

# 随机稀疏调频步进信号 距离像抗混叠方法研究

吕明久<sup>1</sup>, 李少东<sup>2</sup>, 杨 军<sup>1</sup>, 马晓岩<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院, 湖北武汉 430019; 2. 解放军 93253 部队, 辽宁大连 116000)

**摘 要:** 传统步进频率波形不模糊距离窗大小受载频步进量制约, 将会导致距离像混叠等问题. 针对此问题, 基于压缩感知理论, 研究了一种随机稀疏调频步进信号距离像抗混叠方法. 首先对子脉冲进行脉压(Dechirp)处理, 将处理后的回波信号看作为具有等效带宽线性调频信号回波的量测数据; 其次根据子脉冲随机发射方式构造相应的量测矩阵, 得到随机稀疏调频步进信号的压缩感知重构模型, 并采用压缩感知重构算法得到高分辨一维距离像. 最后, 对该方法不模糊距离窗大小进行了分析, 并给出了影响不模糊距离窗大小的因素和参数设置原则. 所研究方法通过将随机稀疏调频步进信号的距离像合成处理等效为 LFM 信号的距离像合成过程, 既降低了载频步进量对不模糊距离窗大小的限制, 克服了距离像混叠问题, 又提高了距离像合成性能. 仿真实验进一步验证了本文方法的有效性.

**关键词:** 压缩感知; 随机稀疏调频步进信号; 距离混叠; 高分辨距离像

**中图分类号:** TN911.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2018)01-0039-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.006

## An Anti-Range Aliasing Method for Random Sparse Chirp Frequency-Stepped Signal

LÜ Ming-jiu<sup>1</sup>, LI Shao-dong<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, MA Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China; 2. The Unit 93253 of PLA, Dalian, Liaoning 116000, China)

**Abstract:** The ambiguity range of the traditional stepped-frequency waveform is decided by the frequency step, which result in range aliasing. To solve the above problem, a compressive sensing-based anti-range aliasing method for random sparse chirp frequency-stepped (RSCFS) signal is proposed. In the method, the sub pulses are dechirped firstly. Then the echoes are treated as the measurement data of the equivalent bandwidth LFM signal. Secondly, the corresponding measurement matrix is constructed according to the random transmission mode of the sub pulses, and then the compressed sensing reconstruction model of the RSCFS signal is built. At the same time, the high resolution range profile can be obtained by the compressed sensing reconstruction algorithm. At last, the ambiguity range of the proposed method is analyzed, and the factors that influence the size of the ambiguity range and the parameter setting criteria are given. In this method, the range profile synthesis process of the RSCFS signal is regarded as the process of the equivalent bandwidth LFM signal. It can not only reduce the restriction of the carrier frequency step to ambiguity range, effectively overcome the range aliasing problem, but also improve the range profile synthetic performance. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** compressive sensing; random sparse chirp frequency-stepped waveform; range aliasing; high resolution range profile

### 1 引言

线性调频步进信号(Chirp Frequency-Stepped signal, CFS)兼顾线性调频信号大时宽带宽积以及频率步

进信号瞬时带宽小的特点, 具有实现难度低、合成带宽大等优势, 已应用于现代雷达系统<sup>[1-3]</sup>. 但对于 CFS 信号, 要得到高分辨距离像就必须增加子脉冲个数或者载频步进量, 然而子脉冲个数的增多会加大运动补偿

的难度,载频步进量的提高将造成不模糊距离窗变小,导致距离像混叠,限制了波形参数设置的自由度<sup>[4]</sup>.此外,当相邻子脉冲间载频步进量恒定不变时,其抗干扰性能也会降低.如何在利用 CFS 信号优势的同时,解决其不模糊距离窗过小、距离像混叠等问题是十分值得研究的方向<sup>[5]</sup>.

实质上,步进频率波形不模糊距离窗的大小与信号载频步进量有关,载频步进量越大,不模糊距离窗越小,当不模糊距离窗小于目标最大尺寸时,传统的“IDFT”成像方法将会产生距离像混叠,无法对目标正确成像与识别<sup>[4]</sup>.因此众多学者展开了抗距离像混叠方法的研究,常用的方法可分为以下三种类型,即合成距离包络法<sup>[6]</sup>、频域合成法<sup>[7]</sup>、时域合成法<sup>[8]</sup>.这些方法对于传统 CFS 信号具有较好的合成效果.近年来,众多学者将压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论<sup>[9]</sup>应用于 CFS 信号的波形设计中,提出了随机稀疏调频步进信号(Random Sparse Chirp Frequency-Stepped signal, RSCFS)等新的波形形式,在获得与传统 CFS 信号等效的高分辨能力的同时,减少了成像时间、进一步提高了雷达的抗干扰性能<sup>[10,11]</sup>.但是当传统抗距离像混叠方法应用于 RSCFS 信号时,将会出现较多的虚假重构,甚至失效<sup>[12]</sup>.为此,文献[13]中利用 CS 方法替代传统“IDFT”方法中的 IDFT 处理过程,得到了较好的重构结果,但是仍然没有解决距离混叠的问题.文献[14~16]研究了一种随机调频信号的距离像合成方法,通过对接收的子脉冲回波信号直接进行重排,并构造相应的距离像重构模型得到距离像合成结果.文献[17~19]研究了稀疏调频步进信号的距离像成像方法,给出了基于不同压缩感知算法条件下的成像性能分析,并取得了较好的成像结果.上述方法重点在于利用性能优越的算法得到更好的重构结果,而对于这些方法如何增大不模糊距离窗,从而避免距离混叠缺少相应的分析与解释.

针对上述问题,本文提出一种基于 CS 理论的 RSCFS 信号距离像抗混叠方法并对其抗混叠性能进行了研究.首先,对 RSCFS 信号子脉冲进行脉压处理,利用 RSCFS 信号可视为 LFM 信号的随机降采样发射样式这一实际,将 RSCFS 子脉冲脉压处理结果看作为具有等效带宽的 LFM 信号随机发射的子段信号,并将其作为随机量测数据;其次,根据子脉冲随机发射方式得到相应的量测矩阵,从而得到基于 CS 理论的 RSCFS 信号距离像稀疏重构模型;并利用稀疏重构算法得到真实的高分辨一维距离像,避免了距离像混叠.最后,对该方法能增大不模糊距离窗的原因进行了分析,给出了影响不模糊距离窗大小的因素以及相应的参数设置方法.理论分析和仿真结果均表明本文方法可以在增大

不模糊距离窗,抗距离像混叠的同时保证良好的距离像重构性能.

## 2 RSCFS 信号回波模型

传统的 CFS 信号需发射  $N$  个载频连续变化的子脉冲,而 RSCFS 信号通过随机选择  $M$ , ( $M < N$ ) 个子脉冲进行发射,因此可看作为传统 CFS 信号的随机采样形式.对于 RSCFS 信号,其发射波形可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$s_e(\hat{t}; m) = \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T}\right] \exp[j\pi(\mu\hat{t}^2 + 2f_m\hat{t})] \quad (1)$$

式中,  $\hat{t}$  为子脉冲快时间,且  $\hat{t} = [-T/2, -T/2 + 1/f_s, \dots, -T/2 + (L-1)/f_s]$  ( $f_s$  为采样率,  $L$  为每个子脉冲采样点数);  $\text{rect}(\cdot)$  为窗函数;  $T$  为子脉冲宽度;  $\mu$  为调频率;  $f_m$  表示第  $m$  个子脉冲的载频,且  $f_m = f_0 + n_m\Delta f$ ,  $\Delta f$  为载频步进量;  $n_m$  为  $[0, N-1]$  区间的随机整数.

经过接收机混频后的基频回波信号可表示为:

$$s_r(\hat{t}; m) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \tau(k)}{T}\right] \cdot \exp[j\pi(\mu(\hat{t} - \tau(k))^2 - 2f_m\tau(k))] \quad (2)$$

式中,  $\sigma_k$  为第  $k$  个散射点强度;  $K$  为散射点个数;  $\tau(k) = 2R_k/c$  为第  $k$  个散射点的时延,  $R_k$  表示第  $k$  个散射点与雷达间的距离.

对于 RSCFS 信号子脉冲回波首先应进行脉冲压缩处理.由于 Dechirp 处理可极大的降低对采样频率的要求,因此本文利用 Dechirp 实现子脉冲脉压过程.假设目标已经经过运动补偿转化为转台模型,此时式(2)做差频处理可以得到<sup>[20]</sup>:

$$s_f(\hat{t}; m) = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - 2R_k/c}{T}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi\mu}{c}(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c})\Delta R_k\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_m\Delta R_k + j\frac{4\pi\mu}{c^2}\Delta R_k^2\right] \quad (3)$$

式中  $\Delta R_k = R_k - R_{ref}$ ,  $R_{ref}$  为参考距离.

完成去斜处理,去掉 RVP 和包络斜置相后可以得到:

$$S_f(f; m) = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{c}f_m\Delta R_k\right]\right\} \cdot \text{sinc}\left[T(f + 2\mu\Delta R_k/c)\right] \quad (4)$$

上述过程与传统的 LFM 信号 Dechirp 处理过程相同.为了得到最终的高分辨距离像,传统“IDFT”方法通过对式(4)进行采样,并进行 IDFT 处理,得到最终的距离像<sup>[4]</sup>.由于 IDFT 处理结果存在  $c/2\Delta f$  的不模糊距离窗,当目标的尺寸大于不模糊距离窗时将会出现距离混叠,影响目标的识别<sup>[4]</sup>.为避免上述问题,下面研究基于 RSCFS 信号的距离像抗混叠方法.

### 3 RSCFS 信号距离像抗混叠方法

首先将式(4)的子脉冲 Dechirp 处理结果,变换至时域可得到:

$$s_m(\hat{t}; m) = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T}\right) \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{c}(f_0 + \mu(n_m T + \hat{t}))\Delta R_k\right]\right\} \quad (5)$$

式(5)为子脉冲经过 Dechirp 处理后在时域的结果.可以看出,子脉冲变换至时域后为一串时宽为  $T$  的矩形脉冲形式.

实际上, RSCFS 信号可视为 LFM 信号的随机降采样发射信号样式,通过随机选择其中的  $M$  个子段进行发射,在接收端利用信号处理手段合成得到大的带宽,其相互关系如图 1 所示.

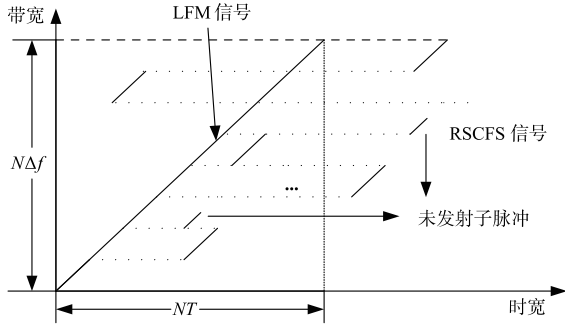


图1 LFM信号与RSCFS信号关系示意图

从图 1 可看出:在频域上 RSCFS 信号可等效为带宽为  $N\Delta f$ 、在时域上等效为合成时宽为  $NT$  的 LFM 信号<sup>[21]</sup>.因此,在 RSCFS 信号宽带合成时可以等效为相应的 LFM 信号进行处理.为此,我们首先分析具有带宽为  $N\Delta f$ 、脉宽为  $NT$  的 LFM 信号,其经 Dechirp 处理后变换至时域的结果为<sup>[20]</sup>:

$$s_{LFM}(t') = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k \text{rect}\left(\frac{t'}{NT}\right) \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{c}(f_0 + \mu t')\Delta R_k\right]\right\} \quad (6)$$

式中,  $t'$  为 LFM 信号对应的快时间,且  $t' = -NT/2 + [0, 1/f_s, \dots, (NL-1)/f_s]$ .

比较式(5)和式(6)可知,经过 Dechirp 处理后的 RSCFS 信号与 LFM 信号在时域均为单载频脉冲形式,且 RSCFS 信号脉压后的时域脉冲信号同样可以看成 LFM 脉压后时域信号的随机采样形式,两者之间的关系可以表示为:

$$\mathbf{S}_{RSCFS} = \Phi \mathbf{S}_{LFM} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{S}_{RSCFS} \in \mathbb{C}^{ML \times 1}$ ,且可以表示为  $\mathbf{S}_{RSCFS} = [s_1(\hat{t}; m)^T, \dots, s_m(\hat{t}; m)^T, \dots, s_M(\hat{t}; m)^T]^T$ ;  $\mathbf{S}_{LFM} = [s_{LFM}(t')]^T \in \mathbb{C}^{NL \times 1}$ ;  $\Phi \in \mathbb{C}^{ML \times NL}$  为随机降采样量测矩阵,其形式为:

$$\Phi = \Phi' \otimes \mathbf{I} \quad (8)$$

式中,  $\otimes$  为 Kronecker 积;  $\mathbf{I}$  为  $L \times L$  维单位对角矩阵;  $\Phi' = \{\varphi_{m,i}\} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ ,且

$$\varphi_{m,i} = \begin{cases} 1, & i = n_m \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (9)$$

经 Dechirp 处理后的 RSCFS 信号在时域的宽带合成示意图如图 2 所示.

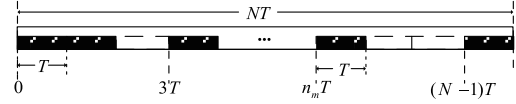


图2 RSCFS信号宽带合成关系示意图

图 2 中,斜线部分表示经过 Dechirp 处理后的 LFM 时域脉冲信号,黑色子段表示经 Dechirp 处理后的 RSCFS 信号时域子脉冲信号,虚线部分为未发射的子脉冲信号.因此,对于 RSCFS 信号,即是将  $M$  个时宽为  $T$  的矩形子脉冲合成为一个时宽为  $NT$  的矩形脉冲,等效为相应的 LFM 信号进行处理.

#### 3.1 不模糊距离窗大小分析

下面分析经过上述等效处理后,信号不模糊距离窗大小的变化情况.对于 RSCFS 信号,其不模糊距离窗长度为<sup>[4]</sup>:

$$R_u = \frac{c}{2\Delta f} \quad (10)$$

当目标的尺寸大于  $R_u$  时,距离像将会出现混叠, RSCFS 信号的距离像混叠示意如下图 3 所示,其中  $E$  为目标长度.例如,假设目标长度为 30m,信号不模糊距离窗大小为 25m,此时,落入不模糊距离窗外的目标将会折叠显示在一起,造成距离模糊,影响对目标的分辨.

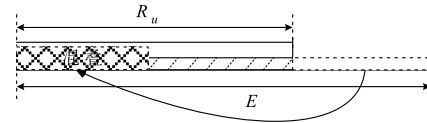


图3 RSCFS信号距离像混叠示意

为了在合成距离像时避免混叠,一般要求载频步进量  $\Delta f$  满足<sup>[4]</sup>:

$$\Delta f \leq \frac{c}{2E} \quad (11)$$

当按照式(6)、式(7)将 RSCFS 合成为一个带宽为  $N\Delta f$  的 LFM 信号进行处理.要研究信号的不模糊距离大小,可以通过检验回波的相位来分析,此时信号的相位项变为:

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{c}[f_0 + \mu t'(i)]\Delta R_k, i = 1, 2, \dots, NL \quad (12)$$

因而:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{4\pi\mu[f_0 + t'(i+1) - f_0 - t'(i)]\Delta R_k}{c[t'(i+1) - t'(i)]} \quad (13)$$

式中,  $\Delta t'$  为采样时间间隔.

上式等价为:

$$\Delta R_k = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi\mu\Delta t'} = \frac{cL\Delta\varphi}{4\pi\Delta f} \quad (14)$$

通过上式可以看出, 当  $\Delta\varphi_{\text{真值}} = \Delta\varphi_{\text{模糊}} + 2h\pi$  ( $h$  为正整数) 时存在距离模糊. 此时, 式可以变为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\text{真值}} &= \frac{\Delta\varphi_{\text{模糊}} + 2h\pi}{4\pi\Delta f} \\ &= \Delta\varphi_{\text{模糊}} + h\left(\frac{cL}{2\Delta f}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

因而, 此时的不模糊距离窗大小变为:

$$\Delta R = \frac{cL}{2\Delta f} = LR_u \quad (16)$$

因此, 可以看出利用上述等效处理方法时, 得到的不模糊距离窗大小为  $LR_u$ . 此时, 最终的不模糊距离窗大小不仅与载频步进量  $\Delta f$  有关, 而且与采样点数  $L$  联系起来, 图 4 为本文宽带合成方法得到的不模糊距离窗大小示意图.

$$\Psi_{LFM} = \begin{bmatrix} \exp[jaF_m(1)R'(1)] & \vdots & \exp[jaF_m(1)R'(q)] & \vdots & \exp[jaF_m(1)R'(P)] \\ \exp[jaF_m(p)R'(1)] & \vdots & \exp[jaF_m(l)R'(q)] & \vdots & \exp[jaF_m(l)R'(P)] \\ \exp[jaF_m(P)R'(1)] & \vdots & \exp[jaF_m(P)R'(q)] & \vdots & \exp[jaF_m(P)R'(P)] \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中  $a = -\frac{4\pi}{c}$ ;  $F_m(p) = f_0 + \mu t'(p)$ ;  $R'$  为目标场景长度且  $R' = [\rho_r, 2\rho_r, \dots, P\rho_r]$ ;  $\rho_r$  为距离分辨率.

基于式(7)和式(17)可得 RSCFS 信号的距离像重构模型:

$$S_{RSCFS} = \Phi S_{LFM} = \Phi \Psi_{LFM} \theta = \Theta \theta \quad (19)$$

式中,  $\Theta = \Phi \Psi_{LFM} \in \mathbb{C}^{ML \times P}$  为感知矩阵.

根据压缩感知理论, 只要矩阵  $\Theta$  满足约束等距性<sup>[9]</sup> (Restricted Isometry Property, RIP) 条件, 则信号  $\theta$  可通过低维观测信号  $S_{RSCFS}$  高概率重构. 要保证  $\Theta$  满足 RIP, 就要求设计的  $\Theta$  各列之间相关性最小, 通常选择随机矩阵作为量测矩阵. 而 RSCFS 信号的载频步进量随机变化, 因此满足上述约束等距性要求, 可以实现高概率的重构.

当考虑噪声时, 此时上述量测模型可写为:

$$S_{RSCFS} = \Theta \theta + w \quad (20)$$

其中  $w$  为白噪声序列.

依据压缩感知理论, 当量测数  $ML$  与信号维数  $Q$  以及信号稀疏度  $K$  满足  $ML \geq O(K \log Q)$  时, 上述问题的求解可转化为以下凸优化问题来得到:

$$\hat{\theta} = \min \|\theta\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \|S'_{RSCFS} - \Theta \theta\|_2 \leq \xi \quad (21)$$

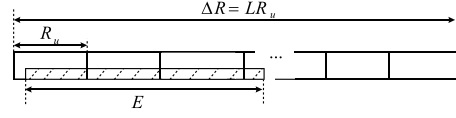


图4 RSCFS信号不模糊距离窗合成示意

另外, 从式(15)可知, 当载频步进量  $\Delta f$  固定不变时, 可以通过控制采样点数  $L$  的多少即控制采样频率  $f_s$  即可达到增大不模糊距离窗, 避免距离像混叠的目的, 因而降低了  $\Delta f$  对信号不模糊距离窗大小的限制. 对应上述分析, 下面进一步给出基于 CS 的 RSCFS 信号距离像重构方法.

### 3.2 基于 CS 的距离像重构方法

通常情况下, 目标只占观测区域的一小部分, 相比于观测区域, 目标可以认为是稀疏的, 因此, 满足稀疏性要求. 基于式(6)可以构建出基于 LFM 信号的距离像稀疏表示模型:

$$S_{LFM} = \Psi_{LFM} \theta \quad (17)$$

式中  $S_{LFM} \in \mathbb{C}^{P \times 1}$ ,  $P = NL$ ;  $\theta \in \mathbb{C}^{P \times 1}$  为一维距离像;  $\Psi_{LFM} \in \mathbb{C}^{P \times P}$  为稀疏基,  $\Psi_{LFM}$  的构造方式为:

式中  $\xi$  表示误差上界;  $\theta$  为  $\theta$  中非零的系数值;  $\|\cdot\|_p$  为  $l_p$  范数. 通过 CS 稀疏重构算法可以完成式(21)的求解, 得到最终的目标一维距离像  $\theta$ .

## 4 性能分析

### 4.1 距离分辨率

从式(4)可知, 经过 Dechirp 处理后的子脉冲信号在频域对应的是位置为  $f_i = 2\mu\Delta R_k/c$ , 宽度为  $T$  的 sinc 状窄脉冲, 因此子脉冲的距离分辨率为:

$$\rho_r' = \frac{c}{2\mu} \times \frac{1}{T} = \frac{c}{2\Delta f} \quad (22)$$

同样的, 在宽带合成过程中, 将 RSCFS 信号看作为等效 LFM 信号的随机降采样形式. 通过 Dechirp 处理后的 LFM 信号, 其对应的分辨率为:

$$\rho_r = \frac{c}{2\mu} \times \frac{1}{NT} = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (23)$$

上式进一步验证了通过本文距离像抗混叠处理方法, RSCFS 信号保持了原有的分辨率. 此外, 由于 CS 理论的引入还可进一步提高距离分辨率. 假设场景细化点数为  $Q > P$ , 此时的距离分辨率为  $\rho_r'' = \rho_r P/Q$ , 因此可以通过提高场景的细化点数来提高距离分辨

能力<sup>[22]</sup>.

#### 4.2 影响不模糊距离窗的因素

对于 Dechirp 处理时,采样频率应满足<sup>[20]</sup>:

$$f_s \geq 2\mu E/c \quad (24)$$

的要求,才能与回波信号作差频处理.从上图 4 可以看出,在载频步进量  $\Delta f$  不变的情况下,只要不模糊距离窗不小于目标尺寸,即

$$\Delta R \geq E \quad (25)$$

便可避免发生混叠.结合式(24)和式(25)可知,最终的采样率  $f_s$  需满足:

$$f_s \geq 2\mu\Delta R/c = 2g\mu R_u/c \quad (26)$$

其中  $g = \lceil E/R_u \rceil$ ,  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整运算.

因此可以看出:通过将 RSCFS 信号等效为 LFM 信号进行处理后,RSCFS 信号相应的不模糊距离窗实质上等效为子脉冲 dechirp 处理时需要的开窗大小.此时,在载频步进量  $\Delta f$  不变的情况下,子脉冲作 Dechirp 处理时的采样频率必须满足式(26)的要求.当  $f_s$  较大即当  $L$  选取过大,式(20)中的感知矩阵  $\Theta$  的维数急剧增大,算法处理时间也会大幅增加,在实际中应根据需要进行选取.

#### 4.3 重构性能分析

文献[4]研究的传统“IDFT”方法以及文献[13]基于 CS 理论的距离像重构方法都是利用子脉冲脉压后的采样信号进行距离像重构.子脉冲脉压后所能表征的最大距离为  $\rho_r' = c/2\Delta f$ ,因此在子脉冲采样时,采样点只能获取长度为  $\rho_r'$  的信息,且由于 sinc 包络对幅度的不均匀加权作用,此时将会出现采样损失.当目标长度不满足式(11)的要求时,采样误差将会更大,导致最终重构的误差增大<sup>[4]</sup>.对于文献[16]所提方法,由于子脉冲没有经过脉压处理,因此没有信噪比增益.而本文方法由于在子脉冲脉压后利用了回波的全部数据进行距离像稀疏重构,采样损失大大降低,同时保证了信噪比的增益.因此,最终重构误差将会减小,仿真实验也将对上述分析进行验证.

### 5 仿真与分析

本节通过仿真验证本文方法的性能.本仿真中噪声按照文献[23]的方式进行添加.定义 RSCFS 的采样率  $\alpha = M/N$ ,可以看出采样率越大,RSCFS 信号发射的子脉冲数越多.利用重构的相对均方误差  $Er = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|_F^2 / \|\mathbf{x}\|_F^2$  来表征距离像重构质量,其中  $\mathbf{x}$  为原始信号, $\hat{\mathbf{x}}$  为重构的信号.因此,Er 的值越小,重构精度越高.RSCFS 信号子脉冲载频步进量实际上可以随机选择.为便于各种算法间的性能比较,本节采用子脉冲载频步进量呈递进关系(即  $n_m < n_{m+1}$ )的 RSCFS 信号进行仿真研究.

仿真所用的 RSCFS 信号参数设置如下表 1 所示,最终的合成带宽为 1GHz,对应的距离分辨率为  $\rho_r = 0.15\text{m}$ ,信噪比设置为 20dB, $\alpha$  设置为 0.7.

表 1 信号参数设置

参数	仿真值	参数	仿真值
$f_0$	10GHz	$N$	25
$\Delta f$	40MHz	$R_0$	30Km
$T$	2.5 $\mu\text{s}$	PRF	1000Hz

#### 5.1 有效性验证

下面首先验证本文方法的不模糊距离窗大小.由 4.2 节影响不模糊距离窗的因素分析可知,在发射信号参数选定不变的条件下,不模糊距离窗大小与采样频率有关.依据式(26),当采样率  $f_s = 2\text{MHz}$  时,对应的不模糊距离为  $\Delta R = 18.75\text{m}$ .因此,只要目标相对于参考距离的长度不超过  $\Delta R$ ,便可避免距离混叠.为便于分析,设置 2 个目标,目标 1 的散射点相对位置为  $[1 \ 1.3 \ 10 \ 15]\text{m}$ ,目标 2 的散射点相对位置为  $[1 \ 1.3 \ 15 \ 25]\text{m}$ ,相应的散射点强度为  $[1, 0.8, 0.5, 0.8]$ ,图 5 为本文方法在采样率  $f_s = 2\text{MHz}$  时的仿真结果.

可以看出:图 5(a)中,由于目标的尺寸没有超过一个不模糊距离窗的长度,因此可以正确显示各散射点的位置.对于相对位置为  $[1 \ 1.3 \ 15 \ 25]\text{m}$  的目标,由于目标的最大尺寸超过  $\Delta R$ ,依据式(15),位置为 25m 的散射点将会折叠显示在相对位置为  $25 - 18.75 = 6.25\text{m}$  处,从图 5(b)的仿真结果与理论分析一致.此时依据式(26),可以通过提高采样频率的方法增大不模糊距离窗的大小,避免距离混叠的产生.图 6 为设置采样率  $f_s$  为 3MHz 时,利用本文方法重构得到的距离像结果.依据式(26),此时合成得到的不模糊距离窗大小为  $\Delta R = 30\text{m}$ ,因而可以正确显示出散射点的位置,也验证了不模糊距离窗大小与采样率  $f_s$  之间的关系.

#### 5.2 重构性能分析

为验证本文方法的重构性能,假设仿真信号参数保持不变( $f_s = 2\text{MHz}$ ,采样率  $\alpha$  为 0.7).仿真中将文献[13]基于 CS 的距离成像方法(方法 1)、文献[8]中提出的频域合成方法(方法 2)以及文献[16]提出的距离合成方法(方法 3)作为对比算法.另外基于 CS 的重构方法均采用 OMP 算法进行重构.利用不同重构算法得到的距离像成像结果如图 7 所示.

在图 7(a)中,由于传统基于 CS 的距离像合成方法存在距离混叠,散射点折叠显示在一个距离窗中,难以分辨散射点位置.图 7(b)中,成像结果能够正确反映散射点的位置,但是成像结果存在较多旁瓣.图 7(c)中的成像结果存在重构损失,这是由于回波没有脉压过程,重构结果存在虚假点.图 7(d)中,本文方法可以正

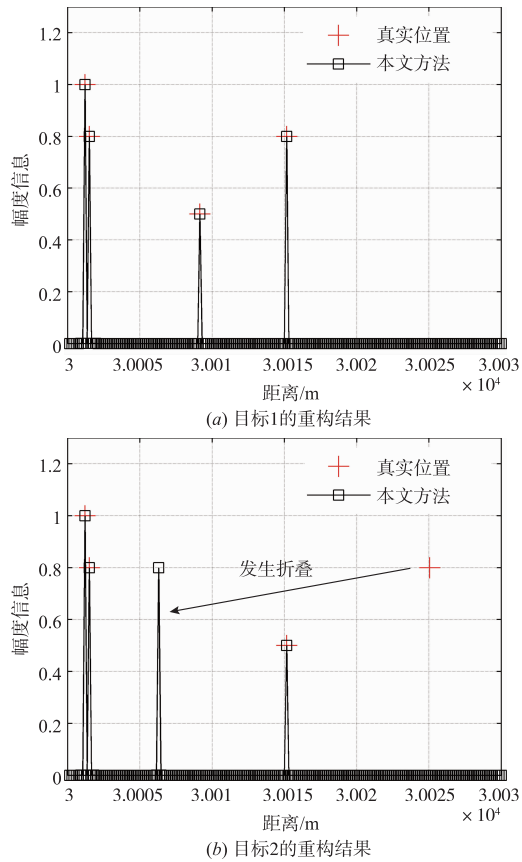
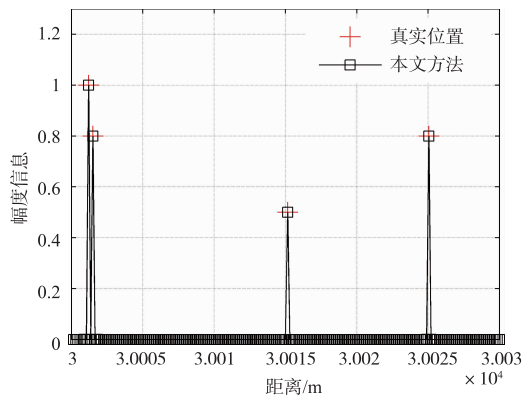


图5 不模糊距离窗大小验证

图6  $f_s=3\text{MHz}$ 时目标2重构结果

确显示目标的位置,不存在混叠现象,重构结果好于其他几种方法.

基于上述参数条件,图8为不同稀疏率以及信噪比条件下几种方法的重构误差性能曲线.由于方法一存在混叠问题,估计误差较大,因此没有进行对比实验.从图8(a)可以看出,在相同的采样率条件下,本文方法的重构误差最小.传统频域合成方法由于受频率稀疏的影响,导致重构误差处于较高的水平.对于图8(b),在相同的采样率情况下,本文方法的距离像成像误差受信噪比影响较小,因此本文方法可以在较低的

采样率以及较低的信噪比条件下重构出高精度的距离像成像结果.

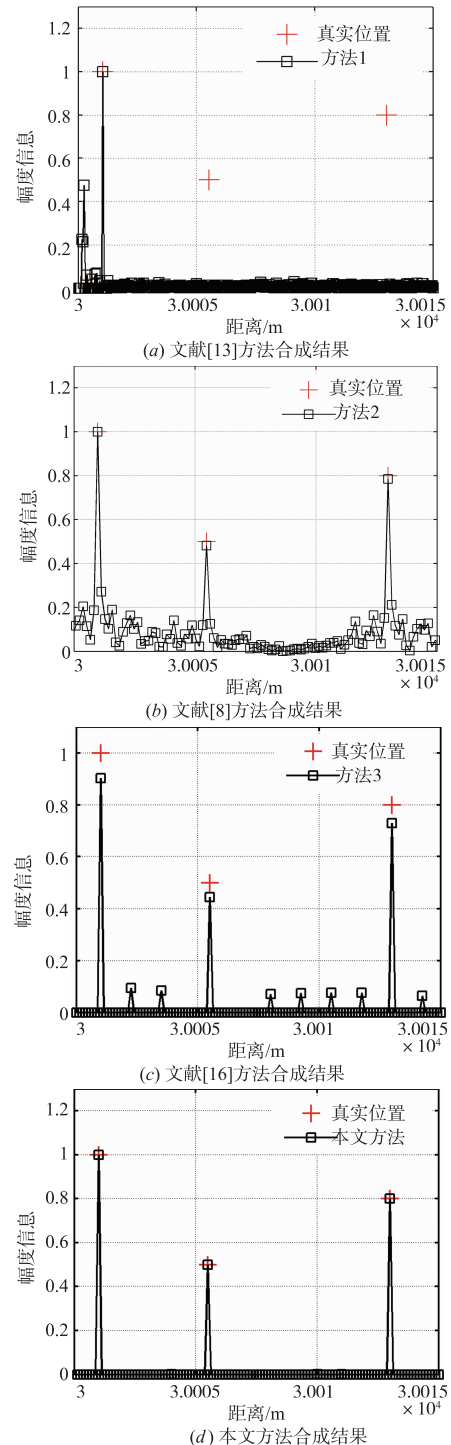
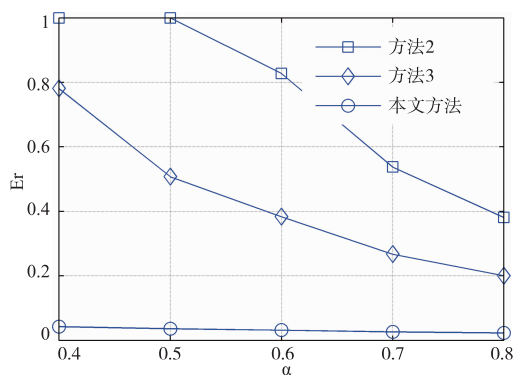


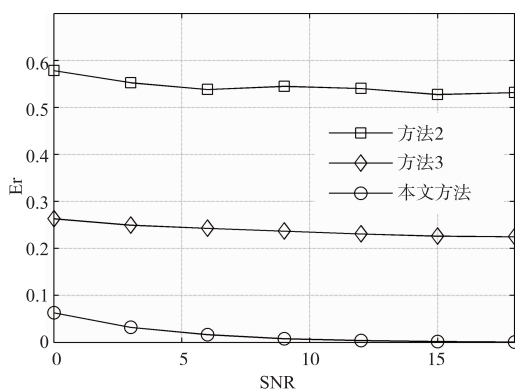
图7 RFSCS距离像成像结果比较

### 5.3 实测数据验证

本节利用 Yak42 实测数据进一步验证所提方法的有效性,该实测数据为线性调频信号形式,其维度为  $256 \times 256$ <sup>[18]</sup>.由于本文方法是将随机稀疏调频步进信号等效为线性调频信号的随机采样形式进行处理,因



(a) 不同采样率条件下误差曲线



(b) 不同信噪比条件下误差曲线

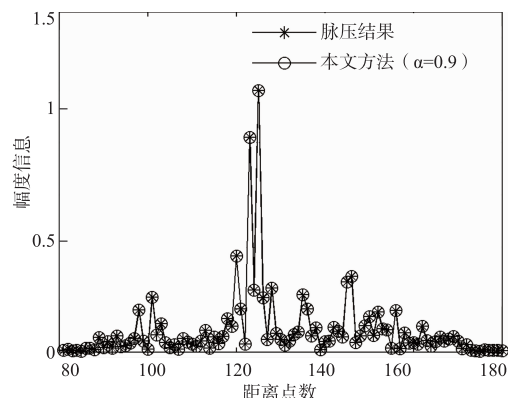
图8 不同条件下重构误差对比

此为模拟随机稀疏调频步进信号形式,假设实测数据距离向包含 64 个子脉冲信号,则此时每个子脉冲包含 4 个采样点,下图 9(a) ~ (c) 为利用本文方法得到的成像结果(图中显示的为第 10 组脉冲的成像结果)。

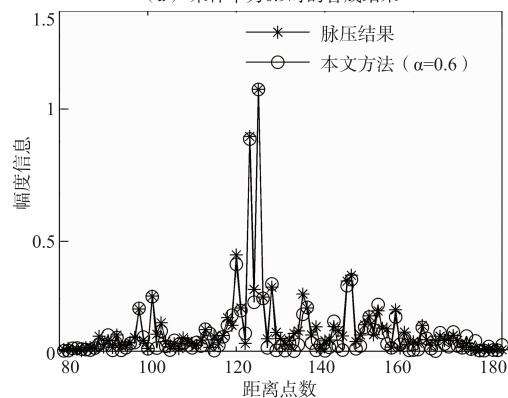
从图 9(a) ~ (c) 可以看出,利用本文方法可以准确重构出原始距离像信息,并不存在距离像混叠现象,并且只是在采样率下降的条件下,出现了重构误差,但是仍能反映出目标的散射点分布情况. 图 10 为继续添加不同高斯白噪声条件下的重构误差曲线. 从图中可以看出随着信噪比的增加,本文方法重构误差也随之增大,这也与上节的仿真结果一致. 因而实测数据进一步验证了本文方法的有效性.

## 6 结论

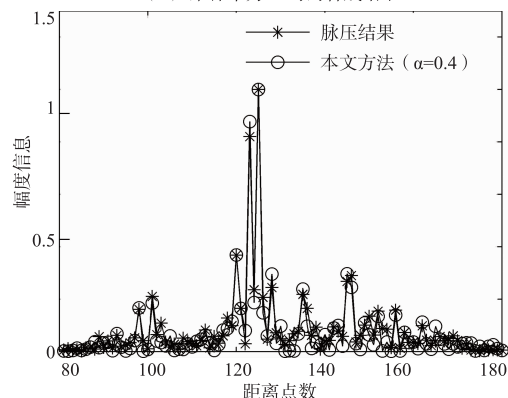
本文研究了一种 RSCFS 信号距离像抗混叠方法,分析了该方法增大不模糊距离窗大小的原理以及影响因素. 通过将 RSCFS 信号等效为 LFM 信号的降采样发射形式,构建相应的距离像重构模型,得到最终的成像结果. 该方法主要优势体现在:一是将 RSCFS 信号合成为具有等效带宽的 LFM 进行处理,降低了对不模糊距离窗的大小限制,克服了距离像混叠问题;二是在距离像成像时利用了所有的回波采样数据,提高了重构精度;另外,通过对采样率的合理设置既可以避免距离像



(a) 采样率为0.9时的合成结果



(b) 采样率为0.6时的合成结果



(c) 采样率为0.4时的合成结果

图9 实测数据验证结果示意图

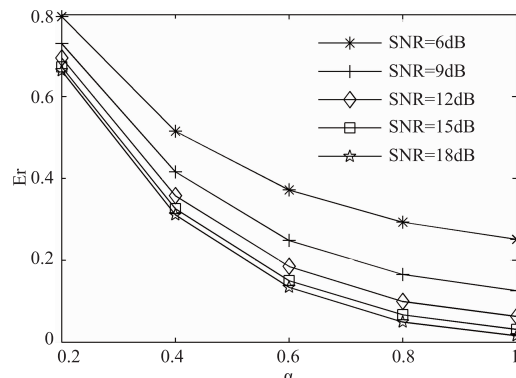


图10 不同信噪比条件下误差曲线

混叠,又可实现距离像的快速重构.但是本文是在平动补偿后进行的分析如何基于 RSCFS 信号同时实现补偿与成像将是下一步的研究方向.

#### 参考文献

- [1] XU Hai-sheng, WANG Jian, YUAN Jian, et al. Range-resolution improvement for spaceborne/airborne bistatic synthetic aperture radar using stepped-frequency chirp trains [J]. *IET Signal Processing*, 2015, 9(4): 377 – 386.
- [2] XU Dan-lei, DU Lan, LIU Hong-wei, et al. Compressive sensing of stepped-frequency radar based on transfer learning [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(12): 3076 – 3087.
- [3] 吕明久, 李少东, 杨军, 等. 基于随机调频步进信号的高分辨 ISAR 成像方法 [J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(12): 3129 – 3136.  
LV Ming-jiu, LI Shao-dong, YANG Jun, et al. High resolution ISAR imaging method based on random chirp frequency-stepped signal [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3129 – 3136. (in Chinese)
- [4] 毛二可, 龙腾, 韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理 [J]. *航空学报*, 2001, 22(增): 16 – 25.  
MAO Er-ke, LONG Teng, HAN Qiu-yue. Digital signal processing of stepped frequency radar [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(Suppl): 16 – 25. (in Chinese)
- [5] HU Ke-bin, ZHANG Xiao-ling, SHI Jun, et al. A novel synthetic bandwidth method based on BP imaging for stepped-frequency SAR [J]. *Remote Sensing Letter*, 2016, 7(8): 741 – 750.
- [6] 高昭昭. 高分辨 ISAR 成像新技术研究 [D]. 陕西西安: 西安电子科技大学, 2009.  
GAO Zhao-zhao. New technologies of high resolution ISAR imaging [D]. Xi'an, Shaanxi: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [7] TAIT N W, LORD J, WDKINSON R. The use of a frequency domain stepped frequency technique to obtain high range resolution on the CSIR X band SAR system [A]. *Africon Conference [C]*. Africa: IEEE Africon, 2002. 327 – 332.
- [8] RICHARD T L, MICHAEL R I. High resolution SAR processing using stepped-frequencies [A]. *Geoscience and Remote Sensing (IGARSS '97) [C]*. Singapore: IEEE Xplore, 1997. 490 – 492.
- [9] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [10] ZHU Feng, ZHANG Qun, LUO Ying, et al. A novel cognitive ISAR imaging method with random stepped frequency chirp signal [J]. *Sci China Inf Sci*, 2012, 55(8): 1910 – 1924.
- [11] ZHAO Tong, NAN Zheng, HUANG Tian-yao. Performance analysis of joint time delay and Doppler-stretch estimation with random stepped-frequency signals [OL]. <http://arxiv.org/abs/1605.05990v1>, 2016.
- [12] LIU Yi-ming, XING Meng-dao, ZHANG Lei, et al. Novel range profile synthesis algorithm for linearly stepped-frequency modulated inversed synthetic aperture radar imaging of remote manoeuvring target [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2011, 5(4): 496 – 506.
- [13] 刘记红. 基于压缩感知的 ISAR 成像技术研究 [D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
LIU Ji-hong. Inverse synthetic aperture radar imaging technique based on compressed sensing [D]. Changsha, Hunan: Graduate School of National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] LIU Yi-ming, HUANG Tian-yao, MENG Hua-dong, et al. Fundamental limits of HRR profiling and velocity compensation for stepped-frequency waveforms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(17): 4490 – 4504.
- [15] LIU Yi-ming, XING Meng-dao, ZHANG Lei, et al. Novel range profile synthesis algorithm for linearly stepped-frequency modulated inversed synthetic aperture radar imaging of remote manoeuvring target [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2011, 5(4): 496 – 506.
- [16] LI Hong-tao, WANG Chao-yu, WANG Ke, et al. High resolution range profile of compressive sensing radar with low computational complexity [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2015, 9(8): 984 – 990.
- [17] ZHANG Lei, QIAO Zhi-jun, XING Meng-dao, et al. High resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4630 – 4651.
- [18] HU Xiao-wei, TONG Ning-ning, ZHANG Yong-shun, et al. Moving target's HRRP synthesis with sparse frequency-stepped chirp signal via atomic norm minimization [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(9): 1212 – 1215.
- [19] HU Xiao-wei, TONG Ning-ning, DING Shan-shan, et al. ISAR imaging with sparse stepped frequency waveforms via matrix completion [J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(9): 847 – 854.
- [20] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
BAO Zheng, XING Meng-dao, WANG Tong. *Radar Imaging Technology* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [21] 高磊. 压缩感知理论在宽带成像雷达 Chirp 回波处理中

的应用研究[D]. 湖南长沙:国防科技大学学报,2011.

GAO Lei. Study on application of compressed sensing theory in Chirp echoes processing for broadband Imaging radar[D]. Changsha, Hunan: Graduate School of National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

- [22] KRICHENE H A, PEKALA M J, SHARP M D, et al. Compressive sensing in through-the-wall radar imaging [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Prague: Czech Republic, 2011. 4008 - 4011.

- [23] 李少东, 陈文峰, 杨军, 等. 任意稀疏结构的多量测向量快速稀疏重构算法研究[J]. 电子学报, 2015, 43(4): 708 - 715.

LI Shao-dong, CHEN Wen-feng, YANG Jun, et al. Study on the fast sparse recovery algorithm via multiple measurement vectors of arbitrary sparse structure [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(4): 708 - 715. (in Chinese)

#### 作者简介



吕明久 男, 1985 年出生, 安徽庐江人. 2008 年、2010 年在空军雷达学院获得工学学士、工学硕士学位, 现为空军预警学院博士研究生, 主要从事信号检测与识别、雷达成像等方面研究.

E-mail: lv\_mingjiu@163.com



李少东 男, 1987 年出生, 河北保定人. 2010 年、2012 年、2016 年在空军雷达学院获得工学学士、工学硕士、工学博士学位, 现为解放军 93253 部队工程师. 主要研究方向为压缩感知在 ISAR 中的应用、雷达成像.

E-mail: liying198798@126.com

杨军 男, 1973 年出生于云南大理. 空军预警学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为雷达系统、SAR/ISAR 成像等.

马晓岩 男, 1962 年出生于湖北赤壁. 空军预警学院教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、现代信号处理及其应用.