

系 四



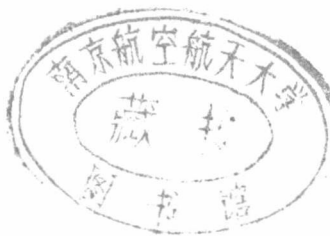
目 录

四〇一教研室(18 篇)

基于软件技术的 ISAR 实时成像	陈工羽、张兴敢等
Identifying the Number of Aircraft in Formation Flight Using ISAR Technique	朱岱寅、朱兆达 H
机载雷达地面动目标指示和成像	朱岱寅、朱兆达
Autofocusing of Synthetic HRR Radar Using Stepped - Frequency Waveforms	朱岱寅等 H
机载 SAR 斜视区域成像模式运动补偿研究	朱岱寅等
机载干涉 SAR/ISAR 对地面慢速目标成像研究	朱兆达等
BP 网络进化及其在雷达目标识别中的应用	严卫等 H
逆合成孔径雷达横向一维像快速定标	张兴敢等
用 ISAR 横向动态一维像分辨编队飞机架数	张兴敢等 H
用 DSP 实现相参处理器 I/Q 通道幅相误差自动校正	张兴敢等 H
机载 SAR 旁视条带成像运动补偿研究	李振华等
前斜视机载 SAR 成像处理的 RD 算法研究	邵玉龙等 J
球不变随机过程杂波背景下局部最优检测器	唐劲松等 H
快速高精度正弦波频率估计综合算法	刘 渝 H
快速解线性调频技术	刘 渝 H
大转角条件下二维计算雷达像的改进	周建江等 H
Extrapolation of RF Echo Data Based on AR Modeling	周建江等 H
声纳实时信号处理机的 ADSP21020 实现	周建江等 H

四〇二教研室(2 篇)

提高 GPS 选星仰角门限抗多径干扰方法	宋茂忠 J
----------------------------	-------



神经网络数据处理在 ICAI 中的应用研究 潘永东等

四〇三教研室(6 篇)

常用数字集成电路的在系统自动检测 吴 宁 H

着眼于应用能力培养的微机课程综合教改 吴宁等

FPGA 在测试系统中的应用 戎舟、蒋璇等

模拟电路、数字电路的教改实践 王成华等

Construction and Reformation of Electrical and

Electronic Base - training of innovative tatents 王成华等

电工电子基地建设进展 陈旭等

四〇五教研室(1 篇)

Kirchhoff Formula With Line Integral Form

and its Applications 顾长青等 H

基于软件技术的 ISAR 实时成像

陈工羽 张兴敢 吴宁
南京航空航天大学电子工程系

摘要 逆合成孔径雷达二维实时成像可用硬件实现,其缺点是成本高,研制周期长,且难以随时更改成像处理方法。本文根据无线电软件技术,介绍以奔腾 PC 机为平台用软件实现 ISAR 二维成像实时处理的方法。利用外场数据作为实时仿真信号源,成像数据流与外场采集数据的速率相同。该实时成像方法可用于研究实时成像算法改进,图像后处理方法和人机界面设计,或作为信号处理器的一部分。

关键词: 逆合成孔径雷达, 实时仿真, 相干处理

1. 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 能从固定或运动平台对导弹、卫星、飞机、舰船、天体等运动目标进行全天候、全天时、远距离成像,在战略防御、反卫星、战术武器以及雷达天文学中都有重要应用价值^[1]。60 年代美国的西屋、通用电器、航天公司等相继研制对空间轨道目标成像的雷达。70 年代初林肯实验室首先获得近地目标高质量的雷达图像。70 年代末林肯实验室的远距成像雷达的距离分辨率已达 25cm^[2]。1980 年 Chen 和 Andrews 最早给出飞机的 ISAR 图像^[3]。1993 年英国 Thorn EMI 公司给出安装在悬崖顶上的雷达对舰船成像的图像^[4]。由法国 Thomson—CSF 和德国 Deutsche Aerospace 联合研制的 Ocean Master 400 机载雷达的资料上给出了机载 ISAR 对舰船成像的图像。

ISAR 成像的基础是距离多普勒原理^[2]。ISAR 一般固定在地面上,目标运动。成像的纵向分辨率靠大带宽信号得到,横向分辨率则基于目标相对于雷达视线的转动引起的多普勒梯度。ISAR 信号处理的两个关键是运动补偿和成像。国内经过十多年的研究,运动补偿和成像技术已与国外同步,但成像处理与 ISAR 本身是分开的,即非实时的。为了推广 ISAR 成像技术的应用,就要解决 ISAR 成像实时处理的问题。ISAR 信号处理可用硬件实现,但成本昂贵,研制周期长,并且 ISAR 实时成像的算法还不断的改进。

随着奔腾计算机运算速度的加快,用软件在计算机上完成 ISAR 实时成像处理已成为可能。ISAR 实时成像技术为研究 ISAR 实时运动补偿及成像方法,改善成像质量提供了手段。

2. 实时仿真信号源

ISAR 实时成像软件需要合适的实时仿真信号源。为了避免电磁仿真中的近似因素,我们采用 ISAR 在外场实际采集的数据作为实时仿真信号源。ISAR 参数及目标数据为:

发射信号带宽: 400MHz
发射信号形式: LFM
雷达工作波长: 5.435cm
目标型号: 雅克-42
目标距离: 10~70Km

数据采样率: 10Msps

外场数据分六个文件存放在光盘中。计算机按照数据采样率与雷达重复周期读取光盘中的数据供软件实时成像用。

3. 实时成像计算

3.1 距离多普勒成像的原理^[6]

目标和雷达的相对运动可以分解成目标上某参考点相对于雷达的平移运动及目标绕参考点的自转, 前者对成像没有贡献, 需要补偿。运动补偿后只剩下目标绕参考点的自转, 这等价于转台运动, 可用多普勒方法进行成像。

图 1 示意雷达波束对准转台, 物体绕通过 O 点垂直于画面的轴转动, 角速度为 ω 。雷达到散射点 A(X_a, Y_a, Z_a) 的距离 R 为

$$R = [R_0^2 + R_a^2 + 2R_0R_a\sin(\omega t + \theta) + Z_a^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: R_0 为雷达到参考点的距离, R_a 为参考点到散射点的距离。

一般情况下, $R_0 \gg R_a, Z_a$ 则

$$R = R_0 + X_a\sin\omega t + Y_a\cos\omega t \quad (2)$$

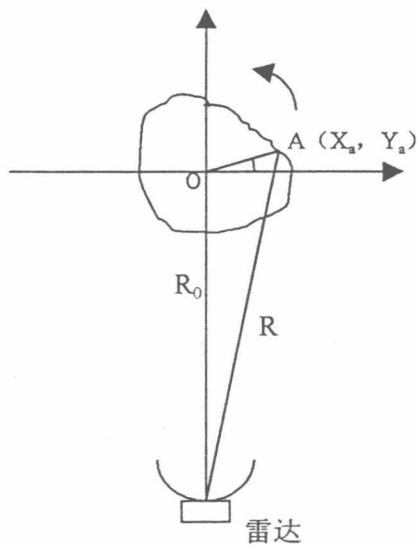


图 1 转台目标散射点坐标的变化

多普勒频率 f_d 由物体上的散射点相对于雷达运动而产生, 且

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2dR}{\lambda dt} = \frac{2X_a\omega}{\lambda}\cos\omega t - \frac{2Y_a\omega}{\lambda}\sin\omega t \quad (3)$$

当 $\Delta\theta = \omega\Delta t$ 很小时, 上式右边第二项近似为零, 可得

$$R \cong R_0 + Y_a \quad (4)$$

$$f_d \cong \frac{2X_a \omega}{\lambda} \quad (5)$$

只要估计出 R 和 f_d 就可以确定散射点位置 (X_a, Y_a) ，这就是距离多普勒成像原理。

如果物体作直线运动，它与雷达的相对位置关系如图 2 所示。 $\xi-\eta$ 坐标固定在物体上， $X-Y$ 坐标随雷达视线而转动，两者的关系如下

$$\begin{aligned} X_a &= \xi_a \cos \theta + \eta_a \sin \theta \\ Y_a &= -\xi_a \sin \theta + \eta_a \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

雷达 $R(X_r, Y_r)$ 到散射点 $A(X_a, Y_a)$ 的距离为

$$S(X_a, Y_a, X_r, Y_r) = [(X_a - X_r)^2 + (Y_a - Y_r)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

当 $X_a^2 + Y_a^2 \ll X_r^2$, $Y_r = 0$ 时

$$S(X_a, Y_a, X_r, Y_r) \cong X_r - X_a \quad (8)$$

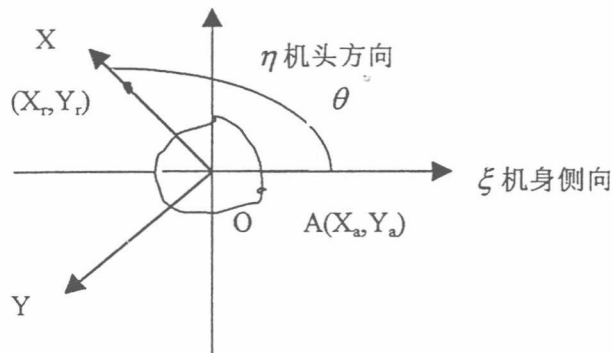


图 2.

X_r 和 X_a 均为时间 t 的函数，A 点的多普勒频率为

$$f_d(X_a, Y_a) = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{dX_r}{dt} - \frac{dX_a}{dt} \right) \quad (9)$$

$f_{d1} = \frac{2}{\lambda} \frac{dX_r}{dt}$ 是物体中心 O 相对于雷达运动所产生的多普勒频率。 X_r 可表示成

$$X_r = (R_0^2 + Y_r^2)^{\frac{1}{2}} = R_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{Y_r^2}{R_0} \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{Y_r^4}{R_0^3} \right) + \dots \quad (10)$$

式中 R_0 为雷达到物体的运动轨迹的法线距离。若以恒速 V 飞行，根据图 2 有 $\frac{dY_r}{dt} = -V$ ，于

是

$$f_{d1} = \frac{2}{\lambda} \frac{dX_r}{dt} = \frac{2}{\lambda} \left(-\frac{Y_r}{R_0} V + \frac{1}{2} \left(\frac{Y_r}{R_0} \right)^3 V - \dots \right) \quad (11)$$

可见多普勒频率 f_{d1} 主要和 Y_r 成线性关系另加一些 Y_r 的高次项。当越接近正侧视状态, Y_r 越小, $(Y_r/R_0)^3$ 以后的更高次项均可忽略, 也就是说在正侧视附近 f_{d1} 和 Y_r 成线性关系。 f_{d1} 对成像没有贡献, 要对其进行补偿。

运动物体上 A 点相对参考点 O 运动所产生的多普勒频率为

$$f_{d2} = \frac{2}{\lambda} \frac{dX_a}{dt} = \frac{2}{\lambda} Y_a \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

当飞机航迹到达与雷达视线相垂直时 $Y_r=0$, 近似可得

$$f_{d2} = \frac{2Y_a}{\lambda} \frac{V}{R_0} \quad (13)$$

可见雷达上各散射点相对运动产生的多普勒频率 f_{d2} 与 X_a 无关, 只与 Y_a 有关。

3.2 运动补偿方法^[6]

ISAR 运动补偿旨在消除目标与雷达间相对平移运动的影响。使 ISAR 成像转化为转台成像。运动补偿可分两步完成: 距离对准和相位补偿。

距离对准是从各个雷达重复周期回波中找出与目标上同一距离单元对应的回波信号, 使得各个雷达重复周期回波信号距离向对齐, 补偿目标在平动过程中的距离变化。

距离对准方法较多, 实时软件中采用了空域法。设 $f_{t1}(r)$ 和 $f_{t2}(r)$ 为相邻重复周期回波信号, r 为距离变量, 如果脉冲重复周期很小, 则回波包络幅度有如下近似关系

$$m_{t1}(r + \Delta r) = m_{t2}(r) \quad (14)$$

其中 $m_{t1}(r)$, $m_{t2}(r)$ 分别为 $f_{t1}(r)$ 和 $f_{t2}(r)$ 的回波包络, Δr 为距离偏移量。定义 $m_{t1}(r)$, $m_{t2}(r)$ 的相关函数为

$$R(s) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} m_{t1}(r) \cdot m_{t2}(r-s) dr}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} m_{t1}^2(r) dr \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} m_{t2}^2(r) dr \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

根据许瓦兹不等式, 可得 $S = \Delta r$ 处有最大值。因此有 $R(S)$ 的峰值位置可得 Δr 值。

相位补偿是为了补偿目标中心相对雷达平移运动产生的相位移, 实时软件中采用多普勒中心跟踪法。多普勒中心跟踪法是基于最大似然原理的最优估计与补偿, 具体过程如下:

将相邻雷达重复周期回波信号各距离门相位差进行加权平均, 并作为相邻回波的多普勒相位差。为了避免相位模糊, 定义相位函数如下

$$e^{j\varphi_{1,2}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f_{t1}(r) \cdot f_{t2}^*(r) dr}{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} f_{t1}(r) \cdot f_{t2}^*(r) dr \right|} \quad (16)$$

依次迭加相邻回波的多普勒中心相位差, 可得各次回波的多普勒中心相位函数为

$$e^{j\varphi_{t2}} = e^{j(\varphi_{t1} + \Delta\varphi_{t1,2})} = e^{j\varphi_{t1}} \cdot e^{j\varphi_{t1,2}} \quad (17)$$

最后, 利用多普勒中心相位差对各距离门的回波进行相位校正, 即

$$e^{j\varphi'_{t2}} = e^{j\varphi_{t2}} \cdot e^{-j\varphi_{t1,2}} \quad (18)$$

式中 φ'_{t2} 表示 $f_{t2}(r)$ 补偿后的相位。

4. 实时成像界面

我们用 Visual C++5.0 在 Win95 环境下实现 ISAR 成像实时仿真。Visual C++ 是 Microsoft 公司推出的支持可视化编程的集成环境。可视化技术就是利用计算机图形技术和方法, 对大量的数据进行处理, 并用图形图像的方式形像而具体地加以显示。

4.1 实时成像程序的基本框架

用 MFC AppWizard 生成该应用程序的基本框架, 派生出五个主要的类(文档类, 视图类, 主边框窗口类, 子边框窗口类 and 应用程序类), 主要任务均分布在这些类中实现。

在本应用程序中, 文档类实现读取光盘中的外场数据, 并对它进行处理, 最后保存这批处理过的数据。视图类用来显示文档中已处理过的数据。主边框窗口类用于管理应用程序窗口, 显示标题栏、菜单栏、工具栏、状态栏、控制菜单和控制按钮。子边框窗口类用于管理在主边框窗口中打开的各个文档。应用程序类控制应用程序的所有对象并完成应用程序的初始化工作和最后的消除工作。

在实时成像仿真程序中, 一个文档类的对象和两个视图类的对象相关联, 其中在一个视窗中显示最后飞机成像的图像, 另一视窗中显示飞机飞行的轨迹, 并且在状态栏中显示出飞机当前的坐标、速度、方位。(如图三所示) 根据 ISAR 外场数据速率, ISAR 成像速率在 3~5 秒之间。在此期间, 计算机成一幅图像的时间小于 3 秒, 能保证实时成像。考虑到每幅图像在屏幕上停留 3~5 秒的时间太短, 我们在屏幕上保留 4 幅目标像, 依次更新, 并对图像进行编号, 便于观察和选择 ISAR 二维像。(如图三所示)

4.2 实时成像程序中有关图像显示、处理的技术

为了使本仿真程序更加实用、界面更加友好、更加容易操作, 我们创建了设备无关位图(DIB), 由一个名为 CDIB 的类来管理。DIB 具有一个内置的颜色表, 这个颜色表可以被用来同创建 DIB 时所使用的同一种颜色来显示该 DIB, 无论在设计最初的 DIB 时使用的是哪一种输出设备(显示器或打印机)。每个 DIB 都提供了一组内置的数据结构, 其中包含了有关该 DIB 的关键信息, 包括其大小、所使用的颜色的总数以及其颜色分辨率。我们利用这些信息可以很方便地对图像进行操作。我们把位图数据段分成四段, 每段分别存储每刻处理完

的数据, 然后再把整个位图显示出来。这样, 连续处理每段数据, 就可以连续显示飞机在不同地点的成像结果。(如图三所示)

4.3 多数据文件的连续处理

在本应用程序中通过调用 SetTimer 函数安装了一个 Windows 计时器。安装了计时器后, CPU 就会以有规律的间隔发生一件 WM_TIMER 事件 (此处间隔为 4 秒)。然后, 向 WM_TIMER 事件中添加调用处理数据的程序, 即可连续的处理数据。当不需要处理数据的时候, 调用 KillTimer 函数, 这时图像立刻在屏幕上停止显示。我们可以很方便地通过点击菜单或按钮来进行连续成像, 或停止成像。为了易于管理, 我们把这部分工作封装到了视图类中。

4.4 实时成像结果

图 3, 图 4 为实时成像过程中同时显示的 4 幅图像和同时显示的目标轨迹。机连续成像的结果。图 3 中, A 处飞机的坐标 $X=2839m$, $Y=12097m$, 方位= 6.6° , 速度= $72m/s$; B 处飞机的坐标 $X=2948m$, $Y=12068m$, 方位= 6.4° , 速度= $72m/s$; C 处飞机的坐标 $X=3039m$, $Y=12037m$, 方位= 6.2° , 速度= $72m/s$; D 处飞机的坐标 $X=3123m$, $Y=12006m$, 方位= 6° , 速度= $72m/s$ 。(成像的先后次序为 CDAB)

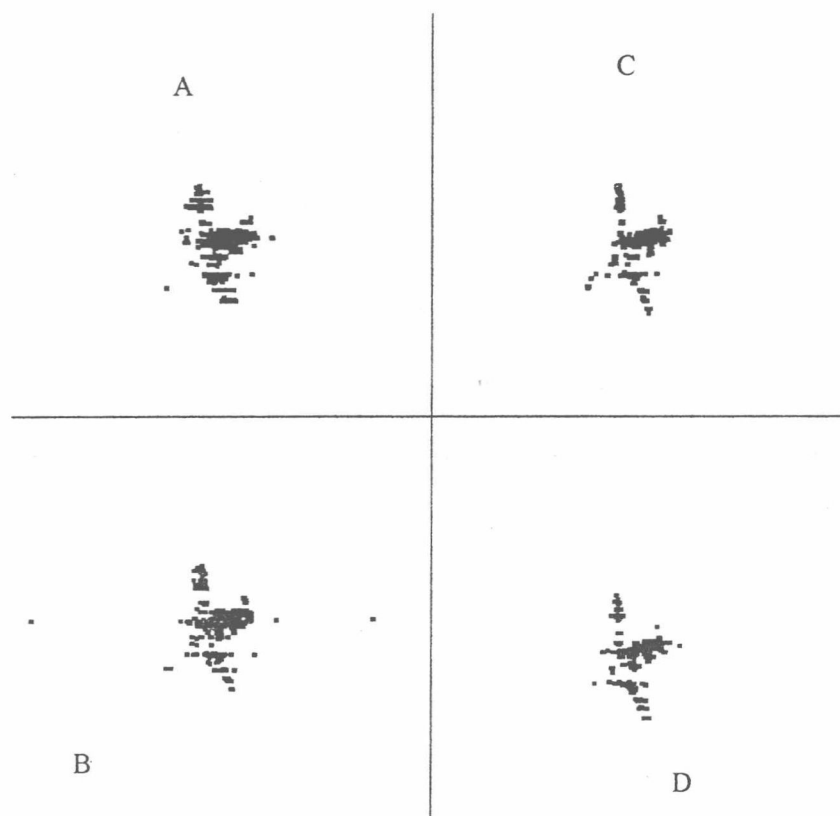


图 3. 实时成像显示界面

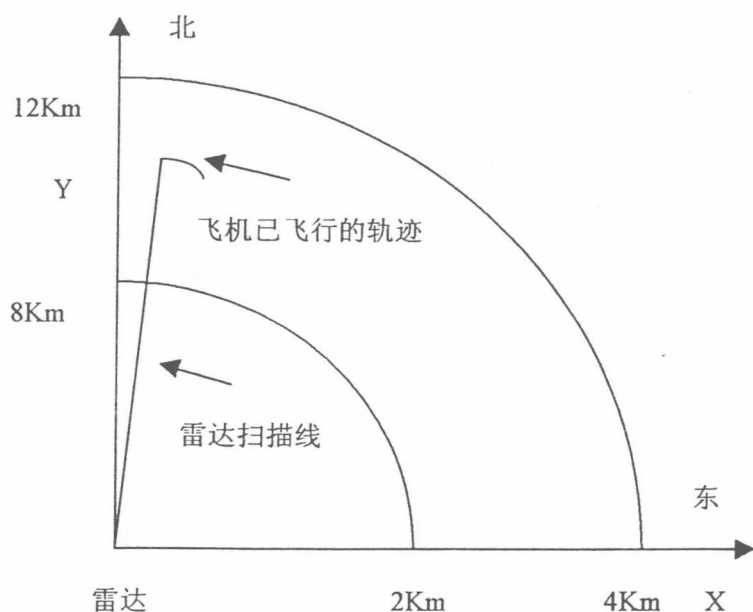


图 4. 目标轨迹显示的界面

结束语

ISAR 软件实时成像处理成本较低, 可用来研究连续成像过程中的运动补偿和成像方法, 有利于推广 ISAR 二维成像的应用。在这方面, 我们的工作刚起步, 在实时成像软件中只采用了一种距离对准和相位补偿方法。今后要进一步研究适用于实时成像的运动补偿、成像及图像后处理算法, 改进 ISAR 二维实时成像质量。

参考文献

1. M. J. Prickett, C. C. Chen, Principles of inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging. In: EASCON Record. 1980: 340--345
2. D. A. Ausherman, K L Walker, et al. Developments in radar imaging. IEEE Trans AES, 1984, 20(4): 363--398
3. C. C. Chen, H C Andrews, Target-motion-induced radar imaging. IEEE Trans AES, 1980, 16(1): 2--144.
4. R. Voles, Resolving revolutions: imaging and mapping by modern radar. Proc IEE-F, 1993, 140(1): 1--11
5. 逆合成孔径雷达信号处理技术总结报告, 南京航空航天大学, 1991 年 6 月
6. 朱兆达等, 逆合成孔径雷达外场数据成像结果, 《数据采集与处理》Vol. 11 No. 2 Jun. 1996: 89--92

陈工羽, 男, 南京航空航天大学电子工程系, 硕士研究生, 邮政编码 210016, 电话 025-4892401

Article ID: 1000-9361(1999)03-0160-04

IDENTIFYING THE NUMBER OF AIRCRAFT IN FORMATION FLIGHT USING ISAR TECHNIQUE

ZHU Dai-yin (朱岱寅), ZHU Zhao-da (朱兆达)

(*Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210026, China*)

Abstract: In this paper, an attempt at applying the cross-range one-dimensional ISAR processing for identifying the number of aircraft in formation flight is described. The procedure will succeed only if the translational motion of the target is compensated perfectly. The two-dimensional ISAR motion compensation methods based on high resolution range profile, such as the scatter point referencing and the track-the-target centroid, can not be used here. The track fitting method, which can be used for one-dimensional ISAR motion compensation, relies on a parametric model and suffers from a serious defect of large amount of computation. The authors proposed an iterative dominant scatterer method for one-dimensional ISAR motion compensation. It is robust and nonparametric with low computational complexity. Live echo signals from two fighter planes in formation flight have been collected using an S band surveillance radar. The cross-range one-dimensional ISAR processing was done. Experimental results show that identifying the number of aircraft in formation flight via cross-range one-dimensional ISAR processing is feasible.

Key words: inverse synthetic aperture radar; radar imagery; motion compensation; formation flight; radar resolution

CLC number: V243 **Document code:** A

Development of inverse synthetic aperture radar (ISAR), which possesses high cross-range resolution capabilities, made it possible to resolve target scatterers for various purposes including target imaging and target recognition. Unfortunately, ISAR imposes large bandwidth requirement on radar design, and entails additional cost and complexity. However, bandwidth of the majority of existing and planned search and tracking radars is not wide enough to provide sufficient range resolution. Nevertheless, cross-range one-dimensional ISAR technique may be used in narrowband coherent radars to enhance cross-range resolution and to realize cross-range one-dimensional imaging of moving target such as aircraft or identification of the number of aircraft in formation flight. Some authors have shown the experimental results of

cross-range one-dimensional ISAR imaging of a single flying aircraft^[1,2]. An attempt to apply cross-range one-dimensional ISAR technique for identifying the number of aircraft in formation flight was reported^[3], but only simulation data were used to verify the idea, and the motion compensation method needs to be improved. Motion compensation is a key step in ISAR processing. Two-dimensional ISAR motion compensation methods^[4,5] based on high resolution range profile, such as the scatter point referencing and the track-the-target centroid, can not be used in cross-range one-dimensional ISAR processing. The trajectory fitting motion compensation method has been adopted in one-dimensional ISAR processing to obtain the cross-range one-dimensional image of a single flying aircraft^[1,2]. The trajectory fitting

method assumes a parametric model of the translational motion of the target, and needs multi-dimensional search in realization. So this method lacks in robustness, and demands large amount of computation.

The authors proposed a robust and computationally simple motion compensation method for one-dimensional ISAR processing, namely the iterative dominant scatterer method. Live echo signals from two fighter planes in formation flight were acquired using an S band surveillance radar. Off-line processing was carried out for the recorded data. Our experimental results reveal the feasibility of identifying the number of aircraft in formation flight via one-dimensional ISAR processing in narrow band coherent radar systems.

1 Motion Compensation in Cross-Range One-dimensional ISAR processing

The motion of a target can be decomposed into the translational motion of the target relative to the radar and the rotational motion of the target relative to a reference point on the target itself. One-dimensional ISAR processing for the echo data contains two steps. First, the phase component of echo signals corresponding to translational motion is removed through motion compensation. Then, the cross-range one-dimensional image is reconstructed by performing Fourier transform on the compensated data.

One-dimensional ISAR motion compensation can be realized using trajectory fitting method^[1,2]. For uniform motion of a target, the radial motion relative to the radar in a short period of time can be considered to be with a uniform acceleration. The phase $\varphi(t)$ induced by the translational motion of the target can be described by a quadratic polynomial such as

$$\varphi(t) = \alpha t^2 + \beta t + \gamma \quad (1)$$

where α and β are parameters to be estimated, while γ is a constant which has not any influence on the final result, and can be ignored. Let $S(t)$ be echo signal. The signal after motion compensation $S_{mc}(t)$ is

$$S_{mc}(t) = S(t) e^{-j\varphi(t)} \quad (2)$$

Performing Fourier transform on $S_{mc}(t)$, one can reconstruct the cross-range one-dimensional image $g(r)$ of the target as

$$g(r) = \int S_{mc}(t) e^{-j2\pi r t} dt \quad (3)$$

where r denotes the cross-range variable. According to maximum likelihood principle, and adopting peak maximization criterion, define the objective function for motion compensation as

$$C(\alpha, \beta) = \max_r |g(r)| \quad (4)$$

The optimum estimate is

$$(\alpha_0, \beta_0) = \text{Arg max}_{(\alpha, \beta)} C(\alpha, \beta) \quad (5)$$

In practice, one just need to identify the number of targets. So the position of the targets on the cross-range coordinate axis, which is dependent on β in Eq. (1), is of no concern. One need not work on β . Hence, the two-dimensional searching process can be simplified to a one-dimensional one as

$$\alpha_0 = \text{Arg max}_{\alpha} C(\alpha, \beta) \quad (6)$$

This method is computationally expensive. The initial value of α in searching process depends on information about the radial velocity of target. In addition, in order to find α_0 , the searching interval should be large enough and the searching step should be small enough.

Furthermore, in many practical cases phase $\varphi(t)$ can not be exactly described by a second order polynomial. Instead, a higher order polynomial is required. In such cases the optimum estimate p_0 of the parameter vector p is

$$p_0 = \text{Arg max}_p C(p) \quad (7)$$

where $C(p)$ denotes the objective function. Obviously, this is a multi-dimensional searching problem which requires even larger amount of computation.

To avoid the assumption of parametric model for phase $\varphi(t)$ and the large amount of computation of trajectory fitting method, the iterative dominant scatterer method is developed. By this method one can extract the phase information, which is needed for performing the motion com-

pensation, from the strongest scatterer in the cross-range one-dimensional image, and eliminate the second order and higher order phase error from echo data. The method is a modified and generalized version of the phase gradient autofocus method^[6] for SAR and the modified Doppler centroid tracking method^[7] for two-dimensional ISAR.

The iterative dominant scatterer method can be summarized as the following routine.

I. Perform Fourier transform on echo data to achieve a cross-range one-dimensional image, and find out $\max |g(r)|$. Motion compensation has not been performed yet.

II. Isolate and separate the strongest scatterer. Perform inverse Fourier transform. The phase of the resulting data is just the translational phase component that needs to be removed in motion compensation. Perform Fourier transform on the compensated data, then one can see that $\max |g(r)|$ increases.

III. Repeat II until $\max |g(r)|$ does not increase any more.

In comparison with the trajectory fitting method, the iterative dominant scatterer method demands a greatly reduced amount of computation. Usually, the algorithm converges after several steps of iteration. Furthermore, this method is nonparametric and robust.

2 Processing Results of Live Data

Live echo data from two fighter planes in formation flight have been collected using an S band surveillance radar in 1990. The cross-range one-dimensional ISAR processing was carried out. Figs. 1, 2, and 3 show the processing results for data of 80, 120, and 160 pulse repetition intervals, respectively. In the figures, (a), (b), and (c) represent the result obtained by direct Doppler processing, trajectory fitting, and iterative dominant scatterer procedure, respectively.

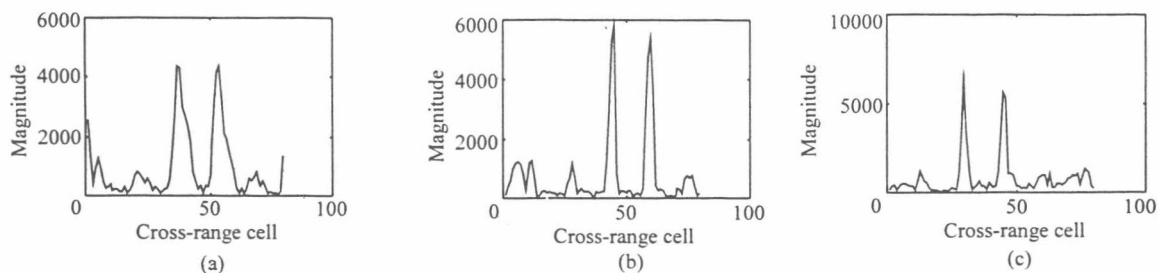


Fig. 1 One-dimensional ISAR processing results, 80 PRI

(a) direct Doppler processing; (b) trajectory fitting; (c) iterative dominant scatterer

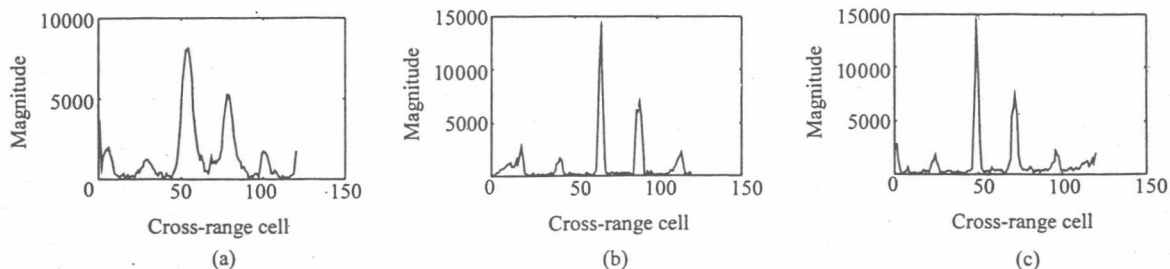


Fig. 2 One-dimensional ISAR processing results, 120 PRI

(a) direct Doppler processing; (b) trajectory fitting; (c) iterative dominant scatterer

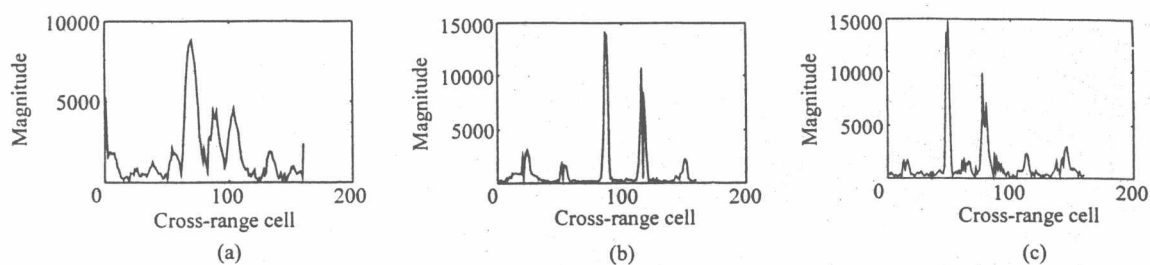


Fig. 3 One-dimensional ISAR processing results, 160 PRI

(a) direct Doppler processing; (b) trajectory fitting; (c) iterative dominant scatterer

3 Concluding Remarks

Based on the above results, one may make the following observations.

1) Direct Doppler processing without motion compensation suffers from poor resolution, and may miscount the number of aircraft. When the processed number of pulse repetition intervals increases, the higher order phase error becomes larger, so the performance of direct Doppler processing deteriorates further.

2) Whereas both trajectory fitting and iterative dominant scatterer methods can improve resolution and ability of identifying the number of aircraft, the latter needs much less amount of computation than the former, and will further manifest its merit when higher order phase error exists in echo data.

References

- [1] Eerland, K. K., "Application of inverse synthetic aperture radar on aircraft"[A], *Proceeding of International Conference on Radar*[C], France, 1984, pp. 618-623.
- [2] Corsini, G., Dalle Mese, E., and Manara, G., "Radar imaging of non-cooperating maneuvering aircraft"[A], *Proceeding of the IEEE International Radar Conference*[C], USA, 1990, pp. 563-568.
- [3] ZHU Zhao-da, SHE Zhi-shun, WU Xiao-qing, and Zhou Jianjiang, "Multiple moving target resolution and imaging by ISAR"[J], *Chinese Journal of Electronics*, Vol. 4, No. 3, 1995, pp. 66-70.
- [4] CHEN, C. C., and Andrews, H. C., "Target-motion-induced radar imaging"[J], *IEEE Trans. on AES*, Vol. 16, No. 1, 1980, pp. 2-14.

- [5] Prickett, M. J., and Chen, C. C., "Principle of inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging"[Z], *Record of the IEEE EASCON*, U. S. A., 1980, pp. 340-345.
- [6] Wahl, D. E., Eichel, P. H., Ghiglia, D. C., and Jackowitz, Jr. C. V., "Phase gradient autofocus — a robust tool for high resolution SAR phase correction"[J], *IEEE Trans. on AES*, Vol. 30, No. 3, 1994, pp. 827-834.
- [7] ZHU Zhao-da, QIU Xiao-hui, and SHE Zhi-shun, "ISAR motion compensation using modified Doppler centroid tracking method"[J], *Acta Electronica Sinica*, Vol. 25, No. 3, 1997, pp. 65-69 (in Chinese).

Biographies:



ZHU Dai-yin (朱岱寅) was born in Wuxi, China, in 1974. He graduated from the Southeast University in 1996 with honor. He is now enrolled as a post graduate student in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) in 1996. His research interests include radar imaging and signal processing.



ZHU Zhao-da (朱兆达) was born in Qingdao, China, in 1939. He graduated from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) in 1960. Since then, he has joined the Department of Electronic Engineering at NUAA, where he is now a Professor and the Director of the Electronic Engineering Research Laboratory. His teaching and research interests are in detection, signal processing and radar imaging. He is a Fellow of CIE and a Senior Member of IEEE.

Tel: +86-25-4891229. E-mail: zzdee@nuaa.edu.cn

机载雷达地面动目标指示和成像研究

朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学 电子工程系, 南京 210016)

[摘要] 本文研究用机载干涉 SAR/ISAR 技术实现地面动目标指示和成像。利用 SAR 成像的距离和横向距离高分辨力, 以及干涉仪的空域对消, 实现杂波抑制, 提高信杂比。动目标的真实方位由相位比较干涉仪测定。进而用 ISAR 处理得到地面动目标的高分辨图像。理论分析和初步计算机仿真证明了这项技术的正确性。

[关键词] 地面动目标指示, 地面动目标成像, 机载雷达

1 引言

机载雷达对地面动目标检测的一个主要困难在于慢速目标信号在时、空、频域上都被淹没在强大的主瓣杂波之中。在时、空域上很直观, 而在频域, 一方面由于雷达平台的运动导致地杂波频谱展宽, 另一方面慢速目标落入主瓣杂波频率范围之内。

抑制主瓣杂波, 提高慢速目标信杂比的途径是提高雷达的分辨力。文[1]报道 Lincoln 实验室正在研究运动目标超高分辨成像技术。雷达工作在 Ka 波段, 距离和横向距离分辨力均为 0.3m。可见在二维成像之前, 首先依靠时域距离高分辨获得高信杂比的一维距离像。文[2]报道正在研究用干涉动目标聚焦(IMTF)技术实现机载雷达地面动目标指示(GMTI), 以及地面动目标成像(GMTIm)。这种 GMTI 技术已在 Joint STARS 和 AN-APG76 雷达里使用[3], 并在海湾战争中显示了效能[4]。AN-APG76 雷达区域成像分辨力为 3-20m, 比文[1]报道低的多。

Joint STARS 和 AN-APG 76 机载雷达的 GMTI 技术, 实质上属于沿航迹干涉 SAR 技术[5], 但一般 SAR 文献中没有讨论把干涉 SAR 用于 GMTI。文[2, 3]也只有 IMTF 技术简单和定性的介绍。本文对此技术作进一步深入研究。为了使含义更明确, 本文下面称它为干涉 SAR/ISAR 地面动目标指示和成像技术。

本文第 2 节研究干涉 SAR/ISAR 的工作原理。第 3 节介绍机载干涉 SAR/ISAR 地面动目标指示和成像计算机仿真结果, 并给出简短结论。

2 沿航迹干涉 SAR/ISAR 的原理

沿航迹干涉 SAR/ISAR 可以划分成三个部分, 即 SAR, 干涉仪, 和 ISAR。

第一部分由三路 SAR 组成。沿飞机地速 $\vec{v}$ 的方向等间距设置 A、B、C 三个天线, 发射时使用全孔径, 相位中心在 B 点。接收时三个天线分别单独接收回波, 由三路分别进行 SAR 处理, 产生同一地区三幅 SAR 图像。SAR 处理可以是条带成像, 也可以是区域成像。本文以下讨论区域成像。雷达发射大时带积脉压信号时, SAR 处理首先对回波作脉压, 以实现距离高分辨力, 获得高分辨一维距离像。然后根据 IMU+GPS 提供的载机运动参数进行运动补偿。在区域成像情况可经运动补偿转化为转台成像。如果采用 ISAR 中的 FFT 距离多普勒成像算法[6], 则经横向 FFT 完成横向距离高分辨, 获得地面的二维 SAR 图像。

由于 SAR 的距离和横向距离二维高分辨能力, 使动目标信杂比得以很大提高。由于 SAR 处理是对固定目标匹配的, 动目标会出现距离走动, 横向位移和横向散焦。为了克服动目标距离走动和

横向散焦,把相干处理全驻留时间分成若干分驻留时间,在 SAR 处理阶段,相干处理在分驻留时间内进行。纠正动目标横向位移求其真实方位,由干涉仪解决。

第二部分是干涉仪。由于接收天线位置不同,上面所述三路 SAR 图像对应像素存在相位差,而此相位差对动目标和固定目标是不同的。因此,可以把二路 SAR 图像逐个像素进行干涉空域对消,进一步抑制地杂波,提高动目标信杂比。还可以把三路 SAR 图像的二路对消输出逐个像素进行干涉相位测向,确定动目标的真实方位。另外还可以求出动目标的径向速度。一路空域对消输出经过 CFAR 处理,可以完成动目标检测。

第一、二部分已完成 GMTI,第三部分是 ISAR。上面空域对消输出图像的信杂比已经足够高,但是由于分驻留时间较短,图像的横向分辨力还达不到动目标成像的要求,解决办法是先把空域对消输出二维像域经变换返回到距离像和横向数据域,然后把各分驻留时间的数据链接成全驻留时间,再按 ISAR 成像要求进行运动补偿,在全驻留时间内作横向压缩,最终得到高分辨力的动目标二维像。上述空域对消输出在变换之前可以先在二维 SAR 图像上我们关心的动目标周围加窗,这样可以进一步提高信杂比,有利于下一步 ISAR 处理。

以上就是机载干涉 SAR/ISAR 实现地面动目标指示和成像的主要过程。

3 计算机仿真和结论

在计算机上进行了机载干涉 SAR/ISAR 地面动目标指示和成像的原理仿真,仿真中假设的参数和条件如下。

雷达波长 3cm , 发射 LFM 信号, 载机高度 8000m , 前斜视角 60° , 成像距离 80km , 距离分辨力 2.5m , 分驻留时间 $T = 1\text{sec}$, 全驻留时间 $T_i = 4\text{sec}$, SAR 横向分辨率 10m , ISAR 横向分辨率 2.5m 。

在地面均匀设置固定点散射源,点源反射率为复高斯变量,方差为 1,围绕地面成像区中心 O 点共设置 4 行 20 列点源,列间距 37.5m ,行间距 7.5m 。

在地面 O 点处设置一动目标,它由三个点散射源组成,形状如图 1 所示,每个点的反射率均为 $\sqrt{2}$,动目标真实方位 $\Delta\theta = 0^\circ$,动目标径向速度 $V_r = 1\text{m/sec}$ 。

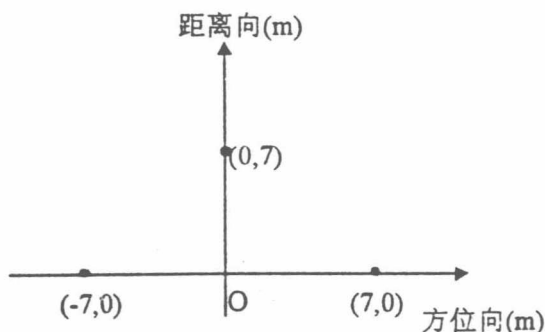


图 1 动目标