

低分辨雷达目标成像的横向距离定标¹

姜正林 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 确定低分辨雷达目标横向成像的距离定标(横向距离因子),是正确获取目标横向距离像和进行雷达目标识别的一个前提。根据逆合成孔径雷达(ISAR)原理,目标横向距离因子取决于雷达波长和目标对于雷达视线(RLOS)在相干处理时间内的转角,前者可已知,但对于非合作的运动目标,后者在简单的 ISAR 方式下,是难以确定的。该文根据合成阵列以及干涉 SAR(INSAR)的原理,利用两个水平方向放置的天线,通过对两个天线所成一维横向距离像进行比相,便可对目标进行横向定标。通过理论分析和仿真实验证明,该方法是正确和有效可行的。

关键词 逆合成孔径雷达, 横向距离定标, 相干积累, 干涉

中图分类号 TN951

1 引 言

逆合成孔径雷达(ISAR)能够对非合作的运动目标成像,横向分辨率是基于目标相对于雷达视线的转动产生的多普勒效应,纵向分辨率取决于雷达的信号频带宽度^[1,2]。ISAR 技术可推广应用到低分辨雷达,由于低分辨雷达对飞机一类目标没有纵向分辨能力,只能进行横向成像^[3]。成像的目的是为雷达目标识别提供有效的依据,但是只有完成了目标横向定标后,获得目标的横向尺寸,才能正确进行目标识别。

对于低分辨雷达,由于纵向分辨不敏感,分辨率长达百米,则对飞机一类目标在纵向上没有分辨能力,设 $y = 0$ 。它的一维横向像,可看成是目标 ISAR 像在 x 轴的投影。对飞机一类“点”目标,其回波的主要分量只占一个距离单元,第 m 次回波的复振幅为 $a(m)e^{j\phi(m)}$ ($m = 1, 2, \dots, M$), M 为采集的回波总次数,与 ISAR 不同的是,它无需做包络对齐,而使用插值方法计算出各次回波峰值的复振幅,并将其排成一行,但是回波的相位是紊乱的,它包括平动和转动的相位,为了进行转台成像,必须首先对回波数据聚焦,即平动相位的补偿,这里可以采用以图形锐化度准则估计目标运动参数的最小熵方法^[4]聚焦,然后方可进行横向相干积累。

大家知道,ISAR 成像是依靠雷达和目标之间的相对运动,要得到转台目标的模型,必须补偿掉平动分量,当包络对齐完成后,即将目标上某一参考点移到转台轴心,成为雷达对一个转台目标成像。对于单个天线,相邻回波间的相位差近似为 $\Delta\phi = (4\pi/\lambda)x\Delta\theta_m$, 其中 $\Delta\theta_m$ 为相邻两次采样回波目标转过的角度, x 为横向一维像上的横距,此时 ISAR 的横距分辨率为^[2]

$$\Delta R_x = \lambda / (2\Delta\theta) \quad (1)$$

要完成对目标的横向距离 x 的估计,进行横向距离定标,必须知道目标在相干积累时间内转过的角度 $\Delta\theta$,但是对于非合作目标, $\Delta\theta$ 的实际值是难以测定的,虽然通过多普勒分析的横向处理,可以得到目标的横向分布图,但为了对横坐标进行定标,还需做进一步的工作。

应当指出,横向成像要求有很高的横向分辨率,因而合成阵列必须很大。但是散射点得到分离后,只要有两个距离上分开的天线,用比相法(干涉法)就可对散射点做横向定位。

¹ 1999-11-30 收到, 2000-03-20 定稿
国家自然科学基金资助项目(项目批准号: 69831040)

为此,我们可以增加一个天线,两个天线均可将散射点做横向分离。正如干涉合成孔径雷达(INSAR)的技术,即增加一个天线,与原天线高度方向上有差别,然后对各天线通道所接收到的信号成像,对结果做相干处理,从而获得被成像对象散射点间相对高度信息^[5]。同样如果在水平方向放置两个天线,通过两个天线所成的横向距离像,进行相位比较,即可测出目标上各多普勒单元相对于基线的横向距离,从而根据几何关系,可估计出各多普勒单元之间的相对横向距离,完成目标的横向定标。

2 干涉法横向定标基本原理

要完成两个雷达所得回波数据的干涉处理,必须使得横向一维距离像上的散射点一一对应,以第一个天线为基准对目标在 O 点聚焦成为转台目标后, R_0 近似为常数,为了进行“比相”,所以聚焦必须采用共同的焦点,为满足这个条件,在用最小熵方法聚焦时,采用与第一个天线共同的相位参数对第二个天线回波数据进行补偿。

为了说明在通常条件下采用同样的参数,仍可对第二个天线回波数据在 O 点较好的聚焦,如图 1 所示,我们假设 O 点为目标聚焦点,目标以速度 v , 夹角为 α 飞行,飞行时间为 t , A 和 B 天线间距为 D , R_0 为天线 A 聚焦后的半径, R'_0 为天线 B 聚焦后 0 时刻半径, R_A 和 R_B 分别为目标瞬时距离,则有

$$R_A = \sqrt{(vt)^2 + R_0^2 - 2vtR_0 \cos(90^\circ + \alpha)} \quad (2)$$

$$\sin \beta = vt \sin(90^\circ + \alpha) / R_A = vt \cos \alpha / R_A \quad (3)$$

$$R_B = \sqrt{R_A^2 + D^2 - 2R_A D \cos(90^\circ - \beta)} = \sqrt{R_A^2 + D^2 - 2Dvt \cos \alpha} \quad (4)$$

对第二个天线 B 采用第一个天线聚焦相位参数聚焦后的聚焦半径误差为

$$\Delta R'_0 = R_B - (R_A - R_0) - R'_0$$

以 $R_A=100\text{km}$, $D=10\text{m}$, $\alpha = 10^\circ$, $v=200\text{m/s}$, 脉冲宽度 $0.8\mu\text{s}$, 积累时间为 8s 为例, R'_0 的 $\Delta R'_0$ 变化曲线如图 2 所示。 R'_0 的误差 $\Delta R'_0$ 最大为 0.12m , 根据文献 [3], 当 $\Delta R \leq (1/4)[C/(2B)]$ 时, 可忽略, 一般情况, 此条件可以满足, 故此时完全可以进行良好的聚焦, 并对散射点进行分离。尽管比相后, 存在一个因聚焦半径不同产生回波相位差 $2\pi[(R_0 - R'_0(t))/\lambda]$, 但是为了定标只需求出横向一维像上两点间相对横距, 所以对于某瞬时, 两散射点横距相减, $2\pi[(R_0 - R'_0(t))/\lambda]$ 抵消掉, 从而求出两散射点间横距。本文正是基于这种原理, 完成目标的横向定标。

对聚焦后的回波数据, 要完成横向距离定标, 至少要选出两对散射点, 但是, 由于分辨率的限制, 在同一距离单元具有相同多普勒频率的散射点会投影到同一个多普勒分辨单元, 而发生角闪烁, 为了避免比相定标误差, 须避开这些发生角闪烁的散射点(判断角闪烁方法另文讨论)。下面推导中, 假设 P 、 Q 两点是经过处理, 从回波数据中分离出的两个散射点。

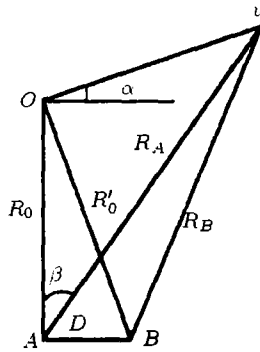


图 1 天线空间几何位置

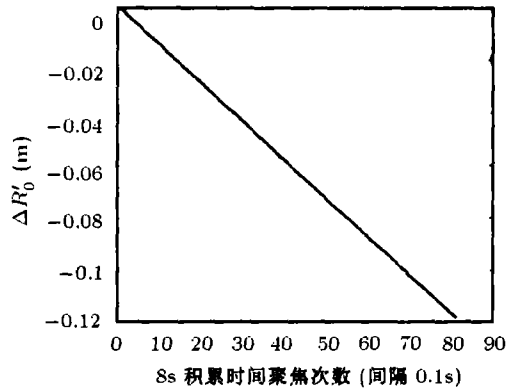


图 2 $\Delta R'_0$ 变化规律

首先考虑最简单的情况, 如图 3 所示, A 和 B 是两个水平放置的天线, D 为两天线间的距离, 以目标的聚焦点 O 为原点, 建立 $x-y$ 坐标系, x 轴为目标一维横向距离像所在直线, $P(x, y)$ 为目标上一散射点, P 到 A 天线距离为 R_1 , P 到 B 天线距离为 R_2 , $Q(x', y')$ 为目标上另一散射点, 对应参数分别为 R'_1 , R'_2 , 设天线 A 发射的信号为: $s(t) = a(t) \exp(j(2\pi ft + \varphi_0))$ 经过点目标 P 的反射后, A 和 B 天线接收到的信号分别为

$$s_A(t) = a(t) \exp\{j[2\pi f(t - 2R_1/c) + \varphi_0]\} \tag{5}$$

$$s_B(t) = a(t) \exp\{j[2\pi f\{t - (R_1 + R_2)/c\} + \varphi'_0]\} \tag{6}$$

这里, 两天线的初相不可能完全一致, 初相差为 $\Delta\varphi'_0$, 二者做相参(干涉)处理后为

$$s_B(t)s_A^*(t) = a^2(t) \exp\{j2\pi f[(R_1 - R_2)/c] + \Delta\varphi'_0\} \tag{7}$$

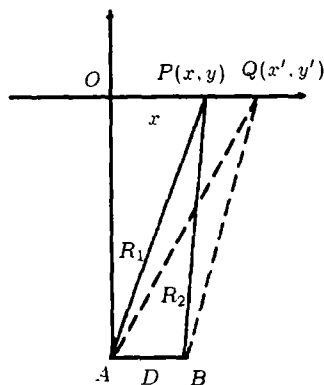


图 3 天线目标简单几何关系

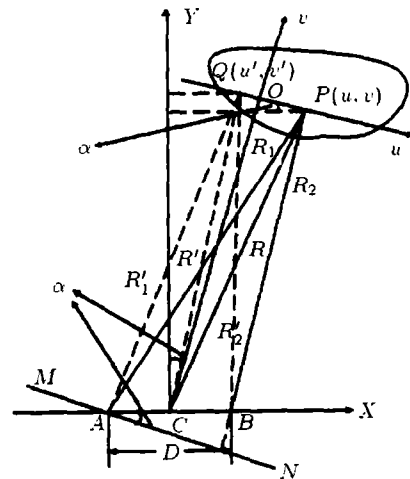


图 4 天线与目标空间一般位置

根据图 3 有 $R_1^2 - x^2 = R_2^2 - (x - D)^2$, 即

$$R_1 - R_2 = (2xD - D^2)/(R_1 + R_2) \tag{8}$$

则

$$s_B(t)s_A^*(t) = a^2(t) \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2xD - D^2}{R_1 + R_2} + \Delta\varphi'_0) \quad (9)$$

当 $R_1 + R_2 \gg D$ 而且 $R_1 + R_2 \gg x$ 时, 有 $R_1 + R_2 \approx 2R$, 则对任意一点 P , AB 干涉相位差为

$$\Delta\varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2xD - D^2}{R_1 + R_2} + \Delta\varphi'_0 \quad (10)$$

对 P 点有 $x = [(\Delta\varphi_p - \Delta\varphi'_0)\lambda(R_1 + R_2) + 2\pi D^2]/(4\pi D)$, 同理对 Q 点有 $x' = [(\Delta\varphi_q - \Delta\varphi'_0)\lambda(R'_1 + R'_2) + 2\pi D^2]/(4\pi D)$, (在此初相差被抵消)。

从 (10) 式也可看出, D 的取值也不能太小, 否则 $\Delta\varphi$ 误差变大, 横向测距精度变差。反之, D 太大, 由此造成两信号的相干性降低, 在两个一维距离像上难以找到对应的两个散射点。我们知道, 由于相位差以 2π 为周期, 若要求 x 及 x' 测距无模糊, 则对 $\Delta\varphi_p$ 和 $\Delta\varphi_q$ 要求无模糊, 即 $|\Delta\varphi| < \pi$ 则有 $|x|_{\max} = [\lambda(R_1 + R_2) + 2D^2]/(4D)$, 以 $\lambda = 0.15\text{m}$, $R = 10\text{km}$, $D = 10\text{m}$ 为例, 要求 $|x|_{\max} \leq 80\text{m}$, 显然条件较苛刻, 但为了进行目标定标来讲, 只需求出目标上两特显点间的横向距离 (在实际应用中, $R'_1 = R_1, R_2 = R'_2$), 即

$$x - x' = [(\Delta\varphi_p - \Delta\varphi_q)\lambda/(4\pi D)](R_1 + R_2) \quad (11)$$

尽管 $\Delta\varphi_p$ 和 $\Delta\varphi_q$ 有可能发生模糊, 但 $|(\Delta\varphi_p - \Delta\varphi_q)|$ 不应超过 π , 因为对于 ISAR 研究对象, 一般空中飞行目标横距小于 100m , 即不会发生模糊, 即使若 $|(\Delta\varphi_p - \Delta\varphi_q)|$ 超过 π , 通过加上或减去 2π , 调整到 $[-\pi, \pi]$ 之间, 同样我们还可以采用第三个天线进行解模糊, 在此不作详细讨论, 我们另文讨论。

3 横向距离定标算法

当然实际情况, 基线 AB 不一定与雷达射线垂直, 推广到一般情况, 如图 4 所示, $u-v$ 直角坐标系为雷达观测坐标系, v 轴为雷达射线方向, u 轴为射线的法线方向, 即目标横向一维距离像所在直线, 令它以 AB 的中点 C 为原点, AB 连线为 x 轴, $P(u, v)$ 为目标上一散射点, P 到 A 天线距离为 R_1 , P 到 B 天线距离为 R_2 , P 到 C 点距离为 R 。 $Q(u', v')$ 为目标上另一散射点, 对应参数分别为 R'_1, R'_2 和 R' , 根据两坐标系关系, 图中 α 为雷达射线与两个天线连线的法平面的夹角, 即目标横向一维像与 x 轴的夹角, 假设方位角为 β (正北为 0°), 高低角为 γ , 则有 $\sin \alpha = \sin \beta \cos \gamma$, 也可求得 $\cos \alpha$ 。

天线 A 发射的信号经过目标上点 P 的反射后, A 和 B 天线接收到的信号分别为 $S_A(t)$ 及 $S_B(t)$, 与前面推导类似, 二者做相参 (干涉) 处理后相位差 $\Delta\varphi_p$ 仍为 $2\pi f(R_1 - R_2)/c$, (初相差在横距定标时将被抵消, 所以在此可以不考虑初相差)。

根据图 4 有 $R_1^2 - (u + (D/2) \cos \alpha)^2 = (R_2 + D \sin \alpha)^2 - (u - (D/2) \cos \alpha)^2$ 即

$$R_1 - R_2 = \frac{2R_2 D \sin \alpha + D^2 \sin^2 \alpha + 2Du \cos \alpha}{R_1 + R_2} \quad (12)$$

则

$$\Delta\varphi_p = \frac{2\pi 2R_2 D \sin \alpha + D^2 \sin^2 \alpha + 2Du \cos \alpha}{\lambda (R_1 + R_2)} \quad (13)$$

于是 P 点横距 $u = [\Delta\varphi_p \lambda (R_1 + R_2) / (4\pi D \cos \alpha)] - [(2R_2 \sin \alpha + D \sin^2 \alpha) / (2 \cos \alpha)]$, 同理对 Q 点有 $u' = [\Delta\varphi_q \lambda (R_1' + R_2') / (4\pi D \cos \alpha)] - [(2R_2' \sin \alpha + D \sin^2 \alpha) / (2 \cos \alpha)]$ 。即

$$u - u' = \frac{(\Delta\varphi_p - \Delta\varphi_q) \lambda}{4\pi D \cos \alpha} (R_1 + R_2) \quad (14)$$

(14) 式即为一般情况下的定标公式。

4 目标一维横向距离像获取

通过 ISAR 技术得到的横向像, 是基于目标是平稳飞行的, 目标相对于雷达的转动主要是偏航 (yaw), 它的运动是在一个平面上, 目标的转轴在观测期间是固定不变的, 此时的等效的合成阵列是二维的圆弧状。当目标作机动飞行时, 即同时伴有侧摆 (roll) 和俯仰 (pitch), 目标的转轴发生了变化, 所成的横向像会与“目视”结果发生大的差别, 等效的合成阵列是三维的不规则形状, 相干积累期间成像的平面是变化的, 不同时刻的横向距离因子也是变化的^[6,7]。而基于 DFT 的多普勒功率谱的一维横向像, 相当于沿时频平面 Wigner-Ville 分布沿平行与水平时间轴的直线做边沿积分, 这对匀速旋转的平稳飞行目标显然是合适的, 即在有限的相干时间内, 转动目标上任意一个散射点的子回波的相位差是和横距成正比的。但是对于飞机一类目标, 即使做匀速直线运动, 它相对于雷达的视线的变化也近似是等加速的, 当成像要求不高时, 可近似成为匀速旋转, 但是对于非匀速 (加速或减速飞行) 运动目标, 则不能做此近似。图 5 是一个做匀加速直线运动仿真目标的 DFT 一维横向距离像, 它的时频分布图见图 6, 显然, 该目标的运动相对于转轴为非匀速转动。而对于像如图 6 所示的非平稳的斜直线时频分布, 对于目标上的对应点的多普勒单元, 在整个相干积累时间是时变的, 即会发生多普勒走动, 正如前面所述, 对于非平稳过程, 不同时刻的切片的图像是不一样的, 目标在不同时刻的横向距离像的尺寸是变化的, 如果仍采用这种多普勒分析方法, 将使一个散射点在横向多普勒维扩展为一片, 那么直接用 DFT 得到的一维距离像就难以清楚地分离出两个特显点, 因而无法进行横向定标。尽管如此, 但是, 各个散射点对一定时刻, 成像投影平面是确定的, 散射点在该时刻的横距与瞬时多普勒的值成正比, 显然通过增加一个天线对两个天线的一维瞬时横向距离项进行比相, 可以确定目标任一瞬时的横距。

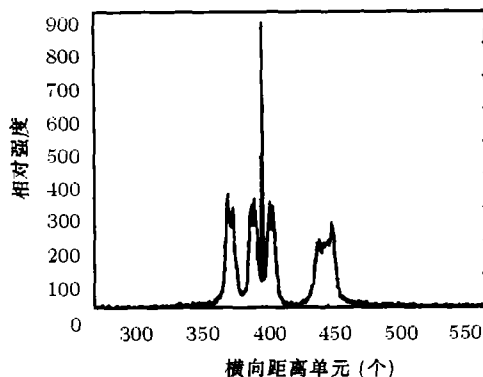


图 5 一维横向距离像

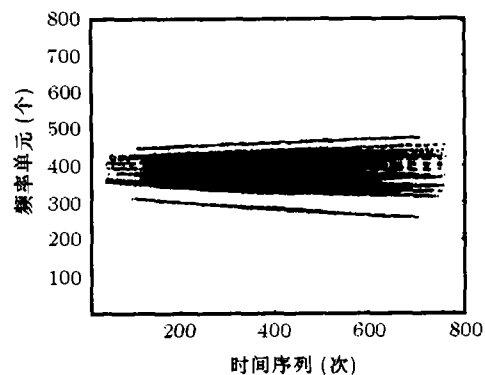


图 6 回波的时频分布图

对运动目标定标应该取不同时刻的切片即目标的横向一维瞬时像图像进行横向定标。但是, 直接对信号的 WVD 取瞬时切片也是行不通的, 因为多分量信号的 WVD 存在严重的交叉项, 它成为切片信号中的虚假信号, 使得横向距离像的分辨率也降低。如果在 WVD 的时频平面里, 各散射点的子回波的分布近似为各种斜直线, 要对某时刻 t 成像, 只需知道此时刻各散射点的瞬时多普勒分布, 但是, 瞬时多普勒频率的分辨率和相干积累的时间长度有关, 我们仍然需要对一段回波数据进行相干积累。对飞机一类目标, 由于机械惯性较大, 雷达回波的时频变化不会十分剧烈, 在以秒计的短时间里, 常可用直线近似, 因此可以在时频平面中沿着各散射点的斜直线求积分。这样就可对各散射点的回波能实现有效的相干积累。从原理上讲, 检测各直线分量可以用 Radon-Wigner 变换, 并采用一定的门限消除交叉分量和杂散分量, 然后重构为一组不同参数的线性调频信号, 但计算比较复杂。实际计算中, 我们采用解线调 (dechirping) 并结合“洁净” (clean) 算法^[8]来计算 Radon-Wigner 变换, 因为 dechirping 加上 FFT 与 Radon-Wigner 变换是等效的^[3]。

假设信号 $s(t) = u(t) + n(t)$, 假设它为单分量, 即 $u_1(t) = a_1 \exp[j(\omega_{01}t + (1/2)m_1t^2)]$, 将信号 $s(t)$ 乘以 $\exp(-jmt^2/2)$, m 以不同的值进行搜索, 并做傅氏变换, 得到信号解调频后的频谱幅值为

$$|F(m, \omega)| = \left| \int s(t) \exp[-j(\omega t + mt^2/2)] dt \right| \quad (15)$$

当 dechirping 的 m 值等于信号的实际参数 m_1 时, (15) 式将得到在 $\omega = \omega_{01}$ 处为最强散射点 p_1 峰值的窄谱输出, 同时便估计出 m_1, ω_{01}, a_1 , 则

$$u_1(t) = a_1 \exp[j(\omega_{01}t + m_1t^2/2)] \quad (16)$$

按洁净法, 从总的信号 $s(t)$ 减去 $u_1(t)$, 得到剩余信号:

$$s^{(1)}(t) = s(t) - u_1(t) \quad (17)$$

然后再从 $s^{(1)}(t)$ 中按照 (15) 式求出次强点 p_2 的谱, 并同时便估计出 m_2, ω_{02}, a_2 , 重复上述步骤, 直至剩余的信号功率足够小 (一般取 $(1/20)|s(t)|^2$ 即可)。从而, 我们可以用估计出来的多个线性调频信号, 构造出目标的瞬时多普勒谱, 即目标的瞬时一维距离像。这样, 我们可以通过对 A 和 B 两个天线的一维横向瞬时距离像, 根据上面所述干涉 ISAR 的原理, 可以求出对应点的相位差, 实现横向定标。

5 仿真试验结果

如图 7 和 8 所示, 仿真目标由 5 个散射点组成, 由于目标的运动参数和尺寸是已知的, 所以我们用 A 和 B 两个天线得到的回波数据, 按照前文所述方法进行计算而得到的横向尺寸, 并与原仿真目标尺寸相比较, 便可验证本文方法的正确性。

目标初始运动速度方向与 x 轴夹角为 $\alpha = 10^\circ$, 在图 8 坐标系中, 天线 A 坐标为 $(-5, -10^{-3})$, 天线 B 坐标为 $(+5, -10^{-3})$, 即基线为 10m, 目标沿初始方向以 $v=150\text{m/s}$, $a=10\text{m/s}^2$ 飞行, 雷达波长 $\lambda=0.15\text{m}$, 重复频率为 100Hz, 脉冲宽度为 $0.8\mu\text{s}$ 。相干积累时间为 8s, 图 9 为目标最后时刻瞬时一维距离像, 显然横向分辨率也要比图 5 所示的 DFT 一维距离像要高, 可明显分出几个主要特显点, 通过对两天线 t 时刻一维距离像进行干涉, 采用上述方法可得到在 t 时刻的横向定标结果 (以最远两个点间距为例)。表 1 是第 1 个采样时刻, 中间采样时刻和最后采样时刻定标结果, 以转台成像观点理论分析, 以及仿真目标的运动规律, 很显然目标的横向一维距离像尺寸减小, 从表中实验数据也正验证了这一点。

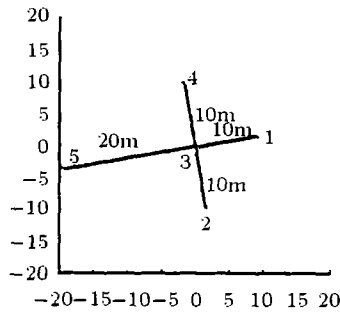


图 7 仿真目标散射点坐标

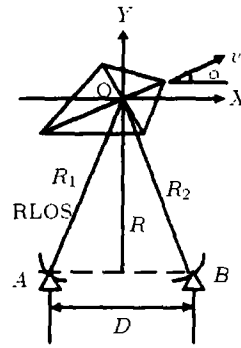


图 8 目标和雷达的空间位置

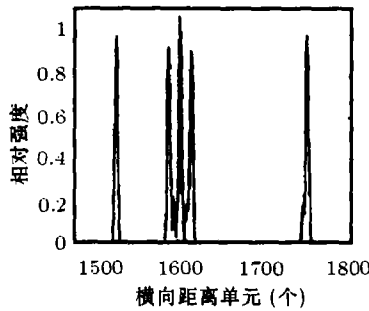


图 9 一维瞬时横向距离像

表 1 仿真目标定标结果

	第一次采样时刻	中间采样时刻	最后时刻
定标计算值 (m)	29.91	29.52	28.41
实际值 (m)	29.54	29.34	28.96

6 结 论

本文根据 ISAR 成像原理，采用水平放置的两个天线进行干涉的技术，给出了一种低分辨目标一维横向距离像定标的方法，根据理论分析和计算机仿真结果表明，该方法能够准确的进行横向距离定标。这对进一步进行目标识别提供了有效的依据。

参 考 文 献

- [1] C. C. Chen, H. C. Andrews, Target-motion-induced radar imaging, IEEE Trans. on AES 1980, AES-16(1), 2-14.
- [2] D. A. Ausherman, *et al.*, Developments in radar imaging, IEEE Trans. on AES 1984, AES-20(3), 363-398.
- [3] J. C. Wood, D. T. Barry, Radon transformation of time-frequency distribution for analysis of multicomponent signal, IEEE Trans. on SP, 42(11), 3166-3177.
- [4] D. R. Wehner, High Resolution Radar, Artech House, 1991, Chapter 6, 185-271.
- [5] R. Bamler, P. Hartl, Synthetic aperture radar interferometry, Inverse Problem 14, (1998) R1-R54. Printed in the UK.
- [6] R. P. Bocker, T. B. Henderson, S. A. Jones, A new inverse synthetic aperture radar algorithm for translational motion compensation, SPIE Vol. 1596, Stochastic and Neural Methods in Signal Processing, and Computer Vision (1991), 322-330.
- [7] 保铮, 王根原, 具有三维转动目标的逆合成孔径雷达成像算法, 西安电子科技大学学报, 1997, 24(6), 1-8.

- [8] W. Li, Wigner, Distribution method equivalent to dechirp method for detecting a chirp signal, IEEE Trans. on ASSP, 1987, 35, 1210-1211.

A NEW METHOD OF CROSS-RANGE SCALING OF LOW RESOLUTION RADAR

Jiang Zhenglin Bao Zheng

(National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Cross-range scaling of low-resolution radar is very important to obtain correctly cross-range image and target classification and recognition. According to the technology of inverse synthetic aperture radar(ISAR), the cross-range scale depends on both radar wavelength and rotating angle of target relative to radar-line-of-sight(RLOS) during the coherent accumulation. The former is known while the latter is difficult to determine especially in the case of ISAR. In this paper, a new approach is proposed which is based on the principle of synthetic array and interferometric inverse synthetic aperture. The phase difference of some scatters between two instant cross-range images by two antennae which are placed on one level, can be calculated. The proposed algorithm is applied to the emulational data of two antennae. The theoretical analysis and the processing results show that the proposed method is correct and effective.

Key words ISAR, Cross-range scaling, Coherent accumulation, Intereferometry

姜正林: 女, 1968 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向为雷达信号处理及计算机应用.

保 铮: 男, 1927 年生, 中科院院士, 电子学会会士, 博士生导师, 主要研究方向为阵列信号处理, 雷达信号处理.