

## 双站 SAR 的海面速度聚束调制机理研究

余颖<sup>①②</sup> 王小青<sup>①</sup> 朱敏慧<sup>①</sup> 肖疆<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要:** 为了利用双站 SAR 对海洋进行研究, 首先必须正确理解双站 SAR 对海面成像的调制机理。而速度聚束调制是 SAR 所特有的调制机理。该文推导出平飞斜视情况下双站 SAR 图像平面中方位向强度变化表达式, 定量地描述了目标方位位置偏移量和方位向分辨率的下降程度。并在线性近似条件下, 求得双站 SAR 的线性速度聚束调制传递函数。通过仿真分析, 定性给出载机观测条件对双站 SAR 海浪线性成像范围大小的影响。

**关键词:** 双站 SAR; 海面; 速度聚束调制; 观测条件

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2840-04

## A Study on Bistatic SAR Velocity Bunching Modulation of Ocean Surface

Yu Ying<sup>①②</sup> Wang Xiao-qing<sup>①</sup> Zhu Min-hui<sup>①</sup> Xiao Jiang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to develop bistatic SAR ocean investigation, the first issue is the study of bistatic SAR ocean surface imaging mechanism. And velocity bunching mechanism is a SAR inherent modulation. Thus, the intensity expression in the bistatic SAR image plane is derived in this paper. The expression describes quantitatively the displacement of the scatter elements in the image plane and a degradation in radar resolution in azimuthal direction. In addition, a bistatic SAR linear velocity bunching transfer function is obtained in the linear parameter regime. Finally, this paper analyzes qualitatively the effects that various platform observation conditions have on the bistatic SAR linear imaging range of wave spectrum.

**Key words:** Bistatic SAR; Ocean surface; Velocity bunching modulation; Observation condition

### 1 引言

过去的几十年间, 合成孔径雷达(SAR) 在海洋遥感领域得到了大量成功的应用。由于技术水平的限制, 目前成熟的星载、机载SAR主要是单站SAR系统。但双站SAR与单站SAR相比可以获得更多海面散射角的信息, 从而反演出更准确的海流、海浪谱等信息<sup>[1]</sup>。因此, 双站SAR研究受到了越来越多的关注, 很多国家的研究人员提出了一些双/多站SAR卫星编队和组网的计划和方案, 如TechSAT21<sup>[2]</sup>, BISAT, Cartwheel<sup>[3]</sup>等。近年来国内的研究人员也开始致力于双站SAR理论、技术的研究<sup>[4-7]</sup>。其中, 速度聚束调制(velocity bunching)是SAR成像特有的调制机理, 正确理解速度聚束这种特殊而重要的调制机理可以为双站SAR海洋应用研究及系统设计提供理论基础。

本文首先推导出平飞斜视情况下双站 SAR 图像平面中方位向强度变化表达式, 它定量地描述了目标方位位置偏移量和方位向分辨率的下降程度。并且在线性近似条件下, 本文简化了方位向图像强度表达式, 求得双站 SAR 的线性速

度聚束调制传递函数。最后, 本文通过仿真分析了载机观测条件对双站 SAR 海浪线性成像范围大小的影响。

### 2 双站 SAR 速度聚束理论

如图 1 所示, 假设两平台平行飞行且飞行速度都为  $V$ 。发射机沿  $AM$  方向飞行, 接收机沿  $BN$  方向飞行,  $XOY$  平面为海平面。 $\alpha_t$ ,  $\alpha_r$  分别为发射、接收平台的斜视角;  $\theta_i$  和  $\theta_s$  分别为入射角和散射角。 $R_{tc}$ ,  $R_{rc}$  分别为发射、接收平台波束中心线指向目标时与该点目标  $P$  的距离。

对于实孔径雷达(RAR)来说, 海面成像调制机理只有截面调制。它主要能探测与雷达发射电磁波共振的海面布拉格

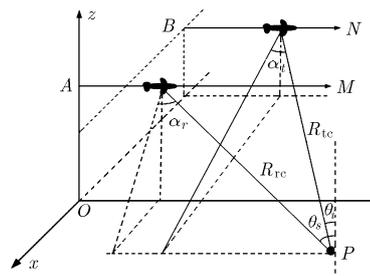


图1 双站 SAR 几何示意图

2007-08-29 收到, 2007-12-21 改回

国家自然科学基金(40706063)资助课题

波。根据图1的几何关系,布拉格波波数与雷达入、散射波波数有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} k_{bx} &= k \left( \sqrt{\sin^2 \theta_i - \sin^2 \alpha_t} + \sqrt{\sin^2 \theta_s - \sin^2 \alpha_r} \right) \\ k_{by} &= k (\sin \alpha_t + \sin \alpha_r) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $k_{bx}$ 、 $k_{by}$  为布拉格波在  $x$ 、 $y$  轴的分量;  $k$  为雷达发射、接收电磁波波数; SAR 除截面调制外,还有速度聚束调制,它是由海面长波的轨道运动引起的,而 SAR 正是通过这种长波运动来探测 RAR 不能探测的海波<sup>[8]</sup>。

假设海面有一运动的点目标  $P$ , 它的回波信号幅度为<sup>[9]</sup>

$$A(t, x_0) = \sqrt{\sigma} \exp[-j\phi(t, x_0)] \quad (2)$$

平飞斜视情况下,根据双站 SAR 的几何关系,回波相位可写为

$$\begin{aligned} \phi(t, x_0) &= \sum_{i=t,r} \left\{ k \left[ (R_{ic} - \Delta R_i(t, x_0))^2 + (Vt + R_{ic} \sin \alpha_i - x_0 - \Delta x_i(t, x_0))^2 - 2(R_{ic} - \Delta R_i(t, x_0))(Vt + R_{ic} \sin \alpha_i - x_0 - \Delta x_i(t, x_0)) \sin \alpha_i \right]^{1/2} \right\} \\ &\approx \sum_{i=t,r} k \left[ R_{ic} - \sin \alpha_i (Vt + R_{ic} \sin \alpha_i - x_0) + \frac{\cos^2 \alpha_i (Vt + R_{ic} \sin \alpha_i - x_0)^2}{2R_{ic}} \right] + \Delta\phi \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\Delta R_i(t, x_0)$  和  $\Delta x_i(t, x_0)$  分别为距离向、方位向海面长波运动产生的目标位移,  $i = t, r$ ;  $\Delta\phi$  为海面长波运动产生的相位差。

由一个单频海面大尺度波和表面流场运动引起的相位误差表示为

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= -\int_0^t \mathbf{k}_i(\mathbf{u}(t') + \mathbf{v}) dt' - \int_0^t \mathbf{k}_r(\mathbf{u}(t') + \mathbf{v}) dt' \\ &= k\xi_0 \left[ (m_1 \cos \varphi + n \sin \varphi) \sin(\mathbf{k}x_0 - wt + \delta) - m_2 \cos(\mathbf{k}x_0 - wt + \delta) \right] - k|\mathbf{v}|t(m_1 \cos \varphi_c + n \sin \varphi_c) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $m_1 = (\sin \alpha_t + \sin \alpha_r)$ ,  $m_2 = (\cos \theta_t + \cos \theta_s)$ ,  $n = \left( \sqrt{\sin^2 \theta_i - \sin^2 \alpha_t} + \sqrt{\sin^2 \theta_s - \sin^2 \alpha_r} \right)$ ,  $\mathbf{k}$ ,  $w$ ,  $\xi_0$  分别为单频长波的波数、角频率、波幅,根据流体波动理论,  $w = \sqrt{g|\mathbf{k}|}$ ,  $g$  为重力加速度;  $\mathbf{u}(t)$  为大尺度波轨道速度,  $\mathbf{v}$  为流场流速,  $\mathbf{k}_i$  和  $\mathbf{k}_r$  分别为入射、接收波数矢量  $|\mathbf{k}_i| = |\mathbf{k}_r| = k$ ;  $\varphi$ ,  $\varphi_c$  分别为发射(接收)平台飞行方向与长波、表面流场传播方向的夹角;  $\delta$  为某一固定相位。

用一个二阶多项式来近似海面长波运动产生的相位误差<sup>[9]</sup>:

$$\Delta\bar{\phi} = \varphi_0 - 2k \left( \bar{U}_r t + \frac{1}{2} \bar{A}_r t^2 \right) \quad (5)$$

$\varphi_0$  表示固定相位,  $\bar{U}_r$  表示估算的径向速度,  $\bar{A}_r$  表示估算的径向加速度。

假设  $(wT/2) \ll 1$ , 用最小平方误差估算:  $\min:$

$$\int_{-T/2}^{T/2} (\Delta\phi - \Delta\bar{\phi})^2 dt, \text{ 可得}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_r &= \frac{1}{2} \xi_0 w \left[ (m_1 \cos \varphi + n \sin \varphi) \cdot \cos(\mathbf{k}x_0) + m_2 \sin(\mathbf{k}x_0) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} |\mathbf{v}| (m_1 \cos \varphi_c + n \sin \varphi_c) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{A}_r = \frac{1}{2} \xi_0 w^2 \left[ (m_1 \cos \varphi + n \sin \varphi) \sin(\mathbf{k}x_0) - m_2 \cos(\mathbf{k}x_0) \right] \quad (7)$$

为了推导方便并不失一般性,假设发射、接收天线方位方向图均为高斯型方向图,那么图像平面的能量密度可以表示为

$$\begin{aligned} \left\langle |e(x, x_0)|^2 \right\rangle &= \frac{\pi}{2} T^2 \sigma \frac{\rho_a}{\rho'_a} \exp \left[ -\frac{(R_{tc} \sin \alpha_t - R_{tc} \sin \alpha_r)^2}{V^2 T^2} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[ -\frac{\pi^2}{\rho_a^2} \left( x - x_0 + \frac{(\cos^2 \alpha_t \sin \alpha_t + \cos^2 \alpha_r \sin \alpha_r) R_{tc} R_{rc}}{R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r} \bar{U}_r \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\rho_a = \frac{\lambda}{VT \left( \frac{\cos^2 \alpha_t}{R_{tc}} + \frac{\cos^2 \alpha_r}{R_{rc}} \right)}$ ,  $\rho'_a = \rho_a \left[ 1 + \frac{\pi^2 T^4 \bar{A}_r^2}{\lambda^2} + \frac{T^2}{\tau_s^2} \right]^{1/2}$ 。

$\rho'_a$  表示受长波运动影响的方位向分辨率,  $\tau_s$  为海面回波相关时间<sup>[10]</sup>, 由此可看出因长波运动会引起方位分辨率的下降,变化量与二次相位误差  $\bar{A}_r$  和相关时间  $\tau_s$  有关。

从式(8)来看,真实的方位位置  $x_0$  和图像平面中的方位位置  $x$  不一致: 它们之间的关系为

$$\begin{aligned} x &= x_0 - \frac{(\cos^2 \alpha_t \sin \alpha_t + \cos^2 \alpha_r \sin \alpha_r) R_{tc} R_{rc}}{R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r} \\ &\quad + \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r} \bar{U}_r \end{aligned} \quad (9)$$

因此,如果径向速度分量  $\bar{U}_r$  在方位向非均匀分布,那么散射体在图像平面中方位向的平移量也是非均匀的,有的地方聚集,有的地方分散,从而导致图像强度起伏变化,这就是速度聚束调制的基本原理。

### 3 双站 SAR 线性速度聚束调制传递函数

根据文献[9]的推论,图像平面的图像强度可表示为

$$\begin{aligned} \langle I(x) \rangle &= \left\langle \left| \int_{-\infty}^{+\infty} e(x, x_0) dx_0 \right|^2 \right\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\langle |e(x, x_0)|^2 \right\rangle dx_0 \\ &= \frac{\pi}{2} T^2 \exp \left[ -\frac{(R_{tc} \sin \alpha_t - R_{tc} \sin \alpha_r)^2}{V^2 T^2} \right] \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(x_0) \frac{\rho_a}{\rho'_a(x_0)} \exp \left[ -\frac{\pi^2}{\rho_a^2} \left( x - x_0 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{(\cos^2 \alpha_t \sin \alpha_t + \cos^2 \alpha_r \sin \alpha_r) R_{tc} R_{rc}}{R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r} \bar{U}_r \right)^2 \right] dx_0 \end{aligned} \quad (10)$$

如果在方位分辨单元内,  $\left|1 + \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)}\right|$

$\cdot \frac{\partial}{\partial x_0} \bar{U}_r(x_0) \Big|^{-1}$ ,  $\rho'_a(x_0)$ ,  $\sigma(x_0)$  基本不变化, 经变量代换后,

上式可近似为

$$\langle I(x) \rangle \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2} T^2 \exp \left[ -\frac{(R_{tc} \sin \alpha_t - R_{tc} \sin \alpha_r)^2}{V^2 T^2} \right] \cdot \left[ \frac{\sigma(x_0)}{\left| 1 + \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} \frac{\partial}{\partial x_0} \bar{U}_r(x_0) \right|} \right] \quad (11)$$

如果  $\frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} \frac{\partial}{\partial x_0} \bar{U}_r(x_0) \ll 1$ , 通过式(11)

中  $\frac{\sigma(x_0)}{\left| 1 + \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} \frac{\partial}{\partial x_0} \bar{U}_r(x_0) \right|}$  可得:

$$\sigma'/\sigma \approx \left( 1 - \frac{2}{V} \frac{R_{tc} R_{rc}}{(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} \frac{\partial}{\partial x_0} \bar{U}_r(x_0) \right) \Big|_{x_0 \cong x} = [1 + C_{\text{bist}} \cos(\mathbf{k}x_0 + \alpha)] \quad (12)$$

其中

$$|C_{\text{bist}}| = \left| \frac{R_{tc} R_{rc}}{V(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} |\mathbf{k}| \xi_0 w \cos \varphi \cdot g_{\text{bist}} \right| \quad (13)$$

$$g_{\text{bist}} = \left[ (m_1 \cos \varphi + n \sin \varphi)^2 + m_2^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left( \frac{m_1 \cos \varphi + n \sin \varphi}{m_2} \right)$$

因此, 在线性近似范围内, 可用一个线性速度聚束调制传递函数来表示:

$$R^{\text{bunching}} = |R^b| \cdot e^{j\alpha} \quad (15)$$

$$|R^b| = \frac{R_{tc} R_{rc}}{V(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} |\mathbf{k}| w \cos \varphi \cdot g_{\text{bist}} \quad (16)$$

#### 4 理论分析

根据文献[8,11]的研究表明, 单站正侧视 SAR 速度聚束调制在图像平面的线性映射过程的限制条件可以近似为

$$|C_{\text{mon}}| = \left| \frac{R_c}{V} |\mathbf{k}| \xi_0 w \cos \varphi \cdot g_{\text{mon}} \right| \leq 0.3 \quad (17)$$

$$g_{\text{mon}} = [(\sin \theta \sin \varphi)^2 + \cos^2 \theta]^{1/2} \quad (18)$$

双站斜视情况的限制条件可以类似地写出:

$$|C_{\text{bist}}| = \left| \frac{R_{tc} R_{rc}}{V(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} |\mathbf{k}| \xi_0 w \cos \varphi \cdot g_{\text{bist}} \right| \leq 0.3 \quad (19)$$

当  $R_{tc} = R_{rc}$ ,  $\theta_i = \theta_s$ ,  $\alpha_t = \alpha_r = 0^\circ$  时,  $C_{\text{bist}}$  就退化为单站正侧视形式  $C_{\text{mon}}$ 。

由于海洋 SAR 遥感应用中不需要高分辨率观测, 分辨单元一般在 10m 左右, 小于 10m 左右的波浪不能被识别。

因此, 式(19)中不必考虑小于分辨单元的波浪。当风速约 6m/s 时, 本文用文献[12]中的  $D$  波谱计算  $|\mathbf{k}| \xi_0 w$  的最大值在  $|\mathbf{k}| = 0.25 \text{rad/m}$  处, 从而得到风速约 6m/s 时式(19)的演变公式:

$$|C_{\text{bist}}|_{U=6} = \left| \frac{R_{tc} R_{rc}}{V(R_{tc} \cos^2 \alpha_t + R_{tc} \cos^2 \alpha_r)} \cos \varphi \cdot g_{\text{bist}} \right| \leq 1.2 \quad (20)$$

另外, 由于星载 SAR 斜距大约为  $10^6 \text{m}$  量级, 飞行速度约  $7 \times 10^3 \text{m/s}$  量级; 而机载 SAR 斜距大约为  $10^4 \text{m}$  量级, 飞行速度  $10^2 \text{m/s}$  量级。因此, 从式(19)可以直观地看出, 在海况相同, 入(散)射角、斜视角一定的情况下, 机载双站 SAR 系统的  $|C_{\text{bist}}|$  与星载 SAR 系统约在同一个量级, 它们的线性成像范围大致相同。

由式(19)可知, 当  $\varphi = \pm 90^\circ$ , 与载机飞行方向相垂直的波浪没有速度聚束效应, SAR 不能通过该效应来探测该方向的波浪。为了使 SAR 系统能探测到全方向性的波浪, 就需要通过截面调制来实现与载机飞行方向垂直波浪的探测。由于截面调制主要能探测布拉格波。因此, 布拉格波方向应尽量与载机飞行方向垂直。根据式(1), 也就是需要发射机与接收机的斜视角正负对称, 亦即  $\alpha_t = -\alpha_r$ 。从而使得两种调制作用有效地结合起来, 更加有利于全方向性波浪的探测以及全方向性波谱的精确反演。本文下面的分析均基于该假设。

为了分析方便, 本文在相同海况条件下, 以  $\theta_i = \theta_s = 40^\circ$ ,  $R_{rc} = R_{tc}$ ,  $\alpha_t = -\alpha_r = 0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  的观测情况为基准, 亦即该情况下  $|C_{\text{bist}}| = 1$ , 定义归一化  $|C_{\text{bist}}|$ 。假设  $R_{tc} R_{rc}$  乘积固定不变,  $R_{rc} = m R_{tc}$ ,  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  表达式如下:

$$|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}} = \left| \frac{\sqrt{m} \cos \varphi \cdot g_{\text{bist}}}{\cos 40^\circ (R_{rc}/R_{tc} \cos^2 \alpha_t + \cos^2 \alpha_r)} \right| \quad (21)$$

从式(21)出发, 我们可以通过仿真来说明  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  与斜视角、入(散)射角、 $R_{rc}$  ( $R_{tc}$ ) 之间的关系。

从图 2—图 4 可以看出如下规律:

(1)在发射机前(后)斜视、接收机后(前)斜视观测情况下,  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  随斜视角的增大而增大, 说明在该斜视观测情况下, 对于所有  $\varphi$  角度的波浪而言, 双站 SAR 正侧视模式的  $|C_{\text{bist}}|$  最小, 该观测模式下对海浪的线性成像范围最大。

(2)在发射机前(后)斜视、接收机后(前)斜视观测情况下,  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  随入(散)射角的增大而减小, 说明入(散)射角越大, 双站 SAR 系统对海浪的线性成像范围越大。但由于目前公认的海面布拉格波成像机理适用于中等入(散)射角, 为便于成像系统的工作, 入(散)射角又不宜太大, 在实际应用中应折中考虑这两个因素。

(3)当  $R_{rc}/R_{tc} = 1$  时,  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  最大; 而当  $R_{rc}$  和  $R_{tc}$  相差越远,  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  越小, 说明这时双站 SAR 系统对海浪的线性成像范围越大。

综合上述 3 种情况, 在相同海况条件下, 当双站 SAR 平台的  $R_{rc}$ ,  $R_{tc}$  相差越远, 入(散)射角越大, 斜视角越小时, 双站 SAR 成像系统对海浪的线性成像范围越大。

另外, 如果要求双站 SAR 能更容易探测海波, 就需要尽量大的速度聚束调制  $|C_{\text{bist}}|$ , 从而形成明显的波纹状图案。但大的速度聚束调制  $|C_{\text{bist}}|$  就意味着可能使成像过程变为非线性, 而非线性成像又会扰乱海波的探测。因此, 把双站 SAR 应用到探测海波这个方面, 需要折中考虑速度聚束调制强度与非线性成像之间的矛盾。

图 2 仿真参数:  $\theta_i = \theta_s = 80^\circ$ ,  $R_{\text{rc}}/R_{\text{tc}} = 1.5$ , 8 条曲线从下到上分别对应  $\alpha_t = -\alpha_r = 0^\circ \sim \pm 70^\circ$ 。

图 3 仿真参数: 各曲线从上到下分别对应  $\theta_i = \theta_s = 30^\circ \sim 80^\circ$ ,  $R_{\text{rc}}/R_{\text{tc}} = 1.5$ ,  $\alpha_t = -\alpha_r = \pm 20^\circ$ 。

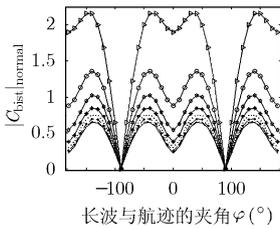


图 2  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  随  $\varphi$ , 斜视角的变化曲线

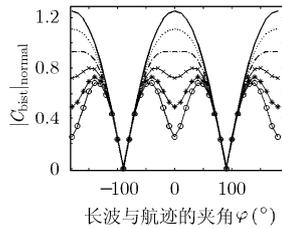


图 3  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  随  $\varphi$ , 入(散)射角的变化曲线

图 4 仿真参数:  $\theta_i = \theta_s = 45^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ 。图中 4 条曲线从下到上分别对应  $\alpha_t = -\alpha_r = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 。

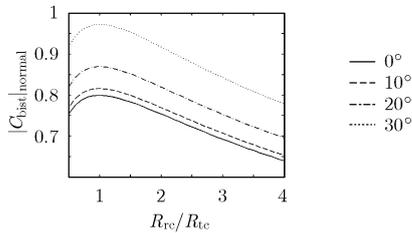


图 4  $|C_{\text{bist}}|_{\text{normal}}$  随  $R_{\text{rc}}/R_{\text{tc}}$ 、斜视角的变化曲线

### 5 结束语

本文解释了平飞斜视情况下, 双站 SAR 的速度聚束效应以及方位分辨率的降低。而且通过线性速度聚束调制传递函数看出当  $\alpha_t = -\alpha_r$  时, 更有利于全方向性波浪的探测以及全方向性波谱的精确反演。最后通过仿真分析得到, 在相同海况条件下, 当双站 SAR 平台的  $R_{\text{rc}}$ ,  $R_{\text{tc}}$  相差越远, 入(散)射角越大, 斜视角越小时, 双站 SAR 成像系统对海浪的线性成像范围越大。利用上述结论可以为海洋观测用途的双站 SAR 系统设计提供理论依据。

### 参考文献

[1] Moccia A, Rufino G, and D'Errico M, et al. BISSAT: A bistatic SAR for earth observation. Phase A Study—Final Report, ASI Research contract I/R/213/00, 2001.  
 [2] Martin M, Klupar P, and Kilberg S, et al. Techsat 21 and revolutionizing space missions using microsattellites. 15th Am.

Inst. of Aeronaut. and Astronaut. Conf. on Small Satellites 2001, Utah, USA, 2001, SSC01-1-3.  
 [3] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.  
 [4] 刘建平, 梁甸农. 星载双/多站SAR系统地面分辨特性影响分析. *信号处理*, 2006, 22(3): 307-311.  
 Liu Jian-ping and Liang Dian-nong. Effect analysis of ground resolution performance for bi-and multi-static spaceborne SAR system. *Signal Processing*, 2006, 22(3): 307-311.  
 [5] 张勇胜, 梁甸农, 董臻. 星载寄生式SAR系统频率同步分析. *国防科技大学学报*, 2006, 28(2): 85-110.  
 Zhang Yong-sheng, Liang Dian-nong, and Dong Zhen. Analysis of frequency synchronization error in spaceborne parasitic SAR system. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(2): 85-110.  
 [6] 李宁, 何峰, 梁甸农. 双站SAR距离徙动算法. *现代电子技术*, 2007, (5): 38-40.  
 Li Ning, He Feng, and Liang Dian-nong. Range migration algorithm of bistatic SAR. *Modern Electronic Technology*, 2007, (5): 38-40.  
 [7] 朱振波, 汤子跃, 蒋兴舟. 机载双站合成孔径雷达Chirp Scaling成像算法. *电子与信息学报*, 2006, 28(6): 977-981.  
 Zhu Zhen-bo, Tang Zi-yue, and Jiang Xing-zhou. The chirp scaling algorithm of airborne bistatic SAR imaging. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(6): 977-981.  
 [8] Alpers W R, Rufenach C L, and Ross D B. On the Detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C7): 6481-6498.  
 [9] Alpers W R and Rufenach C L. The effect of orbital motions on synthetic aperture radar imagery of ocean waves. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1979, 27(5): 685-690.  
 [10] Bruning C, Alpers W R, and Schroter J G. On the focusing issue of synthetic aperture radar imaging of ocean waves. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(1): 120-128.  
 [11] Moccia A, Rufino G, and De'Luca M. Oceanographic applications of spaceborne bistatic SAR. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03, Toulouse, France*, 2003: 1452-1454.  
 [12] Plant W J. A stochastic, multiscale model of microwave backscatter. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C9): 3120.

余颖: 女 1981 年生, 博士生, 研究方向为海洋微波雷达成像。  
 王小青: 男 1978 年生, 助理研究员, 研究方向为雷达信号与信息处理。  
 朱敏慧: 女 1943 年生, 研究员, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为计算机图像和图形学、微波遥感与雷达技术、雷达信号与信息处理等。