

# 利用信噪比削弱多路径误差的方法研究

吴雨航<sup>1</sup> 陈秀万<sup>1</sup> 吴才聪<sup>1</sup>

(1 北京大学遥感与地理信息系统研究所,北京市海淀区颐和园路 5 号,100871)

**摘 要:**多路径效应是卫星导航定位中重要的误差源,在分析多路径效应的产生原理以及多路径效应与信噪比相关性的基础上,提出了可利用信噪比削弱多路径效应的方法,并利用自测的 GPS 观测数据进行了验证。  
**关键词:**多路径效应;信噪比;基线  
**中图法分类号:**P228.41

目前,削弱多路径误差的方法主要有两种:硬件处理方法和后处理方法。硬件处理方法通过使用新型天线和改进的信号跟踪环来削弱多路径效应。后处理方法的主要思想是认为接收机接收的信号中包含多路径信息,从而利用卫星、反射物、天线环境、GPS 接收机所记录的各种信息来从原始观测数据中去除或减小多路径误差的影响。利用信噪比(signal noise ratio, SNR)削弱多路径效应的方法是后处理方法的一种,该方法是通过分析 GPS 信号的信噪比 SNR,利用频率特性来削弱多路径效应。由于信噪比与相位残差相比,对天线姿态有较小的敏感性,因此可以通过对每颗卫星接收信号的信噪比率进行分析,从而估计出多路径对信号的影响程度,并通过一定的方法从复合信号中分离出多路径的影响,得到“干净”的观测值,但目前该方法还不是很成熟。本文在分析多路径效应的产生原理以及多路径效应与信噪比相关性的基础上,对此进行了研究。

## 1 多路径效应及其与信噪比的关系

GPS 观测中接收到的信号是直接信号和反射信号的合成(图 1),其反射信号相对于直接信号而言,能量发生衰减,且相位发生延迟。设直接信号为  $S_d = V \cos \varphi$ ,反射信号为  $S_r = \alpha V \cos(\varphi + \theta)$ ,  $V$  和  $\varphi$  为直接信号的振幅和相位; $\alpha$  为反射系数( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),  $\alpha V$  为反射信号的振幅; $\theta$  为反射信号对直接信号的相移。则合成的接收信号为:

$$S = S_d + S_r = \beta V \cos(\beta + \varphi) \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  为由多路径干扰引起的载波相位误差。经简单推导可得:

$$\beta = (1 + 2\alpha \cos \theta + \alpha^2)^{1/2} \quad (2)$$
$$\varphi = \arctan[\sin \theta / (\alpha^{-1} + \cos \theta)] \quad (3)$$

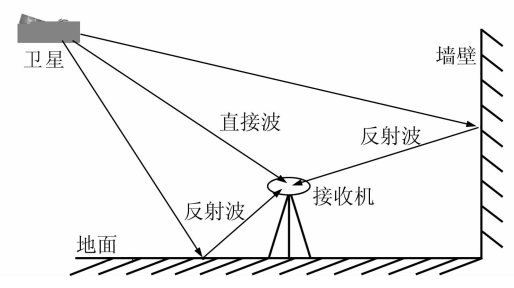


图 1 多路径效应示意图  
Fig. 1 Schematic Diagram of Multipath Effects

由于卫星、反射体和天线的几何变化,  $\theta$  随时间缓慢变化,因而导致载波相位多路径误差  $\varphi$  呈周期性变化。对于给定的  $\alpha$ , 对式(3)求极值, 当  $\theta = \pm \arccos(-\alpha)$  时,  $\varphi$  达到最大值:

$$\varphi_{\max} = \pm \arcsin \alpha \quad (4)$$

这样,多路径载波相位误差的振幅仅取决于反射信号的相对信号强度。当  $\alpha = 1$  时,得到最大误差为  $90^\circ$ , 或者  $1/4$  周,对  $L_1$  频率而言,相当于 4.8 cm 的距离误差。

SNR 是指接收的载波信号强度与噪声强度的比值(dBHz)。SNR 主要受天线增益参数、接收机中相关器的状态、多路径效应三个方面的影响<sup>[1]</sup>。当卫星信号发生多路径效应时,卫星信号

的质量降低,SNR 值也随之发生变化。

2 利用信噪比削弱多路径误差的原理

根据电磁波理论,接收机接收到的直接信号和反射信号的合成信号被接收机 PLL 环路跟踪,信号可表示为复数形式  $r=Ae^{j\varphi}$ ,  $A$  表示信号振幅; $\varphi$  表示信号相位; $j$  为复数单位<sup>[2]</sup>。则有:

$$\begin{aligned}\bar{r}_c &= A_c e^{j\varphi_c} = A_c e^{j(\varphi_d + \delta\varphi)} \\ \bar{r}_d &= A_d e^{j\varphi_d} = A_0 A_a e^{j\varphi_d} \\ \bar{r}_m &= \sum_{i=1}^m \alpha_i A_0 e^{j(\varphi_d + \psi_i)}\end{aligned}\tag{5}$$

式中,  $A_c$  为合成信号的振幅;  $A_d$  为直接信号的振幅,且  $A_d=A_0 A_a$ ,  $A_0$  为直接信号振幅中的固定部分,  $A_a$  称为标准化的天线增益,它是与天线增益、卫星高度角、方位角等有关的量;  $\varphi_c$  为合成信号的相位;  $\varphi_d$  为直接信号的相位;  $\delta\varphi$  为多路径效应引起的相位偏移;  $\psi_i$  为第  $i$  颗卫星多路径效应引起的相位偏移。由于卫星运动,  $A_a$  随时间变化,则有:

$$\bar{r}_c = \bar{r}_d + \bar{r}_m\tag{6}$$

代入式(5)得:

$$A_c e^{j(\varphi_d + \delta\varphi)} = (A_0 A_a + \sum_{i=1}^m \alpha_i A_0 e^{j\psi_i}) e^{j\varphi_d}$$

故有:

$$\bar{r}_c = A_c e^{j\delta\varphi} = A_0 A_a + \sum_{i=1}^m \alpha_i A_0 e^{j\psi_i}\tag{7}$$

根据欧拉方程,有:

$$\begin{aligned}A_c (\cos\delta\varphi + j\sin\delta\varphi) &= \\ A_0 A_a + \sum_i \alpha_i A_0 \cos\psi_i + j \sum_i \alpha_i A_0 \sin\psi_i\end{aligned}\tag{8}$$

式中,

$$A_c \cos\delta\varphi = A_0 A_a + \sum_i \alpha_i A_0 \cos\psi_i$$

$$A_c \sin\delta\varphi = \sum_i \alpha_i A_0 \sin\psi_i$$

$$A_c =$$

$$\sqrt{(A_0 A_a + \sum_i \alpha_i A_0 \cos\psi_i)^2 + (\sum_i \alpha_i A_0 \sin\psi_i)^2}$$

$$\tan\delta\varphi = \sum_i \alpha_i A_0 \sin\psi_i / [A_0 A_a + \sum_i \alpha_i A_0 \cos\psi_i]$$

一般地,对于多路径信号,  $\alpha_i$  均较小,则有<sup>[3]</sup>:

$$A_c \approx A_0 A_a [1 + \sum_i \alpha_i A_0 \cos\psi_i / (A_0 A_a)]$$

$$\delta\varphi \approx \sum_i \alpha_i A_0 \sin\psi_i / A_c\tag{9}$$

由此可知,多路径信号对合成信号的相位和振幅的影响与多路径信号的相移和振幅有关。如

图 2 所示,当多路径信号的相移  $\psi=0^\circ$  时,  $A_c$  取得最大值;当  $\psi=180^\circ$  时,  $A_c$  取得最小值;当  $\psi=90^\circ$  时,  $\delta\varphi$  取得最大值;当  $\psi=0^\circ$  或  $180^\circ$  时,  $\delta\varphi=0$ , 相位观测值没有多路径误差。

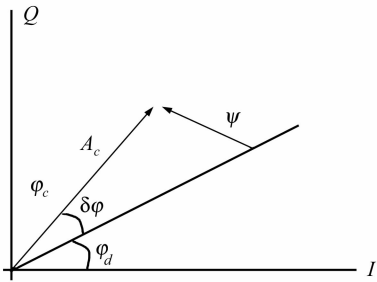


图 2 多路径效应影响图  
Fig. 2 Influence of Multipath Effects

利用信噪比改进多路径效应的方法是从接收机接收的信噪比中包含了载波相位多路径的影响出发,通过分离多路径信号成分和直接信号成分,得到多路径对直接信号的影响量来改正载波相位观测值,从而达到消除或减弱多路径效应的目的。

在 GPS 接收机中,跟踪环路除记录锁定的 GPS 卫星的载波相位观测量外,还同时记录了信噪比 SNR。当仅考虑信噪比在振幅上的大小时,可以用 SNR  $A$  来代替 SNR,表征信号的振幅率。SNR  $A_c$  表示合成信号的信噪比率,SNR  $A_d$  表示信号的信噪比率,SNR  $A_m$  表示多路径信号的信噪比率。则有:

$$\begin{aligned}\text{SNR } A &= A_c + \text{noise} \approx A_c = \text{SNR } A_c \\ \text{SNR } A_d &= A_0 A_a \\ \text{SNR } A_m &= \sum_i \alpha_i A_0 \cos\psi_i\end{aligned}\tag{10}$$

如果能从接收机输出的 SNR  $A$  中分离出 SNR  $A_d$  和 SNR  $A_m$ ,则可以从式(9)中计算出多路径对载波相位的影响  $\delta\varphi$ ,这样就可通过相位观测值的改正来得到基本上只包含直接信号的相位观测值,用此相位观测值计算的基线向量则不包含多路径效应的影响。为了从接收机记录的信噪比中分离出多路径成分,有必要对 GPS 接收的信息作一些合理的假设。

根据接收机的工作原理和多路径的特性,假设如下<sup>[4]</sup>:① 直接信号和反射信号(多径信号)在到达天线时,它们的振幅是固定不变的,也即忽略了大气折射对信号振幅的影响。② 天线增益图是连续平滑变化的空间直线,而且它对卫星的高度角和方位角的变化并不是特别敏感。③ 在一定时间内,多路径信号的频率可以看作是固定的,

也即多路径信号应保持足够的时间,以便能正确地区别它而加以改正。

根据以上假设,考虑到式(9)和式(10),则有:

$$\text{SNR } A \approx \text{SNR } A_c = A_c = A_0 A_\alpha +$$
$$\sum_i \alpha_i A_0 \cos \psi_i = \text{SNR } A_d + \text{SNR } A_m$$
$$\text{SNR } A_m = \text{SNR } A - \text{SNR } A_d$$

对于不同的天线,天线增益图均不同。由假设②可知,当历元间隔不是很大时,可以认为历元间的  $\text{SNR } A_d$  非常接近,则可在历元间求差来消除直接信号的信息,即  $\Delta \text{SNR } A_m = \Delta \text{SNR } A + v$ ,从中可解出各个历元中多路径的振幅  $\alpha_i A_0 \cos \psi_i$ 。由于各个多路径之间相互独立,因此,它们对合成信号的影响并不是简单的叠加,而是代数和,即  $\sum_i \alpha_i A_0 \cos \psi_i = \alpha_1 A_0 \cos \psi_1 \pm \alpha_2 A_0 \cos \psi_2 \pm \dots$ 。

在解出多路径信号的振幅后,可由式(9)求解出各个历元由多路径引起的相位偏差  $\delta \varphi$ ,并在相位观测量中加以改正,得到完全“干净”的观测量,再求解 GPS 基线。

3 实验分析

3.1 实验设计

实验中,采用两台接收机同时观测。两台接收机相距较远,数据采样间隔为 15 s。第一台接收机放置在宽阔平坦的地方,周围均无遮挡。第二台接收机放置在湖的西岸,接收机距离湖面约 10 m。观测数据由接收机自动记录,观测时间为上午 8:30 至 10:30,共记录有效数据 2 h。数据处理采用 Matlab7.1、接收机自带的软件 GPSsolution 和 Convert 以及中海达的 GPS 数据处理软件等。数据下载采用自带的 GPSsolution 软件,并采用自带的 Convert 软件将原始观测值转换为 RINEX 数据格式。

3.2 实验与结果分析

首先利用第一台接收机接收的数据解算该接收机的精确位置,此处的位置解算采用取平均值法,并利用 Matlab7.1 对第二台接收机接收到的数据进行信噪比提取(如图 3 所示)。从图中不难发现,在第二台接收机测量的数据中,6 颗卫星的信噪比有明显的差异,其中第 26 号和 24 号卫星的信噪比值明显偏低,其信噪比值在 9:45 后多次低于 40 dB,甚至跌至 35 dB 以下。

观察图 4 可知,9 号、24 号和 26 号卫星运行在易发生多路径效应的接收机的东侧,但 9 号卫星的高度角较高,多路径效应发生的可能性小。

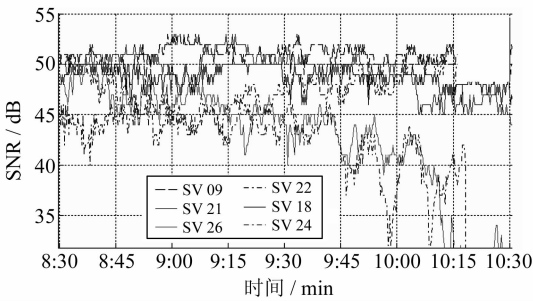


图 3 同时刻观测的 6 颗卫星的信噪比值  
Fig. 3 SNR Values of 6 Satellites

而 26 号和 24 号卫星的高度角逐渐变低,尤其在 9:45 左右,两颗卫星的高度角低至容易发生多路径效应的程度。24 号卫星在 10:15 左右更低,以至天线无法接收其信号。对比图 3,此时,26 号和 24 号卫星的 SNR 值有较大的降低,而 22 号卫星的高度角逐渐变大,其信噪比值也从 8:30 左右的约 40 dB 升高至 10:30 的 50 dB 左右。

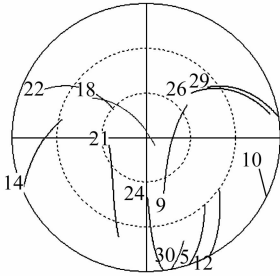


图 4 卫星轨迹天球图  
Fig. 4 Distribution of Satellites on the Celestial Sphere

以第一台接收机的解算位置为量算起点,第二台接收机为量算终点,利用中海达 GPS 数据处理软件进行基线残差解算,解算中,历元间隔为 15 s,电离层误差改正选择默认模型,对流层误差改正选择改进的 Hopfield 模型,其他选项默认,解算结果如图 5 所示。从图 5 不难发现,在 9:45 左右,24 号和 26 号卫星解算的基线残差有较大扰动。

利用前述基于信噪比削弱多路径误差的算法对第二台接收机接收的数据进行多路径误差改正,改正后的信噪比如图 6 所示。之后,再进行基线残差解算,解算结果如图 7 所示。

观察图 6 可发现,经多路径改正后,信噪比值有所提高。比较图 3 和图 6,尤其是图 6 中的黑色矩形框部分,不难发现,SV26 和 SV24 两颗卫星的信噪比值的提高较明显。在图 3 中的相应部分,信噪比值最低小于 30 dB,而改正后,信噪比值基本高于 35 dB。观察图 7 可发现,经多路径改正后,基线残差较收敛,但多路径校正的效果并不是很理想。

分析其原因,可能有:① 自测的数据质量较差; ② 算法可能不是最优的。另外,测量环境控制得不是很理想,实验观测时间较短,以及高度角较低时,接收信号较弱引起的信噪比降低等。

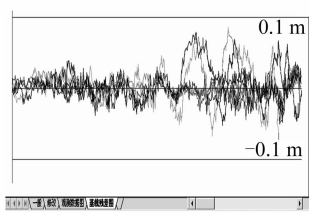


图 5 未经多路径校正的基线残差图  
Fig. 5 Baseline Residual Before Multipath Effects Correction

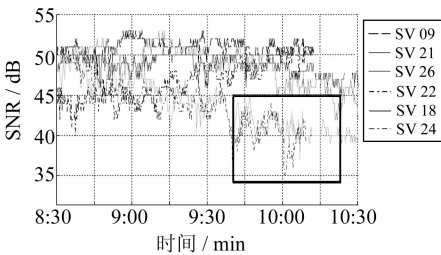


图 6 多路径校正后的信噪比值  
Fig. 6 SNR Value After Multipath Effects Correction

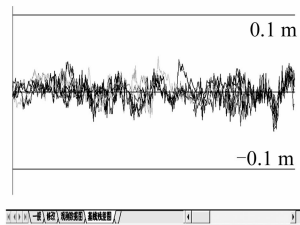


图 7 多路径校正后的基线残差图  
Fig. 7 Baseline Residual After Multipath Effects Correction

4 结 语

在实际应用中,利用多路径误差的周日重复性可以较容易地发现连续多天观测中多路径误差的存在。因此,利用多路径效应的周日重复性和其对周边观测环境的依赖性可判断出多路径效应在特定卫星、特定时间段上的存在。但由于多路径信号对天线环境相当敏感,且在实际中较难判断多路径的个数,因此在实际测量中,除采用各种多路径误差削弱方法外,还应该恰当地选择站址以及适当变化天线高度,从而较为有效地削弱多路径效应。此外,还可采用大偏心观测,避开强反射波;或在解算时,采用删除多路径效应严重的观

测时段或卫星的方法。

参 考 文 献

[1] 张波,黄劲松,苏林. 利用信噪比削弱 GPS 多路径效应的研究[J]. 测绘科学, 2003, 28(3) :32-35  
[2] 成伟. GPS 精密定位误差及其相位多路径误差分析研究[D]. 西安:长安大学, 2003  
[3] 杨天石. 多路径效应对 GPS 精密定位的影响及消除方法分析[J]. 勘察科学技术, 2006 (3): 53-56  
[4] 孙常建,杨晓超. GPS 多路径效应规律研究[J]. 测绘通报, 2006(11): 12-15

第一作者简介:吴雨航,博士生。研究方向为卫星导航应用、GNSS 信号处理。  
E-mail:wuyuhang23551@163.com

Mitigation of Multi-path Effect Using SNR Values

WU Yuhang<sup>1</sup> CHEN Xiuwan<sup>1</sup> WU Caicong<sup>1</sup>

(1 Institute of Remote Sensing & GIS, Peking University, 5 Summer Palace Road, Haidian District, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Because multipath is not spatially correlated, it can not be canceled with different techniques. The bias-like multipath remains the dominant error source for different measurements. According to the quality of each carrier phase measurement is contained in the signal-to-noise ration(SNR), a method using SNR values with GPS carrier phase observable in the presence of multipath is developed. And the experimental result is carried out.

**Key words:** multipath effects; SNR; baseline

About the first author: WU Yuhang, Ph.D candidate, majors in GNSS application, GNSS signal processing.  
E-mail: wuyuhang23551@163.com