

一种非均匀环境中双端口干涉 SAR/GMTI 杂波抑制算法

吴 迪,朱岱寅,朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院,江苏南京 210016)

摘 要: 本文针对非均匀环境对杂波抑制干涉 SAR/GMTI 系统的影响,提出了一种新的自适应杂波抑制算法,利用系统参数、成像几何关系以及接收通道误差推算空域对消权系数的先验值,并将其作为约束条件来控制自适应算法的求解,从而得到对消权系数较为准确的估计值.实测数据处理结果表明,此算法能够在非均匀环境中有效地降低权系数的估计误差,从而达到满意的杂波抑制效果.是一种实际可行的双(多)端口杂波抑制方案.

关键词: 合成孔径雷达;地面动目标指示;杂波抑制干涉;恒虚警检测;非均匀

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 09-2179-05

A Clutter Suppression Algorithm for Two-Port Interferometric SAR/GMTI in Heterogeneous Environment

WU Di, ZHU Dai-yin, ZHU Zhao-da

(College of Information Science and Technology, NUA, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: According to the performance loss of a clutter suppression interferometric synthetic aperture radar ground moving target indication (SAR/GMTI) system caused by the heterogeneous environments, this paper proposes an adaptive clutter suppression algorithm. In the proposed algorithm, the priori form of the spatial cancellation weight concerning a certain pixel is calculated by using the knowledge of system parameters, imaging geometry and array errors and performs as a constraint to the process of adaptive weight solving. Estimated value of the cancellation weight with high accuracy can be obtained consequently. Experimental results are employed to verify the improved performance of clutter mitigation and the feasibility of this algorithm.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); ground moving target indication (GMTI); clutter suppression interferometric; constant false alarm rate (CFAR); heterogeneous

1 引言

对于多通道合成孔径雷达地面动目标指示(SAR/GMTI)系统,慢动目标的检测往往通过对主杂波进行抑制,从而提高目标信杂噪比(SCNR)来实现,如相位中心偏置天线(DPCA)技术^[1],空时自适应处理(STAP)技术^[2,3],沿航迹干涉 SAR/GMTI 技术^[4].其中,以美国 JS-TARS 系统^[5]为代表的多端口沿航迹干涉 SAR/GMTI 是目前达到实用阶段的一种技术.

基于杂波抑制干涉的多端口 SAR/GMTI 技术在高分辨率成像的基础上,对不同通道图像进行逐像素补偿(此补偿量即为空域对消权系数),并相减实现杂波空域对消.由于两个通道便可以实现杂波的对消,本文将重点研究双端口 SAR/GMTI 系统.研究表明,各像素单元的对消权系数可由平台运动参数及 SAR 成像几何关系等推算得出^[4].而由于实际处理中环境和系统的不确定性,某一像素单元的对消权系数往往通过相邻单元信号自适应估计得出,这种方法与自适应 DPCA 中差波束权矢量

的计算相似^[6],我们将其称为自适应 SAR/GMTI.

在自适应 SAR/GMTI 中,要求参与估计的样本信号与检测单元信号服从独立同分布(i.i.d).然而,实际环境中地貌的区域性变化,通道误差的方向性变化,干扰目标的存在等因素使得 SAR 图像中的杂波分布体现出很强的非均匀性,使得样本间 i.i.d 条件很难满足,从而导致了估计的偏差,影响杂波抑制效果.

针对这种情况,本文提出了一种基于先验约束的自适应杂波抑制算法,有效地改善了非均匀环境中的杂波抑制性能,并通过双通道 SAR 实测数据处理结果验证了此算法的有效性.

2 基于杂波抑制干涉的双端口 SAR/GMTI

设载机匀速直线飞行,雷达波长为 λ ,由全孔径发射信号,分别由沿航迹排列的前、后(相对于飞行方向)子孔径 A 、 B 接收信号,相位中心间距为 d .则地面相对于发射孔径相位中心方位角为 α ,俯仰角为 θ 的静止散射点由 A 、 B 接收的回波信号存在相位差^[4]:

$$\varphi_{AB} = \frac{2\pi d \sin \alpha \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

对两路接收数据分别进行成像处理(运动补偿均对同一成像区中心点进行)后,所得两幅 SAR 图像中,对应

像素单元中静止目标存在上述相位差.因此可以按式(1)逐像素单元推算对消系数,实现杂波抑制,图 1 给出了双端口 SAR/GMTI 的信号处理流程图.

图 1 中, $Z_1(r, a)$, $Z_2(r, a)$ 表示 A、B 孔径 SAR 图像中对应像素单元的复信号, r, a 分别为距离和方位单元序号,令 $w(r, a)$ 表示此单元对应的空域对消系数.则在理想情况下:

$$w(r, a) = e^{-j\varphi_{AB}} = e^{-j\frac{2\pi d \sin \alpha \cos \theta}{\lambda}} \quad (2)$$

利用此式逐像素补偿 B 通道 SAR 图像后,再将两通道的复图像相减可实现杂波的抑制:

$$Z_{\Delta}(r, a) = Z_1(r, a) - w(r, a) Z_2(r, a) \quad (3)$$

动目标由于径向速度引入附加的多普勒频率,在 SAR 图像中其方位位置会偏离真实位置,在对消过程中能量得以保留.因此,在杂波抑制后输出图 Z_{Δ} 中进行恒虚警率(CFAR)检测便可实现对其检测.式(2)中权系数的计算利用了系统参数和成像几何关系,并没有利用到接收信号本身的信息,是一种非自适应方案.

针对实际中环境与系统的未知性,某一像素单元的空域对消系数可由自适应方案产生.令 $I_i(r, a)$ ($i = 1, 2$) 表示无目标出现时,相邻通道 SAR 图像对应像素单元的复信号.根据最小剩余功率准则,选择满足如下条件的 $w(r, a)$,作为待检测单元的空域对消系数.

$$\min_{w(r, a)} E\{|I_1(r, a) - w(r, a) I_2(r, a)|^2\} \quad (4)$$

对式(4)求解可得:

$$w(r, a) = \frac{E\{I_1(r, a) I_2^*(r, a)\}}{E\{I_2(r, a) I_2^*(r, a)\}} \quad (5)$$

实际处理时,由于 $E\{I_1(r, a) I_2^*(r, a)\}$, $E\{I_2(r, a) I_2^*(r, a)\}$ 未知,当图像中与检测单元距离相邻的样本信号 $I_i(l, a)$ 与检测单元信号服从独立同分布时,我们可用其极大似然估计值来代替真值,从而计算每个像素单元的空域对消系数:

$$\hat{w}(r, a) = \frac{\sum_{l=r-L/2}^{r+L/2} I_1(l, a) I_2^*(l, a)}{\sum_{l=r-L/2}^{r+L/2} I_2(l, a) I_2^*(l, a)} \quad (6)$$

其中, L 为样本数目,上标 $*$ 表示共轭运算.然而,实际 SAR 图像中,杂波背景总是体现出很强的非均匀性,像素单元间的 i.i.d 条件难以满足,导致式(6)较大的估计误差,从而影响杂波对消效果,使得后续 CFAR 检测难以准确完成.

3 空域对消系数估计的新算法

由上文分析可知,非自适应与自适应算法均存在各自的缺陷:前者缺乏对系统误差与外部环境的适应性,其对消系数无法实时调整,以适应变化的环境;后者则由于实际环境的非均匀性,导致权系数较大的估计误差.针对这种情况,本文提出了一种新的杂波抑制算法,将两种方法有效地结合,从而降低非均匀环境对自适应算法的影响.

如第 2 节所述,在数据处理之前,我们首先可以根据式(2)计算每个像素单元的对消系数,这种形式的权系数可以看作对消系数的先验值.随后,我们将其作为约束条件作用于自适应算法的求解中.因此,此算法也可以看作是一种先验辅助^[7,8]的杂波抑制算法.

令 $w_0(r, a)$ 表示某一像素单元空域对消系数的先验形式,根据其准确程度,我们以不等式的形式将其作为约束条件来求解式(4),即:

$$\begin{aligned} \min_{w(r, a)} E\{|I_1(r, a) - w(r, a) I_2(r, a)|^2\} \\ \text{s.t. } |w(r, a) - w_0(r, a)|^2 \leq \delta^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中 δ^2 表示先验权系数的准确程度,在实际中,我们需要综合考虑以往的飞行经验、系统的误差程度、杂波环境的非均匀程度及系统信噪比等因素,从而合理设定 δ^2 的取值.

为了表达方便,我们在不引起混淆的情况下省略式(7)中变量的距离与方位单元序号(r, a),并令 $\rho(w) = E\{|I_1 - w I_2|^2\}$,将其展开可得:

$$\begin{aligned} \rho(w) = E\{|I_1|^2\} - w^* E\{I_1 I_2^*\} - w E\{I_1^* I_2\} \\ + w w^* E\{|I_2|^2\} \end{aligned} \quad (8)$$

做变量替换,令 $v = w - w_0$ 则式(8)可化为:

$$\begin{aligned} \rho(v) = \beta + \{-v^* E\{I_1 I_2^*\} - v E\{I_1^* I_2\} \\ + (v w_0^* + v^* w_0 + v v^*) E\{|I_2|^2\}\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 β 为与 v 无关的常量.至此方程组(7)对变量 w 的求解可化为对 v 的求解,即:

$$\begin{aligned} \min_v \{-v^* E\{I_1 I_2^*\} - v E\{I_1^* I_2\} + (v w_0^* + v^* w_0 + v v^*) \\ \cdot E\{|I_2|^2\}\} \quad \text{s.t. } |v|^2 \leq \delta^2 \end{aligned} \quad (10)$$

如前文所述,在实际中,我们无法得到 $E\{I_1 I_2^*\}$, $E\{I_1^* I_2\}$, $E\{|I_2|^2\}$ 的真实值,因此我们仍用其极大似然估计来代替式(10)中这三个量的真实值,并对式(10)求解可得:

$$\begin{cases} v = \hat{w} - w_0, & \text{当 } |\hat{w} - w_0|^2 \leq \delta^2 \text{ 时} \\ v = \frac{\delta(\hat{w} - w_0)}{|\hat{w} - w_0|}, & \text{当 } |\hat{w} - w_0|^2 > \delta^2 \text{ 时} \end{cases} \quad (11)$$

其中, \hat{w} 为上节所述的自适应对消权系数,由式(6)计算得出.因此,每个像素单元对应的约束条件下的空域对消权系数可表示为:

$$w'(r,a) = w_0(r,a) + v(r,a) \quad (12)$$

由于在对消权系数自适应求解中引入了先验值的约束条件,我们将这种方案称为先验约束的自适应 SAR/GMTI 杂波抑制方案.

4 空域对消权系数的先验形式

由上节可知,空域对消权系数先验形式的准确性对求解极为重要,本节我们将具体讨论如何在实际中得到较为准确的先验值.由于实际中接收通道间误差^[9]的存在,利用式(2)直接计算的空域对消因子的先验值并不准确,需要对其进行修正.我们考虑两种情况下的修正方法:(1)飞行前通道的非时变误差已知,即通过对天线方向图的测量,或者根据以往的飞行数据对通道误差进行估计,从而得到其值;(2)通道的非时变误差未知,即我们对天线的通道误差没有任何先验知识.对于第一种情况,可以直接利用通道的非时变误差作为误差的先验值,对空域对消权系数的理想值进行补偿,从而获得其先验形式.

对于第二种情况,需要通过接收信号对误差进行校正.关于基于接收信号的通道误差校正,以往的文献中已经提出了很多成熟的方法^[9~11],本文中,我们采取 J. Ender 提出的两维频域迭代法^[11]对数据进行处理.经校正后,通道 B 相对于通道 A 的幅向误差可表示为:

$$\epsilon = 1 + \Delta\epsilon \quad (13)$$

其中 $\Delta\epsilon$ 为经过校正后的残余误差,通常为均值为 0,方差较小的随机变量.因此,可以通过式(2)直接计算空域对消权系数的先验形式.同时,可以通过校正后的数据对 $\Delta\epsilon$ 的方差进行估计,并将其作为式(7)、(10)中 δ^2 的取值进行求解.

5 实测数据处理流程及结果

本节,我们通过对实测双通道沿航迹干涉 SAR 数据的处理对新算法进行了验证,作为对比,我们同样采用了自适应算法对数据进行了处理.实测数据主要系统参数列于表 1.

图 2 给出了先验约束的自适应双端口干涉 SAR/GMTI 动目标检测流程图.在处理中,由于没有通道误差的先验知识,我们首先采用 J. Ender 提出的二维频域迭代法^[11]对通道误差进行校正,之后,采用极坐标格式算

法^[12](PFA)进行成像处理,并对两幅图像进行了像素位置配准,图 3 给出了配准后地面区域的 SAR 图像.

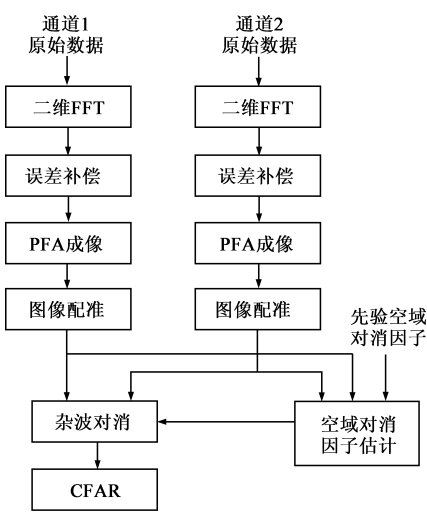


图2 先验约束双端口SAR/GMTI动目标检测流程图

表 1 系统主要参数列表

参数	参数值
系统带宽	180MHz
脉冲重复频率	1250Hz
相干处理脉冲数	1024
接收孔径间距	0.7cm
载机地速	110m/s
载机高度	5km
成像区中心点距离	34km

成像处理后,我们分别采用了自适应算法以及本文算法进行杂波抑制处理,图 4、图 5 分别给出了训练样本为 4 个时两种算法的杂波抑制输出图,为便于比较,两幅图像的色阶范围和对比度均采用了统一设置.图中,我们用白色的阿拉伯数字标出实验中配合目标(6 辆速度不同的汽车)在对消图中的位置.从图 4 中可以看出,在实际非均匀环境中,自适应算法对权系数估计的准确度不够,空域滤波器凹口位置出现偏差,表现为对消图背景中大量的杂波能量剩余,影响后续的 CFAR 检测.而采用先验约束算法却可以明显改善这一点,从图 5 中可以看出,经本文算法处理后,图像中的杂波得到了明显地抑制,6 个配合目标更显著地突出于杂

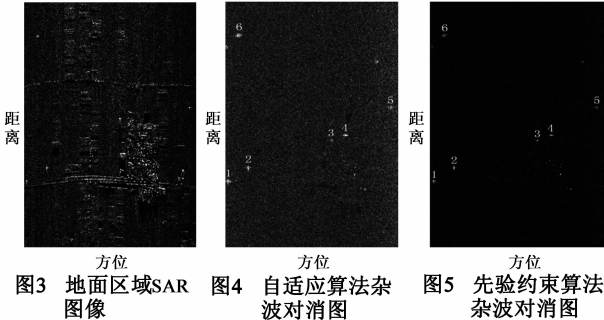


图3 地面区域SAR 图4 自适应算法杂波对消图 图5 先验约束算法杂波对消图

波背景之上,为有效的检测提供了前提.

为了进一步比较两种方案的 SCNR 改善效果,图 6 给出了不同训练样本时,配合目标 3 的对消输出剖面图.图中,我们将所有单元的输出能量对动目标输出能量进行了归一化处理.可以看出,本文算法在不同训练样本时的 SCNR 改善效果均优于自适应算法(约 7 ~ 12dB).当训练样本较少时(图 6(a)),这种改善尤为明

显,这是由于在小样本集合时,非均匀样本的存在对估计精度的影响更加明显.从图中同样可以看出,当样本逐渐增加时,自适应算法的杂波抑制效果同样有所改善,然而这种改善是以扩大样本选择范围为前提的,必然会引起样本非均匀性进一步增强,同时也会增加干扰目标的出现概率.本文的实测数据处理结果表明,当样本数为 24 时,其杂波抑制性能可达到满意效果.

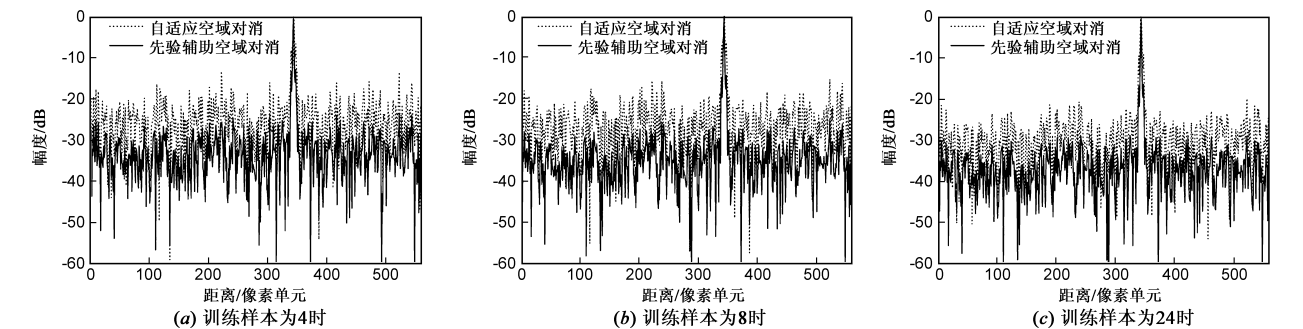


图6 杂波对消后动目标所在距离单元方位剖面图

对消处理后,我们对两种算法的输出图分别进行了单元平均 CFAR 检测,虚警概率设为 10^{-6} ,表 2 给出了具体检测结果.可以看出,与自适应算法相比,本文算法能够更好地抑制背景杂波,从而在后续 CFAR 检测中能够获得更高的检测性能.

表 2 配合目标区域 CFAR 检测结果

采用算法	训练样本数	检测数	虚警数	漏检数
自适应杂波抑制算法	4	5	29	1
	8	6	15	0
	24	6	6	0
先验约束自适应杂波抑制算法	4	6	5	0
	8	6	4	0
	24	6	1	0

6 结束语

本文针对非均匀环境对沿航迹干涉 SAR/GMTI 系统的影响,提出了一种新的杂波抑制算法.此算法利用系统参数和成像几何关系计算空域对消权系数的先验值,并作为约束条件作用于自适应估计过程中,同时具备了自适应与非自适应处理的过程:一方面,弥补了非自适应算法中由于内部系统与外部环境的不确定性造成的误差;另一方面,弥补了自适应算法中非均匀杂波环境引起的性能损耗.实测数据处理结果表明,与自适应算法相比,本文算法能够更准确地估计空域对消权系数,使得杂波抑制结果对非均匀环境具有良好的鲁棒性,是一种实际可行的双(多)端口 SAR/GMTI 杂波抑制方案.

参考文献:

[1] 王永良,陈建文,吴志文.现代 DPCA 技术研究[J].电子

学报,2000,28(6):118-121.
Wang Yong-liang, Chen Jian-wen, Wu Zhi-wen. Research on modern DPCA techniques[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28 (6): 118-121. (in Chinese)
[2] J Ward. Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar [R]. Lexington, MA: MIT Lincoln Laboratory, 1994.
[3] R Klemm. Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. London, U K: IEE Press, 2002.
[4] E Yadin. A performance evaluation model for a two port interferometer SAR-MTI[A]. Proc IEEE National Radar Conference [C]. Ann Arbor, Michigan, 1996. 261-266.
[5] J N Entzminger, C A Fowler, W J Kenneally. Joint STARS and GMTI: Past, present and future[J]. IEEE Trans on AES, 1999, 35 (2): 748-761.
[6] R S Blum, W L Melvin, M C Wicks. An analysis of adaptive DPCA[A]. Proc IEEE National Radar Conference [C]. Ann Arbor, Michigan, 1996. 303-308.
[7] J R Guerci. Knowledge-aided adaptive radar at DARPA: An overview[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23 (1): 41-50.
[8] P Stoica, J Li, X Zhu, J R Guerci. On Using a priori knowledge in space-time adaptive processing[J]. IEEE Trans on SP, 2008, 56(6): 2598-2602.
[9] M Soumekh. Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(1): 127-137.
[10] 王彤, 保铮. 提高沿航向干涉法性能的最小二乘图像对补偿方法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(12): 1484-1490.
[11] J H G Ender. The airborne experimental multi-channel SAR-system AER- II [A]. Proc EUSAR '96 [C]. Königswinter, Germany, 1996. 49-52.

[12] D Zhu, S Ye, Z Zhu. Polar format algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation[J]. IEEE Trans on AES, 2008, 44(4): 1433 – 1448.

作者简介:



吴迪 男, 1982 年 3 月出生于河南省安阳市, 现为南京航空航天大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为: 雷达信号处理和地面动目标检测。
E-mail: wudi_nuaa@yahoo.cn



朱兆达 男, 1939 年 3 月出生于山东省青岛市, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 主要研究方向为: 雷达信号检测和处理。
E-mail: zzdee@nuaa.edu.cn



朱岱寅 男, 1974 年 7 月出生于江苏省无锡市, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, IEEE 会员, 主要研究方向为: 合成孔径雷达和雷达信号处理。
E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn