基于 LCMV 算法的星载 SAR 距离模糊抑制方法

于 泽 周荫清 陈 杰 李春升

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 距离模糊抑制是星载合成孔径雷达(SAR)系统顶层设计中的关键问题之一. 增加天线高度可以抑制距离模糊,但卫星平台往往对天线尺寸有所限制. 指出了距离模糊抑制对于提高可视观测带宽度、产生高质量雷达图像的重要性,介绍了距离模糊的数学模型,提出了分布距离模糊度的概念,分析了平均距离模糊度与分布距离模糊度的区别,给出了应用线性约束最小方差(LCMV)算法抑制星载 SAR 距离模糊的方法. 仿真结果证明,该方法在天线高度不变的情况下,不仅能够提高平均距离模糊度,也可以改善分布距离模糊度.

关 键 词: 合成孔径雷达; 相控阵天线; 算法; 系统分析

中图分类号: TN 958

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1035-04

Approach of range ambiguity suppression for spaceborne SAR based on LCMV algorithm

Yu Ze Zhou Yinqing Chen Jie Li Chunsheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The range ambiguity suppression is a key problem in the design of the spaceborne synthetic aperture radar(SAR) system. Increasing the antenna height can solve this problem. But usually the satellite platform can not load the large antenna, which restricts the size of the antenna. The importance of suppressing the range ambiguity for observing the wide swath and producing the high quality radar image was pointed out. The mathematical model of the range ambiguity was described and a new concept was presented, i. e., the distributed range ambiguity signal ratio(DRASR). The difference between the average range ambiguity signal ratio(ARASR) and the DRASR was analyzed. An approach of the range ambiguity suppression for the spaceborne SAR based on the linearly constrained minimum variance(LCMV) algorithm was proposed. Simulation results prove that this approach not only increases ARASR, but also improves DRASR under the condition that the antenna height is not needed to be changed.

Key words: synthetic aperture radar; antenna phased arrays; algorithms; system analysis

星载合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)作用距离远、观测区域广,接收到的信号中不仅包含观测带的回波信号,同时也包含观测带外其它区域的回波信号,后者对前者造成干扰,从而产生距离模糊[1-5]. 距离模糊是星载 SAR 不可避免的问题,它使得图像质量下降[6],严重情况下,无法判读. 星载 SAR 的距离模糊不同于经典雷达理论[7]中所指的距离模糊,即由于脉冲重复频率不满足要求而在测距中产生的多值现象. 文献[1-3, 5]中详细阐述了星载 SAR 距离模糊产生的机理,并对其变化规律进行了分析. 可以看出,星载 SAR 距离模糊现象严重,尤其是在大视角情况下,这将不利于宽可视区域的观测. 一般来说,增大天线高度可以改善距离模糊,但是卫星平台对天线尺寸往往有所限制,因此,应当考虑从其它角度对距离模糊进行抑制. 天线赋形就是其中一种方法.

本文首先描述了距离模糊的数学模型,提出

收稿日期: 2005-11-15

作者简介: 于 泽(1979-),男,陕西凤县人,博士生, yz706@163.com.

了分布距离模糊度(DRASR, Distributed Range Ambiguity Signal Ratio)的概念,分析了平均距离模糊度(ARASR, Average Range Ambiguity Signal Ratio)与DRASR的区别,给出了应用线性约束最小方差(LCMV, Linearly Constrained Minimum Variance)算法抑制星载SAR距离模糊的方法. LCMV算法是一种有效的天线赋形解析算法,相对其它常用的算法而言,精度和效率都比较高[8-9]. 文章最后给出了仿真结果.

1 距离模糊的数学模型

距离模糊是观测带回波与距离向相邻区域(模糊区)回波混叠造成的. 距离模糊度(RASR, Range Ambiguity Signal Ratio)是距离模糊的定量描述,是星载SAR系统重要的技术指标. RASR又可细化为ARASR与DRASR两个指标. 在文献[1-6]中,所指的RASR都是ARASR(用A_{RASR}表示),其定义为距离向模糊区内回波信号的总能量同观测带内回波信号能量之比,数学模型如式(1).

$$A_{\mathrm{RASR}}=\frac{\sum_{\substack{m=1\\m\neq 0}}^{+\infty}\int_{\theta_{mn}}^{\theta_{mf}}\frac{\sigma^0(\theta)G(\theta)^2}{R(\theta)^3\sin\theta}}{\int_{\theta_{0n}}^{\theta_{0f}}\frac{\sigma^0(\theta)G(\theta)^2}{R(\theta)^3\sin\theta}} \tag{1}$$

其中,$\sigma^0(\theta)$,$G(\theta)$,$R(\theta)$,θ分别表示地面后向散射系数,天线功率增益,天线相位中心与地面之间的距离,入射角;θ_{mn},θ_{mf}($m=1,2,\cdots$)表示第m个模糊区的近端入射角和远端入射角;θ_{0n},θ_{0f}表示观测带的近端入射角和远端入射角.

由式(1)可以看出,每个观测带只对应一个A_{RASR}. 而观测带距离向上不同位置目标的距离模糊情况都是不同的,A_{RASR}难以准确反映星载SAR距离模糊沿距离向的分布状况. 因此,本文提出了DRASR(用$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$表示)的概念.

严格地讲,$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$应是一个连续函数,自变量是观测带距离向上点的地面位置. 为了分析问题方便,$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$可用矢量表示为($D_1$, D_2, D_3, …, D_n). 其中每个分量代表沿观测带距离向离散选取的某点的模糊情况,定义为距离向上与该点产生模糊的各点的回波信号能量之和同该点本身回波信号能量之比,数学模型为

$$D_i=\frac{\sum_{\substack{m=1\\m\neq 0}}^{+\infty}\frac{\sigma^0_{im}\,G^2_{im}}{R^3_{im}\sin\theta_{im}}}{\frac{\sigma^0_{i0}\,G^2_{i0}}{R^3_{i0}\sin\theta_{i0}}}\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

其中,σ^0_{im},G_{im},R_{im},θ_{im}为第m个模糊点对应的地面后向散射系数,天线功率增益,到天线相位中心距离,入射角;σ^0_{i0},G_{i0},R_{i0},θ_{i0}为观测带内第i个被模糊点相应的量.

对比ARASR和DRASR两者的概念可知,若对星载SAR系统提出距离模糊指标,以$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$衡量,要求观测带距离向上任意一点都必须满足该指标;以A_{RASR}衡量,只要求整个观测带的平均模糊情况达到指标即可. 这样带来的问题是:有时虽然A_{RASR}符合指标要求,但是某些区域的模糊情况仍然较差,这些区域的图像质量相应也会较差. 图1是某一观测带的$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$曲线,观测带宽度30 km. 通常星载SAR系统的RASR指标为-18 dB. 而图1中满足该指标的区域只有19.45 km,但是整个观测带的$A_{\mathrm{RASR}}=-18.26$ dB,是满足要求的.

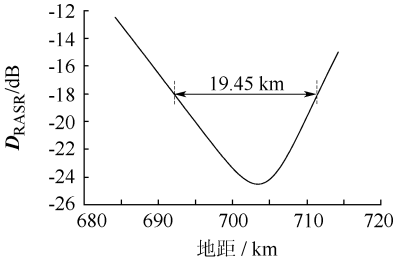

图1 某一观测带的$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$曲线

分析式(1)、式(2),$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$和$A_{\mathrm{RASR}}$主要取决于:①天线距离向方向图,决定了天线功率增益;②轨道高度H、地球半径R_e与被模糊点到天线相位中心距离R之比H/R,R_e/R,决定了被模糊点的空间位置;③脉冲重复周期T_p内电磁波传播距离与R之比$T_p\cdot c/R$(其中c为光速),决定了被模糊点与模糊点之间的相对位置.

当星载SAR系统参数与观测带位置确定后,以上3个决定因素中的②和③成为常数,唯一能够变动的是因素①. 实验证明,通过增大天线高度改变天线距离向方向图,能够改善距离模糊状况. 图2是相同SAR系统参数、同一观测带、不同天线高度条件下的$\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$对比曲线. 曲线1是天线高度2 m对应的结果,$A_{\mathrm{RASR}}=-22.341$ dB,满足-18 dB指标要求的区域有27.2 km;曲线2是天线高度1.8 m对应的结果,$A_{\mathrm{RASR}}=-17.627$ dB,满足-18 dB指标要求的区域有17.4 km.

但正如前文所述,这种方法有其不利之处. 因此,本文将采用线性约束最小方差(LCMV, Linearly Constrained Minimum Variance)算法,在不改变天线高度的前提下,进行天线方向图赋形,抑制距离模糊.

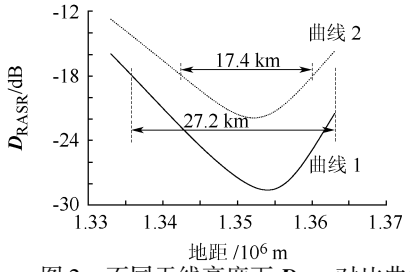

图 2　不同天线高度下 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$ 对比曲线

2　LCMV 算法

LCMV 算法的基本思想是:使天线主瓣内远区辐射场的场强分布逼近期望的场强分布,同时控制天线总的辐射功率最小[8-9]. 对距离模糊抑制而言,这一思想要有所改变:

1) 使天线主瓣内远区辐射场的场强分布逼近期望的场强分布;

2) 同时控制加权后天线总的辐射功率最小;

3) 有时也要使若干副瓣内远区辐射场的场强分布逼近期望的场强分布.

第 1) 点确保星载 SAR 观测带内回波信号的强度能够满足检测所需的信噪比条件;第 2) 点确保在满足第 1) 点的前提下,星载 SAR 系统在观测带外的辐射能量最小,对观测带内回波信号的总体干扰最弱;第 3) 点允许对若干副瓣照射区域的场强分布进行调整,从而使 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$ 得到改善. 星载 SAR 距离模糊抑制中,期望具有峰值旁瓣比尽量高、同时主瓣能够恰好覆盖观测区域的场强分布.

基于以上想法,首先定义 $M\times N$ 阶复矩阵:

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{M1} & E_{M2} & \cdots & E_{MN} \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中,N 为天线距离向阵元数目;M 为地面距离向采样点数;E_{kj} 为单位激励下第 j 个阵元在第 k 个采样点上产生的场强.

M 个采样点中,前 $K(K<M)$ 个点是天线指定区域(主瓣和若干副瓣)内的采样点,定义矩阵 $\boldsymbol{E}$ 的子阵 $\boldsymbol{E}_K$:

$$\boldsymbol{E}_K=\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{K1} & E_{K2} & \cdots & E_{KN} \end{bmatrix} \tag{4}$$

令激励复系数矩阵为

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} W_{1\mathrm{R}}+\mathrm{i}W_{1\mathrm{I}} \\ W_{2\mathrm{R}}+\mathrm{i}W_{2\mathrm{I}} \\ \vdots \\ W_{N\mathrm{R}}+\mathrm{i}W_{N\mathrm{I}} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中 W_k 为第 k 个阵元的激励系数. 则天线指定区域内的采样点上的总场强可表示为

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{E}_K\cdot\boldsymbol{W} \tag{6}$$

令加权矩阵为

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} c_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_M \end{bmatrix} \tag{7}$$

则加权后天线总的辐射功率为

$$P_{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{W})^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{W}) \tag{8}$$

其中 $(\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{W})^{\mathrm{H}}$ 是 $(\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{W})$ 的共轭转置矩阵.

至此,距离模糊抑制问题已经转化为一个最优化问题,可建立如下优化模型:

$$\left.\begin{aligned} &\min P_{\mathrm{T}} \\ &\boldsymbol{E}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}}$ 为期待的场强分布.

利用文献[9]给出的结果,可得出最优激励系数的解析解:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{W}_{\mathrm{opt}}=&(\boldsymbol{R}+e\boldsymbol{I}_N)^{-1}\boldsymbol{E}_K^{\mathrm{H}}[\boldsymbol{E}_K(\boldsymbol{R}+ \\ &e\boldsymbol{I}_N)^{-1}\boldsymbol{E}_K^{\mathrm{H}}+e\boldsymbol{I}_K]^{-1}\boldsymbol{E}_{\mathrm{I}} \end{aligned} \tag{10}$$

其中,$\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{E})^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{E})$;$\boldsymbol{I}_N$,$\boldsymbol{I}_K$ 分别为 N 阶,K 阶单位阵;e 是一个非常小的实数.

根据式(10)的结果激励各个阵元,即可得到相应的场强分布.

3　仿真结果

下面给出基于 LCMV 算法的距离模糊抑制仿真结果. 天线距离向阵元数目 260 个,阵元间距 0.015 m. 仿真中期望天线主瓣内远区辐射场的场强分布逼近均匀相位激励时的情况,副瓣远区辐射场的场强尽量弱.

作为对比,也给出了天线各个阵元在均匀相位规律激励下的仿真结果. 均匀相位规律激励是星载 SAR 天线经常使用的一种阵元激励方式. 图 3、图 4 分别是两种情况下的天线幅度方向图和 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$ 曲线.

从仿真结果来看,天线阵元均匀激励下,观测带的 $A_{\mathrm{RASR}}=-23.73$ dB,满足 -18 dB 距离模糊指标要求的区域为 27.3 km;利用 LCMV 算法进行距离模糊抑制后,$A_{\mathrm{RASR}}=-28.26$ dB,提高了

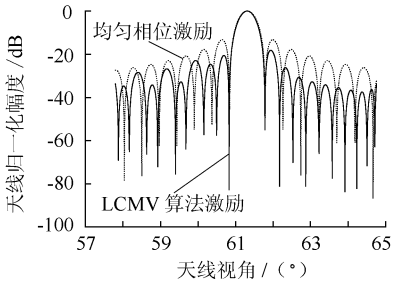

图3 均匀激励与LCMV算法激励下的天线幅度方向图

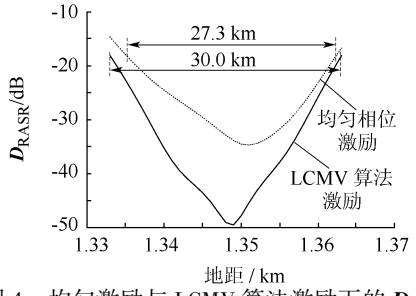

图4 均匀激励与LCMV算法激励下的 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{RASR}}$ 曲线

4.53 dB,满足指标要求的区域为30 km.

4 结束语

本文应用LCMV算法抑制星载SAR距离模糊,取得了较好的效果.该方法不需要改变天线高度,对SAR卫星总体设计有重要的参考价值.进一步的研究工作将集中于该方法在星载SAR系统方位模糊抑制方面的应用与算法性能的提高.

参考文献(References)

[1] Mehlis J G. Synthetic aperture radar range-azimuth ambiguity design and constraints[C]//Proceedings of the International Conference on Thermoelectric Engergy Conversion. Arlington, Va:IEEE,1980:143-152

[2] Curlander J C, Mcdonough R N. Synthetic aperture radar: systems and signal processing[M]. New York: Wiley,1991:296-305

[3] 陈元藻. 星载SAR模糊特性及其工程设计[J]. 上海航天,1997(4):50-57
Chen Yuanzao. Ambiguous characteristics of spaceborne SAR and engineering design[J]. Shanghai Aerospace,1997(4):50-57(in Chinese)

[4] Iwamoto M, Fujisaka Takahiko, Kirimoto T. A design method to increase the signal-to-ambiguity ratio of scan SAR[J]. Electron Commun Jpn Part I,2001,84(12):32-40

[5] 王峨峨,谢亚楠. 星载合成孔径雷达模糊特性研究[J]. 上海航天,2002(4):13-17
Wang Ee, Xie Yanan. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar[J]. Shanghai Aerospace,2002(4):13-17(in Chinese)

[6] 张永军,李彩萍. 合成孔径雷达模糊度分析[J]. 电子与信息学报,2004,26(9):1455-1460
Zhang Yongjun, Li Caiping. Analysis of synthetic aperture radar ambiguities[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2004,26(9): 1455-1460(in Chinese)

[7] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995:170-171
Ding Lufei, Geng Fulu. Radar theory[M]. Xi'an: XiDian University Publishing House,1995:170-171(in Chinese)

[8] 张亦希,傅君眉,汪文秉. LCMV方法在卫星多波束天线赋形中的应用[J]. 电子学报,2002,30(3):332-334
Zhang Yixi, Fu Junmei, Wang Wenbing. Application of LCMV algorithm to pattern synthesis for satellite multiple-beam antenna[J]. Acta Electronica Sinica,2002,30(3):332-334(in Chinese)

[9] 张亦希,傅君眉,汪文秉. 卫星多波束天线的赋形方法[J]. 空间电子技术,2001(1-2):6-14
Zhang Yixi, Fu Junmei, Wang Wenbing. Pattern synthesis method for satellite multiple-beam antenna[J]. Space Electronic Technology,2001(1-2):6-14(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)