

# 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

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

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

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  $\tau$  的矩形函数,  $C$  为光速,  $T_p$  为脉冲重复周期,  $\phi(t) = bt^2$ ,  $b$  为调频率. 令  $x = m \cdot v_a \cdot T_p$ ,  $r = (1/2) \cdot C \cdot \tau$ , 为回波延迟时间, 则多通道天线 SAR 的脉冲响应为

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

式中  $*$  表示关于  $r$  的卷积, 且

$$h_{kx}(x, r) = \sum_{i=1}^K W_a(x) \exp\{j2\pi d(i-1)\} \exp\{j2\pi d(k-1)\} \exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R(x)\} \cdot [r - R(x)]$$

$$h_r(x, r) = (2/Cv_a) a(r) \exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R(x)\}$$

地面目标  $(x, r)$  回波信号为

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

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  $T_s$  完成,  $T_s$  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  $T_s$  和时域变换矩阵  $T_t$  分别表示为

$$T_s^H = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_{N-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_2 & \dots & s_{N-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_1 & s_2 & \dots & s_{N-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_1 & s_2 & \dots & s_{N-3} \end{bmatrix}_{4 \times N}$$

$$T_t^H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{M \times M}$$

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  $X$ , 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

$$X_T = (T_s \otimes T_t)^H X$$

这里假设  $X_T$  为距离压缩后的数据.

二维导向矢量为

$$S_T = (T_s^H S_s) \otimes (T_t^H S_t)$$

经过以上的处理后, 自适应权满足

$$\begin{cases} \min W_T^H R_T W_T \\ \text{s. t. } W_T^H S_T = \text{常数} \end{cases}$$

因此, 自适应权为

$$W_T = \mu R_T^{-1} S_T$$

最优处理器信噪比增益为

$$G_{SNR} = [ (T_s^H S_s) \otimes (T_t^H S_t) ]^H [ (T_s \otimes T_t)^H R_s (T_s \otimes T_t) ]^{-1} \cdot [ (T_s^H S_s) \otimes (T_t^H S_t) ] \cdot \frac{P_{si}}{P_{si}}$$

### 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 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.

### 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.

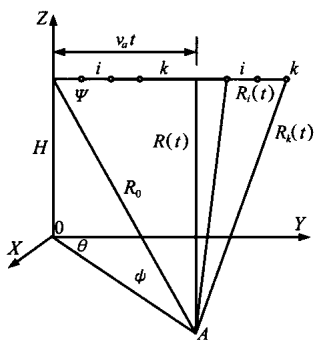


图 1 多通道天线 SAR 与地面目标的空间几何关系

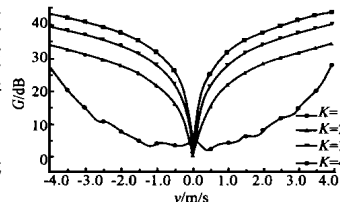


图 2 单通道天线和多通道天线的杂波抑制性能曲线

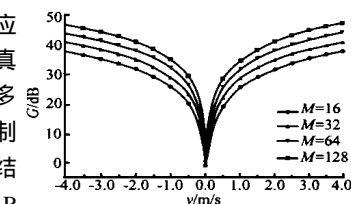


图 3 四通道天线条件下不同时间采样的杂波抑制性能曲线

为 1.5 时,工作状态对电流不敏感,起振电流较高,效率太低.通过计算我们还发现,工作状态对磁场很敏感,必须适当选取,电压取为 45kV 是较理想的.

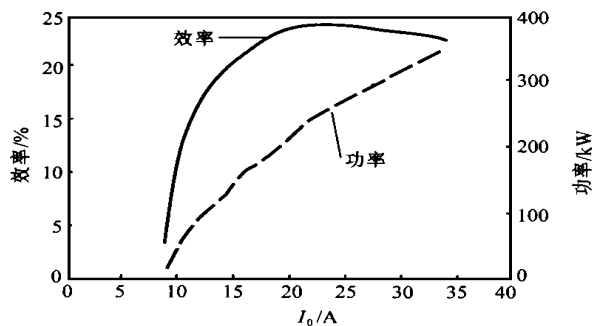


图 6  $U_0 = 45kV$ ,  $B_0 = 0.442T$  时,效率、输出功率与注电流之间的关系

## 5 结论

用动力学理论和自治非线性理论分析计算了一只 35GHz 三次谐波突变结构复合腔回旋管,发现三次谐波回旋管的工作状态对磁场很敏感,必须选取适当,工作电压也必须适当选取,在一定范围适当提高工作电压可增加输出功率,当磁场 0.442T,工作电压为 45kV 时,起振电流较小,可得到 24% 的效率.对工作状态影响很大,适当增大有利于提高互作用效率和降低起振电流,计算表明取 2.0 可使三次谐波突变结构复合腔回旋管得到较理想的工作状态.

## 参考文献

- [1] 刘盛刚. 轴对称结构电子回旋谐振脉塞. 电子学报, 1982, 25 (2): 203 ~ 211
- [2] Li Hongfu, Du Pinzhong, Yang Shiwen et al. The study on Third harmonic gyrotron with complex cavity, The 21<sup>st</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves, 1996
- [3] Huang Yong, Li Hongfu, Du Pingzhong. Self-Consistent Nonlinear Theory of Third Harmonic Complex Cavity Gyrotron with Gradual Transition. Chinese Journal of Electronics, 1997, 6(4): 43 ~ 47
- [4] Huang Yong, Li Hongfu, Du Pingzhong, Liu Shenggang. Third-Harmonic Complex Cavity Gyrotron Self-Consistent Nonlinear Analysis. IEEE Trans on Plasma Science, 1997, 25(6): 1406 ~ 1412
- [5] O. Dumbrajs, E. Borie. A complex cavity with mode conversion for gyrotron, Int J Electronics, 1988, 65(3): 285 ~ 295
- [6] K. R. Chu, Theory of electron cyclotron maser interaction in a cavity at the harmonic frequencies. Phys. Fluids, 1978, 21(12): 2354 ~ 2364
- [7] 杨仕文, 李宏福. 突变结构复合腔高频场研究, 电子学报, 1997, 25(12): 43 ~ 47

黄 勇 1967 年出生, 1980 年与 1995 年分别在四川大学与电子科技大学获学士学位和硕士学位, 现在电子科技大学高能电子学研究所攻读博士学位, 主要从事相对论电子学的研究工作.

李宏福 电子科技大学高能电子学研究所教授、博士生导师. 已发表论文 90 余篇, 多次获省、部级科技进步奖和国家发明奖. 主要从事微波电子学、高功率微波、相对论电子学等领域的研究工作.

(上接第 94 页)

## 参考文献

- [1] R. Klemm. Current trends in SAR technology-an overview of EUSAR '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