

文章编号:1005-0523(2012)01-0024-06

移变模式双站SAR信号模型及电磁仿真研究

刘志伟¹, 张月园¹, 陈嘉琪², 郑晴²

(1. 华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌, 330013; 2. 南京理工大学通信工程系, 江苏 南京, 210094)

摘要:针对移变模式下的双基地合成孔径雷达成像方法及电磁仿真进行了研究。在这一模式下对双基地SAR信号频谱进行分析,结合改进的Loffeld模型进行点目标回波信号分析及成像仿真。与此同时,通过物理光学方法获得三维目标的双基地回波信号,在此基础上分别采用原始与改进的Loffeld模型进行了双站SAR电磁成像仿真实验。点目标及电磁仿真结果均表明,与传统的Loffeld模型相比,改进的Loffeld模型在双基地移变模式下具有更为优良的聚焦性能。

关键词:双站SAR; 移变模式; 改进Loffeld模型; 物理光学

中图分类号:TN957.51

文献标志码:A

双基地合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是指发射机与接收机分置在不同平台上的雷达系统^[1]。相对单基地SAR,双基地SAR可以获得更多的目标信息,具有隐蔽性好,抗干扰和抗截获性能强的特点,因此成为目前合成孔径雷达研究领域中的热点^[2]。

不同于单基地SAR,双基地SAR的点目标斜距历程为收发双根号形式,这使得直接利用驻定相位原理难以得到频域算法所需要的点目标二维参考频谱^[3]。因此求取点目标二维频谱成为双基地SAR研究中的重点和难点。近年来,各国学者提出了许多解决这一难题的方法,如DMO^[4],GBF^[5,12],LBF^[6],MSR^[7]等。其中,Loffeld双站公式(Loffeld's bistatic formula, LBF)通过对收发相位历程在各自的驻相点处进行二阶泰勒展开,之后利用驻定相位原理得到双基地SAR点目标二维近似频谱,具有算法快捷,实现简单的特点。特别针对平移不变(收发平台速度矢量相同)成像结构,LBF可获得很好的图像聚焦效果。然而,对于移变结构(收发平台具有不同的速度矢量),极端情况如星机混合结构,原始的LBF则会出现严重散焦的状况^[8]。为了解决移变结构下双基地SAR成像问题,Wang^[8]提出了改进的Loffeld双站公式(extended LBF, ELBF),此方法与原始LBF的不同之处在于,该方法不再假设接收机和发射机对整个距离历史的瞬时多谱勒贡献是相等的,而是通过引入权重因子,将发射机与接收机对目标的多谱勒贡献之比引入到LBF推导过程中,这一做法更加符合双基地SAR的实际物理意义,从而获得了更具一般性的双基地SAR点目标二维解析频谱。

首先分析了移变模式下双基地SAR的几何模型和信号模型,在此基础上分别阐述了LBF和ELBF,并进行了详细的点目标仿真及分析。同时,为了进一步验证ELBF在双基地移变结构下成像的准确性,还结合物理光学方法进行了三维目标的电磁仿真成像实验,并给出了相应的实验结果。

1 移变模式双站SAR信号模型

采用双站移变模式信号模型,如图1所示。发射机和接收机分别以恒定的速度 V_T 和 V_R 飞行,设成像带中心点为 P 。在方位向慢时间的零时刻,发射机和接收机到 P 点的距离为 R_{Tc} 和 R_{Rc} 。双基地SAR的点目标

收稿日期:2011-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61061002);华东交通大学科研项目(11XX01)

作者简介:刘志伟(1982—),男,讲师,博士,研究方向为计算电磁学。

历程 $R(\eta)$ 为

$$R(\eta) = R_T(\eta) + R_R(\eta) = \sqrt{R_{Tc}^2 + V_T^2 \eta^2} + \sqrt{R_{Rc}^2 + V_R^2 \eta^2} \quad (1)$$

为了信号处理的需要,回波信号必须被解调到基带。解调之后的回波信号表达式为^[9]

$$s(\tau, \eta) = A_0 \omega_R \left(\tau - \frac{R(\eta)}{c} \right) \omega_{az}(\eta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi f_0 R(\eta)}{c} + j\pi K_R \left[\tau - \frac{R(\eta)}{c} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

式中: A_0 表示后向散射系数; τ 为雷达发射脉冲的快时间; λ 为雷达中心频率对应的波长; c 为光速; $\omega_{az}(\eta)$ 为双基地收发天线决定的方向图函数。忽略幅度调制和后向散射系数的影响,解调信号通过距离向压缩之后的表达式为

$$s_{Rc}(\tau, \eta) = \rho_\tau \left(\tau - \frac{R(\eta)}{c} \right) \omega_{az}(\eta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi R(\eta)}{\lambda} \right\} \quad (3)$$

式中: ρ_τ 为距离向窗函数 ω_R 经压缩之后的sinc型窗函数。

2 改进的Loffeld模型

首先简要介绍Loffeld模型描述的双站点目标二维频谱^[6]。经过距离向傅立叶变换之后的回波信号相位可以表示为

$$\varphi(\eta, f_R) = 2\pi \left[\frac{f_R + f_0}{c} (R_R + R_T) + f_\eta \eta \right] \quad (4)$$

式中: $R_T(\eta) = \sqrt{R_{Tc}^2 + (\eta - \eta_{T0})^2 V_T^2}$; $R_R(\eta) = \sqrt{R_{Rc}^2 + (\eta - \eta_{R0})^2 V_R^2}$; η_{T0} 和 η_{R0} 为发射机和接收机的零多普勒时间。令 $\varphi_T(\eta) = 2\pi \left(\frac{f_R + f_0}{c} R_T + \frac{1}{2} f_\eta \eta \right)$, $\varphi_R(\eta) = 2\pi \left(\frac{f_R + f_0}{c} R_R + \frac{1}{2} f_\eta \eta \right)$,其中 η_{PT} 和 η_{PR} 分别为发射机和接收机各自的驻定相位点。将相位 $\varphi_T(\eta)$ 和 $\varphi_R(\eta)$ 分别在驻定相位点处进行二阶泰勒展开可得

$$S(f_a, f_R) \approx \exp\{j\varphi_R + j\varphi_T\} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ j \frac{\varphi_R''(\eta_{PR})(\eta - \eta_{PR})^2 + \varphi_T''(\eta_{PT})(\eta - \eta_{PT})^2}{2} \right\} d\eta \quad (5)$$

在这里,可以将该积分内的二次项写成

$$\varphi_R''(\eta - \eta_{PR})^2 + \varphi_T''(\eta - \eta_{PT})^2 = \frac{\varphi_T'' \varphi_R''}{\varphi_T'' + \varphi_R''} (\eta_{PR} - \eta_{PT})^2 + [\varphi_T'' + \varphi_R''] (\eta - \eta_P)^2 \quad (6)$$

式中: $\eta_P = \frac{\varphi_T'' \eta_{PT} + \varphi_R'' \eta_{PR}}{\varphi_T'' + \varphi_R''}$ 为双基地的驻定相位点。因此可将方程(5)中的常数项提到积分符号外面,得到

$$S(f_a, f_R) \approx \exp\{j\varphi_R + j\varphi_T\} \exp \left\{ \frac{j}{2} \frac{\varphi_T'' \varphi_R''}{\varphi_T'' + \varphi_R''} (\eta_{PR} - \eta_{PT})^2 \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ j \frac{(\varphi_R'' + \varphi_T'') (\eta - \eta_P)^2}{2} \right\} d\eta \quad (7)$$

可见,双基地SAR的点目标二维频谱可以表示为两项:准单站项和双站项^[6]。经过化简运算,准单站项为

$$\Psi_M = \pi (\eta_{T0} + \eta_{R0}) f_\eta + \frac{2\pi R_{Tc}}{c} F_T + \frac{2\pi R_{Rc}}{c} F_R \quad (8)$$

式中: $F_T = \sqrt{(f_R + f_0)^2 - f_\eta^2 \frac{c^2}{4V_T^2}}$; $F_R = \sqrt{(f_R + f_0)^2 - f_\eta^2 \frac{c^2}{4V_R^2}}$ 。双站项为

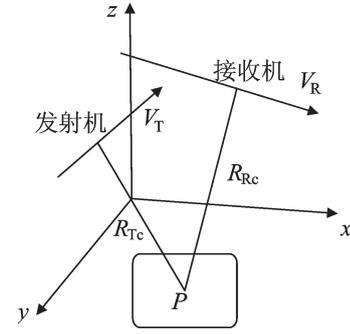


图1 双站SAR信号模型
Fig.1 Signal model of bistatic SAR

$$\Psi_B = \frac{2\pi V_T^2 V_R^2 F_T^3 F_R^3}{c(f_R + f_0)^2 (R_{Rc} V_T^2 F_T^3 + R_{Tc} V_R^2 F_R^3)} \left(\eta_{T0} - \eta_{R0} - \frac{cf_\eta}{2V_T^2 V_R^2 F_T F_R} (R_{Rc} V_T^2 F_T - R_{Tc} V_R^2 F_R) \right)^2 \quad (9)$$

准单站项具有单站 SAR 二维频谱的形式,而双站项主要由收发平台的驻定相位点的差来决定, η_{PT} 与 η_{PR} 的差又受到收发平台空间几何结构的差异影响。在收发平台几何结构差异较大的情况下,双站项便会很大,成像便会出现散焦现象。

通过仿真计算,当收发平台速度不相等时 ($V_T = 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_R = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),双站项相位最大值将会超过 2 rad 。因此,在双站移变模式下,由于接收机和发射机速度不等,使得传统的 Loffeld 公式不再适用。我们知道,原始 Loffeld 模型按照等分的方式把整个相位历史分解为接收机和发射机两个部分。也就是说,原始 Loffeld 模型假设接收机和发射机对整个距离历史的瞬时多谱勒影响是相等的。这种假设在收发平台较为接近,速度大致相等的情况下可以近似成立,但在收发平台较远,速度差异较大时便不再成立。下面,我们对此进行具体分析和阐述。

整个距离历史的瞬时多谱勒频率公式为^[9]

$$f_\eta(\eta) = -\frac{f_R + f_0}{c} \frac{d}{d\eta} (R_R + R_T) \approx -\frac{f_R + f_0}{c} \frac{V_T^2}{R_{Tc}} (\eta - \eta_P) - \frac{f_R + f_0}{c} \frac{V_R^2}{R_{Rc}} (\eta - \eta_P) \quad (10)$$

式中:右边第 1 项为发射机的作用,第 2 项为接收机的作用。发射机与接收机对目标的多谱勒贡献之比可以近似的由 $\frac{V_T^2}{R_{Tc}}$ 与 $\frac{V_R^2}{R_{Rc}}$ 之比来表示。由此,令 $k_T = \frac{V_T^2}{R_{Tc}} / \left(\frac{V_T^2}{R_{Tc}} + \frac{V_R^2}{R_{Rc}} \right)$, $k_R = \frac{V_R^2}{R_{Rc}} / \left(\frac{V_T^2}{R_{Tc}} + \frac{V_R^2}{R_{Rc}} \right)$, 则

$$\varphi_{TW}(\eta) = 2\pi \left(\frac{f_R + f_0}{c} R_T(\eta) + k_T f_\eta \eta \right) \quad (11)$$

$$\varphi_{RW}(\eta) = 2\pi \left(\frac{f_R + f_0}{c} R_R(\eta) + k_R f_\eta \eta \right) \quad (12)$$

由公式(11),(12)出发,重新推导 LBF,便可获得 ELBF 的点目标二维频谱^[8]。经过计算,单站项为

$$\Psi_M = 2\pi (k_T \eta_{T0} + k_R \eta_{R0}) f_\eta + \frac{2\pi}{c} R_{Tc} F_T + \frac{2\pi}{c} R_{Rc} F_R \quad (13)$$

双站项为

$$\Psi_B = \frac{2\pi V_T^2 V_R^2 F_T^3 F_R^3}{c(f_R + f_0)^2 (R_{Rc} V_T^2 F_T^3 + R_{Tc} V_R^2 F_R^3)} \left(\eta_{T0} - \eta_{R0} - \frac{cf_a}{V_T^2 V_R^2 F_T F_R} (k_T R_{Tc} V_R^2 F_R - k_R R_{Rc} V_T^2 F_T) \right)^2 \quad (14)$$

3 双站 SAR 信号高频仿真

通常,成像仿真过程中的点目标回波数据是由幅度和相位信息来决定的。而对于三维复杂目标而言,幅度信息可以理解为电磁波入射到目标上之后目标的散射电场强度。为了快速高效地获得复杂目标模型的回波数据,该文采用物理光学方法来进行回波计算^[10-11]。

物理光学方法是一种基于表面电流的方法^[10],它应用积分方程的表达形式,并且遵循物理上合理的高频假设,即由物体上某一点对该物体其它点的散射场的贡献和入射场相比是很小的。根据物理光学理论,当电磁波照射到目标表面时,在目标表面会产生感应电磁流,它们将作为新的源向外辐射电磁场,这些辐射的电磁场称为散射场,而且只有照亮区域的感应电磁流才对散射场有贡献。物理光学方法通过对感应电磁流的近似和积分而求得散射场。简化后的物理光学公式可写成:

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = jkZ_0 \frac{e^{-jk r}}{4\pi r} \int_s \hat{\mathbf{r}} [\hat{\mathbf{r}}(\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{H}) - Z_0^{-1} \hat{\mathbf{n}} \mathbf{E}] e^{jk \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} ds \quad (15)$$

$$\mathbf{H}^s(\mathbf{r}) = -jk \frac{e^{-jk r}}{4\pi r} \int_s \hat{\mathbf{r}} [Z_0^{-1} \hat{\mathbf{r}}(\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{E}) + \hat{\mathbf{n}} \mathbf{H}] e^{jk \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} ds \quad (16)$$

式中: $E^s(\mathbf{r})$, $H^s(\mathbf{r})$ 为远区散射场; \mathbf{E} , \mathbf{H} 为目标表面总场; Z_0 为自由空间本征阻抗; $\hat{\mathbf{n}}$ 为目标表面面元的单位法矢量; \mathbf{r} 为观察点位置矢量; $\hat{\mathbf{r}}$ 为散射方向单位矢量; \mathbf{r}' 为目标表面任一面元的位置矢量, 以面元中心点的位置矢量表示面元的位置矢量。物理光学远场计算公式中的积分可以采用数值积分算法来求解。利用高频方法获得复杂目标的回波数据之后, 我们便可以进行双站SAR的电磁仿真成像实验。

4 数值仿真结果与分析

为了分析比较原始Loffeld模型(LBF)和改进Loffeld模型(ELBF)之间的差异, 分别利用点目标和三维金属球模型在双基地模式下进行成像。系统参数为: 发射机到场景中心距离为15 237 m, 载机高度为3 000 m; 接收机到场景中心距离为13 010 m, 载机高度为1 000 m; 载频9.35 GHz, 信号带宽100 MHz, 多谱勒带宽194 Hz, 过采样率为2.4, 窗函数为 $\beta = 2.5$ 的Kaiser窗。

针对移变结构, 我们选取速度大小不等($V_R = 200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_T = 300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 方向一致的收发平台。采用LBF和ELBF进行点目标仿真的成像结果如图2所示。

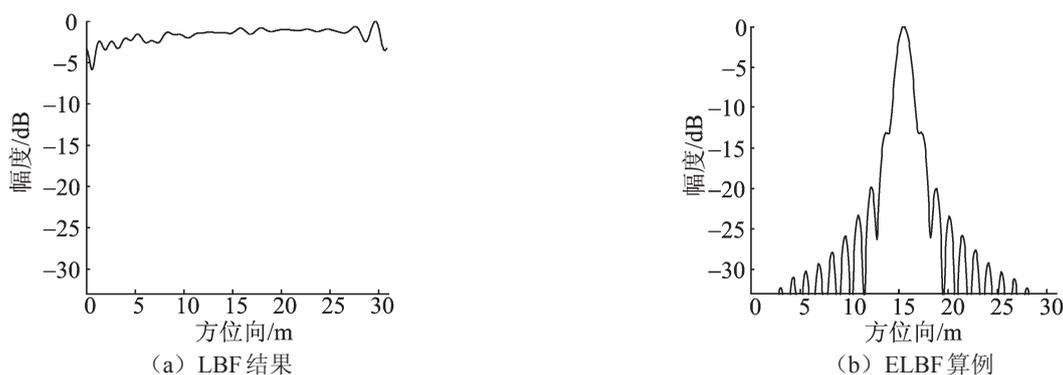


图2 移变结构下方方位向剖面
Fig.2 Azimuth profile of variant SAR

经过比较, 可以看出, LBF在双站移变情况下会出现方位向散焦的现象, 因此需要利用ELBF模型。对比原始的Loffeld模型, 改进的Loffeld模型在速度不等的情况下, 可以有效去除原始Loffeld模型成像结果的方位向散焦现象。为了进一步验证ELBF的有效性, 我们结合物理光学方法对金属球目标进行了电磁仿真成像实验, 仿真参数如表1所示。

表1 双站SAR成像系统仿真参数

Tab.1 Simulation parameters for imaging system of bistatic SAR

模拟参数	发射机	接收机
中心频率/GHz	9.35	9.35
信号带宽/MHz	150	150
平台速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	200	300
合成孔径长度/m	242	242
零时刻场景中心斜距/m	17 250	14 978
下视角/ $^\circ$	60	60

金属球的半径为50 m, 图3给出了LBF模型的成像结果和ELBF的成像结果。

对比LBF在平移不变与移变两种结构下的成像结果可以看出, 在移变结构下, LBF会出现散焦的现象, 并产生能量较大的旁瓣, 严重影响成像质量。这一结果表明, 原始的Loffeld模型不能够很好地适用于收发平台差异较大的双基地移变模式。而对于ELBF, 如图3(b)所示, 由于充分考虑了接收机和发射机对于瞬时多谱勒频率的不同贡献, 因此有效克服原始LBF中的方位向散焦现象, 获得了更好的聚焦效果。

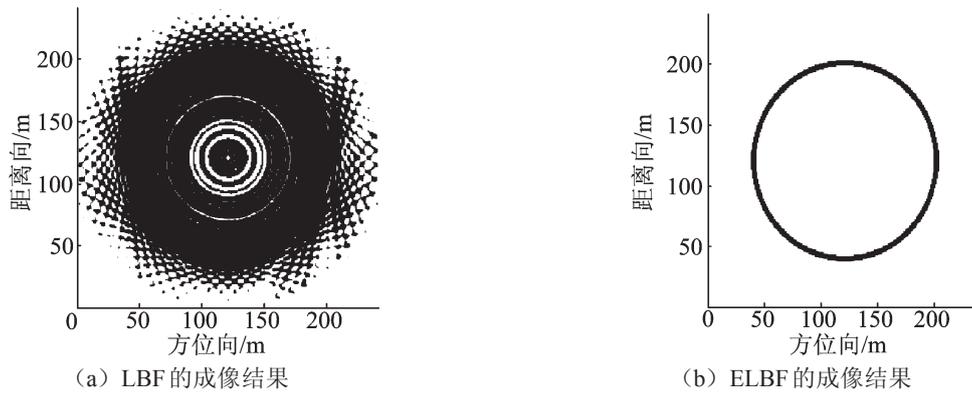


图3 移变模式下三维目标算例

Fig.3 Example of PEC sphere in variant model

5 结束语

详细分析了原始Loffeld模型和改进Loffeld模型在双基地SAR移变结构下的成像算法。原始Loffeld模型简单地将整个方位向多谱勒频率项按照等分的方式分解为接收机和发射机两部分,并未考虑发射机与接收机对于双基地瞬时多谱勒频率贡献的不同。特别在移变模式下,采用原始的LBF进行图像聚焦,会在方位向出现一定的散焦现象。而改进的Loffeld模型通过引入权重因子衡量发射机与接收机对瞬时多谱勒频率贡献的大小,并按照各自贡献的比例来对多谱勒频率项进行分解,从而提高了SAR图像的聚焦效果。同时,为了克服点目标仿真的局限性,该文利用物理光学方法计算得到了三维目标模型的双站回波数据,在此基础上进行了相应的电磁仿真成像实验。通过点目标及电磁仿真结果可知,在双基地移变模式下,改进的Loffeld模型可以有效地改善原始Loffeld模型存在的方位向散焦现象。

参考文献:

- [1] KRIEGER G, MOREIRA A. Spaceborne bi-and multistatic SAR: potential and challenges [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153(6): 184-198.
- [2] ENDER J H G. A step to bistatic SAR processing [C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar, Ulm: VDE Conference Services, 2004: 359-364.
- [3] AUTERMAN J L. Phase stability requirements for bistatic SAR [C]//IEEE National Radar Conference, Atlanta: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 1984: 45-52.
- [4] ARIA D D, GUARNIERI A M, ROCCA. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out [J]. IEEE Transaction on Geoscience & Remote Sensing, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [5] ZHANG ZHENHUA, XING MENGDAO, DING JINSHAN, et al. Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in wavenumber domain [J]. IEEE Transaction on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [6] LOFFELD O, NIES H, PETERS V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR [J]. IEEE Transaction on Geoscience & Remote Sensing, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [7] NEO Y L, WONG F, CUMMING I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. IEEE Transaction on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 4(1): 93-96.
- [8] ROBERT WANG, OTMAR LOFFELD, QURAT ULANN. A bistatic point target reference spectrum for general bistatic SAR processing [J]. IEEE Transaction on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 5(3): 517 - 521.
- [9] CUMMING I G, WONG F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation [M]. New York: Artech House, 2005: 477-532.
- [10] KNOTT E F. 雷达散射截面—预估、测量和减缩 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1988: 132-143.

- [11] 袁苏民. 基于PO技术快速分析电大复杂载体天线辐射特性[D]. 南京:东南大学,2006.
- [12] 丁金闪,OTMAR LOFFELD,HOLGER NIES,等. 双基SAR成像的点目标解析频谱研究[J]. 电子与信息学报,2009,31(4):763-767.

Variant Bistatic SAR Signal Model and EM Simulation

Liu Zhiwei¹, Zhang Yueyuan¹, Chen Jiaqi², Zheng Qing²

(1. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China 2. Department of Communication Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The paper studies variant bistatic synthetic aperture radar(SAR) imaging method and EM simulation. After analyzing spectrum variant bistatic SAR signal, based on extended Loffeld's bistatic, point target echo signal and EM simulation are conducted. Meanwhile, bistatic echo signal of 3D target is gained through physical optics. Conventional LBF and extended Loffeld's bistatic formula (ELBF) are adopted respectively to conduct variant bistatic synthetic aperture radar (SAR) imaging method and EM simulation. Results of target and EM simulation show that the ELBF has better focusing property compared with the conventional LBF.

Key words: bistatic SAR; variant configuration; extended Loffeld's model; physical optics