

# 天线相位中心偏移方位多波束合成孔径 雷达的误差分析

李世强<sup>1,2</sup>, 杨汝良<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 本文介绍了天线相位中心偏移方位多波束技术的工作原理, 分析了该技术引入的各种误差的成因以及对成像的影响, 并给出了计算机仿真结果. 本文为系统设计和进一步研究天线相位中心偏移方位多波束系统的成像处理方法提供了参考.

**关键词:** 星载合成孔径雷达; 高分辨率宽测绘带; 方位多波束 (MAB); 天线相位中心偏移 (DPCA); 误差分析

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2004) 09-1436-05

## Error Analysis of Displaced Phase Centers Multiple Azimuth Beam Synthetic Aperture Radar

LI Shi-qiang<sup>1,2</sup>, YANG Ru-liang<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The principle of displaced phase centers multiple azimuth beam is introduced, the cause and effect to imaging of the errors induced by the method are analyzed, and computer simulation results are presented. The paper provides the reference for system design and further studying on imaging algorithm of displaced phase centers multiple azimuth beam SAR.

**Key words:** spaceborne SAR; high resolution wide swath; multiple azimuth beam (MAB); displaced phase centers antenna (DPCA); error analysis

### 1 引言

星载合成孔径雷达 (SAR) 系统的主要技术指标是空间分辨率和测绘带宽, SAR 方位分辨率与回波信号的多普勒带宽成反比, 由于合成孔径雷达以脉冲方式工作, 相当于在方位向以脉冲重复频率 (PRF) 对回波信号进行采样, 根据 Nyquist 采样定理, PRF 值必须大于方位多普勒带宽, 要提高方位分辨率就必须增加 PRF 值; 另一方面, 为了抑制距离向模糊信号, 必须保证测绘带宽内的回波信号全部落在一个脉冲重复周期内, 扩展测绘带宽就要求降低 PRF. 对常规 SAR 来说, 方位分辨率与测绘带宽相矛盾, 要扩展测绘带宽, 需要以牺牲方位分辨率为代价; 同样, 要提高方位分辨率, 也要以牺牲测绘带宽为代价<sup>[1,2]</sup>.

一些文献<sup>[1,3-5]</sup>中提到了采用天线相位中心偏移方位多波束技术同时获得高分辨率和宽测绘带的概念, 采用这种技术可在保持一定测绘带宽的条件下可获得方位分辨率的提高, 或保持一定方位分辨率的条件下获得测绘带宽的展宽, 为

实现高分辨率宽测绘带星载 SAR 系统提供了一种技术途径. 但在以上文献中只提出了天线相位中心偏移方位多波束技术的概念, 并未研究由此引入的各种误差等问题, 而且在介绍该技术的原理时未考虑地球自转效应带来的较大的信号传播路径误差以及由此带来的方位向相位误差. 本文在介绍天线相位中心偏移方位多波束技术的基础上, 分析了采用这一技术时引入的各种误差及对成像造成的影响, 考虑了地球自转带来的信号传播路径误差的影响, 为系统设计和进一步研究针对天线相位中心偏移方位多波束 SAR 的成像处理方法提供了参考.

### 2 天线相位中心偏移方位多波束技术原理

天线相位中心偏移 (DPCA) 方位多波束 (MAB) 技术的基本思想是以方位向空间维采样的增加换取时间维采样率的降低, 在一定的系统工作脉冲重复频率下可以得到更高的方位向等效采样率, 允许展宽方位向多普勒带宽, 获得更高的方位向分辨率.

对于天线相位中心偏移方位多波束 SAR 系统的脉冲重复频率,本文引入两个概念,一个是系统工作脉冲重复频率 PRF,即系统实际发射脉冲的重复频率;另一个是等效脉冲重复频率  $PRF_e$ ,沿方位向排列的各接收波束分别接收回波,对每一发射脉冲有  $N_B$  组回波数据( $N_B$  为波束数),相当于方位向采样率提高  $N_B$  倍,从接收的观点看脉冲重复频率提高了  $N_B$  倍,这一提高了的脉冲重复频率称为等效脉冲重复频率。

采用天线相位中心偏移方位多波束技术时,雷达天线在方位向包含多个子天线,其中中间子天线为收/发天线,两边的子天线为接收天线,各子天线的

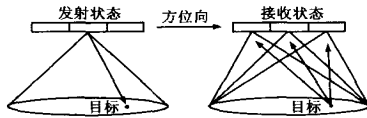


图 1 天线相位中心偏移方位多波束技术原理

方位向尺寸相同,波束宽度相同。中间波束发射信号,各个波束同时接收由同一地域反射回来的回波信号。图 1 所示为三波束情况的原理示意图。其工作脉冲重复频率为与其具有相同波束宽度的常规 SAR 脉冲重复频率值的三分之一。合理设置三波束相位中心间距  $d$ ,使得  $d$  与波束数  $N_B$ 、平台飞行速度  $v_s$  及 PRF 之间满足下式关系:

$$d = \frac{2v_s}{N_B \cdot PRF} \quad (1)$$

可以利用各接收波束模拟具有相同方位分辨率的常规 SAR 的回波方位相位历程,而只引入一个与方位时间无关的常数相位误差。通常该常数相位误差可通过信号处理方法予以校正,而引入的一次及高次相位误差因数值很小可以忽略。

由于系统工作脉冲重复频率与等效脉冲重复频率的比例关系,中心发射波束的位置可与具有相同方位分辨率的常规单波束 SAR 的天线位置对应,与中心发射波束相距为  $d$  的接收波束的回波数据,模拟的是具有相同方位分辨率的常规 SAR 在与发射波束相距  $d/2$  处的回波数据,从而两侧接收波束的回波数据可以“填充”由于系统工作脉冲重复频率降低而引起的回波相位历程中的“空缺”。只要对两侧接收波束的回波数据进行适当的相位校正,就可通过组合三个波束回波数据获得完整的方位向回波相位历程。<sup>[1,3,4]</sup>这样,在系统工作脉冲重复频率为 PRF 时,可得到方位向等效采样率  $PRF_e = N_B \cdot PRF$ ,允许方位向多普勒带宽展宽  $N_B$  倍,从而可使方位分辨率提高  $N_B$  倍,即在提高方位分辨率的同时不牺牲测绘带宽,为实现高分辨率宽测绘带星载 SAR 系统提供了技术途径<sup>[1,4,5]</sup>。

由天线相位中心偏移方位多波束技术原理可知,成像处理前,应首先对各接收波束的回波数据分别进行相位校正,能否施行相位校正为天线相位中心偏移方位多波束 SAR 正常工作的前提,而要施行相位校正,首先必须了解各种相位误差产生的根源及对成像的影响,下面具体分析天线相位中心偏移方位多波束技术引入的各种误差。

### 3 天线相位中心偏移方位多波束的误差分析

采用天线相位中心偏移方位多波束技术可能引入的误差

主要有三种:一是信号传播路径误差,二是各接收通道增益和相移不平衡带来的误差,三是方位向采样不均匀带来的误差。要使系统正常工作,这些误差需在处理过程中得到校正,或者保证对成像的影响限制在可容忍的限度内。

#### 3.1 信号传播路径差引入的误差

采用天线相位中心偏移方位多波束技术时,利用 SAR 天线各接收波束的回波数据模拟常规 SAR 相应位置的真实回波数据,这一过程存在信号传播路径误差,会在方位向引入相位误差。为了便于理解,将该误差分为两部分。首先假定地面点目标不动,图 2(a)示出了这部分误差的成因,A 为收/发波束,B 与 D 为接收波束。分别以  $R_s$  和  $R_t$  表示惯性坐标系下卫星和地面点目标的位置矢量, $e_v$  表示沿卫星飞行速度方向上的单位矢量, $d$  为波束相位中心间距,则  $R_1 = R_s - R_t$ ,  $R_2 = R_1 - d \cdot e_v$ ,  $R_3 = R_1 - (d/2) \cdot e_v$ ,  $R_4 = R_1 + d \cdot e_v$ ,  $R_5 = R_1 + (d/2) \cdot e_v$ ,接收波束 B 接收的回波信号模拟的是常规 SAR 在 AB 中心位置 C 的回波信号,两者之间存在传播路径差  $R_L = (|R_1| + |R_2|) - 2|R_3|$ ,从而引入方位向相位误差为:

$$\alpha_{L1} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot R_L = \frac{2\pi}{\lambda} (|R_1| + |R_2| - 2|R_3|) \quad (2)$$

同理接收波束 D 引入方位向相位误差为:

$$\alpha_{L2} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot R_R = \frac{2\pi}{\lambda} (|R_1| + |R_4| - 2|R_3|) \quad (3)$$

这是第一部分误差,也是一些文献<sup>[1,3,4]</sup>中介绍天线相位中心偏移方位多波束技术原理时提到的相位误差。

第二部分误差是由信号传播距离历程不连续导致的。由于地球的转动,地面上点目标会形成自己的运动轨迹。图 2(b)示出了

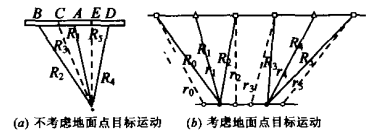


图 2 DPC 多波束引入的相位误差

三波束情况下卫星与地面点目标间的相对运动过程,图中小小三角表示卫星运动过程中中间收/发波束的位置,小方块表示的是两侧接收波束的等效位置,圆点表示系统工作脉冲重复频率 PRF 下各发射脉冲时刻的点目标位置,圆圈表示的是以等效脉冲重复频率  $PRF_e$  工作的常规 SAR 发射脉冲时刻对应的点目标位置。由图中可以看出,以等效脉冲重复频率工作的常规 SAR,回波距离历程为  $r_0, r_1, r_2, r_3, \dots$  是一个连续变化过程的采样,而采用三波束的 SAR 系统,回波距离历程为  $R_0, R_1, R_2, R_3, \dots$ ,距离变化过程中有突变,在每个脉冲重复周期时间内,二者距离历程都会有误差(发生在两侧接收波束对应位置处)。对多波束 SAR 系统,方位向参考函数是参照以等效脉冲重复频率工作的常规 SAR 来构造的,使得方位向回波信号与参考函数间存在不匹配,相当于在回波信号中引入了方位相位误差 $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} (R_i - r_i)$ ,这是第二部分相位误差,这一误差在以前的一些文献中都未提及,分析表明该部分相位误差在由信号传播路径差引入的相位误差中占主要部分。

以三波束情况为例说明信号传播路径差引起的相位误差。根据以上说明,仿照常规 SAR 方位相位历程,对于三波束 SAR,合成后的方位向相位历程可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_a(m) &= -\frac{4}{3}R(m) \cdot \text{PRT} + \varphi_e(m) \\ &= -\frac{4}{3}R(m) \cdot \text{PRT}_e + \varphi_e(m), \quad m=0,1,2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 PRT 为系统工作脉冲重复周期, PRT<sub>e</sub> 为等效脉冲重复周期. 式(4)当 mod(m, 3) = 0 时为左波束相位, 此时 φ<sub>e</sub>(m) = 0, 该误差可近似表示为:

$$\varphi_e(m) = -\frac{4}{3} \omega_e R_e \cdot \text{PRT}_e \cos \theta_s \cos \theta_t \quad (5)$$

其中 ω<sub>e</sub> 为地球自转角速度, R<sub>e</sub> 为成像点处地球半径, θ<sub>t</sub> 为成像点纬度, θ<sub>s</sub> 为雷达视线与成像点运动轨迹之间夹角, 满足:

$$\cos \theta_s = \frac{R_e + H}{R_0} \cdot \frac{\sqrt{[\cos(\theta_s + \theta_t) + \cos \theta_s][\cos(\theta_s - \theta_t) - \cos \theta_s]}}{\cos \theta_t} \quad (6)$$

其中 H 为卫星高度, R<sub>0</sub> 为雷达视线长度, θ<sub>s</sub> 为卫星纬度, θ<sub>t</sub> 为卫星与成像点所夹的地心角.

式(4)当 mod(m, 3) = 1 时为中间波束相位, 此时 φ<sub>e</sub>(m) = 0.

式(4)当 mod(m, 3) = 2 时为右波束相位, 此时 φ<sub>e</sub>(m) = 0, 该误差可近似表示为:

$$\varphi_e(m) = \frac{4}{3} \omega_e R_e \cdot \text{PRT}_e \cos \theta_s \cos \theta_t \quad (7)$$

根据以上分析, 以三波束情况为例, 对由信号传播路径差引起的相位误差对点目标成像的影响进行计算机仿真, 仿真参数为: 卫星轨道高度 450km, 工作波长 0.09375m, 方位分辨率 2m, 天线下视角 35°, 波束中心间距 3.4344m, 系统工作 PRF = 1500Hz, 相当于等效脉冲重复频率为 4500Hz. 其中图 4 是信号传播路径差引起的各波束相位误差, 从图中可以看出, 该项相位误差甚至已超过了 2°, 如不补偿, 将造成方位匹配滤波器严重失配, 无法正确成像. 图 5(a),

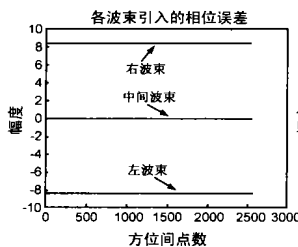


图 4 信号传播路径差引入的各波束相位误差

5(b) 给出了补偿前后点目标方位向压缩的结果.

### 3.2 各接收通道幅相不平衡和方位向采样不均匀引入的相位误差

各接收通道幅相不平衡和方位向采样不均匀引入的误差对系统性能的影响可用成对回波理论进行分析. 线性调频信号的波形畸变在频域造成成对回波, 通过匹配滤波器压缩会在时域输出波形上反映出来<sup>[6]</sup>. 另外, 由于成对回波的出现, 必然使主波功率下降, 从而造成主波峰值下降<sup>[7,8]</sup>.

#### 3.2.1 各接收通道幅相不平衡引入的相位误差

采用天线相位中心偏移方位多波束技术时, 对应每一波束有一从天线到 A/D 输出端的独立的接收通道, 为了获得较好的图像质量, 要求各个接收通道的增益和相移必须一致. 然而在系统实现过程中, 各接收通道之间可能会存在增益和/或相移的不平衡. 无论各接收通道的增益相移失衡情况如何, 各接收波束合成后的信号都呈现为以波束数 N<sub>B</sub> 为周期的周期

$$\begin{aligned} s_a(t) &= [a_0 + a_1 \cos(2 \cdot \frac{\text{PRF}_e}{N_B} \cdot t + \varphi_1)] \exp\{j[\omega_d t + k_a t^2 + \\ &\quad b_1 \sin(2 \cdot \frac{\text{PRF}_e}{N_B} \cdot t + \varphi_2)]\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 a<sub>0</sub> 为无失真信号的幅度, a<sub>1</sub> 为幅度误差的振幅, ω<sub>d</sub> 为方位多普勒角频率, k<sub>a</sub> 为方位向线性调频斜率, b<sub>1</sub> 为信号相位误差的幅度, φ<sub>1</sub> 与 φ<sub>2</sub> 分别为幅相误差傅里叶展开式中的相位项.

当只存在增益失衡时, 相当于在方位向线性调频信号上有寄生调幅, 上式可写成:

$$\begin{aligned} s_a(t) &= a_0 e^{j[\omega_d t + k_a t^2]} + \frac{a_1}{2} e^{j[(\omega_d + \frac{2 \cdot \text{PRF}_e}{N_B})t + k_a t^2 + \varphi_1]} \\ &\quad + \frac{a_1}{2} e^{j[(\omega_d - \frac{2 \cdot \text{PRF}_e}{N_B})t + k_a t^2 - \varphi_1]} \end{aligned} \quad (9)$$

该信号通过匹配滤波器后输出三项, 第一项对应的输出为主波, 输出波形不会失真, 但幅度会因调幅信号的功率分配<sup>[9]</sup>而下降, 与无失真信号相比下降的倍数为  $\frac{1}{\sqrt{1 + a^2/2 a_0^2}}$ ; 上式第二、三两项对应的输出为成对回波, 幅度与主波幅度之比为  $\frac{a_1}{2 a_0} |\cos[(\omega_d \pm \frac{\text{PRF}_e}{N_B})t + \varphi]|$ , 出现位置距主波为  $\pm \frac{\text{PRF}_e}{N_B k_a}$ .

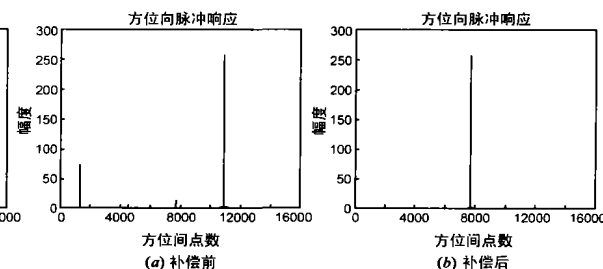


图 5 存在信号传播路径差时相位补偿前后点目标方位压缩仿真结果

当只存在相移失衡并且相移失衡的幅度 b<sub>1</sub> < 0.5rad 时, 式(8)可近似写成:

$$\begin{aligned} s_a(t) &= a_0 J_0(b_1) e^{j[\omega_d t + k_a t^2]} + \frac{a_0 b_1}{2} e^{j[(\omega_d + \frac{2 \cdot \text{PRF}_e}{N_B})t + k_a t^2]} \\ &\quad - \frac{a_0 b_1}{2} e^{j[(\omega_d - \frac{2 \cdot \text{PRF}_e}{N_B})t + k_a t^2]} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 J<sub>0</sub>(·) 为 0 阶第一类贝塞尔函数. 该信号通过匹配滤波器后输出三项, 第一项对应的输出分量为主波, 主波波形不会失真, 只是幅度会下降, 与无失真信号相比下降的倍数为 J<sub>0</sub>(b<sub>1</sub>); 上式第二、三两项对应的输出为极性相反的成对回波, 幅度为主波幅度的 b<sub>1</sub>/2, 出现位置距主波为 ±PRF<sub>e</sub>/(N<sub>B</sub>k<sub>a</sub>).

#### 3.2.2 方位向采样不均匀引入的误差

采用天线相位中心偏移方位多波束技术时, 各波束相位中心间距 d 与系统工作脉冲重复频率 PRF 及卫星速度 v<sub>s</sub> 间应满足式(1)的关系. 由于卫星轨道一般是椭圆的, 卫星在飞行过程中的不同轨道位置处, 速度是连续变化的, 而 d 值一

一旦确定,在工作过程中是不会变化的,使得在轨道的一些位置处式(1)的关系不能严格满足,造成方位向采样不均匀。

为了分析方便,假定卫星速度没有偏差,方位向采样不均匀由 PRF 误差造成。系统工作的标称脉冲重复频率为 PRF,而实际工作的脉冲重复频率为:PRF + f,则 PRF 偏差引起的方位向路程差为:

$$X = \frac{f}{N_B \cdot PRF \cdot (PRF + f)} \cdot v_s \quad (11)$$

相应地引入方位向相位误差为:

$$\theta = \frac{4\pi}{\lambda} [ \sqrt{R_t^2 + (x)^2} + 2R_t \cdot x \cdot \sin \alpha - R_t ] \quad (12)$$

其中:R<sub>t</sub> 为该时刻卫星到地面点目标的斜距, α 为该时刻的斜视角。

由以上分析可知,方位向采样不均匀对多波束 SAR 的影响与各接收通道间存在相移失衡时的情况类似,在方位向引入周期性的超前与滞后相位误差,从而在方位向压缩输出中出现成对回波现象。

### 3.2.3 计算机仿真

以三波束情况为例仿真增益相移不平衡和方位向采样不均匀的情况。

对于增益失衡情况,以中间波束为基准,假设左侧接收波束信号幅度为中间波束的 k 倍,右侧接收波束信号幅度为中间波束的 1/k 倍,并设中间波束信号幅度为 1 而不失一般性,则合成后的方位向信号相当于在幅度为 1 的常规 SAR 方位向信号上叠加了一个幅度误差序列,对应的连续误差信号可近似表示如下:

$$e(t) = \frac{f}{2} \left( k - \frac{1}{k} \right) \cos \left( 2 \cdot \frac{PRF_e}{3} \cdot t + \dots \right) \quad (13)$$

其中 f 为一比例系数,对应 k = 0.5 ~ 5dB, f = 1.15。

对于相移失衡情况,仍以中间波束为基准。假设左侧波束相移比中间波束多出 φ<sub>e</sub>,右侧波束相移比中间波束少 φ<sub>e</sub>,合成后的方位向相位函数相当于在等效脉冲重复频率工作的常规 SAR 方位向相位函数上叠加了一个相位误差序列,对应的连续相位误差信号可近似写成如下形式:

$$e(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \phi_e \sin \left( 2 \cdot \frac{PRF_e}{3} \cdot t + \frac{\pi}{3} \right) \quad (14)$$

按照 3.1 节给出的系统参数,对三个接收波束的回波数据分别施加不同的幅度和相位误差,模拟增益和相移不平衡情况,改变系统工作 PRF 的值,模拟方位向采样不均匀情况,分别进行点目标成像计算机仿真。对于增益失衡情况,产生的方位向成对回波与主波之比符合图 6 所示实线曲线,主波峰

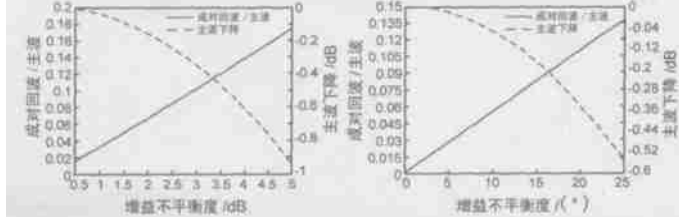


图 6 增益失衡与成对回波及主波下降的关系

值降低的倍数符合图 6 所示虚线曲线;对于相移失衡情况,产生的方位向成对回波与主波之比符合图 7 所示实线曲线,主波峰值降低的倍数符合图 7 所示虚线曲线;对于方位向采样不均匀的情况,系统工作 PRF 的误差与由此带来的方位向相位误差之间的关系如图 8(a) 所示,PRF 误差与由此引起的成对回波与主波之比的关系如图 8(b) 所示,相应的主波峰值降低情况与图 7 虚线一致。

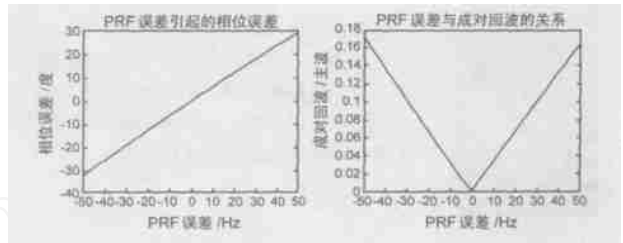


图 8 PRF 误差引起的相位误差及成对回波

仿真结果表明,当增益失衡达到 3dB 时,方位压缩输出中最大成对回波与主波之比仍能达到 20lg(0.102) = -19.8dB,而主波下降仅 0.13dB;当相移失衡达到 15 时,方位压缩输出中最大成对回波与主波之比达到 20lg(0.086) = -21.3dB,此时主波下降仅 0.2dB;当系统工作脉冲重复频率的误差达到 30Hz 时,方位压缩输出中最大成对回波与主波之比仍能达到 20lg(0.1059) = -19.5dB,主波幅度下降 0.29dB,可以满足星载 SAR 系统对成像的一般要求。从以上仿真结果可以看出,各接收通道增益相移不平衡和方位向采样不均匀对成像的影响主要表现为方位压缩产生成对回波,并使主波幅度下降,即在图像中出现模糊干扰,并使图像信噪比下降。在系统设计过程中,可以采取控制各接收通道的增益相移不平衡程度,并使定时器输出的脉冲重复频率有足够的密度,就可减小这些误差对成像的影响。

## 4 结束语

天线相位中心偏移方位多波束技术为高分辨率宽测绘带星载 SAR 系统的实现提供了技术上的可能性。本文介绍了天线相位中心偏移方位多波束技术的工作原理,分析了该技术引入的各种误差的成因以及对成像的影响,并进行了计算机仿真。本文的工作为进一步研究天线相位中心偏移方位多波束 SAR 的成像算法和系统设计具有一定的参考价值。

### 参考文献:

[ 1 ] A Currie ,M A Brown. Wide-swath SAR[J]. IEE Proceedings-F,1992, 139(2) :122 - 135.  
 [ 2 ] A Freeman ,W T K Johnson ,B Huneycutt ,R Jordan ,S Hensley ,P Siqueira J Curlander. The "Myth" of the minimum SAR antenna area constraint[J]. IEEE Trans ,2000, GRS - 38(1) :320 - 324.  
 [ 3 ] A Currie. Wide-swath SAR imaging with multiple azimuth beams[A]. IEE Colloquium on Synthetic Aperture Radar[C]. London :IEE,1989.  
 [ 4 ] D L Bickel ,B C Brock ,C T Allen. Spaceborne SAR study :LDRD '92 final report[R]. USA :Department Energy ,DE93011485,1993.  
 [ 5 ] M Suess ,B Grafmueller ,R Zahn. A novel high resolution ,wide swath

- SAR system [ A ]. IGARSS '2001 [ C ]. Sidney , Australia : IGARSS , 2001 ,3. 1013 - 1015.
- [ 6 ] 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. 140 - 153.
- [ 7 ] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京:国防工业出版社, 1984. 144 - 146.
- [ 8 ] 马晓岩,向家彬. 雷达信号处理[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1999. 84 - 96.
- [ 9 ] 曹志刚,钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1992. 27 - 34.

#### 作者简介:



李世强 男,1967 年出生于河北省东光县, 1989 年毕业于北京理工大学电子工程系,1992 年在中国电子科技集团第 54 所取得硕士学位,现为中国科学院电子学研究所博士研究生,研究方向为高分辨率宽测绘带合成孔径雷达.



杨汝良 男,1943 年出生于云南省昆明市, 1965 年毕业于成都电子科技大学雷达专业,现为中国科学院电子学研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为机载、星载合成孔径雷达系统.

www.cnki.net