

GPS 掩星技术低轨卫星计划的现状及进展

张大海 郭 鹏 张贵霞 严豪健 黄 斌

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

主要介绍了几个国际上已经实施的 GPS 掩星计划 (GPS/MET, Ørsted, Sunsat, SAC-C, CHAMP) 和在研的 (COSMIC, ACE) 低轨卫星计划的现状及取得的进展。通过总结可知, 下一代 GPS 掩星接收器应具有体积小、质量轻(几百克)、低功耗的特点; 能提供实时的卫星物理状态参数; 飞行器上的自主计算和控制; 星上数据通信和命令解释; 所有跟踪数据应符合厘米级精密定轨的要求; 能提供掩星和海洋反射实验的测量。

关键词 GPS 掩星技术 — 低轨卫星计划 — 接收器

分类号 P129, P128.15

1 引 言

自从在上世纪 80 年代实现 GPS 星座在气象学的应用以后, 在大气科学中利用 GPS 探测大气主要有两条途径: (1) 在地面 GPS 网接收双频 GPS 信号, 获得信号延迟、沿着 GPS 发射机和地面接收机路径上的水汽的积分; (2) 采用无线电掩星技术, 即用安装在一个低轨道卫星上的 GPS 接收机在 GPS 卫星升出或下没时测量 GPS 双频信号的频率变化。可用多普勒频偏量来计算无线电波的偏折角, 而偏折角是大气折射率的函数; 在电离层中, 折射率是电子密度的函数; 在中性大气中, 折射率是温度、气压和水汽的函数; 因此, 无线电掩星测量技术有可能提供有关电离层、平流层和对流层结构的信息。

1995 年 4 月, Pegasus 火箭把搭载在 NASA 的 Microlab I 卫星上的 GPS/MET 设备发射到预定近地轨道 (LEO) 上, 就已标志着 GPS 无线电掩星技术进入了实用阶段。

2 GPS/MET 实验计划

GPS 无线电掩星探测地球大气技术最初是由斯坦福大学和 JPL 的科学家共同提出和发展

国家自然科学基金重点项目 (19833030) 资助课题 国家自然科学基金 (100730170) 资助课题

973 项目 (G1998040703) 资助课题 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJXC2-SW-T) 资助课题

2001-11-01 收到

的。1993年由UCAR(University Corporation for Atmosphere Research)、Arizona大学以及JPL联合建立了GPS/MET实验计划,利用无线电掩星技术探测地球的中性大气和电离层。1995年4月3日发射了一个低轨(LEO)卫星Microlab-1,用于接收GPS卫星被掩时的信号。实验结果给出了GPS/MET观测中射线偏折角和折射率的垂直剖面,由此可以得到电离层的电子密度和中性大气的密度、压力、温度与水汽剖面。

这个计划很成功地完成了最初实验的目的,同时也完成了一些额外的任务。该计划的成功使得掩星技术被广泛认同为从事精确的天气预报、气候变化研究以及空间气象研究的手段。同时,GPS/MET数据频繁地被引用也是这一计划成功的反映。GPS/MET计划完成的主要任务有:(1)获得振幅和相位的有效数据集(Level 1)62000个;温度、压力、折射率、湿度以及极地的数据集(Level 3)11000个;这些数据已经公布。同时已有几千个数据集与独立的天气分析和其他观测得到的数据集进行了对比;(2)以1K的精度验证了地表以上40km范围内的理论温度;(3)通过附加的温度数据证明了水汽反演是精确的;(4)证实了对流层顶及以上层探测的垂直分辨率可达到500m;(5)检验了全天候条件下都可进行探测的能力;(6)证明了地极精确测定范围在10m以内;(7)可确定从中对流层到平流层范围内的重力波;(8)GPS/MET的轨道数据被新的地球重力模型EGM96引用;(9)观测系统的模拟试验和实测数据的同化试验都肯定了GPS/MET数据对模型初始化和天气预报的积极作用;

由于GPS/MET实验计划仅仅是第一步,它通过对飞行器上原有测地设备的改造,使其具有简单的无码功能。这意味着当GPS信号处于未加密的时候,仪器可以在很短的时间间隔内采集到高质量的连续的数据。由于需要同时获得掩星数据和用于定轨的所有GPS数据,而仪器只有一个低增益的天线,大大限制了掩星信号的质量和定轨的精度。

GPS/MET实验计划的另一个有意义的结论是,由于接收机没有专门的跟踪软件,因此在3~5km高度处经常丢失信号,尤以在水蒸气富集、温度结构复杂的中纬度和热带地区更为严重。尽管这样,GPS/MET数据集的分析结果不仅有助于大气科学的研究,而且对掩星信号的了解和跟踪的必要性有了进一步的认识,这对下一代掩星接收器的设计具有指导意义。

根据GPS/MET实验计划获得数据的分析结果可以看出^[5,6,10],掩星温度数据与无线电探空和模型数据的偏差在热带地区通常小于1K,在高纬度地区通常小于0.5K;无线电掩星技术探测地球大气的精度要高于其他空基的探测方法。由Abel反演技术得到的电离层剖面,与参数化电离层模型(PIM)和电离层探测器以及非相干散射雷达的结果对比^{[[3,9]},GPS/MET剖面获得的 N_mF_2 值(每 m^3 中的电子数)与附近的电离层探测器在(1-sigma)水平上的一致性约达到20%。同时首次利用GPS掩星数据对水汽剖面进行了反演^[7],在低纬度6~7km范围内精度可达到10%~20%,边界层内约可达到5%,甚至更好。因此,GPS无线电掩星技术的覆盖性、稳定性、精度、垂直分辨率以及对云层的敏感度都将对全球气候变化研究及天气预报做出巨大的贡献。

通过对GPS/MET计划测量数据的分析^[6,9,11],表明该计划的技术具有精度高、垂直分辨率高、全天候、稳定性好及全球覆盖等特点。

理论上讲,对流层上部直到40km范围内GPS/MET无线电掩星测量温度数据的精度可达到1K,这一结论已被很多文章证实。Rocken等人(1997)^[9]详细作了总结和验证,同时也反演了几百个温度剖面 and 少量水汽剖面,研究结果表明8~25km高度范围内温度剖面的平均

误差要小于 0.5K, 均方根误差小于 1.5K。

GPS/MET 计划的成功也为研究 GPS 无线电掩星技术对电离层中的电子密度分布的全球监测的能力提供了可靠的依据。

但是在数据稀疏地区, GPS/MET 的分析结果与气象学的分析结果存在较大分歧; 在取消 A/S 政策后对数据的影响方面, 也还需做进一步的研究。同时 GPS/MET 也存在不足之处: 理论中存在与事实不相符的假设; 水平方向测量精度较低; 无法控制掩星事件的发生时间和空间位置; 水汽中温度和湿度不能同时反演等。

3 Ørsted 和 Sunsat 计划

GPS/MET 计划的成功促成了 NASA 在 1995 年同意资助两个较小的国际计划: (1) 丹麦的 Ørsted 计划, 这个计划最初的设计是磁场成像; (2) 南非的 Sunsat 计划, 这个计划是在学生设计的卫星上搭载一个高分辨率成像仪。这两个计划中的卫星上都具有类似 GPS/MET 的掩星接收机的, 并于 1999 年 2 月一起搭载 Delta 火箭发射升空。经过一段飞行器校验期, 在 1999 年 9 月才接收到有限的的数据。由于受到这些小卫星天线的限制和连续的 GPS 信号加密的影响, 信号的质量大大低于 Microlab I 的信号。为了分析其分辨率较低的数据, 必须采用更先进的算法, 以提高数据处理的能力。另外, Sunsat 仪器可以在飞行中软件得到升级, 从而改善它的无码跟踪程序和开循环跟踪算法。

表 1 Ørsted 和 Sunsat 计划简要情况^[13]

	Ørsted	Sunsat
轨道参数	852km(高度) 98.74° (倾角)	852km(高度) 98.74°(倾角)
项目管理 单位	CRI(丹麦)	Stellenbosch 大学 (南非)
任务	磁测 带电微粒	通讯展示 立体成像, 激光反射器
GPS 任务	大气掩星	大气掩星

4 SAC-C 计划和 CHAMP 计划

GPS 掩星以后的主要发展方向体现于两个计划: SAC-C 和 CHAMP。SAC-C 计划发射一个载有磁力仪和多谱成像仪的阿根廷卫星; CHAMP 计划发射用于重力和磁力成像的卫星。这两个较大的飞行器首次携带 JPL 新一代掩星接收器已经分别在 2000 年春季升空^[11]。SAC-C 首次携带前后两个沿速度方向的天线, 因此能够观测到升出时的掩星数据。它们还携带向下方向的天线, 用于恢复被海洋表面反射的信号。在发射后, 所有的飞行的软件还都可以得到升级和重载。

SAC-C 卫星已于 2000 年 6 月 8 日在加利福尼亚由 Delta 7320 火箭发射升空, 是由美国和阿根廷合作的一项国际卫星计划。阿方负责卫星的发展, NASA 负责提供发射和仪器设备, 并负责总体项目管理。

SAC-C 可提供地球和海岸带的多谱成像; 飞行器还可提供地球大气层和电离层的结构和动力学的研究资料, 其观测数据已经分阶段在网上公布, 同时还有地磁场的数据。SAC-C 可进行空间辐射量在空间环境中的测量, 进而研究其对大气电子成分的影响, 最后, SAC-C 还可验证定轨的准确程度。

飞行器约重 463kg, 高 137cm, 宽 119cm, 主体由 16 个边构成, 内部最大圆直径是 76.2cm, 进入太阳同步轨道时, 轨道高度为 702km, 倾角 98.3° 。其主要的星载设备有: 多谱介质分辨探测仪 (MMRS), 用于监测地球和海洋生物圈的动态, 将在 SAC-C 卫星上服务 4yr; 磁场成像仪 (MMP), 用于连续的地球磁场的测量, 对于日地关系的理解很有帮助, 至少工作 14 个月; GPS 掩星接收仪, 用于发展和利用新的全球定位系统进行大气测量, 用以研究气候的季节、年度和长期的变化。

CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload) 计划是由德国空间管理局支持, GFZ (GeoForschungs Zentrum Potsdam) 的科学家于 1994 年提出的小卫星计划, 主要用以改善重力场和磁场模型。CHAMP 卫星于 2000 年 7 月 15 日在俄罗斯发射升入 454km 高的第一轨道。经 1yr 多的运行, 现在已经有高质量的数据和分析结果。卫星设计寿命为 5yr, 因此用户可以有多年高精度数据流用以地球科学和大气科学的研究。

CHAMP 卫星的物理参数和尺寸分别如表 2 所示。

表 2 CHAMP 卫星物理参数和尺寸^[14]

总质量	522.5kg
高度	750mm
长度	8333mm(其中 4044 为杆长)
宽度	1621mm
面积与质量比	$0.00138\text{m}^2/\text{kg}$

将来 10 年地球科学的中心任务是, 把整个地球包括固体、流体、气体作为一个系统, 研究该系统在时间和空间上的变化以及它们在不同时间尺度上的相互作用。为了描述这样一个庞大的、复杂的、性质迥异的系统需要全局的、长期的和综合的圈层内及圈层间的数据。CHAMP 计划可以为此做出一定的贡献。

CHAMP 低轨卫星主要科学任务和主要运载的设备仪器有:

- 重力研究方面: 低轨道卫星的轨道摄动的连续精确监测由 GPS 星座完成, 低轨道卫星上载有高精度新一代 GPS 接收器、用于测量表面重力加速度的高精度三轴加速度计, 同时有一对确定飞船姿态的摄像装置;
- 磁场研究方面: 一个用于测量环境磁场的三个分量的高性能磁通门磁力仪, 一对用于测定星体姿态的摄像头、标量磁力仪;

- 大气层 / 电离层研究方面: 用于观测重力和磁场的仪器组成一个很强的传感器组, 可用于相关的中性大气层和电离层参数的测量: GPS/CHAMP 无线电掩星测量, 以推导大气的温度和水汽分布; 数字离子漂移计, 用于测量电场; GPS/CHAMP 可确定电离层中的电子密度分布, 高分辨率的加速度计可确定 CHAMP 轨道上的空气密度变化。

由于 CHAMP 计划中的 GPS 接收机是 JPL 的最新一代产品, 而高增益、多方向的天线又提高了信号的质量, 从而使先进的信号跟踪技术能得以应用。在 2001 年 2 月 11 日, 第一次接收到了 CHAMP 卫星的掩星测量数据^[12], 其中包含了 7 个高质量的掩星数据, 掩星持续时间均在 30s 以上。反演结果与相应 ECMWF 数据比较显示了两者的很好的一致性, 对流层顶以上的温度偏差小于 1K(标准偏差在 1.5 左右), 高于北纬 30° 的地区偏差小于 0.5K。从短期上讲, CHAMP 的数据将有助于改善 GPS 无线电掩星技术和提高对流层的回归算法技术; 从长期上讲, 将有利于增强全球气候变化的研究能力。

5 COSMIC 计划

COSMIC 计划 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 是由美国国防部和台湾地区合作研究的科学实验, 利用低轨道卫星星座探测地球大气来研究天气预报、空间气象监测。主要参与单位包括: 中国台湾地区的太空计划办公室(NSPO)、美国 UCAR、JPL 等研究机构。

COSMIC 计划的目的是: (1) 改善全球和局地的天气预报; (2) 改善全球空间天气监测和预报; (3) 为气候和全球变化研究提供数据; (4) 提高对地球重力场的认识。COSMIC 计划主要分为三个阶段: (1) 计划和发展阶段; (2) 发射轨道过渡阶段; (3) 实时操作展示阶段^[8]。现今已开始实施第二阶段的研究, 该计划的 8 颗低轨卫星预计在 2003 年发射; 每个低轨卫星将携带以下仪器: (1) GPS 掩星仪器, (2) 微型电离层光度计 (TIP), 它将测量沿着卫星轨迹在 F2 层顶部的电子密度, (3) 三波段信标发射机 (TBB), 在地面接收到的信号用于高分辨率电离层层析成像重建。整个 COSMIC 系统包括 LEO 卫星、地面数据接收和飞行器控制站、数据分析中心和数据通信网络。具体的观测要求如表 3 所示。

表 3 COSMIC 计划的观测要求^[8]

测 量 参 数	要 求
观测掩星星次	约 4000/d
分布	全球
L1/L2 相位测量	约 2mm
GPS 相位采样率	0.1~50Hz
GPS 垂直范围 (中子大气)	0~60km(50Hz 采样)
GPS 垂直范围 (电离层)	90~800km(10Hz 采样)
TBB 相位测量	< 32mm(150MHz 频率, 地面接收机)
TBB 采样率	> 50Hz(地面接收机)
TIP 测量	< 10%
TIP 迹	125×25km(400km, F2 中)
TIP 分辨率	平均 0.1~10s
磁力仪	10nT 精度, 500nT 精度 (待定)

期望的轨道倾角为 72° , 轨道半径为 800km, 各飞行器位于上升节点时轨道间隔为 23° 。每 100 min 整个星座可在全球范围内测量一遍, 每天系统将归算 4000 个垂直大气剖面。归算结果的气象数据将大致反映 0~60km 范围内大气的情况, 电离层数据将反映 90~180km 范围的情况。COSMIC 设备具有专门为完成掩星测量而设计的前后两个方向的高增益天线, 结合指向上方的宽束天线, 以获得用于定轨的数据; 增强的无码技术使得即使在信号加密期间获得的信号质量也高于 GPS/MET 在解密期间获得的信号。

COSMIC 计划可获得的数据包括:

(1) 通过无线电掩星技术得到大气和电离层剖面。由 LEO 卫星上的 GPS 接收机测得的相位和多普勒频移量, 由精密定轨可得到精确的接收和发射的位置和速度值, 据此就可推导出大气折射角和地心到信号入射路径垂直距离的函数关系; 由以上关系可推导出垂直折射率剖面和正切点半径的函数关系。进一步由折射率转化为电离层中的电子密度和中性大气中的温度、压力、水汽等物理量。Eyre(1994)^[2] 阐述了 COSMIC 计划在中性大气数据处理中最大的贡献是可将折射率或偏折角直接同化到数值模型中, 这样就避免了大量的近似, 数值模拟已经显示这一做法使模型的温度、水蒸气和风场更接近实际情况。

(2) 由微电离层光度仪 (TIP) 的测光测量配合电离层 GPS 测量, 将提供沿着卫星轨道 F2 层顶部的电子密度水平梯度数据。

(3) 全球地面站均可接收到三波段信标仪 (TBB) 以 150400 和 1067MHz 频率发射的相位数据, 这些数据可被转化为电离层总电子含量 (TEC) 观测量, 可用于 2-D 电离层层析成像研究^[4], 也可结合其他电离层观测数据以及物理数据同化模型来计算全球 4-D 电子密度场。同时, COSMIC 数据也可用于监测电离层摄动。

(4) COSMIC 的磁力仪可提供空间天气研究很有价值的的数据。

除了 GPS 掩星数据, 接收机还可以接收所有 GPS 卫星 0.1Hz 双频相位数据。GPS 相位观测和其他相关卫星的信息对建立大地测量和轨道参数估计模型很有意义, 可达到改善重力场模型和确定 GPS 轨道的目的。

6 ACE 计划

ACE 计划 (Atmosphere Climate Experiment) 是由欧洲空间局组织的一项 GPS 气象学试验计划, 主要参与单位是丹麦气象研究所和芬兰气象研究所。该计划主要包括两部分: (1) 用 6 颗低轨小卫星星座的 GRAS 接收机, 跟踪 GPS 和 GLONASS 两个全球定位系统, 实施无线电掩星观测, 即利用无线电掩星技术监测大气参数; (2) 用 COALA 光谱仪, 采用临边探测技术探测天体紫外和可见光波段辐射吸收, 用于臭氧层的监测。两种仪器同时在轨运行, 观测资料可以互相补充, 例如, GRAS 的结果可直接用于 COALA 资料的处理, 而臭氧廓线图与温度廓线图的联合使用在臭氧消耗的研究中是十分有效的。

由于 ACE 计划是对 GPS 和 GLONASS 两个星座进行掩星观测, 所以每天可获得 6000 多次掩星。在 ACE 资料中, 水平分辨率大约为 300km, 这主要取决于接收机的位置和数量的多少; 由于 ACE 星座的最好覆盖出现在高纬地区, 这有利于解决该地区气候研究和监测。

GRAS 和 COALA 都不要求轨道与太阳同步, 实际上这种非太阳同步轨道是有其优点的,

能够在任何特定的地区进行不同次数的局域观测，这将改进该处的气候模式资料的质量。最终资料可通过同化处理归算成准连续图的形式。

该计划提供具有极高精度、密度和分辨率的观测资料，有效使用期为 5yr。该计划将在 2002 年第四季度发射第一颗卫星，第二颗卫星将在 2003 年第三季度升空。卫星星座将由 2 颗承载 GRAS 和 COALA 仪器的卫星和仅承载 GRAS 仪器的 4 颗卫星组成。

ACE 计划的实施可以直接改进地球系统模式的大气部分，了解掌握各种相关过程，使地球系统模式的得到延伸，获得相关资料。该计划将在以下几个方面做出贡献：(1) 将提供三维温度场，以满足改进气候敏感部分模拟的需要；(2) 观测周期和气候模拟方法都将与气候的季节和年际变化的模拟直接相关；由此将对局部和全球模式中的大气部分做出改进，以便处理和模拟 10~100yr 的变化过程；(3) 通过临边探测获得高分辨率臭氧垂直剖面，将帮助人们加深对大气臭氧层变化的认识和掌握；(4) 将对平流层下部和对流层上部臭氧进行准确的监测。将开发出温度分布的同步精确测量技术，从而增强对对流层顶附近动力学过程的认识。

ESA 的 GRAS 科学顾问团已经为 GRAS 气候监测应用制定了要求。其主要技术指标如表 4 所示。

表 4 ACE 计划的 GRAS 接收机观测参数要求^[4]

参数	温度	湿度
水平范围	全球	全球
水平抽样	$1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 至 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	$1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 至 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$
垂直范围	地表至 1hpa(0~50km)	地表至 300hpa(0~10km)
垂直分辨率(对流层)	0.5km	0.5km
垂直分辨率(平流层)	1.0km	
时间尺度	> 10yr	10yr
时间分辨率	1~10yr	1~10yr
绝对精度(对流层)	< 0.1K	< 2%
绝对精度(平流层)	< 0.1K	
每个格点域的随机廓线数	> 100(每 3 个月)	> 100(每 3 个月)
精度(对流层)	< 1K	< 10%
精度(平流层)	< 1K	
及时性	6 个月	6 个月

来自 GRAS 和 COALA 的资料，即 0 级产品。由 GRAS 可得到：伪距测量值、载波相位测量值、观测次数、GNSS 位置和速度、GNSS 健康状况数据、轨道参数；由 COALA 可得到：未衰减和已衰减的星光谱、星体传感器测量值、观测时间、飞行器位置和速度、星体确认。而上述 0 级产品经过分析加工可得到最后 3 级产品，包括：全球臭氧场图、全球臭氧趋势图、全球温度、气压、湿度场图以及全球趋势图。

为了进一步确立该计划的目标而需要进行的科学研究包括：为 COALA 研制算法；气候模式的深化研究；对大数据量的 GRAS 反演方法的改进；观测对象三维场的层析成像等。

7 小 结

综观已经实施的低轨卫星计划, GPS/MET 计划是该领域的开路先锋, 而 SAC-C 和 CHAMP 计划则代表了 GPS 掩星计划将来的发展方向, 后两个计划携带的 JPL 新一代掩星接收机是在研的 COSMIC 计划接收机的原型, 较以往计划增加的后向天线对未来多方向掩星天线的研究起到重要作用。在几年内, 这两项计划将是研究 GPS 掩星技术的支撑和平台。将来飞行器的发展方向应是: 飞行系统将更小, 并形成多个甚至上百个飞行器组成的星座。

下一代 GPS 掩星接收器应具有体积小、质量轻(几百克)、低功耗的特点, 它将能提供如下服务: 实时位置、速度和时钟; 实时姿态和姿态变化确定; 所有飞行器星上自主计算和控制; 所有星上数据存贮; 所有上传数据提取和命令解释; 所有跟踪数据符合厘米级精密定轨; 所有掩星和海洋反射实践的测量。

参 考 文 献

- 1 Bernhardt *et al.* Physics of Plasmas, 1998, 5: 2010
- 2 Eyre J. In: Tech. Memo.199, Eur. Cent. For Medium Range Weather Forecast, England: ECMRWF, 1994
- 3 Hajj G A, Romans L J. Radio Sci., 1998, 33: 175
- 4 DMI, <http://www.dmi.dk/f+u/tele/ACE.html>, 1999
- 5 Kursinski E R. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1997
- 6 Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I *et al.* Science, 1996, 271:1107
- 7 Kursinski E R, Hajj G A, Hardy K R *et al.* Geophys. Res. Letter, 1995, 22: 2365
- 8 Rocken C *et al.* Terrestrial Atmosphere and Oceanic Science, 2000, 11: 21
- 9 Rocken C *et al.* J. Geophys. Res., 1997, 102: 29849
- 10 Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C. Radio Sci., 1999, 34: 949
- 11 Ware R, Exner M, Feng D *et al.* Bull. Am. Meteor. Soc., 1996, 77: 19
- 12 Wickert J, *et al.* Geophys. Res. Letter, 2001, 28: 3263
- 13 Yunck T P, Liu C, Ware R. Terrestrial Atmosphere and Oceanic Science, 2000, 11: 1
- 14 Reigber Ch, <http://op.gfz-potsdam.de/champ/>, 2000

Recent Proceeding on GPS Based LEO Satellite Project

Zhang Dahai Guo Peng Zhang Guixia Yan Haojian Huang Cheng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

In this paper several international launched (GPS/MET, Orsted, Sunsat, SAC-C, CHAMP) and developing (COSMIC, ACE) low earth orbit (LEO) satellite program are reviewed. By summary, next generation GPS occultation receiver should be palm-sized, low quality (a few hundred grams), and low consuming, and it can provide real-time satellite physical parameter, onboard spacecraft computation and control, data communication and command interpretation; all tracking data can reach centimeter-level precise orbit determination; it can support the acquisition of all occultation and ocean reflection.

Key words GPS occultation—LEO satellite project—reciever