



图 8

上式求得 $T=0.02$, 其值和有关的参量不稳定性理论得出的结果基本一致.

- [1] J. M. Dawson, *Phys. Fluid*, **5** 4(1962), 445.
- [2] C. K. Birdsall, *Phys. Fluid*, **13**-8(1970), 2123.
- [3] J. M. Dawson, *Rev. Modern Phys.*, **55**-2(1983), 403.
- [4] 王闽, 等离子体物理及其计算机模拟, 陕西科技出版社, (1992).
- [5] 刘成海、王闽, 计算物理, **1** 2(1984), 200.
- [6] 王闽, 国防科学技术大学学报, **13**-4(1991), 59.
- [7] 陈德明、王闽, 计算物理, **7**-1(1990), 24.
- [8] 王闽、林励平, 核聚变与等离子体物理, **9**-1(1989), 46.

卫星多普勒定位技术及发展

李长真

(武汉测绘科技大学, 武汉 430070)

扼要介绍了卫星多普勒定位技术的理论基础和发展过程, 并简单地介绍了在卫星多普勒定位技术的基础上发展起来的全球定位系统(GPS), 以及卫星多普勒定位技术和全球定位系统在世界和我国的最新应用成果和潜在应用前景. 最后给出了几个定位技术中有待解决的基础物理问题.

Abstract

In this article a brief introduction is given to the theoretical foundation and the history of development of satellite Doppler positioning and the global positioning system, as well as the present status of research and practical and potential applications of them at home and abroad. Some fundamental problems in satellite positioning techniques related to modern physics are also described.

基础物理的研究成果之一——多普勒效应在科学研究、国防工业、国民经济建设等多种领域中有着非常广泛的应用. 卫星多普勒定位技术就是一个典型的应用例证. 它是根据多普勒效应的原理, 利用已知轨道参数的人造地球卫星播发的已知频率的无线电信号, 在地面、海洋或空中某一固定或活动测站上, 测量其信号的多普勒频率移动来确定测站的地心坐标. 这种物理

技术目前在世界上许多国家的国防、军事和经济领域里起着重大的作用.

一、卫星多普勒定位技术

多普勒效应是 1842 年由奥地利物理学家多普勒(Christian Doppler, 1803—1853)首先发现的. 其原理简单的说就是: 当波源与观测者

作相对运动时,观测者接收到的频率与波源发射的频率不同.多普勒当时发现这种效应时,仅限于声频.后来,随着麦克斯韦 1856 年预言电磁波的存在,赫兹在 1888 年在实验室中产生电磁波以后,人们发现多普勒频移效应对电磁波也是适用的.波源相对于测站运动所引起的多普勒频移效应可用下式表示:

$$f_r = \frac{c}{c - v \cos \alpha} f_s, \quad (1)$$

上式中 c 为真空中的光速, v 为卫星相对于测站的瞬时速度, f_s 为波源发射频率, f_r 为测站接收到的频率, α 为波源瞬时速度方向与波源至测站联线的夹角.注意,上式中未考虑相对论效应的影响,但随着测量精度的提高,在精密的多普勒定位中应增加狭义相对论的时间延缓效应和广义相对论的引力场中时钟变慢的效应.如果波源是卫星上已知发射频率的无线电信号发射源,卫星到测站的距离为 r ,则称 $dr/dt = v \cos \alpha$ 为卫星的径向速度,则(1)式经过整理,得

$$\frac{dr}{dt} = \frac{c}{f_s} (f_r - f_s) = \frac{c}{f_s} \Delta f. \quad (2)$$

测站就可根据所测量的接收频率而得出多普勒频移,再经过技术处理,算出卫星在某一瞬时与测站的距离差,从而确定测站的地心坐标.实际应用时,为了精确地测量多普勒频移 Δf ,通常在地面接收机内增加一个固定的频率,即本征频率.将接收到的频率与本征频率混频,得出差拍频率,最后用积分的方法导出多普勒频移或直接进行定位计算.下面简述一下卫星多普勒定位技术的发展.

1957 年 10 月 4 号前苏联发射了人类第一颗人造地球卫星,美国霍普金斯大学应用物理实验室的韦芬巴赫(G. C. Weiffenbach)和吉尔(W. H. Guier)等人,根据多普勒效应的原理,在已知坐标的地面点 x 跟踪前苏联卫星播发的无线电信号,测得其多普勒频移,成功地确定了前苏联卫星的轨道参数.随后,当时任该实验室研究中心主席的麦克雷(F. T. Meclure)等人设想了一个“反方案”,通过测量已知轨道

参数的卫星播发的无线电信号的多普勒频移来测定测站的坐标,这就是卫星多普勒定位技术.

1958 年美国的北极星潜艇下水服役,为了解决为潜艇导航的问题,美国海军海面武器实验室(NSWL)和霍普金斯大学应用物理实验室于 1958 年开始研制卫星多普勒定位技术.从 1959 年 9 月发射第一颗试验性卫星至 1961 年 11 月共发射了九颗试验性导航卫星,经过四年多的试验和论证,解决了许多技术性问题,因而于 1963 年 12 月起陆续发射了六颗工作卫星,组成了卫星多普勒导航星座,使地球上的任何一个测点,平均每隔 2h 可观测到其中一颗卫星.由于这些卫星的轨道倾角都接近 90° ,于地球的子午面平行,故称为子午卫星系统,也称为导航卫星系统(NAVSAT).卫星高度在 950—1200km 之间,运行周期约为 107min,每天绕地球运行约 13—14 周.轨道的偏心率很小,近似圆形.在每一个运行周期内,地球相对于卫星自转约 27° ,每颗卫星在地面上覆盖的区域,即每次卫星通过地面上有可能进行多普勒测量的区域,是一个约 3000—3500km 的带状区域.子午卫星系统于 1964 年交付美国海军使用,1967 年 7 月 29 号解密部分电文供民用测量.

二、卫星多普勒定位技术的应用

从 1967 年子午卫星系统部分电文解密供民用后,起初仅用于远洋船舶的导航和某些海上目标的定位.后来,美国首先试验用来进行大地测量.1972 年,他们公布了多普勒网的定位成果.由于这种测量具有全球性、全天候、速度快、精度高、装备简单、作业方便等优点,特别是在交通不便的地区更有特殊作用,因此很快被世界各国包括我国广泛运用于大地测量、地球物理探测、地质和石油勘探等领域.民用多普勒接收机的销售量大幅度上升,1982 年(45,555 台)比 1974 年(860 台)增长了 53 倍.我国从 70 年代初期就开始了对此类仪器装备和理论的研究,不久就引进国外技术进行实际作业.在 1978 年春,我国测绘工作者对西沙群岛进行了

多普勒定位测量,将西沙群岛的主坐标联入北京坐标系.从1978年开始,我国建立了全国陆地海洋卫星定位网,对我国广大地域进行了大规模的作业,进行了整体平差,使我国的卫星多普勒定位技术飞速地向世界水平迈进.武汉测绘科技大学完成的“卫星网与地面网的联合平差以及在西北卫星定位网中的应用”项目,获1988年国家科技进步三等奖.近年来,对南极长城站、中山站的坐标也是用卫星多普勒定位技术测量的.如对南极长城站,共观测了210次子午卫星通过,精确测定长城站的地理位置为:南纬 $62^{\circ}12'59''.811 \pm 0''.015$,西经 $58^{\circ}57'52'' .665 \pm 0''.119$,高程 $43.58 \pm 0.67\text{m}$,至北京的距离为17501949.51m.

子午卫星系统的主要民用应用为:

1. 测定地面点的地心坐标,建立全球统一的以地球质心为原点的大地坐标系和全球性大地控制网,以提高和扩展现有人工天文大地网的精度.

2. 对远洋船舶进行导航,对远海岛屿、海上钻井平台进行联测和定位.

3. 在地面特别是某些困难、隐蔽、荒漠地区建立卫星控制网,供地形测量、工程勘测、地质调查和找矿、石油勘探以及测图控制方面使用.

4. 利用定位手段测定和追索接触带、断层、节理地质特征,利用测量参数和状态变化来研究地质现象,测定大陆板块运动和断裂应力的方向与大小,进而预报可能发生的地质自然灾害.

5. 与天文测量及水准测量配合,测定大地水准面的起伏、地面点的绝对垂线偏差以及研究地极移动等.

三、卫星多普勒定位技术的进一步发展 ——GPS 卫星全球定位系统

由于子午卫星星座的运行轨道较低,约1000km,而且卫星的数量较少,常为六颗,这样子午卫星星座作为一种导航系统有一个很大物理

的缺点,就是卫星不能连续地出现在某一地面上空.地球上一点平均每隔2h才可观察到一颗卫星,通过时间约为10—18min.这样,就无法进行全球性实时导航和实时定位测量,特别是对高速运行的宇宙飞行器的发射,测控、定轨,弹道导弹制导等无法发挥作用,而且其测量精度对高精度导航也还不甚理想.1973年12月美国国防部为了满足美国陆、海、空三军的需要开始研制导航卫星定时和测距全球定位系统(navigation satellite timing and ranging global positioning system),简称为GPS全球定位系统.1978年2月22号成功发射了第一颗GPS试验卫星,计划于1993年发射完成24颗GPS工作卫星,在六个近似圆形的轨道上各运行四颗,运行周期为12h.GPS卫星与子午卫星比较,运行高度高,平均为20200km,一颗卫星的地球覆盖区域约为地球表面积的38%左右,而子午卫星约为7%.GPS卫星的数量较多,且每颗卫星在地平线上运行的时间较长,不存在间断观测时间,并可同时观测到多颗卫星.对地面上某点的观测者而言,见到一颗卫星在地平线上的运行时间约为5h,位于地平线上的卫星颗数随时间和地点的不同而异,最多时达11颗,最少为四颗.只观测到四颗卫星的间隙段时间(此时,定位精度相对差一些)一般不超过10min,故可连续地在全球,包括陆地、海洋(水面和水下)、空中和近地轨道上进行实时导航和定位.GPS系统是一种正在发展的全天候、高精度、快速实时定位的全球定位系统,从覆盖范围、信号可靠性、数据内容、准确度和多用性这五项指标来看,都大大优于子午卫星系统.

GPS系统主要是为美国军事用途服务的,但也可供民用.其主要军事用途为:

1. 核潜艇的导航和误差修正,航空母舰、战略飞机、直升飞机的全天候飞行的航线导航,飞行器在电磁干扰情况下的导航.

2. 航天飞机和卫星的发射、测控、定轨,空间会合,软着陆,弹道导弹制导等.

3. 快速布设加密军控网,为地面部队或单兵提供实时定位,指明方向.

4. 像片测图,搜索敌方目标.
5. 精密时间同步等.

GPS 系统现在已逐渐被广泛应用于民用上,其应用范围十分广泛,例如

1. 在地球表面任何地区进行全天候、高精度的快速大地定位和快速布设大地网.
2. 飞机和远洋船舶的定位和导航,在全球范围内为飞机提供最短航线.
3. 为大地测量、工程测量、地球物理测量、陆地和海洋资源勘探提供高精度定位.
4. 在地震频繁区布设监视网,监测地壳形变.
5. 向全球发播原子时,其精度比现行播时精度提高约两个数量级.
6. 在地球极移、大陆板块运动、地球固体潮汐现象,地球自转和公转的速度变化、时间传输等科学研究领域里有着巨大的应用潜力.

目前已有多种商品型 GPS 信号接收机可供选购民用,用以跟踪 GPS 卫星,接收并解译出卫星所发送的电文,实时地计算出定位或导航所需的数据.我国在 1992 年参加了国际空间年 '92 全球 GPS 会战,中国资源卫星应用中心和中国测绘工程规划设计中心组织了地矿、石油、煤炭、海洋、测绘和地震等部门的上千名测绘科技工作者参加了这—工作.1992 年 7 月 26 号北京时间八时整,均衡分布在我国国土的 29 个观测点位同步开机工作,经过三个多月的

努力,布测完成我国高精度的全国 GPS 骨干控制网,使第一次全国规模的卫星大地定位中国 '92GPS 会战顺利告捷.测算表明,这个控制网的精度已达到千万分之一,即在相邻点位的七八百公里距离上,量算精度达到了正负 10cm 以内.这标志我国的 GPS 骨干控制网已经达到发达国家的同期水平.

卫星定位技术已使传统的测量技术拓宽到地球动力学、地球物理学、天体力学、空间物理等领域,为了不断提高测量精度,人们还必须不断地研究、消除或减少各种误差对精度的影响.如狭义和广义相对论对多普勒频移的影响,时钟的精度和误差,大气不均匀的折射率,电离层的非线性散射,各种气象因素如温度、压力、湿度等,都会使卫星定位结果产生较大的系统误差.对消除或减少这些误差的模型还需不断地修正,还需要物理学、测量学以及其他学科的科学工作者进行大量的基础性研究工作.随着将惯性定位技术、遥感技术、地面近景摄影和数字化地图等新技术同卫星定位技术相结合,人类将实现全天候、全自动定位测图,卫星定位技术也将日益深入人们的日常生活中.

- [1] 沈镜祥等编,空间大地测量,中国地质大学出版社,(1990),69,76,77.
- [2] 宋成骅等编,卫星多普勒定位测量,测绘出版社,(1987),316,320.