

BDS 分集接收机高精度定位技术研究

董 斌^{1,2}, 王文丽³, 孔龙涛³, 李云天⁴

(1 江西洪都航空工业集团有限责任公司 南昌 330024;

2 西北工业大学 西安 710072;

3 北京遥测技术研究所 北京 100076;

4 东方蓝天钛金科技有限公司 烟台 264010)

摘要: 传统 BDS (BeiDou Navigation Satellite System, 北斗卫星导航系统) 分集接收机在定位时, 直接使用每个天线的卫星信号, 导致定位位置点不明确, 定位精度较低。针对该问题, 提出了一种高精度的分集定位技术。首先, 给出了一种基于通道码相位的天线时延标定算法, 以消除不同天线的硬件时延差异; 然后, 介绍了一种不依赖于外部姿态信息计算北斗坐标系下天线基线向量的方法, 并对计算精度进行了理论分析; 最后, 介绍了一种考虑天线时延和基线向量的分集定位解算算法, 通过将定位结果归算至基准天线, 明确了定位位置点, 从而提高了定位精度。在室外静态环境条件下进行了对比测试验证, 结果表明: 该定位技术使 BDS 分集接收机的定位精度得到了明显提高, 达到了单天线的定位精度。

关键词: BDS; 分集定位; 天线时延标定; 基线向量

中图分类号: TN967.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)02-0087-05

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220602002

引用格式: 董斌, 王文丽, 孔龙涛, 等. BDS 分集接收机高精度定位技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 87-91.

Research on high precision positioning technology of BDS diversity receiver

DONG Bin^{1,2}, WANG Wenli³, KONG Longtao³, LI Yunhua⁴

(1. Aviation Industry Hongdu, Nanchang 330024, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

4. Oriental Bluesky Titanium Technology Co., Ltd., Yantai 264010, China)

Abstract: The traditional BDS diversity receiver uses the satellite signal of each antenna for positioning directly, resulting in unclear positioning position points and low positioning accuracy. To solve this problem, a high-precision diversity positioning technology is proposed. Firstly, an antenna delay calibration algorithm based on channel code phase is proposed to eliminate the hardware delay difference of different antennas. Then, a method of calculating antenna baseline vector in Beidou coordinate system independent of external attitude information is introduced, and the calculation accuracy is theoretically analyzed. Finally, a diversity positioning algorithm considering antenna delay and baseline vector is introduced. By reducing the positioning results to the reference antenna, the positioning position points are defined, thus improving the positioning accuracy. The comparison test was carried out under outdoor static environmental conditions. The results show that the positioning accuracy of BDS diversity receiver is significantly improved by this positioning technology, and the positioning accuracy of single antenna is achieved.

Keywords: BDS; Diversity positioning; Antenna delay calibration; Baseline vector

Citation: DONG Bin, WANG Wenli, KONG Longtao, et al. Research on high precision positioning technology of BDS diversity receiver[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 87-91.

引 言

随着我国自主建设、独立运行的北斗三号全

球卫星导航系统 (BDS) 正式开通运行, BDS 目前已广泛应用到交通运输、公共安全、航空航天等各领域。在大多数应用场景下, 载体的姿态变

化较小,可以保证天线一直有较好的收星条件。因此,常见的 BDS 接收机一般只使用一个天线即可实现高精度的定位。

但如果载体在飞行过程中存在较大姿态变化,使得单天线无法接收全空域的卫星信号,这会严重影响接收机的定位性能甚至不能定位。此时,通常采用多天线分集接收机来适应动态环境需求。每个天线安装在载体的不同部位,分别接收不同方向的导航卫星信号,并分别进入各自的射频信道进行放大、下变频,再分别进行基带信号处理等,最后分别得到各自的原始观测量信息。由于接收机综合了多个天线的卫星信号,使得可见卫星数目增多。但如果将多个天线的观测量信息直接用于定位,则会因为各天线位置不一致,而造成定位位置点不明确。当以其中某个天线坐标评估定位性能时,定位精度较差。文献[1]分析了旋转条件下天线安装位置与载体质心的位置速度关系,设计了一种旋转多天线条件下导航解算方法,将各天线观测值统一修正到载体质心,从而将定位结果归算至载体质心处,但该方法需要依赖外部姿态信息辅助。文献[2]和文献[3]针对火箭发射时姿态变化造成的卫星信号接收不连续问题,分别提出了不同的空间分集方式下信号锁相环路设计方案。文献[4]则应用空间分集最大信噪比准则进行信号选择性合并,改善接收机抗多径衰落性能。文献[5-7]分别从多天线的信号捕获、补偿旋转效应的信号跟踪以及导航电文解调方面进行了详细分析。文献[8]则从卫星可见性方面仿真验证了不同天线数的影响。文献[9]提出了一种基于跟踪时间和高度角的相对最小几何精度衰减因子(GDOP, Geometric Dilution of Precision)选星方法。

本文以两个天线呈 180° 夹角的二分集 BDS 接收机为例(如图 1 所示),首先介绍了传统分集定位解算方法;然后说明本文提出的分集处理原理,详细分析了分集天线时延标定,基线向量计算和定位解算原理等;最后在室外静态环境条件下验证了二分集定位算法的性能。

1 传统分集定位解算

经过电离层、对流层、卫星钟差和地球自转等修正后,卫星 i 的伪距观测方程式可简化为^[10]

$$\rho^{(i)} = \sqrt{(X^{(i)} - x)^2 + (Y^{(i)} - y)^2 + (Z^{(i)} - z)^2} + \delta t_u \quad (1)$$

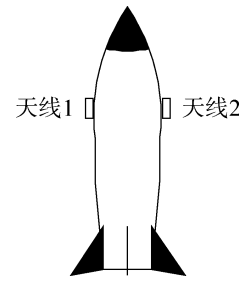


图 1 二分集天线安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-diversity antenna installation

其中, $\rho^{(i)}$ 为天线 1 或天线 2 接收的卫星 i 的伪距; $(X^{(i)}, Y^{(i)}, Z^{(i)})$ 为卫星 i 坐标; δt_u 为接收机钟差; (x, y, z) 为综合两个天线观测的混合定位结果。

将上述方程线性化,在初始值 (x_0, y_0, z_0) 上一阶泰勒级数展开为

$$\rho^{(i)} = \rho_0^{(i)} + \left. \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial x} \right|_{x=x_0} \Delta x + \left. \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial y} \right|_{y=y_0} \Delta y + \left. \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial z} \right|_{z=z_0} \Delta z + \delta t_u \quad (2)$$

其中:

$$\rho_0^{(i)} = \sqrt{(X^{(i)} - x_0)^2 + (Y^{(i)} - y_0)^2 + (Z^{(i)} - z_0)^2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial x} \right|_{x=x_0} = -\frac{X^{(i)} - x_0}{\rho_0^{(i)}} \\ \left. \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial y} \right|_{y=y_0} = -\frac{Y^{(i)} - y_0}{\rho_0^{(i)}} \\ \left. \frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial z} \right|_{z=z_0} = -\frac{Z^{(i)} - z_0}{\rho_0^{(i)}} \end{cases} \quad (4)$$

卫星伪距观测方程式中共有四个未知量,包括三个坐标分量 (x, y, z) 和接收机钟差 δt_u , 观测四颗或四颗以上卫星即可实现定位。假设天线 1 和天线 2 共观测 n 颗卫星,可组成如下方程组:

$$\begin{cases} \rho^{(1)} = \sqrt{(X^{(1)} - x)^2 + (Y^{(1)} - y)^2 + (Z^{(1)} - z)^2} + \delta t_u \\ \rho^{(2)} = \sqrt{(X^{(2)} - x)^2 + (Y^{(2)} - y)^2 + (Z^{(2)} - z)^2} + \delta t_u \\ \dots \\ \rho^{(n)} = \sqrt{(X^{(n)} - x)^2 + (Y^{(n)} - y)^2 + (Z^{(n)} - z)^2} + \delta t_u \end{cases} \quad (5)$$

将上述方程组线性化,在 (x_0, y_0, z_0) 上一阶泰勒级数展开,利用最小二乘算法可得上述方程组的解为:

$$\mathbf{dx} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\delta t_u \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b} \quad (6)$$

式中, \mathbf{G} 为几何矩阵, 只与各颗卫星相对于用户的几何位置有关; \mathbf{b} 为伪距残差矩阵。表达式分别为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho^{(1)}}{\partial x} & \frac{\partial \rho^{(1)}}{\partial y} & \frac{\partial \rho^{(1)}}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial \rho^{(2)}}{\partial x} & \frac{\partial \rho^{(2)}}{\partial y} & \frac{\partial \rho^{(2)}}{\partial z} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \rho^{(n)}}{\partial x} & \frac{\partial \rho^{(n)}}{\partial y} & \frac{\partial \rho^{(n)}}{\partial z} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho^{(1)} - \rho_0^{(1)} \\ \rho^{(2)} - \rho_0^{(1)} \\ \dots \\ \rho^{(n)} - \rho_0^{(n)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

迭代上述过程即可获取位置信息 (x, y, z) 。

传统方法不区分卫星信号的来源, 对两个天线的观测量不进行处理, 直接用于定位, 定位位置点不明确, 精度较差。

2 分集处理原理

分集接收机接收首先明确卫星信号来源于哪个天线, 然后通过测量信息进行综合处理, 实现高精度定位。如图2所示, 天线1、天线2接收不同的卫星信号或同一卫星信号, 但由于电缆长度、信道差异会导致时延差, 同时分集天线也存在安装位置差, 通过对分集链路时延修正和天线位置差的处理, 消除以上因素带来的定位误差, 并采用分集定位技术进行导航解算, 实现接收机定位精度的提高。

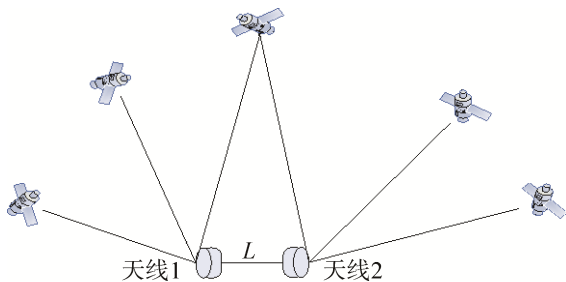


图2 二分集天线收星示意图

Fig.2 Schematic diagram of visible satellites with two-diversity antenna

3 分集天线时延标定

对天线1、天线2链路时延差的标定可使用接收机直接测量, 通过对比同一采样时刻(定位时

刻)同一卫星两天线通道码相位差获取时延参数^[11], 公式如下:

$$\Delta\tau = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i / n, \Delta\tau_i = r_{2i} - r_{1i} \quad (9)$$

式中, $\Delta\tau$ 为时延差; r_{2i} 、 r_{1i} 表示左右两天线链路码相位, 单位为s; n 表示能计算出差值的通道个数, $n \geq 2$ 。

当时延差已知, 直接对链路进行时延修正, 如果参与定位的卫星来自基准天线, 则不需要对之进行天线链路时延差的修正; 如果参与定位的卫星来自非基准天线, 则需要在该卫星实测伪距上减去 $\Delta\tau$ 。即:

$$\rho = \begin{cases} \rho - \Delta\tau \times c, & \text{非基准} \\ \rho, & \text{基准} \end{cases} \quad (10)$$

由于天线时延参数具有一定的稳定性, 因此分集天线时延标定后, 将标定结果存储至接收机非易失存储器中。接收机工作时, 读取时延参数使用即可。

4 分集天线基线向量计算

天线1、天线2安装位置不同, 采用两天线的测量信息进行定位时, 需考虑两天线的位置差。两天线的基线向量(简记为 \mathbf{l}) 在载体坐标系(简记为 \mathbf{b} 系) 的表示可以事先通过两个天线的安装位置确定。由于定位解算是在北斗坐标系(简记为 \mathbf{e} 系) 进行, 因此需要将天线基线向量由载体坐标系转换为北斗坐标系。坐标变换如下所示。

$$\mathbf{l}^e = \mathbf{C}_n^e \mathbf{C}_b^n \mathbf{l}^b \quad (11)$$

式中, \mathbf{n} 代表当地的东北天坐标系。

\mathbf{C}_n^e 是 \mathbf{n} 系与 \mathbf{e} 系的转换矩阵, 其表达式为:

$$\mathbf{C}_n^e = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\sin L \cos \lambda & \cos L \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin L \sin \lambda & \cos L \sin \lambda \\ 0 & \cos L & \sin L \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, λ 和 L 分别为载体的经度和纬度, 可通过接收机初步的定位结果获得。

\mathbf{C}_b^n 是 \mathbf{b} 系与 \mathbf{n} 系的转换矩阵, 与载体的姿态相关。载体的姿态角一般可通过导航系统获取。若外部不能实时提供姿态信息, 则接收机根据载体速度能够自主计算出偏航角和俯仰角。

假设载体在飞行过程中不发生滚动, 横滚角可作为已知值预设。偏航角和俯仰角的计算流程如下。

① 求解载体在 \mathbf{e} 系下的速度

首先通过卫星的伪距率(卫星和接收机的径

向相对速度)求解载体速度。径向相对速度的表达式为:

$$V_d = \left(\vec{V}_s - \vec{V}_u \right) \cdot \frac{\vec{R}}{|\vec{R}|} \quad (13)$$

其中, \vec{V}_s, \vec{V}_u 分别为卫星和接收机天线在 e 系下的速度值; \vec{R} 表示卫星和接收机天线的距离矢量。

根据公式可知, 天线的位置误差对卫星的径向相对速度影响很小, 对于从天线 2 接收到的卫星, 采用天线 1 的坐标计算卫星的径向相对速度, 其误差可忽略不计。因此, 可直接联立两天线的伪距率观测方程, 通过最小二乘法解算出 e 系的速度 (v_x, v_y, v_z) 。

② 根据载体速度求解载体姿态信息

首先将 e 系的速度转换到 n 系:

$$\begin{pmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{pmatrix} = (C_n^e)^T \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (14)$$

然后, 根据 n 系下速度计算载体的偏航角 φ 和俯仰角 θ :

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin\left(\frac{v_E}{V_H}\right) \\ \theta = \arcsin\left(\frac{v_U}{V}\right) \\ V_H = \sqrt{(v_E)^2 + (v_N)^2} \\ V = \sqrt{(v_E)^2 + (v_N)^2 + (v_U)^2} \end{cases} \quad (15)$$

其中, V_H 是载体的水平速度, V 是载体的合速度。

③ 精度分析

根据东北天坐标系下速度计算载体姿态信息的公式可知, 姿态计算精度由接收机的测度精度和载体的速度决定。估算方法为:

$$\begin{cases} \delta\varphi = \arcsin\left(\frac{\delta v_E}{V_H}\right) \\ \delta\theta = \arcsin\left(\frac{\delta v_U}{V}\right) \end{cases} \quad (16)$$

接收机的测速精度约 0.1 m/s, 在飞行阶段, 以载体的水平速度 V_H 和合速度 V 分别为 200 m/s 和 500 m/s 为例, 此时

$$\begin{cases} \delta\varphi = \arcsin\left(\frac{0.1}{200}\right) = \arcsin(0.0005) \approx 0.0005 \\ \delta\theta = \arcsin\left(\frac{0.1}{500}\right) = \arcsin(0.0002) \approx 0.0002 \end{cases} \quad (17)$$

因此, 根据接收机速度计算载体姿态信息带

来的误差可以忽略不计, 由此给定位解算带来的误差可以忽略不计。

5 分集定位解算

设天线 1 坐标 (e 系, 下同) (x, y, z) , 天线 2 坐标为 $(x + \Delta x_{12}, y + \Delta y_{12}, z + \Delta z_{12})$, 其中 $(\Delta x_{12}, \Delta y_{12}, \Delta z_{12})$ 表示天线 2 相对于天线 1 的在北斗坐标系下的基线向量, 可由第 4 节获取。二分集定位时选取天线 1 作为基准天线进行导航解算。

天线 1 收到的卫星 i 的伪距观测方程式可简化为

$$\rho_1^{(i)} = \sqrt{(X^{(i)} - x)^2 + (Y^{(i)} - y)^2 + (Z^{(i)} - z)^2} + \delta t_u \quad (18)$$

天线 2 收到的卫星 j 伪距经过天线时延标定后, 观测方程式可简化为:

$$\rho_2^{(j)} = ((X^{(j)} - (x + \Delta x_{12}))^2 + (Y^{(j)} - (y + \Delta y_{12}))^2 + (Z^{(j)} - (z + \Delta z_{12}))^2)^{1/2} + \delta t_u \quad (19)$$

天线 1 和天线 2 收到卫星伪距观测方程式中共有四个未知量, 包括天线 1 的三个坐标分量 (x, y, z) 和接收机钟差 δt_u 。假设天线 1 观测 m 颗卫星, 天线 2 观测 n 颗卫星, 可组成如下方程组:

$$\begin{cases} \rho_1^{(1)} = \sqrt{(X^{(1)} - x)^2 + (Y^{(1)} - y)^2 + (Z^{(1)} - z)^2} + \delta t_u \\ \dots \\ \rho_1^{(m)} = \sqrt{(X^{(m)} - x)^2 + (Y^{(m)} - y)^2 + (Z^{(m)} - z)^2} + \delta t_u \\ \rho_2^{(m+1)} = ((X^{(m+1)} - (x + \Delta x_{12}))^2 + (Y^{(m+1)} - (y + \Delta y_{12}))^2 + (Z^{(m+1)} - (z + \Delta z_{12}))^2)^{1/2} + \delta t_u \\ \dots \\ \rho_2^{(m+n)} = ((X^{(m+n)} - (x + \Delta x_{12}))^2 + (Y^{(m+n)} - (y + \Delta y_{12}))^2 + (Z^{(m+n)} - (z + \Delta z_{12}))^2)^{1/2} + \delta t_u \end{cases} \quad (20)$$

线性化和迭代计算过程与传统定位解算方法相同, 最终获取接收机基准天线的位置信息 (x, y, z) 。

6 试验验证

采用北京遥测技术研究所研制的 BDS 二分集接收机进行室外静态收星试验验证。二分集定位时使用 B3 频点。以天线 1 作为基准天线, 天线 2 相对于天线 1 的在北斗坐标系下的基线向量 $(\Delta x_{12}, \Delta y_{12}, \Delta z_{12})$ 为 $(-0.8 \text{ m}, 1.0 \text{ m}, -1.4 \text{ m})$ 。经标定, 两天线的时延差为 5 ns。

接收机采用以下两种方案进行导航定位。

方案一: 传统分集定位解算方法, 天线 1 和天

线2的观测不进行处理直接用于定位;

方案二: 本文提出的分集处理方法, 从天线2接收到卫星信号经过时延修正和基线向量修正, 之后与天线1接收到的卫星信号进行分集定位解算。

两种方案定位结果与基准天线坐标的误差曲线如图3所示, 从图中可明显看出, 本文提出的分集处理方法定位精度较高。

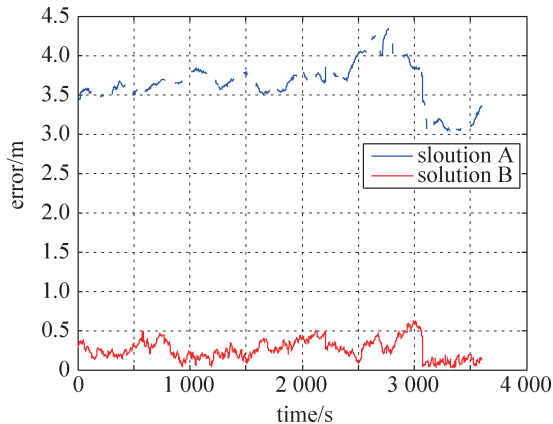


图3 精度对比曲线

Fig.3 Curve: accuracy comparison

7 结束语

本文以BDS分集接收机的高精度定位需求为背景, 介绍了分集接收机的处理方案, 深入分析了分集定位中的实现细节, 包括天线时延标定、基线向量计算和定位解算, 提出了一整套高精度分集接收机定位解决方案。室外静态环境下的BDS实际测试结果表明: 该算法的定位精度与单天线的定位精度相近。可以推广到其他天线安装方式和多分集接收机, 但对动态情况下的精度需进一步验证。

参考文献

- [1] 刘旭东, 刘广军, 李强, 等. 旋转多天线条件下导航解算方法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(4): 466-475.
LIU Xudong, LIU Guangjun, LI Qiang, et al. Navigation solution under rotary multi-antenna conditions[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(4): 466-475.
- [2] 彭舒文, 魏继栋, 刘庆, 等. 适用于空间分集的GNSS信号跟踪环路设计[J]. 无线电工程, 2021, 51(6): 470-475.
PENG Shuwen, WEI Jidong, LIU Qing, et al. Design of GNSS signal tracking loop suitable for spatial diversity [J]. Radio Engineering, 2021, 51(6): 470-475.
- [3] 徐晓艳, 田巍. GPS空间分集接收机[J]. 遥测遥控,

2007, 28(S1): 90-93.

XU Xiaoyan, TIAN Wei. GPS space diversity receiver[J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2007, 28 (S1): 90-93.

- [4] 冀常鹏. 多天线GPS接收机分集算法研究[J]. 遥感信息, 2004(4): 19-21.
JI Changpeng. Study of divide-collecting algorithm on multi-antenna GPS receiver[J]. Remote Sensing Information, 2004(4): 19-21.
- [5] MOHAMMAD M, ALI B, KYLE O, et al. Weak GPS signal acquisition using antenna diversity[J]. Navigation, 2015, 62(3): 205-218.
- [6] IM H C, LEE S J. GPS signal tracking on a multi-antenna mounted spinning vehicle by compensating for the spin effects[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(2): 867-874.
- [7] KEN H, HIROBUMI S, TAKUJI E. Navigation message demodulation for GPS receiver on-board spinning rockets [J]. GPS Solutions, 2012, 16(4): 495-505.
- [8] 刘旭东, 赵军祥. 旋转载体多天线对GPS卫星可见性分析[J]. 全球定位系统, 2009, 34(5): 11-14.
LIU Xudong, ZHAO Junxiang. GPS satellites visibility analysis for multi-antenna rotating carrier[J]. GNSS World of China, 2009, 34(5): 11-14.
- [9] 蔡体菁, 刘阳, 赵梓超, 等. 旋转GNSS双天线/MIMU组合系统选星方法研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39 (11): 21-24.
CAI Tijing, LIU Yang, ZHAO Xinchao, et al. Study on rotating GNSS dual antenna/MIMU combined system star selection method[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11): 21-24.
- [10] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [11] DANIEL M, ROCK S, SOPHIE L, et al. Improving vertical GPS precision with a GPS-over-fiber architecture and real-time relative delay calibration[J]. GPS Solutions, 2012, 16(4): 449-462.

[作者简介]

董斌 1979年生, 本科, 研究员, 主要研究方向为导航和控制。

王文丽 1981年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星导航。

孔龙涛 1990年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航和组合导航。

李云花 1980年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为智能制造。

(本文编辑: 傅杰)