

文章编号: 1007-4619(2005)05-0544-05

SAR 辐射定标中的地物杂波抑制方法

王一丁¹, 涂国防¹, 洪 峻²

(1 中国科学院 研究生院信息学院, 北京 100039; 2 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

摘 要: 研究了 SAR 有源编码辐射定标技术, 提出了通过移相器进行方位信号编码, 通过混频器进行距离信号调频斜率反向的地物杂波抑制方法; 采用 RD 成像算法获得了分布目标的图像, 完成了不同分布和强度的地物杂波与定标参考目标的仿真图像, 并采用峰值方法对 SAR 辐射定标精度进行了定量研究。实验结果证明有源编码辐射定标技术能够有效地抑制地物杂波的影响, 提高 SAR 辐射定标精度。

关键词: SAR; 辐射定标; 杂波; 成像; 峰值方法

中图分类号: TP732.1 **文献标识码:** A

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 图像数据已经在地质、农业、水文、林业、海洋、制图测绘和军事侦察领域取得了广泛的应用。然而, 最初 SAR 应用只是一种定性遥感技术。在实际的应用过程中, 需要建立雷达图像与目标截面积或散射系数之间的定量关系。这种定量关系的确定, 由 SAR 辐射定标完成。对雷达图像中每一个像素的灰度值所代表的该分辨单元的雷达截面积进行精确的和正确的测定构成了 SAR 辐射定标的全部内容。国际上 SAR 系统, 如 ERS-1, SIR-C, X-SAR 和 RADARSAT 等, 都采用了辐射定标技术^[1-4]。

辐射定标技术包括定标方法、定标设备和定标场地等许多内容, 其中定标场地的选择通常要求其信杂比至少满足 20 dB 的要求^[5-7]。随着定标精度和 SAR 空间分辨率的提高, 对场地信杂比的要求会越来越高, 可能满足信杂比要求的场地很难找到, 因此实现地物杂波抑制成为解决问题的有效办法。为了解决地物杂波的抑制问题, 国外近些年开展了 SAR 有源编码辐射定标技术的研究^[8,9]。有源编码辐射定标技术通过编码调制, 可以使定标参考信号从背景杂波信号中分离出来, 提高了辐射定标精度,

同时降低了对定标场地信杂比的要求。

2 地物杂波信号对 SAR 辐射定标精度的影响

SAR 辐射定标的具体任务是测定系统总体传递函数, 系统总体传递函数的测量通常采取端对端方法。根据雷达方程, 可以得出地面定标参考目标在雷达图像中冲激响应的峰值 P_p , 系统总体传递函数 H 和地面参考目标的雷达截面积 σ 之间的关系式为^[10]:

$$P_p = H \times \sigma, \sigma = P_p / H \quad (1)$$

因此要精确地确定每一雷达分辨单元所代表的雷达截面积, 需要精确地测定系统总体传递函数 H 。端对端测量方法具体是在地面上设置 n 个已知雷达截面积 σ_n 的定标参考目标, 从图像中测定其相应的 P_{pn} 值, 做出 $P_{pn} - \sigma_n$ 的关系曲线, 这一曲线的形状就代表了 H 。

根据 SAR 成像过程的原理可以知道, 定标参考目标在雷达图像中冲激响应的峰值大小存在周围地物杂波的贡献, 因此必须考虑地物杂波对 SAR 辐射定标精度的影响。通常情况下, 要求定标参考目标放置在地势平坦、地物反射率较低的环境中, 这个定标区域总是特别选定的。然而, 在实际的过程中, 选

收稿日期: 2004-02-18; 修订日期: 2004-10-10

基金项目: 中国科学院领域前沿创新项目。

作者简介: 王一丁 (1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 1998 年毕业于南京理工大学电子工程系信号与信息处理专业, 目前的研究领域包括雷达成像技术、遥感图像应用、模式识别与智能控制等, 先后承担了国家“九五”和“十五”国防预研课题、国家自然科学基金和部委课题, 已发表论文 40 余篇, 其中 SCI 收录 1 篇, EI 收录 20 篇, 申请专利两项。E-mail ydwang@gscas.ac.cn.

定这样一个定标区域比较困难,当背景地物目标的反射率较高时,地物杂波对定标参考目标在雷达图像中冲激响应峰值大小的影响不能忽略,根据公式 $H = P_1 / \sigma$,使得端对端测量法测得的系统总体传递函数误差比较大。当地物杂波的影响不能忽略时,系统总体传递函数误差的相对误差 ϵ_p 为:

$$\epsilon_p = (|H - H_{杂}| / H) = (|P_1 - P_{杂}| / P_1) \quad (2)$$

式中, P_1 为无杂波存在时地面转发器参考目标在 SAR 图像中的冲激响应峰值大小, $P_{杂}$ 为有杂波存在时地面转发器参考目标在 SAR 图像中的冲激响应峰值大小,因此,地物杂波信号引起的辐射定标精度误差为:

$$E = 20 \times \log(1 + \epsilon_p) \quad (3)$$

为了定量说明地物杂波信号对 SAR 辐射定标精度的影响,我们进行了仿真实验。地物杂波分布分别是均匀分布和韦伯分布两种情况,结果见图 1。

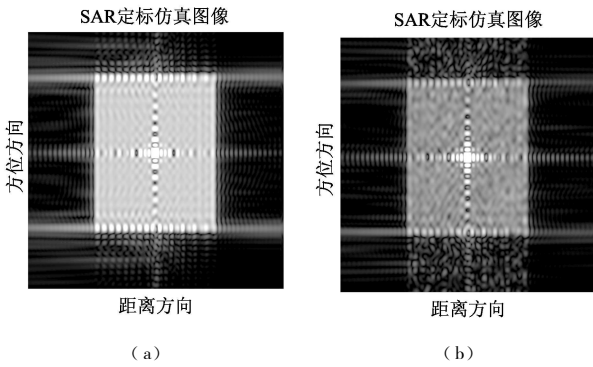


图 1 信杂比为 20dB 时定标参考目标仿真成像

(a)地物杂波为均匀分布;(b)地物杂波为韦伯分布

Fig 1 Simulated Image SCR=20dB

(a) Uniform clutter distribution; (b) Weibull clutter distribution

分析表 1 可以发现,地物杂波信号对 SAR 辐射定标精度的影响较大。如果 SAR 辐射定标精度要求小于 0.5dB,则定标参考目标与地面背景信杂比的要求一般大于 20dB,一般的场地情况不满足该条件;另外,随着 SAR 技术的发展,对辐射定标精度的要求也会越来越高,地物杂波信号对于 SAR 辐射定标的影响会更加严重。当信杂比的要求更高后,寻找满足条件的场地更加困难,因此为了从根本上提

表 1 信杂比与辐射定标精度的关系

Table 1 The relationship between SCR and radiometric calibration accuracy

信杂比 /dB	20.0	16	12	9	6
均匀分布杂波的辐射定标精度/dB	0.4327	0.6759	1.0476	1.4445	1.9690
韦伯分布杂波的辐射定标精度/dB	0.2009	0.3400	0.6557	0.7589	1.3385

高 SAR 辐射定标精度,同时降低定标场选择的难度,人们找到了 SAR 有源编码辐射定标解决方法。

3 SAR 有源编码辐射定标技术的原理

与传统有源转发器相比, SAR 有源编码转发器增加了距离信号斜率反向和方位信号编码两个环节(图 2)。来自 SAR 发射的信号被有源转发器接收到以后,首先通过混频方式使接收的线性调频信号的调频斜率反向,然后该信号通过一个受控的移相器,这样 SAR 在不同位置可以对应一组编码信号,该编码信号去控制移相器,完成接收信号在方位向上的编码。

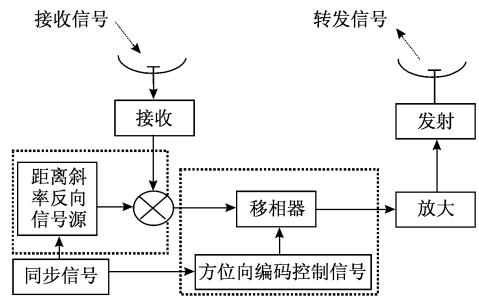


图 2 有源编码转发器的原理

Fig 2 Active coded radiometric calibration reflector

通常情况下,有源转发器的转发信号形式为:

$$v_r(s, t) = \exp\left\{-\frac{j^4 \pi R(s)}{\lambda}\right\} \exp\left\{-j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s)}{c} \right]^2\right\}, \quad \left| t - \frac{2R(s)}{c} \right| \leq \frac{\tau_p}{2} \quad (4)$$

其中, K_r 为线性调频信号的斜率, s 为雷达孔径运动时间, λ 为信号波长, c 为光速, τ_p 为 SAR 发射信号的时宽, $R(s)$ 为 SAR 随着运动时间与目标之间的距离。接收到的数据方位向离散采样,每个离散时间点为 $s_i, i=1, 2, \dots, N, N$ 为方位向采样点总数。在每一个采样点 s_i 处,回波信号的大小为:

$$v_r(s_i, t) = \exp\left\{-\frac{j^4 \pi R(s_i)}{\lambda}\right\} \times \exp\left\{-j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s_i)}{c} \right]^2\right\} \quad (5)$$

采用有源编码转发器后,接收到的 SAR 信号通过距离向调频斜率反向与方位向移相器编码两个环节,这样有源编码转发器的转发信号形式应为:

$$v_r(s_i, t) = \exp\left\{-\frac{j^4 \pi R(s_i)}{\lambda} + j \cdot \text{code} \cdot \pi\right\} \times \exp\left\{j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s_i)}{c} \right]^2\right\} \quad (6)$$

其中,距离向斜距 K_r 反向; $code$ 为方位向每一采样点处增加的码元,如果方位向进行二相编码,相移器只取 0 或 π 两个数值,对应的移相控制信号为 0 或 1 。

由于距离向调频斜率反向与方位向移相器编码操作只是针对有源编码转发器进行的,因此有源转发器所在区域的地物杂波仍为:

$$v_c(s, t) = \sum_{n=1}^N a_n \exp\left[-\frac{j^4 \pi R(s_n)}{\lambda}\right] \times \exp\left\{-j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s_n)}{c}\right]^2\right\} \quad (7)$$

其中 n 为地物杂波的单元数目, a_n 为地物杂波信号强度。

有源转发器所在区域总的回波信号为:

$$v(s, t) = v_r(s, t) + v_c(s, t) \quad (8)$$

在定标成像处理之前,总的回波信号首先进行解码。解码过程如下:

$$v_{r_解码}(s, t) = [v_r(s, t) + v_c(s, t)] \cdot \exp(-j \cdot code \cdot \pi)$$

$$= \exp\left[-\frac{j^4 \pi R(s_1)}{\lambda}\right] \exp\left\{-j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s_1)}{c}\right]^2\right\} + \sum_{n=1}^N a_n \exp\left[-\frac{j^4 \pi R(s_n)}{\lambda} - j \cdot code \cdot \pi\right] \times \exp\left\{-j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s_n)}{c}\right]^2\right\} \quad (9)$$

解码后的数据用于成像,方位向和距离向的压缩匹配滤波器分别为:

$$h_a = \exp\left\{\frac{j^4 \pi R(s_1)}{\lambda}\right\}, \quad (10)$$

$$h_r = \exp\left\{-j\pi K_r \left[t - \frac{2R(s_1)}{c}\right]^2\right\}$$

根据 h_r, h_a 的表达式,与式 (9) 的总回波结果比较,距离压缩滤波器对有源编码转发器的转发信号在距离向上满足共轭关系是匹配,对地物杂波不满足共轭关系,因此失配。在方位向上,地物杂波在每一个方位向采样点处由于解码操作引入了编码相位误差。相对于有源编码转发信号而言,方位向压缩滤波器 h_a 对地物杂波信号是失配的。显然经过成像处理,成像后的地物杂波被散焦,从而可以有效抑制地物杂波对有源编码定标参考信号成像质量的影响,有利于 SAR 辐射定标精度的提高。

4 仿真实验

我们进行了仿真,目的是通过 SAR 图像仿真手段,直观显示本文杂波抑制方法的杂波抑制效果,并

采用第二节的辐射定标峰值方法定量分析辐射定标精度的改善。图 3 是仿真流程图。SAR 图像的距离分辨率为 $2.5m$,方位分辨率为 $5m$,杂波存在区域与 ERS-1 辐射定标方法相同^[11],为 20 倍距离分辨单元 \times 20 倍方位分辨单元。在不同杂波分布,不同信杂比条件下,进行有源编码辐射定标图像的模拟(图 4,图 5),采用峰值方法定量研究地物杂波抑制后的辐射定标精度,经过 50 次实验,然后取统计平均,结果见表 2。

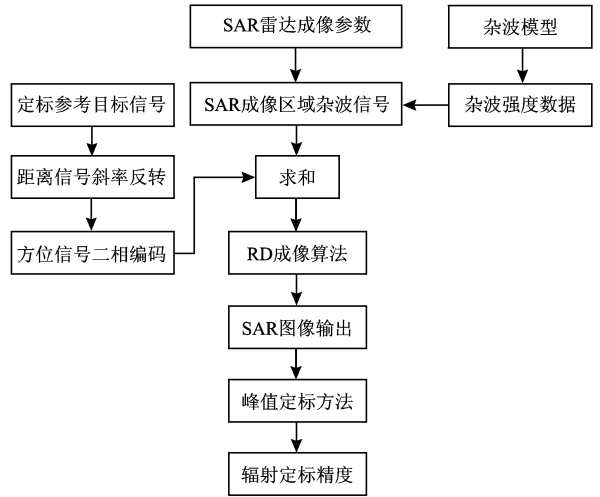


图 3 仿真流程图

Fig 3 Simulation flow chart

仿真结果如下:

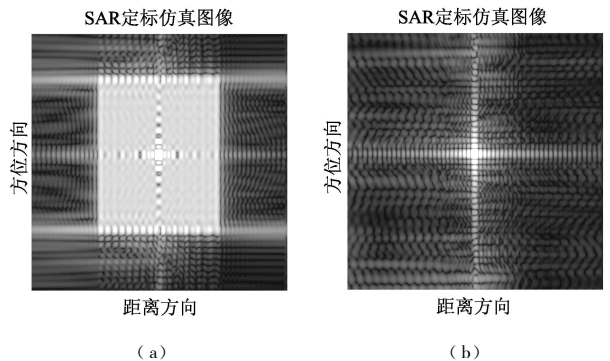


图 4 杂波均匀分布,信杂比 20dB 时的结果
(a) 杂波抑制前的定标图像; (b) 杂波抑制后的定标图像

Fig 4 Simulated results with uniform clutter distribution SCR=20dB

(a) Before clutter rejection; (b) After clutter rejection

通过比较图 4(a)和图 4(b),图 5(a)和图 5(b),可以看出,不论杂波信号是均匀分布还是韦伯分布,经过编码杂波抑制方法以后,地物杂波信号都可以被很好地抑制。在表 2 和表 1 中,杂波均匀分

表 2 信杂比与辐射定标精度的关系

Table 2 The relationship between SCR and radiometric calibration accuracy

信杂比 /dB	20.0	16	12	9	6	3	0
均匀分布杂波的辐射定标精度 /dB	0.0131	0.0207	0.0608	0.1864	0.2911	0.3590	0.4640
韦伯分布杂波的辐射定标精度 /dB	0.0067	0.0070	0.0132	0.0162	0.0176	0.1016	0.1349

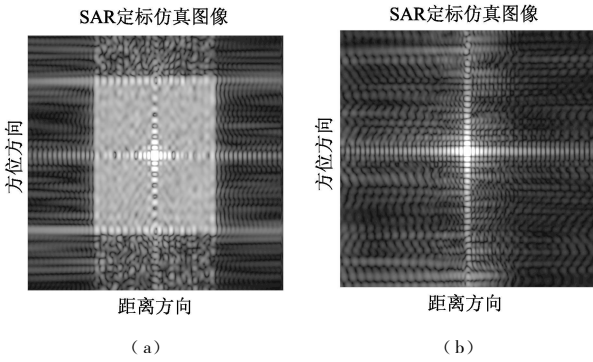


图 5 杂波韦伯分布,信杂比 20dB时的结果
(a) 杂波抑制前的定标图像; (b)杂波抑制后的定标图像

Fig 5 Simulated results with Weibull clutter distribution SCR=20dB

(a) Before clutter rejection; (b) After clutter rejection

布情况下,信杂比为 20dB时,经过编码杂波抑制方法后的辐射定标误差从 0.4327dB 减少到 0.0131dB;杂波韦伯分布情况下,信杂比为 20dB时,经过编码杂波抑制方法后的辐射定标误差从 0.2009dB减少到 0.0067dB。特别是当信杂比为 0dB时,经过编码杂波抑制方法后的辐射定标误差为 0.4640dB(表 2),由此可见同样满足辐射定标精度 0.5dB的要求,采用杂波抑制方法后,对信杂比的条件可以降低到 0dB。因此,有源编码辐射定标技术通过杂波抑制方法极大地改善了辐射定标精度,同时提高了定标场地选择的灵活性。

5 结 论

本文对 SAR 辐射定标中的地物杂波抑制方法进行了研究,提出了基于有源编码辐射定标技术的杂波抑制方法。在不同地物杂波分布和信杂比条件

下,通过 SAR 图像模拟,直观显示了杂波抑制的效果,并采用峰值方法定量分析了地物杂波对辐射定标精度的影响。本文的研究和实验结果表明,有源编码定标技术可以有效抑制地物杂波,提高辐射定标精度,开展这方面的研究工作,满足未来 SAR 技术发展的要求。

参 考 文 献 (References)

- [1] Freeman A. et al SAR-C Data Quality and Calibration Results [J]. IEEE Trans on GRS. 1995, 33(4): 848- 857.
- [2] Srivastava S.K. et al RADARSAT Image Quality and Calibration Results[A]. Proc IGASS'97 [C]. 1997; 1182- 1185.
- [3] Zink M. Bamler R. X-SAR Radiometric Calibration and Data Quality[J]. IEEE Trans on GRS. 1995, 33(4): 840- 847.
- [4] Lukowski T I et al Spaceborne SAR Calibration Studies ERS-1[A]. Proc IGASS'94 [A]. 1994; 2218- 2220.
- [5] David R Bunnfeldt et al An Active Radar Calibration Target [A]. IGASS'82[C], 1982, Vol II, TA-6, 5.1- 5.5.
- [6] Ulaby F T Microwave Remote Sensing Vol II [M]. Addison Wesley Pub Co, 1982.
- [7] Long M W. Radar Reflectivity of Land and Sea[M]. Artech House Inc, 1975.
- [8] Blotscher H. et al A New Concept of Radiometric Polarimetric and Interferometric SAR Calibration Using Coded Transponders [A]. European Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. Germany. 1998; 209- 212.
- [9] David Hounam, KarlHans Wage! A Technique for the Identification and Localization of SAR Targets Using Encoding Transponders[J]. IEEE Trans on GRS. 2001, 39(1): 3- 7.
- [10] Curlander J C. McDonough R H. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. John Wiley & Sons Inc New York 1991.
- [11] Desnos Y L Seifert F M. et al A Workstation for ERS-1/JERS-1/Multifrequency Polarimetric Calibration and Validation [J]. IEEE Trans on GRS. 1984, 22(2): 165- 169.

Clutter Rejection Method in SAR Radiometric Calibration

WANG Yi-ding¹, TU Guo-fang¹, HONG Jun²

(¹ Information Department Graduate School Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China;

² Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

Abstract SAR radiometric calibration accuracy is influenced by background clutter. In order to obtain high radiometric calibration accuracy, certain signal and clutter ratio (SCR) requirement must be satisfied or the SCR should be increased by clutter rejection method. This paper studies Active Coded Radiometric Calibration Technique (ACRCT) of SAR and a clutter rejection method based on azimuth signal phase shifter coding and presents the inversion of range signal frequency modulation. We adopted Range-Doppler imaging algorithm to simulate reference point target and distributed clutter. We also studied SAR radiometric calibration accuracy by peak value method. Experiment results prove that ACRCT could effectively restrain the influence of background clutter signal and improve the precision of radiometric calibration of SAR.

Key words SAR; radiometric calibration; clutter; image formation; peak value method