

基于北斗导航的隧道定位方法研究

董立桥

中国电子科技集团公司第五十四研究所

DOI:10.12238/etd.v5i5.9135

[摘 要] 由于山体屏蔽,空间卫星导航信号无法对隧道内用户提供导航定位服务,为了解决隧道定位问题,本文提出了北斗卫星隧道定位系统设计方案。首先建立隧道定位系统模型,分析基于北斗卫星信号测距方法在隧道内定位技术可行性,研究隧道内导航信号的传播特性,获取了隧道定位的理论依据;其次研制了北斗隧道信号模拟器,搭建了北斗卫星隧道定位系统,构建了真实隧道定位场景;最后开展了定位导航试验,成功实现隧道内高精度导航定位,定位精度达到 5m 以内,验证了系统可行性,为隧道定位系统建设提供理论和技术支撑。

[关键词] 无线电技术; 卫星导航; 北斗导航; 伪卫星; 隧道定位

中图分类号: TN965.8 **文献标识码:** A

Research on Tunnel Positioning Method based on Beidou Navigation Dong Shiqiao The 54th
Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation

Liqiao Dong

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation

[Abstract] Due to the mountain shielding, the space satellite navigation signal cannot provide navigation and positioning services to the users in the tunnel. In order to solve the problem of tunnel positioning, the design scheme of the Beidou satellite tunnel positioning system is proposed. Firstly, the tunnel positioning system model is established, analyzing the feasibility of tunnel positioning technology based on the Beidou satellite signal ranging method, studying the propagation characteristics of the navigation signal in the tunnel, obtaining the theoretical basis of tunnel positioning; secondly, the Beidou tunnel signal simulator is developed, constructing the Beidou satellite tunnel positioning system, constructing the real tunnel positioning scenario; finally, the positioning navigation test, successfully realize high-precision navigation positioning in the tunnel within 5m, verify the system feasibility and provide theoretical and technical support for the construction of the tunnel positioning system.

[Key words] radio technology; satellite navigation; Beidou navigation; pseudo-satellite; tunnel positioning

引言

随着我国综合国力的不断增强,一方面城镇化进程不断加快,地面上的交通堵塞状况日渐严重,而地铁因其载客量大、污染小、不易拥堵等优点,已成为各大城市缓解交通堵塞问题的首要选择;另一方面,高铁、高速公路交通网迅速推广,隧道建设显著加快,铁路隧道、公路隧道、公铁两用隧道建设里程不断创下新高,为我国交通网络建设提供了重要支撑。

随着隧道长度不断增大,铁路隧道最长超38km,公路隧道超18km,隧道内安全也日益受到关注,隧道导航也提出迫切需求。近年来,随着我国北斗系统的逐步构建及其可用性的稳步提升,卫星导航系统在铁路、公路交通系统中已经得到广泛应用,已经成为高铁、公路运营中导航和定位的必要手段,但受卫星导航系统

本身特征影响,隧道内是卫星盲区,卫星导航终端不能正常连续工作,导致进入隧道客户导航定位中断。

随着我国自主卫星导航系统的投入使用和大力推广,北斗终端、北斗/GNSS(Global Navigation Satellite System全球导航卫星系统)兼容终端得到长足发展,国内两客一危强制性使用;智能手机也全部配置了北斗/GNSS兼容导航功能,卫星导航已成为定位的主要和重要手段,因此开发基于北斗卫星导航定位体制的特殊应用有极强的现实意义和推广价值。

1 北斗卫星导航隧道定位方案优势分析

1.1 国内交通运输应用推广

北斗三号是真正意义上的全球定位系统。2020年7月31日,国家领导人在人民大会堂宣布北斗三号全球卫星导航系统正式

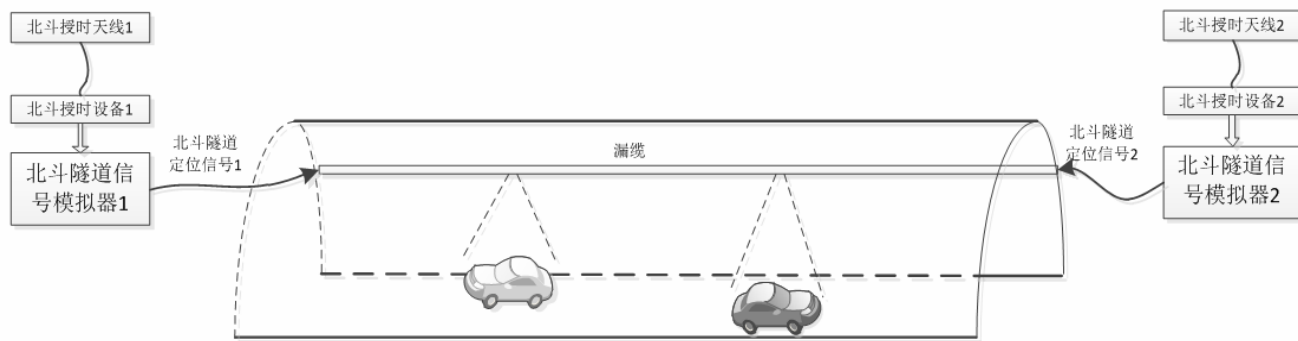


图1 北斗卫星隧道定位系统组成框图

开通。随着我国经济持续快速增长和国民生活质量的提高,卫星导航系统在交通运输业中得到广泛应用;随着北斗定位技术的快速发展,现在越来越多的车辆管理机构、公司等都已经将导航技术应用在车辆上,结合后台系统中的地图,对车辆进行跟踪和监督,极大地提高了车辆的管理效率。导航技术的研究开发,将会让更多的车辆实现无人驾驶;在物流运输方面,也可让无人送货到家方式得以普及。

1.2 手机端北斗广泛应用

目前,全球有超过50亿台全球导航卫星系统设备在使用,其中80%是移动智能手机。谷歌Play和苹果商店中超过50%的应用程序(Application, APP)使用位置信息。面向智能手机定位研究业务拓展研究有极强的现实意义和巨大的应用价值,这将进一步拓宽智能手机和可穿戴设备在半专业领域中的应用范围。北斗的蓬勃发展极大地促进了大众消费级GNSS芯片的发展,新入网的智能手机超80%支持北斗导航系统。

1.3 不新增设备

为了实现隧道内接收北斗卫星导航信号,需要将伪卫星信号通过漏缆实时播发到隧道中。根据接收端和发射端的相对位置关系,基于卫星导航系统定位原理计算出精确位置信息。结合隧道长度,曲率等关键参数进行二次配置,调制、放大、滤波后发送出去,依托既有隧道基础设施和高铁列车/汽车/人员已安装的定位设备,在不改动已有定位设备和隧道内布线的情况下,实现隧道内北斗卫星导航信号的全覆盖,保障北斗接收机正常工作,为实现隧道无缝导航提供有力支撑。

漏缆是基于北斗卫星导航隧道定位系统必不可少的部分。漏缆是泄漏同轴电缆简称,通常用作微波通信电缆,外导体均匀规则的槽孔使通信信号辐射到电缆周围空间,为铁路隧道的半封闭空间提供了无线通信解决方案。特别是将来4G与5G信号的覆盖,漏缆已经大范围在隧道内铺设和应用。漏缆应用前景广阔,产品自身性能优异,漏泄同轴电缆既具有信号传输作用,具有天线收发、低驻波比、低插损、系统构建简单等优点。漏缆能够满足绝大部分复杂的铁路通信应用需求,且北斗卫星导航频段也同样处于L波段,与通信频段有重合,可以借助现有漏缆设备实现隧道定位功能。

研制北斗导航信号隧道模拟器,北斗隧道信号通过一条贯

穿隧道的漏缆,即可实现隧道内卫星导航信号全覆盖,实现隧道一维定位。使用2条漏缆,可实现隧道二维定位,大大降低了定位基础建设的成本和周期,减少了定位系统复杂度。

1.4 不更换现有定位终端

实现导航服务,导航定位终端是必不可少的部分,也是导航服务落地的最后环节,是为定位用户提供服务的直接提供设备。

目前随着北斗卫星导航的推广,其定位终端随着不同的功能需求也有众多类型和形态,归结起来可以说是包括两大类:其一是专用定位终端——其形态为独立的导航定位产品,提供单一的导航定位服务,主要是军工、行业专用等,其体积相对较大,一般会支持北斗/GNSS定位,会根据应用场景不同为用户提供定位、定向、测姿等服务。其二是通用的定位终端——大众化的定位终端,主要是车载导航、移动电话定位服务。

不管是哪类导航终端,其导航定位原理均为跟踪捕获空间真实卫星导航信号,通过电文解算卫星位置、通过测距测量卫星和终端距离,多组观测数据解算本身位置、速度、时间信息,实现导航定位功能。

本系统根据这个原理,使用现有终端实现隧道定位,为大众用户提供隧道定位服务。研制专用隧道导航信号模拟器播发隧道专用北斗导航信号,通过漏缆辐射实现隧道内信号全域覆盖,导航终端在隧道内跟踪捕获该导航信号(隧道导航信号与空间北斗导航信号格式相同),终端上报解算的导航电文和观测伪距,我们只需使用这两类数据通过专用算法实现隧道定位。

2016年5月谷歌公司宣布开放安卓原始GNSS获取接口,基于安卓原始GNSS观测数据的大众低成本、数据再利用开发成为可能和有效手段。也就是说我们可以通过使用智能手机报送的RINEX格式电文和观测数据,我们可以通过这些信息实现隧道定位。

基于以上分析,我们可以使用现有定位终端(包括专用终端和移动智能手机)不改变终端状态,即可实现隧道定位。对于专用类定位终端我们只需在原有定位程序上做一个简单的升级插件,增加隧道定位功能;对于智能手机用户,可以通过开发应用程序APP方式实现,只要手机预装隧道定位APP而不需要任何特殊需求,即可实现隧道定位。

2 系统设计

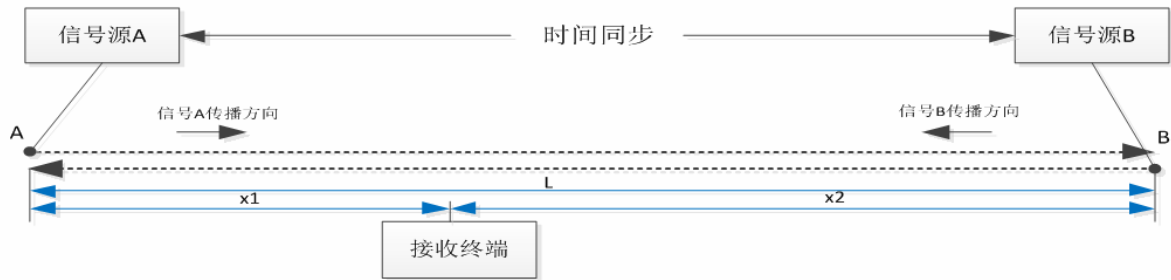


图2 隧道测距基本原理图

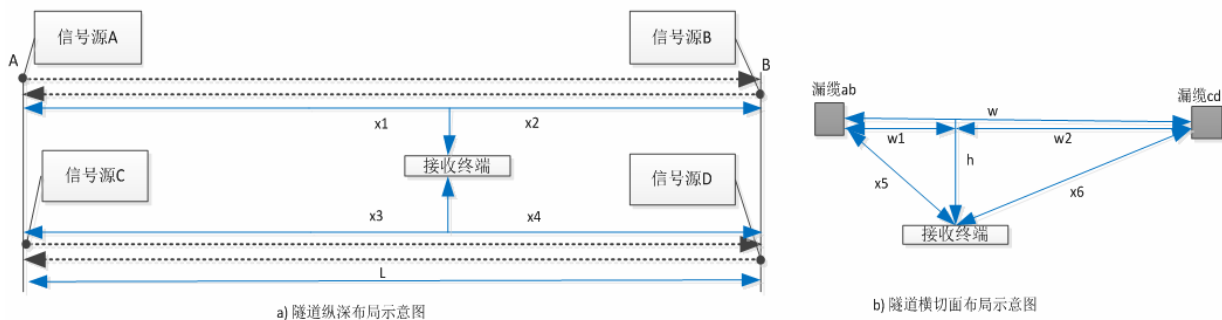


图3 二维空间定位原理框图

2.1 系统组成

北斗卫星隧道定位系统由北斗授时设备、北斗隧道信号模拟器、漏缆、隧道定位终端等组成。

北斗授时设备:接收天线放置于隧道外开阔地带,通过天线接收空间真实北斗卫星导航信号,实现时间同步。授时设备为北斗隧道信号模拟器提供时间参考。保证多台套北斗隧道信号模拟器工作于同一个时间系统。

北斗隧道信号模拟器:是隧道定位系统的主要设备,用于产生特殊的北斗导航信号,其信号格式与空间真实北斗导航信号相同,卫星号通过算法与空间真实信号区分,便于进出隧道北斗用户实时跟踪定位。北斗隧道信号模拟器共设置2台,通过北斗授时设备实现时间统一。

漏缆:漏缆是一种特殊的同轴电缆,与普通同轴电缆的区别在于:其外导体上开有用作辐射的周期性槽孔。漏泄电缆的设计目的是特意减小横向屏蔽,使得电磁能量可以部分地从电缆内穿透到电缆外。本研究项目采用漏缆将北斗隧道信号均匀泄漏到隧道内部,以便接收终端可以在隧道内任意位置可以接收到相同的导航信号(除了伪距),导航终端利用距离差实现精准定位。

隧道定位终端:隧道定位设备,为参与隧道定位人员、车辆提供位置和导航服务。该终端完全等同于市面产品,仅考虑更改定位算法即可实现定位;对于通用终端——例如智能手机——只需要安装一个APP插件即可实现隧道定位。

2.2 工作原理

2.2.1 时延测量法原理

北斗导航终端进入隧道后,由于遮挡原因无法接收真实空间导航卫星信号,因此需要构建一个虚拟导航无线信号播发环境。

如图,隧道内预先铺设一对漏缆(图中虚线所示),信号源A、B产生不同射频信号,从隧道两端接入,向隧道内均匀辐射射频信号。采用同步手段使两信号源时间同步,即播发的信号起始于同一时刻。

如此,隧道定位终端在隧道内任意位置可以同时接收到2个隧道导航射频信号,信号a和信号b,设终端距离端点A、端点B距离为 x_1 、 x_2 ,隧道总长 L ,接收终端与系统时差 t_u ,通过测量获得信号A伪距 x_1' 、信号B伪距 x_2' 。则有:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = L \\ x_1 = x_1' + C \times t_u \\ x_2 = x_2' + C \times t_u \end{cases}$$

式中 C 为光速, x_1' 、 x_2' 为测量值, L 隧道总长为已知量, x_1 、 x_2 、 t_u 为未知数,可以通过解算以上三个方程获得。信号源A、B的位置坐标可预先标定精确获取,由此接收终端在隧道内的准确位置可以根据 x_1 、 x_2 推算。

基于以上分析,在隧道两头向内布设2条漏缆可实现一维空间定位,通过测量伪距方法实现隧道一维定位。若考虑隧道内的二维空间属性,可以扩展为在隧道顶端两侧各布设一对漏缆,通过隧道定位终端测量两对漏缆的时间差来实现更复杂空间定位。

如上图3,在隧道内沿隧道顶端两侧,共设置了四条漏缆,由

四台信号源驱动, 播发a、b、c、d四路卫星信号, 与一维空间定位相比增加了一组宽度方向的未知数, 设两组漏缆相距 w , 隧道高度 h , 终端距离第一对漏缆映射距离 w_1 , 距离第二对漏缆映射距离 w_2 , 终端接收到a、b、c、d信号的测距值为 x_1' 、 x_2' 、 x_3' 、 x_4' , 得到方程组如下:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = L \\ x_1 + x_5 = x_1' + C \times t_u \\ x_2 + x_5 = x_2' + C \times t_u \\ \\ x_3 + x_4 = L \\ x_3 + x_6 = x_3' + C \times t_u \\ x_4 + x_6 = x_4' + C \times t_u \\ \\ \begin{cases} w_1 + w_2 = w \\ w_1^2 + h^2 = x_5^2 \\ w_2^2 + h^2 = x_6^2 \end{cases} \end{cases}$$

通过解算, 可获取隧道横向位置参数, 再利用隧道端口基准坐标, 进而计算出终端的绝对坐标。

2.2.2 隧道定位设计

信号源a、b, 均使用北斗系统时间(即两信号源通过技术手段将本地时间同步到北斗系统时间)。两信号源各播放1路北斗卫星信号, 卫星号可以通过星历文件控制, 一般为不可见卫星。这样即保证了接收机的顺利捕获, 又满足出入隧道导航终端跟踪捕获的无缝切换。隧道内近似一维空间, 可以通过这个距离再结合隧道地形来实现精确定位。

调研现有终端, 大部分商用终端, 尤其是手机, 内部卫星导航定位可以向系统实时上报定位结果、时间信息等NMEA语句。在安卓7.0以后的版本还可以上报原始观测测量, 包括伪距测量值、电文信息等, 我们可以用来实现上述计算。我们还可以通过修改电文方式, 提供我们隧道一维定位需要的参数, 例如隧道顶点标定位置、隧道地图信息等, 用于解算精确位置。

需要说明的是, 信号在漏缆内传输特性与空间传输时延不同, 以上公式未区别对待, 漏缆传输参数可参看漏缆说明书, 一般为光速的80%~90%, 需要对该参数进行标定并修改上述公式中常数 C 。

2.3 试验验证情况

定位试验在长隧道内展开: 隧道顶端布设一对漏缆, 漏缆长度75m。两套信号源A、B精确时间同步, 各模拟一路北斗卫星信号, 从漏缆两端注入。调整模拟器信号电平, 试验用隧道定位终端在隧道内正常跟踪和接收模拟北斗信号, 满足测距条件。隧道定位终端放置于移动推车, 通过便携式电池供电, 用于隧道内移动目标。下面给出一组定位测试试验数据及分析。

隧道定位终端初始位置位于A点, 接收测距稳定后, 向B点移动, 到达B后, 迅速折返回到A点, 如此多次试验。定位终端在移动过程中获取隧道内漏缆辐射信号通过测量获取 x_1' 和 x_2' , 结算方程组获取隧道定位终端距离A点距离值 x_1 , 测试结果如下图所示, 测量曲线平滑可信, 抵达B点与真实距离吻合, 经与隧道内真值比对, 最大误差在5m以内。

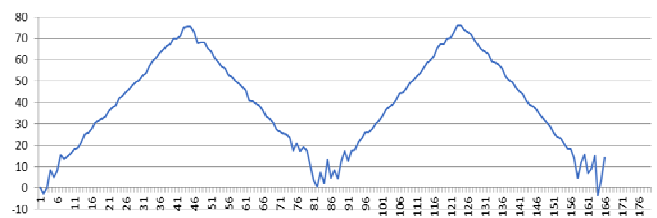


图4 隧道定位测量试验数据分析

3 结语

北斗卫星导航隧道定位系统, 经理论分析和推导计算, 拓展了北斗卫星导航系统应用场景, 解决了隧道内因信号屏蔽带来的定位盲区难题。并通过真实隧道内定位试验验证了隧道定位系统的可行性。本系统有很好的市场前景和商业价值, 在不更换定位终端的前提下, 很好的解决了隧道内定位问题。当然, 试验仅通过一维场景验证了技术可行性, 后续还需开展做隧道二维/三维定位、隧道定位终端出入隧道与空间真实导航信号的无缝切换等试验, 定位策略、定位算法还需要进一步研究和测试, 最终满足隧道内车道级导航要求。

参考文献

- [1]康艳.隧道内定位中北斗卫星导航技术的应用[J].数字通信世界,2023,(5):8-10.
 - [2]任科翰,王振岭,郭政.一种伪卫星实现隧道定位的方法及验证[J].计算机测量与控制.2024,32(3):300-305.
 - [3]蒋韵,张文字,练灿明,等.高铁隧道内基于北斗卫星的导航定位延伸系统研究[J].铁道通信信号,2020,56,(1):8-10.
 - [4]黄文摄.北斗卫星导航技术在隧道内定位的应用[J].卫星应用,2022(2):66-69.
 - [5]胡鹏.融合北斗定位技术的长大隧道群工程线安全管控系统设计与实现[J].计算机应用,2023,33(1):57-61.
 - [6]崔畅,宋茂忠.利用泄漏电缆实现的隧道内伪卫星定位方法[J].物联网技术,2021(8):26-31.
 - [7]张俊罗,瑶邱渝峰.基于北斗的地下环道导航系统设计方案[J].现代信息科技,2022,6(22):53-57.
 - [8]赵鑫冉.高精度地基伪卫星导航定位技术研究[D].成都:电子科技大学,2023.
 - [9]湖南导信息科技有限公司.隧道内外导航信号连续定位系统和方法:CN20181152941.4[P].20190510.
 - [10]格星微电子科技有限公司.一种基于伪卫星的隧道内定位方法:CN201810729390.4[P].2018-12-18.
 - [11]杜艳忠,石震.LED定位技术在隧道无人驾驶导航中的应用[J].测绘通报,2016(S2):100-101.
- 作者简介:**
董立桥(1971--),男,汉族,河北栾城人,大学,中国电子科集团公司第五十四研究所,高级工程师研究方向:卫星导航。