

机载前视SAR三维成像原理及分辨率分析

任笑真^{1,2}, 杨汝良¹

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 海淀区 100190; 2. 中国科学院研究生院 北京 海淀区 100190)

【摘要】提出一种新型的采用天线阵模式的机载前视合成孔径雷达(SAR)系统,分析了其三维成像原理。根据前视SAR的成像几何模型和回波信号特点给出了实现前视SAR三维成像的处理流程,详细推导了前视SAR的三维分辨率。模拟了X波段前视SAR点目标回波并进行了三维成像实验。仿真结果表明前视SAR系统能够实现三维成像,验证了本文算法的有效性。

关键词 天线阵; 前视; 分辨率; 合成孔径雷达; 三维成像

中图分类号 TN595

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.05.013

Three-Dimensional Imaging Principle and Resolutions Analysis for Air-Borne Forward-Looking SAR

REN Xiao-zhen^{1,2} and YANG Ru-liang¹

(1. The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100190;

2. The Graduate University, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100190)

Abstract In this paper, an innovative air-borne forward-looking SAR system using antenna array is studied, and three-dimensional imaging principle is analyzed. A three-dimensional imaging process is proposed for air-borne forward-looking SAR based on the image geometry and the characteristic of echo signal, and the resolutions in three dimensions are derived. Raw data of forward-looking SAR in X-band is simulated and three-dimensional image is achieved. The imaging result is analyzed, and simulation results show that the forward-looking SAR could achieve three-dimensional imaging, and also confirm the validity of the proposed algorithm.

Key words antenna array; forward-looking; resolution; synthetic aperture radar; three-dimensional imaging

合成孔径雷达具有全天候、全天时工作能力,在民用和军事领域获得了广泛的应用。越来越多的军事与民用需求已不仅仅满足于二维合成孔径雷达成像,希望对目标实现三维成像。层析成像合成孔径雷达是传统干涉合成孔径雷达的扩展,其在垂直于视线的方向依次增加多个基线,沿高度维合成一个大孔径,具有高度维分辨能力^[1-3]。然而在现有的重复飞行模式下,SAR层析成像几乎不可避免地存在航线不均匀分布的问题。不均匀的航线分布是产生成像高度模糊的主要原因^[4-5],减少航行次数则会引起模糊水平的增加或者高度分辨率的减少。

前视SAR系统是一种全新的SAR工作模式^[6-9]。前视SAR能够经过一次航行获得目标的三维像,避免了层析成像SAR航线分布不均匀带来的高度模糊问题。文献[4]首先提出了利用前视SAR系统来获得目标的三维像,并进行了初步的仿真试验。

本文分析了采用天线阵模式的前视SAR三维成像原理,根据前视SAR的空间几何关系和回波信号特点给出了实现前视SAR三维成像的处理流程,推导出了前视SAR的三维分辨率。使用X波段前视SAR系统进行了点目标仿真实验。

1 前视SAR三维成像原理

机载前视SAR系统的成像几何配置如图1a所示, x 轴表示顺轨向(即距离向), y 轴表示方位向, r 轴表示斜距向。平台在离地面高程为 H 的航线上沿 x 轴方向以速度 v 飞行。雷达各接收天线以 $y=0$ 为中心沿方位向等间隔对称分布。发射天线与接收天线阵分置,位于接收天线阵中心正下方 δh 处。飞机在飞行过程中,由位于中心处的发射天线以高的脉冲重复频率PRF发射线性调频脉冲,所有的接收天线在 y 轴上以一定的速度快速切换并依次接收回

波, 各天线收发顺序如图1b所示。为了保证发射脉冲与天线接收回波相匹配, 信号来回双程所用的时间应与接收天线切换时间一致, 即脉冲重复频率与接收天线切换频率一致。假设切换速度是 v_s , 相当于一个接收天线在方位向以同样的速度运动, 在方位向形成以线性阵列为长度的似合成孔径, 可保证方位向不模糊^[10-11]。

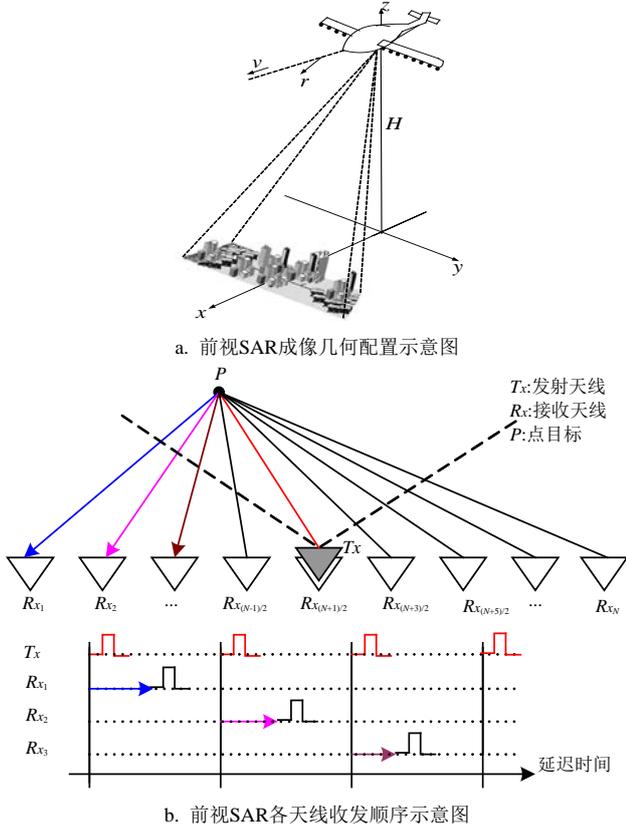


图1 前视SAR成像几何配置及各天线收发顺序示意图

图1a中, 设雷达第 n 个接收天线的空间位置坐标为 $(x_{m,n}, y_n, H)$, 其中 y_n 为第 n 个接收天线方位向空间采样位置, $x_{m,n}$ 为顺轨向空间采样位置。在发射信号的过程中, 飞机继续向前飞行, 成像区域内不同点目标的距离徙动轨迹各不相同, 距离徙动问题变得复杂。但在飞机飞行速度 v 很小, 且PRF很高的情况下, 在接收天线切换时间内, 飞机飞过的距离很小, 对成像的影响可以忽略, $x_{m,n} \approx x_m = vt_m$ 。成像区域内任一点目标 (x_p, y_p, z_p) 的发射路程 $R_{T,n}$ 和接收路程 $R_{R,n}$ 可表示为:

$$R_{T,n} = \sqrt{(x_m - x_p)^2 + y_p^2 + (H - \delta h - z_p)^2} \quad (1)$$

$$R_{R,n} = \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (y_n - y_p)^2 + (H - z_p)^2} = \sqrt{R_m^2 + (y_n - y_p)^2} \quad (2)$$

式中 $R_m = \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2}$ 。

设雷达发射的线性调频(LFM)信号为 $s(\hat{t}) = A_0 \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2} \gamma \hat{t}^2\right)\right]$, 其中, f_c 为中心频率, γ 为调频率。对于成像区域任一点目标 (x_p, y_p, z_p) , 雷达第 n 个接收天线接收的基频回波信号为:

$$s_1(\hat{t}, y_n; R_m) = a_p s\left(\hat{t} - \frac{R_{T,n} + R_{R,n}}{c}\right) \exp(-j2\pi f_c \hat{t}) \quad (3)$$

式中 a_p 为散射点雷达反射系数; c 为光速。

将式(1)和式(2)代入式(3), 化简后得:

$$s_1(\hat{t}, y_n; R_m) = A_1 \exp\left[j\pi\gamma\left(\hat{t} - \frac{2\sqrt{R_m^2 + (y_n - y_p)^2}}{c}\right)\right] \times \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{R_m^2 + (y_n - y_p)^2}\right) \quad (4)$$

式中 $A_1 = a_p A_0 \exp(-j2\pi R_{T,n} / \lambda)$; λ 为信号波长。

根据式(4), 在沿航线向某个固定空间采样点 x_m (R_m 为一定值), 雷达各接收天线依次接收一遍后得到的回波数据经过方位向和斜距向聚焦后获得的单幅前视SAR图像可表示为^[7-8, 10-11]:

$$s_2(\hat{t}, y; R_m) = A_2 \text{sinc}\left[B_r\left(\hat{t} - \frac{2R_m}{c}\right)\right] \times \text{sinc}\left[\frac{L_{\text{eff}}}{\lambda R_m}(y - y_p)\right] \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_m\right) \quad (5)$$

式中 A_2 为方位-斜距聚焦后目标信号的幅度; L_{eff} 为目标方位向的有效合成孔径^[11]。

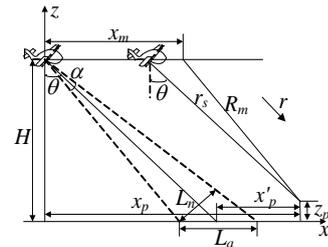


图2 前视SAR顺轨向成像几何关系示意图

当飞机以速度 v 匀速向前飞行时, 便可得到一系列飞行前方的SAR图像。将所获得的所有SAR图像进行配准处理, 在波束照射范围内, 目标在各SAR图像中的方位向位置保持不变, 与雷达间距离随飞机运动而减小。根据图2所示前视SAR顺轨向成像几何关系, 前视SAR波束视角为 θ , 顺轨向波束宽度为 α , 它在顺轨向的点目标覆盖宽度为 $L_u = H(\text{tg}(\theta + \alpha/2) - \text{tg}(\theta - \alpha/2))$, 随着载机匀速向前飞行, 波束依次扫过各个点目标, 得到顺轨向宽

度各为 L_a 的一系列回波。截取方位向 $y = y_0$ 对应的一个顺轨-斜距向截面进行分析, 可得:

$$s_3(\hat{t}, R_m; y = y_0) = A_2 \text{sinc} \left[B_r \left(\hat{t} - \frac{2R_m}{c} \right) \right] \text{sinc} \left[\frac{L_{\text{eff}}}{\lambda R_m} (y_0 - y_p) \right] \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_m \right) = A_3 \text{sinc} \left[B_r \left(\hat{t} - \frac{2R_m}{c} \right) \right] \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_m \right) \quad (6)$$

式中 $A_3 = A_2 \text{sinc}[L_{\text{eff}}(y_0 - y_p)/(\lambda R_m)]$ 。由于 A_3 为常数, 对成像过程没有影响, 因此在后续处理中将忽略该项。空间位置 (x_p, y_p, z_p) 的点目标在该截面上的斜距变化 R_m 可表示为:

$$R_m(x_p, z_p) = \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2}$$

$$x_m \in [x_p - x_{\text{ref}} - L_a/2, x_p - x_{\text{ref}} + L_a/2]$$

其中:

$$x_{\text{ref}} = (H - z_p) \tan \theta \quad (7)$$

从式(6)可以看出, 任意一个顺轨-斜距向截面上的点目标, 经过斜距向匹配滤波之后的图像沿顺轨向的位置变化为沿 R_m 的曲线变化。各截面上不同位置的点目标对应不同的互不重叠的曲线。因此对不同位置处的目标, 可将进行相位补偿以后计算其相对应的曲线上的信号值之和作为该点的聚焦结果^[12]。

相位补偿滤波器形式为:

$$G_f(f, R_0) = \exp \left[j \frac{4\pi(f + f_c)}{c} R_0 \right]$$

式中 $R_0 = \sqrt{(x_m - x_0)^2 + (H - z_0)^2}$, 表示雷达到待聚焦位置 (x_0, z_0) 的距离。

滤波后的信号为:

$$s_5(R_0) = \sum_{m=M_1}^{M_2} \text{sinc} \left[\frac{2B_r}{c} (\sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2} - \sqrt{(x_m - x_0)^2 + (H - z_0)^2}) \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2} - \sqrt{(x_m - x_0)^2 + (H - z_0)^2}) \right] = \sum_{m=M_1}^{M_2} \text{sinc} \left\{ \frac{2B_r [\Delta z (H - z_p - \Delta z/2) + \Delta x (x_m - x_p - \Delta x/2)]}{c \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2}} \right\} \times \exp \left\{ - \frac{j4\pi [\Delta z (H - z_p - \Delta z/2) + \Delta x (x_m - x_p - \Delta x/2)]}{\lambda \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2}} \right\} = \sum_{m=M_1}^{M_2} \text{sinc} \left\{ \frac{2B_r [\Delta z (H - z_p - \Delta z/2) + \Delta x (-x_{\text{ref}} + (m - M/2)\Delta u - \Delta x/2)]}{c \sqrt{(-x_{\text{ref}} + (m - M/2)\Delta u)^2 + (H - z_p)^2}} \right\} \times \exp \left\{ - \frac{j4\pi [\Delta z (H - z_p - \Delta z/2) + \Delta x (x_m - x_p - \Delta x/2)]}{\lambda \sqrt{(x_m - x_p)^2 + (H - z_p)^2}} \right\}$$

式中 Δu 为顺轨向采样间隔; $M = M_2 - M_1 + 1$ 。因为 $x_{\text{ref}} \gg M\Delta u/2$, $H \gg M\Delta u/2$, 有:

$$s_4(\hat{t}, R_m, R_0; y = y_0) = \text{IFFT}_{\hat{t}} \left\{ G_f \cdot \text{FFT}_{\hat{t}} [s_3(\hat{t})] \right\} = \text{sinc} \left\{ B_r \left[\hat{t} - \frac{2(R_m - R_0)}{c} \right] \right\} \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_m - R_0) \right]$$

进行相干叠加得:

$$s_5(R_0; y = y_0) = \sum_{m=M_1}^{M_2} s_4(\hat{t} = 0, R_m) = \sum_{m=M_1}^{M_2} \text{sinc} \left[\frac{2B_r}{c} (R_m - R_0) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_m - R_0) \right] \quad (8)$$

从式(8)可看出, 相位补偿后沿累积曲线相加, 可在目标点上实现同相相干叠加, 而在非目标点上则是非相干叠加。对所有方位向对应的顺轨-斜距向截面都进行上述处理后, 即可获得目标的三维像。

2 前视SAR三维分辨率分析

由式(5)可知前视SAR方位向分辨率为:

$$\Delta y = \frac{\lambda}{L_{\text{eff}}} R_m \quad (9)$$

考察前视SAR顺轨向和高程向的分辨率, 取同一方位向上两个相距很近的目标 (x_p, z_p) 和 (x_0, z_0) , 令 $(x_0, z_0) = (x_p + \Delta x, z_p + \Delta z)$, Δx 和 Δz 很小, 代入式(8)得:

$$\begin{aligned}
 s_5(R_o) \approx & \operatorname{sinc} \left\{ \frac{2B_r(H-z_p)\Delta z}{c\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \exp \left\{ -\frac{j2\pi[\Delta z(2H-2z_p-\Delta z)-\Delta x^2]}{\lambda\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \times \\
 & \sum_{m=M_1}^{M_2} \exp \left\{ -\frac{j4\pi\Delta x(x_m-x_p)}{\lambda\sqrt{(x_m-x_p)^2+(H-z_p)^2}} \right\} = \\
 & \operatorname{sinc} \left\{ \frac{2B_r(H-z_p)\Delta z}{c\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \exp \left\{ -\frac{j2\pi[\Delta z(2H-2z_p-\Delta z)-\Delta x^2]}{\lambda\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \times \\
 & \sum_{m=-M/2+1}^{M/2} \exp \left[\frac{j4\pi\sin(\theta+m\Delta\alpha)\Delta x}{\lambda} \right] \approx \\
 & \operatorname{sinc} \left\{ \frac{2B_r(H-z_p)\Delta z}{c\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \exp \left\{ -\frac{j2\pi[\Delta z(2H-2z_p-\Delta z)-\Delta x^2]}{\lambda\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \times \\
 & \exp \left(\frac{j4\pi\sin\theta\Delta x}{\lambda} \right) \times \sum_{m=-M/2+1}^{M/2} \exp \left(\frac{j4\pi\cos\theta m\Delta\alpha\Delta x}{\lambda} \right) \approx \\
 & \operatorname{Asinc} \left\{ \frac{2B_r(H-z_p)\Delta z}{c\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \operatorname{sinc} \left(\frac{2\cos\theta M\Delta\alpha\Delta x}{\lambda} \right) \times \\
 & \exp \left\{ \frac{j2\pi[\Delta x^2-\Delta z(2H-2z_p-\Delta z)]}{\lambda\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \exp \left[j\frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta\Delta\alpha+2\sin\theta)\Delta x \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

当 Δx 、 Δz 、 $\Delta\alpha$ 很小, $\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2} \gg \Delta x$ 、

Δz 、 $\Delta\alpha$ 时, $\exp \left\{ \frac{j2\pi[\Delta x^2-\Delta z(2H-2z_p-\Delta z)]}{\lambda\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \times$

$\exp \left[j\frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta\Delta\alpha+2\sin\theta)\Delta x \right]$ 趋近于1, 有:

$$\begin{aligned}
 s_5(R_o) \approx & \operatorname{Asinc} \left\{ \frac{2B_r(H-z_p)\Delta z}{c\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}} \right\} \times \\
 & \operatorname{sinc} \left(\frac{2\cos\theta M\Delta\alpha\Delta x}{\lambda} \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

由式(11)可知前视SAR高程向分辨率为:

$$\Delta z = \frac{c}{2B_r} \frac{\sqrt{x_{\text{ref}}^2+(H-z_p)^2}}{H-z_p} = \frac{c}{2B_r} \frac{1}{\cos\theta} \quad (12)$$

前视SAR顺轨向分辨率为:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2M\Delta\alpha\cos\theta} = \frac{\lambda}{2\alpha\cos\theta} \quad (13)$$

式中 α 为顺轨向波束宽度; θ 为波束前视角(即斜距向与高程向的夹角)。

由式(12)可知, 前视SAR成像区域高程向的分辨率取决于雷达发射信号的带宽和前视SAR的成像几何, 其值等于常规SAR在斜距向上的分辨率乘以一个因子, 该因子的值等于波束前视角 θ 余弦值的倒

数。这说明前视SAR三维成像的高程向分辨率主要来自于雷达发射信号在高程向上的有效带宽或有效时宽。

由式(13)可知, 前视SAR顺轨向分辨率取决于雷达发射信号的波长、前视SAR顺轨向波束宽度和前视SAR波束前视角 θ , 随着 θ 值增大, 顺轨向分辨率变差。

根据上面的分析可知, 采用天线阵模式的前视SAR系统能够获得方位向、高程向和顺轨向3个方向的分辨率, 因此能实现目标区域的三维成像。

3 模拟仿真

本文对成像场景9个点目标进行模拟仿真。以载机起始位置作为顺轨向原点, 9个点目标在 (x, y, z) 直角坐标系下的坐标分别为 $(585, -30, 0)$ 、 $(585, -30, 10)$ 、 $(655, -30, 0)$ 、 $(655, -30, 10)$ 、 $(620, 0, 5)$ 、 $(585, 30, 0)$ 、 $(585, 30, 10)$ 、 $(655, 30, 0)$ 、 $(655, 30, 10)$, 目标的位置分布如图3a所示。仿真所用的参数为雷达信号波长 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, 信号带宽 $B = 80 \text{ MHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 1.0 \text{ }\mu\text{s}$, 接收天线阵长度 $L = 3 \text{ m}$, 接收天线阵元数 $p = 57$, 顺轨向天线宽度 $l = 0.8 \text{ m}$, 脉冲重复频率 $\text{PRF} = 9\ 600 \text{ Hz}$, 载机飞行高度 $H = 800 \text{ m}$, 载机飞行速度 $v = 80 \text{ m/s}$, 波束

视角 $\theta = 35^\circ$ ，波束方位张角 $\beta = 35^\circ$ ，顺轨向波束宽度 $\alpha = 2^\circ$ 。

根据以上的处理流程，对每个方位向所对应的顺轨-斜距截面进行成像处理便得到成像场景的三维像。三维成像结果的-3 dB包络如图3b所示。从图3a和3b可以看出，点目标在方位向、顺轨向和高程向的成像位置与实际位置基本对应，说明利用前视SAR可进行三维成像，表明了本文算法的有效性。

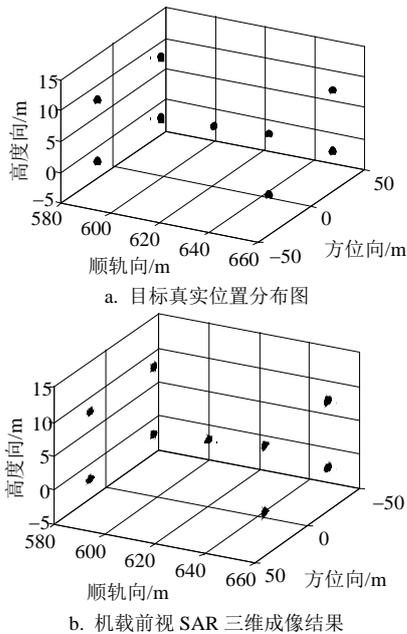
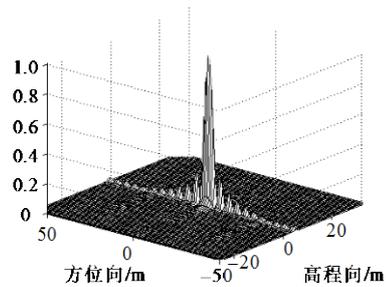
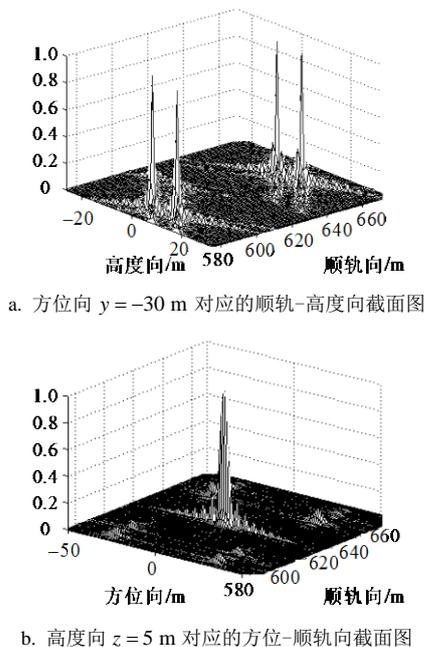


图3 成像场景目标真实位置分布与前视SAR三维成像结果为详细分析成像效果，图4给出了前视SAR三维成像的3个截面图。从图4a~图4c可看出，点目标在方位向、顺轨向和高程向聚焦效果良好。



c. 顺轨向 $x = 620$ m 对应的方位-高程向截面图

图4 前视SAR三维成像结果的二维截面图

4 结束语

本文以收发分置的前视SAR系统为对象，分析了前视SAR三维成像原理，推导了前视SAR的三维分辨率。前视SAR通过在机翼下安装一个由各独立的天线阵元组成的天线阵，在方位向形成以真实天线阵为长度的似合成孔径获得方位向分辨率，利用飞行方向上的合成孔径获得顺轨向分辨率，利用雷达发射信号在高程向上的有效带宽或有效时宽获得高程向分辨率。通过前视SAR系统对成像场景中点目标进行了模拟仿真，得到了目标三维成像效果图。仿真结果表明点目标在方位向、顺轨向和高程向都取得了良好的聚焦性能，证明了前视SAR系统具有三维分辨能力，能够实现三维成像，同时也证明了本文算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] REIGBER A. Airborne polarimetric SAR tomography[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2001.
- [2] FORNARO G, PAUCIULLO A, SERAFINO F. Multipass SAR processing for urbanized areas imaging and deformation monitoring at small and large scales[C]//IEEE 2007 Urban Remote Sensing Joint Event. Paris: IEEE, 2007.
- [3] NANNINI M, SCHEIBER R, HORN R. Imaging of targets beneath foliage with SAR tomography[C]//EUSAR 2008. Friedrichshafen, Germany: VDE VERLAG GMBH, 2008.
- [4] LOMBARDINI F, PARDINI M, GINI F. Sector interpolation for 3D SAR imaging with baseline diversity data[C]//IEEE 2007 Waveform Diversity and Design Conference. Pisa: IEEE, 2007.
- [5] LOMBARDINI F, PARDINI M, VERRAZZANI L. A robust multibaseline sector interpolator for 3D SAR imaging [C]//EUSAR 2008. Friedrichshafen, Germany: VDE VERLAG GMBH, 2008.
- [6] SUTOR T, WITTE F, MOREIRA A. A new sector imaging radar for enhanced vision — SIREV[C]//Proceedings of SPIE. [S.l.]: SPIE, 1999.
- [7] KRIEGER G, MITTERMAYER J, WENDLER M, et al. SIREV-sector imaging radar for enhanced vision[J]. Aerospace Science and Technology, 2003, (7): 147-158.

(下转第724页)

行电磁兼容设计,能有效地分析各种电磁干扰影响,提高系统的电磁兼容性水平,确保车载集群通信系统的正常工作。

参 考 文 献

- [1] 张燕燕. PCB级的电磁兼容性设计研究[J]. 西安邮电学院学报, 2007, 12(03): 86-89.
ZHANG Yan-yan. PCB level EMC design[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2007, 12(03): 86-89.
- [2] 靳松, 何军. 武器装备中电子设备的板级电磁兼容技术[J]. 国防技术基础, 2004, (6): 26-27.
JI Song, HE Jun. PCB level EMC design in the weaponry electronics[J]. Technology Foundation of National Defence, 2004, (6): 26-27.
- [3] OSBURN J D M. The role of systems EMC analysis in large system EMC management by equipment EMC assurance[C]//Electromagnetic Compatibility of IEEE, 1991 International Symposium. [S.l.]: IEEE, 1991.
- [4] ZHOU Qi, XIE Yong-jun, CHEN zheng. Prediction of equipment-to-equipment coupling through antennas mounted on an aircraft[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2007, 21(5): 653-663.
- [5] 仓艳, 胡磊. 军用车辆电磁兼容性设计方法研究[J]. 专用汽车, 2008, (6): 44-46.
CANG Yan, HU Lei. EMC design to the military vehicles[J]. Special Vehicle, 2008, (6): 44-46.
- [6] 苏东林, 雷军, 王冰切. 系统电磁兼容技术综述与展望[J]. 宇航计测技术, 2007, (21): 34-38.
SU Dong-lin, LEI Jun, WANG Bing-qie. Review and perspective of system-level EMC technologies[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007, (21): 34-38.
- [7] 邱扬, 俞智敏, 袁军, 等. 车载通信系统无线设备间谐波干扰量仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2004, 24(21): 152-154.
QIU Yang, YU Zhi-min, YUAN Jun, et al. Simulation to the harmonics interference among vehicle-carried wireless equipments[J]. Ship Electronics Engineering, 2004, 24(21): 152-154.
- [8] CARSON B, RANGA T, GARY S. EMI modeling and Characterization of the rhino SMPS[C]//Ansoft Boston EMI Seminar. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [9] 唐星海, 虞学犬. 系统级EMC设计应用探索[C]//2006 Ansoft年会. [S.l.]: [s.n.], 2006.
TANG Xing-hai, YU Xue-quan. Research on the system level EMC design[C]//2006 Ansoft Roadshow. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [10] 苏东林, 王冰切, 金德琨, 等. 电子战特种飞机电磁兼容预设计技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1241-1245.
SU Dong-lin, WANG Bing-qie, Jin De-kun, et al. EMC pre-design technologies on EW special aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1241-1245.
- [11] 刘莹. 基于软件仿真的系统级EMC设计[J]. 地球资源, 2009, 1: 45-48.
LIU Ying. System level EMC design using EDA tools[J]. Global Sources, 2009, 1: 45-48.
- [12] DAVID M P. Microwave engineering[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2005: 313-315.
- [13] DAVID A. Weston, electromagnetic compatibility, principle and applications[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1991: 236-240.
- [14] 谢拥军. HFSS原理与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 58-59.
XIE Yong-jun. HFSS foundations and applications[M]. Beijing: Science Press, 2009: 58-59.
- [15] BARDI I V M, CENDES Z J. Modeling large screens via homogenization with the finite element method[C]//Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International. [S.l.]: IEEE, 2006: 1315-1318.
- [16] 汪剑鸣, 许镇琳. 利用混沌提高dc/dc变换器的EMC性能[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(10): 586-589.
WANG Jian-ming, XU Zhen-lin. Improve EMC of dc/dc converter by chaos[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(10): 586-589.

编辑 税红

(上接第710页)

- [8] MITTERMAYER J, WENDLER M. Data processing of an innovative forward looking SAR system for enhanced vision [C]//EUSAR 2000. Munich, Germany: VDE VERLAG, 2000.
- [9] 曹建蜀, 汪学刚. 机载前向阵雷达近程杂波频移补偿[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 320-323.
CAO Jian-shu, WANG Xue-gang. Doppler compensation in airborne forward-looking radar for ground short range clutter[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(3): 320-323.
- [10] 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 and Information Technology, 2008, 30(1): 228-232.
- [11] 陈琦. 机载斜视及前视合成孔径雷达系统研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006.
CHEN Qi. Study on systems of airborne squint mode and forward looking mode synthetic aperture radar[D]. Beijing: Institute of Electronics, of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [12] ISHIMARU A, CHAN T K, KUGA Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1524-1530.

编辑 税红