

对机载单天线 SAR 实际数据进行 ATI 动目标检测的新方法

康雪艳^{1,2}, 杨汝良¹

(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: 本文给出一种基于机载单天线 SAR 实际数据进行 ATI 动目标检测的方法。该方法将单通道 SAR 数据抽样近似为两通道 ATI-SAR(Along Track Interferometric SAR)数据, 利用两通道方位向干涉进行杂波抑制, 实现动目标检测。检测结果表明, 单天线 SAR 数据的 ATI 方法对动目标检测是有效的, 在没有 ATI-SAR 实际数据情况下, 为研究 ATI-SAR 干涉算法提供了一种有效途径。

关键词: 单天线 SAR; 沿迹干涉 (ATI); 动目标检测**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0416-03

A New Method of Moving Target Detection Using ATI for Single-Antenna Airborne SAR Real Data

KANG Xue-yan^{1,2}, YANG Ru-liang¹

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

Abstract: In the paper, a new method of moving target detection for single-antenna airborne SAR real data is proposed. The method samples the real data of single-antenna SAR into the data of two-antenna ATI-SAR. The ATI is adopted to suppress clutter and to detect moving target. The detection results show that the method is effective for moving target detection, and it provides an effective way to study ATI-SAR interferometric algorithm in absence of ATI-SAR real data.

Key words: single-antenna SAR; along track interferometry; moving target detection

1 引言

运动目标检测是军用机载 SAR 需要具备的一项基本功能。对于单天线 SAR 系统, 一般假定运动目标频谱落在杂波谱之外, 对回波信号进行一定的频域滤波处理, 就可将运动目标频谱从杂波谱中分离出来, 对快速运动目标有较好的检测结果; 如果运动目标的径向速度不足以使其频率偏移超过杂波谱宽度, 必然会给运动目标检测带来困难。解决这一问题的关键就是最大限度地抑制主瓣杂波, 通过增加雷达系统空间维的信息, 将 SAR 系统由单天线扩展为多天线, 利用空间和时间两维信息, 才能有效地抑制杂波, 提取出动目标信息。美国预警飞机 E-8A 上装备的联合监视目标攻击雷达系统(JSTARS), 采用三通道杂波抑制干涉仪技术来抑制主瓣杂波, 实现对慢速目标的检测和定位, 并在海湾战争中显示了强大的效能^[1]。加拿大的 RADARSAT-2 也验证了两通道的 ATI 方法对落入主瓣杂波中的慢速目标能够获得较好的检测结果^[2]。

多通道 SAR 系统是以较大的硬件开销为代价来提高对慢速目标的检测概率。为了充分利用现有的机载单天线 SAR 实际数据, 本文给出一种基于机载单天线 SAR 数据进行 ATI 动目标检测的方法。该方法将单天线 SAR 数据抽样近似为两通道的 ATI-SAR 数据, 利用 ATI 实现运动目标检测。

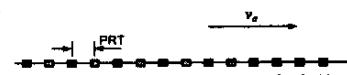
本文第 2 节分析了如何将机载单天线 SAR 实际数据近

似为两通道 ATI-SAR 数据, 第 3 节给出了用单天线 ATI 方法检测动目标的流程及实验结果。

2 新方法提出

2.1 机载单天线 SAR 数据模型

机载单天线 SAR 系统的脉冲重复频率 $prf \approx nB_d$ (对于电子所 X 波段 SAR, 满足 $2 < n < 3$), B_d 为地杂波带宽。图 1 给出该系统实际数据的获取关系



关系, 其中, v_a 是载机飞行速度, 方位向数据采样和存储的顺序

为 1、2、3、…, 两个相邻采样点对应的时间间隔为: $PRT = 1/prf$ 。通常的 SAR 成像处理是在满足 Nyquist 采样定理的前提下, 预滤波后进行成像。由此可见, 原始回波数据具有冗余信息, 即使对数据进行二抽一, 即抽取 1、3、5、… 或 2、4、6、… 进行成像, 也能满足 $prf > B_d$ 的成像要求。

2.2 单天线 SAR 数据近似为多天线 SAR 数据

多天线 SAR 在动目标检测中具有独特优点, 沿航迹干涉 SAR(ATI-SAR)是常用的一种多天线 SAR。ATI-SAR 的两天线在空间上沿平台飞行方向以固定的距离 $2B$ 分开, 地面的后向散射信号被前后两路天线分别记录, 并单独处理为两幅 SAR 复图像, 这两幅复图像测绘相同的景物, 仅存在一个短的

时间间隔,通过干涉合并为一幅 ATI-SAR 复图像,其干涉相位近似与成像区域中运动目标的径向速度分量成正比。因此,可以利用干涉相位进行运动目标检测。

本文的思路就是在分析单天线 SAR 原始数据的基础上,通过数据抽取将单天线 SAR 数据近似为双天线 SAR 数据,由于抽样所得两路数据的脉冲重复频率是未抽样前的一半,所以单天线 SAR 数据杂波带外的动目标频谱经过抽样后在两路数据中与杂波重叠,杂波对消前运动目标和静止目标无法分辨,采用两天线 ATI 方法,可以对消杂波并检测到折叠到杂波带内的动目标。对原始数据进行二抽一,抽取图 1 中的数据 1、3、5、…组成 C1 通道,抽取数据 2、4、6、…组成 C2 通道,令 C1 通道与 C2 通道相位中心的距离为 2B,对应 PRT 时间内平台的位移,即 $2B = v_a \cdot \text{PRT} \approx 0.208\text{m}$,也就是近似 ATI-SAR 干涉基线的长度。图 2 给出抽样得到的两通道 SAR 数据补偿几何关系。已知机载 SAR 系统是正侧视模式,为了使 C1 与 C2 通道的波束中心对准相同的景物,进行 SAR 成像时,C1 通道需要用一个很小的前斜视角 α 来补偿,C2 通道需要用一个很小的后斜视角来补偿,其中, $\alpha \approx B/R_0$ 。经过补偿后,就可近似认为 C1 通道与 C2 通道对应的两幅 SAR 复图像是在不同的时间对同一景物观测两次得到的。由于实际数据方位向 Nyquist 采样定理的限制,只能对原始数据进行二抽一,否则会引起 SAR 图像方位向的混叠。对于实验选取的 SAR 实际数据对应的两幅经过补偿的 SAR 复图像,计算其相关系数达 0.94 左右,可以进行 ATI 干涉处理。下面利用两天线 ATI-SAR 模型来推导 ATI-SAR 数据动目标检测原理。

2.3 ATI-SAR 数据动目标检测原理

ATI-SAR 成像几何关系如图 3 所示, x_0 为方位向坐标(平台的飞行方向), y_0 为地面的距离向坐标, $2B$ 为两天线相位中心在方位向分开了的距离。天线 A_1 和 A_2 发射、接收信号时序如图 4 所示^[3]。假设第 1 个脉冲由 A_1 发射并接收,接收的信号为 11。第 2 个脉冲由 A_2 发射并接收,接收的信号为 22。可认为经过补偿的 C1 和 C2 通道对应的复图像就相当于 11 和 22 这两路信号对应的 SAR 复图像。下面推导 11 和 22 这两路回波信号的 ATI

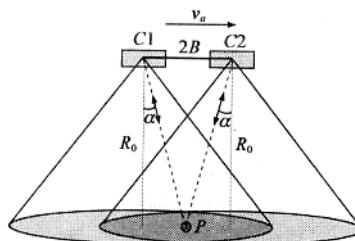


图 2 抽样两通道 SAR 数据补偿几何关系

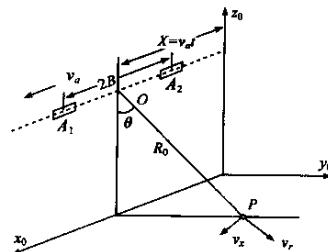


图 3 ATI-SAR 成像几何关系图

干涉动目标检测原理

参照图 3,假设地面上有一个运动点目标 P ,径向速度分量为 v_r ,方位向速度分量为 v_x ,在 t 时刻,用坐标 (x_0, y_0) 表示 P 点的位置,两天线间的中心位置 O 点到 P 点的距离表示为 R_0 , θ 为雷达入射角。天线 A_1 在时 $t_1=t-\Delta t$ 刻到达 $X=v_a t$ 的位置,而天线 A_2 在 $t_2=t+\Delta t$ 时刻到达相同的位置,这里的 $\Delta t=B/v_a$ 。我们用 $R(t_1)$ 和 $R(t_2)$ 分别表示在 $t_1=t-\Delta t$ 和 $t_2=t+\Delta t$ 时天线 A_1 和 A_2 到 P 点的双程路径。在满足 $v_x \ll v_a$, $v_r \ll v_a$ 和 $v_r \Delta t \ll R_0$ 的条件下,利用菲涅尔近似,得到 $R(t_1)$ 和 $R(t_2)$ 的表达式如下:

$$\begin{aligned} R(t_1) &= R(t-\Delta t) = 2[(v_a t - x_0 - v_x t_1)^2 + (R_0 + v_r t_1)^2]^{1/2} \\ &\cong 2R_0 + 2v_r(t-\Delta t) + (v_a t - x_0)^2/R_0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R(t_2) &= R(t+\Delta t) = 2[(v_a t - x_0 - v_x t_2)^2 + (R_0 + v_r t_2)^2]^{1/2} \\ &\cong 2R_0 + 2v_r(t+\Delta t) + (v_a t - x_0)^2/R_0 \end{aligned} \quad (2)$$

当天线 A_1 和 A_2 在位置 X 时,天线 A_1 和 A_2 的接收信号经过同步检波和距离压缩后对应的基带信号分别为:

$$S_1(t_1) = C_0 \exp\{-jkR(t_1)\} = C_0 \exp\{-jkR(t-\Delta t)\} \quad (3)$$

$$S_2(t_2) = C_0 \exp\{-jkR(t_2)\} = C_0 \exp\{-jkR(t+\Delta t)\} \quad (4)$$

这里的常数 C_0 是由目标的后向散射系数和天线的双程方向图决定的, k 是雷达发射电磁波的波数。将距离压缩后的两路基带信号 $S_1(t_1)$ 和 $S_2(t_2)$ 与方位向的匹配滤波器 $h(t)$ 进行卷积。

$$h(t) = \exp\left[j \frac{k}{R_0} (v_a t)^2\right] \quad (5)$$

通过匹配滤波,天线 A_1 和 A_2 输出的相应复 SAR 图像为 $i_1(t_1)$ 和 $i_2(t_2)$,将前路图像数据取共轭与后路图像数据相乘,得到干涉后的 INSAR 复图像具有如下形式:

$$\begin{aligned} I(t) &= i_1^*(t-\Delta t) i_2(t+\Delta t) \\ &= C \exp(jk \cdot 2v_r \cdot 2\Delta t) \cdot \{T_s \operatorname{sinc}[kT_s \cdot (v_a^2 t / R_0 \\ &\quad - v_x t_0 / R_0 - v_r)]\}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

这里的常数 C 是与目标的后向散射系数和天线的双程方向图有关的一个常数,包含 C_0 和常数相位。 T_s 表示 ATI-SAR 每幅复图像的积分时间(即合成孔径时间)。分析式(6),得到 INSAR 复图像的相位,即干涉相位与运动目标的径向速度分量关系为:

$$\Delta\phi = k \cdot 2v_r \cdot 2\Delta t \quad (7)$$

运动目标的地面距离向速度 v_{gr} 为:

$$v_{gr} = \frac{\Delta\phi}{2k \cdot 2\Delta t \sin\theta} = \frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{4\pi} \cdot \frac{v_a}{2B \cdot \sin\theta} \quad (8)$$

分析式(7),如果运动目标的 $v_r \neq 0$,则干涉相位 $\Delta\phi \neq 0$ 。对于静止目标 $v_r = 0$,则干涉相位 $\Delta\phi = 0$,因此根据干涉相位的信息,就可以对消地杂波,提高动目标的信杂比,以实现动目标的检测。

3 运动目标检测

3.1 实现流程及步骤

图 5 给出机载 SAR 实际数据 ATI 处理的基本流程,主要步骤为:

(1)首先对单天线 SAR 回波数据进行二抽一,将数据分为 C1 和 C2 两路信号;

(2)对 C1 和 C2 两通道信号分别进行多普勒中心补偿的 SAR 成像处理,使两幅复图像相位中心尽可能对准;



图 4 天线 A_1 和 A_2 发射、接收信号时序图

(3) 将复图像 1 的数据取共轭与复图像 2 的数据相乘, 得到 INSAR 复图像数据 $I = i_1^* \cdot i_2$, 为了减小相位噪声, 还需要对 INSAR 复图像进行多视处理^[4].

(4) 最后是 CFAR(恒虚警)检测门限的确定. 从理论上分析, 对于静止目标(杂波), INSAR 复图像的干涉相位应该为零, 但由于热噪声、相位噪声和其他系统噪声的存在以及对消剩余杂波的存在, 需要确定一个合适的检测门限, 使得相位和幅度大于门限的运动目标能被检测到. 检测门限的确定需要采用经验拟合的方法, 见参考文献[2]. 将实部数据等间隔划分, 得到每一部分的虚部直方图, 然后求出各部分虚部的方差 σ (认为虚部服从高斯分布), 再根据给定的虚警概率 P_{fa} , 计算出各部分对应的虚部 y_0 的值, 由此得到一组 (x, y) 点, 可以用这组 (x, y) 点拟合出一条曲线, 该曲线就是 CFAR 检测门限. 其中, 虚警概率和虚部的关系为^[2]:

$$P_{fa} = 2 \cdot \int_{y=y_0}^{y=\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma^2}\right) / \int_{y=-\infty}^{y=\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$

在式(9)中系数 2 是考虑了高斯分布的对称性.

3.2 运动目标检测结果

下面通过对机载单天线 SAR 实际数据的处理实验来检验这种新方法对运动目标检测的效果. 实验选取了一条公路附近的数据, 通道 1 对应的 SAR 幅度图像如图 6 所示, 图像大小为 600×370 像素(方位向 \times 距离向, 图像的水平方向为方位向). 利用 ATI 方法, 按照 3.1 节所述步骤, 得到了图 7 所示的运动目标检测结果. 比较图 7 和图 8, 可见单天线 SAR 数据的 ATI 方法也能得到较好的运动目标检测结果.

由于单天线 SAR 数据经过抽样后在时间维上的采样数比原来减小了一半, 相当于两天线 ATI-SAR 数据的采样频率降低为原来的一半, 所以经过抽样后单天线数据杂波带外的运动目标频谱在两路数据中与杂波重叠, 杂波对消前运动目标和静止目标无法分辨. 分析 ATI 干涉前后复图像的相位

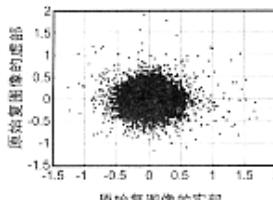


图 9 干涉前复图像 1 相位的分布

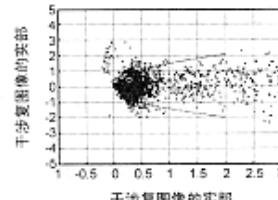


图 10 干涉后 INSAR 复图像相位的分布



图 6 通道 1 对应 SAR 幅度图像



图 7 ATI 方法动目标检测结果



图 8 滤波法动目标检测结果

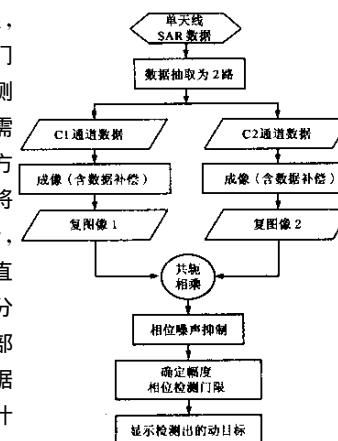


图 5 实际数据处理流程

分布, 图 9 给出了干涉前复图像 1 的相位分布, 目标完全被淹没在杂波和噪声中, 不可能进行动目标检测. 图 10 给出了 ATI 方法干涉后干涉 SAR 复图像的相位分布, 同时还显示出恒虚警检测门限. 从图 10 可见大部分杂波都被对消, 仅由于噪声和对消剩余杂波的存在, 主瓣杂波围绕零相位轴发生弥散, 通过选定合适的 CFAR 检测门限, 相位和幅度大于门限的运动目标就能被检测到.

4 结论

本文给出了一种机载单天线 SAR 实际数据的动目标检测新方法, 对于方位向过采样的单天线 SAR 数据, 该方法将实际数据抽样近似为两通道的 ATI-SAR 数据, 然后应用 ATI 的方法实现杂波抑制和动目标检测, 为利用单天线 SAR 数据研究 ATI 干涉算法提供了一种有效途径.

参考文献:

- [1] N E John. JointSTARS and GMTI past, present and future [J]. IEEE Trans, 1999, AES-35(2): 748-761.
- [2] S Chiu, C Livingstone, T Knight, I Sikaneta. Computer simulations of Canada's RADARSAT2 GMTI [A]. RTO SET Symposium[C]. Greece, 2000: (45-1)-(45-8).
- [3] R E Carande. Estimating ocean coherence time using dual-baseline interferometric synthetic aperture radar [J]. IEEE Trans, 1994, GRS-32(4): 846-854.
- [4] J S Lee, K W Hoppel, S A Mango, A R Miller. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery [J]. IEEE Trans, 1994, GRS-32(5): 1017-1028.

作者简介:



康雪艳 女, 1975 年出生于山西省兴县, 中科院电子所通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向: 合成孔径雷达运动目标检测与成像技术. E-mail: kangxueyan@sina.com.



杨汝良 男, 1943 年出生于云南省昆明市, 研究员, 博士生导师, 三十多年来从事航空航天电子系统工程研究与研制工作, 现为中国科学院联合遥感中心理事, 中国通讯学会无线通信委员会委员, 中国航空学会雷达与制导专业委员会委员, 中国科学院电子所成像雷达系统部主任, 中国电子学会高级会员, 研究方向: 微波遥感, 星载和机载合成孔径成像雷达系统.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>