

# 机载多通道天线 SAR 自适应杂波抑制

李春升 陈杰 周荫清

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘要:** 本文通过分析多通道天线 SAR 的空间几何关系, 建立了完善的多通道天线 SAR 回波信号模型, 提出了基于相控阵天线空域阵元混迭式结构形成多个接收通道天线的多通道天线 SAR 自适应杂波抑制方法和实现结构。理论分析和计算机仿真结果表明, 利用多通道天线技术并结合时空二维自适应杂波抑制技术, 可以在进行机载 SAR 成像中对慢速运动目标具有良好的检测性能。

**关键词:** 合成孔径雷达; 时空二维自适应信号处理; 杂波抑制

**中图分类号:** TN959    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0093-02

## Airborne Multi-channel Antenna SAR Adaptive Clutter Suppression

LI Chun-sheng, CHEN Jie, ZHOU Yin-qing

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** On the basis of multiple-channel antenna SAR geometry relation, a completed multi-channel antenna synthetic aperture radar (SAR) echo signal model is built and the multi-channel antenna SAR adaptive clutter suppression method and practical structure based on phased array antenna forming multiple receiving channel antenna using the spatial element repetition structure are presented in this paper. Conclusion can be drawn from theoretical analysis and computational simulation that it can achieve good low speed moving target detection performance in airborne SAR imaging by combining multiple channel antenna technology with spatial-temporal adaptive clutter suppression technology.

**Key words:** synthetic aperture radar; spatial-temporal adaptive signal processing; clutter suppression

## 1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种全天候、全天时的微波遥感成像雷达, 具有良好的空间分辨率和辐射分辨率。作为高科技侦察手段,SAR在军事应用领域有着非常重要的作用。但常规 SAR 系统不具备在一幅成像场景中检测出动目标的能力, 运动目标只能以模糊目标形式叠加在 SAR 图像上, 并且不能相对于静止的地面背景定位, 而在许多 SAR 图像应用中, 人们希望能够检测出运动目标并能聚焦成像。在 SAR 成像基础上, 进行运动目标检测与成像, 使 SAR 具有对地面运动目标和固定目标进行探测、定位、分类和跟踪的能力, 并产生高分辨力的雷达图像, 一个重要问题就是杂波抑制。

多通道天线合成孔径雷达技术是新一代 SAR 系统的发展方向。多通道天线利用了有源相控阵天线的特点, 采用时间二维自适应信号处理技术, 并结合先进的 SAR 成像处理方法, 可以进一步提高 SAR 对地观测的性能。机载多通道天线 SAR 在完成地面静止目标高分辨率成像处理的同时, 进一步完成对运动目标的检测、参数估计和成像处理, 同时完成抗干扰、动目标方位校正、平台运动速度补偿、杂波和干扰抑制等。

基于时空二维自适应信号处理的多通道天线 SAR 技术是在机载 SAR 成像处理基础上的进一步深化和时空二维自适应信号处理应用的扩展。研究基于时空联合处理的多通道天线 SAR 技术不仅可以扩展 SAR 的功能, 而且能扩大时空二维自适应信号处理的应用领域。

## 2 多通道天线 SAR 时空二维信号模型

如图 1 所示, 沿载机飞行方向摆放了  $K$  个天线方向性图相同的天线, 间隔为  $d$ , 载机飞行速度为  $v_a$ 。根据空间几何关系, 目标 A 与载机相对距离随时间  $t$  的变化规律为

$$R(t) = R_0 - v_a t \cos\psi + [(v_a t)^2 / (2R_0)] \sin^2\psi$$

设第  $i$  个天线发射信号, 第  $k$  个天线接收信号, 则地面目标 A 的相位变化规律为

$$\Phi(t) = (2\pi/\lambda)[R_i(t) + R_k(t)]$$

其中  $R_i(t) + R_k(t) \approx 2[R_0 - v_a t \cos\psi + [(v_a t)^2 / (2R_0)] \sin^2\psi] - (i-1) \cdot d \cos\psi - (k-1) \cdot d \cos\psi$

从上式可以看出,  $\Phi(t)$  与收发天线的位置有关, 相差一个与  $i, k$  有关的相位。

设机载 SAR 有  $K$  个天线方向性图相同的天线, 每一个天

线均同时发射线性调频脉冲串,  $a(t)$  是宽度为  $\Delta$  的矩形函数,  $C$  为光速,  $T_p$  为脉冲重复周期,  $\phi(t) = \pi b t^2$ ,  $b$  为调频率. 令  $x = m \cdot v_a \cdot T_p, r = (1/2) \cdot C \cdot \tau, \tau$  为回波延迟时间, 则多通道天线 SAR 的脉冲响应为

$$h_k(x, r) = h_{kr}(x, r) * h_r(x, r), k = 1, 2, \dots, K$$

式中  $*_r$  表示关于  $r$  的卷积, 且

$$\begin{aligned} h_{kr}(x, r) &= \sum_{i=1}^K W_a(x) \exp\left\{\frac{j2\pi d(i-1)}{\lambda}\right\} \exp\left\{\frac{j2\pi d(k-1)}{\lambda}\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R(x)\right\} \cdot \delta[r - R(x)] \\ h_r(x, r) &= (2/Cv_a)a(r) \exp\{-j\varphi(r)\} \end{aligned}$$

地面目标  $\sigma(x, r)$  回波信号为

$$s_k(x, r) = \sigma(x, r) W_r(r) * h_k(x, r) = \int \int \sigma(x - x_1, r - r_1) \\ \cdot W_r(r - r_1) h_k(x_1, r_1) dx_1 dr_1, k = 1, 2, \dots, K$$

式中  $*$  为关于  $x$  和  $r$  的二维卷积,  $W_r(r)$  为距离向天线方向性函数, 且每一天线的距离向方向性函数相同. 可以看出, 多通道天线 SAR 回波信号具有二维卷积的形式.

### 3 机载多通道天线 SAR 自适应杂波抑制实现方法

空域波束形成可以通过空域变换矩阵  $\mathbf{T}_s$  完成,  $\mathbf{T}_s$  为一  $N \times 4$  维矩阵, 这种变换是全自适应处理的一种降维处理. 空域变换矩阵  $\mathbf{T}_s$  和时域变换矩阵  $\mathbf{T}_t$  分别表示为

$$\mathbf{T}_s^H = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_{N-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_2 & \cdots & s_{N-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_1 & s_2 & \cdots & s_{N-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_1 & s_2 & \cdots & s_{N-3} \end{bmatrix}_{4 \times N}$$

$$\mathbf{T}_t^H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{M \times M}$$

进行自适应处理的数据可以是距离维脉冲压缩后的数据, 也可以是对应每一通道方位处理后的数据, 即 SAR 图像数据. 但是, 由于 SAR 图像数据是对于地面静止目标(对于动目标是杂波)进行匹配处理获得的, 因此, 对于动目标来讲是失配的. 匹配处理后的数据可以提高信噪比, 但信杂比没有提高, 反而下降. 因此, 当杂噪比较高时, 采用回波数据进行自适应信号处理是比较现实的.

设时空二维信号矢量为  $\mathbf{X}$ , 这样, 先对数据作变换形成多通道 SAR 数据, 以便在降维的子空间内处理, 变换后的时空二维信号矢量为

$$\mathbf{X}_T = (\mathbf{T}_s \otimes \mathbf{T}_t)^H \mathbf{X}$$

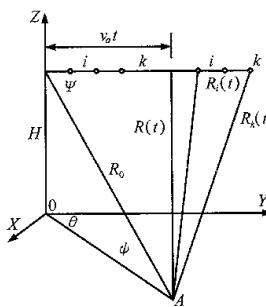


图 1 多通道天线 SAR 与地面目标的空间几何关系

这里假设  $\mathbf{X}_T$  为距离压缩后的数据.

二维导向矢量为

$$\mathbf{S}_T = (\mathbf{T}_s^H \mathbf{S}_s) \otimes (\mathbf{T}_t^H \mathbf{S}_t)$$

经过以上的处理后, 自适应权满足

$$\begin{cases} \min \mathbf{W}_T^H \mathbf{R}_T \mathbf{W}_T \\ \text{s. t. } \mathbf{W}_T^H \mathbf{S}_T = \text{常数} \end{cases}$$

因此, 自适应权为

$$\mathbf{W}_T = \mu \mathbf{R}_T^{-1} \mathbf{S}_T$$

最优处理器信噪比增益为

$$G_{SNR} = [(\mathbf{T}_s^H \mathbf{S}_s) \otimes (\mathbf{T}_t^H \mathbf{S}_t)]^H [(\mathbf{T}_s \otimes \mathbf{T}_t)^H \mathbf{R}_x (\mathbf{T}_s \otimes \mathbf{T}_t)]^{-1} \\ \cdot [(\mathbf{T}_s^H \mathbf{S}_s) \otimes (\mathbf{T}_t^H \mathbf{S}_t)] \cdot \frac{P_{ni}}{P_{si}}$$

### 4 计算机仿真结果

对于正侧面阵多通道天线 SAR, 设主要参数为阵面天线  $N = 63$  列,  $P = 8$  行, 杂噪比  $CNR = 40$  dB, 天线指向  $\theta_0 = 90^\circ$ , 作用距离  $R_0 = 16$  km, 雷达平台高度  $H = 8$  km, 速度  $v_a = 150$  m/s, 波长  $\lambda = 0.2$  m, 脉冲重复频率  $f_r = 300$  Hz, 阵元幅相误差  $\sigma_a = \sigma_p = 0.05$ .

图 2 给出了的单通道天线与多通道天线 SAR 在信号域(长度  $M = 64$ )进行自适应杂波抑制的性能曲线. 可以看出, 多通道天线 SAR 的杂波抑制性能明显改善.

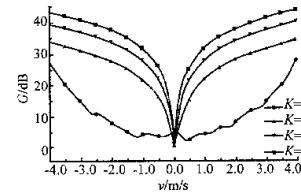


图 2 单通道天线和多通道天线的杂波抑制性能曲线

图 3 给出四通道天线 SAR 不同孔径长度(不同回波信号长度)进行自适应杂波抑制性能曲线. 从仿真结果可以看出, 孔径长度对多通道天线 SAR 的杂波抑制性能有明显影响. 从仿真结果可看出, 四通道天线 SAR 在信号域进行自适应杂波抑制, 不需要很长的孔径数据就可以获得很好的杂波抑制性能.

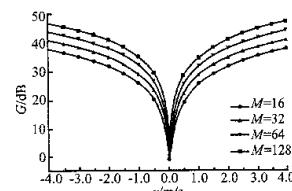


图 3 四通道天线条件下不同时间采样的杂波抑制性能曲线

### 5 结论

由于单通道天线 SAR

几乎不可能对慢速运动目标进行检测, 因此, 提出了基于时空二维自适应处理的多通道天线 SAR 概念和方法. 理论分析和计算机仿真表明, 利用多通道天线技术并结合时空二维自适应杂波抑制技术, 可以在进行机载 SAR 成像中对慢速运动目标有良好的检测性能. 论文内容是时空二维自适应信号处理技术应用的拓广, 所得出的结论对时空二维自适应信号处理的更广泛应用具有非常重要的意义.

(上接第 94 页)

## 参考文献

- [ 1 ] R.Klemm. Current trends in SAR technology-an overview of EU-SAR'96. 1996 CIE International radar conference, Beijing, China: 1~4
- [ 2 ] W.Keydel. SAR technique and technology, its present state of the art with respect to user requirements. EUSAR ' 96: 26 ~ 28,

March, 1996:19

- [ 3 ] D.Sicard. RAMSES airborne SAR development status and experiments. EUSAR'96:26~28, March, 1996:45
- [ 4 ] A.Freeman, D.Evans and J.J.van Zyl. SAR Applications in the 21st Century. EUSAR'96:26~28, March, 1996:25
- [ 5 ] S.Barbarossa and A.Farina. Space-time frequency processing of synthetic aperture radar signal. IEEE Trans on AES 30(2), 1994: 341~358

## 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](http://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](http://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](http://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>