

# 强地杂波背景下步进线性调频信号 ISAR 成像方法

冯有前<sup>1</sup>, 项 艳<sup>2</sup>, 孙亚军<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 3. 空军工程大学 训练部, 陕西 西安 710051)

**摘 要:**在低空飞行目标的 ISAR 成像中,回波信号常被地杂波掩盖导致无法进一步处理,如何有效地剔除杂波一直是困扰人们的难题。相消处理是一种典型而又简单易行的杂波滤除方法,首先对相消处理展开了一定研究,相干信号经过相消处理,可以有效地滤除固定地物产生的杂波,为后续的成像处理提供有利数据。针对线性调频步进信号体制 ISAR,对回波信号的相邻脉冲串使用同一拉伸延时量进行处理,然后运用相消技术滤除杂波,最后再进行成像。仿真结果表明,文中提出的成像方法鲁棒性较好,可以获得较好的成像结果,为强地杂波背景下运动目标的 ISAR 成像提供了一种有效途径。

**关键词:**ISAR 成像;步进线性调频信号;相消处理;脉冲串

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.01.013

**中图分类号:**TN957.52 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)01-0054-05

ISAR 成像技术是现阶段被广泛研究和应用的重要技术。随着飞行技术的发展,亚音速、超音速轰炸机、攻击机和巡航导弹等低空飞行器相继出现。当雷达照射此类飞行目标时,由于大量固定地物引起的杂波进入雷达接收机,导致无法成像,所以强地杂波背景下的低空飞行目标成像问题一直是困扰人们的难题。目前现有的一些信号处理方法大都是假设不存在杂波或假设杂波被有效剔除的前提下进行的<sup>[1]</sup>。而在强地杂波背景下,多数文献仅限于目标检测<sup>[2-4]</sup>,这是由于在对这些目标(如低空飞行的飞机、导弹等)进行 ISAR 成像时现有的一些成像方法不适用。所以,强地杂波背景下如何有效地对运动目标进行识别以及成像,一直是国内外学术界讨论的热点<sup>[5-6]</sup>。

相消处理是一种典型而又简单易行的杂波滤除方法<sup>[7]</sup>。相干信号经过相消处理,可以有效地滤除信号中的杂波分量。文献[8]提出了强地杂波背景下对运动目标的成像方法,在对拉伸(Stretch)信号的处理时,采用了前后两次回波使用同一拉伸延时量<sup>[9]</sup>进行处理的方法,使用相消处理滤除杂波后实现成像,使得滤除杂波后的回波信号对最终成像效果几无影响。文献[10]提出了强地杂波背景下基于线性调频步进信号体制 ISAR 的成像方法,该方法需要对线性调频步进信号的信号形式进行简单变化,然后对回波信号进行相消处理后成像。

本文针对步进线性调频体制 ISAR,在不改变信号形式的前提下,对回波信号的相邻脉冲串使用同一拉伸延时量进行处理,运用相消技术滤除杂波后再进行成像,获得了较好的成像结果,为强地杂波背景下运动目标的 ISAR 成像提供了一种有效途径。

## 1 基于步进线性调频信号体制的成像方法

步进线性调频信号是一个包含一组周期性出现的线性调频子脉冲的脉冲串,每个子脉冲的载频都是递

\* 收稿日期:2009-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60672032);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2007F28, SJ08F10)

作者简介:冯有前(1960-),男,陕西富平人,教授,博士生导师,主要从事信号与信息处理、小波理论及其应用研究。

E-mail:helen325@sina.com

增的<sup>[5]</sup>。假设其每个脉冲串中包括  $N$  个子脉冲,脉冲间频率步进值为  $\Delta f$ ,子脉冲宽度为  $T_1$ ,子脉冲重复间隔为  $T_r$ ,成像时间设为  $T$ ,这样在成像过程中雷达应该发射  $M_B$  个脉冲串。

假设雷达和目标之间的几何关系如图 1 所示。其中雷达固定在  $(X, Y, Z)$  坐标系统的原点  $O$ ;  $Q$  为一个散射点,  $P$  为参考点,  $(x, y)$  为散射点  $Q$  的坐标,目标沿  $Y$  轴的运动速度为  $v$ 。

如图 1 所示,固定杂波点为  $B(x_b, y_b)$ ,  $R_q(m)$ 、 $R_b$  分别是散射点  $Q$ 、 $B$  与雷达之间的距离,  $R_0(m)$  是参考点  $P$  与雷达之间的距离,  $R_{\Delta q}(m) = R_q(m) - R_0(m)$ ,  $S_{\text{ref}}$  为参考点  $P$  的回波信号。令  $t' = t - mNT_r - iT_r$ ,  $s_{rq}(t', i; m)$  和  $s_{rb}(t', i; m)$  分别为  $Q$ 、 $B$  两散射点的回波信号。雷达发射的第  $m$  个脉冲串里的第  $i$  个子脉冲的回波经过拉伸处理<sup>[6]</sup>后,为:

$$s_{cq}(t', i; m) = s_{rq}(t', i; m) \cdot s_{\text{ref}}^*(t', i; m) = \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m))\Delta\tau_q(m)) \cdot \exp(-j2\pi f_i \Delta\tau_q(m)) \cdot \exp(-j2\pi\mu\Delta\tau_q^2(m)) \quad (1)$$

$$s_{cb}(t', i; m) = s_{rb}(t', i; m) \cdot s_{\text{ref}}^*(t', i; m) = \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m))(\tau_b - \tau_0(m))) \cdot \exp(-j2\pi f_i (\tau_b - \tau_0(m))) \cdot \exp(-j2\pi\mu(\tau_b - \tau_0(m))^2) \quad (2)$$

式中:  $\tau_0(m) = 2R_0(m)/c$ ;  $\Delta\tau_q(m) = 2R_{\Delta q}(m)/c$ ;  $\tau_b = 2R_b/c$ 。

同理,雷达发射的第  $m+1$  个脉冲串里的第  $i$  个子脉冲的回波经过拉伸处理后,为:

$$s_{cq}(t', i; m+1) = s_{rq}(t', i; m+1) \cdot s_{\text{ref}}^*(t', i; m+1) = \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m+1))\Delta\tau_q(m+1)) \cdot \exp(-j2\pi f_i \Delta\tau_q(m+1)) \cdot \exp(-j2\pi\mu\Delta\tau_q^2(m+1)) \quad (3)$$

$$s_{cb}(t', i; m+1) = s_{rb}(t', i; m+1) \cdot s_{\text{ref}}^*(t', i; m+1) = \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m+1))(\tau_b - \tau_0(m+1))) \cdot \exp(-j2\pi f_i (\tau_b - \tau_0(m+1))) \cdot \exp(-j2\pi\mu(\tau_b - \tau_0(m+1))^2) \quad (4)$$

为保证拉伸处理后输出信号的相干性,对同一组信号采用相同的参考信号,即:  $\tau_0(m) = \tau_0(m+1)$ 。

所以式(4)改写为:

$$s_{cb}(t', i; m+1) = \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m))(\tau_b - \tau_0(m))) \cdot \exp(-j2\pi f_i (\tau_b - \tau_0(m))) \cdot \exp(-j2\pi\mu(\tau_b - \tau_0(m))^2) \quad (5)$$

经过相邻脉冲串间的对消,得到:

$$s_{cc}(t', i; m) = (s_{cq}(t', i; m+1) + s_{cb}(t', i; m+1)) - (s_{cq}(t', i; m) + s_{cb}(t', i; m)) = (s_{cq}(t', i; m+1) - s_{cq}(t', i; m)) + (s_{cb}(t', i; m+1) - s_{cb}(t', i; m)) = \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m+1))\Delta\tau_q(m+1)) \cdot \exp(-j2\pi f_i \Delta\tau_q(m+1)) \cdot \exp(-j2\pi\mu\Delta\tau_q^2(m+1)) - \exp(-j2\pi\mu(t' - \tau_0(m))\Delta\tau_q(m)) \cdot \exp(-j2\pi f_i \Delta\tau_q(m)) \cdot \exp(-j2\pi\mu\Delta\tau_q^2(m)) \quad (6)$$

可以看出,经过以上处理,作为地杂波的固定点目标回波信号已经完全消去,剩下的是运动目标回波相减后相邻脉冲重复周期变化的部分输出。

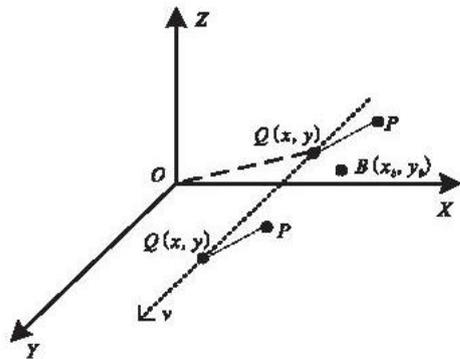


图 1 雷达和目标之间的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship between radar and target

## 2 仿真结果

仿真中采用的雷达初始载频  $f_c = 10$  GHz,发射步进线性调频信号的频率步进值  $\Delta f = 2.3438$  MHz,每个

脉冲串中包含  $N=64$  个子脉冲,从而获得的合成带宽  $B=N\Delta f=150$  MHz,子脉冲时宽  $T=1.2207 \times 10^{-6}$  s,子脉冲重复间隔  $T_r=3.9063 \times 10^{-5}$  s,脉冲串重复间隔  $NT_r=\frac{1}{400}$  s。

仿真运动目标是飞机,见图2。目标与雷达的几何关系见图1,其相对雷达的径向距离为10 km,运动速度  $v$  为300 m/s,成像时间为0.5 s,横向距离分辨率  $\Delta_R=1$  m。

假设杂波点在飞机的空域范围内均匀分布。图3给出了目标背景没有任何杂波情况下的ISAR成像结果。

根据仿真实例的数据计算出粗高分辨距离单元为64 m,精高分辨距离单元为1 m,本文假设不存在散射点越距离单元徙动现象。对式(6)做关于  $t'$  的傅里叶变换并去除RVP后,可以分别得到式(6)右边两项粗高分辨距离像的峰值:  $f_m = -2\mu R_\Delta(m)/c$ ,  $f_{m+1} = -2\mu R_\Delta(m+1)/c$ ,经计算两峰值在一个粗高分辨距离单元中,几乎完全重叠在一起,形成粗分辨距离像,但是相消处理造成了一定的波峰幅度损失。并且可以看出式(6)包含有载频线性跳变引起的相位项,在各个粗分辨距离像的峰值位置进行采样得到一个采样序列,对该采样序列做关于  $i$  的  $N$  点IDFT处理即可得到精高分辨距离像。同理可以分别得到式(6)右边2项精高分辨距离像的峰值:  $k_m = -2\Delta f R(m)/c$ ,  $k_{m+1} = -2\Delta f R(m+1)/c$ 。对于一般的飞行目标,2个相邻脉冲串的精高分辨距离像的峰值仍然在一个精高分辨距离单元中,峰值几乎重叠在一起。最后对同一精高分辨距离单元作DFT处理,得到最终目标ISAR像。

假设目标背景的地杂波全部由固定点构成,杂波点均匀分布在飞机飞行的空域内,信杂比为-24 dB。如果不对固定点杂波进行对消处理而直接成像,所得的成像结果如图4所示,目标像已全部被杂波所掩盖。图5是采用本文所述的相消法所得到的结果,可以看出,经过相消处理后,目标像的能量有一定的损失,但对成像结果几乎无影响,可以清楚地识别出飞机目标。

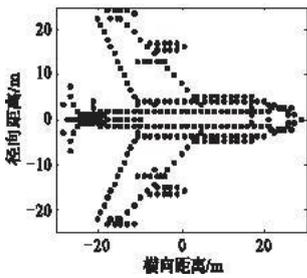


图2 目标散射点模型

Fig.2 Target scattering points model

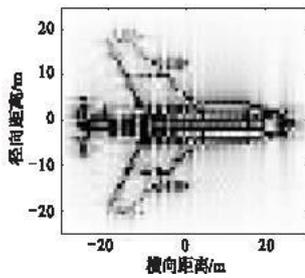


图3 高分辨ISAR像

Fig.3 High resolution ISAR imaging

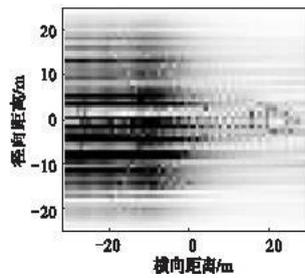


图4 未去杂波成像

Fig.4 ISAR imaging before cancellation

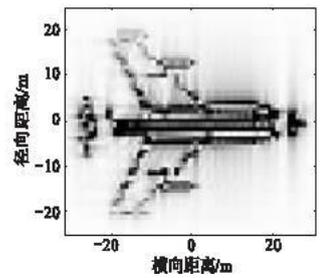


图5 相消处理后成像

Fig.5 ISAR imaging after cancellation

假设每个固定点目标在成像过程中都存在着随机运动。设每个点的随机运动速度在  $[-1$  m/s,  $1$  m/s] 的范围内变化、随机运动加速度在  $[-0.5$  m/s<sup>2</sup>,  $0.5$  m/s<sup>2</sup>] 的范围内变化。

图6是信杂比-24 dB情况下相消前后的成像结果。由于地杂波的随机运动,只消掉了那些零值多普勒附近的点,另外有些地杂波点没有被对消掉,这个情况可以从目标像的结果中看到。

图7、图8分别为信杂比-29 dB和-32 dB情况下的成像结果,可以看出随着信杂比的增大,目标渐渐被杂波点掩盖,越难分辨。

又设每个点的随机运动速度在  $[-2$  m/s,  $2$  m/s] 的范围内变化,随机运动加速度在  $[-\frac{1}{2}$  m/s<sup>2</sup>,  $\frac{1}{2}$  m/s<sup>2</sup>] 的范围内变化。

图9为信杂比-22 dB情况下相消前后的成像结果。图10、图11分别为信杂比-25 dB和-30 dB情况下的成像结果。从图中可看出,当信杂比为-25 dB时,所得目标像的背景中虽然有一些杂波点,但所得结果还是清晰可见的;当信杂比为-30 dB时,更多的随机运动杂波点没有被剔除掉。

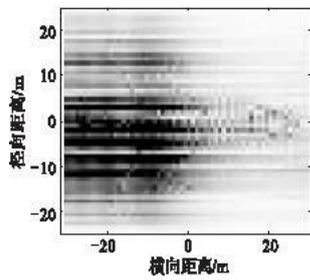
图 6 信杂比  $-24$  dB 相消处理前后的 ISAR 像

Fig. 6 ISAR imaging before and after cancellation under  $-24$  dB

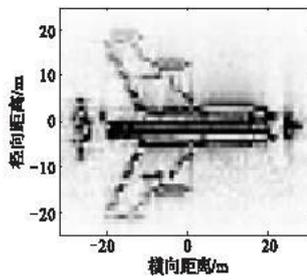
图 7 信杂比  $-29$  dB 相消处理后 ISAR 像

Fig. 7 ISAR imaging after cancellation under  $-29$  dB

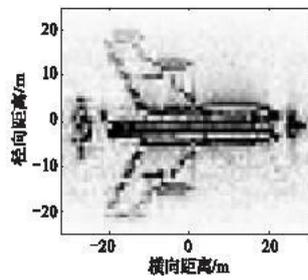
图 8 信杂比  $-32$  dB 相消处理后 ISAR 像

Fig. 8 ISAR imaging after cancellation under  $-32$  dB

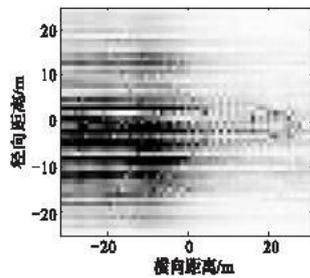
图 9 信杂比  $-22$  dB 相消处理前后的高分辨 ISAR 像

Fig. 9 ISAR imaging before and after cancellation under  $-22$  dB

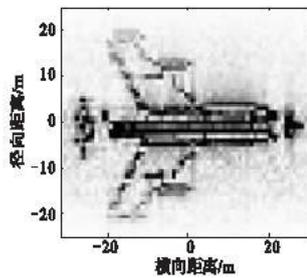
图 10 信杂比  $-25$  dB 相消处理后高分辨 ISAR 像

Fig. 10 ISAR imaging after cancellation under  $-25$  dB

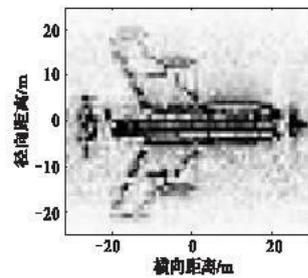
图 11 信杂比  $-30$  dB 相消处理后高分辨 ISAR 像

Fig. 11 ISAR imaging after cancellation under  $-30$  dB

通过以上仿真结果可以看出:随机运动速度较小的情况下,信杂比在  $-25$  dB 左右时,其成像效果仍然比较清晰;随机运动速度增大,随着信杂比的不断降低,其 ISAR 成像质量越来越差,但当信杂比在  $-30$  dB 左右时,其成像效果仍然不错。因此,本文所提方法鲁棒性较好。

在同样的信杂比条件下,随机风速越大成像效果越差,说明在目标与杂波点相对运动速度较大的情况下,本文所提方法能够很好地剔除地杂波,得到较好的成像结果。

### 3 结论

在雷达成像中,地杂波是影响成像效果的重要因素,如何有效地剔除杂波一直是困扰人们的难题。本文在分析了步进线性调频信号体制 ISAR 成像原理的基础上,根据步进线性调频信号脉冲串间的特点提出了一种脉冲间相消方法,运用该相消方法较好地剔除了地杂波,获得了较好的成像结果,并进一步比较了在信杂比不同、随机运动速度不同的条件下的成像结果,说明了该方法具有较好的鲁棒性。

#### 参考文献:

- [1] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms [M]. New York: Wiley, 1999.
- [2] Farina A, Studer F A. Detection with High Resolution Radar: Great Promise Big Challenge [J]. Microwave Journal, 1991, 34(5), 263 - 273.
- [3] Currie N C, Hayes R D, Trebits R N. Millimeter - Wave Radar Clutter [M]. Boston: Artech House, 1992:67 - 92.
- [4] Wehner D R. High Resolution Radar [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [5] Thomas G, Flores B C, Tariq S. Selective Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Moving Targets [J]. Optical Engineering, 2001, 40(2): 217 - 226.
- [6] Blacknell D. Target Detection in Correlated SAR Clutter [J]. IEEE Proceeding Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(1): 9 - 16.

- [7] Skolnik M I. Introduction to Radar Systems [M]. New York: Mcgraw Hill, 2001.
- [8] 张群, 张涛, 张守宏. 强地杂波背景下的低空飞行目标成像[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(10): 1352 - 1357.  
ZHANG Qun, ZHANG Tao, ZHANG Shouhong. Low - Altitude Target Imaging in Strong Ground Clutter[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2002, 24(10): 1352 - 1357. (in Chinese)
- [9] Zhang Q, Li Y, Zhang T. Low - altitude Target Imaging in Strong Ground Clutter [C]//Proceedings of CIE international Conference on Radar . Beijing: [ s. n. ]2001:665 - 669.
- [10] Zhang Qun, Jin Ya Qiu. Aspects of Radar Imaging Using Frequency - Stepped Chirp Signals [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, 13:85823.

(编辑:徐楠楠)

## Frequency - stepped Chirp ISAR Imaging in Strong Ground Clutter

FENG You - qian<sup>1</sup>, XIANG Yan<sup>2</sup>, SUN Ya - jun<sup>3</sup>

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 3. Training Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The returned signal of low - attitude flying targets is often jammed by the strong ground clutter, so it is a difficult problem to eliminate the clutter effectively. Then, cancellation is a simple and valid method of eliminating the ground clutter. In the paper the cancellation of ground clutter in ISAR imaging of frequency - stepped chirp radar is presented. The identical amount of stretching time - delay with the adjoined bursts of echo is applied in the signal stretching process, and then the ground clutter is filtered by cancellation. After cancellation the coherent signal can provide useful data for the successive ISAR processing. Simulation results show that the proposed method is robust and effective, hence, it is a valuable approach to ISAR imaging of low - attitude flying targets.

**Key words:** ISAR imaging; frequency - stepped chirp; cancellation; burst

(上接第 22 页)

## Study on Lift - enhancement of Canard Vortex and Strake Vortex to Configuration With Forward - swept Wing

LI An - yi, WANG Xu, LIU Wen - fa, REN Zhi - jing

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to study the inflection of canard and strake on the aerodynamic characteristics of configuration with forward - swept wing (FSW), longitudinal aerodynamic characteristics of configuration with forward - swept wing (FSW) installing canards, strakes and canard strake combination are calculated by using three dimension N - S equations, and then the vortex mechanism is analyzed by streamlines display. The results indicate that all three models can enhance the lift - drag characteristics of FSW. After installing canard, the separated region of the wing upper - surface is diminished by the downwash effect of canard vortex and it can control the flow on the wing surface effectively. The maximal lift of the airfoil is increased about 40%. Flow separation at the root of FSW was interfered and deferred by the strake vortex after installing strake and it also produces vortex lift. The lift - drag characteristics is better than primordial wing. After installing canard strake combination, canard vortex and strake vortex induces mutually, and enhance the control ability to the flow on the wing surface. The maximal lift of the airfoil is increased about 3% than installing canard; the aerodynamic characteristics are remarkably improved.

**Key Words:** forward - swept wing; canard; strake; aerodynamic configuration; flow mechanism