

机载激光成像雷达运动畸变的分析与修正^{* *}

王蔚然^{* *}

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 针对在机载应用情况下, 单元探测的激光成像雷达的载机运动对其地面目标成像影响的问题, 给出了激光成像的系统模型; 阐明了激光雷达扫描成像的映射变换关系, 建立了定位于大地坐标的被成像目标与载机运动平台以及雷达坐标之间的数学关系式, 分析了导致目标成像发生畸变的原因及影响因素, 并给出了按时序的逐级修正方法。

关键词 机载激光雷达; 运动成像; 机载扫描成像; 动态畸变修正

中图分类号 TN 249. 3; TP391

对激光成像雷达的研究, 以往主要集中于对相对静止的目标成像的研究^[1]。而要设计与研制机载激光成像雷达, 必须首先弄清载机的运动将对地面目标的雷达成像引起的变化及进行修正等问题, 本文则针对单元探测扫描成像的激光雷达, 着重讨论激光成像的运动畸变问题。

1 激光成像雷达系统模型

激光雷达通过发射的激光照射目标, 并接收由目标反射回来的光信号完成目标定位^[2]。激光成像雷达则可借助于按预定规律在空间扫描的发射激光来照射目标, 并接收由目标面反回的后向散射信号, 从中提取其蕴含的目标位置信息和物理特征, 再通过时空映射变换形成目标三维图像。其成像的实质是建立和显示被探测目标的空间分布。成像的过程实质上是完成了目标空间至显示空间的映射变换过程。

若用 $f(X, Y, Z, W)$ 表示被探测对象的空间分布及其物理特征 W 的分布, $f(x, y, z, w)$ 为人眼可视的显示空间分布与对应于物理特性 W 的人眼可辨识的标识量 w 的分布关系, 则上述成像映射变换过程, 可用下式描述

$$f(x, y, z, w) = F[f(X, Y, Z, W)] \quad (1)$$

成像系统的模型如图 1 所示。图 1 的成像系统模型对目标信息的载体未作任何限定, 系一个广义的模型。对于激光成像雷达, 可通过对其物理过程的描述, 得到与图 1 的成像系统模型相吻合的结果, 同时展现模型的内涵。

$$f(X, Y, Z, W) \longrightarrow F(\circ) \longrightarrow f(x, y, z, w)$$

图 1 成像系统的模型

假设发射天线孔径处的发射光场不受扫描位置的影响, 其复包络相对于光束的空间指向是恒定的, 定义为 $E_T(\rho, t)$; 扫描视场内用以表示大气传播特性的大气格林函数 $h_c(\rho', \bar{p})$ ^[3] 在成像一帧的时间内不随系统瞬时视场的变化而变化; 设目标的反射率 $T(\rho', t)$ ^[4] 与雷达瞬时视场有关, 这

* 1998 年 8 月 31 日收稿, 1998 年 10 月 28 日修改定稿

* 电子部预研基金资助项目

* * 女 59 岁 大学 教授

是因为视场内不同的目标或者同一目标不同的照射点所至。所以用 $T_{i,j}(p', t)$ 表示不同的扫描位置对应的目标反射特性, 即不同的 i, j 定位了光束不同的空间指向。这样, 任一个光束指向到达目标面的光场为

$$E_i(p', t) = \int d\rho E_T(\rho, t - R/c) h_c(p', \rho) e^{\pm j2\pi\rho/\lambda}$$

入射光场与目标作用产生的反回光场 $E_r(p', t)$ 为

$$E_r(p', t) = E_i(p', t) T_{ij}(p', t)$$

则接收天线孔径处的光场分布 $[E_r(p, t)]_{i,j}$ 为

$$\begin{aligned} [E_r(p, t)]_{i,j} &= \int d\rho' E_r(p', t - R/C) h_c(p', \rho) e^{\pm j2\pi\rho'/\lambda} = \\ &= \int d\rho' \int d\rho E_T(\rho, t - 2R/C) h_c(p', \rho) T_{ij}(p', t) h_c(p', \rho) e^{\pm j2\pi\rho'/\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $2R/C$ 为收发之间由传播路径产生的时延, $e^{\pm j2\pi\rho'/\lambda}$ 为相对径向运动产生的多普勒频移。反回光场经探测接收、预处理后可以获得一组有关被探测目标的信息, 可用 $f(i, j, R, I)$ 来表示, 这里 i, j, R 定义了目标空间坐标。其中强度 I 直接与目标反射特性相关。这里的 i, j 与预定的扫描规律相对应, 表示了空间量化坐标位置。显然此结果与图 1 系统模型中的 $f(X, Y, Z, W)$ 具有相同的含义, 那么完成预定的映射变换即可获得目标的图像。但当成像雷达的载体与目标发生相对运动时, 情况就有所变化, 为突出以下的分析, 假定扫描将不引入静态几何畸变。

2 载机运动对目标成像影响的分析

2.1 载机运动的描述

载机相对地面目标存在 6 个自由度的运动, 3 个平移运动和 3 个旋转运动, 为方便分析, 建立大地坐标 $OXYZ$ 与机体坐标 O_FXYZ 的关系如图 2 所示。其中 O_F 一般取在飞机质心处, O_FX 处于飞机对称平面内与轴线平行; O_FY 垂直于飞机对称平面, O_FZ 在飞机对称平面内且垂直于 O_FX 轴指向下方; θ 为俯仰角以抬头为正; 滚转角 ϕ 指机体轴 O_FZ 与含 O_FX 的铅垂面间的夹角; 偏航角 ψ 为机体轴 O_FX 在地面上投影与地轴 OX 的夹角, 右偏为正。

2.2 载机运动对激光雷达成像影响的分析

载机运动对激光雷达成像产生影响的根本原因在于成像速率与载机运动速度属于相对可比拟的范围, 对于脉冲体制的扫描成像雷达, 其成像速率除受限于扫描器的响应速率之外还受限于雷达的最大探测距离, 即每个像元的测量时间应满足 $T > 2R_{\max}/C$, R_{\max} 为雷达的最大探测距离。所以单元探测的激光成像雷达的成像速率一般不可能达到 TV 的帧速。指定的应用参考数据为 1 帧/秒, 256×256 像素。

对于静止目标成像, 成像雷达可视为置于大地坐标的原点; 而对于机载情况, 成像雷达被视为处于机体坐标的原点 O_F , 虽然此时成像雷达仍按预定规律作空间扫描, 但由于载机相对大地运动的原因, 对地面目标的实际扫描图样不再与雷达预定的扫描图样相吻合, 而是扫描与载机两者复合运动的结果。载机平台的坐标相对大地坐标可能存在三个自由度的平移和三个自由度的旋转, 如图 2 所示。即: 雷达此时所提取的空间采样点的实际分布将不再单单由雷达扫描器的预定规律决定, 若仍按原映射关系成像, 由载机平台运动引入的畸变必在其中。具体分析如下: 假定大地坐标系为 $O-XYZ$, 载机平台坐标系为 O_F-XYZ , 成像雷达坐标系为 $S-UVW$ 。设大地上的一点 P , 在成像雷达坐标系的坐标为 (U_p, V_p, W_p) , 而在大地坐标系则为 (X_p, Y_p, Z_p) , 两者则存在以下变换关系

置面

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mathbf{A} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} U_p \\ V_p \\ W_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

则接

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mathbf{A} \left\{ \mathbf{B} \begin{bmatrix} U_p \\ V_p \\ W_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

式中 (X_0, Y_0, Z_0) 为载机平台坐标系原点 O_F 在大地坐标系中的坐标平移量, 且由于载机运动, 该平移量为

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{00} + U_x \Delta t \\ Y_{00} + U_y \Delta t \\ Z_{00} + U_z \Delta t \end{bmatrix} \quad 2t$$

$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为成像雷达坐标原点在载机平台坐标系中的坐标平移量; \mathbf{B} 为成像雷达坐标系相对于载机平台坐标系的姿态角旋转矩阵 (3×3) ; \mathbf{A} 为载机平台坐标系相对于大地坐标系的姿态角旋转矩阵 (3×3) , 由于载机相对于地面运动, 此项为姿态角速度与时间的函数。

从式(5)可以看出: 1) 式(5)描述了机载/车载成像雷达的映射关系; 2) 式(5)包含了相对静止目标成像的映射关系, 此时 \mathbf{A} 矩阵为单位矩阵; $(X_0, Y_0, Z_0) = (0, 0, 0)$ 。 \mathbf{B} 矩阵反映预定的扫描规律, 与载机运动无关。特别需指出的是式中用以描述成像雷达的 (U_p, V_p, W_p) 为直角坐标系, 与扫描方式之间尚存在额外的变换关系; 3) 由于载机的运动, 成像映射变换中引入了 (X_0, Y_0, Z_0) 项和 (3×3) \mathbf{A} 矩阵项, \mathbf{A} 矩阵属时变的参数矩阵, 与载机运动规律有关, 且严格地说, 对每个像元存在不等量的变化, 载机运动的影响存在于每个像元之间; 4) 如果成像速率高达对每帧内的所有像元 \mathbf{A} 矩阵及 (X_0, Y_0, Z_0) 几乎可以看成是一个常量, 即载机运动不破坏客观地物的相对坐标关系, 则由相对运动引入的畸变可以忽略。

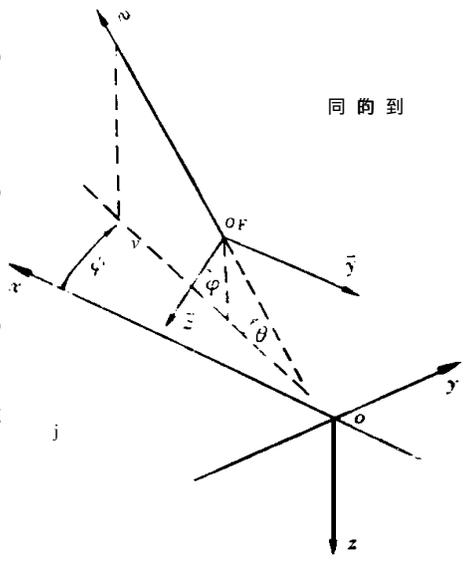


图 2 大地坐标与机体坐标关系图

3 运动成像畸变修正方法

由上面的分析可知, 畸变的原因在于获取前后像元的观测点坐标发生了变化, 修正的原则只能是根据载机运动的信息, 把前面采集的客观物体的像元纠正到当前的观测点。仍然假定大地上的一点 P , 在 $t=0$ 时具有以下的关系

处
而当 $t=1$ 时

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{00} \\ Y_{00} \\ Z_{00} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_0 \begin{bmatrix} X_{p0} \\ Y_{p0} \\ Z_{p0} \end{bmatrix} \quad R$$

地面 系成

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} X_{p1} \\ Y_{p1} \\ Z_{p1} \end{bmatrix}$$

将 $(X_{p0}Y_{p0}Z_{p0})$ 修正至 $(X_{p1}Y_{p1}Z_{p1})$ 得

$$\begin{bmatrix} X_{p1} \\ Y_{p1} \\ Z_{p1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1^{-1} \begin{bmatrix} X_{p0} \\ Y_{p0} \\ Z_{p0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{00} - X_{01} \\ Y_{00} - Y_{01} \\ Z_{00} - Z_{01} \end{bmatrix} \quad (6)$$

如前所述, \mathbf{A} 为载机平台坐标系相对于大地坐标的姿态角旋转矩阵, 可以证明 $\det \mathbf{A} = \pm 1$, 所以式 (6) 成立。

按图 2 给定的坐标关系, \mathbf{A} 矩阵为两坐标系的方向余弦。各参数表示如下

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \psi \cos \theta \\ a_{12} &= \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi \\ a_{13} &= \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ a_{21} &= \sin \psi \cos \phi \\ a_{22} &= \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \\ a_{23} &= \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ a_{31} &= -\sin \theta \\ a_{32} &= \cos \theta \sin \phi \\ a_{33} &= \cos \theta \cos \phi \end{aligned}$$

式中 $\psi = \psi(t)$, $\theta = \theta(t)$, $\phi = \phi(t)$, 且由载机三个角速度决定。

对式 (6) 中的 3 个姿态角和坐标原点的平移量的修正, 取决于当时飞机运动参数, 原则上说 \mathbf{A} 及 (X_0, Y_0, Z_0) 对每个像元都对应了不同的值, 所以应按式 (6) 逐点来修正。

由 \mathbf{A} 矩阵的各参数可知, 对于六维的运动状态修正的运算工作量相当大, 所以实时修正系统的实现是很困难的, 将另文加以研究。

式 (6) 仅仅描述机体坐标之间的转换, 实际操作时还必须由式 (6) 与式 (4) 找出相应成像雷达新的坐标值, 并考虑扫描成像映射变换关系的转换。

修正式 (6) 表明, 我们是根据“0”时刻所获得的关于大地上 P 点的位置信息 (X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0}) 与载机运动的参数, 求得载机运动至“1”时刻时 P 点的新坐标。如果在“0”时刻由于种种原因, 如由于复合运动, 成像雷达瞬时视场限制已无法获取 P 点的反回信号, 依靠修正是无能为力的。修正是在已获得客观景物信息的基础上完成的, 对由于载机运动而丢失的信息, 一般而言很难弥补, 除非 P 点的临域与 P 点关联性很强的像元的信息未被丢失, 但即使这样也要付出相当的代价, 给实时操作带来困难。

4 结束语

本文针对激光成像雷达运动成像可能导致的畸变问题, 全面、系统地进行了分析, 首次对动态成像和畸变给出了完整的数学描述, 进而导出修正方法的数学描述式。它有助于同行开展激光成像雷达实用化研究。对文中的修正方法已通过了计算机仿真, 验证了其正确性。关于动态修正的仿真问题, 将另文发表。

参 考 文 献

- 1 王蔚然. 激光成像雷达在我国. 中国科学技术文库. 北京: 科学技术文献出版社, 1997
- 2 Bachman Christian G. Laser radar systems and techniques. Massachusetts: Atech House INC, 1979:3
- 3 Papuit David M. Atmospheric propagation effects on coherent laser radars. SPIE, 1981, 300:86~90
- 4 Shaprio J H. Target-reflectivity theory for coherent laser radars. Applied Optics, 1982, 21 (18):3 398~3 407

Analysis and Amending of Dynamical Disto of Airborne Imaging Ladar

Wang Weiran

(Inst. of Applied Physics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper studies airborne imaging ladar with unit detector to analyze the effects of the airborne movement on laser scanning imaging of ground target. In this paper, the imaging ladar system model is founded and the mapping transormation relationship of ladar scanning imaging are explained. The mathematic relations among imaged earthbased target and moveing airborne and Ladar are established. The distortion mechanism and factor are analysed. At last the method of time series level by level amending is deduce.

Key words airborne ladar; moving imaging; airborne scanning imaging; dynamical distortion amending

编辑 叶红

·科研成果介绍·

应用软件管理框架 APP Farme

主研人员: 唐雪飞 熊萍 徐波 谭浩 刘锦德 谢娟

APP Farme 是基于 Sun 工作站的一个应用软件管理框架, 它为用户提供了一个图形化、集成应用程序的应用软件管理器, APP Farme 在多用户环境中实现了每个使用者都可以拥有自己的配置文件并提供了基于通行字的安全管理机制, 从而能独立地管理各自的应用, 而互不干扰。其次系统能将多个相关的应用划分成组, 并能够以目标的形式表示和管理应用软件。对图标的描述可以由使用者根据需要自己定义。APP Farme 为用户提供了超文本格式的联机帮助, 提供了良好的应用编程接口, 使用者可借此开发出自己的基于图标的应用系统。APP Farme 是一个功能很强的先进实用的应用软件管理框架。

·科 卞·