

# 双站合成孔径雷达的距离分辨特性

汤子跃<sup>1,2</sup>, 林卫明<sup>2</sup>, 张守融<sup>3</sup>

(1. 空军雷达学院, 湖北武汉 430010; 2. 海军工程大学, 湖北武汉 430033; 3. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 该文从雷达方程出发, 研究了双站合成孔径雷达的信噪比关系和距离分辨特性, 并给出了计算机仿真结果.

**关键词:** 双站合成孔径雷达; 距离分辨力; 信噪比

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2005-04

## The Range Resolution Performance of Bistatic Synthetic Aperture Radar

TANG Zi-yue<sup>1,2</sup>, LIN Wei-ming<sup>2</sup>, ZHANG Shou-rong<sup>3</sup>

(1. Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

3. Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The performance of range resolution and signal-to-noise of the bistatic synthetic aperture radar is analyzed based on the radar range equation in this paper, and the results of computer simulation are presented.

**Key words:** bistatic synthetic aperture radar; range resolution; signal-to-noise ratio

### 1 引言

双站合成孔径雷达(Bistatic Synthetic Aperture Radar, 双站 SAR)是指发射系统和接收系统(含天线)安装在不同平台上的合成孔径雷达<sup>[1,2]</sup>. 由于收、发分置, 双站 SAR 一方面可以获取目标区域的多方向散射信息, 可以以较长的基线实现干涉 SAR(以获取高精度的高程信息或速度信息), 可以将接收平台作为无源系统进行军事(成像)侦察; 但另一方面, 双站 SAR 除了系统复杂度增加<sup>[2]</sup>之外(需要解决收、发系统间波束和信号的同步等问题<sup>[3]</sup>), 由于距离特性(通常采用目标至收发天线相位中心的距离和来描述)的不同, 其目标回波的信噪比关系以及距离分辨特性与有关常规 SAR 有较大差异.

本文将从雷达方程出发, 主要研究双站 SAR 的信噪比关系和距离分辨特性.

### 2 双站 SAR 的雷达方程

从普通双基地雷达方程<sup>[4]</sup>可以导出双站 SAR 关于点目标的理想信噪比-作用距离方程<sup>[2]</sup>为

$$(SNR)_0 = k_a \cdot \frac{P_{av} G_T G_R \lambda^3 \sigma(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)}{(4\pi)^3 k T F_n L R^2 R_{0a}^2 V_{Ra}} \quad (1)$$

式中 $(SNR)_0$ 为双站 SAR 信号处理的输出信噪比;  $k_a = k_r / [k_v^2 + k_r]$ 为与收、发平台位置和速度有关的系数, 其中,  $k_v = V_{Ta} / V_{Ra}$  ( $V_{Ra} \neq 0$ ),  $V_{Ra}$ 、 $V_{Ta}$ 分别为收、发平台的运动速度,  $k_r = R_T /$

$R_R$ ,  $R_R$ 、 $R_T$ 分别为目标至雷达收、发天线相位中心的距离;  $P_{av} = P_t \cdot (T_p \cdot PRF) = P_t \cdot R_p / T_r$ 为雷达发射信号的平均功率,  $P_t$ 为发射脉冲功率,  $T_p / T_r$ 为工作比;  $G_T$ 、 $G_R$ 分别为发射天线和接收天线的增益;  $\lambda$ 为雷达工作波长;  $k$ 为玻耳兹曼常数;  $T$ 为接收机的噪声温度;  $B$ 为接收机的噪声带宽;  $F_n$ 为接收机的噪声系数;  $L$ 为实际雷达系统在信号的发射、传输以及接收等过程中的损耗量;  $\sigma(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)$ 为目标的雷达等效散射截面积, 由于收发分置,  $\sigma(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)$ 除了与雷达工作波长、极化方式等因素有关以外, 通常还与波束入射方向 $(\theta_i, \phi_i)$ 和散射方向 $(\theta_s, \phi_s)$ 有关<sup>[9]</sup>.

### 3 双站 SAR 的距离特性

#### 3.1 等距离和方程

对于给定的收发天线相位中心, 所有到收发天线相位中心距离和相等的点的集合组成了双站 SAR 的等距离面, 为一个以收发天线相位中心  $X_R$ 、 $X_T$  为焦点的椭球面. 假设平坦地面(零高度), 发射平台高度为  $H_T$ , 接收平台高度为  $H_R$ , 以收发天线相位中心的连线在地面的投影线段的中心为原点, 以投影线为  $x$  轴, 在地平面内按右手法则建立直角坐标系, 如图 1 所示,  $X_R$ 、 $X_T$  的坐标分别为  $(l, 0, H_R)$  和  $(-l, 0, H_T)$ ,  $X_R$ 、 $X_T$  在地面上的投影点  $X'_R$ 、 $X'_T$  的坐标分别为  $(l, 0, 0)$  和  $(-l, 0, 0)$ , 其中  $l$  为  $X_R X_T$  连线在地面投影线段的半长度. 这样, 任意点  $(x, y, z)$  到  $X_R$ 、 $X_T$  的距离  $R_T$  和  $R_R$  可以分别表示为

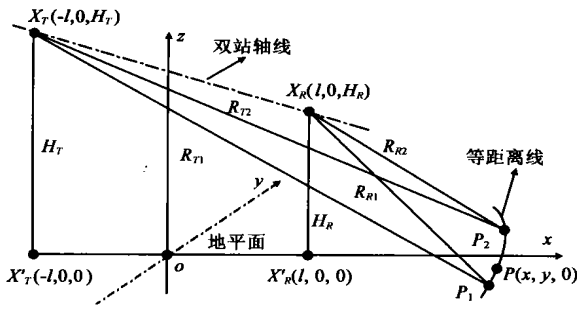


图 1 双站 SAR 等距离线

$$R_T = [(x+l)^2 + y^2 + (z-H_T)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$R_R = [(x-l)^2 + y^2 + (z+H_R)^2]^{1/2} \quad (3)$$

设  $R_T + R_R = 2a$ ,  $a$  为半距离和值, 则可以给出等距离椭球面的方程为

$$[(x+l)^2 + y^2 + (z-H_T)^2]^{1/2} + [(x-l)^2 + y^2 + (z+H_R)^2]^{1/2} = 2a \quad (4)$$

假设水平地面高度为 0 (即  $z=0$ ), 得到椭球与地平面的交线 (即等距离线) 方程为

$$[(x+l)^2 + y^2 + H_T^2]^{1/2} + [(x-l)^2 + y^2 + H_R^2]^{1/2} = 2a \quad (5)$$

将式(5)表示成标准的椭圆方程形式, 为:

$$\frac{(x+x_0)^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \quad (6)$$

式中,  $A$ 、 $B$  分别为椭圆的长短轴,  $x_0$  是偏移量:

$$x_0 = \frac{l(H_R^2 - H_T^2)}{4(a^2 - l^2)} \quad (7)$$

$$A^2 = \frac{a^2}{(a^2 - l^2)^2} \left\{ (a^2 - l^2)^2 - \frac{1}{2}(a^2 - l^2)(H_R^2 + H_T^2)^2 + \frac{1}{16}(H_R^2 - H_T^2)^2 \right\} \quad (8)$$

$$B^2 = \frac{1}{(a^2 - l^2)^2} \left\{ (a^2 - l^2)^2 - \frac{1}{2}(a^2 - l^2)(H_R^2 + H_T^2)^2 + \frac{1}{16}(H_R^2 - H_T^2)^2 \right\} \quad (9)$$

根据式(6), 图 2 给出了  $l=100\text{km}$ ,  $H_T=10\text{km}$ ,  $H_R=5\text{km}$ ,  $R_T + R_R = 2a = 250 \sim 400\text{km}$  时的一组等距离线, 相邻曲线对应

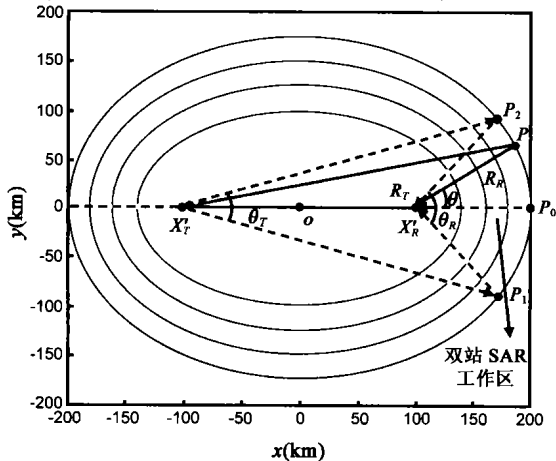


图 2 双站 SAR 等距离工作线

的距离和相差为 50km, 里边的椭圆对应的距离和近; 外面的椭圆对应的距离和远. 由里及外, 对应的偏移量  $x_0$  的值分别为  $-0.3333\text{km}$ ,  $-0.1500\text{km}$ ,  $-0.0909\text{km}$  和  $-0.0625\text{km}$ , 由于收发载机高度 ( $H_R, H_T$ ) 相对于距离和值 ( $R_T + R_R$ ) 较小, 所以, 偏移量  $x_0$  的值也很小. 图中,  $\theta_R$  表示接收波束在地面上投影宽度,  $\theta_T$  为发射波束在接收波束照射区域内的地面投影宽度. 从图 2 所示的双站 SAR 工作区内的曲线来看, 椭圆弧与圆弧接近, 这说明双站 SAR 受椭圆特性的影响较小.

### 3.2 等距离线上的信噪比变化

双站 SAR 的距离特性由目标到收、发天线相位中心之间的距离和 ( $R_T + R_R$ ) 决定, 而信号处理器的输出信噪比与目标距离之间的关系为  $(\text{SNR})_0 \propto (R_T^2 R_R)^{-1}$ , 这样, 由于 ( $R_T + R_R$ ) 值与  $R_T^2 R_R$  值不是一一对应, 在目标 ( $R_T + R_R$ ) 值一定的情况下, 由于  $R_T^2 R_R$  值的不同得到不同的  $(\text{SNR})_0$ . 例如, 图 2 中的  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  点处在等距离和线上, 它们的 ( $R_T + R_R$ ) 值相同, 但  $R_T^2 R_R$  值不同. 下面, 主要来研究在目标 ( $R_T + R_R$ ) 值一定, 由  $R_T^2 R_R$  值不同所引起的  $(\text{SNR})_0$  变化问题.

定义双站 SAR 目标的方位角为: 目标与接收机天线相位中心地面投影点的连线与收发天线相位中心连线在地面投影线 (即椭圆长轴) 间的夹角. 图 2 中  $P$  点对应的方位角为  $\theta$ , 其坐标  $(x, y)$  可以表示为

$$x = l + \sqrt{R_R^2 - H_R^2} \cos \theta \quad (10)$$

$$y = \sqrt{R_R^2 - H_R^2} \sin \theta \quad (11)$$

根据式(10)、(11), 可以求得点  $P$  到  $X_T$  的距离为

$$R_T = \left[ \left( \sqrt{R_R^2 - H_R^2} \cos \theta + 2l \right)^2 + \left( \sqrt{R_R^2 - H_R^2} \sin \theta \right)^2 + (H_T)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

由  $R_T + R_R = 2a$  的关系, 有

$$\left[ \left( \sqrt{R_R^2 - H_R^2} \cos \theta + 2l \right)^2 + \left( \sqrt{R_R^2 - H_R^2} \sin \theta \right)^2 + (H_T)^2 \right]^{1/2} + R_R = 2a \quad (13)$$

解式(13)、(12) 所给出的方程, 得

$$R_R = \frac{a[4(a^2 - l^2) - (H_T^2 - H_R^2)]}{4(a^2 - l^2 \cos^2 \theta)} - \frac{\sqrt{l^2 \cos^2 \theta [4(a^2 - l^2) - (H_T^2 - H_R^2)]^2 - 16H_R^2(a^2 - l^2 \cos^2 \theta)}}{4(a^2 - l^2 \cos^2 \theta)} \quad (14)$$

$$R_T = \frac{a[4(a^2 + l^2) + (H_T^2 - H_R^2) - 8l^2 \cos^2 \theta]}{4(a^2 - l^2 \cos^2 \theta)} + \frac{\sqrt{l^2 \cos^2 \theta [4(a^2 - l^2) - (H_T^2 - H_R^2)]^2 - 16H_R^2(a^2 - l^2 \cos^2 \theta)}}{4(a^2 - l^2 \cos^2 \theta)} \quad (15)$$

从而可以采用方位角  $\theta$  的函数  $R(\theta)$  来表征距离积  $R_T^2 R_R$ , 即

$$R(\theta) = R_T^2 R_R \quad (16)$$

因此, 可以有

$$(\text{SNR})_0 \propto (R(\theta))^{-1} \quad (17)$$

根据上述公式, 图 3 给出了  $l=100\text{km}$ ,  $H_T=10\text{km}$ ,  $H_R=$



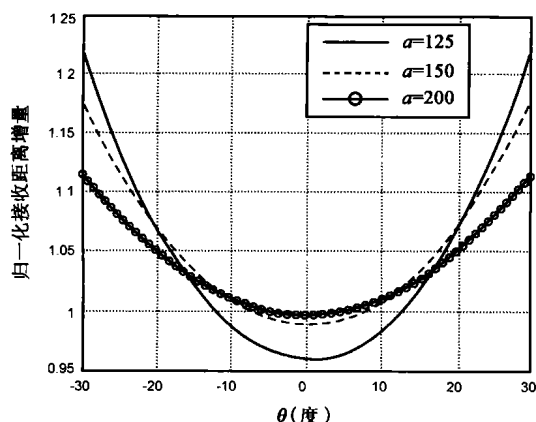


图6 接收距离增量随方位角的变化关系

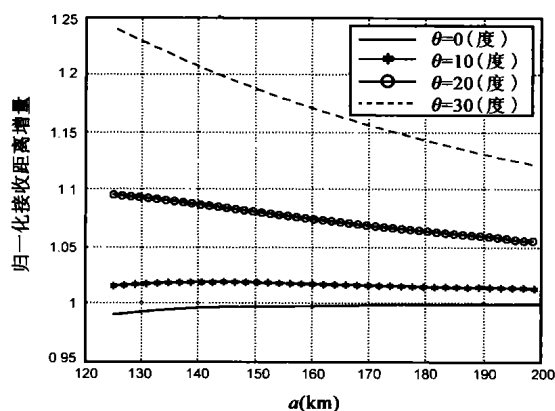


图7 接收距离增量随半距离和的变化曲线

从仿真结果可以看出, 双站 SAR 在 0 方位角附近, 信噪比和地距分辨力的相对变化较小; 而方位角较大时, 信噪比和地距分辨力均有所下降。

#### 4 结束语

由于收发分置, 双站 SAR 工作在非 0 方位角的情况是常见的, 实际目标方位角的大小主要取决于双站 SAR 平台的几何配置(含误差)和成像工作模式。在正侧视成像模式下, 由于收发载机在实际飞行中不可避免地存在前后位置误差(如图 4 中所示横向距离差  $\Delta x$ ), 使得收发天线相位中心在地面上

的投影连线与接收波束中心指向之间存在夹角, 即方位角  $\theta$ ; 在斜视成像模式下<sup>[2]</sup>, 收发波束中心指向与双基地轴线在地面的投影存在着明显的夹角, 非 0 方位角的情况自然更为突出。

实际中, 可以利用本文的方法, 根据双站 SAR 系统的工作参数, 来对目标信噪比的变化和地距分辨问题进行具体分析。

#### 参考文献:

- [1] Caputi Jr. Bistatic imaging radar processing for independent transmitter and receiver flight paths[P]. US Patent: 4, 325, 065, April 13, 1982.
- [2] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 6.
- [3] 汤子跃, 张守融. 双站 SAR 收发系统频率源稳定性要求[A]. 第八届全国雷达年会论文集[C]. 安徽合肥: 中国电子学会, 2002. 11. 550~ 553.
- [4] 杨振起, 等. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] C Oliver, Shaun Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. USA: Artech House, 1998.
- [6] G T Ruck, et al. Radar Cross Section Handbook[M]. New York: Plenum Press, 1970.
- [7] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 11.

#### 作者简介:



汤子跃 男, 1966 年 10 月生于浙江湖州, 博士, 副教授, 1990 年于空军雷达学院获硕士学位, 2000 年于海军工程大学获博士学位, 2001 年 2 月至 2003 年 4 月于中科院电子所进行博士后流动, 主要从事雷达系统、雷达信号处理、SAR 成像及信息处理等领域的研究。

林卫明 男, 1968 年 8 月生于浙江台州, 博士生, 1999 年于武汉理工大学获硕士学位, 主要从事 SAR 成像及信息处理等领域的研究。

张守融 男, 1942 年 11 月生于江苏无锡, 博士, 中科院电子所研究员, 博士生导师, 长期从事电磁散射、微波遥感和微波成像技术研究。