

文章编号: 1001 - 2486(2003)05 - 0048 - 04

卫星导航系统信号的多普勒特性分析*

许晓勇, 王飞雪, 庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:在卫星导航定位系统中,多普勒频率偏移是影响接收机性能的关键因素之一。通过对地面卫星信号覆盖区内的多普勒频率偏移及不确定性范围的计算,给出了卫星导航系统信号的多普勒频率偏移与接收机位置之间的关系。对多普勒不确定范围做了定量分析,提出了压缩多普勒不确定范围的方法。

关键词:多普勒;接收机;卫星定位;全球定位系统

中图分类号:TN967.1 **文献标识码:**A

The Analysis of Doppler Performance of the Satellite Navigation Signal

XU Xiao-yong, WANG Fei-xue, ZHUANG Zhao-wen

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the satellite navigation and positioning system, Doppler shift is one of the key problems that may degrade the performance of the satellite receiver. By calculating the Doppler shift and its uncertainty in the signal covering area, the relation between Doppler shift and the position of the receiver is obtained. Quantitative analysis of Doppler uncertainty range is derived. A method for compressing Doppler uncertainty is presented.

Key words: Doppler; receiver; satellite positioning; GPS

在 GPS 等卫星导航定位系统中^[1],卫星处于与地球赤道面有一个固定夹角的近圆轨道面上,对于地面上—固定点处的接收机而言,它们之间的径向运动总是存在的,从而产生了多普勒频率偏移。多普勒频率偏移是影响卫星导航定位接收机性能的关键因素之一,尤其影响伪码捕获速度和载波锁定速度。一般需对该多普勒偏移值进行估计并作补偿,补偿之后使多普勒不确定范围变小。多普勒偏移值的估计需要事先获知卫星的运动状态以及接收机的位置等信息。在卫星导航定位系统中,这些信息比较容易获得,它可由接收机中存储的星历信息以及先前的定位结果估计得到。只要距离上一次定位时间不长,在这期间接收机也没有较大移动,则由此估计得到的多普勒值一般是比较精确的。但是,如果卫星星历数据是过去几周内接收的,接收机位置误差在几十到几百千米,这时估计得到的多普勒值存在一定的误差,其误差范围就有不确定性。

在一般的应用中,由位置的不确定性而造成的多普勒不确定范围在整个频率不确定范围中不是主要因素,因此相关的研究很少,也缺乏定量分析。但是在一些特定场合,如接收机的本地频率稳定度很高,同时接收机静止或可对其运动作精确估计,此时前面提到的多普勒不确定范围可能成为影响信号捕获的瓶颈。因此有必要对卫星信号覆盖区内的多普勒值及其不确定范围特性进行研究。

1 多普勒频率偏移及不确定性的计算

本文感兴趣的是地面上卫星信号覆盖区内各点的多普勒分布特性,因此需首先确立覆盖区内各点的表示方法。虽然覆盖区内的点是三维空间中的点,但由于这些点被限制在球面上,因而只有两个自由度,故可建立三维坐标到二维坐标的一个映射。在建立这种映射关系之前,先做一些近似处理,我们假定

* 收稿日期: 2003 - 04 - 05

基金项目: 国家部委预研基金项目资助(106010303)

作者简介: 许晓勇(1977—),男,博士生。

导航系统的卫星轨道为圆形(一般卫星轨道的离心率都非常小),地球是一个正球体,数值计算表明这些近似并不影响所得结论的正确性。

卫星导航定位系统中常用的坐标系是地心地球固连(ECEF)坐标系^[2],根据卫星历书可获得当前卫星在该坐标系下的位置和速度表示式。在图1中,令卫星与地球中心连线在球面的交点为M(称为星下点)。对于覆盖区内的任意一点P,它到M点的球面距离记为 ρ ,弧线MP与卫星速度在当地水平面投影的球面夹角记为 ζ (从卫星方向看,角度按逆时针方向增大),则参数 (ρ, ζ) 可惟一表征覆盖内的任意一点。图中地球半径为 R_0 ,卫星轨道半径即卫星到地心的距离为 r ,卫星速度矢量 v 与矢量SP的夹角记为 φ 。

根据解析几何知识可计算得到方向余弦:

$$\cos \varphi = \frac{SP \cdot v}{|SP| \cdot |v|} = \frac{R_0 \sin(\rho/R_0) \cos \zeta}{\sqrt{r^2 - 2rR_0 \cos(\rho/R_0) + R_0^2}} \quad (1)$$

又根据古典的多普勒方程式,在覆盖区内各点的多普勒频率偏移值可近似表示成:

$$f_D = \frac{v \cos \varphi}{c} f_0 = \frac{R_0 \sin(\rho/R_0) \cos \zeta}{\sqrt{r^2 - 2rR_0 \cos(\rho/R_0) + R_0^2}} \cdot \frac{v}{c} f_0 \quad (2)$$

其中 f_D 是多普勒频率偏移; v 是卫星在ECEF坐标系下速度的幅值,这可从星历信息中获取轨道要素之后计算得到^[3]; c 是光速,为常值; f_0 是卫星信号载波频率,对于给定的系统,此值是已知的。

对于覆盖区内的任意一点 $P(\rho_0, \zeta_0)$,以定位误差 σ 为半径作一个圆,圆上各点以 P 为坐标原点时可用 (σ, θ) 来表征,这些点的多普勒值构成一个区间,该区间就是由接收机位置不确定性而引起的多普勒不确定范围。计算出该圆上任意一点 Q 在以星下点为原点的参数 (ρ, ζ) 表示式,然后代入式(2),可得:

$$f_Q = \frac{\sin \frac{\sigma}{R_0} \cos \frac{\rho_0}{R_0} \cos \theta \cos \zeta_0 + \cos \frac{\sigma}{R_0} \sin \frac{\rho_0}{R_0} \cos \zeta_0 - \sin \frac{\sigma}{R_0} \sin \theta \sin \zeta_0}{\sqrt{\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 + \frac{2r}{R_0} \left(\sin \frac{\sigma}{R_0} \sin \frac{\rho_0}{R_0} \cos \theta - \cos \frac{\sigma}{R_0} \cos \frac{\rho_0}{R_0} + 1\right)}} \cdot \frac{v}{c} \cdot f_0 \quad (3)$$

2 数值计算及分析

在GPS系统中^[1],对于L1波段信号, $f_0 = 1575.42\text{MHz}$,卫星在赤道上空时其速度为 $v = 3.186 \times 10^3 \text{m/s}$,假定接收机的位置估计误差为500km,则由式(2)、(3)可分别计算得到卫星信号覆盖区各点的多普勒值以

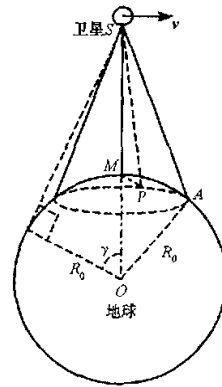


图1 卫星速度 v 和矢量 SP 的夹角关系

Fig.1 The relation between satellite velocity and vector SP

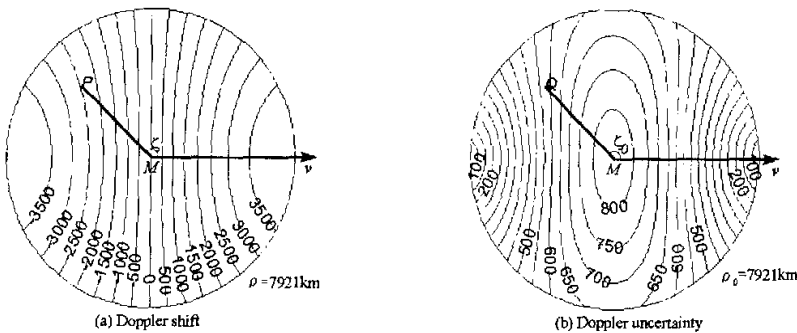


图2 信号覆盖区内的多普勒分布特性
Fig.2 Doppler performance in signal covering area

及多普勒不确定范围,其等值线分布分别如图2(a)和图2(b)所示。图2中圆内部分为卫星信号在地球上的覆盖区域,各点对卫星仰角均大于 5° ,极轴方向与卫星速度方向平行, M 点为卫星星下点,覆盖区内任意一点的映射关系由前一小节给出。图2(a)中等值线间隔为500Hz,图2(b)中等值线间隔为50Hz,从图2中可得到以下结论:

(1) 多普勒频率偏移关于卫星速度方向对称分布,与其垂直方向成反对称分布。因此中间的那条等值线为0,即这条线上的点没有多普勒效应,然后分别向左右两侧负的极值和正的极值变化,左右两极处的多普勒频率偏移达到最大。

(2) 在覆盖区中心,多普勒频率偏移最小,但不确定性最大;在左右两极,多普勒频率偏移值最大,但不确定性最小。由图2(a)知,星下点处的频率偏移为0,左右两极处其绝对值达到4000Hz;由图2(b)知,星下点的不确定性超过800Hz,而在左右两极则不到100Hz。因此,频率偏移在中心处绝对值较小但对位置比较敏感,而两侧虽然绝对值较大但对位置不太敏感。

前面的分析都是基于卫星在一个特殊位置得出的,当卫星在其轨道上运行时,其速度将发生变化,包括幅值大小和方向。由公式(2)、(3)知,多普勒频率偏移及不确定范围与速度成线性关系,因此多普勒及其不确定值乘一个缩放因子即可转换到任意卫星位置下的数值。

多普勒不确定性与接收机位置估计误差 σ 的关系比较复杂,但经数值计算表明,当 σ 小于800km时,其值与 σ 近似成线性关系。因此,对于50km的定位误差,多普勒不确定性将小于100Hz。

3 实例应用

在卫星导航定位系统中,信号采用了直接序列扩频码^[4]的形式。为了能够实现码同步,需要对码相位按照一定的步进作相关运算。此外,由于多普勒频移的存在,接收机还需要对频率进行搜索。这是一个二维搜索^[5],在无先验知识的情况下,其搜索过程可能极为耗时。压缩多普勒不确定范围将是加快搜索的有效手段,在接收机开始工作的选星阶段,总希望先对那些多普勒不确定范围较小的卫星信号进行捕获,缩短捕获时间。

以GPS系统为例,假定接收机位于东经 113° ,北纬 50° 的地面上,接收机的位置误差为500km。根据1993年7月1日零时的GPS卫星星座参数^[1],可计算得到该时刻卫星的星下点坐标以及运动状态^[3]。表1前半部分是卫星的运动状态数据,接收机对这些卫星的仰角都大于 5° 。卫星的星下点坐标用大地经纬度来表示,速度方位角定义为速度方向与正北方向的夹角,角度沿顺时针方向增大。根据球面三角的有关知识^[6],可计算得到接收机在每颗卫星下的 (ρ, ζ) 表示式,从而由公式(2)、(3)得出相应的多普勒频率偏移值以及多普勒不确定范围,这些数据列于表1的后半部分。

表1 卫星的运动状态及多普勒特性

Tab.1 Movement status and Doppler performance of satellites

卫星编号	星下点坐标	卫星速度 (km/s)	速度方位角	ρ (km)	ζ	多普勒频率 (Hz)	多普勒不确定性 (Hz)	卫星仰角
A4	东经 20.8° 北纬 33.1°	3.005	20.0°	7409	335.6°	3404	280.6	9.8°
A2	东经 163.0° 北纬 14.8°	3.147	172.2°	5949	210.0°	- 3144	429.2	23.9°
B1	东经 128.2° 北纬 54.0°	2.774	72.2°	1128	179.2°	- 805	695.9	76.7°
C1	西经 121.3° 北纬 49.5°	2.825	130.1°	7814	163.8°	- 3405	174.5	6.0°
C3	东经 101.7° 南纬 16.5°	3.138	8.4°	7490	0.6°	3910	101.6	9.0°
C2	东经 120.5° 北纬 9.6°	3.170	6.2°	4546	13.6°	3051	478.9	38.3°
D3	西经 164.3° 北纬 28.1°	3.052	15.4°	7158	60.5°	1857	573.2	12.1°
F3	东经 49.0° 北纬 52.2°	2.794	119.1°	4330	52.2°	1641	588.8	40.6°
F4	西经 84.1° 北纬 35.2°	2.985	157.7°	2858	111.9°	- 771	729.2	56.8°

分析表 1 数据可知,接收机接收到的 C3 卫星信号,虽然其多普勒值为 3910Hz,但不确定性却比较小,只有 101.6Hz,不到 F4 信号的 1/7。相应地,捕获 C3 卫星信号的时间也只是 F4 的 1/7。但是我们也需考虑卫星的可见性,C3 卫星的仰角为 9.0°,F4 卫星的仰角为 56.8°,因此 C3 卫星较 F4 容易被遮挡。但这并不表示多普勒不确定范围小对应的仰角就小,由表 1,C1 卫星其仰角比 C3 更小,不确定范围却比 C3 大。在实际应用中,需根据这些数据结合多方面因素综合考虑,从而合理选择卫星信号捕获的顺序。

4 小结

建立了信号覆盖区各点的二维参数描述,给出了其多普勒频率偏移及不确定范围的计算方法。分析表明,接收机和卫星之间的相对位置对信号的多普勒特性有着较强的影响,它将直接影响多普勒频率偏移值及其不确定范围的大小。最后,以 GPS 系统为例,说明了通过选择特定卫星对多普勒不确定范围进行压缩的方法。

参考文献:

- [1] Parkinson B W, Spilker J J. Global Positioning System: Theory and Applications Volume I [M]. Washington D. C.: American Institute of Astronautics and Aeronautics, 1996.
- [2] Kaplan E D. GPS 原理与应用 [M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [3] 任霞. 人造地球卫星轨道力学 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1988.
- [4] Ziemer R E, Peterson R L. Digital Communications and Spread Spectrum Systems [M]. New York: Macmillan, 1985
- [5] Crewal M S, Weill L R, Andrews A P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [6] 沈永欢,梁在中,等. 实用数学手册[M]. 北京:科学出版社, 2001.

