

DOI: 10.7652/xjtuxb201702011

采用相关曲线偏差的导航卫星多径信号分离方法

袁赫良¹, 金天¹, 杨茜¹, 纪元法²

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 100191, 北京;
2. 广西精密导航技术与应用重点实验室, 541004, 广西桂林)

摘要: 为解决卫星导航信号中提取多径分量困难的问题,提出了一种利用相关曲线偏差(SCB)分离导航卫星多径信号的方法(MSCB)。首先建立包含多径分量的接收信号模型;然后分析 SCB 偏差与多径信号幅值、延迟与相位之间的关系,得到不同多径延迟条件下两种不同的 SCB 偏差形状;最后通过 SCB 拐点估计出多径信号参数。基于北斗和 GPS 导航卫星的实验结果表明:MSCB 方法能够有效地将来自地面与卫星自身的多径分量(或类似多径分量)特征参数提取出来,将多径分辨率从米级提高到分米甚至厘米级别,其估计标准差仅为传统多径估计延迟锁定环路算法的1/6左右,为未来多径信号的建模与分析提供了一种新的有效方法。

关键词: 卫星导航;多径信号;相关曲线偏差;北斗

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0065-07

A Separation Method for Navigation Satellite Multipath Signals Using Relative Curve Bias

YUAN Heliang¹, JIN Tian¹, YANG Qian¹, JI Yuanfa²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: A multipath S-curve bias (MSCB) method to isolate multipath signals based on S-curve bias (SCB) is proposed to solve the complexity of extracting the multipath component from the signals of navigation satellite. A model for received signals that contain multipath components is built. Then both the relationship between SCB and multipath amplitude and the relationship between phase and delay are analyzed. Two different SCB curves are obtained under different multipath delay conditions. The multipath parameters is finally estimated from the turning points of the SCB curves. Experimental results based on Beidou and GPS signals show that MSCB effectively extracts characteristic parameters of multipath component (or multipath like) from the ground or satellite itself, and the multipath resolution is improved from meter to decimeter or even centimeter level, and that the standard deviation of MSCB estimation is only one-sixth of that derived from the traditional multipath estimation delay locked loop algorithm. It is concluded that MSCB may provide a new approach to model and to analyze multipath signals in the future.

Keywords: satellite navigation; multipath signal; relative curve bias; Beidou

全球卫星导航系统在监测、定位、姿态控制^[1]等领域的广泛应用,使得用户对卫星导航系统的定位精度也提出了更高的要求。影响定位精度的系统误差(例如星历误差、卫星钟差等)与传播误差(例如电离层延迟误差、对流层延迟误差等)可以通过差分技术或建模得以消除,但由多径引起的误差则无法通过差分方法来消除。

针对卫星导航系统中的多径分量,传统的卫星导航基带抗多径算法可分为非参量式和参量式2种处理方法。非参量式多径抑制算法是基于对信号相关函数的先验信息^[2]抑制多径,代表性研究成果主要包括 van Dierendonck 等人提出的窄相关技术^[3],该算法计算复杂度低,结构简单,但估计精度较差。参量式多径抑制算法最早由 van Nee 等人提出^[4],这种算法是对多径的幅值、延迟、相位进行估计,从而分离和抑制多径信号对直射信号的影响,典型的有 MEDLL 算法^[5]、MMSES 算法^[6]等,但由于该算法采用的是多个不同相关器间隔的结果,对于 GPS 信号即使采用 0.1 个相关器间隔也只能达到 15 m 左右的分辨率,因此算法的分辨率较低,小延迟多径的效果不佳。与非参量式方法相比,参量式方法是对多径参数进行估计,所以可以达到更好的多径抑制效果但计算复杂度较高^[7]。另一方面,信号的分辨率会极大地影响多径参数的估计精度,如果能够从更高分辨率的角度对信号相关域的结果进行分析,就能够更清晰的看出多径信号对于导航信号的质量影响,提取出多径信息,有助于多径效应的抑制。从信号质量监测角度,常常采用相关曲线偏差(SCB)来系统地描述相关峰质量^[8]。因此,将 SCB 引入多径估计,能够有效的提升多径信号分离的效果。

本文提出利用相关曲线偏差处理高分辨率采集数据分离多径参数的方法,理论推导出多径信号码相位误差和相关间隔之间解析表达式,并进行了理论仿真、模拟数据仿真与实际信号验证。仿真实验表明,在不同多径信号的参数条件下,SCB 偏差呈现不同的形状。通过对 SCB 偏差的形状与特性分析,可以进一步估计出多径信号参数,为多径的建模与分析分析提供了一种新方法。

1 多径信号建模

多径是指接收机天线除了接收到来自卫星方向的直射信号外,还接收到了由于物体反射卫星信号而形成的反射信号,从而引起接收到的信号变形,产生测量误差。通常,多径信号具有滞后于直达信号

和弱于直达信号幅值的特性^[9]。无线通信中信道可以看作是大量径的叠加,其中每个径可以分解为发射天线阵列流型、接收天线阵列流型以及纯粹的多径信道信息^[10]这3部分的乘积。因此多径信道可表示为

$$H(\tau, t) = \sum_{p=1}^N \{ [\mathbf{C}_{R,p}(t) \mathbf{A}_p(t) \mathbf{C}_{T,p}^T(t)] \mathbf{G}'_B(\tau - \tau_p) \} \quad (1)$$

式中: τ 和 t 分别为信道时延和时间; τ_p 为第 p 条多径时延; N 为多径数; $\mathbf{C}_{R,p}(t)$ 为接收端包含2个极化方向的天线阵列导向矩阵; $\mathbf{C}_{T,p}^T(t)$ 为发射端包含2个极化方向的天线阵列导向矩阵的转置; $\mathbf{A}_p(t)$ 为第 p 条多径的极化复增益矩阵; $\mathbf{G}'_B(\tau - \tau_p)$ 是对应于每个天线单元的等效基带响应函数矩阵。为方便忽略导航电文。接收到直达与 N 个多径信号的复合信号^[11]可表示为

$$r(t) = \sum_{i=0}^N a_i c(t - \tau_i) \cos(2\pi(f + f_D)t + \phi_i) + n(t) \quad (2)$$

式中: $c(t)$ 为扩频码; a_i 、 τ_i 、 ϕ_i 为第 i 个信号的幅值、延迟和相位, $i=0$ 时为直达信号,其余为反射信号; f 、 f_D 分别为载波频率与多普勒频率; $n(t)$ 为噪声。通常,多径信号具有以下特征^[9]:

(1)由于传播路径比直射信号长,故多径信号总是晚于直射信号到达接收机,由此可得 $\tau_i > \tau_0$;

(2)由于反射过程中会有能量衰减,多径信号的功率总要低于直射信号,由此可得 $a_i < a_0$ 。

式(2)中的接收信号 $r(t)$ 经过载波解调后具有如下形式

$$s(t) = \sum_{i=0}^N a_i c(t - \tau_i) \cos(\phi_i - \hat{\phi}_0 - \phi_e) + n_c(t) \quad (3)$$

式中: $\hat{\phi}_0$ 是对直射信号的相位估计; ϕ_e 是相位的估计误差。在忽略环境噪声与相位估计误差的情况下,可以假设 $\phi_e = 0$, $n_c(t) = 0$ 。

载波解调后的信号 $s(t)$ 与早码和晚码分别相关,早码与晚码的相关结果 $R_E(\epsilon)$ 与 $R_L(\epsilon)$ 如下所示^[12]

$$\left. \begin{aligned} R_E(\epsilon) &= \sum_{i=0}^N a_i R(\epsilon + \Delta\tau_i - d/2) \cos(\phi_i - \hat{\phi}_0) \\ R_L(\epsilon) &= \sum_{i=0}^N a_i R(\epsilon + \Delta\tau_i + d/2) \cos(\phi_i - \hat{\phi}_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\epsilon = \tau_0 - \hat{\tau}_0$ 是码相位误差; $\hat{\tau}_0$ 是对直达信号的时延估计; $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_0$ 是第 i 条多径相对直达信号延迟; d 是早、晚码间的时间间隔(相关间隔)。假设

T_c 为扩频码 $c(t)$ 的码片宽度,可知相关间隔 $d \leq T_c$ 。

2 相关曲线偏差分析

相关曲线偏差(SCB)表示相关曲线左右两侧对称性与最高峰值的偏差。接收机是通过码跟踪环路的相关曲线获得码鉴别器结果与零数的偏差,从而进一步调整跟踪环路^[13]。SCB 偏差方法采用不同相关间隔获得对应的早码-晚码的鉴别器结果,分析相关峰偏离中心零点的位置。其相关间隔 d 、码相位误差 ϵ 与鉴别器结果 C_{SCB} ^[8] 可由下式定义

$$C_{SCB}(\epsilon, d) = |R_E(\epsilon)|^2 - |R_L(\epsilon)|^2 \tag{5}$$

锁定点位置 $\epsilon_{bias}(d)$ 的定义为

$$C_{SCB}(\epsilon_{bias}(d), d) = 0 \tag{6}$$

对于 BOC 调制方式或者相关峰畸变较强的情况,如果有多重锁定点的位置,需要选择距离最高相关峰最近的位置。

假设只存在一路多径信号($i=1$),根据公式(4)

$$\epsilon_{bias}(d) = \begin{cases} \frac{d}{2}A, & 0 < d \leq \frac{2\Delta\tau_1}{1+A}; \quad 0 < \Delta\tau_1 \leq \frac{1+A}{2}T_c \\ \frac{\Delta\tau_1 A}{1+A}, & \frac{2\Delta\tau_1}{1+A} < d \leq T_c; \quad 0 < \Delta\tau_1 \leq \frac{1+A}{2}T_c \\ \frac{d}{2}A, & 0 < d \leq \frac{2(T_c - \Delta\tau_1)}{1-A}; \quad \frac{1+A}{2}T_c < \Delta\tau_1 < T_c \\ \frac{A}{2-A}\left(\frac{d}{2} + T_c - \Delta\tau_1\right), & \frac{2(T_c - \Delta\tau_1)}{1-A} < d \leq T_c; \quad \frac{1+A}{2}T_c < \Delta\tau_1 < T_c \end{cases} \tag{9}$$

由上述关系可知, $\Delta\tau_1$ 在 $0 < \tau_1 < (1+A)T_c/2$ 与 $(1+A)T_c/2 < \tau_1 < T_c$ 两种条件下,锁定点偏差 $\epsilon_{bias}(d)$ 与相关间隔 d 的 SCB 偏差呈现不同形状。假设当 $\Delta\tau_1$ 在 $0 < \tau_1 < (1+A)T_c/2$ 时为小多径延迟场景,在 $(1+A)T_c/2 < \tau_1 < T_c$ 时为大多径延迟场景。另一方面,可以根据 SCB 曲线中的分段函数的拐点推算出相应的多径参数。以 d 为横坐标、 $\epsilon_{bias}(d)$ 为纵坐标可得到不同延迟场景下的 SCB 曲线图,图中拐点的横纵坐标分别以 (X, Y) 表示,则在不同的多径延迟条件下估计出的多径幅度与延迟满足以下公式

$$A = 2Y/X \tag{10}$$

$$\Delta\tau_1 = \begin{cases} X/2 + Y, & 0 < \Delta\tau_1 \leq \frac{1+A}{2}T_c \\ T_c - X/2 + Y, & \frac{1+A}{2}T_c < \Delta\tau_1 < T_c \end{cases} \tag{11}$$

根据式(10)和式(11),可以得到实际信号的 SCB 偏差后,然后根据拐点信息求出多径的参数估计值。

和(5)可得出

$$\begin{aligned} C_{SCB}(\epsilon_{bias}, d) &= |R_E(\epsilon_{bias}(d))|^2 - \\ &|R_L(\epsilon_{bias}(d))|^2 = 0 \end{aligned} \tag{7}$$

由式(3)和(4)可知,早晚码的相关结果满足如下关系

$$|R_E(\epsilon_{bias}(d))| = |R_L(\epsilon_{bias}(d))| \tag{8}$$

不同于无线通信系统中对多径信号进行分集接收提高信噪比,卫星通信中更加关注剔除多径信号来提高定位精度。考虑到在实际环境下,对多个多径信号的估计较为困难,本文重点针对信号中的第一条多径进行分析。根据文献[12],接收到信号相关峰为直达信号相关峰与多径信号相关峰的叠加,存在一条多径且多径延迟 $\Delta\tau_1 < T_c$ 情况下,锁定点偏差 $\epsilon_{bias}(d)$ 与相关间隔 d ,直达信号与多径信号的幅值比 a_0/a_1 ,相位差 $(\phi_1 - \hat{\phi}_0)$ 和多径延迟 $\Delta\tau_1$ 有关。假设 $A = a_1 \cos(\phi_1 - \hat{\phi}_0)/a_0$,锁定点偏差 $\epsilon_{bias}(d)$ 的理论值为

3 信号验证

通过对不同类型的仿真和实测信号,选取不同的多径信号参数,利用仿真数据分别生成不同条件下的 SCB 偏差,同时生成理论曲线并与仿真曲线和实测信号进行对比。信号为 BDS B1I 或者 GPS L1 频点信号,采样率为 5 GHz,仿真与实测参数设定值如表 1 所示。

表 1 仿真与实测参数设定值

卫星	信号	频点/MHz		载噪比/dB·Hz	
		仿真	实测	仿真	实测
1 号星	BDS B1I	1 561.098	1 561.098	无噪声	59
28 号星	GPS L1	无	1 575.42	无噪声	48

3.1 仿真对比

3.1.1 小延迟多径仿真 针对如式(8)所示的小延迟多径($0 < \tau_1 < (1+A)T_c/2$),在上述平台上进行 3 个小延迟多径场景的模拟,分别改变多径信号的相位、幅度与延迟,其多径仿真设定值如表 2 所示。

表 2 小延迟多径场景参数设定值

实验场景	实验次数	延迟/ns	归一化幅值	相位/(°)
小延迟 场景 1	1	161.3	0.4	60
	2	161.3	0.4	45
	3	161.3	0.4	30
小延迟 场景 2	1	161.3	0.2	60
	2	161.3	0.4	60
	3	161.3	0.6	60
小延迟 场景 3	1	80.6	0.4	60
	2	161.3	0.4	60
	3	241.9	0.4	60

通过式(9)计算得到的理论结果与仿真结果的对比分别如图 1~3 所示。

从图 1~图 3 可以看出,理论曲线与仿真曲线相吻合。对比 3 种不同的多径参数可知:多径相位和多径幅值对 SCB 偏差产生的效果相似;随着多径相位差减小或 $|\cos(\phi_1-\hat{\phi}_0)|$ 的增大以及延迟的增大、多径幅值增大都会使锁定点值增大、拐点上移。

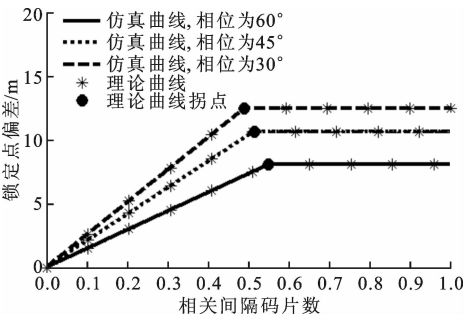


图 1 小延迟多径下不同相位的 SCB 偏差

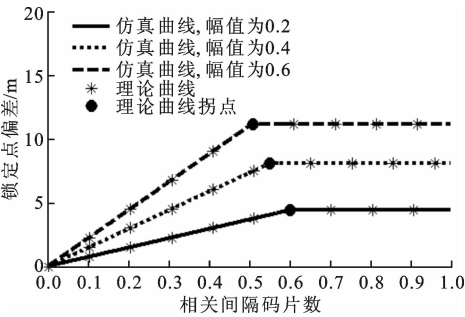


图 2 小延迟多径下不同幅值的 SCB 偏差

3.1.2 大延迟多径仿真 针对式(9)所示的大延迟多径 $((1+A)T_c/2<\tau_1<T_c)$,同样在上述平台上进行不同多径参数值的仿真实验。仿真结果如表 3 所示。

通过式(9)计算得到的理论结果与仿真结果的对比如图 4~6 图所示。

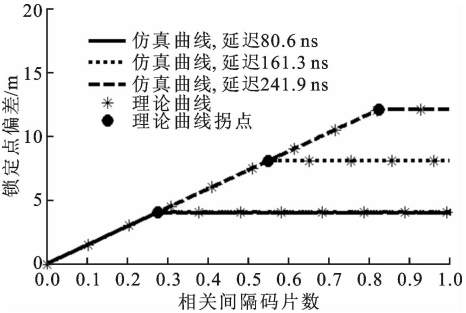


图 3 小延迟多径下不同延迟的 SCB 偏差

表 3 大延迟多径场景参数

实验场景	实验次数	延迟/ns	归一化幅值	相位/(°)
小延迟 场景 1	1	367.1	0.4	60
	2	367.1	0.4	45
	3	367.1	0.4	30
小延迟 场景 2	1	367.1	0.2	60
	2	367.1	0.4	60
	3	367.1	0.6	60
小延迟 场景 3	1	302.5	0.4	60
	2	367.1	0.4	60
	3	431.6	0.4	60

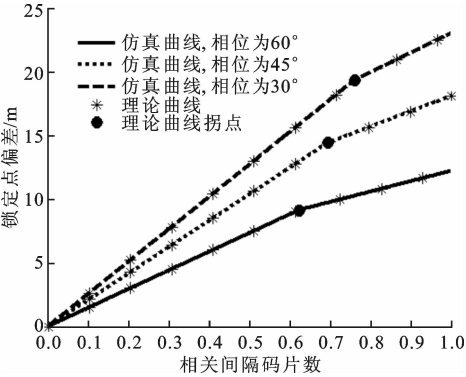


图 4 大延迟多径下不同相位的 SCB 偏差

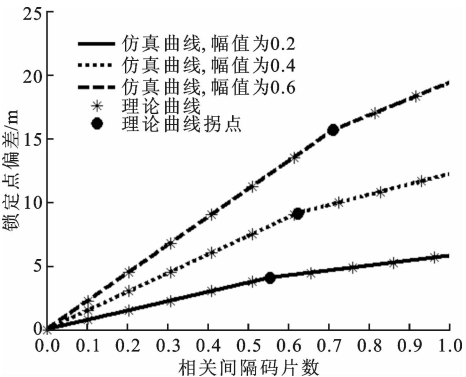


图 5 大延迟多径下不同幅值的 SCB 偏差

从图 4~6 图可以看出,理论曲线与仿真曲线相吻合。对比 3 种不同的多径参数可得:多径相位和

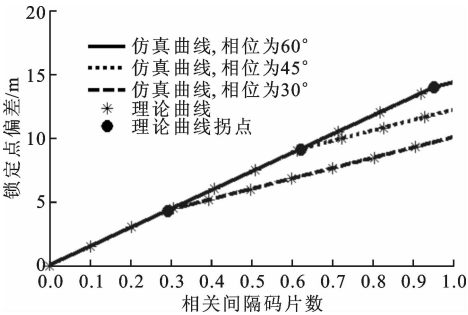


图 6 大延迟多径下不同延迟的 SCB 偏差

多径幅值对 SCB 偏差产生的效果相似,随着多径相位减小和幅值增大会使锁定点值增大、拐点上移,但延迟的增大反而会使锁定点值减小、拐点下移。

3.2 实测信号分析

本节在理论推导与仿真分析的基础上,采集真实的卫星多径信号,通过 SCB 偏差来估计相应的多径参数。实验分别采集了北斗和 GPS 的信号作为实验数据,采集设备与处理流程如图 7 所示。

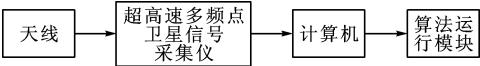


图 7 采集设备与处理流程框图

图 7 中,超高速多频点卫星信号采集仪采用 Xilinx kintex7 FPGA 芯片和 E2V EV10AQ190 芯片,通过 PCIE 2.0 接口,实现对导航信号 2 bit 量化和 5 GHz 的 A/D 采样。利用高速率的采集器直接采集射频信号不仅能够排除下变频可能引入的干扰,而且可以获得高分辨率的相关域结果。

3.2.1 全向型天线 GPS 采集实验 本次实验地点是在北京航空航天大学新主楼二层大台阶处,采集点坐标经度为 116.345 618°,纬度为 39.978 886°,高度为 49.95 m。此处环境是处于楼宇的包围之中,具有天然的多径环境。采集设备及环境如图 8 所示。

本次实验主要采集了 GPS L1 频点信号作为实验数据,天线为全向型天线。对信号处理的参数如



图 8 采集设备及环境

表 1 所示,对于其中 10 组连续的 1 ms 长的数据处理获得的相关曲线偏差如图 9 所示。

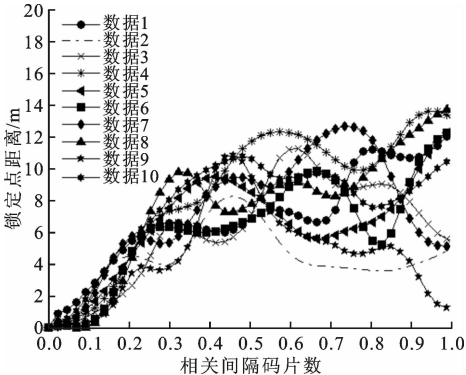


图 9 GPS 28 号星 10 组 SCB 偏差

对上述 10 组 SCB 偏差进行平均得平均值曲线,最大值点作为曲线的拐点,该拐点的坐标为 (0.378 3,8.952 m),如图 10 所示。

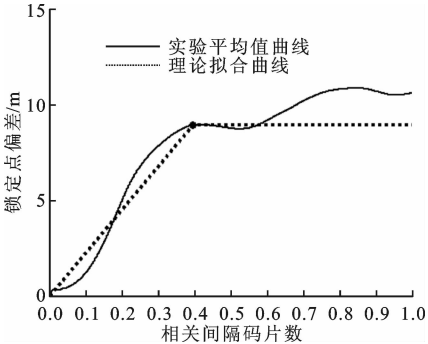


图 10 GPS 28 号星平均 SCB 偏差与仿真曲线

由平均值曲线可观察出多径时延未超过 488.7 ns(0.5 个码片),符合小多径场景下的 SCB 偏差曲线,故根据式(10)和(11)可得多径参数估计值:延迟 214.77 ns,A=0.161。所以,GPS 28 号星在该采集地点采集时刻有 214.77 ns 延迟的多径信号存在。根据该时刻卫星星历和采集地点理论建模,采集时刻的 28 号星多径大致在 233.3~266.7 ns 左右。SCB 偏差验证的多径大致符合理论建模值。

3.2.2 定向型天线 BDS 采集实验 利用定向型天线采集了北斗 15 号卫星(MEO)的信号作为实验数据,采集地点为北京航天城,采集天线为直径 9 m 的定向型天线。对信号处理的参数如表 1 所示。

对于其中 10 组连续的 1 ms 长的信号处理获得的相关曲线偏差如图 11 所示。对这 10 组 SCB 偏差进行平均,可到如图 12 虚线所示曲线。取该平均值曲线的最大值点作为曲线的拐点(该拐点的坐标为(0.280,1.271 m))。

由于平均值曲线走势较符合小多径场景下的

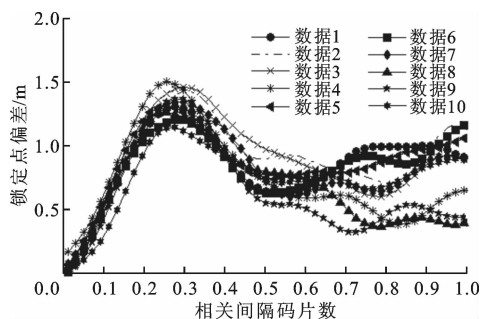


图 11 北斗 15 号星 10 组 SCB 偏差图

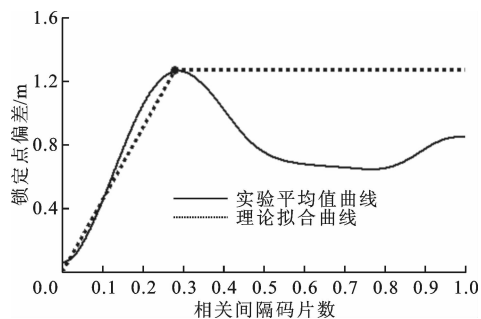


图 12 北斗 15 号星平均 SCB 偏差与仿真曲线

SCB 偏差,故根据式(10)、式(11)可得多径参数估计值为延迟 72.63 ns, $A=0.061$ 。北斗第 15 号卫星存在一个延迟为 72.63 ns 的多径。高速率采集器采用原子钟作为基准,直接对射频信号进行采集,排除了下变频等处理环节对真实信号的影响;5 GHz 的采样率能够得到相关峰局部细节,更好地利用 SCB 曲线检测到多径信号;定向型天线高载噪比信号减小了噪声对 SCB 曲线的影响。

利用传统 MEDLL 算法对上述 10 组数据进行处理。根据文献[7],MEDLL 算法的多径分辨率大约为 0.05 个码片(对于北斗系统大约为 7.33 m,对于 GPS 系统约为 14.66 m),难以分离出上述环境中较小的多径。实际使用 MEDLL 算法分析 10 组 BDS 数据,得出 MEDLL 算法分离出多径延迟估计值的均值为 71.33 ns,标准差为 29.50 ns;而采用 MSCB 方法得到多径延迟估计值的均值为 72.63 ns,标准差为 4.50 ns。图 13 为上述两种方法各次实验得到的多径延迟估计值对比效果。从图中可以看出,两种方法估计的结果类似,但 MSCB 方法的标准差仅为前者的 1/6 左右。

综上所述,在高信噪比和高采集速率下,可以较好地利用 SCB 曲线进行多径信号分离。因为采集地点利用的定向型天线周围较为空旷,故该多径是由地面反射引起的可能性较小,有可能是由卫星发射时卫星某结构部件反射或卫星信号发射电路引起。

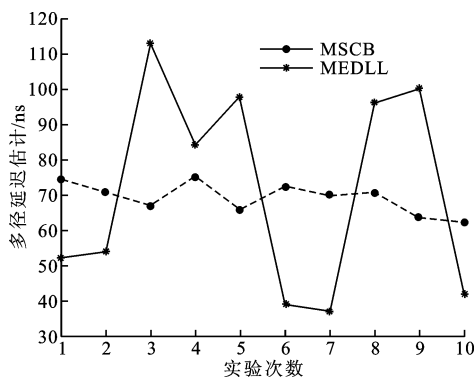


图 13 MSCB 和 MEDLL 对 10 次数据的多径延迟估计结果

由于实验条件限制,本次实验只对一颗卫星信号进行了分析,后期会对更多卫星信号进行 SCB 曲线分析。

4 结 论

本文提出了一种利用 SCB 偏差分析多径信号的方法,通过 SCB 偏差可以获得在不同的相关间隔下锁定点的值,可以分析多径环境下卫星导航信号存在的相关峰畸变情况,并通过该形状直接计算出卫星导航信号多径的延迟、相位和幅值。

通过对模拟信号、GPS 和北斗卫星导航系统定向性和全向天线采集实际信号的分析,验证了上述方法的有效性和准确性。与传统 MEDLL 算法等参量估计方法的多相关器结构相比,本方法的分辨率可以达到 0.06 m(1 个采样点以内),使卫星导航信号多径延迟估计的精度得到大幅提高。实际数据测试表明,由本文方法估计的多径参数的标准差仅为传统方法的 1/6 左右,本文方法为未来卫星导航多径信号的建模与分析提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 伍宗伟,姚敏立,马红光,等. 移动卫星通信低成本多传感器融合姿态估计方法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12): 55-61.
WU Zongwei, YAO Minli, MA Hongguang, et al. An attitude estimation method using multi-sensor fusion for low-cost mobile satellite communication [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(12): 55-61.
- [2] VAKMAN D. On the analytic signal, the Teager-Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 791-797.

- [3] WANG X, LIU W, Li B, et al. A modified sidereal filtering for mitigating the code measurement multipath effects of BeiDou GEO satellites [J]. Survey Review, 2016, 48(1): 1-9.
- [4] BHUIYAN M Z H, LOHAN E S. Advanced multipath mitigation techniques for satellite-based positioning applications [J]. International Journal of Navigation & Observation, 2010(1): 1-15.
- [5] WU Jinghui, DEMPSTER A G. "BOC-Gated-PRN" a multipath mitigation technique for BOC(n , n) waveforms [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1136-1153.
- [6] 任嘉伟, 贾维敏, 陈辉华, 等. 二进制偏移载波最小均方误差预滤波无模糊跟踪方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 125-130.
REN Jiawei, JIA Weimin, CHEN Huihua, et al. A pre-filtering method with minimizing mean square error criterion for unambiguous tracking of binary offset carrier signals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 125-130.
- [7] BHUIYAN M Z H, LOHAN E S, RENFORS M. Code tracking algorithms for mitigating multipath effects in fading channels for satellite-based positioning [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008(1): 1-17.
- [8] SOELLNER M, KURZHALS C, HECHEN-BLAIKNER G, et al. GNSS offline signal quality assessment [C]//21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Fairfax, VA, USA: The Institute of Navigation, 2008: 2327-2338.
- [9] GREWAL M S, WEILL L R, ANDREWS A P. Global positioning systems, inertial navigation, and integration [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2007: 164-182.
- [10] 孙彦良. 面向下一代无线通信系统的多天线信道建模和仿真技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 15-16.
- [11] 吕欣韵. 卫星导航新体制信号的抗多径环路跟踪技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 20-21.
- [12] 刘荟萃. 扩频测距系统中多径消除算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005: 12-13.
- [13] 刘荟萃, 程肖, 倪少杰, 等. 一种基于误差包络的多径抑制性能评估准则 [J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 72-75.
LIU Huicui, CHENG Xiao, NI Shaojie, et al. Evaluation of multipath mitigation performances based on er-

ror envelope [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 72-75.

[本刊相关文献链接]

- 卢虎, 廉保旺, 闫浩. 新型卫星导航复用调制信号的单路分离方法. 2016, 50(12): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201612006]
- 张欣, 黄普明, 文璐, 等. 一种适用于中高轨合成孔径雷达卫星的分辨率分析方法. 2016, 50(8): 70-76. [doi:10.7652/xjtuxb201608012]
- 唐成凯, 廉保旺, 张玲玲. 卫星通信系统双向中继转发自干扰消除算法. 2015, 49(2): 74-79. [doi:10.7652/xjtuxb201502013]
- 赵建伟, 贾维敏, 姚敏立, 等. 移动卫星通信系统组合姿态估计算法. 2014, 48(8): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201408007]
- 苏威, 洪涛, 徐川, 等. 红外地球敏感器修正的卫星姿态角动量反馈控制. 2014, 48(4): 115-118. [doi:10.7652/xjtuxb201404020]
- 陈鹏, 邱乐德, 王宇. 卫星认知无线电检测门限与功率分配联合优化算法. 2013, 47(6): 31-36. [doi:10.7652/xjtuxb201306006]
- 田方浩, 姚敏立, 周淑华, 等. 宽带移动卫星通信系统低成本姿态估计算法. 2013, 47(6): 44-49. [doi:10.7652/xjtuxb201306008]
- 李实锋, 王玉林, 华宇, 等. 罗兰拟C信号的抗干扰快速检测方法. 2013, 47(10): 91-96. [doi:10.7652/xjtuxb201310016]
- 张小栋, 郭晋, 李睿, 等. 表情驱动下脑电信号的建模仿真及分类识别. 2016, 50(6): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201606001]
- 徐磊磊, 臧会凯, 周生华, 等. 一种相位编码信号及其失配滤波器设计方法. 2016, 50(4): 54-59. [doi:10.7652/xjtuxb201604009]
- 张东伟, 郭英, 齐子森, 等. 采用空间极化时频分布的跳频信号多参数联合估计算法. 2015, 49(08): 17-23. [doi:10.7652/xjtuxb201508004]
- 成玮, 张周锁, 何正嘉. 采用信息理论准则的信号源数估计方法及性能对比. 2015, 49(8): 38-44. [doi:10.7652/xjtuxb201508007]
- 徐光华, 张锋, 谢俊, 等. 稳态视觉诱发电位的脑机接口范式及其信号处理方法研究. 2015, 49(6): 1-7. [doi:10.7652/xjtuxb201506001]
- 熊涛, 江桦, 崔鹏辉, 等. 应用基扩展模型的混合信号单通道盲分离算法. 2015, 49(6): 60-66. [doi:10.7652/xjtuxb201506010]
- 雯洁, 齐春. 一种鲁棒的稀疏信号重构算法. 2015, 49(4): 98-103. [doi:10.7652/xjtuxb201504016]
- 徐田华, 杨连报, 胡红利, 等. 高速铁路信号系统异构数据融合和智能维护决策. 2015, 49(1): 72-78. [doi:10.7652/xjtuxb201501012]

(编辑 刘杨)