

一种曲线轨迹下的大场景前斜视成像算法

刘高高* 张林让 刘昕 刘楠 陈广锋 张波
(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: 该文提出一种曲线轨迹下获取前向目标图像的新算法。考虑到曲线轨迹下严重的距离耦合, 算法首先通过时域距离走动校正有效减少了距离耦合, 然后采用级数反演法获得 2 维频率域表达式, 求取 ECS 算法的相关系数, 利用 ECS 获得了精确的成像结果。文章最后通过仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; ECS 算法; 曲线轨迹; 弹载; 斜视; 级数反演法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0628-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00575

Missile-borne Large Region Squint SAR Algorithm Based on a Curve Trajectory

Liu Gao-gao Zhang Lin-rang Liu Xin Liu Nan Chen Guang-feng Zhang Bo
(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: An advanced algorithm is proposed to obtain forward-target image on a curve trajectory, which causes a serious range coupling. The algorithm decreases efficiently the coupling with Range Walk Correction (RCM) in time domain firstly. The 2-dimention frequency domain expression is presented with series reversion. The correlative coefficient of ECS algorithm is obtained, and SAR image is got with ECS. Finally simulations show the validity of the proposed algorithm.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Extended Chirp Scaling (ECS) algorithm; Curve trajectory; Missile-borne; Squint; Series reversion

1 引言

合成孔径雷达(SAR)可通过平台运动合成较大孔径, 实现对目标的精确成像。由于其全天候、全天时、远距离、高精度成像等特点, 可以大大提高战场感知能力, 因此弹载 SAR 的研究逐年升温。

目前弹载 SAR 大多是对导弹两侧目标进行高分辨成像, 这对地形跟踪、地形回避和威胁回避等具有重要意义。而导弹的攻击目标往往位于导弹运动方向的前下方, 这将导致目标回波的多普勒维与距离维重合, 形成成像盲区^[1]。

为了对运动平台前方目标成像。德国宇航局(DLR)提出了一种能对飞行路径正前方扇形区域进行相当分辨率成像的新型前视系统: SIREV(新型区域成像雷达)^[2]。该系统通过载机前排加装线阵天线, 接收天线模拟平台运动顺次接收目标回波, 利用合成孔径算法获得沿线阵方向的横向分辨率。该系统复杂度高, 分辨率取决于线阵天线的长度, 很难获得高分辨图像。文献[3]提出了一种双基前视系统。

该系统由一个与导弹垂直飞行的飞机发射信号, 导弹接收目标散射回波, 取得类似与前斜视的成像效果。该系统要求导弹和载机之间时间同步、空间配准, 对导弹和飞机飞行姿态要求较高。这两种算法是目前比较典型的前视成像算法, 但都需对导引头雷达系统升级或者加装成像系统方能工作, 工程改造难度大。

关于复杂轨迹下的成像算法, 国内外也有大量的研究。文献[4]分析了高速俯冲 SAR 的信号变化特征, 利用插值处理消除加速度的影响, 采用 ECS 算法做成像处理。但插值运算量较大, 且校正精度取决于插值精度。文献[5,6]利用级数反演法获得 2 维频率域表达式, 分别采用 ECS 和改进的 RD 算法获得了高分辨图像。然而 ECS 算法是在正侧视条件下推导的, 用于前斜视成像误差较大; RD 算法虽然可以用于斜视成像, 但是成像场景范围有限。

本文在不改变现有弹载雷达系统的前提下, 提出了一种复杂导弹轨迹下的前斜视 ECS 算法。该算法通过导弹曲线飞行, 使攻击目标与导弹运动方向保持一定的夹角, 利用斜视成像算法对目标精确成像。曲线轨迹的 3 维速度分量和 3 维加速度分量均

2010-06-03 收到, 2010-11-10 改回

国家自然科学基金(60672130)和国家重点实验室基金资助课题

*通信作者: 刘高高 liu_gaogao@qq.com

不可忽视，成像校正难度较大。文章分析了曲线轨迹下场中心点和非场中心点的距离方程，在时域补偿距离走动后利用级数反演法获得回波 2 维频率域表达式，进而推导了距离徙动和方位调频率随多普勒的变化关系式，给出了一种基于时域距离走动校正的 ECS 成像算法，最后通过与斜视 RD 算法的比较，验证了本文算法的有效性。

2 回波几何模型

图 1 为导弹打击轨迹的几何关系模型。假设雷达已确定目标范围，需通过信号处理以精确定位。导弹常规飞行轨迹如图 1(a)弧 \widehat{QRP} 所示，地面投影如图 1(a)直线 $QR'P$ 所示。该轨迹下，场景中散射点 P 位于导弹轴向的前下方，雷达的方位维与距离维一致，即所谓的 SAR 前视盲区，常规雷达仅能通过 1 维距离像识别目标。而强烈的海杂波(地杂波)很难滤除，较小的目标会被淹没，导引头雷达迫切需要可以前视的 SAR 成像系统。

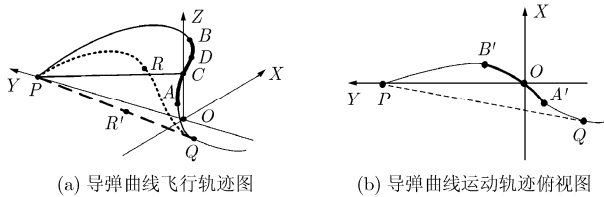


图 1 导弹曲线飞行轨迹示意图

本文就是在这样的背景下提出了一种曲线轨迹下的前斜视成像算法。设曲线轨迹如图 1(a)中弧 \widehat{QACBP} 所示，地面投影如图 1(b)曲线 $\widehat{QA'OB'P}$ 所示。该轨迹下，雷达天线以一定的偏航角前斜视照射目标，方位维与距离维保持一定的夹角。使用表 1(见第 4 节)的参数，目标位于 Y 轴，导弹沿 X 轴速度为 500 m/s，沿 Y 轴速度为 800 m/s，偏航角约 32.0° 。由于导弹飞行高度较高且导弹速度上存在沿 Z 轴的分量，因而导弹运动方向和弹目连线的夹角为 56.2° ，对应的斜视角为 33.8° ，雷达系统工作在小斜视模式。这正是曲线轨迹的优势所在：即在原始轨迹改变不大的情况下，利用前斜视获得目标的 SAR 图像。

成像段如图 1(a)粗实线弧 \widehat{ACB} 所示，地面投影如图 1(b)粗实曲线 $A'OB'$ 所示。成像段上取参考点坐标为 $C(x_C, y_C, z_C)$ ，散射点 $P(x_P, y_P, z_P)$ ，参考点 C 到 P 的距离为 $R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$ ，其中 $x_0 = x_C - x_P$ ， $y_0 = y_C - y_P$ ， $z_0 = z_C - z_P$ 。为了简化分析难度，假设成像段雷达天线通过伺服控制持续指向

目标，且天线波束内增益恒定，这里简化为 1。

本文用二阶运动模型近似曲线轨迹。设导弹沿 X 轴速度为 v_x ，加速度为 a_x ；沿 Y 轴速度为 v_y ，加速度为 a_y ；沿 Z 轴速度为 v_z ，加速度为 a_z 。轨迹 \widehat{ACB} 上任意时刻 t_m 到 P 点的瞬时斜距

$$r(t_m) = \left[\left(x_0 + v_x t_m + \frac{1}{2} a_x t_m^2 \right)^2 + \left(y_0 + v_y t_m + \frac{1}{2} a_y t_m^2 \right)^2 + \left(z_0 + v_z t_m + \frac{1}{2} a_z t_m^2 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式(1)在 $t_m = 0$ 处进行泰勒级数展开，得到多阶逼近距离模型为

$$r(t_m) = \mu_0 + \mu_1 t_m + \mu_2 t_m^2 + \mu_3 t_m^3 \quad (2)$$

式(1)到式(2)的推导略。其中 μ_0 为参考距离项， $\mu_1 t_m$ 为距离走动项， $\mu_2 t_m^2$ 表示距离弯曲项， $\mu_3 t_m^3$ 为三次相位项。具体将式(2)展开多少阶可以满足成像要求需根据具体情况而定，文献[6]的分析说明展开到三阶可以满足成像需求。

大场景下目标斜距 $r(t_m)$ 与参考斜距差 ΔR 较大^[5]，需考虑目标斜距与参考斜距的关系。记参考斜距为 $r_0(t_m)$ ，则 $r(t_m)$ 各项可表示为 $r_0(t_m)$ 项和 ΔR 的函数，其中 μ_3 由于为极小值，这里用参考斜距的 μ_{30} 代替，则有：(详细推导略)

$$\left. \begin{aligned} r_0(t_m) &= \mu_{00} + \mu_{10} t_m + \mu_{20} t_m^2 + \mu_{30} t_m^3 \\ \mu_0 &= \mu_{00} + \mu_{01} \Delta R \\ \mu_1 &= \mu_{10} + \mu_{11} \Delta R \\ \mu_2 &= \mu_{20} + \mu_{21} \Delta R \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 算法分析

3.1 时域距离走动校正

设雷达发射线性调频信号， γ 为调频率， \hat{t} 为快时间， t_m 为慢时间， f_c 为载波中心频率， f_r 为距离维频率， f_a 为方位维频率， $a_r(\cdot)$ 为距离维幅度函数， $a_a(\cdot)$ 为天线增益函数。目标的回波信号经过解调后转换到基带，并做距离维傅里叶变换有^[7]

$$s(f_r, t_m, r) = a_r \left(\frac{f_r}{\gamma} \right) a_a(t_m) \cdot \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} r(t_m, r) (f_r + f_c) \right\} \quad (4)$$

曲线轨迹会引起严重的距离走动现象，对于距离走动的校正可以在时域或者频域进行。由于式(2)不仅考虑到 3 维速度，同时考虑 3 维加速度，直接通过级数反演法获得的 2 维频率域表达式二阶、三阶耦合严重，频域补偿距离走动复杂度较高^[5]。二阶

耦合项 $\varphi_2(f_a; r)$ 主要影响成像的主副瓣比, 而三阶耦合项 $\varphi_3(f_a; r)$ 主要影响成像的对称性。若首先做时域距离走动校正, 则可以有效减小耦合。

由式(3)中距离表达式可知, 线性走动项为 $\Delta R_w = \mu_1 t_m$, 所谓距离走动校正就是要校正该因子:

$$H_1(f_r, t_m) = \exp\left[j\frac{4\pi}{c}\mu_1 t_m(f_r + f_c)\right] \quad (5)$$

将式(4)与式(5)相乘可得去走动后回波信号为

$$s(f_r, t_m) = a_r\left(\frac{f_r}{\gamma}\right)a_a(t_m) \cdot \exp\left[-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right] \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi(f_r + f_c)}{c}(\mu_0 + \mu_2 t_m^2 + \mu_3 t_m^3)\right\} \quad (6)$$

此时, $f_{a1} = f_a - 2\mu_1/\lambda$, f_a 是以 $2\mu_1/\lambda$ 为中心, 通过去走动处理后, 多普勒谱搬移到以 0 为中心了。使用表 1 的参数, 校正前多普勒中心位于 $2\mu_1/\lambda \approx 3.52 \times 10^4$ Hz, 校正后的多普勒位于 0 Hz。多普勒中心搬移 0 频后, 可以使用正侧视 ECS 做成像处理了, 而对于 NCS 成像算法^[8], 由于其对于方位维的约束条件 $|f_a - f_{a\text{ref}}| \gg |K T f_{a\text{ref}}/f_0|$, 若经过本文的处理, 则该条件较容易满足, 因此时域走动后亦可采用 NCS 成像。由于篇幅有限, 不再赘述。

表 1 仿真参数

雷达相关参数	取值
载频(GHz)	10
脉冲宽度(μs)	1
脉冲重复频率(kHz)	5
信号带宽(MHz)	50
采样率(MHz)	200
导弹参考点坐标(km)	(0, 0, 9)
导弹速度(m/s)	(500, 800, 100)
导弹加速度 (m/s^2)	(20, -10, 20)
场景中心坐标(km)	(0, 10, 0)
积累时间(s)	0.2

3.2 基于级数反演法的 2 维频率域表达式

利用级数反演法和驻相点法, 式(6)变换到波束域的表示式整理有^[5,9,10](文献[5]级数反演法式(4)中有 2 倍关系, 这里整理去掉, 同时由于方位时间域去距离走动, 所以 μ_1 的相关项也需去掉。

$$s(f_r, f_a) = a_r\left(\frac{f_r}{\gamma}\right)a_a(f_a) \cdot \exp\left[-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right] \exp\left\{j\pi[\varphi_0(f_a) + \varphi_1(f_a)f_r + \varphi_2(f_a)f_r^2 + \varphi_3(f_a)f_r^3]\right\} \quad (7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0(f_a) &= -\frac{4\mu_0}{\lambda} + \frac{1}{4}\mu_2^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{1}{16}\mu_2^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \\ &\quad + \frac{9}{256}\mu_2^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4 \\ \varphi_1(f_a) &= -\left(\frac{4\mu_0}{\lambda} + \frac{1}{4}\mu_2^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{1}{8}\mu_2^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{27}{256}\mu_2^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4\right)\frac{1}{f_c} \\ \varphi_2(f_a) &= \left(\frac{1}{4}\mu_2^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{3}{16}\mu_2^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{27}{128}\mu_2^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4\right)\frac{1}{f_c^2} \\ \varphi_3(f_a) &= -\left(\frac{1}{4}\mu_2^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{1}{4}\mu_2^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{45}{128}\mu_2^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4\right)\frac{1}{f_c^3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中 $\varphi_0(f_a; r)$ 为方位维调频项; $\varphi_1(f_a; r)$ 为线性项, 为目标距离徙动系数; $\varphi_2(f_a; r)$ 为线性调频率, $\varphi_3(f_a; r)$ 为非线性调频率。记目标斜距与参考斜距的时延差为 $\Delta\tau(f_a; r)$, 具体表示式见式(13)。式(8)各项均与 $\Delta\tau(f_a; r)$ 有关, 场景较大时, $\Delta\tau(f_a; r)$ 随方位维 f_a 的变化率不可忽略, 体现了大场景的空变性。ECS 就是考虑大场景下, 式(8)中各项的空变性的成像算法。

3.3 ECS 成像相关参数分析

3.3.1 距离徙动随多普勒频率的变化

目标距离轨迹的时延可以表示为

$$\tau_d(f_a; r) = -\frac{\varphi_1(f_a; r)}{2} \quad (9)$$

式(9)可由参考距离轨迹的相关参数表示, 将式(3)代入式(8)有

$$\tau_d(f_a; r) = \tau_d(f_a; r_0) + a(f_a)\Delta R \quad (10)$$

整理有

$$\tau_d(f_a; r_0) = \left(\frac{4\mu_{00}}{\lambda} + \frac{1}{4}\mu_{20}^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{1}{8}\mu_{20}^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 + \frac{27}{256}\mu_{20}^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4\right)\frac{1}{2f_c} \quad (11)$$

$$a(f_a) = \left(\frac{4}{\lambda} - \frac{1}{4}\mu_{20}^{-2}\mu_{21}\lambda f_a^2 - \frac{3}{8}\mu_{20}^{-4}\mu_{21}\mu_3\lambda^2 f_a^3 - \frac{135}{256}\mu_{20}^{-6}\mu_{21}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4\right)\frac{1}{2f_c} \quad (12)$$

在多普勒频率域, 目标距离和参考距离徙动时差

$$\Delta\tau(f_a, r) = \tau_d(f_a, r) - \tau_d(f_a, r_0) = a(f_a)\Delta R \quad (13)$$

由于 $\Delta\tau(f_a, r)$ 是随 f_a , r 变化的曲线, 场景较大时会引起较大的距离徙动差, 经过 ECS 处理后,

目标延时轨迹与参考轨迹有相同的时差。定义该时差为多普勒中心处的距离徙动时差 $\Delta\tau(f_{\text{aref}}, r)$, 设多普勒参考频率为 f_{aref} , 则

$$\Delta\tau(f_{\text{aref}}, r) = \tau_d(f_{\text{aref}}, r) - \tau_d(f_{\text{aref}}, r_0) = a(f_{\text{aref}})\Delta R \quad (14)$$

经过 ECS 处理后的 $\tau_s(f_a, r_0)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \tau_s(f_a, r) &= \tau_d(f_a, r_0) + \Delta\tau(f_{\text{aref}}, r) \\ &= \tau_d(f_a, r_0) + \frac{\Delta\tau(f_a, r)}{\omega(f_a)} \end{aligned} \quad (15)$$

$\omega(f_a)$ 是用于校正的系数。比较式(13), 式(14)可得

$$\omega(f_a) = \frac{a(f_a)}{a(f_{\text{aref}})} \quad (16)$$

3.3.2 方位维校正因子随多普勒频率的变化 由于 $\varphi_0(f_a; r)$ 含有 ΔR 的函数, 在方位维处理时需要获得 $\varphi_0(f_a; r)$ 相对于 ΔR 的表达式, 式(8)的 $\varphi_0(f_a; r)$ 对 ΔR 求导并保留到一阶有

$$\varphi_0(f_a; r) = \varphi_0(f_a; r_0) + b(f_a)\Delta R \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi_0(f_a; r_0) &= -\frac{4\mu_{00}}{\lambda} + \frac{1}{4}\mu_{20}^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{1}{16}\mu_{20}^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \\ &\quad + \frac{9}{256}\mu_{20}^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4 \\ b(f_a) &= -\frac{4}{\lambda} - \frac{1}{4}\mu_{20}^{-2}\mu_{21}\lambda f_a^2 - \frac{3}{16}\mu_{20}^{-4}\mu_{21}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \\ &\quad - \frac{45}{256}\mu_{20}^{-6}\mu_{21}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4 \end{aligned} \quad (18)$$

3.3.3 调频率随多普勒频率的变化 ECS 算法场景不是非常大的情况下, 式(8)中 $\varphi_2(f_a; r)$ 随 ΔR 的变化较小, 可以用场景中心 $\varphi_2(f_a; r_0)$ 代替, 这样调频率有

$$\frac{1}{k_m(f_a; r)} \approx -\varphi_2(f_a; r_0) + \frac{1}{\gamma} \quad (20)$$

则

$$\begin{aligned} k_m(f_a; r_0) &= \left[\left(\frac{1}{4}\mu_{20}^{-1}\lambda f_a^2 + \frac{3}{16}\mu_{20}^{-3}\mu_3\lambda^2 f_a^3 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{27}{128}\mu_{20}^{-5}\mu_3^2\lambda^3 f_a^4 \right) \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{\gamma} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (21)$$

当然对于更大的场景, 需要考虑 $k_m(f_a; r)$ 的空变性。由于 $\varphi_2(f_a; r)$ 与 $\varphi_1(f_a; r)$ 比较相似, $k_m(f_a; r)$ 随 ΔR 的变化函数很容易由式(12)和式(8)联合求得。

3.4 ECS 成像算法流程

上面分析了 ECS 成像相关参数, 成像流程与经典 CS 算法流程基本一致^[7], 区别在于补偿因子。

(1)CS 变标 将式(7)变换到多普勒频率-距离

时间域后做变标操作, 变标函数为

$$H_2(\hat{t}, f_a; r_0) = \exp\left\{j\pi q_2(f_a)[\hat{t} - \tau_d(f_a, r_0)]^2\right\} \quad (22)$$

其中 $q_2 = k_m(f_a; r_0)(\omega - 1)$ 。

(2)距离维处理 将式(22)与距离多普勒域的回波信号相乘, 变换到 2 维频率域进行距离维处理。距离维处理包含距离方位 2 维去耦、距离脉冲压缩和 3 次相位补偿, 补偿因子为

$$\begin{aligned} H_3(f_r, f_a; r) &= \exp\left\{j\pi\left[2[\tau_d(f_a; r_0) - \tau_d(f_{\text{aref}}; r_0)]f_r \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{f_r^2}{\omega k_m} - \varphi_3(f_a)f_r^3\right]\right\} \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中第 1 个相位项完成距离方位 2 维去耦, 第 2 个相位项完成距离脉冲压缩, 第 3 个相位项做 3 次相位补偿。

(3)方位维处理 在 2 维频率与完成距离维处理后做距离维逆傅里叶变换, 将信号变换到距离多普勒域做方位维处理。方位维补偿因子为

$$H_4(\hat{t}, f_a; r) = \exp[-j\pi\varphi_0(f_a; r)] \cdot \exp[-j\pi\Delta\varphi(f_a, r)] \quad (24)$$

其中 φ_0 由式(8)给出, $\Delta\varphi(f_a, r) = k_m(f_a; r_0)(1 - 1/\omega)\Delta\tau^2(f_a; r)$ 。

方位维处理完成后, 就完成了 ECS 成像处理, 该算法的处理流程如图 2 所示。

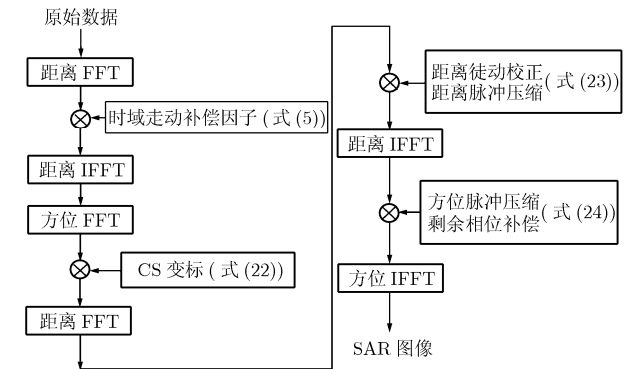


图 2 ECS 成像流程图

4 计算机仿真

4.1 仿真实验

文献[6]的改进 RD 算法做距离走动校正后可用于前斜视成像, 下面进行一组仿真实验验证本文成像效果。为了简化仿真过程, 本文对运动做了适当调整。仿真实验的相关参数见表 1。仿真对 3 个散射点成像, 点阵放置在 XOY 平面上, 中心点坐标为 $(0, 10000, 0)$, 散射点沿 Y 轴方向间距 1000 m, 坐标分别为 $(0, 11000, 0)$, $(0, 9000, 0)$ 。

图 3 分别给出了采用时域去走动、频域校正距

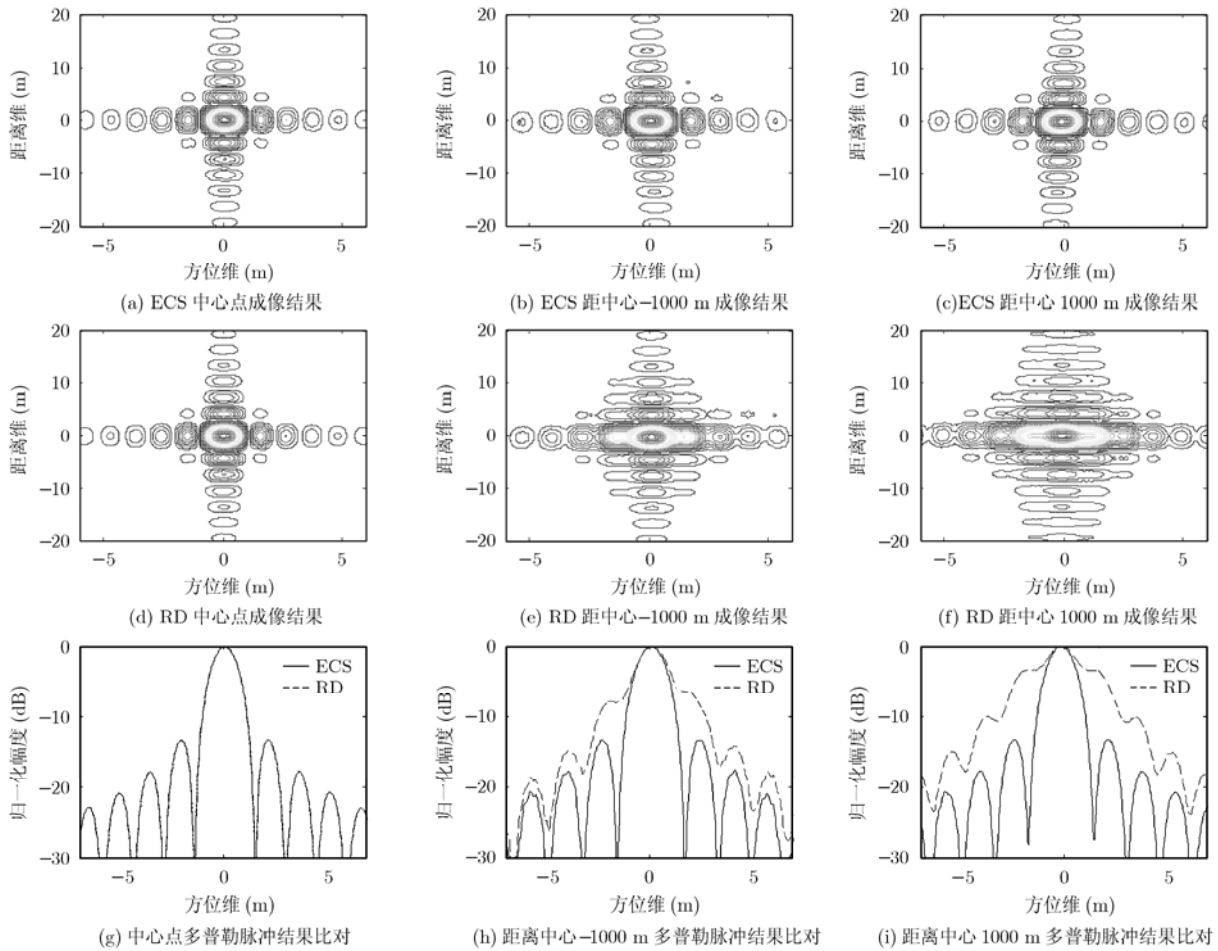


图3 点目标成像比较图

离完全的改进的 RD 算法, ECS 算法对于参考点和测绘边缘点目标的成像结果。由于改进的 RD 算法与 ECS 算法距离维均能得到良好结果, 因此图 3 并没有给出距离维比较图。图 3 中 3 个散射点的成像结果: 图 3(a)~图 3(c)给出的是采用 ECS 的成像结果; 图 3(d)~图 3(f)给出的是采用改进的 RD 算法的成像结果; 图 3(g)~图 3(i)给出的成像结果方位维比较图。表 2 对结果的主瓣宽度, 积分旁瓣比

(Integrated Side-Lobe Ratio, ISLR), 峰值旁瓣比 (Peak Side-Lobe Ratio, PSLR)等指标进行了分析和对比。

4.2 成像性能评估

(1) 成像质量比较 ECS 算法在波束域完成 RCM 处理, 其等效调频率导致了距离维主瓣展宽和 PSLR 下降; 等效补偿 f_r 的 3 次项, 克服了距离维主瓣不对称现象。从图 3 和表 2 可以看出散射点目

表2 点目标图像质量评估结果

	与中心点距离(m)	距离向			方位向		
		分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
RD	0	2.68	13.13	9.99	0.95	13.25	10.02
	-1000	2.69	13.10	9.84	1.16	7.50	5.34
	1000	2.63	13.17	9.99	1.57	3.25	5.96
前斜视 ECS	0	2.69	12.98	9.99	0.95	13.25	9.98
	-1000	2.63	13.13	10.05	1.04	13.25	10.09
	1000	2.63	13.09	9.99	1.02	13.20	9.96
理论值		2.66	13.26	10.0	0.95	13.26	10.0

标无论是否在参考距离上,ECS算法均能良好成像,方位维和距离维的主瓣宽度,ISLR和PSLR均接近理论值。而改进的RD算法在场景中心处补偿因子与ECS相同,与ECS成像结果类似;非场景中心处,则会导致方位维主瓣展宽,旁瓣抬高,散焦严重。由于RD算法的距离维与ECS算法类似,所以图3仅给出了方位维脉冲比较图,具体量化指标见表2。

(2)成像效率比较 从成像流程分析,改进的RD算法和常规ECS算法需要4次傅里叶变换和4次复数乘法;而本文的ECS算法需要6次傅里叶变换和4次复数乘法,与常规NCS算法运算量相同^[8]。运算量相对于常规ECS变化不大,可实时成像。

5 结论

本文通过设计曲线飞行轨迹对攻击目标斜前视成像。通过分析场景中心散射点和非场景中心散射点的关系获得了ECS的相关参数表达式,在时域补偿走动后利用ECS成像算法获得了成像结果。最后通过与改进的RD算法的仿真比较验证了本文算法的有效性,同时比较两者的运算效率,说明本文可用于实时成像。当然,由于时域去距离走动会带来聚集深度问题,因此对于成像精度要求较高的场合,需采用更有效的NCS成像算法。因此作者下一步的工作是对基于级数反演法的NCS成像进行系统的研究。

参考文献

- [1] 陈琦, 杨汝良. 机载前视合成孔径雷达ChirpScaling成像算法研究[J]. 电子与信息学报. 2008, 30(1): 228-232.
Chen Qi and Yang Ru-liang. Research of chirp scaling imaging algorithm for air-borne forward-looking SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2008, 30(1): 228-232.
- [2] German Aerospace Center(DLR), SIREV[Z]. http://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-2331/3693_read-5512, April, 2008.
- [3] Yi Y, Zhang L, and Li Y. Range doppler algorithm for bistatic missile-borne forward-looking SAR[Z]. 2nd asian-pacific conference on synthetic aperture radar proceedings. Xi'an, China, 2009, 4: 960-963.
- [4] 房丽丽, 王岩飞. 俯冲加速运动状态下SAR信号分析及运动补偿[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1316-1320.
Fang Li-li and Wang Yan-fei. Signal analysis and motion compensation of SAR data with diving acceleration [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2008, 30(6): 1316-1320.
- [5] 易予生, 张林让, 刘昕, 等. 一种弹载侧视SAR大场景成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 587-592.
Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, and Liu Xin, et al. A large scene imaging algorithm for missile-borne side-looking SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 587-592.
- [6] 易予生, 张林让, 刘楠, 等. 基于级数反演俯冲加速运动状态弹载SAR成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 39-43.
Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, and Liu Nan, et al. Imaging algorithm for missile-borne SAR with diving acceleration based on series reversion[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(11): 39-43.
- [7] 保铮, 刑孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 62-135.
Bao Zheng, Xin Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 62-135.
- [8] Davidson G W, Cumming L G, and Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [9] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range doppler algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14-21.
- [10] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93-96.

刘高高: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理。
张林让: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理和雷达系统建模和仿真。
刘昕: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号建模与处理、地面动目标检测。
刘楠: 男, 1981年生, 讲师, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号建模与处理、地面动目标检测、MIMO信号处理。