

# 机载干涉 SAR/ISAR 对地面慢速目标成像研究<sup>1</sup>

朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学电子工程系 南京 210016)

**摘 要** 该文研究用机载干涉 SAR/ISAR 技术对地面慢速目标成像。该技术利用 SAR 成像的距离和横向距离高分辨率,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 处理得到慢速目标的高分辨率图像。文中详细讨论了机载干涉 SAR/ISAR 系统框图和工作原理,并导出了该系统中 SAR、干涉仪空域对消和测向以及 ISAR 处理的定量关系式。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** 地面动目标成像,地面动目标指示,干涉仪,合成孔径雷达,逆合成孔径雷达

**中图分类号** TN951

## 1 引 言

地面慢速目标成像是军用机载雷达迫切需要具备的一项功能,但其技术难度很大。1995 年有文献 [1, 2] 报道当时美国对此项技术尚处于研究阶段。机载雷达的慢速目标信号在时、空、频域上都淹没在强大的主瓣杂波之中。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。文献 [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。文献 [2] 报道正在研究用干涉动目标聚焦 (IMTF) 技术实现机载雷达对地面慢速目标成像。IMTF 用沿航迹干涉 SAR 完成地面动目标指示 (GMTI),再用 ISAR 技术实现慢速目标成像。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,比文献 [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]。文献 [2, 3] 中只有 IMTF 技术简单和定性的介绍。本文对此技术作深入和定量的研究。为了使含义更明确,本文下面称它为干涉 SAR/ISAR 地面慢速目标成像技术。

本文第 2 节给出干涉 SAR/ISAR 原理框图,并叙述其工作原理。第 3, 4, 5 节分别讨论 SAR 干涉仪和 ISAR 处理过程,并特别对干涉空域对消和干涉相位测向进行定量研究。第 6 节介绍机载干涉 SAR/ISAR 地面慢速目标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 的原理框图如图 1 所示,整个框图可以划分成 3 个部分,即 SAR,干涉仪和 ISAR。

第 1 部分由 3 路 SAR 组成。沿飞机地速  $v$  的方向设置  $A, B, C$  3 个天线,其间距为  $d$ 。发射时使用全孔径,相位中心在  $B$  点。接收时 3 个天线分别单独接收回波,由 3 路分别进行 SAR 处理,产生同一地区 3 幅 SAR 图像。由于 SAR 的距离和横向距离二维高分辨能力,使动

<sup>1</sup> 2001-10-22 收到, 2002-04-04 改回

国家自然科学基金资助项目 60082002, 航空科学基金资助项目 00F52057, 雷达信号处理国防科技重点实验室基金课题 96JS01.2.2HK0201

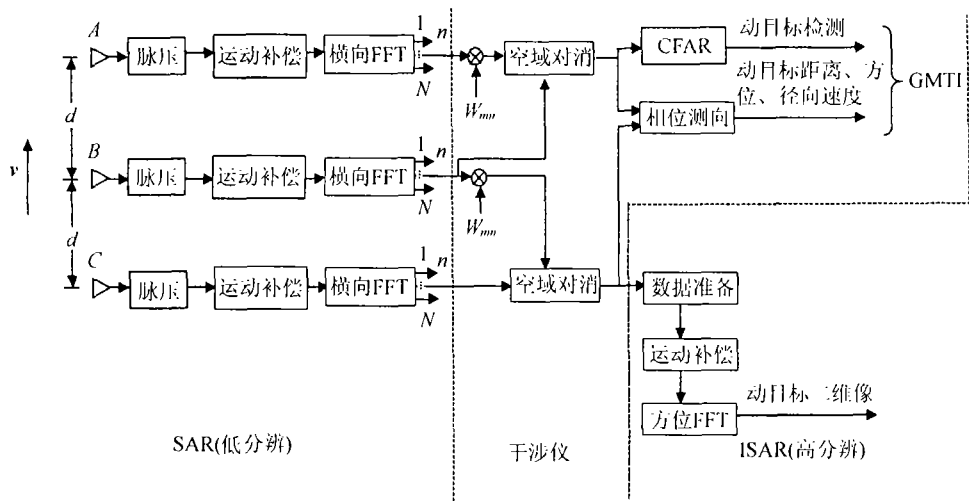


图 1 沿航迹干涉 SAR/ISAR

目标信杂比得以很大提高。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，由下面干涉仪解决。

第 2 部分是干涉仪。由于接收天线位置不同，上面所述 3 路 SAR 图像对应像素存在相位差，可以把 2 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 3 路 SAR 图像的两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 1, 2 部分已完成 GMTI, 第 3 部分是 ISAR。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变换，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 ISAR 处理。

以上就是机载干涉 SAR/ISAR 对地面慢速目标成像的主要过程。

### 3 SAR 成像处理

如图 1 所示，3 路 SAR 成像处理是并行的。SAR 处理可以是条带成像，也可以是区域成像<sup>[6]</sup>。本文以下讨论区域成像。

地面动目标在 SAR 成像过程中与固定目标相比，有 3 点不同。首先，动目标在距离方向发生走动。径向速度为  $V_r$  的动目标在相干处理分驻留时间  $T$  内走动距离为  $V_r T$ 。为了动目标图像不发生距离向模糊，距离走动量应小于图像距离分辨力  $\rho_r$ ，即要求满足下式：

$$V_r T < \rho_r \quad (1)$$

第 2 节提到的 SAR 处理分驻留时间的选择应满足上式。

其次, 动目标的径向速度在动目标的回波信号中引入附加的多普勒频率, 在 SAR 横向分辨后造成动目标横向位置偏移, 横向偏移量  $\Delta X$  和方位偏移量  $\delta\theta$  分别为

$$\Delta X = V_r R / V \cos \theta \quad (2)$$

$$\delta\theta = V_r / V \cos \theta \quad (3)$$

式中  $V_r$  是动目标径向速度,  $V$  是载机前进速度,  $\theta$  是天线波束自飞机正侧向算起的斜视角,  $R$  是地面成像区中心到雷达的距离。

第 3 点是动目标切向速度  $V_t$  可能引起横向散焦和走动。在  $V_t$  远小于  $V \cos \theta$  和分辨率要求不高、相干处理时间  $T$  不大时, 这个问题可不考虑。

## 4 干涉仪处理

干涉仪完成 2 个任务: 空域对消和相位测向。

### 4.1 空域对消

图 2 表示区域成像的几何关系。A, B, C 表示 3 个天线, 间距为  $d$ , 发射相位中心为 B, 接收时有 A, B, C 3 个相位中心。O 是成像区参考点, 位于波束中心线上, P 是成像区内任意一点。OB = R, OB 与天线连线法线夹角即为斜视角  $\theta$ 。PB 与 OB 的夹角为  $\Delta\theta$ 。

SAR 运动补偿是 3 路分别进行的, 经运动补偿之后 A, B, C 3 路 O 点信号的相位都变成 0。运动补偿后 A 路 P 点回波相位为  $\psi_A$ , B 路 P 点回波相位为  $\psi_B$ , P 点回波在 A, B 两路的空域相位差为

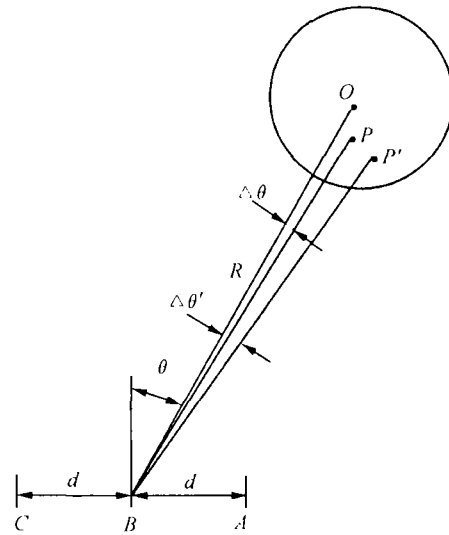


图 2 区域成像几何关系

$$\psi_{AB} = \psi_A - \psi_B = \frac{2\pi d}{\lambda} [\sin \theta - \sin(\theta + \Delta\theta)] \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为雷达波长。图 2 中地面上 P 点处的动目标在 SAR 图像上出现在 P' 点, P' 和 P 的横向坐标相差  $\Delta X$ 。P'B 与 OB 的夹角为  $\Delta\theta'$ 。

由 (4) 式可见,  $\lambda, \theta, d$  一定时, 空域相位差  $\psi_{AB}$  随方位角  $\Delta\theta$  而变。与  $\Delta\theta'$  相应的空域相位差为

$$\psi'_{AB} = \psi'_A - \psi'_B = \frac{2\pi d}{\lambda} [\sin \theta - \sin(\theta + \Delta\theta')] \quad (5)$$

式中  $\psi'_A$  和  $\psi'_B$  分别是 A, B 路地面上 P' 点目标回波相位。把 A 路 SAR 图像上 P' 点所在分辨单元的信号  $S'_A$  乘以权系数  $w = e^{-j\psi'_{AB}}$ , 然后减去 B 路 SAR 图像上 P' 点所在分辨单元的信号  $S'_B$ , 我们得到该分辨单元的空域对消输出为

$$S'_{AB} = wS'_A - S'_B, \quad w = e^{j\psi'_{AB}} \quad (6)$$

为了推导简明起见, 我们以下把单路信号的幅度假设为  $|S'_A| = |S'_B| = 1$ 。由 (5), (6) 式可见, 如果地面上  $P'$  点目标是固定的, 由于它在 SAR 图像上仍出现在  $P'$  点, 于是  $S'_A = e^{j\psi'_A}$ ,  $S'_B = e^{j\psi'_B}$ , 则  $A, B$  两路空域对消后输出为零。

地面上  $P$  点处的动目标, 在 SAR 图像上  $P'$  点分辨单元  $A, B$  两路空域对消输出端的信号由 (4)-(6) 式可得

$$S'_{AB} = e^{j\psi_A} e^{-j\psi'_{AB}} - e^{j\psi_B} = e^{j\psi_B} [e^{j(\psi_{AB} - \psi'_{AB})} - 1] \quad (7)$$

$B, C$  两路空域对消的原理同上面是一样的。应当强调, 空域对消是针对 SAR 图像逐分辨单元进行的。权系数  $w$  由分辨单元横坐标决定, 而与纵坐标无关。

在空域对消输出端的动目标信号幅度为

$$|S'_{AB}| = |e^{j(\psi_{AB} - \psi'_{AB})} - 1| = 2 \left| \sin \left\{ \frac{2\pi d}{\lambda} [\sin(\theta + \Delta\theta') - \sin(\theta + \Delta\theta)] \right\} \right| \quad (8)$$

正侧视时  $\theta = 0$ , 由于  $\Delta\theta$  和  $\Delta\theta'$  都限于波束宽度之内, 其值很小, 近似有

$$|S'_{AB}| = 2 \left| \sin \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \delta\theta \right) \right| \quad (9)$$

式中  $\delta\theta = \Delta\theta' - \Delta\theta$  是 (3) 式表示的在 SAR 图像上动目标的方位偏移量。由于我们在前面假设  $|S'_A| = |S'_B| = 1$ , 所以 (8), (9) 式的  $|S'_{AB}|$  也表示空域对消滤波器的幅度方位特性。(8) 式表明空域滤波器特性与斜视角  $\theta$ , SAR 图像分辨单元的方位角即动目标视在方位角  $\Delta\theta'$  以及动目标真实方位角  $\Delta\theta$  都有关系。(9) 式表明正侧视时近似可认为空域滤波器特性只取决于动目标视在方位角和真实方位角之差  $\delta\theta$ 。

#### 4.2 相位测向

在天线基线尺寸  $d$  远大于工作波长  $\lambda$  时, 只要信噪比足够高, 利用两天线干涉相位差测向, 可达到很高精度。但要保证在天线主瓣宽度  $\alpha$  范围之内, 不出现测向多值性, 基线应满足下式:

$$d < \lambda / (2 \sin(\alpha/2)) \quad (10)$$

同样可以得到, 地面  $P$  点处动目标在 SAR 图像上出现在  $P'$  点时,  $B, C$  两路空域对消输出信号为

$$S'_{BC} = e^{j\psi_B} e^{-j\psi'_{AB}} - e^{j\psi_C} \quad (11)$$

由 (7), (11) 式可得  $S'_{AB} S'^*_{BC}$  的辐角即两路空域对消输出的干涉相位差为

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} [d \sin\theta - d \sin(\theta + \Delta\theta)] \quad (12)$$

利用 (12) 式, 可从干涉相位差  $\Delta\psi$  求出动目标偏离成像区中心的真实方位  $\Delta\theta$ 。

由动目标真实方位角可以求出动目标偏离成像区参考点的横坐标为

$$X = R \operatorname{tg} \Delta\theta \cong R \Delta\theta \quad (13)$$

而动目标在 SAR 图像上的横坐标为

$$X' = R \operatorname{tg} \Delta\theta' \cong R \Delta\theta' \quad (14)$$

由 (2), (13), (14) 式, 并注意到  $\Delta X = X' - X$ , 可求得动目标的径向速度:

$$V_r = (V \cos \theta / R)(X' - X) \quad (15)$$

由以上讨论可知, 经过 SAR 和干涉仪处理, 已完成 GMTI, 即动目标已从固定地杂波中分离出来, 并且已求得动目标真实位置和它的径向速度。

## 5 ISAR 成像处理

在空域对消输出端, 动目标信杂比已大大提高。但如第 2、3 节所述, 在分驻留时间内得到的 SAR 图像分辨率还不高, 还得不到动目标的精细图像。

在任一路空域对消输出的 SAR 图像上, 围绕需要精细成像的动目标区域加一个适当大小的二维窗, 然后作横向傅氏反变换返回横向数据域, 把所有分驻留时间的数据连接起来, 形成全驻留时间的数据。全驻留时间的长短按所要求的分辨力决定。然后按 ISAR 处理方式, 作距离对准和相位补偿, 再作横向傅氏变换, 即得到动目标的精细图像。

## 6 计算机仿真和结论

在计算机上进行了机载干涉 SAR/ISAR 对地面慢速目标成像的原理仿真。仿真中假设的参数和条件如下:

雷达波长  $\lambda = 3.2\text{cm}$ , 干涉仪基线  $d = 35\text{cm}$ , 脉冲重复频率  $\text{PRF} = 197\text{Hz}$ , 发射 LFM 信号带宽  $B = 60\text{MHz}$ , 发射信号时宽  $\tau = 9.2\mu\text{s}$ , 载机速度  $V = 194.4\text{m/s}$ , 载机高度  $H = 6000\text{m}$ , 前斜视角  $\theta = 60^\circ$ , 成像距离  $R = 60\text{km}$ , 距离分辨率  $2.5\text{m}$ , 分驻留时间  $T = 1\text{s}$ , 全驻留时间  $T_t = 4\text{s}$ , SAR 横向分辨率  $10\text{m}$ , ISAR 横向分辨率  $2.5\text{m}$ 。

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  $O$  点共设置 4 行 20 列点源, 列间距  $75\text{m}$ , 行间距  $7.5\text{m}$ 。

在地面  $O$  点处设置一动目标, 它由 3 个点散射源组成, 形状如图 3 所示, 每个点源的反射率均为  $\sqrt{2}$ , 动目标真实方位  $\Delta\theta = 0^\circ$ , 动目标径向速度  $V_r = 1\text{m/s}$ 。

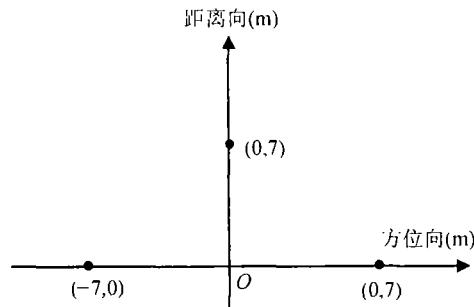


图 3 动目标

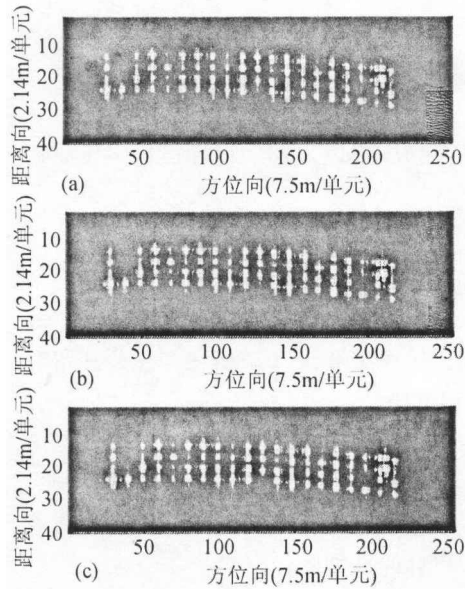


图4 SAR处理结果  
(a) A路, (b) B路, (c) C路

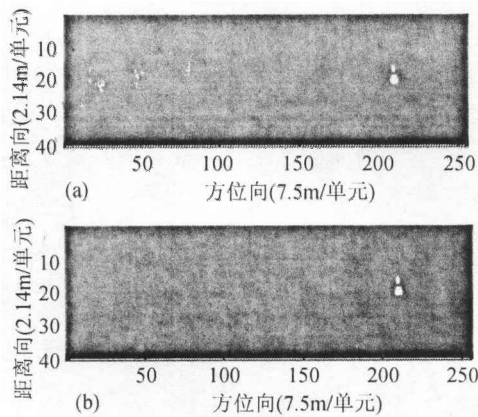


图5 空域对消结果  
(a) A, B, (b) B, C

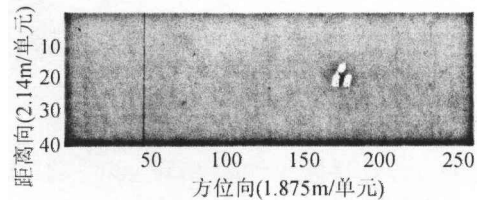


图6 ISAR成像结果

仿真结果如图(4)~图(6)所示。图4是SAR处理结果,图4(a),4(b),4(c)分别是A,B,C3路SAR图像。可见无法辨别动、静目标。图5是空域对消结果,图5(a),图5(b)分别是A,B和B,C两路空域对消结果。由于假设是点散射源,因而固定目标对消得比较干净,而实际面目标对消剩余会再大一些。可见动目标保留下来,但成像分辨率不够高。图6是一路空域对消输出的ISAR成像结果,得到高分辨率的动目标精细图像。仿真求得动目标方位为 $0.0115^\circ$ ,径向速度为 $0.98\text{m/s}$ 。

通过以上的讨论和计算机仿真,我们可以得到以下结论,即用干涉SAR/ISAR技术实现机载雷达对地面慢速目标检测和成像,原理是正确的。从雷达技术发展现状看,干涉SAR/ISAR在目前技术条件下可取得系统性能和复杂度较合理的折衷。

## 参 考 文 献

- [1] J. C. Henry, T. J. Murphy, A Lincoln laboratory technique for the ultra-high resolution imaging of moving target, Proc. of the SPIE, Orlando, Florida, 2487, 1995, 359-370.
- [2] E. F. Stockburger, D. N. Held, Interferometric moving ground target imaging, Proc. of the IEEE International Radar Conference, Alexandria, Virginia, 1995, 438-443.
- [3] M. Tobin, Real time simultaneous SAR/GMIT in a tactical airborne environment, Proc. of EUSAR, Königswinter, Germany, 1996, 63-66.
- [4] M. T. Fennell, R. P. Wishner, Battlefield awareness via synergistic SAR and MIT exploitation, IEEE AES Magazine, 1998, 13(2), 39-45.

- [5] C.V. Jackowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, *et al.*, Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar, A Signal Processing Approach, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1996, Ch.5.
- [6] D. A. Ausherman, A. Kozma, J. L. Walker, *et al.*, Developments in radar imaging, IEEE Trans. on AES, 1984, AES-20(4), 336-340.

## STUDIES OF GROUND SLOW-MOVING TARGET IMAGING BY AIRBORNE INTERFEROMETRIC SAR/ISAR

Zhu Daiyin     Zhu Zhaoda

(Dept. of Electron. Eng., Nanjing Univ. of Aeronaut. and Astronaut., Nanjing 210016, China)

**Abstract** In this paper, ground slow-moving target imaging via airborne interferometric SAR/ISAR technique is investigated. Land clutter suppression and SCR improvement are achieved by range and cross-range two-dimensional high resolution of SAR imaging and spatial domain cancellation of interferometer. True azimuth of moving target is determined using phase-comparison interferometer. Furthermore, high resolution image of the slow-moving target is obtained by ISAR processing. The block diagram and the operational principle of the airborne interferometric SAR/ISAR system are discussed in detail. Quantitative relations for SAR, interferometer spatial domain cancellation, direction finding and ISAR processing are derived. Theoretical analysis and preliminary computer simulation reveal the validity of this technique.

**Key words** Ground moving target imaging, Ground moving target indication, Interferometer, SAR, ISAR

朱岱寅: 男, 1974 年生, 讲师, 研究方向雷达成像和信号处理.

朱兆达: 男, 1939 年生, 教授、博士生导师, 研究方向雷达信号检测与处理.