

一种新的双基地 SAR 地面距离分辨率计算方法

蔡复青 何友 王捷 唐小明

(海军航空工程学院信息融合技术研究所 烟台 264001)

摘要: 该文针对双基地 SAR 地面距离分辨率计算方法问题, 分析了空间梯度的物理意义, 研究了回波延迟时间的空间梯度随时间变化的性质, 完善了一种新的基于空间梯度的双基地合成孔径雷达距离分辨率计算方法, 该算法更具有普遍适用性。仿真验证了算法的正确性, 并提出了基于距离分辨率动态优化的双基地 SAR 航路规划方法。

关键词: 双基地合成孔径雷达; 距离分辨率; 空间梯度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2065-04

A New Approach to Bi-SAR Range Resolution in the Ground Plane

Cai Fu-qing He You Wang Jie Tang Xiao-ming

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: In this paper, a new approach to bi-static SAR range resolution in ground plane, based on special gradient of transit time, is developed. This new approach has more adaptability. The physical meaning of special gradient is analyzed and its temporal changing property is also researched. Detailed simulations test the validity of the approach and some methods for Bi-SAR trajectory planning, dynamically optimized based on range resolution, are provided at the end of the paper.

Key words: Bi-static Synthetic Aperture Radar (Bi-SAR); Range resolution; Spatial gradient

1 引言

衡量双基地 SAR 性能的一个重要指标是它对观测区域的地面距离分辨率(文中统称地距分辨率)。文献[1]对双基地 SAR 地距分辨能力进行了研究, 得到了地距分辨率与方位角度和斜距增量的关系式, 并且得出了仿真结果, 但该关系式是隐含式, 不易看出地距分辨率与斜距增量和方位角的关系。文献[2]的研究表明延迟时间的空间梯度矢量可以很好地用于研究地距分辨率这一问题, 并且证明了地距分辨率和延迟时间的空间梯度之间的关系, 但是在证明的过程中作者没有考虑观测矢量随时间变化这一因素, 只适用于观测点延迟时间的空间梯度不随时间变化的特殊情况。文献[3]引入梯度的慢时间变化量, 使文献[2]的方法更具有普遍适用性。本文采用这一思想, 推导了距离分辨率计算公式, 并且通过详细的仿真验证了算法的正确性。

本文第2节论述了利用空间梯度矢量进行地距分辨率研究的理论基础, 第3节讨论了双基地 SAR 的地距分辨率和时间梯度的关系, 第4节给出了利用该算法得出的仿真结果, 最后是结束语。

2 梯度的物理意义

在物理学中, 由等高线的概念引出了梯度的定义, 在地

面某一点的梯度方向表示高度在这一点增长最快的方向, 梯度的模就是沿着这一方向的高度变化率, 梯度大的地方坡度越陡。

梯度的严格数学定义是: 若函数 $f(x, y, z)$ 在点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 存在对所有自变量的偏导数, 则称矢量 $(f_x(P_0), f_y(P_0), f_z(P_0))$ 为函数 $f(x, y, z)$ 在 P_0 点的梯度, 记为 $\mathbf{grad}f(P_0)$, 其中 $f_x(P_0)$ 、 $f_y(P_0)$ 、 $f_z(P_0)$ 分别表示 $f(x, y, z)$ 在 P_0 点 x 、 y 、 z 方向的偏导数。梯度和方向导数 $f_l(P_0)$ 的关系为: $f_l(P_0) = \mathbf{grad}f(P_0) \cdot \mathbf{l}_0 = |\mathbf{grad}f(P_0)| \cos(\theta)$, 这里 θ 是梯度矢量 $\mathbf{grad}f(P_0)$ 与 \mathbf{l}_0 的夹角。因此当 $\theta = 0$ 的时候方向导数 $f_l(P_0)$ 取得最大值 $|\mathbf{grad}f(P_0)|$, 也就是说 f 在 P_0 的梯度方向是 f 的值增长最快的方向, 且沿这个方向的变化率就是梯度的模。

在单脉冲体制合成孔径雷达系统中, 脉冲信号以重复周期 T 依次发射, 发射时刻 $t_m = mT (m = 0, 1, 2, \dots)$, 称为慢时间, 以发射时刻为起点的时间用 \hat{t} 表示, 称为快时间^[3]。回波延迟时间是目标点 $\mathbf{r}(x_0, y_0, z_0)$ 到发射机和接收机距离和的函数, 并且由于发射机和接收机都是运动的, 回波延迟时间也是发射时刻 t_m 的函数: $\hat{t}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{|R_1(t_m, \mathbf{r})| + |R_2(t_m, \mathbf{r})|}{c}$,

因此求回波延迟时间对三维坐标的偏导就可以得到某一发射时刻回波延迟时间的空间梯度。空间梯度的方向就表示在某一时刻, 观测点的回波延迟时间变化最快的方向, 梯度的模值表示这一时刻单位距离上时间延迟的变化量。对于不同

2007-01-31 收到, 2007-07-05 改回

国家自然科学基金(60172033), 全国优秀博士论文作者专项基金(2000036, 200237)和高校骨干教师基金资助项目

的发射时刻, 由于发射机、接收机及目标点的空间几何关系的变化, 回波延迟时间的空间梯度值也是不同的。

雷达的时间分辨率和距离分辨率存在着直接的关系^[2]。雷达的时间分辨率是信号带宽 B 的倒数, $1/B$ 表示雷达可以区分的最小时间延迟间隔, 如果某一点的空间梯度值为 \mathbf{K} , 就表示在 \mathbf{K} 方向的回波延迟时间变化率为 $|\mathbf{K}|$ (s/m), 那么在该点雷达可以获得的最大距离分辨率就是 $\frac{1}{B|\mathbf{K}|}$ (m)。

3 地距分辨率

问题中涉及到的矢量如图 1 中所示。 \mathbf{P}_{01} 和 \mathbf{P}_{02} 是发射机和接收机的位置矢量, \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 是发射机和接收机的速度矢量, \mathbf{r} 代表地面点目标的位置矢量。

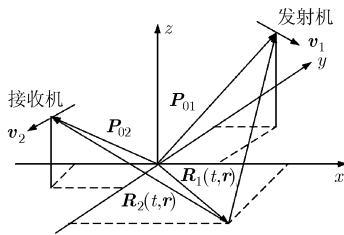


图1 双基地 SAR 空间几何关系

发射机的起始位置在 $\mathbf{P}_{01} = (x_{01}, y_{01}, z_{01})$, 接收机的起始位置在 $\mathbf{P}_{02} = (x_{02}, y_{02}, z_{02})$, 目标点的位置矢量是 $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 。目标点到发射机和接收机的距离矢量为 $\mathbf{R}_1(t, \mathbf{r}) = (\mathbf{P}_{01} - \mathbf{r}) + \mathbf{v}_1 t$ 和 $\mathbf{R}_2(t, \mathbf{r}) = (\mathbf{P}_{02} - \mathbf{r}) + \mathbf{v}_2 t$, 假如在 t 时刻位于 \mathbf{P}_1 的发射机发射的脉冲经过目标点 \mathbf{r} 反射, 返回位于 \mathbf{P}_2 的接收机, 那么延迟时间为

$$\hat{t}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{|\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})| + |\mathbf{R}_2(t_m, \mathbf{r})|}{c} \quad (1)$$

其中

$$|\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})| = \sqrt{\mathbf{R}_1^T \mathbf{R}_1} = \sqrt{[(\mathbf{P}_{01} - \mathbf{r}) + \mathbf{v}_1 t_m]^T [(\mathbf{P}_{01} - \mathbf{r}) + \mathbf{v}_1 t_m]} \quad (2)$$

$$|\mathbf{R}_2(t_m, \mathbf{r})| = \sqrt{\mathbf{R}_2^T \mathbf{R}_2} = \sqrt{[(\mathbf{P}_{02} - \mathbf{r}) + \mathbf{v}_2 t_m]^T [(\mathbf{P}_{02} - \mathbf{r}) + \mathbf{v}_2 t_m]} \quad (3)$$

根据矢量求导定理, 在 t_m 时刻, 双基地雷达在 \mathbf{r} 附近目标点回波延迟时间的空间梯度可以表示为

$$\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r}) = \left[\frac{\partial \hat{t}(t_m, \mathbf{r})}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \hat{t}(t_m, \mathbf{r})}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \hat{t}(t_m, \mathbf{r})}{\partial z} \mathbf{k} \right] \quad (4)$$

由于 $\frac{\partial \mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\partial x} = \frac{(x_{01} - x) + \mathbf{v}_{1x} t_m}{\|\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})\|}$, $\frac{\partial \mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\partial y} = \frac{(y_{01} - y) + \mathbf{v}_{1y} t_m}{\|\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})\|}$, $\frac{\partial \mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\partial z} = \frac{(z_{01} - z) + \mathbf{v}_{1z} t_m}{\|\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})\|}$ 分别表示

$\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})$ 方向的单位矢量在 x , y , z 轴的分量, \mathbf{v}_{1x} , \mathbf{v}_{1y} , \mathbf{v}_{1z} 是 \mathbf{v}_1 在 x , y , z 方向的速度分量。

因此:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\partial z} \mathbf{k} \\ &= \frac{\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})}{\|\mathbf{R}_1(t_m, \mathbf{r})\|} = \mathbf{i}_{R1}(t_m, \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (5)$$

$\mathbf{i}_{R1}(t_m, \mathbf{r})$ 表示在 t_m 时刻从目标点 \mathbf{r} 到达发射机的单位方向矢量。该结论对于 $\mathbf{R}_2(t_m, \mathbf{r})$ 同样成立。因此, 式(4)可化简为

$$\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} [\mathbf{i}_{R1}(t_m, \mathbf{r}) + \mathbf{i}_{R2}(t_m, \mathbf{r})] \quad (6)$$

$\mathbf{i}_{R1}(t_m, \mathbf{r})$ 和 $\mathbf{i}_{R2}(t_m, \mathbf{r})$ 分别表示在 t_m 时刻从目标点 \mathbf{r} 到达发射机和接收机的单位矢量。

式(6)就是延迟时间的空间梯度的表达式, 它表明了观测点 \mathbf{r} 附近, 在梯度方向上单位距离变化量可以引起的目标回波延迟时间的变化量, 梯度方向上是回波延迟时间变化最快的方向。

从式(6)可以看到, 回波延迟时间的空间梯度的大小和目标到发射机和接收机的距离没有关系, 只和双基地角的大小有关系, 空间梯度的方向是双基地夹角角平分线的方向, 因此双基地角平分线的方向就是双基地 SAR 距离分辨率最大的方向。

假如在某一方向上, 有单位距离变化量 $d\mathbf{r}$, 目标回波的延迟时间变化量为

$$d\hat{t} = d\mathbf{r} \nabla \hat{t}(t, \mathbf{r}) \quad (7)$$

当 $d\mathbf{r}$ 与 $\nabla \hat{t}$ 方向一致时, 回波延迟时间变化量 $d\hat{t}$ 最大。延迟时间的空间梯度的物理意义是: 它代表了时间延迟变化最快的方向。

由于接收机对时间的最小分辨率与信号带宽 B 成反比, 即, 最小可分辨的时间单元为 $1/B$, 那么在 t_m 时刻, 双基地 SAR 对目标的最小可分辨距离就是:

$$r_a = \frac{1/B}{|\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r})|} \mathbf{i}_t(t_m, \mathbf{r}) \quad (8)$$

这里 r_a 就是双基地 SAR 的距离分辨率, $\mathbf{i}_t(t_m, \mathbf{r})$ 表示 $\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r})$ 方向上的单位矢量。

从式(8)可以看到, 空间梯度的模值越大, 也就是目标到发射机和接收机的单位距离矢量的和值越大, 双基地 SAR 所能获得的距离分辨率越好。

双基地 SAR 对测绘区域中目标点的地面距离分辨率 $\nabla t_G(t, \mathbf{r})$ 与空间梯度在地面的投影有关。

$$r_{aG} = \frac{1/B}{|\nabla t_G(t_m, \mathbf{r})|} \mathbf{i}_{tG}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{1/B}{|\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r}) \cos(\theta)|} \mathbf{i}_{tG}(t_m, \mathbf{r}) \quad (9)$$

$\mathbf{i}_{tG}(t_m, \mathbf{r})$ 为延迟时间的空间梯度在地面投影的单位矢量。 θ 为梯度与其在地面投影矢量的夹角, 夹角越小, 地距分辨率也越接近斜距分辨率, 但地距分辨率不会好于斜距分辨率。

单基地雷达为双基地雷达的特例, 因此双基地雷达的地距分辨率公式也适用于单基地 SAR 这一特殊情况。

$$\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} [\mathbf{i}_{R1}(t_m, \mathbf{r}) + \mathbf{i}_{R2}(t_m, \mathbf{r})] = \frac{2\mathbf{i}_R(t_m, \mathbf{r})}{c} \quad (10)$$

$$r_a = \frac{1/B}{|\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r})|} \mathbf{i}_t(t_m, \mathbf{r}) = \frac{2c}{B} \mathbf{i}_R(t_m, \mathbf{r}), \text{ 其模值是 } \frac{2c}{B}$$

方向为从飞机指向目标方向。其分辨力的大小不变,但方向随着波束的指向而变化。

在双基地 SAR 的基线延长线方向上,时间的空间梯度与地面投影的夹角为发射机和接收机俯仰角之和的一半 $(\theta = \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2})$, 因此对于单基地雷达其地距分辨率为

$$r_{aG} = \frac{1/B}{|\nabla \hat{t}_G(t_m, \mathbf{r})|} \hat{\mathbf{i}}_{iG}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{1/B}{|\nabla \hat{t}(t_m, \mathbf{r}) \sin(\theta)|} \hat{\mathbf{i}}_{iG}(t_m, \mathbf{r}) = \frac{2c}{B} \hat{\mathbf{i}}_{iG}(t_m, \mathbf{r}), \theta \text{ 为天线的下视角。这一结论与单基地 SAR 中的研究结论是一致的。}$$

4 仿真结果

下面通过计算机仿真,对公式进行验证,得到了观测区域的等地距分辨率曲线。观测区域是 $80 \times 80\text{km}$, 雷达信号带宽 $B = 50\text{MHz}$ 。

情况 1 图 2(a)发射机在 1000km 高度轨道上运行,运行速度为 8000m/s , 速度为 y 方向,接收机距离地面 10km 的高度上,速度是 200m/s , 速度为 y 方向,在 $t = 0\text{s}$ 时刻,发射机和接收机的坐标位置是 $(-80\text{km}, 0, 100\text{km})$ 和 $(0, 0, 10\text{km})$ 。图 2(b)是在时间 $t = 5\text{s}$ 时得到的仿真结果。图中箭头方向为梯度矢量方向。

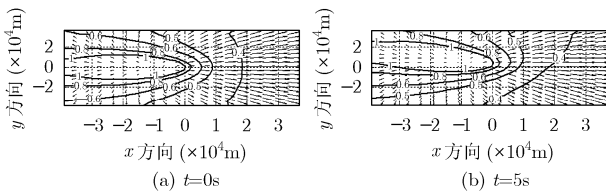


图 2 不同时刻的等地距分辨率线 (m)

由图 2 可以看出,地距分辨率的极限值为 $2c/B = 0.4\text{m}$, 在离雷达相位中心越远的地方,目标到发射机和接收机的单位矢量的方向和在地面的投影越大,地距分辨率和距离分辨率越接近,但是最大地距分辨率不会超过 $2c/B$ 。

在整个合成孔径期间,由于发射机和接收机都是运动的,因此目标到发射机和接收机之间的单位矢量随时间变化,因此地距分辨率也是随时间变化的。

时间梯度在整个合成孔径期间的均值可以用其对时间的积分表示:

$$\nabla \hat{t}(\mathbf{r}) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{c} [\hat{\mathbf{i}}_{R1}(t, \mathbf{r}) + \hat{\mathbf{i}}_{R2}(t, \mathbf{r})] dt \quad (11)$$

t_1 和 t_2 是目标 \mathbf{r} 的合成孔径时间的起始和终止时刻, $T = t_2 - t_1$ 。

由图 2 还可以看出,即使在发射机和接收机速度差异较大的情况下,在目标的合成孔径时间内,目标相对于发射机和接收机的角度变化也很小,因此 $\nabla \hat{t}$ 的模值和方向变化量不大,而且以合成孔径的中间时刻成对称关系,可以近似认

为是定值。另外,在离雷达相位中心比较远的地方,地距分辨率变化较小,可认为是恒定的。

通常情况下,目标相对于发射机和接收机的角度变化不大,在离相位中心较远的地带,可以用合成孔径的中间时刻的回波延迟时间的空间梯度值代替均值,以简化分析的复杂度。

情况 2 图 3(a)表示在某一时刻($t=0$)发射机和接收机同速等高度飞行时的等地距分辨率曲线,此时发射机的坐标位置为 $(-20\text{km}, 0\text{km})$, 高度 10km , 接收机坐标位置为 $(20\text{km}, 0\text{km})$, 飞行高度和飞行速度与发射机相同,图 3(b)中,发射机和接收机交换位置,飞行高度和速度不变。

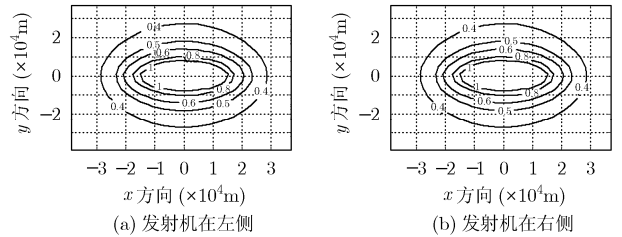


图 3 发射机与接收机等高度时的等地距分辨率线 (m)

仿真结果表明:在基线延长线上的地距分辨率要好于其它方向,但是基线上的地距分辨率极差;在情况 2 条件下,如果其它条件不变,接收机或者发射机位置互换对地距分辨率不产生影响。

对接收机和发射机基线上的地带,距离分辨率极差,因此,在对发射机和接收机在观测带两侧飞行的空间配置模型中,雷达天线要进行斜侧视照射才能进行有效的观测。

情况 3 图 4(a)表示在某一时刻($t=0$)的地距分辨率等高线,此时发射机的坐标位置为 $(-20\text{km}, 0\text{km})$, 高度 10km , 接收机坐标位置为 $(20\text{km}, 0\text{km})$, 高度 20km , 图 4(b)中,发射机和接收机的位置不变,只是飞行高度发生了变化,发射机飞行高度是 20km , 接收机飞行高度 10km 。

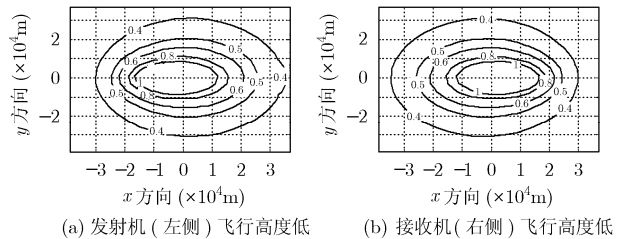


图 4 发射机与接收机高度不同时的等地距分辨率线 (m)

由图 4 中可以看出,在飞行高度低的一侧,等地距分辨率曲线比较集中,因此地距分辨率要好于低高度飞行的一侧。而在飞行高度比较高的一侧,等地距分辨率曲线比较分散,在离开雷达相位中心较远的地方才可以获得较好的地距分辨率。

5 结束语

利用延迟时间的空间梯度的概念可以很好地对双基地 SAR 的地距分辨率进行分析, 仿真结果验证了分析的正确性, 从仿真结果中可以得到如下结论, 这些结论对确定双基地 SAR 成像的航路规划有指导意义:

(1)在整个合成孔径期间, 地距分辨率分布是随飞行时刻变化的, 但是通常情况下, 地距分辨率分布变化较小, 可以认为在孔径合成期间是恒定的;

(2)在观测时刻, 某点所获得的地距分辨率只和该点与发射机和接收机的相对位置有关, 由式(9)可以计算出该点可以获得的地距分辨率;

(3)在飞行高度相同条件下, 基线两端延长线上所获得的地距分辨率是一样的, 因此通常应选择接收机一侧靠近测绘区域以增加隐蔽性;

(4)在飞行高度低的一侧, 地距分辨率要好于飞行高度高的一侧, 因此降低飞行高度可以提高地距分辨率;

(5)基线上的地距分辨率极差, 如果要对发射机和接收机的中间地带进行测绘, 双机应采取前侧视式或后侧视模式。

参考文献

- [1] 汤子跃, 林卫平, 张守融. 双站合成孔径雷达的距离分辨特性. 电子学报, 2003, 31(12): 2005-2008.
- Tang Zi-yue, Lin Wei-ping, and Zhang Shou-rong. The range resolution performance of bistatic synthetic aperture radar, *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 2005-2008.
- [2] Cardillo G P. On the use of the gradient to determine bistatic SAR resolution. In Proc. Of Int. Symp. Antennas and Propagation. Dallas, TX. 1990, Vol.2: 1032-1035.
- [3] Christoph H. Gierull Bistatic Synthetic Aperture Radar TIF-Report Technical Report DRDC Ottawa TR 2004-190 November 2004.
- [4] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术, 北京: 电子工业出版社, 2005, 4: 24.
- Bao Zheng, Xing Men-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique. Beijing, Publishing House of Electronics Industry. 2005, 4: 24-24
- 蔡复青: 男, 1974年生, 博士生, 工程师, 研究方向为合成孔径雷达成像算法研究.
- 何友: 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应检测方法、多传感器信息融合、多目标跟踪、雷达数据处理、分布检测理论及应用等.
- 王捷: 女, 1967年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理.
- 唐小明: 男, 1974年生, 副教授, 研究方向为双/多基地雷达无源定位技术.