

一种提高海洋 SAR 定位精度的方法

郝胜勇^{**} 王小青^{**} 盛新庆^{*} 朱敏慧^{*}

^{*}(微波成像技术国家级重点实验室 中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^{**}(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 在无参考点海洋 SAR 定位方法中, 多普勒中心频率估计对定位精度有着重要的影响。该文从理论和仿真两个角度研究了信噪比对多普勒中心频率估计的影响, 给出了多普勒中心频率和信噪比的理论及仿真关系曲线。在此基础上针对海洋回波信号较弱的特点, 在海洋 SAR 系统设计中增加一个多普勒测量模式。和普通成像模式相比, 该模式通过降低带宽的方式来提高回波的信噪比, 从而提高了定位精度。

关键词: 海洋 SAR 定位, 多普勒中心频率估计, 信噪比

中图分类号: TN959.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)08-1213-04

A Means of Improving Accuracy of Positioning for Ocean SAR

Hao Sheng-yong^{**} Wang Xiao-qing^{**} Sheng Xin-qing^{*} Zhu Min-hui^{*}

^{*}(Microwave Imaging Technology Lab, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Estimation of Doppler central frequency has an important effect to accuracy of fixed position in the fixing approach with no reference points for ocean SAR. The effect of Signal-Noise-Ration (SNR) to the estimation of Doppler central frequency has been studied using theoretical method and simulation technique, and results are given in curves. Based on above results, a Doppler measurement mode is adopted in the design of ocean SAR. Compared to common imaging mode, this mode increases SNR of ocean echo by decreasing the bandwidth, then accuracy of fixed position can be improved.

Key words Position for ocean SAR, Estimation of Doppler central frequency, SNR

1 引言

由于全天候、全天时等优点, 合成孔径雷达(SAR)已越来越成为各种侦察、监视的一个重要手段。如何利用 SAR 的回波信息对目标定位是侦察和监视的不可缺少的一步。SAR 对于目标的定位主要可分为有参考点和无参考点两种方法。前面一种方法相对比较简单, 可是多数情况下, 尤其是在海洋面上是很难找到用于图像像元定位的可靠参考点。因此对于海洋 SAR 来说, 主要是采用无参考点定位方法。一种被广泛接受的方法是利用卫星星历表和回波的距离-多普勒参数来进行目标的定位^[1]。

距离多普勒信息定位法能够比较精确的定位的前提就是可以从回波数据得到相对精确的多普勒参数。现在对于多普勒参数估计已经有很多经典的方法, 如能量均衡法、匹配相关法、最大似然法、相关函数法、符号相关法以及在图像域相应的方法等等。无论何种方法, 信噪比对于多普勒参数

尤其是多普勒中心频率都有重要影响。本文就是从理论和仿真两个角度对信噪比如何影响多普勒中心频率估计精度进行研究。并在此基础上, 针对海洋回波信号较弱的特点, 提出了一种在海洋 SAR 系统设计中, 如何提高信噪比, 从而提高定位精度的设计方法。

2 信噪比对多普勒中心频率估计的理论分析

首先假定星载 SAR 回波经过距离压缩后在同一距离门不同方位时刻的回波为

$$u_i = s_i + n_i, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中 $s_i = \zeta(i\Delta t) * \{G(i\Delta t) \exp[-j4\pi r_1(i\Delta t)/\lambda]\}$ 为信号样本, $\Delta t = 1/\text{PRF}$, PRF 为脉冲重复频率, “*” 表示卷积, $G(\cdot)$ 为天线双程增益函数, $\exp[-j4\pi r_1(i\Delta t)/\lambda]$ 为方位向的多普勒相位, $r_1(i\Delta t)$ 为天线到地面目标的斜距:

$$r_1(i\Delta t) = \sqrt{(v \cdot i\Delta t)^2 + R_0^2} \approx R_0 + v^2 \cdot (i\Delta t)^2 / (2R_0) \quad (2)$$

v 为卫星平台飞行速度, R_0 为天线到目标的最近距离。 n_i 为系统的热噪声, 一般假定为零均值的复高斯随机白噪声过程, 和信号无关。 $\zeta(i\Delta t)$ 为地面的复反射率, 由于星载 SAR 存在严重的距离迁移现象, 该项就不能简单地表示为到雷达地面轨迹等距离的等效散射系数(沿方位向各个单元), 而是有距离迁移变化的。对于扩展面目标, 可以认为等效散射系数为零均值的复高斯随机过程。因此对于均匀的场景, 比如海面, 采样的整个回波序列可以看成是一个零均值高斯随机序列, 其中的信号类似于噪声, 具有随机性。

通过证明可以得到, N 个样本的离散功率谱符合指数分布的随机过程, 并且对于均匀场景条件下, 其功率谱的概率密度为^[2]:

$$p(S_k, f_{dc}) = \frac{1}{A(k\Delta f - f_{dc})} \exp\left\{-\frac{S_k}{A(k\Delta f - f_{dc})}\right\} \quad (3)$$

这里 $\Delta f = \text{PRF}/N$ 为谱线间隔, N 为方位向采样样本数目。其均值:

$$E\{S_k\} = A_s(k\Delta f - f_{dc}) + A_n = A(k\Delta f - f_{dc}) \quad (4)$$

$A_s(k\Delta f - f_{dc})$ 为信号的先验的功率谱密度, 对于均匀场景为天线的双程功率方向图和功率反射强度的乘积。 A_n 为系统热噪声的功率谱密度。把 $A(k\Delta f - f_{dc})$ 称为名义功率谱, 它为信号和噪声的功率谱之和, 且以 $1/\Delta t$ 为周期分布。方差为

$$\begin{aligned} \text{var}\{S_k\} &= E\{(E\{S_k\} - S_k)^2\} \\ &= E\{(A(k\Delta f - f_{dc}) - S_k)^2\} = A^2(k\Delta f - f_{dc}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中信号的功率谱 $A_s(k\Delta f - f_{dc})$ 和噪声功率谱 A_n 不能分别给出, 导致接收的 SAR 中存在乘性噪声, 在图像上会表现为斑点。由上面的公式可以看出, 回波的横向功率谱形式和天线的功率方向图相一致, 二者只在幅值上相差一个常数。在天线方向图在方位向对称的假设下, 估计多普勒中心频率的原理就是找出回波横向功率谱能量中心处对应的频率, 作为多普勒中心值。因此在已知信号的功率谱后, 构造一个加权函数 $R(f)$ 与之作相关运算, 并且 $R(f)$ 以预设的 ϕ 作为中心频率, 从而有

$$D(\phi) = \sum_{k=1}^N S_k \cdot R(k\Delta f - \phi) \quad (6)$$

把满足 $D(\phi) = 0$ 时的 ϕ 作为估计的多普勒频率中心 \hat{f}_{dc} ^[3]。这里的估计既可以在时域也可以在频域里进行。根据 Parseval 理论这两者是等效的。其均值为

$$E\{D(\phi)\} = E\left\{\sum_{k=1}^N S_k \cdot R(k\Delta f - \phi)\right\} = \sum_{k=1}^N E\{S_k\} \cdot R(k\Delta f - \phi) \quad (7)$$

代入式(4)

$$E\{D(\phi)\} = \sum_{k=1}^N A(k\Delta f - f_{dc}) \cdot R(k\Delta f - \phi) \quad (8)$$

经过证明^[4], 估计 \hat{f}_{dc} 的方差为

$$\text{var}\{\hat{f}_{dc}\} = \Delta f \cdot \frac{\int [A(f)R(f)]^2 df}{\left[\int A(f)R(f)df\right]^2} \quad (9)$$

或

$$\text{var}\{\hat{f}_{dc}\} = \Delta f \cdot \frac{\int [A(f)R(f)]^2 df}{\left[\int A'(f)R(f)df\right]^2} \quad (10)$$

上面两式就是根据式(7)来估计多普勒中心频率的方差。

当取加权函数:

$$R(f) = A'(f)/A^2(f) \quad (11)$$

亦即常用的最大似然估计, 代入上面可以得到估计的方差的 Cramer Rao 界限^[5]

$$\text{var}(\hat{f}_{dc}) \geq \frac{\Delta f}{\int [A'(f)/A(f)]^2 df} = \frac{\Delta f}{\int [A'(f)/A_s(f) + A_n]^2 df} \quad (12)$$

如非特别指出, 本文中的积分均为在一个功率谱周期 PRF 上进行。 $A_s(f)$ 为信号的先验的功率谱密度, A_n 为系统热噪声的功率谱密度。

这就是基于功率谱来估计多普勒中心频率所能得到的最高理论精度。

3 信噪比对多普勒中心频率估计的实验分析

通常人们提高多普勒中心频率估计方差的方法主要集中在两个方面努力, 一方面是选用合适的加权函数 $R(f)$, 另一方面是努力减少实际目标场景的非均匀性对估计的影响。围绕着这两点, 人们已经提出了很多的算法, 比如能量均衡法、匹配相关法、最大似然法、相关函数法、符号法以及在图像域相应的估计算法。但是在式(12)界定的 Cramer Rao 界限定的情况下, 不同的估计算法并不能根本改善估计的效果。因此从分析上面的公式的基础来, 从新的途径来考虑提高多普勒中心频率估计的方差。

从式(12)的分析可以看出, 在信号先验功率谱已知的条件下, Cramer Rao 限与 Δf 和系统热噪声的功率谱密度 A_n 有直接的关系。因此利用上面的理论通过仿真来分析回波的信噪比和估计方差的关系。

仿真条件取 ERS-1 的参数:

发射信号波长 $\lambda = 0.057\text{m}$, 成像区域的斜距 $R_0 = 847\text{km}$, 卫星飞行速度 $v = 7500\text{m/s}$ 。脉冲重复频率 $\text{PRF} = 1679\text{Hz}$, 方位向采样点数 $N = 2048$, 天线横向尺寸 $D = 10\text{m}$, 均匀目标

场景，天线横向方向图函数(对应均匀照射函数)：

$$\begin{aligned} \text{频域 } G(f) &= \text{sinc}^2\left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_a}{2v}\right) \quad -\frac{\text{PRF}}{2} \leq f \leq \frac{\text{PRF}}{2} \\ \text{空域 } g(x) &= \text{sinc}^2\left(\frac{\pi \cdot x \cdot D_a}{R \cdot \lambda}\right) \quad -\frac{\lambda R}{2D_a} \leq f \leq \frac{\lambda R}{2D_a} \end{aligned} \quad (13)$$

假定场景的功率反射强度为 1，则由前面的理论得到

$$A_s(f) = G^2(f) \quad (14)$$

根据公式(1)中的第一项产生方位向回波信号，并计算出信号能量。这里均匀目标场景采用高斯白噪声产生。由信噪比和信号能量可以得到噪声的功率谱密度 A_n ，这样就可以在信号中加入相应能量的高斯白噪声，从而得到方位向回波数据。采用最大似然法可得到多普勒中心频率估计值 \hat{f}_{dc} ^[6]。经过大量的仿真，对结果求估计方差。同时利用式(12)可以计算得到估计方差的理论 Cramer Rao 界限值。同理可以得到不同信噪比下估计方差的仿真结果和 Cramer Rao 界限值。图 1 中给出了了不同信噪比下估计方差的变化曲线。考虑到通常雷达的信噪比范围在 5-8dB，这里取信噪比为 0-25dB 区间。并用标准差 $\text{std}\{\hat{f}_{dc}\}$ 来代替方差 $\text{var}\{\hat{f}_{dc}\}$ ， $\text{std}\{\hat{f}_{dc}\} = \sqrt{\text{var}\{\hat{f}_{dc}\}}$ 。

从图 1 中可以看出，无论从理论值还是仿真结果，多普勒中心频率的估计方差随着信噪比的增大而减小的趋势都比较明显。这在 0-10dB 变化区间尤为明显。而在 10dB 以后估计方差随信噪比的变化基本上趋于平缓，此时仿真结果和理论值也更为接近。这说明在低信噪比下噪声对于估计结果影响更为强烈。图中估计方差的仿真曲线有些抖动，这是由于噪声的随机现象造成的。当对无穷多的多普勒中心频率估计结果求估计方差时，抖动的现象就会消失。

图 1 的曲线是在方位向采样 2048 点的基础上计算得来的。实际工程应用中尤其是在实时成像中，大都采用较少的方位采样点进行多普勒中心频率估计，以满足运算速度的要求。图 2 给出了方位向采样点数 $N=256$ 的情形。

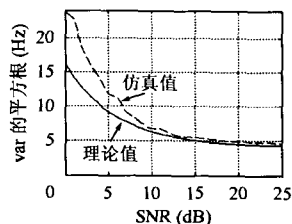


图 1 多普勒中心频率估计方差和信噪比的关系曲线 (方位向采样 2048 点)

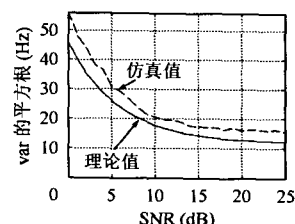


图 2 多普勒中心频率估计方差和信噪比的关系曲线 (方位向采样 256 点)

采样点数 N 减少使谱线间隔 Δf 增大，从而使频率分析精度变差。对比图 1 和图 2，可知在同一信噪比下，后者的多普勒中心频率估计方差的仿真值和理论值均比前者要大的多。这从式(12)给出的 Cramer Rao 界限中亦可以看出。

下面进一步研究采样点数对于估计方差的影响。在前面的系统参数不变的情况下，取发射信号为 L, X, C 波段，采样点数 N 为 32, 64, 128, 256，分别计算信噪比为 0dB 和 20dB 时各自相应的估计方差。结果参见表 1。这里依然使用标准差来代替方差。

从表中可以看出，发射信号的波长对于多普勒中心频率估计方差的影响很小。在不同的采样点数下，信噪比的提高均可以明显地改善多普勒中心频率。同时采样点数对于改善多普勒中心频率也有一定的效果，不过是以牺牲系统的运算速度为代价的。对于信噪比和采样点数的选取，需要在实际系统设计中进行权衡。

表 1 不同波段和采样点数 N 下信噪比在 0dB 和 20dB 多普勒中心频率估计方差结果 单位(Hz)

N	32		64		128		256		
	SNR(dB)	0	20	0	20	0	20	0	20
λ	L(0.234m)	147.4038	46.9 857	111.9690	29.9176	89.3631	20.5524	73.8568	15.3436
	C(0.056m)	126.9280	63.4026	99.9050	40.3330	66.9814	24.6280	58.7012	15.2100
	X(0.031m)	132.5437	66.4936	104.9146	40.5213	70.7557	27.3768	56.9532	17.3519
	理论值	129.4565	36.2466	91.5396	25.6302	64.7283	18.1233	45.7698	12.8151

4 一种提高海洋 SAR 定位精度的设计方法

从前面的结果可以看出,提高信噪比对于多普勒中心频率估计的精度有着直接的意义。在星载海洋 SAR 系统中,为了满足星上实时成像处理的要求,多普勒中心频率估计是在小的孔径上进行的。另一方面海洋回波信号本身就比较弱,使到达接收机的回波信号的信噪比较小。这两者都造成很大的多普勒中心频率估计方差。而在无参考点的情况下,采用距离多普勒信息定位法进行目标定位时需要从回波中提取精确的多普勒参数。下面分析信噪比对于目标定位的影响。

对于多普勒频率偏移 Δf_{dc} 和目标在方位向的偏移 Δx 有下面的关系:

$$\Delta x = \Delta f_{dc} \cdot \lambda \cdot R_0 / (2v) \quad (15)$$

其中 λ 为雷达波长, R_0 为斜距, v 为飞行平台的速度。代入前面仿真使用的 ERS 系统参数: $\lambda = 0.057 \text{ m}$, $R_0 = 847 \text{ km}$, $v = 7500 \text{ m/s}$, 得到

$$\Delta x = \frac{\Delta v \times 0.057 \times 847000}{2 \times 7500} = 3.2186 \Delta f_{dc}。$$

因此在图 2 中,如果提高信噪比从 0dB 到 15dB,则定位精度可以提高大约 100m 左右。如果反射信号为 L 波段 $\lambda = 0.234 \text{ m}$, 待入式(15)

$$\Delta x = \frac{\Delta v \times 0.234 \times 847000}{2 \times 7500} = 13.2 \Delta f_{dc}$$

从表格 1 中可以看出,对于 32 采样点数,当把信噪比提高 20dB 时,目标的方位向定位精度得到大约 10 倍改善。

因此,对于无参考点海洋 SAR 系统,提高信噪比对于定位精度的改善是一个行之有效的方法。不过提高系统自身的信噪比十分困难,代价也相当高。一个方法是在普通的成像模式外,专门设计一个多普勒测量模式。该模式和普通的成像模式不同点在于:普通模式下有用信号是海面目标比如船体的反射信号,海面反射被视为干扰;而多普勒模式下海面背景信号是有用信号,船体反射信号则被看作干扰。针对

该模式,天线需要产生一个特殊的波束。在该模式下,不使用线性调频信号作为探测信号,而是使用简单的同样持续时间的射频脉冲。同时降低发射信号带宽,并使接受设备的带宽也降低同样的水平,这样就可减少接收系统中热噪声,增加系统的信噪比。

当然这里只是给出了一个思想方法,真正应用到实际系统中还需要大量的工作要做。

5 结束语

本文研究了信噪比对多普勒中心频率估计的影响。通过理论分析给出了多普勒中心频率估计方差 Cramer Rao 界限公式,利用模拟的角度验证了的结果。最后又从提高信噪比对于提高定位精度上面进行了探讨,并给出了一个有效提高信噪比以提高多普勒中心频率估计精度的方法。

参考文献

- [1] Curlander J C. Location of pixels in spaceborne SAR imagery. *IEEE Trans. on GE*, 1982, 29(3): 359 - 364.
- [2] Pápoluis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. New York: McGraw-Hill, 1965.
- [3] Li F K, Held D N, Curlander J C. Doppler parameter estimation for synthetic aperture Radar. *IEEE Trans. on GE*, 1985, 23(1): 47 - 56.
- [4] Madsen S N. Estimating the Doppler centroid of SAR data. *IEEE Trans. on AES*, 1989, 25(2): 134 - 140.
- [5] Bamler R. Doppler frequency estimation and the Cramer_Rao bound. *IEEE on Trans. GE*, 1991, 29(3): 385 - 390.
- [6] 禹卫东. 合成孔径雷达信号处理研究. [博士论文], 南京: 南京航空航天大学, 1997 年.

郝胜勇: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 定位。

盛新庆: 男, 1968 生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为计算电磁学和微波遥感。