



卫星导航技术发展向何处去

施浒立*, 崔君霞

中国科学院国家天文台, 北京 100012

* E-mail: shl@nao.cas.cn

收稿日期: 2011-03-15; 接受日期: 2011-03-31

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815500)和国家自然科学基金(批准号: 61001109)资助项目

摘要 综述了导航定位技术的新进展, 特别是卫星导航定位技术的新进展, 探讨了 GPS 后的卫星导航技术的发展趋势和方向, 介绍了多模卫星导航系统的兼容和互操作、卫星导航与地面移动网的融合和互补、导航和通信融合技术的发展, 以及入向卫星定位通信系统和双向卫星定位通信系统的出现. 最后还展望了导航定位信号及功能融入到通信链路中去的可能性.

关键词 GPS, 卫星导航, 天地一体化, 双向定位

PACS: 95.75.Rs

1 引言

卫星导航技术^[1]至今已发展了半个世纪, 其中以美国于 1973 年开始, 1992 年建成的全球定位系统 (GPS, Global Positioning System) 最为成功, 成为卫星导航发展历程中的里程碑. 它以高定位精度、能完成导航、测姿和授时等多项功能、覆盖范围广、不受天气影响, 长年累月可不间断全天候连续工作等长处, 以及已广泛应用于多种领域和行业, 甚至深入亿万人们的生活之中, 受到世人青睐, 也使世人享受到航天高技术的恩惠.

然而, 在 GPS 大量应用以后, 科研人员也渐渐发现了它存在的一些不足和缺失, 主要有以下几点:

(1) 系统投入太大, 特别是系统要有 24 颗以上导航卫星(不包括备用星和替换星)耗资巨大. 建成后, 系统无法直接收费, 运转费用又高, 从而使维持、运行和发展这套系统很不容易.

(2) 系统能实现出向被动定位, 即用户可以实现

个体导航, 但因系统内缺失通信传输链路, 信息不能及时交流和传递, 用户中心也无法知道用户的定位情况, 用户之间也互不知晓, 就是说无法实现中心导航或系统导航.

(3) 导航信号功率谱密度很低, 信号十分微弱, 极易遭受干扰, 也难以克服干扰.

(4) 系统分 M 码和民用码两种测距码, M 码不对外开放, 民用码(C/A 码)精度较低, 故无法适用于航空等需要实时高精度定位导航的民用应用场合.

(5) 在城市高楼密布地段, 在山涧、峡谷、沟壑地区信号被遮挡时, 定位精度会受到影响, 甚至不能实现导航定位. 同样也难以用于室内定位.

这些不足与缺失, 限制了 GPS 类卫星导航定位系统的某些应用, 也限制了它的价值和影响力. 近年来利用其他无线电传输技术的定位技术, 如: 地面无线移动网、地面广播网、无线局域通信网、传感网、红外、超声波以及射频标签等定位系统和定位技术方法的悄然崛起, 在室内外局域定位方面, 特别在解决

引用格式: 施浒立, 崔君霞. 卫星导航技术发展向何处去. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 539-546

Shi H L, Cui J X. Where will satellite navigation be developed (in Chinese)? Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 539-546, doi: 10.1360/132011-342

室内定位问题方面不断地发挥出作用。当我们体会到 GPS 的价值和作用, 又觉察到它的某些不足与缺失时, 就会思考一个问题: 卫星导航系统发展应向何处去? 也就是说卫星导航技术下一步的发展方向及发展趋势是什么呢?

2 新系统的萌动和出现

2.1 多模卫星导航系统的兼容和互用

在不久的将来, 空中的卫星导航系统将增至 5 套以上, 在轨导航卫星数量会增至 100 多颗, 甚至更多。这样就提出了一个值得探讨的课题, 即如何综合利用空中的导航卫星资源? 中国导航工作者曾在 2005 年起草国家中长期科学和技术发展规划时提出建设多模集成卫星定位系统的概念, 这是根据当时世界已出现多个卫星定位系统(GPS-GLONASS/Galileo/BD/CAPS)而提出来的一个如何利用多系统优势的方案。当然多系统的融合, 不是简单的相加, 也不是越多越好, 而是要考虑系统之间的相容性、互补性、增强性, 要做到增加的测量源是有效果的。否则增加测量源会把接收机变得复杂, 或会增加过多的功耗和工作量, 则就不利了。时后几年中已陆续有几家公司成功地研发 GPS 和 GLONASS 双模导航接收机, 以及 GPS 和北斗卫星导航系统, GPS 和 CAPS, GPS 和 Galileo 的双模, 甚至三模接收机, 部分产品已投放到国内外市场。

多模卫星导航接收机能提高卫星导航接收的可靠性、完好性和连续性。特别是当一个新的卫星导航系统还处在研发阶段时, 新系统可接收的卫星数较少, 这时与成熟的 GPS 卫星定位系统双模共享, 可以使新系统提前进入使用状态, 这对发展新的系统十分有利。但是当新的系统成熟以后, 如何利用多模系统的卫星则成为一个需要深入思考的问题。如当新系统已拥有 20 多颗卫星时, 在大多数情况下已经能接收到六至十几颗本系统的卫星, 若仍采用现有接收机和导航算法, 只要求选择四颗卫星就能定位; 若将接收卫星数增加到六颗以上, 根据常理接收卫星数的增加对几何精度衰减因子 GDOP (Geometric Dilution of Precision)减小的影响已很小, 也就是说接收更多的卫星虽对完好性稍有益, 但对提高定位精度已无补。而且多模接收会占用较多的通道, 或要求增加芯片的通道数, 增加选星捕获和跟踪的难度和

工作量, 所以如何更好地利用多个卫星系统中更多卫星数提高定位精度已成为多模卫星接收技术中正待面对的问题和攻克的关键, 其中主要是捕获、跟踪、选星和定位算法的突破。所以研发适用于多模卫星接收机性能提高的算法已成为发展多模卫星系统接收能力的瓶颈^[2]。

当人们享用多套卫星导航系统时, 也不得不面对多套卫星导航定位系统之间的兼容互用所面临的系统和信号层面上的严峻问题, 包括: 各卫星导航定位系统间时空基准的转换和信号体制的兼用, GNSS 信号质量的脆弱性分析、评估及缓解技术、分析传输环境对信号的影响等。由于目前卫星导航系统大多处在 L 波段, L 波段可用频带较窄, 频率资源紧缺, 严重制约着新系统的信号设计。欧洲联盟在设计 Galileo 系统时, 提出了二进制偏置载波(BOC, Binary Offset Carrier)信号和调制体系设计, 做到与 GPS 信号相对兼容。现在我国面临同样的问题, 要做到与 GPS 和 Galileo 信号的兼用, 则更不易。所以深入研究多模导航系统的兼用互用已成为我国全球卫星定位系统发展中正在突破的一个关键技术问题之一。

2.2 卫星导航与地面移动通信网的融合和互补

卫星导航定位系统已较好地解决了室外定位问题, 但随着无线电网络的普及和普适计算技术的发展, 基于位置和时间信息的服务受到越来越多的关注。在物流管理、紧急救助、设备监测、灾害预防、医疗保健、个性化信息传递等领域显示出巨大的活力, 从而提出了室外室内的无缝覆盖定位的迫切需求问题。几年前曾有研究单位想通过提高接收机的接收灵敏度优于 -180 dBW 来解决卫星导航信号在室内的定位问题, 但因为卫星导航信号通过反射、绕射至室内时, 信号强度和质量急剧下降, 在这种情况下, 仍要依靠提高接收灵敏度去实现室内定位, 造成的技术难度太大, 实现所花的代价也太大。即使测量出伪距值, 也因非视距(NLOS, NON Line of Sight)误差大、多径影响严重、定位精度较差, 结果不理想。近年来, 随着地面移动网、无线局域网、传感网等网络技术的迅速发展, 这些网络在室内的信号质量和强度都远远优于卫星导航在室内的信号质量和强度, 甚至优于卫星导航在室外的信号质量和强度, 所以利用地面移动通信网等信号是实现室内定位的有效途径, 从而研究卫星导航与地面移动网等网络信号

的结合成为室内外无缝定位导航技术领域研究的热点. 地面移动通信网最大的优势是接收机(手机)的用户群庞大、产品化程度高、信号强、体积小, 有双向语音和双向短信通信传输功能, 可以实现双向定位, 甚至可以实现室内定位. 但因移动通信网测伪距时存在着非视距误差, 所以至今定位精度仍停留在几十米至几百米量级, 定位精度较差. 为了提高定位精度, 正在尝试的解决办法有两类, 一类为特征参数匹配法(指纹匹配法). 特征参数包括电波强度、到达时间或时间差、入射角等. 它可以避免 NLOS 误差对定位精度产生的影响, 将错就错, 只求对应特征值之间的匹配就行. 但这一方法, 测量工作量大, 数据存储量也比较大, 这是其不足的地方. 另一类方法是与 GPS 相仿的定位方法, 是通过测量距离, 再交会获得位置解的. 但这类方法因为室内辐射情况复杂, 很难测准距离值, 故定位精度也不高. 但卫星导航定位与地面网络定位相结合可能别开生面, 成为解决室内外无缝导航定位的出路之一. 在这方面, 美国发明了 A-GPS (Assisted GPS), 即用移动网传输 GPS 导航电文, 改善 GPS 信号的快捕获与快跟踪, 使车辆刚出车库就可以定位导航. 中国科学院国家天文台、中国电信集团公司和北京邮电大学的研究人员则提出了 A-MPS (Assisted Mobile Positioning System) 概念和方法^[3], 即利用 1 或 2 颗直播星就可以改善地面移动通信网络的定位精度, 其原因是卫星发增强信号, 首先实现提高地面移动网基站的时间同步精度, 这样可以提高利用测时差测伪距的分辨精度和测量精度, 如图 1 所示. 采用一至两颗 EIRP(全向有效辐射功率)大的直播卫星转发增强信号, 还可以直接对手机实现授时和测伪距, 增加了从卫星方向下行的高精度伪距测量值, 其测量值进入测量方程, 便使系统定位测量方程组系数矩阵的条件数大为改观, GDOP(几何精度衰减因子)值减至几, 加上算法的改进, 便可以实现高精度的定位和授时. 从而即使在无差分的情况下也能使定位精度提高至米量级.

在地面移动通信网的基础上可以再考虑增加地面广播网, 采用地面广播网的好处是可以直接改造 CMMB 信号或 DAB 信号中的导频帧实现定位, 即用导频帧中的扩频码直接测伪距, 把导航定位电文直接加入到导频信息帧上^[4]. 这样的系统不占用通信信道, 组成极其简单, 而且由于卫星至用户的测距精度高于地面移动通信网的定位精度, 所以卫星增强方

案会对组合定位精度作出贡献^[2].

总之, 地面移动通信网和移动广播网授时和定位, 增加了卫星辅助(A-MPS)以后, 授时和定位精度能大幅度提高, 若能进一步关注地面移动通信网本身的非视距误差的修正或采用数据匹配技术, 消除或避开非视距误差的影响, 整个天地一体化系统将变成非常实用的定位系统.

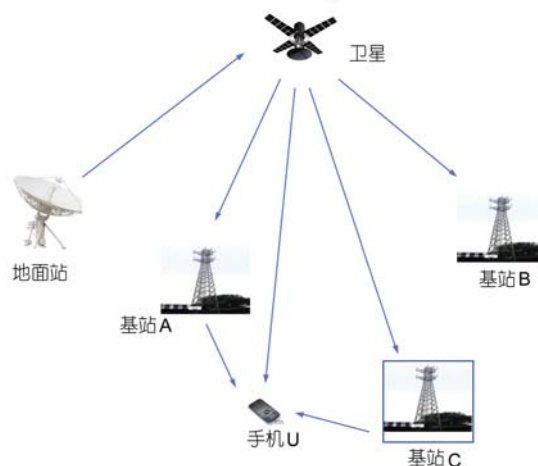


图 1 基于地面移动通信网的由卫星作信号增强的 A-MPS 定位系统组成示意图

Figure 1 A-MPS positioning system based on the terrestrial communication system with the satellite signal enhancement diagram.

2.3 基于双向卫星通信链路基础上的双向导航通信系统

这种系统的星座利用通信卫星, 可以是同步轨道通信广播卫星, 也可以是中轨道和低轨道通信卫星或广播卫星. 因通信卫星和广播卫星上的频率源稳定度不高, 所以系统的时频基准不可能设在卫星上, 为此采用在地面中心站里设置时频基准的做法^[3,5-7]. 这时可以由地面中心站发射多频多码的调制有时间信息和定位电文的扩频信号, 经卫星转发向地面广播, 用户机接收这类出向信号后, 便可以实现用户无限的被动定位^[5-8]. 用户机还可以有发射功能, 利用卫星入向链路把出向定位导航信息经卫星回传至地面站. 卫星入向链路不但是入向通信链路, 还可以设计成伪码扩频的入向定位链路, 它同样可以实现传输途径的距离测量, 最后实现用户的位置测定, 可用于监测用户状态, 甚至可以用于监测目标的微震动, 以及用户间基线的变化情况等等. 若同时考虑保留

转发式卫星导航系统出站定位链路, 则系统就可以组建成为有入向定位通信和出向定位通信组成的双向定位通信能力的卫星定位通信监测网系统^[9~11].

系统应由地面中心站、卫星和终端网组成地星地传输网络. 如图 2 所示, 在监测网的网络节点上安装微小型能发射测距码和通信定位电文的终端设备, 它具有把测量节点上测量仪器和传感器的测量信息及时回传至地面中心站的能力. 信息回传采用卫星传输方式主要是考虑到卫星传输具有覆盖范围广、监视面大、信道传输稳定等特点. 通信体制采用特宽频伪码扩频体制, 扩频码可选用 GOLD 码或混沌序列码等. 为了改善链路的传输载噪比, 地面中心站这一端采用口径大一些的天线. 这样组成的终端-卫星-地面站的卫星传输链路与由大站发测距码和导航电文, 经卫星转发, 由终端定位的链路不同, 是一种反向链路, 是一种逆设计.

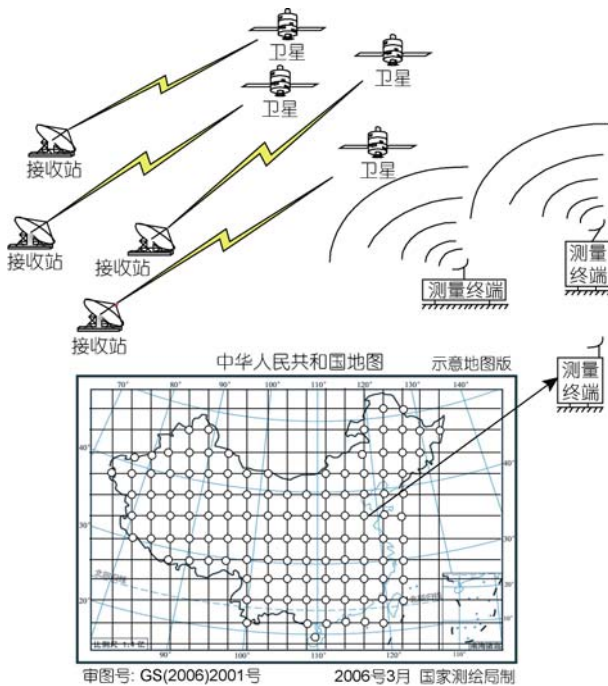


图 2 卫星定位监测网系统配置图

Figure 2 GPS monitoring network system configuration diagram.

如图 3 所示, 双向定位通信链路组成使系统可以实现双向时间比对, 双向伪距比对测量, 双向伪距闭合比对测量和伪距测量误差的比对修正等, 使用户终端能实现高精度的测距和定位, 实现系统导航和

中心导航.

这类系统中, 因为力图使用了微小终端, 出局和入局链路均变成为功率(信噪比)受限链路, 为此中心站应采用大口径天线^[10].

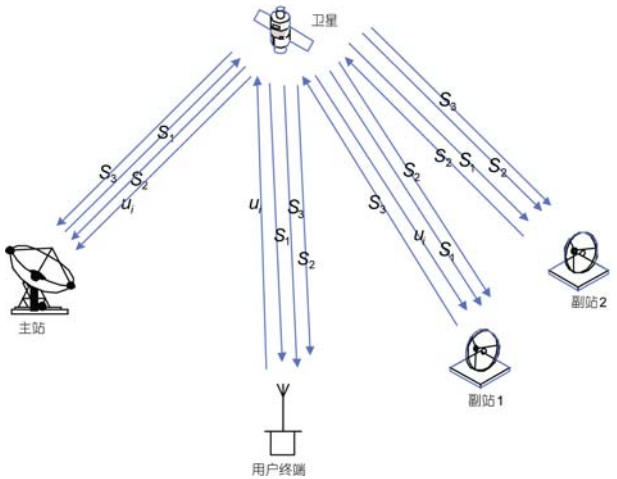


图 3 双向导航通信一体化系统示意图

Figure 3 The bidirectional navigation and communication system schematic diagram.

新系统具有以下功能:

(1) 有双向(出局、入局)定位导航功能, 出局定位是无源定位, 具有用户无限等特点. 而入局定位是有源定位, 能用于无人监测和遥控等场合. 出局定位信息可以通过入局定位链路传回至地面中心站.

(2) 有双向通信传输功能, 具有把测点仪器和传感器的测量信息、勤务信息及其他信息自动回传至地面中心站或区域中心站的能力. 除了回传信息以外, 也可以由地面站经卫星向终端发布指令, 实现出站广播通信传输.

(3) 系统有多终端共视功能和双向时间比对等高精度授时功能, 双向时间比对精度可优于 0.1 ns 量级.

(4) 可以实现卫星轨道的实时精密测量和计算, 当监测小终端站足够多时, 可以达到厘米量级精度的轨位实时动态测量^[12], 从而为实时高精度(毫米量级)定位监测创造了条件.

总之, 这种系统有大站处理能力强, 信息不再需要由其他系统收集, 测量与处理的实时性好、卫星覆盖范围广、监视面大、信道传输稳定、测量精度高等特点.

3 新系统应用的关键技术

下面介绍新系统最主要的几个关键技术.

3.1 导航和通信的结合技术

卫星定位利用了通信中的广播传输方式, 使用户无限, 能被动接收定位. 但由于 GPS 系统中没有保留卫星通信功能, 所以 GPS 只能实现用户个体孤立的导航定位, 无法使位置和时间等信息数据交换传输, 实现系统导航和中心导航. 后来人们发现了这一不足以后, 就利用其他通信方式传输导航定位信息, 如利用地面移动通信、短波通信等进行定位信息回传、交流. 转发式卫星定位系统利用通信卫星导航定位时, 继续发挥了卫星通信的功能, 实现了低信息速率的数据回传和指令下达, 实现了双向低信息速率数据传输和语音通信^[13], 从而使导航定位信息可以在一个卫星传输系统内交流、传输, 使信息活起来, 发挥出更多的作用. 2008 年 7 月美国海军研究实验室授予波音公司团队“高度完善全球定位系统 (HL-GPS 计划)”已经在 2009 年 7 月完成了铱星星座计算机的增强型窄带软件升级工作, 使第二代 GPS 辅助信号能够通过铱星星座进行传输, 利用这种信号, 将能够比目前更快更精确地实现 GPS 的快捕、快跟踪和实时导航定位.

上述所说的导航与通信的结合, 还仅仅是系统的结合或系统内两种功能的结合, 还没有把定位和通信两大功能有机地联系在一起. 为此, 文献[4]提出了在信号结构层面上的导航定位和通信的融合技术和具体格式, 做到定位信号和通信信号的一体化. 这一技术可以做到不占用通信信道, 把导航定位功能融入到通信链路中去, 从而为物流网的定位、交通信息广播、生命救援创造服务条件.

导航通信组合信号因需要完成精确测距, 所以应采用宽带扩频体制, 或特宽带扩频体制. 这样能得到很高的扩频增益, 故在信号组合传输时, 信号可以埋在噪声底下, 信号传输具有很好的抗干扰性能. 在卫星广播信号中, 因有扩频的导频帧, 则可以把它作为测距用, 另外在空帧上加上轨道、时间等参数, 便可以作为导航定位电文. 多路传输时的测距为冗余测距, 可提高测距精度.

3.2 比对测量技术

比对测量可以消除误差, 特别是可以完好地消

除测量偏差, 从而可以获得高精度的测距值. 在现行的卫星导航系统中已利用了单向比对测量技术; 利用测量值与基准点的已知参数比对求得定位误差后, 去修正基准点附近区域测量值中的误差. 但单向相对比对测量有一定的局限性, 如差分修正必须有基准点, 操作会比较累赘.

现在提出入向相对比对测量和双向相对比对技术^[5,10], 其中卫星双向相对比对技术有点对点的比对, 点对多点的比对和多点对点的比对. 卫星双向相对比对测量技术的原理如图 4 所示.

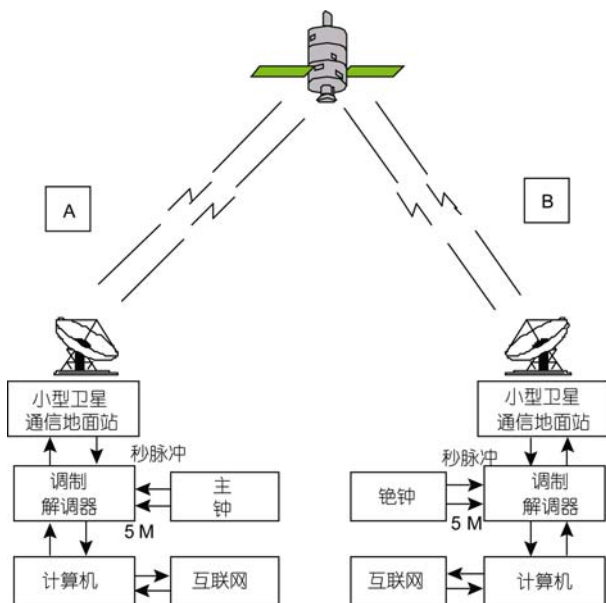


图 4 卫星双向法比对的基本原理图

Figure 4 The satellite two-way comparison basic schematic.

图 4 中地面 A 站发信号, 经卫星转发, 由地面终端 B 站接收; 同时地面终端 B 站也发信号, 经卫星转发后, 广播下行, 由地面站 A 接收, 这就是最基本的双向比对测量. 双向比对测量可以整体消除传输误差, 所以测量精度极高, 如双向时间比对测量可以使时间同步精度优于 0.1 ns. 所以要充分研究各种可行的双向比对方法, 实现高精度误差修正.

下面以基线变化的入向相对比对测量为例介绍入向相对比对测量方法特色.

高精度基线测量大多采用干涉比相测量方法. 干涉比相测量方法分载波相位干涉测量方法和伪距相位干涉测量方法. 但载波相位干涉测量方法在 GPS 中应用时, 存在一个需要把基线两个端点接收

到的载波信号传输到一起处理的问题. 实际上不论是哪一种测量方法都要把两点的测量值传输到同一个数据处理点进行比相测量处理. 而在传输时要求相位不能改变, 相位不能失真, 所以操作比较难(见图 5), 实际上, 传输会产生传输误差, 影响测量精度. 但在入向测量中, 两测站的相位已统一实时传到了地面中心站了, 所以已不需要再传输, 处理时也比较方便(见图 6). 所以在时间差伪距测量的基础上, 辅以载波相位测量, 则可以使伪距实时测量分辨精度达到毫米量级^[11,14].

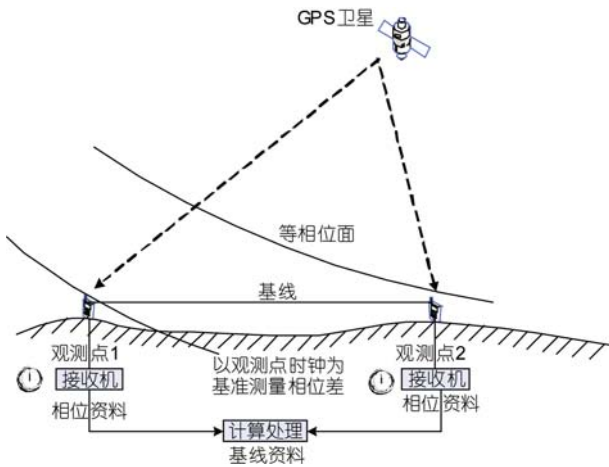


图 5 GPS 干涉测量基本原理图
Figure 5 The basic principles of GPS interferometry.

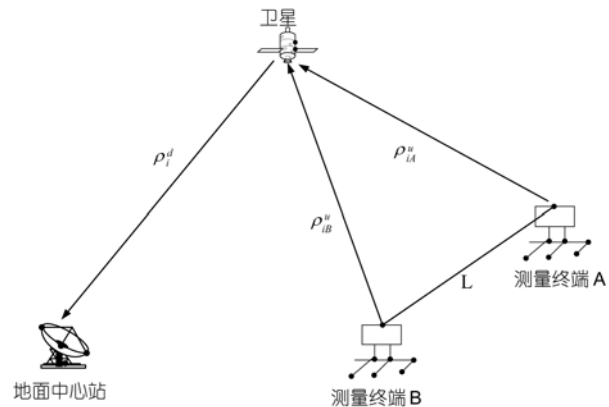


图 6 基线变化测量示意图
Figure 6 The schematic diagram of the baseline changes measurement.

3.3 改善星座的几何精度衰减因子(DOP)

定位精度是定位系统最重要的指标. 采用多

重物理基准增强可以改善星座的几何精度衰减因子(DOP), 从而与仅用地面移动网定位时的精度相比较, 能较大幅度地提高定位精度. 现分析地面移动网定位与由卫星辅助后的地面移动网定位之间的区别.

3.3.1 几何精度衰减因子(DOP)和定位误差估算

对于位置定位误差来说, 由于地面移动网基站不同的几何位置分布, 则会有不同的误差传递, 直接影响到定位误差的大小.

$$\text{位置误差} = \sigma_{\text{URE}} \cdot \text{DOP}, \quad (1)$$

式中 σ_{URE} 为等效伪距误差, DOP 为几何精度衰减因子.

3.3.2 只利用地面移动网络定位时 DOP 的仿真

仿真^[7]条件: 有四个基站, 没有卫星, 四个基站不处于同一水平面, 分布在以移动台为参考点的站心坐标系内相对高度为-50~100 m 的不同地方, 相对距离为 2 km, 2-D 分布情况如图 6 所示, 图 6 中位于中心的圆点为终端, 周围四个矩形的点为基站位置. 仿真计算出的几何精度因子 DOP 如表 1.

表 1 DOP 值表

DOP 类型	DOP 值
GDOP	72.572
PDOP	72.559
HDOP	1.459
VDOP	72.544
TDOP	1.369

3.3.3 地面移动网和卫星组合定位时 DOP 的仿真

仿真条件: 有四个基站, 加入一颗直播星, 假设卫星坐标为赤道上东经 115.5°, 海拔高度为 35796669.7688513 m. 四个基站不处于同一水平面, 分布在以移动台为参考点的站心坐标系内, 相对高度为-50~100 m 的不同地方, 相对距离为 2 km, 2-D 分布如图 7 所示, 图 7 中位于中心的圆点为移动台, 周围四个矩形的点为基站位置. 仿真计算出的几何精度因子 DOP 如表 2.

3.3.4 仿真结论

在上述的仿真中, 用这种极其接近实际的基站分布时, 由于基站分布对手机定位不理想, 对测量误差的放大十分明显, 由此产生的定位误差很大. 即使用户测量误差只有米量级. 但代入(1)式中后, 定位

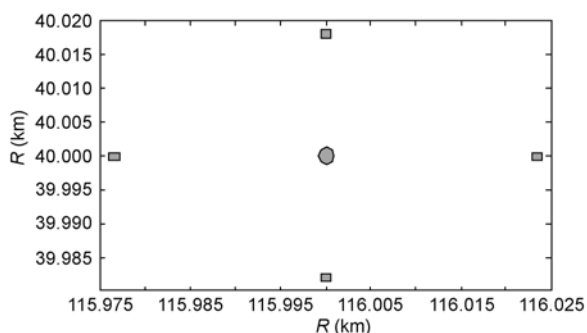


图 7 移动台和基站 2-D 分布图

Figure 7 2-D distribution of mobile stations and base stations.

表 2 DOP 值表

Table 2 DOP value

DOP 类型	DOP 值
GDOP	1.59414746095296
PDOP	1.51154883628597
HDOP	1.21546389360809
VDOP	0.898569645499183
TDOP	0.506484197962106

精度会有上百米. 加入卫星后, 通过上述的仿真, 可以看出在用户测量误差中虽然增加了有关卫星的误差量, 但由于卫星链路传输信道是恒参信道, 链路的 EIRP 又大, 所以伪距测量精度很好, 加上加入卫星

后又极大地改善了 DOP 值. 则根据(1)式, 定位精度将大大提高, 从而使实现高精度定位在理论上成为可能.

在现有的基于地面移动网定位方法的基础上, A-MPS 中提出了一种用卫星增强地面移动网进行高精度授时和定位的方法, 最后, 通过仿真证明了方法对提高定位精度的影响很大, 其实用前景十分美好.

4 结论

总之, 后 GPS 时代的卫星导航技术将出现多元化多层次的局面, 除了当今经典的 GPS 类卫星导航技术和系统外, 将会出现局部应用、部门应用、专业专项应用的卫星导航技术和系统. 同时, 以地面移动网、广播网、局域传感网、局域通信网的定位技术也将同时雀跃而起, 与卫星导航定位技术携手共辉映.

这些技术和系统总的发展趋势将向双向、多频、多模、导航定位通信一体化的方向发展, 并将把空中的卫星导航系统与地面移动通信和广播网等融合, 以便充分发挥各种系统的优势, 形成高精度、高性能的室内外、空中地面均能应用的, 也能实时交流的卫星定位、导航、授时和通信系统.

参考文献

- 1 Parkinson B W, Spilker J J. Global Positioning System: Theory and Applications. Washington DC: AIAA, 1996
- 2 Shu H L, Jing G F. Progress in Satellite Navigation Technology. New Technology Development Report 2011, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 2011 [施许立, 景贵飞. 卫星导航技术新进展, 2011 新技术发展报告, 中国科学院. 北京: 科学出版社, 2011]
- 3 Shi H L, Lü Z P, Deng Z L, et al. Method of mobile communication network positioning aided by communication broadcast satellite signal. Patent, 201010143009.2 [施许立, 吕子平, 邓中亮, 等. 由通信广播卫星信号辅助的地面移动通信网定位方法. 国家发明专利申请号, 201010143009.2]
- 4 Shi H L, Cui J X, Han Y B, et al. Navigation and communication integrated signal structure. Patent, 200910084033.8 [施许立, 崔君霞, 韩延本, 等. 导航和通信一体化的信号结构. 国家发明专利申请号, 200910084033.8]
- 5 Shi H L, Sun X Y, Li Z G. Transponding Satellite Navigation Principle. Beijing: Science Press, 2009 [施许立, 孙希延, 李志刚. 转发式卫星导航原理. 北京: 科学出版社, 2009]
- 6 Ai G X, Shi H L, Wu H T, et al. A positioning system based on communication satellites and the Chinese Area Positioning System (CAPS). Chin J Astron Astrophys, 2008, 8(6): 610–630
- 7 Ai G X, Shi H L, Wu H T, et al. Principle of positioning system based on communication satellites. Sci China Ser G-Phys, Mech Astron, 2009, 52(3): 472–488
- 8 Ai G X, Shi H L, Wu H T, et al. Transponder satellite navigation system. Patent, 200410046064.1 [艾国祥, 施许立, 吴海涛, 等. 转发器卫星通信导航定位系统. 国家发明专利批准号, 200410046064.1]
- 9 Shi H L, Cui J X, Jing G F, et al. Bidirectional navigation system. Patent, 20101043100.1 [施许立, 崔君霞, 景贵飞, 等. 双向卫星导航定位系统. 国家发明专利申请号, 20101043100.1]

- 10 Shi H L, Ning C L, Li S M, et al. Method of using satellite on target communication and positioning. Patent, 200810116829.2 [施浒立, 宁春林, 李圣明, 等. 利用卫星对目标进行通信和定位的方法. 国家发明专利申请号, 200810116829.2]
- 11 Shi H L, Han Y B, Li Z G, et al. Real-time precise orbit and position measurement of satellite and aircrafts. Patent, 200810226676.7 [施浒立, 韩延本, 李志刚, 等. 对卫星或飞行器轨道和位置实时精密测量方法. 国家发明专利申请号, 200810226676.7]
- 12 Li Z G, Shi H L, Ai G X, et al. Transponder satellite orbit determination methods. Patent, 200310102197.1 [李志刚, 施浒立, 艾国祥, 等. 转发器卫星测轨定轨方法. 国家发明专利批准号, 200310102197.1]
- 13 Shang J N, Shi H L, Lu X C, et al. Navigation and communication integrated system based on positioning and time information. Patent, 200610012056.4 [尚俊娜, 施浒立, 卢晓春, 等. 基于时间位置和状态信息的导航通信一体化系统. 国家发明专利申请号, 200610012056.4]
- 14 Shi H L, Han Y B, Pei J, et al. Method of real time precise measurement of millimetersized crust displacement. Patent, 200810240073.2 [施浒立, 韩延本, 裴军, 等. 地壳毫米级位移的实时精密测量方法. 国家发明专利批准号, 200810240073.2]

Where will satellite navigation be developed?

SHI HuLi* & CUI JunXia

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

New progress of navigation and positioning technology, especially satellite navigation and positioning technology is reviewed in this paper. Development trend and direction of satellite navigation technology after GPS is discussed. Compatibility and interoperability of multi-mode satellite navigation system, integration and complementarity of satellite navigation with ground mobile network, and the integration of navigation and communication technology are introduced respectively in the first place. Then the inbound satellite positioning and communication system and bi-directional satellite positioning communication system are proposed. Finally, the possibility of the integration of navigation signal and function into the communication link is looked into the future.

GPS, satellite navigation, world integration, bidirectional positioning

PACS: 95.75.Rs

doi: 10.1360/132011-342