

## 双站 SAR 海面回波相干时间研究

王小青 余颖 陈永强 肖疆 朱敏慧  
(中国科学院电子学研究所微波成像国家重点实验室 北京 100080)

**摘要:** 由于海面的随机运动特性使得海面回波相干时间与陆地目标有很大的差异, 回波的相干时间对 SAR 系统参数和指标设计有很大的影响。该文研究了双站 SAR 的海面回波相干时间, 通过分析波浪随机运动造成的回波相位延迟, 给出了波浪随机运动对双站 SAR 成像的影响。得出了双站 SAR 海面回波相干时间与波浪谱的关系, 给出了双站 SAR 方位向分辨率与相关时间的关系, 并通过仿真分析了相干时间与若干重要参数的关系。

**关键词:** 合成孔径雷达; 双站; 海面; 相关时间

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0564-05

## The Study on the Ocean Echo Signal Coherent Time of Bistatic SAR

Wang Xiao-qing Yu Ying Chen Yong-qiang Zhu Min-hui  
(Nat. Key Lab of Microwave Imaging Tech., Institute of Electronics, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The coherent time of echo signal of ocean surface is much different from that of land because of its stochastic movement, which is related to the system parameters designation. The ocean echo signal coherent time of bistatic SAR is studied in this paper. The echo signal phase due to the wave movement is analyzed, and the effect on the bistatic SAR imaging of the ocean wave stochastic movement is given. The formula of coherent time is given, the relationship between the azimuth resolution and the coherent time is given, and the relationships between the coherent time and some factors are simulated and analyzed.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Bistatic; Ocean; Coherent time

### 1 引言

近二十年来, 合成孔径雷达(SAR)已成为海洋遥感的重要手段, 世界上第一颗星载合成孔径雷达 SeaSAT 就是针对海洋遥感设计的, 以后很多星载 SAR 也都有许多成功的海洋遥感应用, 例如 ERS-1, ERS-2, RADARSAT, EnviSAT 等等, 通过 SAR 图像反演内波、风场、近海海底地形等应用研究都得到了长足的发展。

近年来双站 SAR 是 SAR 领域研究的热点, 双站 SAR 应用在海洋遥感中有很多单站雷达所不具有的优势。我们知道 Bragg 散射效应是海面电磁散射的主要机理, 双站电磁散射的主要机理同样也是 Bragg 散射<sup>[1]</sup>, 所不同的是 Bragg 波数矢量是由入射波数和散射波数矢量共同决定。入射波和散射波的示意图如图 1 所示。

图中  $\mathbf{n}_i$ 、 $\mathbf{n}_s$  分别为入射波和散射波矢量方向,  $\theta_i$ 、 $\theta_s$  分别为入射角(入射矢量与垂线的夹角)和散射角(散射矢量与垂线夹角),  $\varphi_i$ 、 $\varphi_s$  分别为入射方位角(入射面与 XOZ 面夹角)和散射方位角(散射面与 XOZ 面夹角)

则 Bragg 波数矢量为<sup>[1]</sup>

$$\mathbf{k}_b = \pm(\mathbf{k}_{ih} - \mathbf{k}_{sh}) \quad (1)$$

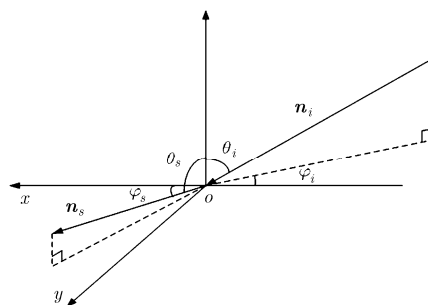


图 1 入射波和散射波示意图

其中  $\mathbf{k}_{ih}$ 、 $\mathbf{k}_{sh}$  分别为入射和散射波矢量在水平面的分量

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{ih} &= k_0 [\sin \theta_i \cos \varphi_i \hat{\mathbf{x}} + \sin \theta_i \sin \varphi_i \hat{\mathbf{y}}], \\ \mathbf{k}_{sh} &= k_0 [\sin \theta_s \cos \varphi_s \hat{\mathbf{x}} + \sin \theta_s \sin \varphi_s \hat{\mathbf{y}}] \end{aligned} \quad (2)$$

$k_0$  为电磁波波数,  $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\hat{\mathbf{y}}$  为  $x$  轴和  $y$  轴单位矢量。

从式(1)可以看出, 通过改变发射和接收站的相对位置, 双站 SAR 就可以对不同尺度和方向的海面 Bragg 波产生谐振效应, 而单站 SAR 只能与入射面内的固定尺度 Bragg 波产生谐振, 单站雷达要观测不同尺度和方向的 Bragg 波就要更换雷达波段和入射方位角, 这是成本很高的; 另外侧向微

波散射特性强度和极化特性也与后向散射有很大的差别<sup>[1]</sup>。因此采用双站 SAR 对海洋观测可以获得比单站 SAR 更多的信息。随着双站 SAR 技术的发展,双站 SAR 在海洋遥感中的应用前景是十分广阔的。

在 SAR 系统参数和指标设计中,雷达回波的相干时间是一个非常关键的指标,他直接关系到合成孔径时间的设计和 SAR 图像的方位向分辨率。常规单站 SAR 的海面相关时间已经有了相当多的理论和实验研究<sup>[2-5]</sup>。在海洋应用的双站 SAR 系统中,海面相关时间同样也是一个非常重要的指标,但是目前相关的理论和试验研究还很少。本文研究了双站 SAR 的海面相关时间,给出了相关时间与波浪谱的关系表达式,分析了双站 SAR 海洋图像分辨率与回波相关时间的关系,通过仿真给出了相关时间与若干重要参数之间的关系。

## 2 雷达回波相干时间波浪谱的关系

下面的推导都是基于这样一个假设:一个分辨单元是有许多散射系数统计独立的 Bragg 散射体组成的,这些 Bragg 散射体的复散射系数在一个合成孔径中是近似不变的,这些 Bragg 散射体“骑”在尺度更大的波浪上并随之运动,正是更大尺度的波浪运动使得 Bragg 散射体的回波产生随机时变特性。

由于在距离向内信号以光速运动,所以在距离向内可以认为海面散射特性是不变的,在后面的推导中都忽略距离向时变特性。为了简化推导,本文假设发射和接收天线方向图都是高斯型的,发射平台和接收平台速度相等,发射和接收平台的合成孔径时间分别为  $T_i$  和  $T_s$ ,下面来看海面双站回波表达式(距离向压缩之后某个距离门的回波):

$$\begin{aligned} r(t) = & \int \rho(\mathbf{x}) \exp \left\{ i \left[ (k_{iz} + k_{sz}) h(\mathbf{x}, t) + (\mathbf{k}_{sh} - \mathbf{k}_{ih}) \mathbf{d}(\mathbf{x}, t) \right] \right. \\ & \cdot \exp \left[ -i (f_{di} + f_{ds}) \left( \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} - t \right) \right] \\ & \cdot \exp \left[ -i \frac{1}{2} \left[ (k_{ri} + k_{rs}) \left( \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} - t \right) \right]^2 \right] \\ & \left. \cdot \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}} - vt}{vT_i} \right)^2 \right] \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}} - vt}{vT_s} \right)^2 \right] \right\} d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{x}$  为水平面位置矢量,  $t$  为方位向时间。 $\rho(\mathbf{x})$  为 Bragg 散射体的散射系数。积分的第 2 项表示由于大尺度波浪运动造成的时变相位项,其中  $h(\mathbf{x}, t)$  为波浪垂直位移,  $\mathbf{d}(\mathbf{x}, t)$  为海面水平位移矢量,  $k_{iz}$ ,  $k_{sz}$  分别为入射波数矢量和散射波数矢量在垂直方向上的分量,  $\mathbf{k}_{ih}$ ,  $\mathbf{k}_{sh}$  与式(2)相同。

$$k_{iz} = k_0 \cos \theta_i, \quad k_{sz} = k_0 \cos \theta_s \quad (4)$$

式(3)中积分的第 3 项表示由于发射和接收平台径向运动分量引起的线性相位项,  $f_{di}$ ,  $f_{ds}$  分别为发射平台和接收

平台引起的多普勒中心频率。第 4 项表示由于发射和接收平台运动引起的线性调频项,  $k_{ri}$ ,  $k_{rs}$  分别为发射平台和接收平台引起的方位向线性调频率,  $\mathbf{x}_0$  为方位向的起始位置,  $v$  为发射和接收平台速度,  $\hat{\mathbf{v}}$  为速度方向的单位矢量。第 5、6 项为发射和接收天线方向图。

根据流体波动理论,海表面水质点近似做圆周运动,将垂直位移和水平位移写成傅里叶展开形式

$$h(\mathbf{x}, t) = \int [a(\mathbf{k}) \exp(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t) + \text{c.c.}] d\mathbf{k} \quad (5a)$$

$$\mathbf{d}(\mathbf{x}, t) = \int [-ia(\mathbf{k}) \exp(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t) + \text{c.c.}] \hat{\mathbf{k}} d\mathbf{k} \quad (5b)$$

其中 c.c. 表示共轭。 $\hat{\mathbf{k}}$  为波数矢量  $\mathbf{k}$  的单位矢量。所以式(3)中的第 2 项可以写成

$$\begin{aligned} & \exp \left\{ i \left[ (k_{iz} + k_{sz}) h(\mathbf{x}, t) + (\mathbf{k}_{sh} - \mathbf{k}_{ih}) \mathbf{d}(\mathbf{x}, t) \right] \right\} \\ & = \exp [im(\mathbf{x}, t)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } m(\mathbf{x}, t) = & \int \left[ (k_{iz} + k_{sz}) - i(\mathbf{k}_{sh} - \mathbf{k}_{ih}) \hat{\mathbf{k}} \right] a(\mathbf{k}) \\ & \cdot \exp(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t) d\mathbf{k} + \text{c.c.} \end{aligned}$$

对方位向进行匹配滤波后输出的方位向图像为

$$\begin{aligned} I(t) = & \int r(\tau) \exp [i(f_{di} + f_{ds})(t - \tau)] \\ & \cdot \exp \left\{ i \frac{1}{2} \left[ k_{ri}(t - \tau)^2 + k_{rs}(t - \tau)^2 \right] \right\} d\tau \\ = & \exp \left\{ i \frac{1}{2} \left[ (k_{ri} + k_{rs}) \left( t^2 - \frac{[(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}]^2}{v^2} \right) \right] \right\} \\ & \cdot \exp \left[ i(f_{di} + f_{ds}) \left( t - \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} \right) \right] \\ & \cdot \iint \rho(\mathbf{x}) \exp [im(\mathbf{x}, \tau)] \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_i} - \tau \right)^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_s} - \tau \right)^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[ -i \left[ (k_{ri} + k_{rs}) \left( t - \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} \right) \right] \tau \right] d\tau d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (7)$$

这样图像的平均能量为

$$\begin{aligned} \langle I(t) I^*(t) \rangle = & \iiint \int \langle \rho(\mathbf{x}_1) \exp [im(\mathbf{x}_1, \tau_1)] \rho^*(\mathbf{x}_2) \\ & \cdot \exp [-im(\mathbf{x}_2, \tau_2)] \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_i} - \tau_1 \right)^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_s} - \tau_1 \right)^2 \right] \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_i} - \tau_2 \right)^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[ -\left( \frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_s} - \tau_2 \right)^2 \right] \\ & \cdot \exp \left\{ -i \left[ (k_{ri} + k_{rs}) \left( t - \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} \right) \right] \tau_1 \right\} \\ & \cdot \exp \left\{ -i \left[ (k_{ri} + k_{rs}) \left( t - \frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} \right) \right] \tau_2 \right\} d\mathbf{x}_1 d\mathbf{x}_2 d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (8)$$

由于不同的 Bragg 散射体的散射系数可以看成是统计无关的, 所以

$$\begin{aligned} & \langle \rho(\mathbf{x}_1) \exp[im(\mathbf{x}_1, \tau_1)] \rho^*(\mathbf{x}_2) \exp[-im(\mathbf{x}_2, \tau_2)] \rangle \\ &= \langle \rho(\mathbf{x}_1) \rho^*(\mathbf{x}_2) \rangle \langle \exp[im(\mathbf{x}_1, \tau_1)] \exp[-im(\mathbf{x}_2, \tau_2)] \rangle \\ &= \sigma(\mathbf{x}_1) \delta(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \langle \exp[im(\mathbf{x}_1, \tau_1)] \exp[-im(\mathbf{x}_2, \tau_2)] \rangle \quad (9) \end{aligned}$$

将  $m(\mathbf{x}, \tau)$  分成两部分: 中尺度波(尺度介于分辨单元和 Bragg 散射体之间的波浪), 这部分的贡献在一个分辨单元内表现为统计值; 大尺度波(尺度大于分辨单元的波浪), 这部分的贡献在一个分辨单元表现为确定值

$$\begin{aligned} m(\mathbf{x}, \tau) &= \int_{|\mathbf{k}| < k_{\text{res}}} [(k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}}) - j(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}] a(\mathbf{k}) \\ &\quad \cdot \exp(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t) d\mathbf{k} + \text{c.c.} \\ &+ \int_{k_{\text{bragg}} > |\mathbf{k}| > k_{\text{res}}} [(k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}}) - j(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}] a(\mathbf{k}) \\ &\quad \cdot \exp(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t) d\mathbf{k} + \text{c.c.} \\ &= m_l(\mathbf{x}, \tau) + m_s(\mathbf{x}, \tau) \quad (10) \end{aligned}$$

其中  $k_{\text{res}}$ ,  $k_{\text{bragg}}$  分别为分辨单元和 Bragg 散射体对应的波数。 $m_l(\mathbf{x}, \tau)$ ,  $m_s(\mathbf{x}, \tau)$  分别是大尺度和中尺度的贡献。

令

$$\tau = \tau_1 - \tau_2, \quad T = (\tau_1 + \tau_2)/2 \quad (11)$$

并且假设波高服从高斯分布, 这样

$$\begin{aligned} & \delta(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \langle \exp[im(\mathbf{x}_1, \tau_1)] \exp[-im(\mathbf{x}_2, \tau_2)] \rangle \\ & \approx \delta(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \exp\{i[U(\mathbf{x}_1)\tau]\} \langle \exp[i(m_s(\mathbf{x}_1, \tau_1) - m_s(\mathbf{x}_1, \tau_2))] \rangle \\ & = \delta(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \exp\{i[U(\mathbf{x}_1)\tau]\} \exp\{-[\varphi_s(0,0) - \varphi_s(0,\tau)]\} \quad (12) \end{aligned}$$

其中  $U(\mathbf{x}) = [\partial m_l(\mathbf{x}, t)] / \partial t$ ,  $\varphi_s(\mathbf{x}, \tau)$  为  $m_s(\mathbf{x}, \tau)$  的自相关, 式(12)的推导中用到了高斯随机过程的如下性质:

$$\left\langle \exp\left\{j \sum_{i=1}^n k_i a(t_i)\right\}\right\rangle = \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_i k_j \langle a(t_i) a(t_j) \rangle\right\} \quad (13)$$

其中  $a(t)$  为一个高斯过程。

令  $s(\mathbf{k})$  为海面波浪谱, 则

$$\begin{aligned} \varphi_s(0,0) - \varphi_s(0,\tau) &= \int_{k_{\text{res}} < |\mathbf{k}| < k_b} [(k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}}) - j(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}]^2 \\ &\quad \cdot s(\mathbf{k}) \{1 - \cos[-\omega\tau]\} d\mathbf{k} \\ &= \int_{k_{\text{res}} < |\mathbf{k}| < k_{\text{bragg}}} \left\{ (k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}})^2 + [(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}]^2 \right\} \\ &\quad \cdot s(\mathbf{k}) \{1 - \cos[-\omega\tau]\} d\mathbf{k} \quad (14) \end{aligned}$$

根据水面重力波色散关系  $\omega = \sqrt{gk}$ , 一般 Bragg 散射体的尺度为 Bragg 波长的 6-7 倍以上<sup>[6,7]</sup>, 这样对于频段在 X 波段以下雷达, 中尺度波的最大频率  $\omega < 20$ , 中尺度波谱集中的区域一般  $\omega < 5$ 。而雷达的脉冲时间间隔在毫秒量级, 也就是  $\omega\tau \ll 1$  所以式(14)可以化简为

$$\begin{aligned} \varphi_s(0,0) - \varphi_s(0,\tau) &= \int_{k_{\text{res}} < |\mathbf{k}| < k_b} \left\{ (k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}})^2 + [(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}]^2 \right\} \\ &\quad \cdot s(\mathbf{k}) \{1 - \cos[-\omega\tau]\} d\mathbf{k} \\ &\approx \int_{k_{\text{res}} < |\mathbf{k}| < k_b} \left\{ (k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}})^2 + [(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}]^2 \right\} s(\mathbf{k}) \frac{(\omega\tau)^2}{2} d\mathbf{k} \\ &= \left( \frac{\tau}{\tau_c} \right)^2 \quad (15) \end{aligned}$$

其中  $\tau_c$  就是海面回波相关时间

$$\tau_c = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\int_{k_{\text{res}} < |\mathbf{k}| < k_{\text{bragg}}} \left\{ (k_{\text{iz}} + k_{\text{sz}})^2 + [(\mathbf{k}_{\text{sh}} - \mathbf{k}_{\text{ih}}) \hat{\mathbf{k}}]^2 \right\} s(\mathbf{k}) \omega d\mathbf{k}}} \quad (16)$$

对于常规后向 SAR,  $k_{\text{iz}} = k_{\text{sz}} = k_z$ ,  $\mathbf{k}_{\text{sh}} = -\mathbf{k}_{\text{ih}} = \mathbf{k}_h$ , 则式(16)就退化为文献[3,5]中的后向 SAR 的海面相关时间:

$$\tau'_c = \frac{1}{\sqrt{2} \sqrt{\int_{k_{\text{res}} < |\mathbf{k}| < k_b} \left\{ k_z^2 + [\mathbf{k}_h \hat{\mathbf{k}}]^2 \right\} s(\mathbf{k}) \omega d\mathbf{k}}} \quad (17)$$

将式(12)、式(15)代入式(8), 并用式(11)进行变量代换, 整理后可得

$$\begin{aligned} \langle I(t) I^*(t) \rangle &= \iiint \sigma(\mathbf{x}_1) \exp\{i[U(\mathbf{x}_1)\tau]\} \exp\left[-\left(\frac{\tau}{T_0}\right)^2\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-2\left(\frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_i} - T\right)^2\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-2\left(\frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{vT_s} - T\right)^2\right] \\ &\quad \cdot \exp\left\{-i\left[(k_{\text{ri}} + k_{\text{rs}}) \left(t - \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v}\right)\right]\right\} d\mathbf{x}_1 dT d\tau \\ &= \frac{\pi T_0 T_i T_s}{\sqrt{2(T_s^2 + T_i^2)}} \int \sigma(\mathbf{x}_1) \exp\left\{-\frac{T_0^2}{4} [(k_{\text{ri}} + k_{\text{rs}}) \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(t - \frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \hat{\mathbf{v}}}{v} - \frac{U(\mathbf{x}_1)}{k_{\text{ri}} + k_{\text{rs}}}\right)]^2\right\} d\mathbf{x}_1 \quad (18) \end{aligned}$$

其中  $T_0$  为等效合成孔径时间:

$$\frac{1}{T_0^2} = \frac{1}{\tau_c^2} + \frac{1}{2T_i^2} + \frac{1}{2T_s^2} \quad (19)$$

从式(18)可以看出此时图像分辨率由等效合成孔径时间决定, 而不仅仅取决于发射和接收合成孔径时间, 图像分辨率的表达式为

$$\eta = \frac{v\pi}{T_0(k_{\text{ri}} + k_{\text{rs}})} \quad (20)$$

假设  $T_i = T_s = \alpha\tau_c$ ,  $T_0 = \beta\tau_c$ , 图 2 给出了  $\alpha$ ,  $\beta$  之间的关系

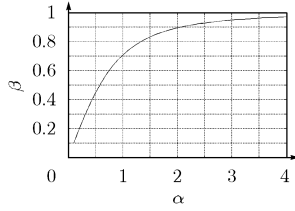


图2 发射、接收合成孔径时间、相关时间和等效合成孔径时间的关系

从中可以看出当发射、接收合成孔径时间大于相关时间的2倍以后就没有什么贡献了,所以在系统设计的时候发射和接收合成孔径时间应当与海面相关时间相当,过长的合成孔径时间并不能相应提高分辨率,最终的等效合成孔径时间将受制于发射、接收合成孔径时间和相关时间中的最小者。

### 3 海面相关时间与若干参数的关系

从式(16)我们可以看出海面相关时间与波浪谱、电磁波长、入射方向、散射方向有关。下面给出了一些仿真结果来说明海面相关时间与相对方位角(入射面和散射面的夹角,表达式为  $\varphi = 180 + \varphi_i - \varphi_s$ )、风向、入射角、电磁波长之间的关系。在下面的仿真中波浪谱模型采用 Plant 在文献[8]给出的  $D$  波谱,该波浪谱的极坐标形式为

$$\left. \begin{aligned} s(k, \varphi) &= s(k)D(k, \varphi) \\ s(k, \varphi) &= \left(\frac{\alpha}{k^4}\right) \exp\left[-\left(\frac{k_p}{k}\right)^2\right] G^H \\ D(k, \varphi) &= \sec h^2(B\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

其中  $k$  为标量波数,  $\varphi$  为波传播方向与风向夹角,  $\alpha$ ,  $k_p$ ,  $G$ ,  $B$  都是与风速有关的参数。

仿真结果如图3—图6所示。从图中的曲线可以看出如下规律:

(1)相关时间随风速增大而减小,这主要是因为风速增大后波浪谱增大了。

(2)相关时间随相对方位角增大而增大,这主要是因为入射面与散射面之间夹角增大后 Bragg 波数减小,这样波浪水平运动对随机相位的贡献就变小了。

(3)相关时间随风向与 Bragg 波传播方向间夹角增大而增大,这主要是因为主要波谱分量与 Bragg 波方向夹角增大后波浪的水平运动对随机相位的贡献变小。

(4)在风速较小时( $<2\text{m/s}$ ),入射角、散射角越小相关时间越大,当风速稍大后正好相反。

(5)相关时间随着电磁波频率增大减小,从式(16)可以看出相关时间近似和电磁波频率成反比,然而这不意味着低频段 SAR 在海洋上更容易得到高分辨图像,因为 SAR 的调频斜率是与电磁波频率成正比,所以在其他参数都一样的情况下,降低电磁波波段虽然能得到更大的相关时间但是不能提高分辨率。

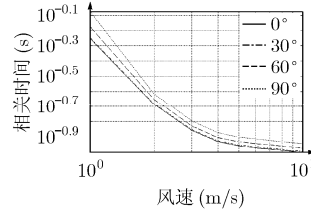


图3 相关时间随风速、相对方位角的变化曲线(仿真参数:入射角、散射角均为  $50^\circ$ , L 波段,风向与 Bragg 波传播方向相同)

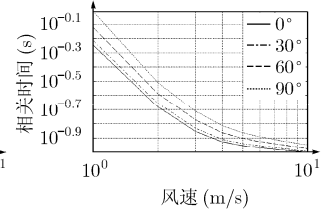


图4 相关时间随风速、风向变化曲线(仿真参数:入射角、散射角均为  $50^\circ$ , L 波段,相对方位角  $30^\circ$ ,图中四条曲线分别对应风向与 Bragg 波传播方向夹角)

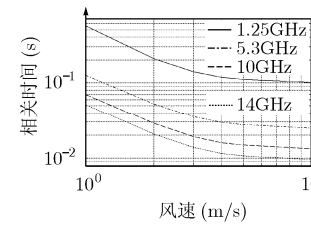


图5 相关时间随风速、波段变化曲线(仿真参数:入射角、散射角均为  $50^\circ$ , 相对方位角  $30^\circ$ ,风向与 Bragg 波传播方向相同,图中四条曲线分别对应电磁波频率)

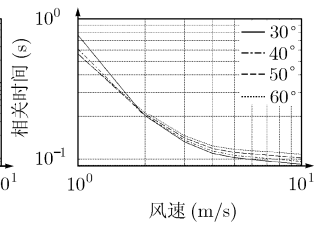


图6 相关时间随风速、入射角、散射角变化曲线(仿真参数:入射角和散射角相等,相对方位角  $30^\circ$ ,风向与 Bragg 波传播方向相同,图中四条曲线分别对应入射角、散射角)

### 4 结论

经过推导本文可以得到海面相关时间和等效合成孔径时间的表达式;等效合成孔径时间与海面相关时间、发射合成孔径时间、接收合成孔径时间都有关系,最终的等效合成孔径时间受制于三者中的最小值。通过仿真分析了海面相关时间与风速、风向、相对方位角、入射角散射角的关系。双站 SAR 要在海面上获得较高的方位向分辨率必须满足如下条件:风速较小;风向与 Bragg 波方向尽量垂直;相对方位角较大。

### 参考文献

- [1] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Boston, London, Artech House, 1994, Ch. 4.
- [2] Kasilingam D P and Shemdin O H. Theory for synthetic aperture radar imaging of the ocean surface with application to tower ocean wave and radar dependence experiment on focus, resolution, and wave height spectra. *J Geophys. Res. C.* 1988, 93(11): 13837-13848.
- [3] Jackson F C and Lyzenga D R. Microwave techniques for measuring directional wave spectra. in *Surface Waves and Fluxes*, Geernhaert G L and Plant W J, Eds. Amsterdam, The Netherland, Kluwer, 1990, Vol. 2, ch.14, 221-264.
- [4] Carande R E. Estimating ocean coherence time using dual-baseline interferometric synthetic aperture radar. *IEEE Trans. on G R S.* 1994, 32(4): 846-854.

- [5] Frasier S J and Camps A J. Dual-beam interferometry for ocean surface current vector mapping. *IEEE Trans. on GRS*, 2001, 39(2): 401-414, 19.
- [6] Romeiser R, Alpers W, and Wismann V. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface, 1. Theory of the model and optimization / validation by scatterometer data. *J Geophys. Res.*, 1997, 102(11): 25237-25250.
- [7] Romeiser R and Alpers W. An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface, 2. Model response to surface roughness variations and the radar imaging of underwater bottom topography. *J Geophys. Res. C.*, 1997, 102: 25251-25267.
- [8] Plant W J. A stochastic multiscale model of microwave backscatter. *J Geophys. Res. C.*, 2002, 107(9): 3120.
- 王小青: 男, 1978年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为雷达信号与信息处理.
- 余颖: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理.
- 肖疆: 男, 1979年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为信号与信息处理.
- 陈永强: 男, 1973年生, 副研究员, 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.