文章编号: 1672-2892(2011)06-0684-05

## 浅海水下地形 SAR 成像的速度聚束调制

王 珂 <sup>a,c,d</sup>, 洪 峻<sup>b</sup>, 明 峰 <sup>a,c</sup>, 张林涛 <sup>a,c,d</sup>

(中国科学院 a.空间信息处理与应用系统技术重点实验室; b.电子学研究所微波成像 技术国家级重点实验室; c.电子学研究所,北京 100190; d.研究生院,北京 100049)

摘 要:速度聚束调制是浅海水下地形合成孔径雷达(SAR)成像的关键理论,文中对其进行了 深入研究。首先从多普勒频移观点论述了速度聚束调制,然后从海浪运动观点,对速度聚束调制 重新进行理论推导,指出了两种观点得到结果的异同。最后由理论推导,证明了雷达参数之间需 要满足一定的约束条件,才能保证速度聚束调制的准确性。本研究为 SAR 海洋遥感系统的设计提 供了参考。

关键词:浅海水下地形; SAR 成像;速度聚束调制 中图分类号:TN957.51 **文献标识码:**A

# Velocity bunching modulation of SAR imaging for shallow ocean under water bottom topography

WANG ke<sup>a,e,d</sup>, HONG Jun<sup>b</sup>, MING FENG<sup>a,e</sup>, ZHANG Lin-tao<sup>a,e,d</sup>

(a.Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology; b.National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology,Institute of Electronics; c.Institute of Electronics,Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190,China; d.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Velocity bunching modulation is the key theory of SAR(Synthetic Aperture Radar) imaging for shallow ocean under water bottom topography. This paper elaborates velocity bunching modulation from the stand point of Doppler frequency shift firstly. Then theoretical deduction is carried out from the standpoint of moving ocean waves, and the differences and similarities from two standpoints are pointed out. Finally, it is verified by theoretical deduction that radar parameters should satisfy certain stipulation conditions in order to guarantee the accuracy of velocity bunching modulation. This work has provided a reference for the design of SAR ocean remote sensing system.

Key words: shallow ocean under water bottom topography; SAR imaging; velocity bunching modulation

SAR 利用合成孔径原理和脉冲压缩技术,以真实的小孔径天线获得方位向和距离向的双向高分辨力遥感 图像<sup>[1]</sup>,具有全天候、全天时、高分辨力的海洋遥感观测能力<sup>[2-3]</sup>。SAR 可遥感探测浅海水下地形,能实现对浅 海地质环境的快速、动态、大范围监测,对此国内外已开展了大量的理论和实验研究<sup>[4-7]</sup>。Alpers 和 Hennings<sup>[4]</sup> 最早对浅海水下地形的真实孔径雷达(Real Aperture Radar, RAR)和 SAR 的成像机制进行了深入研究,提出水动 力调制和速度聚束调制使得 SAR 能对浅海水下地形遥感成像,并利用机载侧视 RAR 图像(X 波段)和 SEASAT/SAR 图像(L 波段)对其理论进行了实验验证。Alpers 和 Hennings 理论作为水下地形 SAR 成像的理论基础,一直沿用 至今并影响了其后的有关研究<sup>[5,7]</sup>。速度聚束调制是 SAR 区别于 RAR 的特有调制方式,是水下地形 SAR 成像的 关键理论,但有关其正确性和准确性的理论研究,国内外学者却少有论述。本文对浅海水下地形 SAR 成像的速 度聚束调制进行了理论研究,阐明了有关问题,获得的结论对实际应用具有指导意义。

### 1 多普勒频移观点

Alpers 和 Hennings<sup>[4]</sup>提出了水动力调制和速度聚束调制作用下的浅海水下地形 SAR 成像理论。如图 1 所示,

阴影部分为水下地形,潮流流经水下地形时,流速 *u* 可分解为 沿水下地形梯度方向的分量 *u*<sub>⊥</sub>,以及平行于水下地形延伸 方向的分量 *u*<sub>1</sub>,潮流流向与水下地形梯度方向的夹角为 *ψ*,雷达平台飞行方向与水下地形延伸方向的夹角为 *φ*。 根据连续性方程,潮流流经水下地形时可认为<sup>[4]</sup>:

$$u_{\perp}(x_{\perp})d(x_{\perp}) = const = c \tag{1}$$

式中: c为常量;  $d(x_{\perp})$ 是沿水下地形梯度方向 $(x_{\perp})$ 的水 深值;  $u_{\parallel} = const$ ,  $u_{\parallel}$ 在水下地形延伸方向上为常量。

将式(1)两边对 x\_ 求导并化简, 可得:

$$\frac{\partial u_{\perp}}{\partial x_{\perp}} = -\frac{c}{d^2} \cdot \frac{\partial d}{\partial x_{\perp}} = -\frac{|u_0| d_0 \cos\psi}{d^2} \cdot grad_{\perp} d \qquad (2)$$

式中:  $c = u_{0\perp}d_0 = |u_0|d_0\cos\psi$ ;  $u_0$ 为水下地形区域外的潮流 流速;  $d_0$ 为水下地形区域外的初始水深;  $grad_{\perp}d = \frac{\partial d}{\partial x_{\perp}}$ 为

沿x<sub>⊥</sub>方向的水深梯度变化。

速度聚束调制是 SAR 特有的调制方式。SAR 通过记录雷达回波的相位历程  $\varphi(t)$ ,以实现方位向的合成孔径,获得方位向的高分辨力。SAR 对固定目标的响应在零多普勒频率,即 d $\varphi/dt = 0$ 。对于侧视雷达,通常固定目标的零多普勒频率位于雷达波束中心。但当目标在斜距上具有速度分量  $u_r$  时,零多普勒频率将相对于雷达波束中心产生移动:

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{u_{\rm r}}{V} \tag{3}$$

式中V为平台飞行速度。

如果 SAR 到目标的斜距为 R,则运动目标在方位向上的移动为:

$$\delta y = -R\frac{u_{\rm r}}{V} \tag{4}$$

速度聚束调制引起的 SAR 图像在方位向上的相对变化,正比于海面散射单元在方位向上的密度变化  $\frac{R}{V} \frac{\partial u_r}{\partial y}$ 。 根据侧视雷达的几何关系,可将斜距速度分量  $u_r$ ,用沿 x 轴(如图 1 所示)的流速分量  $u_r$ 和入射角  $\theta$ 表示,则有<sup>[4]</sup>:

$$\left(\frac{\delta I(y)}{I_0}\right)_{\rm vb} = \frac{R}{V}\sin\theta \frac{\partial u_x}{\partial y}$$
(5)

根据图 1 中流速 u = y 轴的角度关系,将式(5)中 $\frac{\partial u_x}{\partial y}$ 展开,可得:

$$\left(\frac{\delta I(y)}{I_0}\right)_{\rm vb} = \frac{R}{V}\sin\theta \left\{\sin\phi\cos\phi \left(\frac{\partial u_{\perp}}{\partial x_{\perp}} - \frac{\partial u_{\parallel}}{\partial x_{\parallel}}\right) + \cos^2\phi \frac{\partial u_{\perp}}{\partial x_{\parallel}} - \sin^2\phi \frac{\partial u_{\parallel}}{\partial x_{\perp}}\right\}$$
(6)

即可化简为:

$$\left(\frac{\delta I(y)}{I_0}\right)_{\rm vb} = \frac{R}{V}\sin\theta\cos\phi\sin\phi\frac{\partial u_\perp}{\partial x_\perp} \tag{7}$$

将式(2)代入式(7),可得水下地形的速度聚束调制结果为:

$$\left(\frac{\delta I}{I_0}\right)_{\rm vb} = -\frac{R}{V}\sin\theta |u_0| d_0\cos\psi\cos\phi\sin\phi\frac{grad_{\perp}d}{d^2}$$
(8)

Alpers 和 Hennings 由作用量谱平衡方程和 Bragg 共振散射,经理论推导给出水下地形的水动力调制结果为<sup>[4]</sup>:

$$\left(\frac{\delta I}{I_0}\right)_{\text{hydr}} = \frac{4+\gamma}{\mu} |u_0| d_0 \cos\psi \cos^2\phi \frac{\text{grad}_{\perp} d}{d^2}$$
(9)

式中: µ为松弛率; γ为短波的群速度与相速度之比。此即为浅海水下地形的 RAR 成像机制。

在水动力调制和速度聚束调制都保持为线性关系时,则水下地形对 SAR 图像强度的调制为<sup>[4]</sup>:



图 1 水下地形的平面示意图

$$\left(\frac{\delta I}{I_0}\right)_{\text{SAR}} = \left(\frac{\delta I}{I_0}\right)_{\text{hydr}} + \left(\frac{\delta I}{I_0}\right)_{\text{vb}}$$
(10)

此即为浅海水下地形的 SAR 成像机制。

## 2 海浪运动观点

以上论述了 Alpers 和 Hennings<sup>[4]</sup>由多普勒频移观点提出的浅海水下地形 SAR 成像的速度聚束调制。下面从海浪运动对 SAR 成像影响的角度出发,对这一问题重新进行了理论推导。如图 2 所示,这里 u 为点目标  $P(即海 面分辨单元)的速度, V 为平台飞行速度, <math>\theta$  为入射角,  $\varphi$  为u 与 y 轴的夹角, R 为斜距, d 为地距, h 为平台飞行高度。时间起点 t=0 对应于 P 为正侧视时。根据 SAR 成像时的几何关系,距离 D(t) 可由式(11)给出<sup>[8]</sup>:

$$D^{2}(t) = h^{2} + (1-a)d^{2} + (1+b)V^{2}(t+\tau)^{2}$$
(11)

其中,

$$a = \frac{u^2 \sin^2 \varphi}{V^2 + u^2 - 2Vu \cos \varphi} \cong \left(\frac{u \sin \varphi}{V}\right)^2 \tag{12}$$

$$b = \frac{u^2 - 2uV\cos\varphi}{V^2} \cong \frac{-2u\cos\varphi}{V}$$
(13)

$$\tau = \frac{ud\sin\varphi}{V^2 + u^2 - 2Vu\cos\varphi} \cong \frac{ud}{V^2}\sin\varphi$$
(14)

t = 0

假定  $u \ll V$ ,考虑静止目标(u=0)时,有 $a=b=\tau=0$ ,则运动目标的作用为:

1) 在 *x* 轴上(距离向)引起 SAR 图像移动, 其量为:

$$\delta x = \delta d = -\frac{1}{2}ad = -\frac{1}{2}(\frac{u\sin\varphi}{V})^2d \tag{15}$$

2) 在 y 轴上(方位向)引起 SAR 图像移动, 其量为:

$$\delta y = -V\tau = -\frac{ud}{V}\sin\varphi \tag{16}$$

取 $d = R\sin\theta$ 代入式(16),可得:

$$\delta y = -\frac{R}{V} (u\sin\varphi\sin\theta) = -\frac{R}{V} u_r \tag{17}$$

不难发现式(17)与式(4)是相同的。

对于精确选定的点目标 P 的位置,在 SAR 图像中可表示为<sup>[9]</sup>:

$$V$$
  
 $D(t)$   
 $h$   
 $R$   
 $y$   
 $d$   
 $u$   
 $\frac{\pi}{2}-\varphi$ 

Fig.2 Geometry relation of moving target SAR imaging 图 2 运动目标 SAR 成像时的几何关系

(18)

假定海面散射单元具有线性密度函数  $\rho(y)$ (即雷达后向散射截面是 ~  $\rho(y)$ dy),则 SAR 图像上的亮度密度函数  $\rho(y')$ 与  $\rho(y)$ 的关系可由下式给出:

 $y' = y + \delta y$ 

$$\rho(\mathbf{y}')|\mathbf{d}\mathbf{y}'| = \rho(\mathbf{y})|\mathbf{d}\mathbf{y}| \tag{19}$$

即有:

$$\rho(y') = \rho(y) \left| \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}y'} \right| \tag{20}$$

则点 y处 SAR 图像上一个分辨单元的平均亮度值可表示为:

$$I(y) = \int_{y}^{y+r} \rho(y) dy = \int_{y}^{y+r} \rho(y') dy$$
(21)

式中r为雷达分辨力。

由式(18)可得:

$$dy' = dy + d(\delta y) \tag{22}$$

将式(22)代入式(20)可得:

根据式(21)和式(23),可得:

$$\left(\frac{\delta I(y)}{I_0}\right) = \frac{\partial(\delta y)}{\partial y} \tag{24}$$

将式(17)代入式(24)可得:

$$\left(\frac{\delta I(y)}{I_0}\right) = \frac{R}{V} \sin \theta \frac{\partial u_x}{\partial y}$$
(25)

不难发现式(25)与式(5)是相同的,即说明水下地形的速度聚束调制结果为式(8)所示。

综合式(11)~式(25),可见从海浪运动观点对浅海水下地形 SAR 成像的速度聚束调制的理论推导,与 Alpers 和 Hennings 理论在本质上是一致的。但需要指出的是 Alpers 和 Hennings 给出的速度聚束调制结果忽略了距离向的 SAR 图像移动。对于星载或机载 SAR,一般有  $\frac{u}{v} \ll 1$ ,比较式(15)和式(16),不难看出:

$$\delta x = -\frac{1}{2} \left(\frac{u\sin\varphi}{V}\right)^2 d = \left(-\frac{ud}{V}\sin\varphi\right) \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{u\sin\varphi}{V}\right) = \delta y \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{u}{V}\right) \sin\varphi \ll \delta y \tag{26}$$

可见,在理论上水下地形的速度聚束调制也会引起距离向的 SAR 图像移动,但因其量级很小,可被忽略,这也 是合理的近似。

#### 3 雷达参数的约束条件

考虑目标运动对 SAR 成像的主要影响<sup>[10]</sup>,除了引起 SAR 图像移动,还会导致距离向模糊。当u<sub>r</sub>足够大时, 在雷达波束通过目标的时间(即合成孔径时间)内,该目标能通过一个或多个距离向分辨单元,导致图像产生距离 向模糊。

为了避免 SAR 图像产生距离向模糊,在合成孔径时间内的目标位移距离必须小于距离向分辨力,即要求:

$$u_r \left| \cdot \frac{L_s}{V} < \rho_r \right|$$
(27)

式中: $\rho_r$ 为距离向分辨力; $L_s$ 为 SAR 的合成孔径长度。

即有:

$$\frac{(u\sin\varphi\sin\theta)L_{\rm s}}{V} < \rho_{\rm r} \tag{28}$$

对于 SAR 有<sup>[8]</sup>:

$$L_{\rm s} = \frac{R\lambda}{L} \tag{29}$$

将式(29)代入式(28)可得:

$$u\sin\varphi\sin\theta \cdot \frac{R}{V} \cdot \frac{\lambda}{L} < \rho_{\rm r} \tag{30}$$

其中, sin $\varphi$ 可取最大值为 1, 即使强潮流时一般有 u < 1.5 m/s,因此可取最大值 u = 1.5 m/s;通常实际天线长度 L 为几米至十几米<sup>[3,8]</sup>,雷达波长  $\lambda$  为几厘米至几十厘米,一般有  $\frac{\lambda}{L} < \frac{1}{10}$ ;对于星载 SAR,一般  $\frac{R}{V}$ 取值较大,以 SEASAT/SAR 为例<sup>[4]</sup>可取  $\frac{R}{V} = 130 \text{ s}$ ,  $\theta = 23^{\circ}$ 。由此,将式(30)左侧取最大值,可化简为:

$$1.5 \times 1 \times \sin 23^{\circ} \times 130 \times \frac{1}{10} = 7.62 < \rho_{\rm r}$$
 (31)

由于水下地形 SAR 成像时一般为强潮流<sup>[7]</sup>,可见对于星载 SAR,其距离向分辨力不能取得太高,否则 SAR 图像会产生距离向模糊,将导致水下地形的速度聚束调制结果(即式(8))不再准确。

取
$$R = \frac{h}{\cos\theta}$$
代人式(30),可得:

$$u\sin\varphi\tan\theta\cdot\frac{h}{V}\cdot\frac{\lambda}{L}<\rho_{\rm r}\tag{32}$$

对于机载 SAR,上式中h、V是可调整的,因此可通过减小h,增大V,即低空、高速飞行,以满足提高距离向分辨力的需要,使式(32)(即式(30))保持成立。

### 4 结论

Alpers 和 Hennings 提出了浅海水下地形 SAR 成像的速度聚束调制,但当时人们对海面 SAR 成像机制的认 识尚不够充分。本文从海浪运动观点,对这一问题重新进行了理论推导。证明了 Alpers 和 Hennings 理论是基本 正确的,但需要指出的是 Alpers 和 Hennings 给出的速度聚束调制结果是忽略了距离向的 SAR 图像移动。浅海水 下地形 SAR 成像时,雷达参数之间需要满足一定的约束条件,即需要式(30)保持成立,才能保证水下地形的速 度聚束调制结果(即式(8))的准确性。所以,星载 SAR 的距离向分辨力不能取得太高,而机载 SAR 可通过低空、 高速飞行,以满足提高距离向分辨力的需要,实现高分辨力的海洋遥感观测<sup>[3]</sup>。上述结论可为 SAR 海洋遥感系 统的设计提供参考,对实际应用具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 马俊霞,蔡英武,陈惠连. SAR压制式干扰仿真及效果评估[J]. 信息与电子工程, 2004,2(2):109-113. (MA Junxia,CAI Yingwu,CHEN Huilian. Simulation and evaluation of barrage jamming on SAR[J]. Information and Electronic Engineering, 2004,2(2):109-113.)
- [2] 喻亮,丁晓松.利用星载ERS-2 SAR进行长江口海面风场反演研究[J]. 信息与电子工程, 2005,3(3):172-175. (YU Liang,DING Xiaosong. Ocean surface wind field retrieval of the Yangtze river outlet from spaceborne ERS-2 SAR image[J]. Information and Electronic, 2005,3(3):172-175.)
- [3] Seelye Martin. An introduction to ocean remote sensing[M]. Britain:Cambridge University Press, 2004.
- [4] Alpers W, Hennings I.A theory of the imaging mechanism of under water bottom topography by real and synthetic aperture radar[J]. Journal of Geophysical Research, 1984,89:10529-10546.
- [5] Hennings I.A historical overview of radar imaging mechanism of sea bottom topography[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(7):1447-1454.
- [6] Hennings I,Lurin B,Didden N.Radar imaging mechanism of the sea bed:result of the C-STAR experiment in 1996 with special emphasis on the relaxation rate of short waves due to current variations[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001,31:1807-1827.
- [7] 范开国,黄韦艮,贺明霞,等. SAR 浅海水下地形遥感研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2008,23(4):479-485. (FAN Kaiguo,HUANG Weigen,HE Mingxia,et al. Progress on remote sensing of the shallow sea bottom topography[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008,23(4):479-485.)
- [8] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2000. (GUO Huadong. The theories and applications of radar observing earth[M]. Beijing:Science Press, 2000.)
- [9] Valenzuela G R, Laing M B, Daley J C.Ocean spectra for the high-frequency waves as determined from airborne radar measurement[J]. Journal of Marine Research, 1971,29(2):69-84.
- [10] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2003. (ZHENG Mingjie. Study on SAR moving target detection and imaging[D]. Beijing:Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2003.)

#### 作者简介:



**王** 珂(1981-),男,河南省郑州 市人,博士生,主要研究方向为SAR遥 感信息处理与应用.email:email\_of\_ paper@yahoo.com.cn. **洪** 峻(1960-),男,北京市人,研究员,博士,主要 研究方向为SAR遥感信息处理与应用.

明 峰(1977-),男,山东临沂市人,博士,副研究员, 主要研究方向为SAR定标理论与应用.

**张林涛**(1985-),男,山东临沂市人,博士生,主要研 究方向为SAR定标理论与应用.