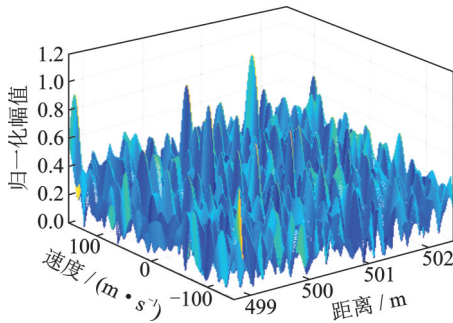


图7 第1个脉组的相参积累结果图

Fig.7 Coherent accumulation result of the 1st pulse group

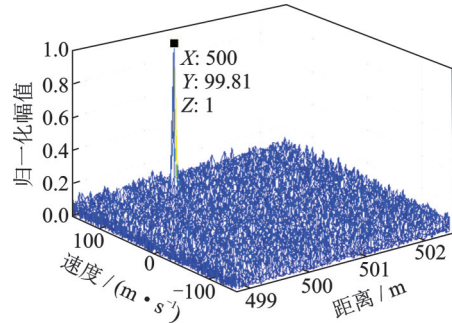


图8 脉组积累结果图

Fig.8 Coherent accumulation result of pulse groups

图9所示为在相同仿真参数条件下采用基于压缩感知的稀疏重构算法对雷达回波信号进行相参积累得到的结果图。由图9可以看出,目标的真实参数没有落在预先设置的网格上,出现了网格失配的问题,因此在稀疏重构结果中出现了除真实目标外的多个伪峰。由该对比实验可知,基于压缩感知的稀疏重构算法可能会出现网格失配现象,从而导致产生伪峰,降低该相参积累算法的鲁棒性。而本文所提相参积累算法无需进行网格划分,因此其相参积累性能稳健,相较于基于压缩感知的稀疏重构算法具有明显的优越性。

接下来对仿真回波信号中加入不同信噪比的高斯白噪声、瑞利噪声以及莱斯噪声,通过100次蒙特卡洛实验进行目标检测性能分析实验。

图10所示为频率分组编码回波信号在不同信噪比条件下,利用本文所提相参积累算法处理得到的目标检测概率曲线图。由图10可以看出,对于高斯白噪声,随着回波信号的信噪比的增大,目标检测概率逐渐增大,并且当信噪比大于 -20 dB时,其目标检测概率增至1后稳定不变,这表明本文所提算法在低信噪比条件下具有良好的目标检测性能。另外,由于瑞利噪声和莱斯噪声的分布与高斯白噪声不同,导致频率分组编码回波信号在处理时的信噪比容忍度发生变化。由仿真结果可以看出,对于瑞利噪声,当信噪比大于 -18 dB时的目标检测概率增至1后稳定不变;对于莱斯噪声,当信噪比大于 -18 dB时的目标检测概率增至1后稳定不变。

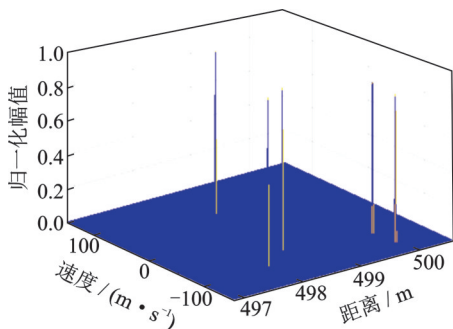


图9 基于压缩感知的稀疏重构结果图

Fig.9 Sparse reconstruction result based on compressive sensing

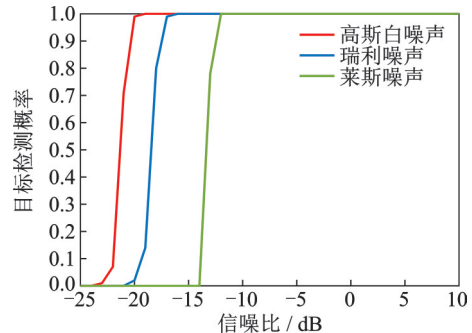


图10 三类噪声在不同信噪比下的目标检测概率曲线图

Fig.10 Target detection probability curves for three types of noise at different signal-to-noise ratios

5 结束语

本文针对捷变频信号回波相位非相参的问题,提出了一种频率分组编码信号的相参积累算法。该方法首先对雷达发射脉冲串进行频率分组编码,利用每个脉组内相同发射次序上的脉组载频符合随机步进频变化规律的特点,使得脉组间回波信号相位相参,然后通过脉组内信号处理以及脉组间积累实

现目标信号的相参积累。仿真实验表明,频率分组编码能够保证雷达发射脉冲频率捷变的随机性,所提相参积累方法能够有效实现捷变频雷达目标检测的目的,并且在低信噪比条件下,该方法能够达到的目标检测性能相对更好。

参考文献:

- [1] 刘忠. 基于DRFM的线性调频脉冲压缩雷达干扰新技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
LIU Zhong. New jamming technology of linear frequency modulation pulse compression radar based on DRFM[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [2] 冉宏远, 张宏伟, 张民国. 数字射频存储器发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 2018 (6): 44-48.
RAN Hongyuan, ZHANG Hongwei, ZHANG Minguo. Development status and trend of DRFM[J]. Aerospace Missile, 2018 (6): 44-48.
- [3] 王永海, 刘朋, 周志增, 等. 对频率捷变信号成像效果影响因素分析[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(6): 15-19.
WANG Yonghai, LIU Peng, ZHOU Zhizeng, et al. Analysis of the factors influencing the imaging effect of the frequency rapid change signal[J]. Journal of Attack and Guidance, 2020, 40 (6): 15-19.
- [4] 丁逊. 捷变频相参雷达波形优化设计与处理技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
DING Xun. Research on waveform optimization design and processing technology of agile frequency coherent radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [5] ZHANG Y, HU W, WANG L, et al. A novel random stepped frequency radar using chaos[C]//Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2014: 662-665.
- [6] 刘雷松, 张永泉, 蔡晨曦, 等. 一种改进的脉间频率捷变与MTD兼容算法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 5-8, 61.
Liu Leisong, Zhang Yongquan, Cai Chenxi, et al. An improved interpulse frequency rapid change with MTD compatible algorithm[J]. Computer Simulation, 2011, 28 (2): 5-8, 61.
- [7] LIU S, CAO Y, YEO T S, et al. Adaptive clutter suppression in randomized stepped-frequency radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(2): 1317-1333.
- [8] 王一鸣. 频率捷变信号目标信息提取及抗干扰性能分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
WANG Yiming. Frequency rapid variable signal target information extraction and anti-interference performance analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [9] QUAN Y H, WU Y J, LI Y C, et al. Range-Doppler reconstruction for frequency agile and PRF-jittering radar[J]. Iet Radar Sonar Navigation, 2018, 12(3): 348-352.
- [10] 姚洪彬. 多参数联合捷变频雷达抗干扰研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
YAO Hongbin. Research on anti-interference of multi parameter joint agile radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [11] HU X, LU F, LIANG C, et al. Range-Doppler spectrum estimation based on matrix completion for frequency agile radar[C]// Proceedings of 2020 IEEE Radar Conference. Florence, Italy: IEEE, 2020: 1-5.
- [12] TIAN R, LIN C, BAO Q, et al. Coherent integration method of high-speed target for frequency agile radar[J]. IEEE Access, 2018, 6: 18984-18993.
- [13] 孟祥东, 夏德平. 脉冲间跳频波形的相参积累目标检测方法[J]. 现代雷达, 2022, 44(3): 70-75.
MENG Xiangdong, XIA Deping. Target detection method based on coherent accumulation of pulse hopping waveforms[J]. Modern Radar, 2022, 44 (3): 70-75.
- [14] 欧建平, 李骥, 张军, 等. 频率捷变雷达信号处理[M]. 北京:科学出版社. 2020.
OU Jianping, LI Ji, ZHANG Jun, et al. Frequency agile radar signal processing[M]. Beijing: Science Press. 2020.
- [15] 李东海, 张兴华. PD雷达脉冲重复间隔最优化选择[J]. 现代电子技术, 2009, 32(21): 35-36, 39.
LI Donghai, ZHANG Xinghua. Optimal selection of pulse repetition interval for PD radar[J]. Modern Electronic Technology, 2009, 32 (21): 35-36, 39.

作者简介:



王家东(1991-),通信作者,男,副教授,研究方向:雷达成像、雷达信号处理、雷达抗干扰等, E-mail: jiadongwang@xidian.edu.cn.



张伟科(1992-),男,助理研究员,研究方向:阵列信号处理、电子对抗、SAR成像处理领域的理论和应用研究。



张盼(1998-),女,硕士研究生,研究方向:抗干扰波形设计及信号处理。