

利用 PPP 分析 GPS 天线积雪引起的信号传播延迟

吴继忠¹

(1 南京工业大学测绘学院,南京市中山北路 200 号,210009)

摘 要:分析了 GPS 天线积雪对载波信号场强、功率的影响,推导了载波信号传播延迟的简化计算公式,利用精密单点定位(PPP)计算了测站在 GPS 天线积雪产生和消除前后的单日解。结果显示,天线积雪使得天线相位中心产生偏移,对平面和高程方向的影响为数个 cm,甚至更大。
关键词:接收机天线;积雪;传播延迟;精密单点定位;测站环境误差
中图法分类号:P228.41

各类误差源的精确建模是 GPS 定位的基础,通常采用精确模型改正、参数估计或差分的方法来消除或削弱误差对参数估计的影响。测站环境的变化会引起传播介质电磁性质的改变,导致 GPS 信号强度、极化特性、传播方向的变化,从而引入定位误差。Solheim 的研究表明,空气中各种悬浮物如沙、土、火山灰等都会引起电磁波信号的传播延迟,GPS 信号在大雨中穿过 1 km 后, L_1 载波的延迟量为 15 mm,无电离层组合 L_3 的延迟量则达 20 mm^[1]。同一参考站在雨天和晴天的不同天气条件下,GPS 观测量的信噪比相差一倍,雨天的多路径效应幅值明显增大^[2]。大气中的降雪可引起相位观测值 2~14 cm 的测距误差^[3],降雪若在 GPS 接收机天线上形成积雪,也会引起信号的折射,从而改变信号的传播方向。Schleppe 研究了接收机被积雪覆盖情况下伪距定位的精度变化,结果表明,积雪能够明显地造成信号强度的衰减,并削弱伪距定位的精度^[4]。本文从理论上分析了 GPS 天线积雪对载波相位观测值的影响特点,并用精密单点定位(PPP)分析了其影响程度。

1 天线积雪对 GPS 载波相位观测值的影响

1.1 电磁波的反射和折射

为了防止地面反射的卫星信号进入天线产生

多路径误差,许多接收机采用了抑径板或抑径圈,因而增加了接收机天线的整体半径,若没有使用整流罩,则极易造成冰雪堆积,当天线表面有积雪后,会引起 GPS 载波信号的反射和折射。GPS 载波属于微波的 L 波段,能够较好地穿透积雪,但在雪中传播会引起信号的衰减,其衰减程度与雪中水的含量有关^[4]。

如图 1 所示,设电磁波由空气传播到积雪,在交界面上产生了反射和折射现象,就本文研究的问题而言,反射信号一般不会被接收机接收,在此不作考虑。设入射波和折射波分别用 E 和 E' 表示,入射角和折射角分别为 θ_1 和 θ_2 ,空气的相对介电常数和相对磁导率分别为 ϵ_1 、 μ_1 ,雪的相对介电常数和相对磁导率分别为 ϵ_2 、 μ_2 。相对介电常数决定介质表面的反射强度,其值越高,反射越强,反之则越弱。由于雪是空气、冰、水的混合物,其相对介电常数是三种成分相对介电常数的加权平均^[3]。对于相对磁导率,除铁磁质外,一般介质 $\mu \approx \mu_0$ 。

根据 Snell 折射定律^[5],并顾及 $\mu \approx \mu_0$,反射角、入射角和介质的相对介电常数满足如下关系:

$$\sin\theta_1/\sin\theta_2 = \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_1} = n_2/n_1 \quad (1)$$

式中, $n_i = \sqrt{\epsilon_i}$ 代表相对介电常数为 ϵ_i 的介质的折射率。由于 $\epsilon_2 > \epsilon_1$,故折射角 θ_2 总小于入射角 θ_1 ,即折射信号偏离了入射信号的传播方向。

1.2 天线积雪对信号场强及功率的影响

在电磁波研究中,通常将入射波分解为垂直于入射面的垂直极化波和平行于入射面的平行极化波。折射信号与入射信号的场强比用透射系数 T 来表示,折射信号与入射信号的功率比用透射功率百分比 τ 来表示。根据 Fresnel 公式^[6],垂直极化波的透射系数 T_{\perp} 和透射功率百分比 τ_{\perp} 以及平行极化波的透射系数 $T_{//}$ 和透射功率百分比 $\tau_{//}$ 可以根据折射定律计算出来。以干雪为例(介电常数为 2),当卫星高度角从 10° 变化为 90° 时,垂直极化波和平行极化波的透射系数和透射功率百分比的变化趋势如图 2 所示。可以看出,随着卫星高度角的增加, T_{\perp} 、 τ_{\perp} 和 $T_{//}$ 的值不断增加, $\tau_{//}$ 在高度角为 $10^{\circ}\sim 35.3^{\circ}$ 时逐渐增大,在高度角为 35.3° 时达到极大值,即发生全折射现象,此时对应的入射角称为布儒斯特角^[6],而在高度角 $35.3^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间, $\tau_{//}$ 逐渐减小,但其变化非常缓慢,远小于其他三个量的变化幅度,因此总体上可以认为信号在高度角较大的情况下衰减越小。

需要说明的是,以上计算的透射系数和透射功率百分比只是信号由空气到积雪这一过程中场强及功率的变化,若信号在积雪内部继续产生折射,信号还会继续衰减。

1.3 天线积雪引起的载波传播路径延迟

图 1 显示了 GPS 信号在传播过程中由空气到天线积雪表面产生的折射现象。此处假定天线表面为平面,所有折射信号都能够进行,并且不考虑积雪内部信号的折射和反射。由于空气和雪的折射率不同,信号的传播路径产生弯曲,图 1 中 O 为入射点, O 点处的积雪厚度为 d ,若没有积雪的影响,其传播路径为直线,即 $OA=l_1$,但积雪的存在使其实际的传播路径为 $OB=l_2$,则入射点 O 处的信号传播路径延迟量 Δd 为:

$$\Delta d = n_2 l_2 - n_1 l_1 = \frac{d}{\cos\theta_2} - \frac{d \cdot n_2}{\cos\theta_1} \tag{2}$$

顾及折射定律,并考虑到卫星高度角 $\alpha=90^{\circ}-\theta_1$, 综合得:

$$\Delta d = d \cdot \left(\frac{n_2}{\sqrt{n_2^2 - \cos^2\alpha}} - \frac{n_2}{\sin\alpha} \right) \tag{3}$$

由于雪的相对介电常数 $\epsilon_2>1$,故 $n_2^2>1$,因此 $\Delta d<0$,并与入射点的积雪厚度成正比,即积雪的存在使 GPS 载波信号的实际传播路径变短。图 3 显示的是 GPS 信号穿过干雪时 Δd 随高度角的变化曲线,当卫星截止高度角为 10° 时,积雪厚度为 2 cm, Δd 最大为 7 cm。若雪的含水量增加, n_2 会变大, Δd 也会不断增加。不难看出,卫星高

度角越大, Δd 越小,因此理论上在数据处理过程中,增大卫星截止高度角可以削弱积雪对观测值的影响。

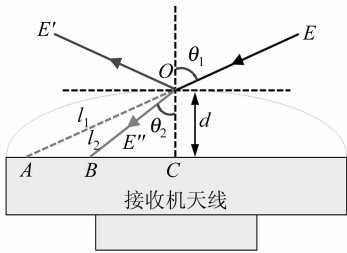


图 1 信号的反射和折射

Fig. 1 Reflection and Refraction of Signal

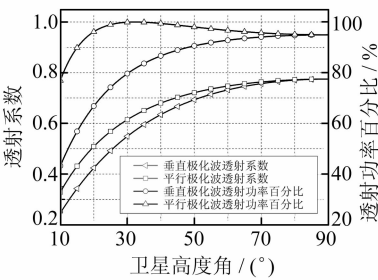


图 2 透射系数及透射功率百分比随高度角的变化

Fig. 2 Transmission Coefficient and Percentage of Transmitted Power Versus Elevation

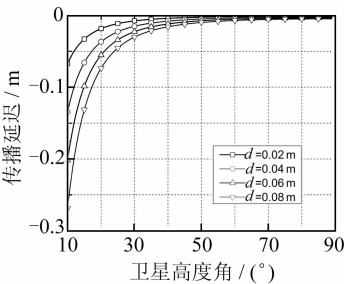


图 3 传播延迟与卫星高度角的变化曲线

Fig. 3 Propagation Delays Versus Elevation

2 实例分析

以 IGS 参考站 ZIMM 和 ZIM2 为例,两个站相距约 19 m,均采用 Trimble 扼径圈天线,整体天线半径约 19 cm,两个天线都没有使用整流罩。根据测站日志文件的记录,2009 年 11 月 30 日(DOY334)的暴雪使这两个站的天线完全被积雪所覆盖,积雪含水量比较高,并伴随不均匀的融化,这些积雪在 2009 年 12 月 2 日 15:30(UTC 时间)被全部清理干净。

PPP 技术不受基准站的约束,单日静态解可达 mm 级,是一种理想的位置监测手段^[7,8]。对

ZIMM 和 ZIM2 站 2009 年 DOY 331~340 连续 10 d 的观测数据作静态 PPP 解算,数据采样间隔为 30 s,采用 IGS 事后精密卫星轨道和钟差,EOP 固定为 IERS 结果,使用绝对天线相位中心改正 IGS05 模型,并估计钟差和对流层延迟。为了验证卫星高度角的作用,分别采用了截止高度角为 10°、15°和 20°三种方案。由于 PPP 结果是单日静态解,长时间的静态观测可以平滑掉多路径误差的影响,环境变化引起的多路径误差变化可忽略不计,静态解可以充分反映积雪对观测结果的影响。

图 4 和图 5 分别显示了 ZIM2 和 ZIMM 的坐标偏移量。由图 4 可以看出,ZIM2 站在 DOY 334~336 由于积雪的覆盖,E、N、U 3 个方向均出现不同程度的偏移,其中 E 方向最大达到了 6 cm,其次是 U 方向,达到了 3 cm。ZIMM 站出现明显坐标偏移的时间与 ZIM2 相同,均是在 DOY 334~336 之间,E 方向和 U 方向的最大偏移量均在 8 cm 左右,N 方向最大达到了 1.5 cm。在接收机天线无积雪覆盖的时间内,两个站平面和高

程方向的偏移量则很小,完全符合精密单点定位的精度水平,说明解算结果是稳定可靠的,由此可以判断引起测站坐标偏移的原因是由天线积雪产生的,并且其影响非常显著。

对比不同的截止高度角的方案结果可以看出,增加截止高度角并未完全削弱积雪对载波相位观测值的影响,其原因在于信号传播路径延迟量的计算是基于一种简化模型:① 认为所有的折射信号均能被接收机所接收,而实际上折射信号在一定入射条件下可能超出天线范围而不会被接收;② 没有考虑积雪内部的信号折射,积雪内部各处的相对介电常数不可能处处相同,因此积雪内部仍然有信号的折射现象。比较图 4 和图 5 可知,接收机天线积雪对高程方向的影响表现一致,即偏移量全部为正。在 PPP 解算中,卫星轨道和钟差全部固定,由前面的理论分析可知,积雪对载波相位观测值的影响是使信号的传播路径变短,因而使得天线相位中心往上偏移,从而导致高程方向的偏移量全部为正。

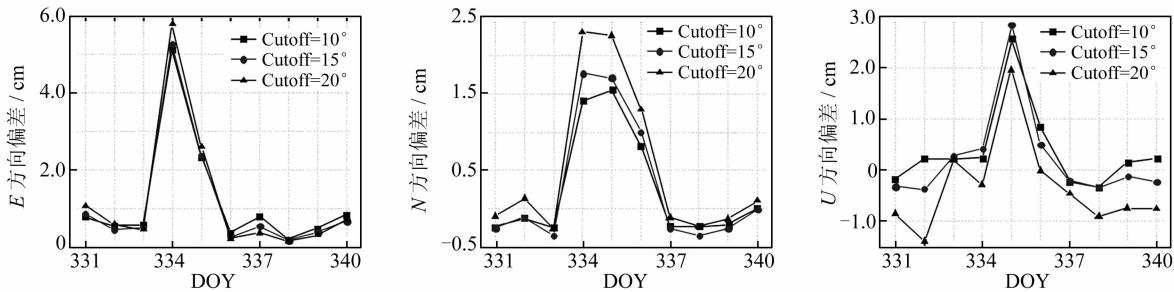


图 4 ZIM2 坐标偏移量
Fig. 4 Coordinates Displacement of Station ZIM2

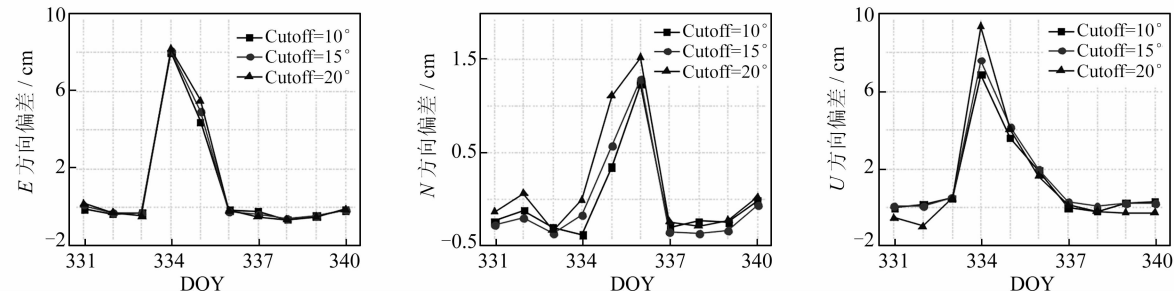


图 5 ZIMM 坐标偏移量
Fig. 5 Coordinates Displacement of Station ZIMM

3 结 语

本文首次分析了接收机天线积雪对 GPS 载波信号的影响,当接收机天线表面被积雪覆盖后,不仅引起电磁波信号场强和功率的衰减,而且造

成信号的折射,改变了载波信号的传播路线,引起传播延迟。尽管理论上卫星高度角越高,其影响越小,但实测数据的计算结果表明,增加卫星截止高度角后,定位偏差并没有减小,其原因是本文考虑的是比较理想的情况,即假定天线表面为平面和所有折射信号均能被接收,没有考虑信号在积

雪内部因含水量的差异而产生的折射和反射。接收机天线积雪的综合影响引起接收机天线相位中心的偏移,对 PPP 平面和高程方向的影响达数个 cm 甚至更大,因此在利用参考站进行卫星定轨或地壳运动分析时,应顾及到这类测站环境误差的影响,最好选择有天线整流罩的参考站或将受到这种影响的参考站予以剔除。

致谢:感谢德国地球科学研究中心葛茂荣博士的指导与帮助,以及 IGS 提供的数据。

参 考 文 献

[1] Solheim F, Vivekanandan J, Ware R, et al. Rock-en, Propagation Delays Induced in GPS Signals by Dry Air, Water Vapor, Hydrometeors and Other Particulates[J]. Journal of Geophysical Research, 1997,104(8):9 663-9 670

[2] 夏林元. GPS 观测值中的多路径效应理论及数值结果[D]. 武汉:武汉大学,2001

[3] Tranquilla J M, Al-Rizzo H M. Range Errors in

Global Positioning System During Ice Cloud and Snowfall Periods [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1994, 42(2):157-165

[4] Schleppe J B, Lachapelle G. Tracking Performance of a HSGPS Receiver Under Avalanche Deposited Snow[J]. GPS Solution,2008(12):13-21

[5] 王蕾,李国定,龚克. 电磁场理论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2001

[6] 钟顺时. 电磁场基础[M]. 北京:清华大学出版社,2006

[7] 张小红,鄂栋臣. 用 PPP 技术确定南极 Amery 冰架的三维运动速度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005,30(10):909-912

[8] 程世来,张小红. 基于 PPP 技术的 GPS 浮标海啸预警模拟研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007, 32(9):764-766

作者简介:吴继忠,讲师,博士,主要从事 GPS 精密定位的研究。
E-mail:jzwumail@163.com

Propagation Delay Induced by Antenna Snow Cover Using PPP Technology

WU Jizhong¹

(1 College of Geomatics Engineering, Nanjing University of Technology,200 North Zhongshan Road, Nanjing 210009,China)

Abstract: The purpose of this investigation is to illustrate the effects of receiver antenna snow accumulation on GPS phase observables. Firstly, the effects of snow cover on carrier phase signal field strength and power are analyzed. Then a simplified model is developed to estimate GPS phase propagation delay due to the complicated mixing ratio of snow and resultant complex refractivity. The theoretical analysis revealed that the magnitude of propagation delay, which can be significant in high-accuracy GPS applications, depends on satellite elevation, the water content of snow and snow depth. At last, the daily coordinates of two stations with ten continuous days of GPS observations are estimated using precise point positioning technology. The results indicate that antenna snow cover have an effect on the antenna phase center, and induce horizontal and vertical errors of several centimeters or even more.

Key words: receiver antenna; snow cover; propagation delay; precise point positioning; site environment error

About the author: WU Jizhong, lecturer, Ph.D, majors in GPS precise position.
E-mail: jzwumail@163.com