doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.004

引用格式:陈磊,陈殿仁,刘颖. 一种毫米波前视合成孔径雷达成像算法[J]. 电讯技术,2014,54(8):1059-1064. [CHEN Lei, CHEN Dian-ren, LIU Ying. A Millimeter-wave Forward-looking SAR Imaging Algorithm[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(8):1059-1064.]

一种毫米波前视合成孔径雷达成像算法*

陈 磊**,陈殿仁,刘 颖

(长春理工大学电子信息工程学院,长春130022)

摘 要:针对传统正侧视和斜视雷达无法对雷达载机前方场景进行成像的缺点,提出了一种基于距离多普勒算法(RDA)的毫米波前视合成孔径雷达(SAR)成像方法。给出了系统的结构模型,分析 了系统成像原理。基于空间几何模型和回波信号形式,分析了点目标回波的多普勒历程,给出了方 位向多普勒调频率,得到各相位补偿因子和距离徒动校正公式。对成像场景大小和方位向成像分辨 率进行了详细分析,采用 MATLAB 对6个点目标进行了成像仿真,并对仿真结果中点目标峰值中心 的64×64 点切片和方位向、距离向进行了分析。理论推导和实验仿真表明,基于 RDA 的前视合成孔径 雷达可以对场景中目标有效成像且方位向成像分辨率可达到2 m,该系统可应用与侦查和制导领域。 关键词:前视合成孔径雷达;毫米波;距离多普勒;成像;前视;方位向;距离向

中图分类号:TN249:TN957.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)08-1059-06

A Millimeter-wave Forward-looking SAR Imaging Algorithm

CHEN Lei, CHEN Dian-ren, LIU Ying

(College of Electronic Information and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: For the disadvantage that the squint-looking and side-looking synthetic aperture radar (SAR) can not image the scene in front of the radar, a new millimeter-wave forward-looking SAR imaging algorithm is presented in this paper. The system architecture model is given and the system imaging principle is analyzed. Based on the spatial geometry and the pattern of echo signals, the target echo Doppler history is analyzed, the azimuth Doppler FM ratio is deduced and a Range-Doppler algorithm (RDA) is proposed. The phase compensation factors and range migration correction fomula are given. The imaging scene's size and azimuth imaging resolution are anlyzed in detail. Six points target imaging is simulated with MATLAB, 64×64 points slice of the target peak center, peak-to-sidelobe ratio(PSLR) of azimuth and range are analyzed. Simulation results demonstrate the validity of the system and the direction resolution ratio can reach 2 meters. This system can be used in the field of investigation and guidance.

Key words: forward-looking SAR; millimeter-wave; RD; imaging; forward-looking; azimuth; range

1 引 言

目前的机载和弹载合成孔径雷达(SAR)多采用 正侧视和斜视成像模式,使得雷达只能对飞行器两 侧的区域目标进行成像^[1]。德国宇航局提出了一 种能对雷达载机正前方扇形区域进行成像的新型机 载前视 SAR 系统——用于视景增强的新型区域成

 ^{*} 收稿日期:2014-01-03;修回日期:2014-07-04 Received date:2014-01-03;Revised date:2014-07-04
 基金项目:国防装备预研项目(40405050302);装备预研基金项目(9140A17010213Bq03003)
 Foundation Item: Defense Equipment Pre-research Project (No. 40405050302);Equipped Pre-research Foundation(9140A17010213Bq03003)
 ** 通讯作者: chenlei511@126. com Corresponding author: chenlei511@126. com

像雷达(SIREV)^[2]。该前视合成孔径成像雷达可对 飞行路线正前方扇形区域进行高分辨率精确成像。 文献[2]中对基于 CS 算法的前视成像算法进行了 详细推导,文献[3-4]研究了一种扇区增强视觉成 像雷达。以上文献均采用单一发射天线和多个接收 天线组成的天线阵列且接收天线随慢时间在接收天 线阵列上切换,等效于在方位向产生一个合成孔径, 该方法发射信号和接收信号的距离历程不相同,使 得成像算法变得复杂。

本文研究了一种基于毫米波收发模块阵列的前 视合成孔径雷达成像算法。首先,从前视 SAR 空间 几何结构出发,建立了点目标的雷达回波数学模型, 对点目标回波数据的方位向和距离向多普勒历程进 行了详细推导,发现前视 SAR 的多普勒中心频率与 低斜视和侧视成像模式下的多普勒中心频率与 低斜视和侧视成像模式下的多普勒中心频率相同, 并且在前视 SAR 距离多普勒(RD)算法中设计距离 向匹配滤波器时需要考虑载机运动引起的距离向上 的多普勒频移。在此基础上,给出了距离多普勒成 像算法的计算步骤,并在 MATLAB 中根据实际飞行 参数模拟了前视 SAR 点目标回波数据,对场景中的 6 个点目标进行了成像仿真和分析,结果证明该系 统可以对载机前方场景进行有效成像。

2 前视 SAR 回波数学模型

2.1 前视成像系统几何模型

毫米波前视合成孔径雷达成像系统几何示意图 如图1所示,雷达平台到地面高度z=H,雷达平台沿 x轴方向(距离像)运动,在y轴方向上(方位向)上 等间隔地分布着N个毫米波发射接收模块,每个阵 元发射和接收共用天线系统,形成 SAR 成像阵列, 该阵列以雷达平台中心为中心,即y=0,在成像过程 中,雷达平台以速度 v_r 沿x轴运动,同时,发射接收 模块沿y轴正方向以速度 v_a 依次切换。切换速率 v_a 选择为 $v_a=d/PRT=d\times PRF$,其中d为相邻两个天 线系统的距离间隔,即切换频率等于雷达脉冲重复 频率(PRF)。由于载机运动速度远小于光速,在任 一模块工作过程中,可以认为载机静止不动。对于 地面坐标为($x_0, y_0, 0$)的P点目标,在一次合成孔径 时间内,其最短斜距 R_0 只随慢时间变换,而不随快 时间变化^[5],即

$$R_0 = \sqrt{(x_0 - v_r(t_m + \tau))^2 + H^2}$$
(1)
则目标到雷达系统的斜距可以表示为

$$R_{r} = R_{t} = \sqrt{R_{0}^{2} + (y_{0} - y_{m})^{2}}$$
(2)

其中, \hat{t} 为快时间,当前工作的模块横坐标为 y_m, t_m 为慢时间,在一次合成孔径时间内可以近似表示 y_m = $v_n t_m$,即

$$R_{t} = R_{t} = \sqrt{R_{0}^{2} + (y_{0} - v_{a}t_{m})^{2}}$$
(3)



图 1 前视 SAR 成像系统几何示意图 Fig. 1 Forward-looking SAR geometric diagram

雷达点目标回波信号经过下变频之后,得到基 带信号为

 $s_r(t) = A_0 \omega_r(\tau - 2R_r/c)$

2.2 方位多普勒域频谱

式(5)中有两个相位项,第一项表示方位向相 位变化,第二项表示距离向相位变化,方位向相位函 数可表示为

$$\theta_a = -4\pi \frac{\sqrt{R_0^2 + (y_0 - v_a t_m)^2}}{\lambda} \tag{6}$$

对式(6)求导:

$$\frac{\mathrm{d}\theta_a}{\mathrm{d}t_m} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_0 v_a - v_a^2 t_m}{\sqrt{R_0^2 + (y_0 - v_a t_m)^2}} \tag{7}$$

· 1060 ·

由于
$$(y_0 - v_a t_m)^2 << R_0^2$$
,所以式(7)可以简化为

$$\frac{\mathrm{d}\theta_a}{\mathrm{d}t_m} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{y_0 v_a - v_a^2 t_m}{R_0} \tag{8}$$

由式(8)可得方位向多普勒频率为

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\mathrm{d}\theta_a}{\mathrm{d}t_m} \approx \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{y_0 v_a - v_a^2 t_m}{R_0} \tag{9}$$

由公式(9)可知,由于 R₀ 为慢时间函数,所以 不同模块的回波多普勒历程不同,方位向多普勒调 频率为

$$K_a = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{v_a^2}{R_0} \tag{10}$$

2.3 距离多普勒域频谱

侧视成像系统中,由于雷达在距离向上没有运动 速度,所以距离向的多普勒历程为0,在前视 SAR 系 统中,雷达载机沿距离向以速度 v_r 做匀速直线运动, 所以在距离向上产生的多普勒频率为 $f_{dr} = 2v_r/\lambda$,在 前视 SAR 距离多普勒(RD)算法中设计距离向匹配 滤波器时需要考虑距离向上的多普勒频率。

3 前视 SAR 距离多普勒(RD)算法

3.1 距离向压缩

将驻定相位原理(POSP)直接应用于公式(5) 就能得到距离多普勒域的频谱^[1],可表示为

$$S_r(f_\tau, t_m) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(t_m, \tau) \exp(-j2\pi f_\tau \tau) d\tau \quad (11)$$

积分号中的相位为

 $\theta_r(\tau) = -4\pi R_r / \lambda + \pi K_r (\tau - 2R_r / c)^2 - 2\pi f_\tau \tau \quad (12)$ $\theta_r(\tau) 对 \tau 求导, 可得$

其中,*f*₀为毫米波载频。由于距离向载机运动造成 的距离向多普勒,所以距离向匹配滤波器频域表达 式可以写成

$$H_p(f_{\tau}) = \operatorname{rect}(\frac{f\tau}{|K_r|T_p}) \exp(j\pi(\frac{2v_r}{\lambda} + \frac{f_{\tau}^2}{K_r})) \quad (14)$$

当直接采用式(14)进行匹配滤波时,峰值旁瓣 比(PSLR)过高会淹没图像中的弱目标,本文中采用 Hamming 窗来抑制匹配滤波后信号的 PSLR。加窗 匹配滤波器频域表达式可写成

$$H(f_{\tau}) = H_{p}(f_{\tau}) \cdot H_{h}(f, |K_{r}|T) =$$

rect $(\frac{f\tau}{|K_{r}|T_{p}}) \exp(j\pi(\frac{2v_{r}}{\lambda} + \frac{f_{\tau}^{2}}{K_{r}}))$ (15)

其中,*H_h(f*, |*K_r*|*T*)为 Hamming 窗频域函数^[6]。 由式(13)和式(15)可得距离压缩输出为

$$s_{ri}(t_m, \tau) = \operatorname{IFFT}_{T}(S_r(f_{\tau}, t_m) H(f_{\tau})) = p_r(\tau - 2R_r/c) w_a \exp\{-j4\pi f_0 R_r/c\} \quad (16)$$

其中, $p_r(\tau-2R(t_m/c))$ 为 W_r 的傅里叶逆变换。

将式(2)写成迈克劳林公式形式,并省略高次 项可得

$$R_{r} = R_{t} \approx R_{0} + \frac{(y_{0} - v_{a}t_{m})^{2}}{2R_{0}}$$
(17)

将式(17)代入式(16)可以得到距离压缩信号 可近似表示为

$$s_{ri}(t_{m},\tau) = p_{r}(\tau - 2R_{r}/c) w_{a} \exp\{-j4\pi f_{0}R_{0}/c\} \cdot \exp\{-j2\pi \frac{(y_{0} - v_{a}t_{m})^{2}}{\lambda R_{0}}\}$$
(18)

3.2 方位向傅里叶变换

将距离压缩后数据进行方位向 FFT 就可以得 到距离多普勒信号,在式(18)中,第一指数项为常 量,所以距离向 FFT 可以表示为

$$S_a(f_m, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{ii}(t_m, \tau) \exp(-j2\pi f_m t_m) dt_m$$
(19)

根据 POSP 原理可知,

$$t_m = (D - f_m) / K_r \tag{20}$$

其中, $D = \frac{2y_0 v_a}{\lambda R_0}$ 为一常数因子,所以方位向傅里叶变换可以表示为

$$S_{a}(f_{m},\tau) = p_{r}(\tau - 2R_{r}/c) W_{a} \exp\{-j4\pi f_{0}R_{0}/c\} \cdot \exp\{-j2\pi \frac{(2y_{0}v_{a}^{2} - 2y_{0}v_{a} - f_{m}\lambda R_{0})^{2}}{4v_{a}^{4}\lambda R_{0}}\}$$
(21)

3.3 距离徙动校准

由于飞机在距离向以速度 v, 运动, 所以距离徙 动与 R₀ 和斜距 R, 有关。将式(20)代入式(18)可 得, 在距离多普勒域需要校准的距离徙动为

$$\Delta R = \frac{(y_0 - v_a t_m)^2}{2R_0} = \frac{K_r^2 y_0 - v_a (D - f_m)^2}{2R_0} \quad (22)$$

可以参考文献[6]给出的 sinc 插值方法对距离 徙动进行插值。

3.4 方位向压缩

由式(10)可知方位向匹配滤波器的频域形式为

· 1061 ·

方位向压缩结果可以表示为

$$s_{ar}(t_{m},\tau) = \text{IFFT}_{T}(S_{a}(f_{m},\tau)H_{a}(f_{\tau})) = A_{ar} \cdot p_{r}(\tau-2R_{0}/c)p_{a}(t_{m}) \cdot \exp\{-j4\pi f_{0}R_{0}/c\}\exp\{-j2\pi f_{m0}t_{m}\} (24)$$

其中, $p_{a}(t_{m})$ 为 w_{a} 的傅里叶逆变换, $f_{m0} = -\frac{2}{\lambda}\frac{\mathrm{d}R_{r}}{\mathrm{d}t_{m}} =$

 $\frac{2v_a(y_0-v_at_m)}{\lambda R_r}$ 为多普勒中心频率,与低斜视和侧视成

像模式的多普勒中心频率相同。

4 系统成像仿真

通过上文的分析,采用表1所示的雷达参数对 6个坐标分别为(-100,3040)、(0,3040)、(100, 3040)、(-62.5,3000)、(0,3000)、(62.5,3000) (单位:m)的点目标进行成像仿真,结果如图3~5 所示。其中图2为点目标的真实坐标,图3为目标 的回波数据,图4为系统成像结果。成像结果表明, 本文提出的毫米波前视合成孔径雷达成像系统可以 对前视场景内的目标有效成像。

Table 1 Recording parameters	
参数	取值
波长/mm	3
雷达载机飞行速度/(m・s ⁻¹)	100
发射脉冲宽度/µs	1.5
阵列个数	60
调频带宽/MHz	100
雷达高度/m	600
切换速度/kHz	10
俯视角/(°)	45
雷达波束角/(°)	24



表1 雷达工作参数



Fig. 3 Echo data of the simulated targets



为了对目标进行进一步分析,针对所有点目标, 取其成像后的方位向和距离向包络,如图 5 和图 6 所示,在图 5 中,由于中间两个目标的方位向坐标一 样,所以方位向 PSLR 中只显示 5 个峰值。同理,距 离向只出现两个峰值。从图 5 和图 6 可以看出,6 个点目标的距离向 PSLR 均约为10 dB,方位向 PSLR 均约为12 dB,可见在距离向和方位向目标聚 焦效果良好。



图 5 压缩后的距离向包络 Fig. 5 Compressed distance envelope



Fig. 6 Compressed azimuth envelope

为了对成像结果进行更加深入的分析,以图 4 中坐标为(-100,3 040)点为例,取成像结果中峰值 处 64×64 点切片进行分析,如图 7 所示,由图可以看 出距离和方位旁瓣未出现扭曲倾斜,因为本文提出 的前视合成孔径雷达成像系统的成像机制类似于正 侧视成像系统,其斜视角为 0,所以未出现距离和方 位旁瓣扭曲倾斜的问题。



Fig. 7 64×64 outline map

5 成像区域大小和成像分辨率分析

5.1 成像区域大小分析

由图1可知,前视合成孔径雷达成像区域为一 梯形,梯形的参数与载机飞行高度、天线角度、天线 下视角度和阵列长度有关,结合图1和表1的参数 可知,成像区域的上近距方位宽(梯形上边)160 m, 远距方位宽(梯形下边)360 m,距离向跨度(梯形 高)480 m。

5.2 成像分辨率分析

距离向分辨率由线性调频带宽决定^[7],此处不 再赘述。

前视合成孔径雷达天线的等效孔径如图 8

所示[1]。



Fig. 8 Equivalent aperture

参数符号如图 8 中所设,则可知整个天线阵列 的等效口径可以表示为

$$D_{f} = \sqrt{2[r^{2} + (y-d)^{2}](1-\cos\gamma)} = \sqrt{2[r^{2} + (r\tan\beta - d)^{2}](1-\cos\gamma)}$$
(25)

其中, $\tan\beta = \frac{2rd}{y^2 + r^2 - d^2} = \frac{8rd}{4r^2(1 + \tan^2\beta) - 4d^2}$ 。则方位 向分辨率可以表示为^[7]

$$\rho = \frac{\lambda}{D_f} r \tag{26}$$

由式(26)可知,前视成像系统中,目标的方位 像分辨率不但与雷达的工作参数有关,还与目标的 位置相关,从公式中可以看出,位于雷达航线上的目 标的分辨率最大。结合表 1、式(25)~(26)可知, $\rho \approx 2m_{\circ}$

方位向分辨率还可以表示为^[6,9]ρ=0.886×*IRW* =0.886×4.12=3.65个采样点数,其中*IRW*=4.12 为加窗引入的方位向展宽因子^[10]。由图7可知,仿 真结果中的目标方位向分辨率约为3.2个采样点 数,约2.1 m,与理论值吻合。

6 结 论

本文研究了一种自发自收式的毫米波前视合成 孔径雷达成像系统,雷达系统由收发共用天线系统 的毫米波发射接收模块组成,工作时,雷达随载机向 前飞行,收发阵列以一定的速度在阵元间依次切换, 发射毫米波并接收回波。文中分析了系统的成像原 理,给出了点目标的回波模型,详细推导了前视合成 孔径雷达 RD 成像算法,并采用 MATLAB 对6 点目标 进行了成像仿真,针对仿真结果中的一个点目标取峰 值处 64×64 点轮廓切片和方位向、距离向包络对成像 效果进行详细分析,发现距离和方位聚焦效果良好且 旁瓣未出现扭曲倾斜,证明该毫米波前视合成孔径雷 达成像系统可对前视场景内目标有效成像。

参考文献:

- [1] 杜汪洋,吴彦鸿,冯庆玉. 合成孔径激光雷达研究[J]. 遥测遥控,2008,29(5):33-38.
 DU Wang-yang, WU Yan-hong, FENG Qing-yu. Research on Syn thetic Aperture Laser-radar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2008,29(5):33-38. (in Chinese)
- [2] 陈琦,杨汝良. 机载前视合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像 算法研究[J]. 电子与信息学报,2008,30(1):228-232.
 CHEN Qi, YANG Ru-liang. Research of Chirp Scaling Imaging Algorithm for Air-borne Forward-looking SAR
 [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(1):228-232. (in Chinese)
- [3] Krieger G, Mittermayer J, Wendler M. SIREV-Sector Imaging Radar for Enhanced Vision [J]. Aerospace Science and Technology, 2003,7(2):147-158.
- [4] 侯海平,曲长文,向迎春. 基于 LFMICW 的机载 SAR 前视成像研究[J].电路与系统学报,2011,16(3):1-7.
 HOU Hai-ping, QU Chang-wen, XIANG Ying-chun.
 Study on forward-looking imaging of airborne SAR based on LFMICW[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(3):1-7. (in Chinese)
- [5] 张刚,祝明波,赵振波,等. 基于直线斜飞弹道的弹载 SAR 成像方案[J]. 电讯技术,2013,52(4):440-446.
 ZHANG Gang,ZHU Ming-bo,ZHAO Zhen-bo, et al. A Missile-borne SAR Image Scheme Based on Linear Slant Trajectory[J]. Telecommunication Engineering, 2013,52 (4):440-446. (in Chinese)
- [6] 李桂英,陈磊,陈宇. 高准确度多频调制激光测距算法研究[J]. 光子学报, 2011,40(12):1888-1892.
 LI Gui-ying, CHEN Lei, CHEN Yu. Research on the high -precision multi-frequency modulation Laser Range Finding algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2011,40(12): 1888-1892. (in Chinese)
- [7] Cumming I G, Wong F H. 合成孔径雷达成像-算法与实现
 [M]. 洪文,胡东辉,译. 北京:电子工业出版社,2012.
 Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation [M].
 Translated by HONG Wen,HU Dong-hui. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2012. (in Chinese)

- [8] 保铮,刑孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工 业出版社,2005:19-44.
 BAO Zheng,XING Meng-dao,WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2005:19-44. (in Chinese)
- [9] 张伟,王莉,耿健,等. 基于 Pauli 基展开的联合极化 SAR 微多普勒分析[J]. 电讯技术,2014,54(4):446-451.
 ZHANG Wei, WANG Li, GENG Jian, et al. Analysis of Micro-Doppler Combined with Polarimetric SAR Based on Pauli-basis Expansion[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(4):446-451. (in Chinese)
- [10] 祝俊,连可,和小冬,等. 基于运动干扰机的合成孔径 雷达二维移频压制干扰[J]. 电讯技术,2013,53 (4):383-388.

ZHU Jun, LIAN Ke, HE Xiao-dong, et al. 2-D Frequency-shift Suppressed Jamming to SAR Based on Moving Jammer [J]. Telecommunication Engineering, 2013,53(4):383-388. (in Chinese)

作者简介:



陈 磊(1985—),男,江苏常州人,博 士研究生,主要研究方向为雷达信号处理;

CHEN Lei was born in Changzhou, Jiangsu Province, in 1985. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns radar signal processing.

Email:chenlei511@126.com

陈殿仁(1952—),男,吉林长春人,教授、博士生导师, 主要研究方向为激光雷达成像、雷达信号处理、弱信号检测;

CHEN Dian-ren was born in Changchun, Jilin Province, in 1952. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns laser radar imaging, radar signal processing, and weak signal detection.

Email:dianrenchen@cust.edu.com

刘 颖(1983—),女,吉林省吉林市人,博士研究生,主 要研究方向为雷达信号处理、SAR 成像技术。

LIU Ying was born in Jilin, Jilin Province, in 1983. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns radar signal processing and SAR imaging technology.

Email:liuying_211@126.com