

# 基于稀布阵综合脉冲孔径雷达的长时间相干积累方法<sup>1</sup>

陈伯孝 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要** 本文研究了稀布阵综合脉冲孔径雷达的长时间相干积累特点及其存在的问题;提出了长时间相干积累中一种易于实现的运动补偿方法和基于时频分析的长时间相干积累方法;并给出了计算机模拟结果. 结果表明 SIAR 雷达体制对微弱运动目标有较好的检测性能.

**关键词** 稀布阵, 综合脉冲孔径雷达, 运动补偿, 时频分析, 相干积累

**中图分类号** TN958

## 1 引言

现代雷达面临巡航导弹和隐身目标以及洲际导弹弹头再入体之类极小 RCS 目标的挑战. 提高雷达的探测能力始终是人们关心的课题. 一般雷达为提高检测能力, 常用相干积累技术, 但因波束扫描, 可供积累的脉冲数有限. 而稀布阵综合脉冲孔径雷达 (简称 SIAR) 采用 25 个发射阵元同时全向地辐射不同频率调制的宽脉冲信号, 使得发射信号在空间叠加后不形成方向图, 即辐射能量在所有方向上均匀分布<sup>[1,2]</sup>. 因此 SIAR 中不需要波束扫描而可以获得很长的相干积累时间. 本文根据该雷达在长时间相干积累中存在的问题, 提出一种简单的易于实现的运动补偿方法, 并将时频分析应用于长时间相干积累中.

## 2 SIAR 长时间相干积累特点及其存在的问题

SIAR 通过信号处理可以在接收端同时形成多个波束或波束堆积, 甚至可以充满整个空间而无波束扫描问题, 可以一直“盯住”目标, 从而获得极高的信噪比改善<sup>[3]</sup>. 但是, SIAR 进行长时间相干积累有三个问题需要考虑:

(1) 发射信号带宽引起的多普勒频率误差限制了相干积累时间. SIAR 同时发射的 25 个频率信号中, 最高频率和最低频率引起的多普勒频率误差为

$$\varepsilon_{f_d} = (2B/c)v_r, \quad (1)$$

其中  $B$  为发射信号“总体”带宽,  $v_r$  为径向速度,  $c$  为光速.  $\varepsilon_{f_d}$  应小于 FFT 子滤波器的频宽  $\Delta F$ ,  $\Delta F$  为积累时间的倒数, 因  $\Delta F = \text{PRF}/N$ , 故在 PRF 一定的前提下限制了积累脉冲数  $N$ . 假定有一匀加速运动目标,  $v_r = 580\text{m/s}$ , 径向加速度  $a_r = 9.8\text{m/s}^2$ , 图 1 给出了对 1024 次回波进行相干积累的输出信号. 可见先 FFT 后脉冲综合处理时, 在两个多普勒通道的输出信号接近相等, 表明同一速度对应的多普勒频率分散到多个多普勒通道 (称多普勒扩散), 同一多普勒通道没有包括全部发射信号, 故综合后有很大损失. 而先综合后 FFT 处理可以克服多普勒扩散的现象.

(2) 目标穿过一个分辨单元的时间限制. 若积累时间太长 (如几秒钟), 目标可能运动了几个距离单元, 因此需对综合得到的窄脉冲进行包络移动补偿.

(3) 目标长时间运动存在多普勒频率的变化, 故不能采用常规的滤波处理方法.

<sup>1</sup> 1997-05-13 收到, 1997-10-13 定稿

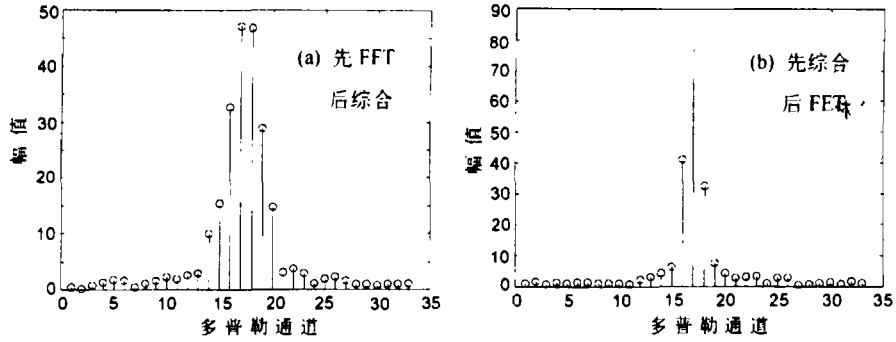


图 1 目标所在距离单元、所在多普勒通道附近的 32 个多普勒通道输出

3 长时间相干积累中运动补偿方法

针对问题 (1), (2), 我们提出先对所有回波分组进行多普勒滤波, 假定有  $(M \cdot N)$  次回波, 按顺序分成  $M$  组, 每组  $N$  个回波。先对每组的  $N$  个脉冲做 FFT, 然后进行脉冲综合处理, 再完成这  $M$  组综合输出的合成处理。在合成处理之前, 考虑到长时间相干积累目标可能运动了几个距离单元, 需进行运动补偿 (即包络对齐)。假定距离分辨单元大小为  $\Delta R$ , 速度分辨单元大小为  $\Delta v = \lambda / (2N \cdot T_r)$ ,  $\lambda$  为平均波长,  $T_r$  为脉冲重复周期, 则可以根据每个多普勒通道对应的速度确定各组脉冲之间目标运动距离单元数。例如, 第  $m$  组脉冲的第  $i$  个多普勒通道的目标运动距离单元数为

$$N_R = \text{int} \left[ \frac{i \Delta v \cdot m N T_r}{\Delta R} \right] = \text{int} \left[ \frac{\lambda \cdot i \cdot m}{2 \Delta R} \right], \quad i = -\frac{N}{2} \sim \left( \frac{N}{2} - 1 \right), \quad m = 0 \sim M - 1. \quad (2)$$

对上述目标, 取  $N=64$ ,  $M=16$ 。图 2 给出了  $M$  组脉冲目标所在多普勒通道的输出信号, 从图 2(a) 可看出, 目标运动了几个距离单元, 而图 2(b) 是按 (2) 式确定的移位数完成了包络对齐后的输出信号。

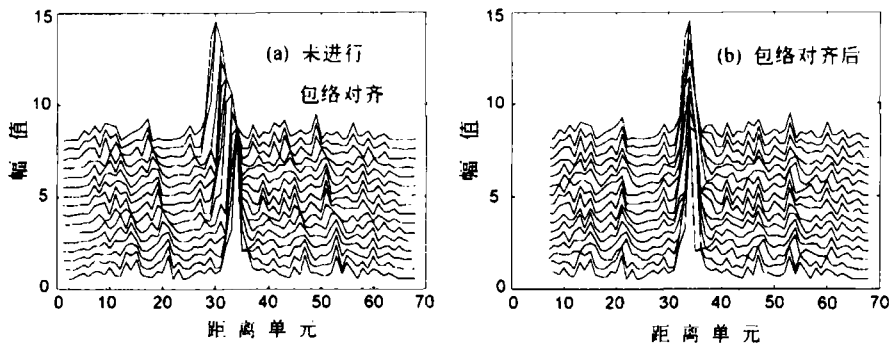


图 2 16 组脉冲目标所在多普勒通道的输出信号

当然, 在分组处理时要避免多普勒走动, 即避免在不同组之间目标进入了不同的多普勒通道, 而组间相干积累时是对相同多普勒通道进行的。例如, 若  $T_r=1\text{ms}$ ,  $N=64$ , 多普勒分辨单元大小  $\Delta f_d=15\text{Hz}$ , 波长  $\lambda=3\text{m}$ , 则要求目标径向速度的变化量  $\Delta v_r < 22.5\text{m/s}$ 。如

果目标径向速度变化较大, 可以减小每组的脉冲数  $N$ , 而组数  $M$  增多, 就可以避免组间相干积累时出现多普勒走动, 这时只是包络对齐精度有一点降低。

#### 4 时频分析在长时间相干积累中的应用

针对问题 (3), 由于通常目标运动方向与雷达视线有一定的夹角, 即使目标匀速运动, 多普勒频率  $f_d$  也存在一定的变化。由文献 [4] 知, 对匀速直线运动的目标,  $f_d$  近似是按线性调频 (LFM) 规律变化的, 其线性调频速率为

$$\mu_f = df_d/dt \approx -[2V^2/(\lambda R)] \sin^2 \phi(t), \quad (3)$$

其中  $\phi(t)$  为目标运动方向与雷达视线的夹角,  $V$  为目标速度,  $R$  为目标距离。当对图 2(b) 中目标所在距离单元信号进行时频分析时, 从图 3 可看出, 组间多普勒频率变化近似为线性调频信号。因此, 组间相干积累时需采用 LFM 信号的处理和检测方法。

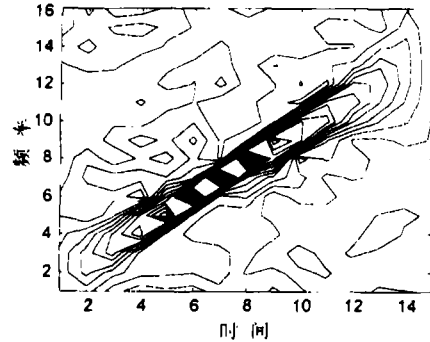


图 3 目标所在距离单元信号的时频特性

对 LFM 信号的检测, 通常采用 Radon-Wigner 变换 (RWT)<sup>[4,5]</sup>, 因为它有基于解线性调频 (Dechirping) 的快速算法, 即将信号乘以  $\exp(-j\mu t^2/2)$  ( $\mu$  以各种不同值作搜索), 并作 FFT。因此, 在对组间相同多普勒通道输出信号进行合成处理时, 需采用 Dechirping 方法进行组间相干积累。图 4 给出了对图 2(b) 信号直接按 FFT 方法和按 Dechirping 方法进行组间相干积累输出结果, 可见采用时频分析的方法可以大大提高其相干积累性能。

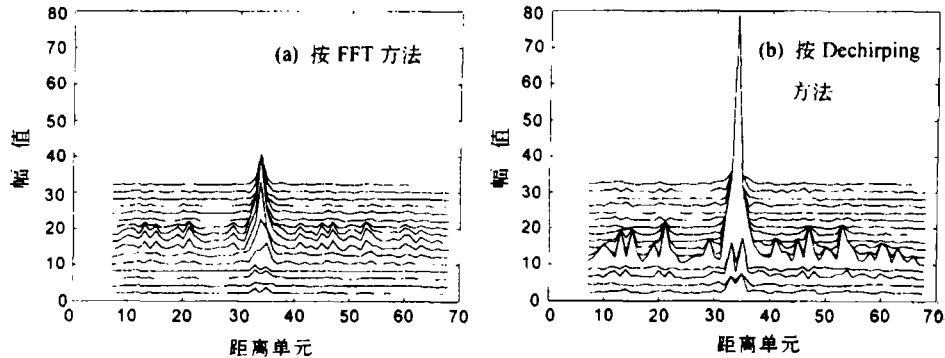


图 4 组间相干积累输出结果

综上所述, SIAR 长时间相干积累信号处理过程如图 5 所示。接收信号经上述处理后, 信噪比的增量为  $10 \cdot \log(N_r \cdot N_t \cdot M \cdot N)$  (dB)。图 6 给出了输入信噪比  $SNR_{in}$  为  $-20$  dB 的输出结果。这里只考虑单个接收天线,  $M=32$ ,  $N=64$ ,  $v_r=300$  m/s,  $SNR_{out}$  表示输出信噪比。可见信噪比的改善达 40 多分贝。若考虑 25 个接收天线, 信噪比的改善还可以提高十几个分贝。这表明 SIAR 雷达体制在信噪比很低的情况下仍可以正常工作, 有利于对微弱

运动目标的检测。若采用大时宽带宽信号<sup>[6]</sup>，还可进一步提高对弱信号的检测能力。



图 5 SIAR 长时间相干积累处理流程

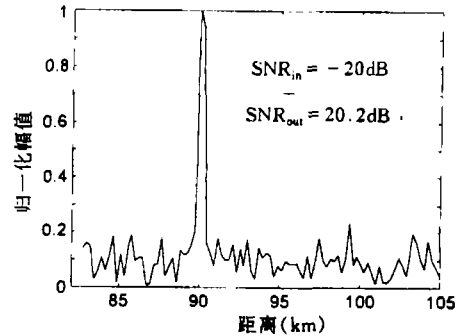


图 6 2048 次回波相干积累输出结果

## 5 结 论

本文研究了 SIAR 的长时间相干积累特点；提出了长时间相干积累中一种简单的运动补偿方法和基于时频分析的长时间相干积累方法。结果表明，SIAR 雷达体制可以通过长时间相干积累，以提高对微弱运动目标的检测能力。

## 参 考 文 献

- [1] Dorey J, Garnier G, Auvray G. RIAS, synthetic impulse and antenna radar. International Conference on Radar, Paris: 1989, 556-562.
- [2] 保铮, 张庆文. 一种新型的米波雷达——综合脉冲与孔径雷达. 现代雷达, 1995, 17(1): 1-13.
- [3] 陈伯孝. SIAR 四维跟踪及其长相干积累等技术研究: [博士论文]. 西安: 西安电子科技大学, 1997.
- [4] 孙晓兵. 非平稳信号的时频分析方法及其应用: [博士论文]. 西安: 西安电子科技大学, 1994.
- [5] Kumar B, Carroll C. Performance of Wigner distribution function base integration methods. Opt. Eng., 1984, 23(6): 732-737.
- [6] 陈伯孝, 张守宏. 基于相位编码的稀布阵综合脉冲孔径雷达的脉冲压缩性能分析. 电子科学学刊, 1998, 20(1): 50-55.

## LONG-TIME COHERENT INTEGRATION BASED ON SPARSE-ARRAY SYNTHETIC IMPULSE AND APERTURE RADAR

Chen Baixiao Zhang Shouhong

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071)

**Abstract** Sparse-array Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR) can isotropically radiate so that the long-time coherent integration can be obtained. But there are some problems in the process. An effective method of the long-time coherent integration is presented, which includes simply implemented motion compensation and time-frequency analysis. The result shows that the novel radar (SIAR) system has better performance for weak target detection.

**Key words** Sparse-array, Synthetic impulse and aperture radar, Motion compensation, Time-frequency analysis, Coherent integration

陈伯孝: 男, 1966 年生, 博士, 主要从事雷达信号处理、雷达波形设计、目标识别与跟踪等方面的研究。

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事雷达系统和雷达信号处理等领域的研究工作。