

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0565

# 基于 ORBCOMM 卫星机会信号的定位技术

秦红磊, 谭滋中, 丛丽\*, 赵超

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为摆脱对全球导航卫星系统(GNSS)的依赖,克服其有意或无意干扰情况下无法工作等问题,可采用机会信号(SOP)实现定位,低轨卫星机会信号具备信号功率高、覆盖性广及无需增建基础设施等优点。提出了利用轨道通信卫星(ORBCOMM)系统实现天基机会信号定位。通过对ORBCOMM卫星机会信号的通信体制进行深入研究,实现了利用ORBCOMM卫星机会信号获取多普勒测量信息,建立了瞬时多普勒定位及其几何精度因子的数学模型,并采用卫星TLE数据结合轨道预测模型获得的卫星轨道信息实现ORBCOMM卫星机会信号定位。实测结果表明:利用ORBCOMM卫星机会信号可实现精度优于140 m的定位。研究成果对基于天基机会信号定位技术的理论研究及应用具有重要意义。

**关键词:** 机会信号(SOP); 低轨卫星; 轨道通信卫星(ORBCOMM)系统; 几何精度因子; 瞬时多普勒定位

中图分类号: P228.1; TN967.1

文献标志码: A 文章编号: 1001-5965(2020)11-1999-08

尽管全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)随着位置服务需求的日益增长得到了快速的发展,但其存在信号弱、容易受到干扰等缺点,越来越多的备用导航定位技术被提出,以摆脱对GNSS系统的依赖。利用广泛存在的无线电机机会信号导航(Opportunistic Navigation, OpNav)<sup>[1-2]</sup>及协作机会信号导航(Collaborative Opportunistic Navigation, COpNav)近年来得到了广泛的关注<sup>[3]</sup>。典型系统如美国提出的全源导航(All Source Positioning and Navigation, ASPN)技术,该技术提出利用一切可以利用的信号资源实现融合导航定位;类似的还有英国国防部研发的Navsop(Navigation via Signals of Opportunity)系统。

机会信号功率强、占用频谱宽、广泛存在,因此具有抗干扰能力强且投入低的优点<sup>[4]</sup>,而将低轨卫星无线电信号作为机会信号具有更广的覆盖范围。目前,成熟的典型低轨卫星系统有铱星

(IRIDIUM)、轨道通信卫星(ORBCOMM)和全球星(Globalstar)等<sup>[5-7]</sup>。Globalstar卫星系统和ORBCOMM卫星系统本身均具备位置信息服务,铱星公司2016年宣布在第二代卫星IRIDIUM NEXT系统中增加了定位服务,然而以上低轨卫星定位服务需授权才可使用。

国外计划未来建造大量低轨卫星系统,2015年OneWeb公司宣布在未来构建一个含有648颗卫星的低轨卫星系统<sup>[8]</sup>;同年SpaceX和Google宣布合作构建一个含有更多卫星的低轨卫星系统,共含有4000颗卫星<sup>[9]</sup>;三星公司也计划在未来建立含有4600颗低轨卫星的卫星系统<sup>[10]</sup>;Boeing公司也启动了构建低轨卫星系统计划<sup>[11]</sup>。国内也计划发射大量的低轨卫星,如鸿雁全球卫星星座、虹云工程计划。现有低轨卫星系统和未来计划发射的大量低轨卫星为基于低轨卫星机会信号的定位技术提供了基础。

收稿日期: 2019-11-02; 录用日期: 2019-12-20; 网络出版时间: 2020-01-20 14:58

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200120.1339.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200120.1339.002.html)

\* 通信作者. E-mail: [congli\\_bh@buaa.edu.cn](mailto:congli_bh@buaa.edu.cn)

引用格式: 秦红磊, 谭滋中, 丛丽, 等. 基于ORBCOMM卫星机会信号的定位技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 1999-2006. QIN H L, TAN Z Z, CONG L, et al. Positioning technology based on ORBCOMM signals of opportunity [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(11): 1999-2006 (in Chinese).

本文研究将低轨卫星作为机会信号源,在不需授权下即可利用低轨卫星实现定位。在前期研究中,利用铱星(IRIDIUM NEXT)机会信号实现了定位<sup>[12]</sup>。本文主要研究将另一种低轨卫星(ORBCOMM)信号作为机会信号实现定位。由于ORBCOMM卫星机会信号仅部分信息已知,重点分析信号体制并给出定位观测信息获取方法。提出利用瞬时多普勒定位方法实现定位,给出了详细的定位数学模型,对多普勒定位几何精度因子的物理意义进行了解释。通过搭建卫星信号采集平台,实现了实际卫星信号的定位。首先,对ORBCOMM卫星机会信号通信体制进行了深入分析,为定位信息观测的获取提供了基础。其次,介绍了基于ORBCOMM卫星机会信号的定位原理,给出了定位观测信息多普勒频率的估计方法,以及瞬时多普勒定位原理及数学模型,并阐述了多普勒定位几何精度因子的物理意义。最后,利用实际接收的ORBCOMM第二代卫星(OG2)信号实现了定位,验证了本文方法的有效性和正确性。

## 1 ORBCOMM 卫星轨道及信号体制

ORBCOMM卫星星座分布决定了接收机可见卫星数量,而定位观测信息提取方法与信号体制有关,本节主要分析ORBCOMM卫星星座结构和信号体制特性。

ORBCOMM卫星通信系统是能够实现数据全球通信的卫星系统<sup>[13]</sup>。ORBCOMM空间星座最初计划如图1所示。主星座4个轨道平面(A、B、C、D),每个平面均匀配置8颗星,轨道高度为825 km,倾角为45°;辅助星座2个轨道平面(G、F),每个平面配置2颗星,倾角分别为108°和70°;赤道面(E)曾设6颗高度为975 km的卫星<sup>[14]</sup>。ORBCOMM公司于2008年宣布部署第二代卫星(OG2)星座。目前,共12颗OG2卫星在轨运行,均匀分布在4个主轨道平面。OG2卫星轨道高度为620 km,轨道倾角为47°,轨道周期为97 min。本文采用OG2卫星实现接收机定位。

ORBCOMM卫星下行链路占用频带为137~138 MHz,共包括13个信道,频带分配如图2所示。12个带宽为25.0 kHz的信道用于与用户终端通信(采用FDMA多址连接),另外1个带宽为50.0 kHz的信道用于与关口站通信。所有ORBCOMM卫星共用12个用户链路下行信道,频率复用次数为4次<sup>[15]</sup>。本文主要采用卫星至用户下行链路信号实现定位。

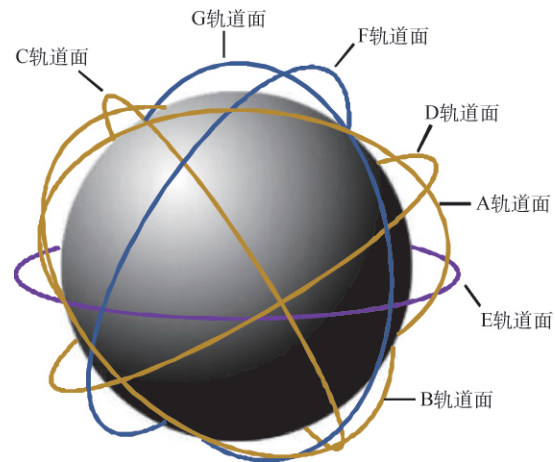


图1 ORBCOMM系统星座计划

Fig. 1 ORBCOMM system constellation plan

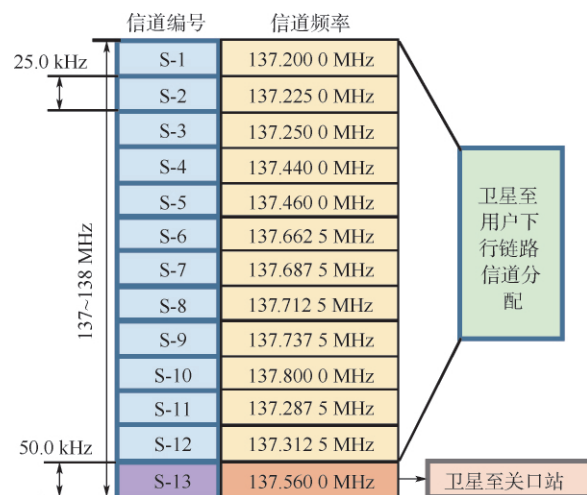


图2 ORBCOMM卫星下行链路频带分配

Fig. 2 ORBCOMM down link frequency band assignment

用户下行链路采用SDPSK(Symmetrical Differential Phase Shift Keying)调制方式,数据率为4800 bit/s。调制采用0数据状态和1数据状态分别引起相位负90°和正90°变化。

采集的实际信号显示每颗OG2卫星最多同时在2个信道内发射信号,所占信道频带在几天内保持不变。ORBCOMM卫星在用户下行链路内持续发射SDPSK调制的信号,为提取定位观测信息并最终实现接收机定位提供了基础。

## 2 ORBCOMM 定位方法

接收机定位需要观测信息、卫星轨道和定位解算。本文利用ORBCOMM OG2卫星的多普勒频率作为定位观测信息,采用公开的TLE数据及轨道预测模型<sup>[16]</sup>计算OG2卫星轨道,定位方法采用瞬时多普勒定位技术。本节主要给出了OG2卫星多普勒频率的估计方法,并介绍了瞬时多普

勒定位原理及数学模型。

### 2.1 ORBCOMM 卫星机会信号多普勒频率估计

OG2 卫星机会信号到达地面功率一般高于噪声,然而相比于直接通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理并根据频谱对称性或峰值谱线对应的频率获得多普勒频率粗测量的其他信号,SDPSK 调制的 OG2 信号无法通过其频谱直接获得多普勒测量值。另外,采用最大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)方法<sup>[17]</sup>进行多普勒精确测量时,根据多普勒粗测量值产生的本地载波与 OG2 信号进行相关时,相关峰会受到数据位的影响。综上,本文先对 OG2 卫星机会信号平方处理获得 2 倍频信号,再利用 FFT 和 MLE 方法估计多普勒频率。

SDPSK 调制信号表达式为

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(t - iT_s) \exp[j(\omega_c t + \varphi_i)] \quad (1)$$

式中:  $\omega_c$  为载波频率;  $T_s$  为符号时间;  $g(t)$  为脉冲函数;  $\varphi_i$  为第  $i$  位数据的调制相位。

令  $b_m$  表示基带数据信息,则  $\varphi_i$  满足以下条件:

$$\begin{cases} \varphi_i = \varphi_{i-1} + \frac{\pi}{2} \delta_m \\ \delta_m = \begin{cases} -1 & b_m = 0 \\ 1 & b_m = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

对式(1)进行平方处理得到

$$s^2(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(t - iT_s) \exp[j(\omega'_c t + \varphi'_i)] \quad (3)$$

式中:  $\omega'_c = 2\omega_c$ ;  $\varphi'_i = 2\varphi_i = 2\varphi_{i-1} + \pi\delta_m$ 。

可以看出,平方后的信号码元相位变化为  $\pm\pi$ ,是一种基带信号为 0/1 交替的特殊 BPSK 调制信号。基带信号不断重复 0/1 交替过程中,信号频谱分别在中心频率的左右两侧对称出现峰值谱线,其间距为码速率大小。令平方后的信号频谱中的 2 个峰值谱线对应频率分别为  $f_1$  和  $f_2$  且  $f_1 < f_2$ ,则原始信号中心频率  $f$  表达式为

$$f = \frac{f_1}{2} + \frac{f_2 - f_1}{4} \quad (4)$$

根据式(4)和信号标准频率可得到多普勒频率粗测量。在 FFT 分辨率带宽内采用最大似然估计方法<sup>[17]</sup>进行多普勒精确测量,最优估计函数为

$$I(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi fn) \right|^2 \quad (5)$$

式中:  $I(f)$  为最优估计函数;  $f$  为载波频率估计;  $x[n]$  为平方信号。

信号相位估计为

$$\tilde{\phi} = \arctan \left( \frac{-\sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sin(2\pi \tilde{f}_0 n)}{\sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cos(2\pi \tilde{f}_0 n)} \right) \quad (6)$$

式中:  $\tilde{f}_0$  为信号频率最优估计值。

### 2.2 ORBCOMM 卫星多普勒定位方法

接收机获得 ORBCOMM 卫星的多普勒频率测量后,可采用瞬时多普勒定位方法实现定位解算。本节主要介绍利用 ORBCOMM 卫星机会信号实现接收机定位解算的原理及数学模型。

接收机在某时刻接收到 ORBCOMM 卫星机会信号并测量出多普勒频率,其位置一定位于以 ORBCOMM 卫星为顶点的圆锥面上,且该圆锥面上所有点对应的多普勒频率均相等。当接收机同时得到多个多普勒频率时,通过多个等多普勒圆锥面的交点即可获得接收机位置<sup>[18]</sup>,此即为 ORBCOMM 卫星机会信号多普勒定位原理的几何解释。一般情况下,同时可见 ORBCOMM 卫星个数至多 2 颗,对于位置保持不变的静止接收机,可采用多历元定位方法<sup>[19]</sup>,即采用多个不同时刻的 ORBCOMM 卫星多普勒频率实现接收机定位解算。

下面给出 ORBCOMM 卫星多普勒定位的数学模型。静止接收机在某一时刻测量得到的卫星多普勒频率表达式为

$$\dot{\rho} = v \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_u}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_u\|} + f_u + \varepsilon_{\rho_k} \quad (7)$$

式中:  $\dot{\rho}$  为 ORBCOMM 卫星的多普勒频率,  $\mu/s$ ;  $\mathbf{r}_u$  为接收机位置向量;  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{v}$  分别为 ORBCOMM 卫星位置矢量和速度矢量;  $f_u$  为接收机钟偏;  $\varepsilon_{\rho_k}$  为多普勒频率误差。

接收机持续接收一段时间 ORBCOMM 卫星机会信号后,将获得多个不同卫星不同时刻的多普勒频率信息。令  $\dot{\rho} = [\dot{\rho}_1 \ \dot{\rho}_2 \ \dots \ \dot{\rho}_k]^T$  表示  $k$  个多普勒观测向量,  $\hat{\rho} = [\hat{\rho}_1 \ \hat{\rho}_2 \ \dots \ \hat{\rho}_k]^T$  表示  $k$  个多普勒频率估计量。令  $\mathbf{u} = [\mathbf{r}_u \ f_u]$  表示接收机真实状态量(位置矢量  $\mathbf{r}_u = [r_{u_x} \ r_{u_y} \ r_{u_z}]$  和钟偏  $f_u$ )  $\mathbf{u}_0 = [r_{u_0} \ f_{u_0}]$  表示接收机状态量先验信息。令  $\mathbf{d}(\mathbf{u})$  表示测量多普勒与估计多普勒的残差向量  $\mathbf{d}(\mathbf{u})$  在  $\mathbf{u}_0$  处进行线性化得到

$$\Delta \mathbf{u} = \left( \left[ \frac{\partial \mathbf{d}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right]^T \left[ \frac{\partial \mathbf{d}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right] \right)^{-1} \left[ \frac{\partial \mathbf{d}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right]^T \mathbf{d}(\mathbf{u}) \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_0} \quad (8)$$

式中:  $\Delta \mathbf{u} = [\Delta r_{u_0} \ \Delta f_{u_0}]^T$  为接收机先验信息  $\mathbf{u}_0$  与

接收机真实状态量的差;  $\frac{\partial d(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = \left[ \frac{\partial d_1}{\partial \mathbf{u}} \quad \frac{\partial d_2}{\partial \mathbf{u}} \quad \dots \right]$

$\frac{\partial d_k}{\partial \mathbf{u}} \Big]^T$  为  $k$  个多普勒残差对接收机状态的导数矩

阵,  $d_k$  为第  $k$  个多普勒残差, 因此有  $\frac{\partial d_k}{\partial \mathbf{u}} = \left[ \frac{\partial d_k}{\partial f_u} \right]$

。

根据多普勒残差表达式有

$$\frac{\partial d_k}{\partial f_u} = 1 \tag{9}$$

$$\frac{\partial d_k}{\partial \mathbf{r}_u} = \mathbf{v}_k \cdot (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_u) \frac{(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_u)^T}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_u\|^3} - \frac{\mathbf{v}_k}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_u\|} \mathbf{E}_{3 \times 3} \tag{10}$$

式中:  $\mathbf{r}_k$  和  $\mathbf{v}_k$  分别为第  $k$  个多普勒频率测量对应的 ORBCOMM 卫星的位置矢量和速度矢量;  $\mathbf{E}_{3 \times 3}$  为单位矩阵。

根据式 (8) ~ 式 (10) 得到 ORBCOMM 卫星多普勒定位线性导航状态更新方程为

$$d(\mathbf{u}_0) = \mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{11}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{u_0}) \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{u_0})^T}{\|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{u_0}\|^3} - \frac{\mathbf{v}_1}{\|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{u_0}\|} \mathbf{E}_{3 \times 3} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{v}_k \cdot (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{u_0}) \frac{(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{u_0})^T}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{u_0}\|^3} - \frac{\mathbf{v}_k}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{u_0}\|} \mathbf{E}_{3 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:  $\Delta\mathbf{u} = [\Delta\mathbf{r}_u \quad \Delta f_u]$  为接收机状态更新向量;  $\mathbf{G}$  为多普勒定位雅可比矩阵;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为测量和线性化误差向量。

利用牛顿迭代运算, 令  $\mathbf{u}_i$  和  $\Delta\mathbf{u}_i$  分别表示第  $i$  次接收机状态量估计和修正量, 则第  $i+1$  次迭代解算的接收机状态量估计  $\mathbf{u}_{i+1}$  的表达式为

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \Delta\mathbf{u}_i \tag{13}$$

ORBCOMM 卫星多普勒定位性能与卫星几何分布及轨道特性有关。令  $\mathbf{H} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{H}_{11}$ 、 $\mathbf{H}_{22}$ 、 $\mathbf{H}_{33}$  表示其对角线元素, 则多普勒定位几何精度因子  $\text{DOP}_D$  表达式为

$$\text{DOP}_D = \sqrt{\mathbf{H}_{11} + \mathbf{H}_{22} + \mathbf{H}_{33}} \tag{14}$$

多普勒频率测量等效为速度时,  $\text{DOP}_D$  的单位为 s, 物理意义代表接收机真实位置以 ORBCOMM 卫星多普勒测量误差的等效速度到达定位解算的位置所用的时间。

接收机持续获得 ORBCOMM 卫星多普勒频率测量并利用 TLE 数据及轨道预测模型获得卫星轨道后, 即可利用上述多普勒定位方法实现基于 ORBCOMM 卫星机会信号的接收机定位。

### 3 实验验证

#### 3.1 ORBCOMM 实际信号分析及多普勒频率估计

本节主要对实际采集的 ORBCOMM 卫星 (OG2) 机会信号进行时频域分析, 并估计信号多普勒频率。采集平台主要包括天线、射频前端和数据处理单元, 采集系统框图如图 3 所示。

图 4 给出了 OG2 卫星机会信号的实时频谱。此时仅有一颗 OG2 卫星划过接收机头顶, 该颗卫星同时在信道 11 和信道 9 发送信号, 分别对应图中 A 信号和 B 信号。2 个信道的标准频率分别为 137.2875 MHz 和 137.7375 MHz。在 137.5 MHz 频带附近的 C 信号为硬件采集平台射频前端引起的噪声信号。

图 5 给出了 OG2 卫星机会信号的三维瀑布图。可以看出, 在 9 min 内可持续接收到 OG2 卫星信道 9 和信道 11 的信号, 信号功率明显高于噪声。

上述给出了 OG2 卫星机会信号实时分析结果, 接下来将采集器中心频率设置为 138 MHz, 持

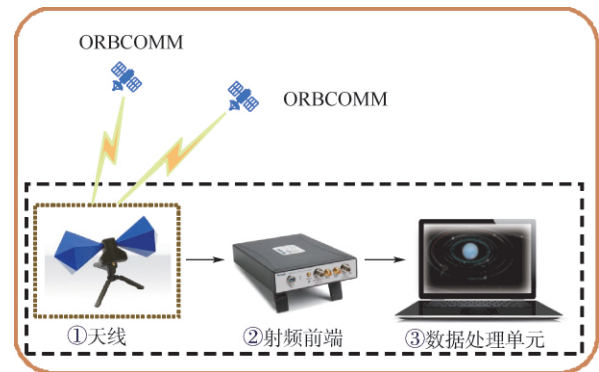


图 3 ORBCOMM 卫星机会信号采集系统框图

Fig. 3 Block diagram of ORBCOMM signals of opportunity collection system

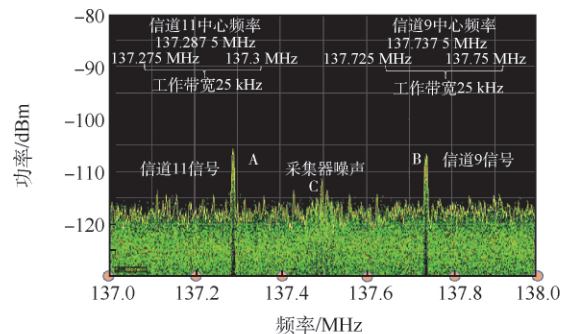


图 4 ORBCOMM 卫星用户链路信道 9 和信道 11 信号功率谱

Fig. 4 Signal power spectrum of ORBCOMM user links channel 9 and channel 11

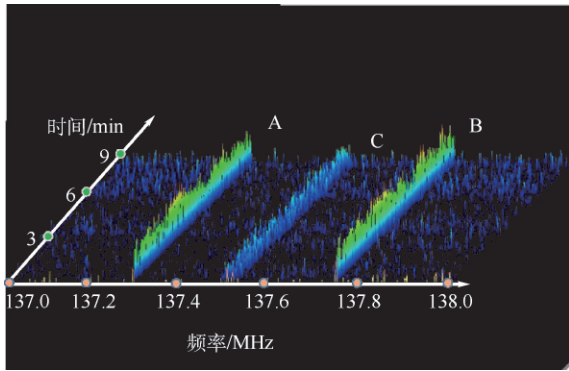


图 5 ORBCOMM 卫星用户链路信道 9 和信道 11 信号瀑布图

Fig. 5 Signal waterfall plot of ORBCOMM user links channel 9 and channel 11

续采集数据 5 min。OG2 卫星信道 9 和信道 11 信号频率经下变频变为 27.7375 MHz 和 27.2875 MHz。对采集的信号进行滤波处理得到相应信道信号数据,并估计信号多普勒频率。

取 100 ms 的 OG2 卫星信道 11 信号进行平方处理并进行 FFT 变换后,可以获得 2 个峰值谱线,如图 6 所示。2 个峰值谱线对应的频率  $f_1$  和  $f_2$  分别为 54 577 234.8 Hz 和 54 582 034.8 Hz 2 个谱线的距离为 4 800 Hz,其值等于 OG2 卫星机会信号的数据率。根据式(4)可以获得原始信号的中心频率粗略估计结果为 27 289 817.4 Hz,对应的多普勒频率粗测量值为 2 317.4 Hz。采用式(5)得到的信号中心频率精测量值为 27 289 816.1 Hz,则卫星信号数据的多普勒频率精测量值为 2 316.1 Hz。对 OG2 卫星信道 9 信号采用上述方法同样可以获得信号多普勒频率。

实验结果证明,OG2 卫星持续在用户下行链路发送信号,并且可采用本文方法估计信号多普勒频率。

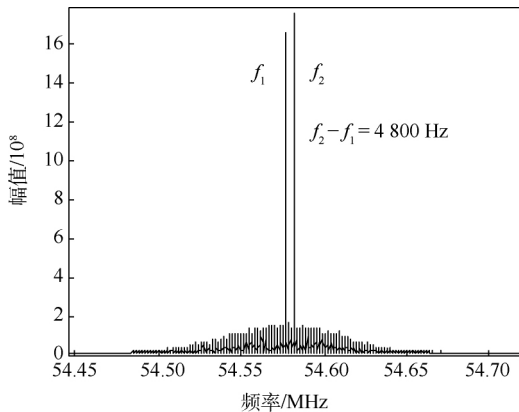


图 6 ORBCOMM 卫星信道 11 信号平方处理后的频谱  
Fig. 6 Spectrum of ORBCOMM channel 11 signal after square processing

### 3.2 ORBCOMM 多普勒频率定位

本节对 OG2 卫星机会信号进行长时间采集,测量卫星多普勒频率,并结合卫星 TLE 轨道信息实现接收机静态定位。

持续接收 OG2 卫星机会信号 48 min,期间接收机保持静止。将数据分为连续的多个 360 ms 数据块,采用匹配滤波器对每个数据块进行检测,当存在卫星机会信号时,估计信号中心频率和多普勒频率。图 7 给出此段时间内可见卫星的信号中心频率估计结果。

可以看出,48 min 内可见卫星共 3 颗:  $Sat_1$ 、 $Sat_2$  和  $Sat_3$ ,每颗卫星同时在 2 个信道内发射信号,共 6 个信号中心频率曲线,同一卫星不同信道信号的中心频率曲线形状大体相同。此段时间内任意时刻最多可见卫星 1 颗,  $Sat_1$  和  $Sat_3$  卫星下点轨迹距离接收机较近且属于同一轨道,在信道 9 和信道 11 发送信号,  $Sat_2$  卫星在信道 6 和信道 10 发送信号。

$Sat_1$  和  $Sat_3$  卫星的信道 11 信号及  $Sat_2$  卫星的信道 6 的信号多普勒曲线如图 8 所示。可以看到,ORBCOMM 卫星的多普勒范围在  $\pm 3$  kHz 之间。  $Sat_1$  和  $Sat_3$  卫星的信道 9 及  $Sat_2$  卫星的信道 10 的信号多普勒曲线与图 8 中对应卫星的多普勒曲线的形状大致相同。

本文利用卫星多个历元的多普勒频率实现定位,分为 2 颗卫星和 3 颗卫星定位 2 种情况。2 颗卫星定位时,观测信息采用  $Sat_1$  卫星信道 11 信号和  $Sat_2$  卫星信道 6 信号的多普勒频率。3 颗卫星定位时,增加了  $Sat_3$  卫星信道 11 信号的多普勒频率观测。

首先,将每颗卫星所有不同时刻的多普勒频率测量值均匀分组;其次,在每组中随机选取一个

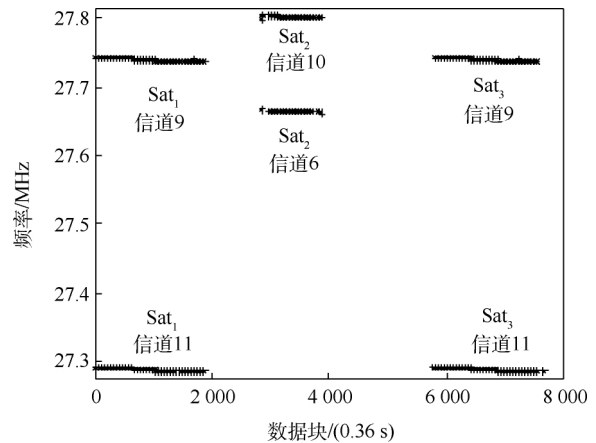


图 7 ORBCOMM 卫星机会信号中心频率曲线  
Fig. 7 Center frequency curves of ORBCOMM signals of opportunity

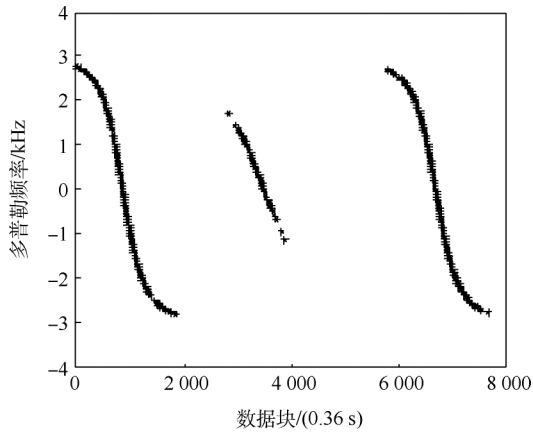


图8 ORBCOMM 卫星用户链路信道6和信道11信号多普勒曲线

Fig.8 Doppler curves of ORBCOMM user links channel 6 and channel 11 signal

测量值,不同卫星的共25个观测历元的多普勒频率组合成定位观测信息,并利用高程辅助<sup>[20]</sup>瞬时多普勒定位进行定位解算;最后,利用25个不同观测历元多普勒频率进行组合800次,分别进行定位解算并统计定位误差均值和RMS值。下面分别给出2颗卫星和3颗卫星情况下定位误差的统计结果和分析。

表1给出了高程辅助情况下的定位误差统计结果,此时高程辅助信息固定为高度真值。2颗卫星定位时,定位误差主要分布在北向,误差均值和RMS值均大于100m,在东向上误差具有较大的波动。当增加卫星个数时,东向误差均值和RMS值变化较小,但北向误差明显有所改善,由于增加了卫星,改善了卫星几何分布,使得东向和北向误差RMS值都在80m左右。

表2给出了无高程辅助和有高程辅助情况下的定位误差对比结果。可以看出,高程辅助可以有效改善定位精度,2颗卫星情况下,三维定位(3D定位)误差RMS值可以达到224m,水平定位(2D定位)误差RMS值可以达到174m,3颗卫星情况下,三维定位(3D定位)误差RMS值可以达到200m,水平定位(2D定位)误差RMS值可以达到120m。

表1 高程辅助多普勒定位误差统计结果

Table 1 Error statistic results of Doppler positioning with height aid

统计方法	东向误差/m	北向误差/m
均值(2颗卫星定位)	35	137
RMS(2颗卫星定位)	90	150
均值(3颗卫星定位)	36	68
RMS(3颗卫星定位)	84	86

表2 有无高程辅助情况下的定位误差结果对比  
Table 2 Comparison of error results of positioning with and without height aid

卫星个数	3D定位误差 RMS/m	2D定位误差 RMS/m
2颗	224	174
3颗	200	120

将高程辅助信息误差固定在40m范围内,重复上述定位实验。实验结果显示,此时高程辅助信息误差对2颗卫星和3颗卫星定位的水平定位精度的影响均不超过15m。综上所述,利用实际ORBCOMM卫星机会信号可以实现接收机定位,高程辅助误差在40m范围内时,接收机水平定位精度可以达到140m。

## 4 结束语

本文提出利用ORBCOMM卫星机会信号实现接收机定位,并利用实际信号进行实验验证。

对SDPSK调制的ORBCOMM卫星机会信号进行平方处理,并利用FFT和MLE方法有效测量多普勒频率。利用瞬时多普勒定位方法,并结合轨道预测模型计算的卫星轨道信息可以实现接收机定位。实验结果表明,在高程辅助情况下水平定位精度可以达到140m,验证了本文方法的正确性和有效性。为GNSS受到强干扰导致不能正常工作的环境下,提供一种有效的定位手段。

针对卫星机会信号定位技术,下一步主要研究联合采用ORBCOMM和IRIDIUM两种卫星机会信号实现接收机定位。

## 参考文献 (References)

- [1] PESYNA JR K M, KASSAS Z M, BHATTI J A, et al. Tightly-coupled opportunistic navigation for deep urban and indoor positioning[C]//2011 ION GNSS Conference 2011: 3605-3616.
- [2] YANG C, NGUYEN T. Self-calibrating position location using signals of opportunities[C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009) 2009: 1055-1063.
- [3] KASSAS Z M, HUMPHREYS T E. Observability analysis of collaborative opportunistic navigation with pseudorange measurements[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2014, 15(1): 260-273.
- [4] KHALIFE J, SHAMAEI K, KASSAS Z M. Navigation with cellular CDMA signals-Part I: Signal modeling and software-defined receiver design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing 2018, 66(8): 2191-2203.
- [5] PRATT S R, RAINES R A, FOSSA C E, et al. An operational and performance overview of the IRIDIUM low earth orbit satellite system[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 1999, 2(2): 2-10.

- [6] HARA T. ORBCOMM low earth orbit mobile satellite communication system [C]//Tactical Communications Conference. Piscataway: IEEE Press ,1994: 5050499.
- [7] SCHIFF L ,CHOCKALINGAM A. Signal design and system operation of Globalstar™ versus IS-95 CDMA-similarities and differences[J]. Wireless Networks 2000 6( 1) : 47-57.
- [8] DE SELDING P B. Virgin qualcomm invest in OneWeb satellite Internet venture [EB/OL]. ( 2015-01-20) [2019-11-01]. https: // www. space. com/28307-virgin-qualcomm-oneweb-satellites. html.
- [9] DE SELDING P B. SpaceX to build 4000 broadband satellites in seattle [EB/OL]. ( 2015-01-20) [2019-11-01]. https: // www. space. com/28305-spacex-satellite-internet-seattle. html.
- [10] KHAN F. Mobile Internet from the heavens [EB/OL]. ( 2015-08-09) [2019-11-01]. https: // arxiv. org/abs/1508. 02383.
- [11] DE SELDING P B. Boeing proposes big satellite constellations in V- and C-bands [EB/OL]. ( 2016-06-23) [2019-11-01]. https: // spacenews. com/boeing-proposes-big-satellite-constellations-in-v-and-c-bands/.
- [12] 秦红磊,谭滋中,丛丽,等. 基于铱星机会信号的定位技术[J]. 北京航空航天大学学报 2019 45( 9) : 1691-1699.  
QIN H L ,TAN Z Z ,CONG L ,et al. Positioning technology based on IRIDIUM signals of opportunity [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2019 45( 9) : 1691-1699( in Chinese) .
- [13] ILCEV S D. Orbcomm space segment for mobile satellite system ( MSS) [C]//2011 10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services ( TELSISKS) . Piscataway: IEEE Press 2011: 12527361.
- [14] 闵士权. 卫星通信系统工程设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社 2015: 352-361.  
MIN S Q. Satellite communication system engineering design and application[M]. Beijing: Electronics Industry Press 2015: 352-361( in Chinese) .
- [15] ORBCOMM LLC. ORBCOMM system overview: A80TD0008 Revision G [R]. Rochelle Park: ORBCOMM 2001.
- [16] BENNETT J , SANG J , SMITH C , et al. Improving low-earth orbit predictions using two-line element data with bias correction [C]//Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference 2012: 1-9.
- [17] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory [M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall Inc. ,1993: 193-197.
- [18] VAN DIGGELEN F. A-GPS: Assisted GPS ,GNSS ,and SBAS [M]. Boston: Artech House 2009: 261-264.
- [19] 张守信. GPS 卫星测量定位理论与应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社 ,1996: 86-87.  
ZHANG S X. Theory and application of GPS satellite measurement and positioning [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press ,1996: 86-87( in Chinese) .
- [20] 王萌,马利华,张丽荣,等. 区域定位系统中高程辅助三星定位算法 [J]. 上海交通大学学报 2012 46( 10) : 1647-1652.  
WANG M ,MA L H ,ZHANG L R , et al. Three-satellite positioning algorithm with altitude aiding for regional navigation satellite system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2012 , 46( 10) : 1647-1652( in Chinese) .

#### 作者简介:

秦红磊 男,教授,博士生导师。主要研究方向: 卫星导航定位、机会信号定位、相对导航、室内定位及组合导航等技术。

谭滋中 男,博士研究生。主要研究方向: GPS 卫星导航定位、低轨卫星定位、组合导航定位等技术。

丛丽 女,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向: 组合导航定位技术、机会信号定位及室内定位等技术。

## Positioning technology based on ORBCOMM signals of opportunity

QIN Honglei , TAN Zizhong , CONG Li\* , ZHAO Chao

( School of Electronic and Information Engineering , Beihang University , Beijing 100083 , China)

**Abstract:** In order to get rid of the dependence on Global Navigation Satellite System ( GNSS) and overcome the problem that it cannot work under the condition of intentional or unintentional interference , we can use Signals of Opportunity ( SOP) to realize positioning. Low earth orbit satellite SOP have advantages of strong signal power , wide coverage and no need for additional infrastructure. This paper proposes to use Orbit Communication satellite ( ORBCOMM) system to realize space-based SOP positioning. Through a further research on the communication system of ORBCOMM signals , Doppler measurement information is obtained by ORBCOMM frequency-doubling signals , and ORBCOMM signals of opportunity positioning method is realized by combining the satellite TLE data with orbit prediction model after establishing mathematical models of instantaneous Doppler positioning and geometric dilution of precision. The experimental results based on actual ORBCOMM signal show that the positioning accuracy can reach better than 140 m. The research of this paper is significant in theoretical research and practice application of positioning technology based on space-based SOP.

**Keywords:** Signals of Opportunity( SOP) ; low earth orbit satellite; Orbit Communication satellite ( ORBCOMM) system; geometric dilution of precision; instantaneous Doppler positioning

**Received:** 2019-11-02; **Accepted:** 2019-12-20; **Published online:** 2020-01-20 14:58

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200120.1339.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200120.1339.002.html)

\* **Corresponding author.** E-mail: [congli\\_bh@buaa.edu.cn](mailto:congli_bh@buaa.edu.cn)