

# 辅助北斗技术的捕获空间计算和误差分析

## Search Space Compute and Error Analysis of A-Beidou Acquisition Technology

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 01-0059-004

**摘要:** 结合辅助北斗定位技术的辅助信息类型,提出了北斗 GEO 和 N GEO 卫星在星历辅助条件下的卫星信号载波频率和码相位的估计方法,在此基础上重点研究了估计得到的载波频率和码相位的不确定度,并针对粗时间和精时间这两种典型的辅助定位技术进行了算例分析。研究表明:粗时和精时辅助能有效减少捕获搜索空间;引起载波频率搜索范围不确定度的因素是时钟频偏和接收机动态,而引起码相位搜索范围不确定度的因素是辅助时间精度和辅助位置误差。

**关键词:** 辅助定位技术;粗/精时间辅助;载波频率和码相位;捕获搜索范围

**Abstract:** With the help of assisted data of the A-BeiDou system, a method is proposed to estimate the shift of carrier frequency and pseudo-code phase of the Geostationary Earth Orbit (GEO) and Non-Geostationary Earth Orbit (NGEO) satellites. We analyze the uncertainty of the estimated value of carrier frequency and pseudo-code phase. Finally, two typical assistant positioning technologies—coarse time and fine time assisted positioning—are analyzed. Simulation shows that assisted data reduces the acquisition searching space; the clock bias and receiver dynamic are two important factors that cause the error of carrier frequency; and assist time precision and assist position error are two key factors that led to the error of code phase.

**Key words:** assisted positioning technology; coarse time and fine time assisted; carrier frequency and pseudo-code phase; search range capture

随着导航技术的发展以及实际应用对于弱信号快速定位的需求,辅助全球导航卫星系统(A-GNSS)<sup>[1-3]</sup>技术已经成为导航领域的研究热点。目前在其他国家,卫星定位系统(GPS)、GALILEO、GLONASS等导航系统均已进入第三代合作伙伴计划(3GPP)组织并形成相应的A-GNSS行业标准,而中国辅助北斗定位技术(A-Beidou)的标准化工作处

于起步阶段,亟需针对其特点对各项指标进行不断研究,推进其加入3GPP标准。

### 1 A-Beidou 捕获搜索空间的估计

卫星信号捕获是一个频率和码延迟的二维搜索过程,卫星和接收机在两者连线方向上的相对运动所引起的多普勒效应决定了接收机在载波频率一维空间搜索的范围,接收机接收到卫星信号的时刻决定了接收信号的伪码相位值,时刻的精度决定了接收机在伪码相位空间内搜索的

谢棋军/ XIE Qijun  
陈新/ CHEN Xin  
刘佩林/ LIU Peilin

(上海交通大学 电子工程系,上海 200240)  
(Department of Electronic Engineering,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai  
200240, China)

范围。

#### 1.1 载波频率的估计

利用辅助星历/历书、时间可以计算出卫星的位置和速度<sup>[4]</sup>,如果接收机的位置和速度也已知,则可以进一步计算出卫星和接收机连线方向的多普勒频偏,为捕获提供初始信息。北斗卫星包括地球同步轨道卫星(GEO)和非地球同步轨道卫星(NGEO),卫星的位置和速度需要分开计算。接收机接收到的北斗卫星信号的多普勒频移计算公式如下:

$$f_d = f \frac{\|\dot{\boldsymbol{v}}^{(s)} \cdot \boldsymbol{e}^{(s)}\|}{c} \quad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}^{(s)} = \dot{\boldsymbol{v}} - \dot{\boldsymbol{v}}_{rec} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{e}^{(s)} = \frac{(X_k^{(s)} Y_k^{(s)} Z_k^{(s)}) - (X_{rec} Y_{rec} Z_{rec})}{\|(X_k^{(s)} Y_k^{(s)} Z_k^{(s)}) - (X_{rec} Y_{rec} Z_{rec})\|} \quad (3)$$

其中,北斗 B11 载波频率  $f = 1561.098$  MHz,  $\dot{\boldsymbol{v}}^{(s)}$  为第  $s$  颗北斗卫星速度矢量与接收机速度矢量差,  $c$  为光速,  $\boldsymbol{e}^{(s)}$  为信号在发射时刻为  $t_k$  时接收机至卫星的单位观测矢量,  $(X_{rec}, Y_{rec}, Z_{rec})$  为  $t_k$  时刻接收机坐标,

收稿日期: 2015-11-02  
网络出版时间: 2015-12-29  
基金项目: 国家自然科学基金  
(61304225)

$(X_k^{(s)} Y_k^{(s)} Z_k^{(s)})$  为  $t_k$  时刻第  $s$  颗 N GEO 卫星在 CGCS 2000 坐标系下的坐标。

### 1.2 码相位的估计

北斗卫星信号的码相位由卫星传输时间所决定,第  $k$  颗卫星传输时间为:

$$TOT^k = SOW^k + \Delta T^k \quad (4)$$

$$\Delta T^k = N_{bit}^k + N_{ms}^k + N_{codephase}^k \quad (5)$$

其中,  $N_{bit}^k$  代表第  $k$  颗卫星在找到  $SOW^k$  之后导航比特的个数,  $N_{ms}^k$  代表第  $k$  颗北斗卫星传输完最后一个导航电文比特之后的整毫秒数,也称为扩频码周期数,  $N_{codephase}^k$  为第  $k$  颗北斗卫星的码相位。  $N_{bit}^k$ 、 $N_{ms}^k$  和  $N_{codephase}^k$  以时间为单位<sup>[5]</sup>。

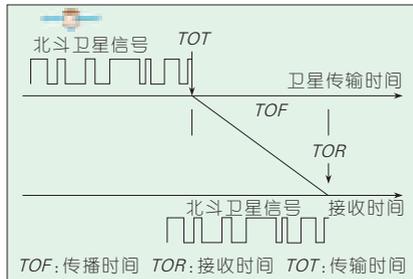
辅助北斗定位技术以接收时间作为辅助的时间信息,根据辅助的接收时间和接收机以及通过辅助星历/历书计算得到的卫星坐标,可以反推出北斗卫星传输时间,并可以计算得到码相位。如图 1 所示,北斗卫星的传输时间记为  $TOT$ ,接收时间为  $TOR$ ,卫星信号传播时间记为  $TOF$ ,则码相位  $N_{codephase}$  的计算方法为:

$$N_{codephase} = \text{mod}(TOT, 1 \text{ ms}) * V_{code} \quad (6)$$

$$TOT = TOR - TOF \quad (7)$$

$$TOF = \sqrt{(X_s - X_{rec})^2 + (Y_s - Y_{rec})^2 + (Z_s - Z_{rec})^2} / c \quad (8)$$

其中  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为由星历/历书估算的卫星位置,  $(X_{rec}, Y_{rec}, Z_{rec})$  为接收机参考位置,  $V_{code}$  为北斗码片速率,为 2.046 Mbit/s。需要人们注意的是:由于北斗信号一个扩频码周期为



▲ 图 1 北斗卫星传输时间和接收时间

1 ms,因此,当时间辅助信号精度高于 1 ms 才能对码相位进行估计。

## 2 A-Beidou 捕获搜索空间模糊度分析

### 2.1 频域搜索空间模糊度分析

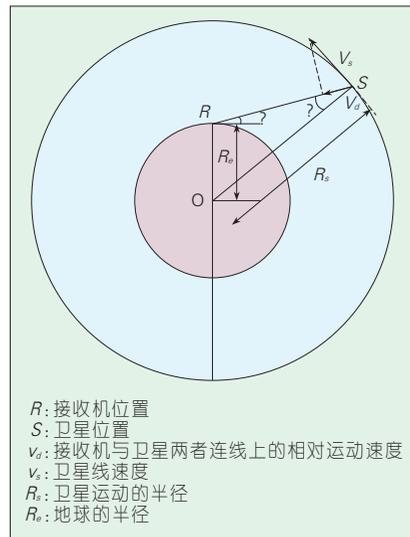
(1) 辅助时间精度对载波频率的影响

假设北斗导航系统(BDS)卫星轨道是一个圆,接收机在卫星轨道平面和地球表面相交的大圆上,将轨道平面放平,得到图 2。在图 2 中,S 为卫星位置,R 为接收机位置,O 为地球球心,  $v_s$  为卫星线速度,  $v_d$  为接收机与卫星两者连线上的相对运动速度。

如图 2,根据几何关系,有:

$$v_d = \frac{v_s R_e \cos \theta}{R_s} \quad (9)$$

其中,  $v_s$  表示在地心地固坐标系下的卫星运动速度,GEO 卫星速度认为是 0,IGSO 卫星速度为 1~3 km/s, MEO 卫星速度为 2~4 km/s;  $R_e$  表示地球的半径,这里假设取平均半径 6 371 km;  $\theta$  表示接收机和卫星之间的仰角,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间;  $R_s$  为卫星到地心的距离,GEO 和 IGSO 卫星轨道高度为 35 786 km,因此它们的  $R_s$  为 42 157 km, MEO 卫星轨道高度则可以达到 21 528 km,其  $R_s$  为 27 899 km。



▲ 图 2 卫星和接收机运动分析

当  $\theta = 90^\circ$  的时候,  $v_d$  最小为 0;当  $\theta = 0^\circ$  或  $180^\circ$  时,可以获得  $v_d$  的最大值。对于 IGSO 卫星,多普勒变化率的计算公式为:

$$\frac{df_d}{dt} = \frac{d(\frac{v_d}{c} f_{B1})}{dt} = \frac{dv_d}{dt} \cdot \frac{f_{B1}}{c} = \frac{dv_d}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{f_{B1}}{c} \quad (10)$$

因此,当  $\theta = 0^\circ$  或  $180^\circ$  时,  $\frac{df_d}{dt}$  取

0 Hz/s;  $\theta = 90^\circ$  时,  $\frac{df_d}{dt}$  取最大值(这里指绝对值),带入数值,计算便可得到北斗卫星的最大多普勒变化率为 0.896 Hz/s。因此,辅助时间造成的多普勒不确定度  $\Delta f$  为:

$$\Delta f = 0.896 \cdot \Delta t \quad (11)$$

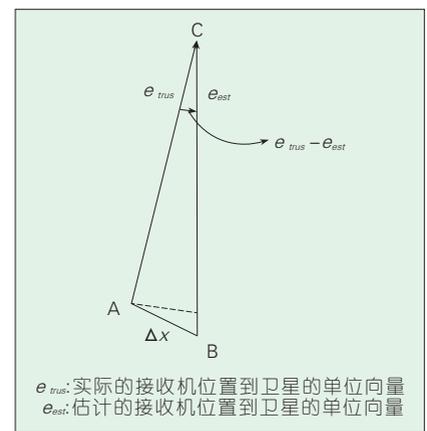
其中,  $\Delta t$  为辅助时间的精度。

(2) 接收机位置误差对载波频率的影响

辅助位置会对估算的多普勒值产生影响。如图 3 所示,A 为接收机的准确坐标,B 为接收机的估计坐标,C 为卫星的坐标,卫星多普勒等于速度向量点乘接收机和卫星连线方向上的单位向量,卫星的多普勒误差为:

$$\Delta f = B11/c \cdot (-v \cdot e_{est} + v \cdot e_{true}) \approx B11/c \cdot v \cdot (e_{true} - e_{est}) \quad (12)$$

该方程最后一个等式取约等于是由于  $e_{true}$ 、 $e_{est}$  与卫星速度之间的夹角稍有不同,这两个夹角由于卫星



▲ 图 3 辅助位置误差

到接收机的距离远大于接收机的误差距离,因此近似相等。当B和D重合并且卫星速度和位置误差向量方向垂直时,多普勒误差达到最大值:

$$\Delta f_{\max} = B1I/c \cdot v \cdot |\Delta x|/CD \quad (13)$$

根据北斗空间接口文件,对于 GEO 和 IGSO 卫星,  $CD$  取 36 786 km; 对于 MGEO 卫星,  $CD$  取 21 528 km。

(3) 接收机速度和钟差对载波频率的影响

假设接收机向着卫星以 km/h 的速度运动,速度引起多普勒偏移量为:

$$\Delta f = B1I \cdot v/c \quad (14)$$

而对于未知的振荡器频偏,可知每 N ppm 的时钟频偏产生的未知载波频偏:

$$\Delta f = N \cdot B1I \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

在式中(14)、(15)中,  $B1I$  为北斗  $B1I$  信号的标称载波频率,为 1 561.098 MHz,  $c$  为光速。

## 2.2 码相位搜索空间模糊度分析

(1) 辅助时间精度对码相位一些影响

由于北斗的一个扩频码的周期是 1 ms,因此,只有当时间精度高于 1 ms 才可以缩小码相位的搜索范围。

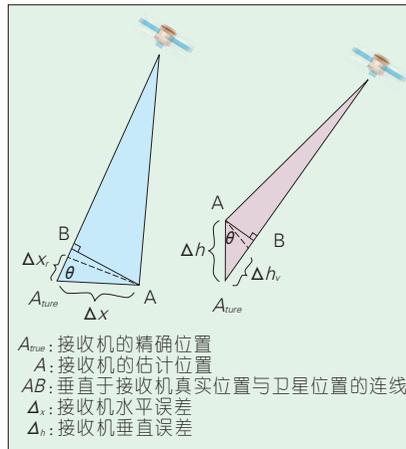
时间误差  $\Delta t$  造成的码相位误差  $\Delta code$  为:

$$\Delta code = \Delta t \cdot V_{code} \quad (16)$$

其中  $V_{code}$  为北斗扩频码速率,为 2.046 Mcps。

(2) 接收机位置误差对码相位的影响

在分析接收机位置误差对码相位的影响时,将接收机位置误差分解为垂直误差和水平误差,如图 4 所示,  $A_{true}$  为接收机的精确位置,  $A$  为接收机的估计位置,  $AB$  垂直于接收机真实位置与卫星位置的连线,  $\Delta x$  为接收机水平误差,  $\Delta h$  为接收机垂直误差,接收机水平和垂直误差造成



▲ 图 4 辅助位置水平和垂直误差

的距离误差为:

$$\Delta x_r = \cos(\theta) \cdot \Delta x \leq A_{true} B \quad (17)$$

$$\Delta h_v = \sin(\theta) \cdot \Delta h \leq A_{true} B \quad (18)$$

因此,接收机误差造成的总的距离误差  $\Delta L$  为:

$$\Delta L = \Delta x_r + \Delta h_v \leq \cos(\theta) \cdot \Delta x + \sin(\theta) \cdot \Delta h \quad (19)$$

造成的码相位误差  $\Delta code$  为:

$$\Delta code = \Delta L \cdot V_{code}/c \quad (20)$$

其中  $V_{code}$  为北斗扩频码速率,为 2.046 Mcps,  $c$  为光速。

(3) 大气层延迟对码相位的影响  
大气层延迟主要包括电离层延迟和对流层延迟两部分,其影响量级从几米到几十米,是全球卫星导航系统(GNSS)导航定位的主要误差源,恶劣情况下大气层延迟会对码相位产生多个码片的误差。

(a) 电离层延迟估计

北斗电离层模型的建立基于地理坐标系,利用刺穿点的地理经度与太阳地理经度的差值和刺穿点的地理纬度作为变量构造电离层模型。北斗提供了 Klobuchar8 参数电离层改正模型来估计电离层延迟,得到电离层延迟  $I_z(t)$ 。

(b) 对流层延迟估计

现有的估算修正对流层延迟的模型有很多种,主要有 Hopfield 模型、

Saastamoinen 模型等,我们采用精度较好的 Saastamoinen 模型估算对流层延迟,得到电离层延迟  $I_z(t)$ 。

(c) 大气层延迟所造成的码相位误差

根据(a)、(b)的分析,大气层延迟对码相位造成的误差为:

$$\Delta code = [\Delta S + I_z(t)] \cdot V_{code}/c \quad (21)$$

其中  $V_{code}$  为北斗扩频码速率,为 2.046 Mcps;  $c$  为光速;  $\Delta S$  和  $I_z(t)$  为估计的对流层和电离层造成的距离误差,当误差为 100 m 时,将导致将近一个码片的误差。

## 3 A-Beidou 捕获搜索空间计算和分析实例

本节将给出粗时和精时两种算例,分别估算北斗卫星的捕获空间,并对估算模糊度进行分析。

选择 N GEO 卫星 6,采用的辅助数据包括以下几个参数。

(1) 时间:2014 年 7 月 1 日上午 8 点整,时间精度粗时辅助为 2 s,精时辅助为 10  $\mu$ s。

(2) 星历:2014 年 7 月 1 日上午 8 点整的 1 号卫星和 6 号卫星的 16 参数星历。

(3) 接收机位置:地理坐标为北纬 121.4°、东经 31.2°、高度为 6 m,接收机位置水平误差为 5 km,接收机速度 80 km/h。

(4) 接收机晶振频偏:100 ppb。

在精时辅助下 6 号卫星的速度为 1 315.8 m/s,进一步求得载波频率估计值为 243.46 Hz,根据公式(6) — (8)求得码相位估计值为 1 108.84 码片。根据频率搜索空间模糊度分析公式(11)、(13) — (15)可以分别计算得到粗时辅助和精时辅助频率误差的结果,见表 1、表 2。根据公式(16)、(20)、(21)得到精时辅助的码相位误差结果,见表 3。

### 3.1 粗时间辅助搜索空间分析

根据计算结果我们可以知道:6

▼表1 北斗6号卫星的频率搜索各分量误差

辅助参数	造成的频率搜索误差/Hz	占搜索空间百分比/%
辅助时间 $\pm 2$ s	$\pm 1.792$	0.65
辅助位置 5 km	$\pm 1.589$	0.58
运动速度 80 km/h	$\pm 116$	42.11
晶振钟偏 100 ppb	$\pm 156.11$	56.67
频率搜索的总范围: $\pm 275.491$ Hz, 频率估计值: 243.36 Hz		

▼表2 北斗6号卫星的频率搜索各分量误差

辅助参数	造成的频率搜索误差/Hz	占搜索空间百分比/%
辅助时间 $\pm 10$ us	$\pm 0.00001$	0.00
辅助位置 5 km	$\pm 1.590$	0.58
运动速度 80 km/h	$\pm 116$	42.46
晶振钟偏 100 ppb	$\pm 156.11$	57.04
注: 频率搜索的总范围为 $\pm 273.7$ Hz, 频率估计值为 243.46 Hz		

▼表3 北斗6号卫星的码相位搜索各分量误差

辅助参数	造成的码相位误差/码片	占搜索空间百分比/%
辅助时间 $\pm 10$ us	$\pm 20.46$	37.36
辅助位置 5 km	$\pm 33.52$	61.21
电离层延迟	$\pm 0.17$	0.31
对流层延迟	$\pm 0.61$	1.11
注: 码相位搜索的总范围为 $\pm 54.76$ 码片, 码相位估计值为 1 108.84 码片		

号卫星总的辅助频率搜索范围为  $-275.491 \sim +275.491$  Hz, 同样的算例, 不采用相关辅助信息, 搜索范围将达到  $-5 \sim +5$  kHz, 大概是采用辅助信息时搜索范围的 18.18 倍。晶振的偏差引起的频偏占整个捕获频率搜索总空间的很大一个比例。

### 3.2 精时辅助搜索空间分析

根据计算可知: 6号卫星总辅助频率搜索范围为  $-273.70 \sim +273.70$  Hz, 同样的算例, 不采用精时辅助, 搜索空间将小于采用粗时辅助下的搜索空间, 也远远小于不采用辅助信息时  $-5 \sim +5$  kHz 的搜索空间, 但是优化的搜索空间较粗时辅助也就是减少了个位数的搜索 Hz 数。粗时间辅助对码相位搜索空间是没有变换的, 都是 2 046 个码片。从表 3 可以看出精时辅助可以大大缩小码相位的搜索空间。在本算例中 6 号卫星码相位搜索空间由不采用辅助信息的

2 046 个码片减少至  $-54.76 \sim 54.76$  码片, 大概会减少了将近 19 倍的搜索空间。

## 4 结束语

结合辅助北斗定位技术的辅助信号类型, 我们给出了北斗 GEO 和 N GEO 卫星在星历、粗/精时间和接收机位置辅助条件下的卫星信号载波频率和码相位的计算方法, 并在此基础上重点研究了计算得到的载波频率和码相位的不确定度, 最后针对粗时间和精时间这两种典型的辅助定位技术进行了算例分析。结果表明, 在粗时间和精时间辅助前提下, 北斗 GEO 卫星和 N GEO 卫星的载波频率搜索范围比没有辅助信息时的搜索范围减小了近 20 倍, 接收机时钟的频偏和接收机的动态是引起捕获过程中频率搜索不确定度的两个主要因素, 辅助位置精度对 N GEO 载波搜索空间较 GEO 载波搜索空间影响

大。在精时辅助前提下, 捕获搜索的码相位较其他方式减小了近 20 倍。并认为引起码相位不确定度的两个重要因素是辅助时间和辅助接收机位置的精度。

### 参考文献

- [1] 汉晓勇, 肖越. GPS 和 A-GPS 技术研讨[J]. 通信技术, 2011, 44(8): 76-78
- [2] 丁翔宇. GPS 卫星导航定位技术的新进展[J]. 全球定位系统, 2008, 33(3): 46-49
- [3] 严昆仑, 章红平, 张提升, 等. AGPS 系统原型设计与性能评估[C]//第四届中国卫星导航学术年会论文集-S5 卫星导航增强与完好性监测, 2013
- [4] 李显, 吴美平, 张开东, 等. 导航卫星速度和加速度的计算方法及精度分析[J]. 测绘学报, 2012, 41(6): 816-824
- [5] VAN D F, ABRAHAM C. Coarse-Time AGPS; Computing TOW From Pseudorange Measurements, and the Effect on HDOP[C]// in Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), 2001: 357-367

### 作者简介



谢棋军, 上海交通大学电子科学与技术硕士研究生; 主要研究方向为北斗导航和辅助型定位的 SOC 技术等; 发表论文 3 篇, 获得专利 1 项。



陈新, 上海交通大学北斗导航与位置服务上海市重点实验室助理研究员; 主要研究方向为导航高灵敏度高精度相关算法; 参与负责中国航天科技集团卫星应用技术研究创新基金、国家自然科学基金青年项目和 中国第二代卫星导航系统重大专项等专项项目; 近年来发表论文 7 篇, 获得专利 2 项。



刘佩林, 上海交通大学教授, 上海交通大学空间信息技术研究中心副主任; 主要研究方向为导航、通信及低功耗高性能 SoC 架构、导航与空间 SoC 技术发展方向等; 已发表篇论文 50 多篇, 获得专利 30 余项。