

参考站相对位置对 AGNSS 接收机卫星信号捕获的影响

李 罡, 常 江, 吕 晶, 李广侠

(解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室, 南京 210007)

摘 要: AGNSS(Assisted Global Navigation Satellite Service)接收机的性能受辅助信息准确程度的影响。由于参考站位置和终端的真实位置存在偏差,使得接收机获得的参考多普勒频移不准确,将增大弱信号条件下终端对卫星信号频率维搜索的范围。为分析参考站相对位置对 AGNSS 接收机卫星信号捕获的影响,推导了参考站相对位置偏差引起的多普勒频移分布以及最大频率搜索空间的表达式,并进行了数值仿真和分析,得到了一些有用的结论。

关键词: AGNSS; 弱信号; 捕获; 多普勒偏差

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2011)06-1288-04

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.06.013

Influence of Reference Station Position on Satellite Signal Acquisition for AGNSS Receiver

LI Gang, CHANG Jiang, LV Jing, LI Guang-xia

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The performance of the AGNSS(Assisted Global Navigation Satellite Service) receiver is affected by the accuracy of assisted information. The assisted Doppler obtained by the AGNSS receiver is not accurate due to the distance between the reference station and the receiver, which will enlarge the frequency search range in weak signal conditions. In order to evaluate the influence of reference station position on satellite signal acquisition, the formulas of Doppler error distribution and maximum frequency search range are derived to analyze the impact. Some useful results are given by numerical simulations and analysis.

Key words: AGNSS; Weak signal; Acquisition; Doppler error

0 引 言

AGNSS 技术是提高弱信号条件下定位性能的有效方法之一。AGNSS 技术在首次定位时间 TTFF(Time To First Fix)、灵敏度、抗干扰方面具有普通接收机无法比拟的优势。AGNSS 接收机的 TTFF 一般小于 5s,而普通接收机通常至少需要 30s 的时间^[1-4]。在信噪比较敏感的场所,如室内、干扰环境下,常采用相关累加的方法可减小捕获跟踪的门

限。一些学者对 AGNSS 接收机、HS(High Sensitivity)接收机和普通接收机的灵敏度进行了测试^[2-4],测试结果表明:捕获灵敏度,AGNSS 接收机比 HS 接收机强 13dB,比普通接收机强 20dB;跟踪灵敏度,AGNSS 接收机与 HS 接收机相当,比普通接收机强 15dB。在连续波、调幅信号和调频信号带内干扰的情况下,捕获灵敏度,AGNSS 接收机比 HS 接收机强 5~10dB,比普通接收机强 10~20dB;跟踪灵敏度相当。跟踪阶段比捕获阶段具有更强的抗干扰能力。

弱信号情况下,AGNSS 接收机冷启动对卫星信号进行捕获时,需从参考站获得参考多普勒、参考码相位和导航电文等信息。参考多普勒、参考码相位被用来缩小对卫星信号的二维搜索范围,导航电文被用来进行导航比特剥离,并进行长时间相干积分以提高接收信噪比。终端获得的多普勒频移偏差的大小,将影响终端对卫星信号多普勒频率搜索范围以及终端消耗的资源。文献[5]分析了辅助型接收机中载波频偏及不确定度的估计。文献[6]给出了辅助型接收机中多普勒频移的数值表达式。本文主要对参考站与终端的相对位置、距离的远近对 AGNSS 接收机获得的多普勒频移偏差的影响进行研究。

1 参考站位置偏差引起的多普勒偏差

参考位置,一般指参考站的位置,可用来对卫星的可见性进行判断,参考位置的偏差对卫星可见性判断的影响不很明显。参考多普勒频移是根据参考站与卫星之间的相对运动计算得到的,参考位置与终端位置的偏差越小,终端获得的多普勒越准确,从而可以减小弱信号捕获时频率搜索范围。下面将对参考位置与终端位置之间的偏差引起的多普勒偏差的影响进行分析。

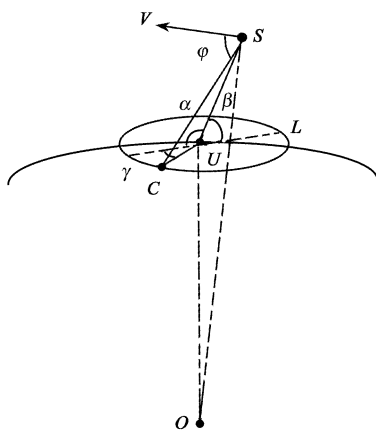


图 1 卫星、终端和参考站之间相对关系示意图
Fig.1 Diagram of satellite, user and reference station

1.1 卫星、终端和参考站相对关系模型

建立以用户为中心的坐标系,图 1 为卫星 S、终端 U 和参考站 C 之间相互关系示意图。其中 V 为卫星运动方向,O 为地心,L 为终端与卫星连线的矢量在水平面上的投影。 α 为终端到卫星视线矢量与终

端到参考站视线矢量的夹角。假设可见卫星的仰角为 β ,终端与参考站连线的矢量与终端与卫星连线的矢量在水平面上的投影的夹角为 γ ,以卫星运动方向为正。卫星运动方向与终端到卫星视线的夹角为 φ 。假设 θ 为卫星运动速度矢量与终端到参考站视线矢量的夹角。

1.2 位置偏差引起的多普勒频移的推导

设时刻 i , 卫星的位置向量和终端的位置向量分别为 $\mathbf{X}_{si} = [x_{si} \ y_{si} \ z_{si}]$, $\mathbf{X}_{ui} = [x_{ui} \ y_{ui} \ z_{ui}]$, 则卫星与终端的伪距为

$$\rho_i = ((x_{si} - x_{ui})^2 + (y_{si} - y_{ui})^2 + (z_{si} - z_{ui})^2)^{1/2} \quad (1)$$

多普勒频移 f_d 与导航信号载波标称波长 λ 、伪距变化率 $\dot{\rho}_i$ 的关系式为:

$$f_d = -\frac{\dot{\rho}_i}{\lambda} \quad (2)$$

对式(1)中的卫星位置矢量和终端位置矢量求导,可得:

$$f_d = -\frac{1}{\lambda\rho_i}(\mathbf{X}_{si} - \mathbf{X}_{ui})(\dot{\mathbf{X}}_{si} - \dot{\mathbf{X}}_{ui})^T \quad (3)$$

式中, $\dot{\mathbf{X}}_{si}$ 表示卫星的速度矢量, $\dot{\mathbf{X}}_{ui}$ 表示终端的速度矢量。

假设以 GPS 卫星为例, GPS 卫星的轨道高度 20200km, 轨道周期 11h58min, 平均线速度约为 3.8km/s。在弱信号条件下,如室内环境,终端一般动态很小,其速度的大小相对于卫星运动速度的大小可忽略不计。而在强干扰环境下,如战场环境等,当终端动态很大时,终端大都采用廉价的惯导来补偿终端运动引起的多普勒频移,延长相干积分时间长度,从而减小弱信号捕获的时间和提供稳健的信号跟踪。所以本文不考虑终端运动引起的多普勒频移。则多普勒的表达式为:

$$f_d = -\frac{1}{\lambda\rho_i}(\mathbf{X}_{si} - \mathbf{X}_{ui}) \dot{\mathbf{X}}_{si}^T \quad (4)$$

对多普勒表达式的终端位置矢量求偏导数,可得位置偏差对多普勒影响的大小:

$$\begin{aligned} \delta f_d &= \frac{1}{\lambda\rho_i}(\delta\mathbf{X}_{ui} \dot{\mathbf{X}}_{si}^T - (\mathbf{X}_{si} - \mathbf{X}_{ui}) \dot{\mathbf{X}}_{si}^T \cdot \\ &\quad \frac{1}{\rho_i}(\mathbf{X}_{si} - \mathbf{X}_{ui})\delta\mathbf{X}_{ui}^T) \\ &= \frac{v\Delta d_u}{\lambda\rho_i}(\cos\theta - \cos\varphi\cos\alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, v 为卫星运动速度大小, δX_{ui} 为终端位置向量相对于参考站位置向量的偏差, 其表达式为 $\delta X_{ui} = [\delta x_{ui} \ \delta y_{ui} \ \delta z_{ui}]$ 。终端相对于参考站的距离偏差为 $\Delta d_u = ((\delta x_{ui})^2 + (\delta y_{ui})^2 + (\delta z_{ui})^2)^{1/2}$ 。

通过空间几何知识可求得:

$$\cos\varphi = \frac{R}{R+h} \cos\beta \quad (6)$$

$$\cos\alpha = -\cos\gamma \cdot \cos\beta \quad (7)$$

$$\cos\theta = \frac{R}{R+h} \cos^2\beta \cos\gamma + \frac{\sqrt{R^2 \sin^2\beta + 2Rh + h^2}}{R+h} \sin\beta \cos\gamma \quad (8)$$

$$\rho_i = \sqrt{R^2 \sin^2\beta + 2Rh + h^2} - R \sin\beta \quad (9)$$

式中 R 为地球轨道半径, h 为导航卫星轨道高度。

所以有

$$\delta f_d = \frac{v\Delta d_u}{\lambda(R+h)} \left(\frac{2R\cos^2\beta}{\sqrt{R^2 \sin^2\beta + 2Rh + h^2}} + \sin\beta \right) \cos\gamma \quad (10)$$

1.3 位置偏差引起的最大频移搜索范围

当终端与参考站连线的矢量和终端与卫星连线的矢量在水平面上的投影重合时, 将引起最大的多普勒误差, 有

$$|\delta f_d| \leq \frac{v\Delta d_u}{\lambda(R+h)} \cdot \left| \frac{2R\cos^2\beta}{\sqrt{R^2 \sin^2\beta + 2Rh + h^2}} + \sin\beta \right| \quad (11)$$

频率搜索间隔可通过下式求得^[7]:

$$\Delta F = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{T} \quad (12)$$

式中, T 为积分时间长度。则最大频率搜索范围 S 为

$$\begin{aligned} S &= \pm \frac{1}{\Delta F} \max_{|\gamma| \leq \pi/2} |\delta f_d| \\ &= \pm \frac{3Tv\Delta d_u}{2\lambda(R+h)} \cdot \left| \frac{2R\cos^2\beta}{\sqrt{R^2 \sin^2\beta + 2Rh + h^2}} + \sin\beta \right| \quad (13) \end{aligned}$$

2 数值仿真及分析

地面终端大都位于无线通信网的蜂窝中, 通常宏蜂窝的半径为 1km ~ 25km, 微蜂窝的半径为 30 ~ 300m。假设这些基站具有参考站的功能。图 2、图 3 分别给出了终端位置与参考站位置偏差为 300m

和 25km 时的多普勒频移偏差分布。图 4 为终端位置与参考站位置偏差为 300m 和 25km 时最大多普勒偏差。可见在位置偏差为 300m 时, 最大多普勒偏差很小, 不超过 0.3Hz; 在位置偏差为 25km 时, 最大多普勒偏差不超过 20Hz。

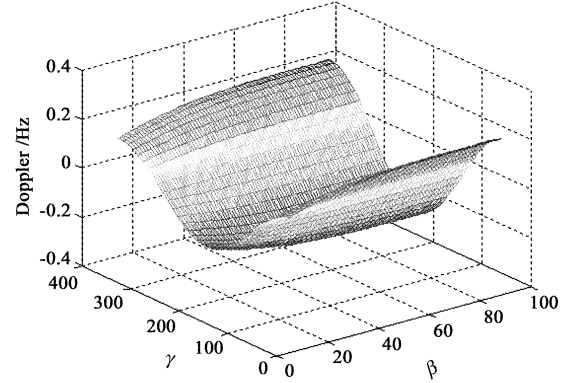


图 2 距离偏差为 300m 时的多普勒频移偏差分布

Fig. 2 Doppler error distribution with distance error 300m

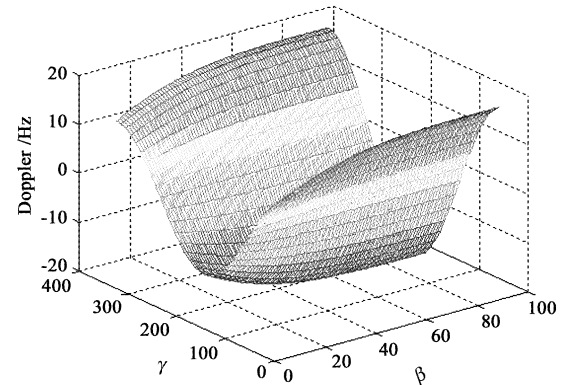


图 3 距离偏差为 25km 时的多普勒频移偏差分布

Fig. 3 Doppler error distribution with distance error 25km

弱信号条件下, 使用普通温补晶振的接收机通常能够进行 3s 的长时间相干积分^[8], 那么最大频率搜索间隔为 0.22Hz。当终端与参考站位置偏差为 300m 时, 终端通过辅助信息获得的最大多普勒偏差为 ± 0.23 Hz。终端只需要对卫星信号进行两次频率维的搜索可捕获卫星信号。当积分时间小于 3s 时, 终端与参考站位置偏差引起的多普勒偏差可忽略。

当终端与参考站位置偏差为 25km 时, 终端与参考站位置偏差引起的多普勒偏差最大约 ± 18.9 Hz。在没有辅助时, 终端对可见卫星的频率搜索最大范围可通过下式计算, 式(4)可重写为:

$$f_d = -\frac{d_s}{\lambda} \cos\zeta \quad (14)$$

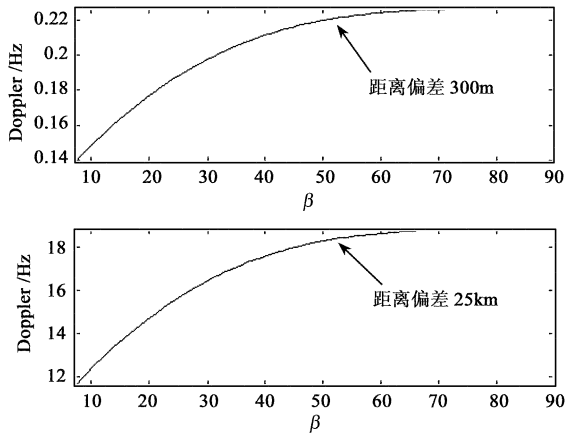


图 4 不同距离偏差时最大多普勒频移偏差

Fig. 4 Maximum doppler error with different distance error

式中 ζ 为卫星运动方向与终端到卫星视线的夹角, 卫星速度的大小为 $d_s = ((\dot{x}_s)^2 + (\dot{y}_s)^2 + (\dot{z}_s)^2)^{1/2}$ 。当卫星刚刚升起或落下时, 上式的模取最大值。可见仰角取为 7.5° 时, 最大值为 $\pm 4.9\text{kHz}$ 。

表 1 频率搜索空间比较

Table 1 Comparison of frequency search scopes

积分时间	0.02s	0.2s	0.6s	1s	3s
无辅助	± 259	$\pm 1.5\text{k}$	$\pm 4.4\text{k}$	$\pm 7.2\text{k}$	$\pm 22\text{k}$
有辅助	± 1	± 6	± 17	± 28	± 85

表 1 为积分时间分别为 0.02s, 0.2s, 0.6s, 1s 和 3s 时, 终端与参考站位置偏差为 25km 时, 无辅助和有辅助时的最大频率搜索空间。表中 k 表示 10^3 。

可见, 有辅助时频率搜索空间较无辅助时的搜索空间小了很多, 从而极大地缩短了首次捕获时间。

3 结 论

弱信号条件下, AGNSS 接收机在 TTFF、灵敏度和抗干扰方面具有明显的优势。本文推导了终端与参考站位置偏差引起的多普勒偏差的表达式, 并给出最大频率搜索范围的表达式。分别对参考站和终端位置偏差为 300m 和 25km 时, 频率偏差分布、最大多普勒和最大频率搜索范围进行了数值仿真。结果表明, 当参考站和终端位置偏差为 300m 时, 对小于 3s 的相干积分, 频率搜索范围的影响可以忽略。当参考站和终端位置偏差为 25km 时, 最大搜索空间为 ± 85 , 较无辅助时的搜索空间小了很多, 有效地缩短了首次定位时间。

参 考 文 献

- [1] Karunanayake M D, Cannon M E, Lachapelle G. Evaluation of assisted GPS in weak signal environments using a hardware simulator[C]. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, USA, September 21 - 24, 2004.
- [2] Kazemi P L, O' Driscoll C. Comparison of assisted and stand-alone methods for increasing coherent integration time for weak GPS signal tracking[C]. ION GNSS 21st International Technical Meeting of the Satellite Division, Savannah, USA, September 16 - 19, 2008.
- [3] Karunanayake M D, Cannon M E, Lachapelle G. Effect of kinematics and interference on assisted GPS[C]. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, San Diego, USA, January 24 - 26, 2005.
- [4] Singh S. Evaluation of assisted GPS performance using simulator and field tests [C]. ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, Fort Worth, USA, September 26 - 29, 2006.
- [5] 宋成, 王飞雪, 庄钊文. 辅助型 GPS 接收机中载波频偏及其不确定度估计算法研究[J]. 信号处理, 2009, 25(11):1694 - 1700. [Song Cheng, Wang Fei-xue, Zhuang Zhao-wen. An estimation algorithm for carrier frequency shift and its uncertainty in the assisted GPS receiver[J]. Signal Processing, 2009, 25(11):1694 - 1700.]
- [6] 阎啸天, 武穆清. 辅助定位卫星多普勒频移特性[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(2):66 - 70. [Yan Xiao-tian, Wu Mu-qing. On assisted GPS doppler characterization [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(2): 66 - 70.]
- [7] Kaplan E D, Hegarty C J. GPS 原理与应用(第二版)[M]. 寇艳红译. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [8] Uijt de Haag M, Kelly J M. Influence of oscillator variations on the observed frequency behavior in software-based navigation receivers[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(3): 390 - 392.

作者简介:李罡(1982 -),男,博士,主要从事卫星导航,星座卫星通信方面的研究。
通信地址:南京市白下区御道街标营 2 号(210007)
E-mail:lga855@sohu.com

(编辑:张宇平)