文章编号:1001-5078(2012)05-0505-05　　·激光应用技术·

GPS/INS 技术在静态激光通信初始捕获中的应用

赵　雪[1],母一宁[2],姜非欧[3],魏枫林[1]
(1. 长春理工大学电子信息工程学院,吉林 长春 130022;2. 长春理工大学光电信息工程学院,吉林 长春 130022;
3. 长春理工大学机械电子工程学院,吉林 长春 130022)

摘　要:为了实现水平远距离大气无线激光通信链路快速建立,并快速获得捕获不确定区域的大小,采用了 GPS/INS 组合导航系统来完成静态水平链路无线激光通信初始捕获的对准定位,同时对该系统的对准算法进行了研究并优化。首先,分析了 GPS/INS 工作原理,根据捕获过程,提出针对该过程的捕获模型,并且分析了该模型的可行性。接着,针对该模型提出相应的静态初始对准算法。然后,通过该算法进行了外场实验。最后,根据实验结果校正捕获模型与其算法,经实验获得了捕获不确定区域的大小为 27 mrad。基本满足 10 km 水平链路大气无线激光通信初始捕获的基本要求,其特点为捕获速度较快,其捕获速度优于 10 s,基本不受天气影响。

关键词:激光通信;GPS/INS;初始捕获;对准算法;旋转角
中图分类号:TN929.1　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.05.006

Application of GPS/INS technology in the initial capture of static laser communication

ZHAO Xue[1], MU Yi-ning[2], JIANG Fei-ou[3], WEI Feng-lin[1]
(1. College of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. College of Mechanical and Electronic Engineering Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to build rapid atmospheric wireless laser communication links and quickly obtain the size of uncertain capture area, GPS/INS integrated navigation system was used to complete the alignment positioning, meanwhile the alignment algorithm of this system was studied and optimized. Firstly, the working principle of GPS/INS was analyzed, the model was proposed according to capture procession, and the feasibility of the model was analyzed. Then, static initial alignment algorithm of the model was proposed. Finally, field experiment was carried out according to this algorithm. Based on the experimental results, capture model and its algorithm were calibrated, and the size of the uncertainty area was 27 mrad, which basically meets the requirements of atmospheric Wireless Laser communication of 10 km horizontal link. The capture time is less than 10 s, and it's independent of weather.

Key words: laser communication; GPS/INS; initial acquisition; alignment algorithm; angle of rotation

作者简介:赵　雪(1986 -),女,硕士研究生,主要从事目标跟踪与捕获技术研究。E-mail:zhaoxue1986922@163.com
收稿日期:2011-10-18

1 引 言

在水平链路静态无线激光通信开始前,要实现两个激光通信终端的精确对准和快速捕获以及高精度跟踪。其中第一步为初始捕获,初始捕获既是水平链路大气无线激光通信的关键技术,也是光轴对准与跟踪的前提条件,即将两个通信终端的视轴旋转到捕获不确定区域。而通信链路能否建立,以及通信链路建立时间长短的关键因素就在于视轴能否正确地旋转到捕获不确定区域及该区域的大小[1],即捕获精度。目前国内外初始捕获对准技术主要有全光扫描,其抗干扰性强,但由于是使用了比传统方式更多的扫描信标光使得其速度慢,且受环境影响严重,不利于快速捕获。激光回波定位技术捕获速度快,抗干扰性强,但其系统的复杂度相对更高。电磁波雷达技术相对简单,但分辨率低且受干扰性强[2-4]。为了建立一种高效、稳定的通信链路,本文提出了一种基于 GPS/INS(全球导航/捷联惯导)系统的远距离光轴初始捕获技术,并提出其优化算法,为后续光轴对准与跟踪提供了保障。

2 模型分析

通常情况下,在开环捕获前,视轴都锁定在初始零位,在执行捕获时,通过目标视轴和当前视轴进行解算,分别求出伺服转台在方位和俯仰两个方向的调整角度。当主控机开始工作后,要在 10 s 内建立起通信链路,捕获过程需要 GPS/INS 的定位定向数据,这些数据可以通过射频链路得到,得到定位定向数据后,通信两端分别解算各自需要旋转的方位角和俯仰角,再通过主控机控制伺服转台。初始捕获模型图如图 1 所示。

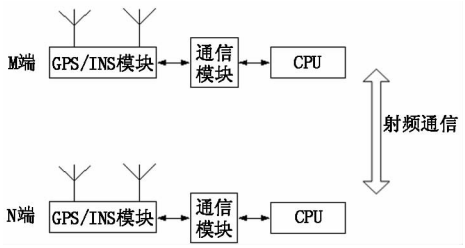

图 1 初始捕获模型图

Fig. 1 block diagram of the initial capture model

在通信开始以前系统首先利用 GPS 获得位置信息,GPS 具有很多优点。简单来说,GPS 定位基本原理就是已知两点间距离,求未知点坐标的问题。已知的两点间距离的方法是卫星发射电波至接收机到电波的时间差 τ、乘以光速 c 求得距离 ρ,即:

$$\rho = c \times \tau \tag{1}$$

由于卫星原子钟和接收机时钟与 GPS 原子时不同步,都存在钟差,需要求出四个未知量,因此至少通过对四颗卫星的数据进行计算,即可得出当前接收机的位置,即:

$$\rho' = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2} + c\Delta tr \tag{2}$$

式中,X_j, Y_j, Z_j 表示第 j 颗卫星在地球协议坐标系(WGS-84)中的直角坐标,可以利用卫星发播的导航电文中给出的卫星位置信息经计算得到,故可以认为是已知量。而 X, Y, Z 为接收机在同一坐标系中的位置坐标,与接收机钟差同为待求量。共 4 个位置参数,只需对 4 颗卫星同步观测,获得 4 个伪距观测值 $\rho'_j (j = 1,2,3,4)$。组成 4 个方程式,通过解算即可解除接收机位置(X, Y, Z)和钟差 Δtr。

获得 GPS 信息后,需将通信视轴指向真北方向并和真北平行来作为零位,即水平角和俯仰角归零,此时载体的姿态信息由 INS 测得。惯性导航系统采用了一种物理方法测姿,这种方法既不发送能量,也不依赖任何的外部信息,完全自主。当通信终端有摆动时,利用陀螺仪使平台始终跟踪当地水平面,三个轴始终指向东、北、天方向,同时在这三个轴向上分别安装上加速度计。陀螺仪和加速度计分别测量三个轴向上的角加速度和线加速度,测量得到的载体角运动和线运动参数是沿与载体固联的坐标轴上的分量。导航计算机通过计算“姿态矩阵”可以将加速度信息转换到惯性坐标系或当地地理坐标系中,从而实现了“数字平台”,然后在进行速度位置计算[5]。

捕获控制系统要求能够高速、稳定地获取通信平台的高精度信息,若不能获取该信息或信息的精度,且更新速率不高,激光通信链路就不能被成功地建立。全球定位系统(GPS),虽然具有较高的导航精度,但野外环境较为复杂,卫星所传递的定位导航信号经常会由于遮挡或干扰而中断,导致无法得到稳定的信息。而作为一种完全自主的惯性导航系统(INS),虽具有不依赖外界信息、隐蔽性好、抗辐射性强以及全天候等优点,但时间的延长其误差会积累,长时间工作后会产生较大的误差。所以为了提高系统的整体导航精度、性能以及对准和再对准的能力,进而提高捕获概率,减少捕获时间,就需要采用适当的方法融合 GPS 和 INS 信息获取通信平台

的运动信息[6]。

3　静态初始对准算法

首先通过 GPS/INS 组合导航系统获得两个通信终端的大地坐标系(WGS－84)坐标分别为(B_i, L_i, H_i),(B_j, L_j, H_j),其中,$B_i, B_j, L_i, L_j, H_i, H_j$ 分别两个通信终端 M, N 的纬度、经度和海拔高度。将同一坐标参照系下的大地坐标(B, L, H)转换为空间直角坐标(X, Y, Z),转换公式为:

$$\begin{cases} X = (N+H)\cos B\cos L \\ Y = (N+H)\cos B\sin L \\ Z = [N(1-e^2)+H]\sin B = \left[N\cdot\dfrac{a^2}{b^2}+H\right]\sin B \end{cases} \tag{3}$$

$$N = a/\sqrt{1-e^2+\sin^2 B} \tag{4}$$

$$e^2 = \frac{a^2-b^2}{b^2} \tag{5}$$

式中,N 为卯酉圈(地平坐标系中的大圆。即与子午圈相垂直的地平经圈,它与地平圈相交于东点和西点)半径;a 为参考椭球的长半轴;b 为参考椭球的短半轴;e 为参考椭球的第一偏心率[6-7]。

通过坐标转换获得 M, N 两通信终端的空间直角坐标分别为(X_i, Y_i, Z_i),(X_j, Y_j, Z_j)。然后再通过坐标转换矩阵将 N 点的坐标转换到以 M 点为原点的站心坐标系下,即:

$$\begin{bmatrix} N_{ij} \\ E_{ij} \\ U_{ij} \end{bmatrix} = T_i \cdot \left[\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}\right] \tag{6}$$

其中,旋转矩阵 T_i 为:

$$T_i = \begin{pmatrix} -\sin B_i\cos L_i & -\sin B_i\sin L_i & \cos B_i \\ \sin L_i & \cos L_i & 0 \\ \cos B_i\cos L_i & \cos B_i\sin L_i & \sin B_i \end{pmatrix} \tag{7}$$

通过上述坐标转换后,可以获得 N 点在以 M 点为原点的站心坐标系下的坐标,其中 U 轴与过 M 点的参考椭球面得发现重合,指向天顶;N 轴垂直于 U 轴,指向真北方向(参考椭球的短半轴);E 轴垂直于 U 轴和 N 轴,最终形成左手坐标系。同理,我们也可以算出 M 点在以 N 点为原点的站心坐标系下的坐标。通常开始时刻将视轴指向真北方向并和真北平行来作为零位,即水平角和俯仰角归零。基于此,在两个站心坐标系下分别算出 M, N 两点通信终端需要旋转的方位角和俯仰角[8]。假设旋转端在站心坐标系的第一象限里时,通过简单的立体几何求角得出旋转方位角和俯仰角的公式:

方位角:

$$\text{yaw} = -\left(180 - \frac{180}{\pi}\times\arctan(|E|/|N|)\right) \tag{8}$$

俯仰角:

$$\text{pitch} = -\frac{180}{\pi}\times\arctan(|U|/\sqrt{N^2+E^2}) \tag{9}$$

旋转方向符号规定:水平角,顺时针为正,逆时针为负;俯仰角,向上为正,向下为负。

为了减小转台掉转时间,进而减小捕获时间,提高捕获速率,本文优化了解算旋转角算法,即初始时刻无需将水平角和俯仰角归零,通过 GPS/INS 获得通信终端姿态,可将通信终端从初始状态直接旋转到不确定区域。详情如表 1、表 2 所示,其中(N, E, U)为旋转端在站心坐标系下的坐标。$\alpha = \dfrac{180}{\pi}\times\arctan(|E|/|N|)$,$\theta = \dfrac{180}{\pi}\times\arctan(|U|/\sqrt{N^2+E^2})$,$Y$ 和 P 是由 GPS/INS 获得的通信终端的航向角和俯仰角。

表 1　水平旋转角求解结果

Tab. 1　result of horizontal rotation angle

坐标范围	航向角范围/(°)	水平旋转角/(°)
$N>0, E>0$	无	$180+\alpha-Y$
$N>0, E<0$	无	$180-\alpha-Y$
$N<0, E>0$	$Y<180$	$-\alpha-Y$
$N<0, E>0$	$Y>180$	$360-\alpha-Y$
$N<0, E<0$	$Y<\alpha+180$	$\alpha-Y$
$N<0, E<0$	$Y>\alpha+180$	$360+\alpha-Y$

表 2　俯仰旋转角求解结果

Tab. 2　result of pitching rotation angle

坐标范围	俯仰旋转角/(°)
$U>0$	$-\theta-P$
$U<0$	$\theta-P$

4　实验与分析

实验方法如下:为了验证算法精度,本实验选择了四个实际通信点进行实验如图 2、图 3 所示,分别定义如下:A－理工科技大厦十三楼,B－东区第一教学楼七楼,C－东区第一教学楼五楼,D－东区西配楼五楼。下文中四个通信点以 A,B,C,D 代替。这四个点如图所示形成两个三角形(ΔABD,ΔACD),两三角形的所有边长均为已知,根据公式(10),即可算出两三角形的内角 λ, ε,使其作为系

统真值。同时从 A 点向 B,C 两点旋转,测得两个水平旋转角,并做差,即可得出内角 λ 的测量值,此值与公式(10)计算得到的 λ 相比较即可验证水平旋转角精度。同理可验证俯仰旋转角精度。

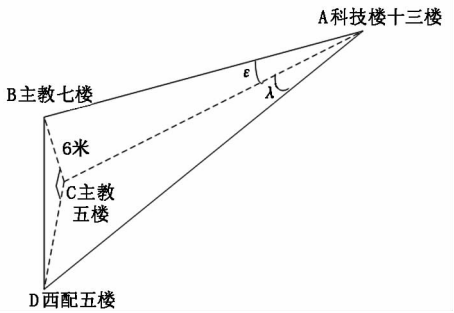

图2 实验地点图

Fig. 2 location structure of the experiment

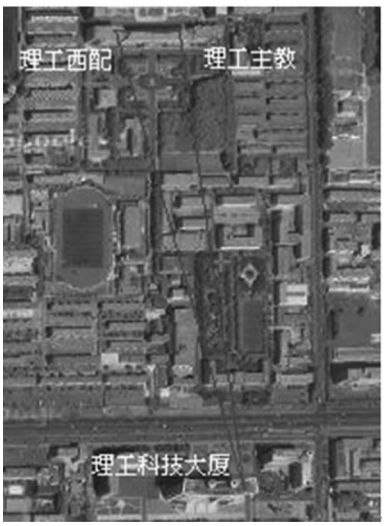

图3 实验地点鸟瞰图

Fig. 3 aerial view of the experimental sites

$$A = \arccos[(b^2 + c^2 - a^2)/2bc] \tag{10}$$

实验开始前,忽略通信终端的初始状态,将 A 点视轴指向真北方向(由 GPS/INS 系统给出),将 BCD 三点视轴指向真南方向(由 GPS/INS 系统给出),通过 GPS/INS 组合导航系统测得 A,B,C,D 四点的经度、纬度、高度如表3所示。

表3 GPS/INS 测得坐标值

Tab. 3 coordinates of GPS/INS measured

位置	经度/(°)	纬度/(°)	高度/m
A	125.3082609	43.8290628	309.957
B	125.3064931	43.8366021	289.453
C	125.3065024	43.8365942	283.398
D	125.3050931	43.8366021	283.425

主控机接收 GPS/INS 模块一帧定位定向数据时序图如图4所示,需要大约 15 ms。

图4 定位定向数据时序图

Fig. 4 positioning and orientation data timing diagram

将经度,纬度,高度代入公式(3)~(9)通过算法进行坐标转换,并计算 A 点在分别以 B,C,D 为原点的站心坐标系下的坐标,如表4所示。

表4 计算 A 点在站心坐标系下的坐标值

Tab. 4 the station coordinates of the A point

原点	N(A 北)/m	E(A 东)/m	U(A 天)/m
B	-838.23151	143.38092	19.681763
C	-837.08594	141.47693	25.707947
D	-838.07324	253.64389	25.292252

获得各点站心坐标系下的坐标后,根据坐标值的范围,将坐标值代入表1表2,即可计算出 A 点到 B 点和 D 点的水平旋转角,A 点到 B 点和 C 点的俯仰旋转角,其中,Y,P 为零。将计算得到的旋转角做差如表5、表6所示。

表5 水平旋转角

Tab. 5 horizontal rotation angle

A 到 B 水平旋转角/(°)	A 到 D 水平旋转角/(°)	水平旋转角之差/(°)	真实值/(°)
-9.7065983	-16.838495	7.1318967	7.6468878

表6 俯仰旋转角

Tab. 6 pitching rotation angle

A 到 B 俯仰旋转角/(°)	A 到 C 俯仰旋转角/(°)	俯仰旋转角之差/(°)	真实值/(°)
-1.3258145	-1.7344884	0.4086139	0.2373832

为了计算真值和测量值的均方误差,重复做了 50 次实验,本文只给出一组相似的数据,如表3~表6所示。计算得到水平旋转角均方差为 0.5073,俯仰旋转角均方差为 0.1635,可以将差值 0.5073 作为算法误差,为了提高捕获精度,捕获不确定区域大概为算法误差的3倍。因此可以将捕获不确定区域确定为 27 mrad。

5 结 论

本文分析了基于 GPS/INS 的静态初始捕获定位技术模型,该模型可以快速完成远距离静态大气无线激光通信的初始捕获,采用 GPS/INS 的捕获误差较小,精度较高。同时对算法原理进行了详细的论证,同时优化了部分算法,提高了捕获速率。在距离约为 1 km 的四个已知通信点模拟了初始捕获实验,通过本文提出的优化算法,计算得到旋转角,并进一步得到内角的测量值,与本实验给出的真值进行比较运算,获得水平旋转角均方差和俯仰旋转角均方差。根据两种旋转角中的最大均方误差获得捕获不确定区域大小为 27 mrad。基本满足 10 km 水平链路大气无线激光通信初始捕获的基本要求。

参考文献:

[1] Han Cheng, Tong Shoufeng, Chen Zhandong, et al. Analysis of influence of GPS/INS system errors on pointing algorithm in space optical communication [J]. Infrared & Laser Engineering, 2009, 38(4): 650 – 654. (in Chinese)
韩成,佟首峰,陈展东,等. GPS/INS 系统误差对空间激光通信对准算法的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 650 – 654.

[2] Li X F. The principle and technology of the satelite-to-ground laser communication links [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.

[3] Mu Yi ning, Wen Guanyu, Wang He, et al. Journal of air force engineering university[J]. Natural Science Edition, 2011, 12(1): 59 – 63. (in Chinese)
母一宁,温冠宇,王贺,等. 基于序列信息圆心拟合的大气光光斑检测技术[J]. 空军工程大学学报航海技术, 2011, 12(1): 59 – 63.

[4] Li Y B. Inaccuracy analysis of GPS position to sailing on the narrow channels [J]. Marine Technology, 2004, 24(5): 27 – 29. (in Chinese)
李义兵. GPS 导航仪在狭水道航行中的定位精度分析[J]. 航海技术, 2004, 24(5): 27 – 29.

[5] Dong X R, Zhang S X, Hua Z C. GPS/INS integrated navigation and its application [M]. Changsha: National Defense University Press, 1998. (in Chinese)
董绪荣,张守信,华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 长少:国防科技大学出版社, 1998.

[6] Zhao Xin, Wang Shifeng, Tong Shoufeng, et al. Initialalignment of antenna for laser communication system betweenaircraft and ground station [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1190 – 1195. (in Chinese)
赵馨,王世峰,佟首峰,等. 飞机 – 地面间激光通信天线的初始对准 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(7): 1190 – 1195.

[7] Han Cheng, Tong Shoufeng, Chen Zhandong, et al. Acquisition control system of free space laser communication [J]. Infrared & Laser Engineering, 2009, 38(1): 91 – 95. (in Chinese)
韩成,佟首峰,陈展东,等. 自由空间激光通信捕获控制系统[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 91 – 95.

[8] Zhao Xin, Wang Shifeng, Tong Shoufeng, et al. Technology on antenna acquis ition forlaser communication sys tem between two ground stations [J]. Optical Communication Technology, 2008, 32(7): 62 – 64. (in Chinese)
赵馨,王世峰,佟首峰,等. 定点激光通信系统天线捕获技术[J]. 光通信技术, 2008, 32(7): 62 – 64.