

编队卫星 INSAR 系统中天线指向误差对天线方向图的影响

邱建国

(华北工学院 太原 030051)

摘要 在编队卫星 INSAR 系统中,为了实现干涉测量,参与干涉的合成孔径雷达的天线波束必须能同时覆盖同一照射区,实现空间同步。但由于各种干扰力矩的作用,天线指向会产生误差。分析了卫星姿态误差引起的天线指向偏离和由此带来的有效天线方向图的改变,对系统性能的分析提供理论依据。

关键词 编队卫星 干涉合成孔径雷达(INSAR) 天线指向 误差 天线方向图

The Affect of Error of Antenna Pointing in Formation Satellite INSAR System to Direction Picture

Qiu Jian Guo

(North China University of Science and Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract In the system of formation INSAR, the antenna direction compound aperture radar must cover with the same area. Antenna direction will bring error due to action of interfere moment. It analyses the influence of antenna pointing direction error induced by satellite attitude error. It provides direction in theory for the system design and performance analysis.

Key words Formation satellite Interferometer synthetic aperture radar(INSAR) Antenna pointing Error Antenna direction picture

1 引言

为了使编队卫星组成的 INSAR 系统实行干涉测量,参与干涉测量的合成孔径雷达的天线波束必须能同时覆盖同一照射区,实现空间同步。但在各种干扰力矩作用下,天线指向会产生误差,从而影响有效天线方向图。引起误差的因素有许多,这里主要分析由于卫星姿态误差引起的天线有效方向图的改变。卫星姿态误差常用刚体转动的欧拉角表示,分为滚动误差、俯仰误差和偏航误差,由此引起的天线指向误差也用这三个误差来表示。

2 天线指向误差对天线方向图的影响

定义天线坐标系 Oxyz; 坐标原点 O 为天线的相位

中心,x 轴沿天线长度方向指向前,y 轴沿天线的高度方向,z 轴垂直于天线平面,指向作用目标方向。假设由于卫星的姿态误差,使第二个天线产生了相对于第一个天线坐标系的旋转, $\theta_R, \theta_Y, \theta_P$ 分别表示滚动角、偏航角和俯仰角,它们的定义如图 1 所示,旋转角度的正方向为沿坐标轴向原点看去的逆时针方向,各种天线误差引起的波束偏转如图 1 右方所示,图中的阴影图案为天线波束脚印,不同程度的阴影表示不同的天线波束。这里只考虑由天线的偏航和俯仰对天线有效方向图的影响。

定义两个天线坐标系中的两个矢量 \vec{D}_1 和 \vec{D}_2 :

$$\vec{D}_1 = \{0, D_1 \sin \theta_{el}, D_1 \cos \theta_{el}\}$$

$$\vec{D}_2 = \{0, D_2 \sin \theta_{el}, D_2 \cos \theta_{el}\} \quad (1)$$

其中, θ_{el} 为天线沿高度方向机械视轴与电子视轴的夹角,假定两个天线波束在高度方向是对准的。第一个天线坐标系的 x 轴与轨道坐标系 x 轴同向,为了保

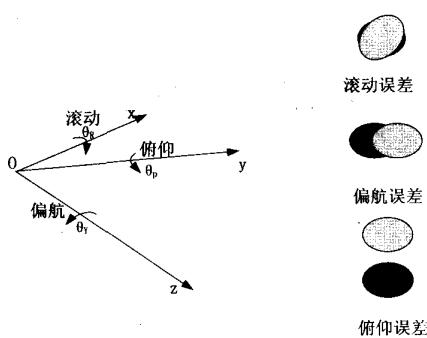


图1 天线指向误差定义以及由此引起的波束偏移

持空间同步,第二个天线坐标系的x轴与第二个卫星轨道坐标系之间有个夹角 $\Delta\Psi$,它决定了第二个雷达的工作方式为斜侧视,且斜视角为 $\Delta\Psi$ 。假定由于卫星姿态误差使第二个天线相对于第二个卫星的轨道坐标系发生了绕动,其中偏航角为 θ_y ,俯仰角为 θ_p ,为了得到两个天线波束的斜视角之差,将矢量 \vec{D}_2 投影到第二个卫星的轨道坐标系,得到 \vec{D}_{20} :

$$\vec{D}_{20} = T_p T_y T_{\Delta\Psi} \vec{D}_2 \quad (2)$$

其中, $T_{\Delta\Psi}$ 为由于斜视角引起的第二个天线坐标系和轨道坐标系之间的转换矩阵, T_y 和 T_p 为偏航和俯仰转换矩阵,它们分别为:

$$T_p = \begin{bmatrix} \cos\theta_p & 0 & -\sin\theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_p & 0 & \cos\theta_p \end{bmatrix} \quad T_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & -\sin\theta_y & 0 \\ \sin\theta_y & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\Delta\Psi} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\Psi & 0 & \sin\Delta\Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Delta\Psi & 0 & \cos\Delta\Psi \end{bmatrix}$$

经过一些转换,且假定绕动角很小,可以得到如下的近似关系式:

$$\vec{D}_{20} \approx \vec{D}_2 \begin{bmatrix} \Delta\Psi \cos\theta_{el} - \theta_y \sin\theta_{el} - \theta_p \cos\theta_{el} \\ \sin\theta_{el} \\ \cos\theta_{el} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于宽测绘带的编队卫星INSAR系统, θ_{el} 较小,两个天线波束的斜视角之差 $\Delta\varphi$ 近似为:

$$\sin\Delta\varphi \approx \Delta\Psi - \theta_y \theta_{el} - \theta_p = \Delta\Psi + \Delta\varphi_{err} \quad (4)$$

其中, $\Delta\Psi$ 为系统本身引起的, $\Delta\varphi_{err}$ 为天线指向误差引起的。影响干涉信号多普勒中心损失的是 $\Delta\varphi$,而只有其中的 $\Delta\varphi_{err}$ 是天线指向误差引起的,它使天线波束发生偏离,影响接收信号的信噪比和方位模糊比。经过推导可以证明,斜视角之差 $\Delta\varphi$ 和方位角 $\Delta\theta_{az}$ 之差近似相等^[1]。

上述讨论的天线波束偏离指的是天线的机械指向偏离,实际的天线方向图指向并不等于这个机械指向,天线方向图的实际指向称为天线的有效指向,下面推导天线的机械指向偏差和有效指向偏差之间的关系。当天线口面电场均匀分布时,天线辐射的电磁场在远区的方位向方向图为^[2]:

$$G(\theta) = \left(\frac{\sin(\pi(L_a/\lambda)\sin\theta)}{\pi(L_a/\lambda)\sin\theta} \right)^2 \quad (5)$$

这里, L_a 为天线长度, θ 表示目标点在方位向偏离天线视轴的角度(离轴角)。则第一个天线的方向图如图2实线所示,

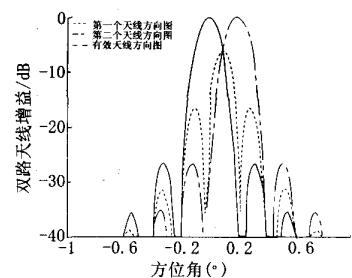
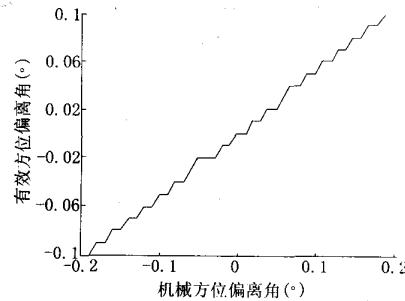


图2 编队卫星INSAR系统的天线方位向方向图

图3 $\Delta\theta_{err}$ 和 $\Delta\theta_{eff}$ 之关系

虚线为机械方位角偏离为 0.2° 的第二个天线方向图,为了比较,图中还绘出了第二个天线的有效方向图。从图中可以看出,第一个天线方向图和第二个天线方向图的叠加得到的有效天线方向图的偏离不同于第二个天线波束的机械偏离,而影响系统性能的是有效天线方向图,通过对不同机械方位角偏离的有效方向图的分析,可以得出机械方位角偏离 $\Delta\theta_{err}$ 和有效方位角偏离 $\Delta\theta_{eff}$ 之间的关系近似为一个线性关系:

$$\Delta\theta_{eff} = 0.5\Delta\theta_{err} \quad (6)$$

(4)式中由天线指向误差引起的斜视角之差应该修正为:

$$\Delta\varphi \approx \Delta\Psi + 0.5 \times \{-\theta_y \theta_{el} - \theta_p\} \quad (7)$$

(下转第739页)

精度太高又会造成不必要的浪费,因此本文从弹道修正引信的实际需要出发,用理论分析、仿真的方法对 MIMU 的精度进行初步论证。

3.1 仿真方法

本文采用的是 122mm 火箭弹,想将落点精度由 1/100 提高到 1/200。将 MIMU 按照图 1 所示安装在火箭弹的质心位置,火箭弹安装于三轴转台上,来模拟火箭弹实际飞行状态,MIMU 的测量信号输出到仿真计算机上,利用计算机作为数学平台,采用图 2 的数学模型来仿真计算火箭弹弹道参数,利用扰动弹道数学模型来计算落点精度和达到精度需要的修正量。

精度仿真时,在 MIMU 的输出中人为加入加速度计和陀螺的误差,来仿真计算弹道落点与不加误差时的落点之间的偏差,进行多次仿真可以找到 MIMU 的误差与火箭弹落点精度之间的定量关系,从而反过来确定 MIMU 的精度,其具体步骤为:

(1)按照图 2 所示,建立 MIMU 数学仿真模型,得到弹丸的实际空间数据;

(2)利用得到的弹丸实际空间数据进行弹道辨识,得到所需的实际弹道参数;

(3)利用扰动弹道数学模型,计算弹丸的实际落点;

(4)在 MIMU 实际输出数据中,人为逐一加入陀螺和加速度计的误差值,重复以上三步,得到加入误差后的弹丸落点,计算射程偏差和方向偏差;

(5)重复以上四步,得到陀螺和加速度计的误差与弹丸落点精度之间的数据列表;

(6)利用系统辨识理论得到 MIMU 误差与弹丸落

点精度之间的定量关系;

(7)计算为了满足需要的弹丸落点精度,MIMU 应该满足的精度要求。

3.2 仿真结果

经过多次仿真,仿真结果列于表 1:

表 1

惯性器件	精度
加速度计 A1	7.5mg(0.01%)
加速度计 A2,A3	5mg(0.3%)
陀螺 G1	零漂 100°/s/20s 分辨率 0.34rad(20°/s)
陀螺 G2,G3	零漂 0.07°/s/20s 分辨率 0.00017rad(0.01°/s)

4 结束语

由于火箭弹引信内部空间有限,因此在弹道修正引信中不可能采用复杂的制导机构,MIMU 由于体积小、精度高而成为首选。本文就 MIMU 在引信中的安装方式、工作原理进行了分析,并结合弹道的实际情况利用卡尔曼滤波进行了弹道辨识。最后对 MIMU 的精度进行了分析和初步论证。

参考文献

- 1 徐朋友. 火箭外弹道学. 北京:兵器工业出版社,1989.
- 2 陈哲. 捷联惯导系统原理. 北京:宇航出版社,1986.
- 3 张煜烽. 捷联惯导/GPS 误差控制技术:[博士论文]. 北京:北京理工大学,2001.
- 4 李树英,许茂增. 随机系统的滤波与控制. 北京:国防工业出版社,1991.

(上接第 736 页)

参考文献

- 1 Dirk Geudtner, Manfred Zink, Christoph Gierull, Scott Shaffer. Interferometric alignment of the X-SAR anten-

na system on the space shuttle radar topography mission. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2002, 40(5):995~1005.

- 2 蔡希尧. 雷达系统概率. 北京:科学出版社. 1983.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>