

引用格式: 张凌志, 张雨露, 王琳, 等. 导航卫星发射时延标定技术研究综述[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 50-59.

导航卫星发射时延标定技术研究综述

张凌志¹, 张雨露², 王琳², 王遂生¹, 同钊², 丁五一², 潘虹臣¹

1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610100;

2. 中国星网网络系统研究院有限公司, 北京 100049

摘要: 卫星导航定位精度受时延测量准确度影响, 除了考虑电离层等时延误差外, 在导航卫星发射端基带信号生成到天线口面的时延同样不可忽略, 通常将这部分时延分为基带到天线前端的链路时延和天线输入到天线相位中心的链路时延两部分, 前者被称为绝对时延, 后者被称为相对时延。总结了导航信号发射通道时延和相对时延的信号模型及测量方法, 并指出绝对时延和相对时延联合测量是未来时延测量的发展方向, 并给出相应的建议。

关键词: 导航卫星; 时延标定; 相对时延; 绝对时延

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-01-0050-10

Techniques for delay calibration of navigation satellites: a review

ZHANG Ling-zhi¹, ZHANG Yu-lu², WANG Lin², WANG Sui-sheng¹,

TONG Zhao², DING Wu-yi², PAN Hong-chen¹

1. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610100, China;

2. China Satellite Network System CO., LTD, Beijing 100049, China

Abstract: The positioning accuracy of satellite navigation is affected by the accuracy of time delay measurement. Besides considering delay errors such as the ionosphere, the time delay from the generation of baseband signals at the transmitting end of navigation satellites to the aperture of the antenna cannot be neglected. Usually, this part of the time delay is divided into two parts: the link time delay from the baseband to the front end of the antenna and the link time delay from the antenna input to the antenna phase center. The former is referred to as the absolute time delay, and the latter is called the relative time delay. This paper summarizes the signal models and measurement methods of the absolute and relative time delays of navigation signals, and indicates that the joint measurement of the relative and absolute time delays is the development direction of time delay measurement in the future, and provides corresponding suggestions.

Key words: navigation satellites; time delay calibration; relative delay; absolute delay

自1978年美国发射第一颗GPS(Global Positioning System)导航卫星以来,导航系统的发展已经经历了40余年的历史,现已形成GPS、BDS(BeiDou Navigation Satellite System)、Galileo(Galileo Satellite Navigation System)、GLONASS(Global Navigation Satellite System)四大导航系统为主的格局。卫星导航定位技术依赖于无线电测距,而无线电测距精度取决于时延测量的准确度,测距信号不仅在空间中传播,还要在信号发射和接收设备中传播,根据文献[1]可知,设备通道时延若不进行高精度校准,则会在时间测量中引入数纳秒量级的误差,进而对测距造成影响。因此,若想获取较为精确的时延测量结果,必须要对设备通道时延进行准确的标校,此外在时间同步系统中,设备通道的时延校准同样值得关注。

导航系统中设备通道时延包括卫星设备和接收机设备的时延。文献[2]和[3]将设备的时延直观理解为信号在收发设备中传输的物理时延,这种说法对于一个无源系统来说相对适用,但对于像导航系统这样受处理算法、电路实现结构以及时钟等外部条件引起的等效时延变化^[4]不再适用。导航发射端或是接收端的设备时延标定需要根据其特定的工作环境进行综合考虑。

美国海军研究实验室和海军天文台对GPS接收机的时延标定工作开展较早。在2001年,这两个机构联合法国的P. Gerard等人^[5]对Ashtech Z12-T型GPS接收机进行了绝对时延标定,采用直接使用高速示波器对信号的特征点进行测量,最终指出1 ns量级的标定精度是能够实现的。在2002年,上述机构联合科罗拉多大学J. F. Plumb等人^[6]对3台测地接收机进行了标定,同样是采用示波器观察的方式获取了高精度接收机时延测量。美国海军同样最早开展对发射端时延的标定,只不过他们标定的出发点是为了更为准确地获取待测试GPS接收机的通道时延,标定也并非针对真实的卫星设备,而是模拟源^[7-8]。

在国内,卫星导航技术与装备工程技术中心^[9]、西安电子科技大学^[10]、中国电子科技集团公司(中电)第五十四所^[11]、国防科技大学^[12]、北京卫星导航中心^[13]等机构^[14]对导航系统时延标定主要集中在

GNSS(Global Navigation Satellite System)接收机时延校准技术研究。中国航天科工集团第二研究院^[15]、北京交通大学^[16]等机构的学者主要对模拟源的发射时延进行了研究,研究结果用于提升GNSS接收机的时间测量准确度。此外,北京跟踪与通信技术研究所^[17]、中电五十四所^[18]、中国科学院国家授时中心^[19-20]等机构对收发系统进行了联合时延标校,这些标校的结果主要应用于双向时间同步系统。

对真实卫星发射通道时延的标校工作率先由中国空间技术研究院总部^[21-23]的崔小准等人完成,他们同样还将类似的方法应用在了星间链路发射机的时延标定上^[24],因同样使用了伪距测量原理,取得了与星地链路相当的标定效果。来自同一机构的刘文山等人^[25]从时延补偿角度开展研究工作,提出基于分数时延滤波补偿的方式,来应对DAC(digital-to-analog converter)等温度敏感器件在低温下的卫星信号发射时延变化,以此获得更加稳定的时延,这是继文献[9]首次分析温度对时延影响以来第一个进行自适应补偿的。上述的标定均在地面完成,从目前最新的研究来看,中国科学院国家授时中心的朱琳等人^[26]采用地面GNSS接收机测量的数据反推导航卫星上的发射机通道时延,这样做的好处就是让卫星发射通道的时延标校不受地域和时间限制,能够应对随时间变化带来的星上发射时延变化,这将是未来时延标校的一个发展趋势。

值得一提的是,在当前已有的导航系统通道时延标校中,对于天线引入的误差关注较少。文献[27]首次分析了天线造成的时延对导航系统的影响,并系统性地给出了天线时延的测量方法。随后文献[28]进一步表明天线在导航系统中的时延不可忽略,同时优化测量手段,在暗室中对天线的时延进行了实际测试。在后续的导航系统时延标定中,逐渐有学者将天线时延纳入到系统时延中去^[15, 26],以期得到更高的时延测量精度。

本文聚焦于导航卫星发射端的时延标定技术,相关文献报道较少,但导航卫星发射时延标定可以采用模拟器通道时延标定方法,同时,导航卫星发射机可以看作导航接收机时延标定的逆过程,对于接收机通道时延中应用的测量方法同样可以借鉴,甚至是可以利用接收机辅助实现对导航卫星发射

时延的标定。此外,天线产生的时延也将纳入考虑范围,本文将对两者产生的时延进行系统性的阐述。

1 导航卫星发射时延定义

不同导航系统的硬件设计与信号体制存在差异,因此对于星上发射时延的定义稍有不同^[29-32],以我国的北斗系统为例,在北斗官方提供的 B3I 接口控制文件中对卫星发射端时延定义如下:星上设备时延是指从卫星的时间基准到发射天线相位中心的时延^[29],根据前面的描述,该时延由两部分组成:导航信号生成到天线前端的时延和天线输入到其辐射等效相位中心的时延,前者通常被称为绝对时延,后者通常被称为相对时延,下面将详细介绍。

1.1 发射通道绝对时延

导航卫星发射通道天线前端主要完成数字基带生成、扩频处理、载波调制、功率放大等信号变化过程,因导航采用伪距测距原理,因此发射通道的时延定义为:与时钟秒脉冲上升沿(或下降沿)对齐的扩频码经过发射通道以后与该时钟秒脉冲上升沿(或下降沿)之间的时间差,如图 1 所示。经分析,该时延是以秒脉冲为参考的绝对时间量,因此也称为绝对时延。

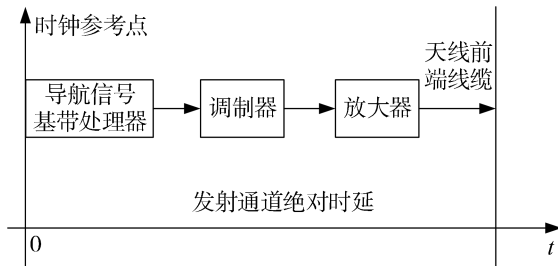


图 1 发射通道绝对时延示意图

1.2 天线相对时延

无论是地面站,卫星还是用户终端均通过天线来收发信号,文献[27]指出,在导航系统中天线设备的时延测量准确度也会直接影响定位及时间同步的性能。对于天线而言,可分为发射时延和接收时延,本文主要关注卫星端的发射时延,因此下面给出天线发射时延的定义:信号在天线馈线输入端口到天线相位中心的传输时间差,如图 2 所示。该时延也被称为相对时延。

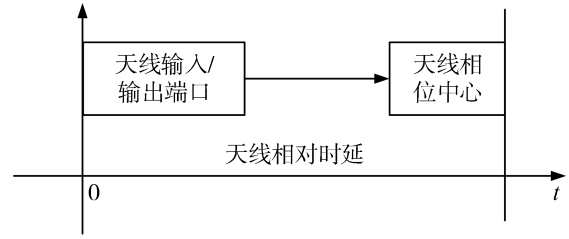


图 2 天线相对时延示意图

在后续章节中将根据本节给出的时延定义,结合现有时延测量方法,进行综合阐述。

2 绝对时延测量原理

2.1 理论模型

绝对时延的测量方法可分为单向时延测量和组合时延测量两种,主要区别在于是对单个设备还是多个设备串接一起测量,均可等效为信号 $s_0(t)$ 经过了一个传输函数为 $h(t)$ 的线性系统产生的时延,基本的理论模型保持一致,原理图如图 3 所示。

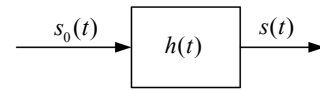


图 3 理论模型框图

其中 $h(t)$ 的频域表达为

$$H(f) = A(f)e^{j2\pi f t}。 \quad (1)$$

式(1)中: $A(f)$ 为幅频响应。输出信号可记为

$$s(t) = s_0(t) * h(t)。 \quad (2)$$

式(2)中: $*$ 为卷积运算,其频域表达式可以写为

$$S(f) = S_0(f) \cdot H(f)。 \quad (3)$$

常见的翻转点法^[4, 33-36],是从表达式(2)出发,频域的相关峰法^[37-39]则是从表达式(3)出发,以常见的导航信号调制 CDMA-BPSK 为例,下面分别进行讨论。

假定输入信号可表示为

$$s_0(t) = AC(t)D(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi_0)。 \quad (4)$$

式(4)中: A 为信号幅度, $C(t)$ 为伪随机码, $D(t)$ 为调制的导航电文, f_c 为载波频率, φ_0 为信号的初相。假设通道理想,等效为固定时延, $s(t)$ 时域表达式为

$$s(t) = s_0(t) * e^{j2\pi f\tau_0} = s_0(t - \tau_0) = AC(t - \tau_0)D(t - \tau_0)\cos(2\pi f_c(t - \tau_0))。 \quad (5)$$

因电文速率远小于伪码速率,在伪随机码符号相反时,载波相位会发生 180° 的翻转,根据此特性,可在时域通过观察码片翻转点与参考基准的时间差来确定待测系统的时延,该方法称为时域翻转点法或观察法。当传输系统不理想时,翻转点可能存在模糊或者额外时延,无法准确衡量系统的传输时延。

若考虑发射信号的相关域特性,则需要引入额外的采集设备对信号进行采集,基本原理框图如图 4 所示。

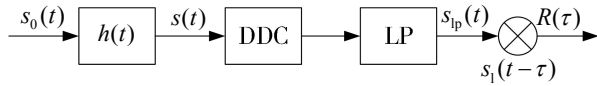


图 4 相关峰标校原理框图

为了简化分析过程,采用等效低通信号模型进行分析,此时有:

$$s_0(t) = \text{Re}\{s_1(t)\exp(2\pi f_c t)\}。 \quad (6)$$

$$H_1(f) = H(f + f_c)。 \quad (7)$$

式 (6) 和 (7) 中: $s_1(t) = c(t)$ 为 $s(t)$ 的理想等效低通信号, $H_1(f)$ 为等效的低通通道传输函数,时域形式为 $h_1(t)$ 。经图 4 中低通滤波器输出的信号为 $s_{lp}(t) = s(t) * h_1(t)$ 。接收端的相关函数如下:

$$\begin{aligned} R(\tau) &= s_{lp}(\tau) * s_1^*(-\tau) = \\ &= s_1(\tau) * h_1(\tau) * s_1^*(-\tau) = \\ &= s_1(\tau) * s_1^*(-\tau) * h_1(\tau) = \\ &= R_1(\tau) * h_1(\tau)。 \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) 中: $R_1(\tau)$ 为 $c(t)$ 的自相关函数。

在通道理想的情况下,即相频响应满足 $\varphi(f) = -2\pi f\tau_0$ 时, τ_0 为常数,则有:

$$\begin{aligned} R(\tau) &= R_1(\tau) * h_1(\tau) = R_1(\tau) * e^{-j2\pi f\tau_0} = \\ &= R_1(\tau - \tau_0)。 \end{aligned} \quad (9)$$

由式 (9) 可知: 在 $\tau = \tau_0$ 时, 相关函数有最大值, 该值为通道传输的群时延。在通道理想的情况下, 时域测量和相关域测量等价; 在通道非理想情况

下, 两者存在差异, 因相关域能够反应信号的特征, 且相关域的处理方式与伪距测量的原理保持一致, 因此更能准确反应通道传输带来的时延。

2.2 绝对时延测量方法

2.2.1 时域测量方法

时域测量方法需配合信号产生的基准脉冲实现, 测量原理框图如图 5 所示。



图 5 时域测量方法原理框图

采用双通道高速示波器对发射信号和秒脉冲同时采样, 以秒脉冲为触发, 设置合理的触发电平, 观察秒脉冲信号与信号翻转点之间的时延。因线缆带来的时延误差在整个通道时延标定中不可忽略, 因此在采用高速示波器测量以前, 需要额外利用矢量网络分析仪对所用测试电缆进行时延标定, 在测定结果中予以扣除。文献[9]对相同电缆传输宽带信号和单频信号的时延进行了测试, 文中提到的测量方法与矢量网络分析仪测试结果最为接近, 因此在后续采用时域观察法测量发射通道时延的时候, 统一推荐采用矢量网络分析仪对线缆进行时延测量, 保持高精度的同时降低工作量。相位翻转点理论波形和实测波形分别示于图 6 和图 7。

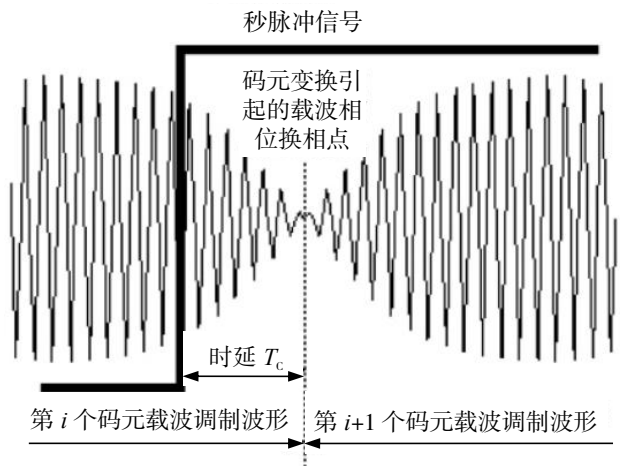


图 6 相位翻转点理论波形

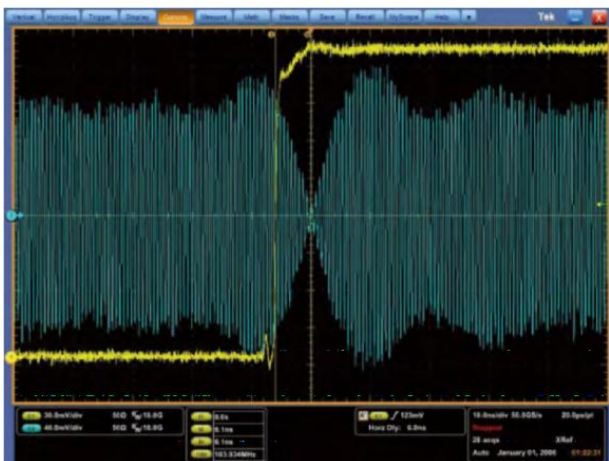


图 7 相位翻转点实测波形

在码片翻转点基础之上, 崔小准等人^[21]认为示波器直接观察带来的误差相对较大, 通过高速示波器直接对射频信号直采, 以数字包络检波的形式, 与参考脉冲信号进行时延计算, 该方法在强信号下可以认为与观察法等价, 但无论哪种方式, 如果以最小值为翻转点, 依旧会存在采样点模糊的情况。

2.2.2 相关域测量方法

相关域测量法将整个信号处理基带、调制、变频等处理时延看作一个整体进行测量, 以导航信号产生的秒脉冲为参考, 通过高速采集设备对射频信号直采, 以相关处理方式获取采集信号的相关峰位置, 从而计算出具体时延, 基本原理框图示于图 8。

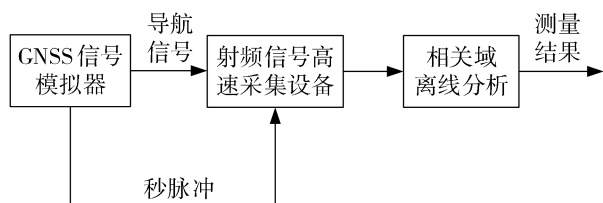


图 8 相关域测量法原理框图

目前相对主流的方式是对采集的射频信号与本地复现参考信号直接进行相关处理, 但因为采样率过高, 数据量过于庞大导致整个计算过程相对较长, 且对硬件的资源要求较高。现阶段对于大容量存储以及高采样率信号采集设备 (采样率通常在 GHz 以上) 的应用, 使得在 GNSS 信号发射端的射频信号直采成为可能, 仅需要考虑在数字域的加速处理。降采样率的处理方式可最大化保留信息, 提升处理效率, 图 9 展示了一种典型的降采样率信号处理方式^[21], 其中 $h(n)$ 为下采样前的抗混叠滤波器

的系统响应函数, M 为降采样倍数, 经过处理后的信号采样率 f'_s 为原来采样率的 $1/M$ 。此外, 在数字域通过数据分时相关的处理策略也同样能够有效提升计算效率^[23]。

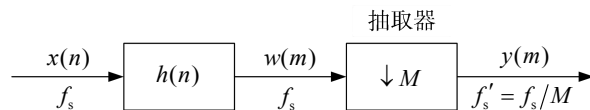


图 9 一种常见的多抽样率信号处理实现框图

相关域处理方式通过获取采集信号相关峰的位置来推算时延, 但在相关处理过程中, 由于链路噪声、采集精度等影响导致相关峰畸变, 进而无法得到理想的峰值位置。若对采集信号进行跟踪处理, 通过跟踪环路来平滑相关峰位置测量误差, 可得到更为精确的时延测量结果^[16]。

2.3 误差分析与方法比较

时域观察法通过测量时域波形码片翻转点和参考秒脉冲的时间差得到时延, 从式 (5) 不难发现, 测量时延 τ'_d 表示为

$$\tau'_d = k\tau_{\text{code}} + \tau_d, \quad k=1, 2, \dots, K. \quad (10)$$

式 (10) 中: τ_d 为示波器实际测量读数, τ_{code} 为码片宽度, 上式表明在发射系统内部时延过大时, 测量端将会出现整数个码片周期的时间测量模糊。以码率为 2.046 MHz 的导航信号为例, $\tau_{\text{code}} \approx 488.75 \text{ ns}$, 当发射系统实际时延超过 488.75 ns 的时候, 时域观察法将无法准确测量。因此为了提高时域观察法测量的准确度, 防止整数个码片翻转的模糊, 在测试前通过分段测量的方式, 预先将整数个的码片时延获取, 提升测量有效性。图 10 展示了测试设备导航信号发射时延测量结果, 从图中读取时延 $\tau_d = 423.05 \text{ ns}$, 测试设备基本参数详见表 1。

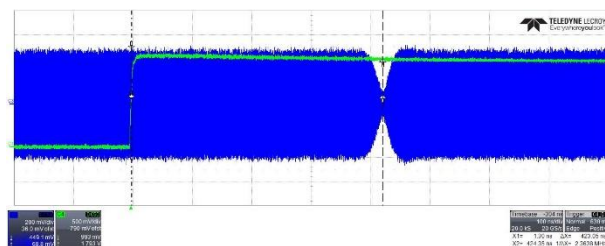


图 10 示波器观察法时延测量结果

表 1 配套测试设备工作参数

参数名	值	单位
频点	1 575.42	MHz
码率	2.046	MHz
示波器采样率	20	GHz

此外，高速示波器在读取测量结果的时候将人为引入误差，图 11 为图 10 的局部放大，因无法精确选定相位翻转点，造成时延测量误差，图 11 和图 10 时延测量结果相差 0.45 ns。

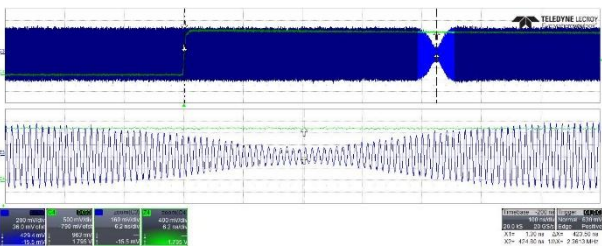


图 11 示波器观察法时延测量局部放大结果

相关域测量法通过对采集的发射系统导航信号进行相关处理，读取相关峰位置的方式测量时延，根据公式，相关峰位置测量精度受接收线缆时延标定准确度、多通道采集器误差、信号处理方式等方面的影响，文献[21]对相关域测量法常见的误差进

行了分析，其中线缆误差 $\sigma_l = 0.10 \text{ ns}$ ，延迟锁相环引入的误差 $\sigma_i = 0.11 \text{ ns}$ ，环境温度与测试误差 $\sigma_e = 0.10 \text{ ns}$ ，环境温度与测试误差 $\sigma_e = 0.10 \text{ ns}$ ，示波器时钟不稳定带来的误差估计为 $\sigma_{\text{clk}} = 0.000 2 \text{ ns}$ ，由于 σ_{clk} 远小于其他误差项，因此在后续计算中忽略 σ_{clk} 对系统总时延测量误差的影响。假定上述误差独立分布，总的时延测量误差 σ 可用式 (11) 计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (11)$$

式 (11) 中： σ_i 为某测试项的标准差，通过式 (11) 计算得到总的时延标定误差标准差为 0.18 ns。

通过分析时域法和相关域法不难发现，时域法主要适用于传统窄带导航信号，如 BPSK 等具有明显相位翻转点的简单信号，其测量精度与采样率和读数有关，该方法通过直接观察得到时延结果，操作简单，实时性高。相关法除传统导航信号外，还适用于宽带导航信号，或者是增加了 BOC 调制的时域波形，当翻转点不明显的时候，其测量精度与码率正相关，该方法通过采集数据后离线分析，实时性低。表 2 中列出了两种方法的比较结果，可根据实际情况具体选择。

表 2 时域测量和相关域测量方法比较

测量方法	适用范围	测量精度	计算量	实时性
时域测量法	窄带 BPSK 或 QPSK 信号	与示波器采样率有关	直接观察或逐点平均后观察，计算量小	较好
相关域测量法	所有导航信号	与信号码率有关	相关运算，计算量大	较差

3 相对时延测量原理

天线的相对时延可进一步分为发射时延和接收时延，前者主要指信号在天线馈线输入端口至天线相位中心的传输时延，后者主要指信号在天线相位中心至馈线输出端口的传输时延，两者的测量方式互逆，可相互借鉴。

3.1 天线时延测试方法

对于天线时延测量，主要采用闭环测试方式，

即通过待测试天线与已知时延天线组成一个闭环系统，通过标定线缆时延，空间衰减时延来计算待测试天线的时延，天线时延测量方案框图详见图 12。

具体测量步骤如下。

- ① 使用相关仪器加电并充分预热。
- ② 按照图 13 所示，对使用线缆 1 和线缆 2 的时延进行标定，测试时延结果应扣除同轴转换器的时延，得到测试用线缆时延，结果记为 τ_{a1} 。

③ 测量两个天线几何中心之间的空间距离 R (满足远场辐射条件), 根据光速计算空间链路传播时延, 得到结果 τ_{a2} 。

④ 测量图 12 闭合回路总时延, 得到结果 $\tau_{a,all}$ 。

⑤ 待测天线时延 τ_a 采用公式 (12) 计算:

$$\tau_a = \tau_{a,all} - \tau_{a1} - \tau_{a2} - \tau_{a3} \quad (12)$$

式 (12) 中: τ_{a3} 为标准天线已知时延。

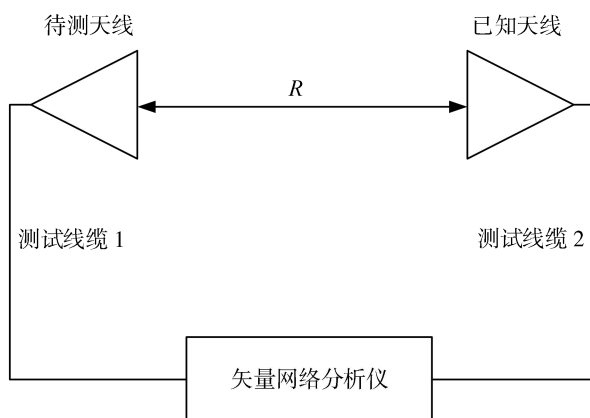


图 12 天线时延测量方案框图

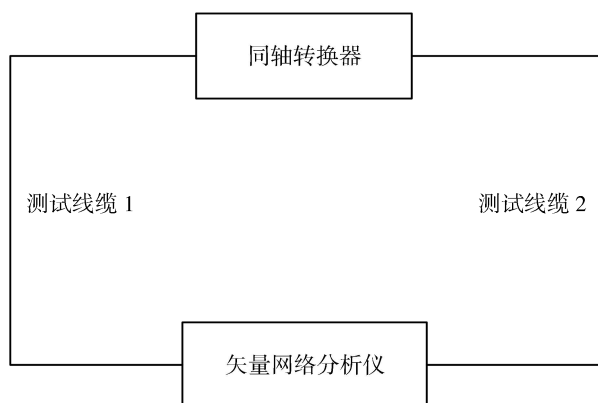


图 13 测试线缆时延标定框图

在上述天线时延测试过程的第 ③ 步, 空间距离 R 更为准确的测量是指天线相位中心之间的距离, 对于理想天线而言可用测量几何中心的方式替代, 但对于实际天线而言, 天线的几何中心与天线相位中心并不重合, 因此要想获得准确的空间链路时延, 需要对天线的等效相位中心进行测量。

等效相位中心可将天线收发等效为一个点, 通过该点到任意位置的相位差符合传播理论。测量方法如图 14 所示, 具体步骤如下。

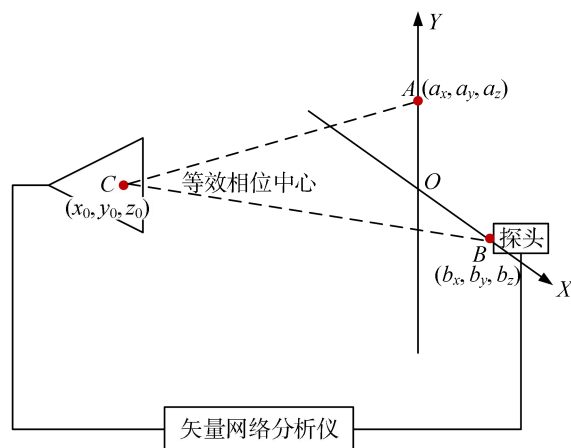


图 14 天线等效相位中心测量方法示意图

① 在已知坐标系中固定待测天线位置, 坐标记为 $C = (x_0, y_0, z_0)^T$ 。

② 使用同一个探头在 XOY 面已知坐标点进行移动, 通过矢网, 读取待测天线与波导的相位差, 记为 $\varphi_A = (\varphi_{A1}, \varphi_{A2}, \dots, \varphi_{An})^T$ 和 $\varphi_B = (\varphi_{B1}, \varphi_{B2}, \dots, \varphi_{Bn})^T$ 。

③ 根据传播理论, 有如下等式成立:

$$\left| \overrightarrow{A_n C} \right| - \left| \overrightarrow{B_n C} \right| = \frac{\varphi_{An} - \varphi_{Bn}}{360} \cdot \lambda \quad (13)$$

式 (13) 中: λ 为测试信号的波长。通过多次测量, 联立方程可以得到等效相位中心 C 点的坐标, 从而获取相对准确的空间距离传播时延。

为了进一步减小测试中带来的误差, 文献[28]对上述系统进行改进, 采用差分的思想尽可能减小测试过程中带来的误差项, 改进后的测试方法如图 15 所示。

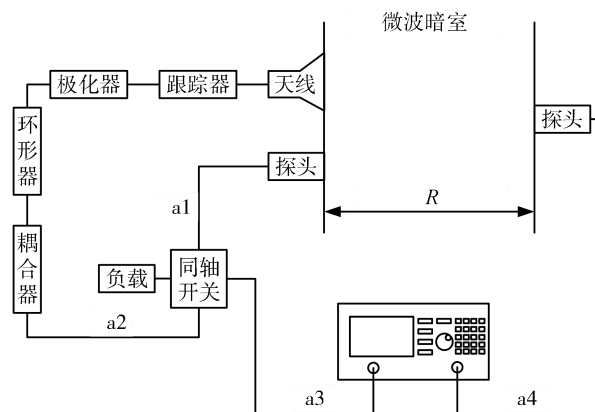


图 15 天线时延比较法测量原理框图

通过同轴开关来切换待测试喇叭天线或探头

组成闭合回路, 以此测量喇叭天线的时延, 具体步骤如下。

① 同轴开关切换至双探头回路, 测量得到时延 $\tau_{r1} = 2\tau_b + \tau_{a1} + \tau_s + \tau_{a3} + \tau_{a4}$ 。

② 同轴开关切换至待测天线回路, 测量得到时延 $\tau_{r2} = \tau_a + \tau_{a2} + \tau_s + \tau_{a3} + \tau_{a4} + \tau_b$ 。

① 和 ② 涉及的两式中: τ_a 为待测天线时延, τ_b 为波导探头时延, τ_s 为开关时延, $\tau_{a1\sim a4}$ 分别为线缆 a1~a4 的时延。

③ 两次测试作差, 得到待测天线时延 τ_a 为

$$\tau_a = (\tau_{r2} - \tau_{r1}) + \tau_b - (\tau_{a2} - \tau_{a1})。 \quad (14)$$

式(14)右侧各项时延均可通过测量获取, 从而计算得到天线时延。

此外, 仿造图 12 的系统构型, 使用两个同样规格的天线在暗室组成闭合回路, 扣除已知链路带来的时延以后, 除以 2 就是单个待测天线的时延。

3.2 误差分析

图 12 方法中, 天线时延测试误差主要来源于仪器的相位测量准确度, 空间时延的计算准确度等。在图 15 中, 因采用了差分思想, 消除了空间链路、接收波导探头、线缆等公共部分的测量误差, 且避免了冗余的标校工作, 使得测量准确度大大提高, 其测量误差主要来源于仪器相位测量准确度。

本文以两个 L 频段螺旋天线为测试样例, 对天线时延进行测量, 结果如表 3 所示。

表 3 L 天线时延测量结果

频率/MHz	天线系统时延/ns
1 176.45 (L5)	1.167
1 575.42 (L1)	1.134

表 3 的测量结果若保留两位有效数字, 则测试天线引入的相对时延均为 1.1 ns, 对应距离误差约为 0.33 m。可见, 若想获得更高精度的定位测量, 需在导航系统中预先标定天线时延, 并在解算中予以剔除。

4 总结及展望

卫星载荷信号发射时延主要由发射机内部信

号产生到天线输入端口的绝对时延以及发射天线输入至其等效相位中心的相对时延构成, 本文对时延定义及时延测量方法进行了综合性的阐述, 已有的典型测量结果表明无论是绝对时延还是相对时延, 在导航系统中均不能忽略。当前的测量手段主要停留在分段测量上, 且多数文章仅考虑单一时延的影响, 未能联合考虑。

针对当前时延测量存在的不足, 未来可以从以下几个方面入手, 完善测量方法, 提升测量精度。

① 综合时延测量方法, 考虑绝对时延和相对时延的联合测量;

② 对于常见线性器件的绝对时延测量, 形成时延误差查找表, 快速计算时延;

③ 分析器件老化率对时延测量的误差影响;

④ 利用差分测量系统进行时延测量, 消除线缆、仪器等公共部分对测量的影响;

⑤ 探索面向新型信号体制的发射时延测量方法。

参考文献:

- [1] ASCARRUNZ F G, JEFFERTS S R, PARKER T E. Earth station errors in two-way time and frequency transfer[J]. IEEE Transaction on Instrument and Measurement, 1997, 46(2): 205-208.
- [2] JONG G D, BEMMELEN R V. Evaluation and improvements of the calibration of a WSTFT station using SATSIM[C] // 34th Annual Precise Time and Time Interval(PTTI) Systems and Application Meeting, Reston: [s.n.], 2002: 391-404.
- [3] ASCARRUNZ F G, PARKER T E, JEFFERTS S R. Measurements of earth-station delay instabilities using a delay-calibration device[C] // IEEE Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, Besancon: [s.n.], 1999.
- [4] PLUMB J, LARSON K, WHITE J. Absolute calibration of a geodetic time transfer system[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(11): 1904-1911.
- [5] PETIT G, JIANG Z H, WHITE J, et al. Absolute calibration of an ashtech Z12-T GPS receiver[J]. GPS Solutions, 2001, 4(4): 41-46.

- [6] PLUMB J F, WHITE J, POWERS E, et al. Simultaneous absolute calibration of three geodetic-quality timing receivers[C]//33rd Annual Precise Time and Time Interval(PTTI) Systems and Application Meeting, Long Beach: [s.n.], 2002: 349-358.
- [7] PLUMB J, LARSON K M, WHITE J, et al. Absolute calibration of a geodetic time transfer system[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(11): 1904-1911.
- [8] LANDIS G P, WHITE J. Limitation of GPS receiver calibrations[C]//Proceedings of 34th Annual Precise Time and Time Interval(PTTI) Meeting, Manassas: ION, 2002: 325-332.
- [9] 魏海涛, 蔚保国, 李刚, 等. 卫星导航设备时延精密标定方法与测试技术研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2010, 40(5): 623-627.
- [10] 李刚, 魏海涛, 孙书良. 导航设备时延测量技术分析[J]. 无线电工程, 2011, 41(12): 32-35.
- [11] 张金涛, 易卿武, 王振岭, 等. 卫星导航设备收发链路时延测量方法研究[J]. 全球定位系统, 2011, 36(6): 25-27+40.
- [12] 林红磊, 牟卫华, 王飞雪. 卫星导航系统信号模拟器通道零值标定方法研究[J]. 导航定位学报, 2013(4): 61-64+83.
- [13] 谢维华, 陈娉娉, 孔敏. 北斗卫星导航系统用户终端时延标定方法[J]. 全球定位系统, 2016, 41(1): 32-36.
- [14] 朱江, 李振华. 卫星导航接收机时延测定技术研究[J]. 计量学报, 2019, 40(5): 910-913.
- [15] 李世光, 寇艳红, 杨军, 等. GNSS 信号模拟器通道群时延标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2328-2334.
- [16] 王鑫泷. 北斗三号时频传递设备硬件延迟测量的方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [17] 李星, 耿淑敏, 李垣陵. 双向时间同步系统的设备时延校准技术研究[J]. 中国空间科学技术, 2011, 31(4): 23-29.
- [18] 易卿武, 宋海涛. 基于矢量网络分析仪的信道链路标校方法[J]. 河北省科学院学报, 2013, 30(1): 58-63.
- [19] 黄承强, 杨旭海, 陈亮. 卫星双向时间比对的设备时延标定方法[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 273-279.
- [20] 马红皎, 李梦, 吴华兵, 等. 双向测距与时间同步系统中设备时延标定的研究[J]. 时间频率学报, 2015, 38(1): 30-37.
- [21] 崔小准, 米红, 李懿, 等. 一种全球定位系统卫星 C/A 信号通道绝对时延标定算法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(11): 5.
- [22] 崔小准, 米红, 刘崇华, 等. 基于数字包络检波的 RNSS 通道时延标定方法[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(3): 42-45.
- [23] 崔小准, 刘庆军, 米红, 等. 基于时分处理的 BOC 信号通道时延标定算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(9): 789-793.
- [24] 崔小准, 康成斌, 刘安邦, 等. 星间链路发射机时延零值的数字标定算法[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1044-1049.
- [25] 刘文山, 王瑛, 边郎. 基于分数时延滤波器的导航信号精密时延调整方法与实现[C]//第十四届中国卫星导航年会电子文集——S06 导航信号技术, 济南: 中国卫星导航年会组委会, 2024: 52-57.
- [26] 朱琳. GNSS 时间监测与性能评估方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2023.
- [27] 原亮, 王宏兵, 刘昌洁. 天线时延标定在卫星导航技术中的应用[J]. 无线电工程, 2010, 40(10): 32-34+49.
- [28] 黄旭峰, 王宇, 王金华. 微波暗室内的天线时延标定技术研究[C]//第三届中国卫星导航学术年会电子文集——S06 北斗/GNSS 测试评估技术, 广州: 中国卫星导航年会组委会, 2012: 141-144.
- [29] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B1I[S]. 3 版. 2019.
- [30] Global Positioning System Directorate. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces Specification-200M[S]. 2021.
- [31] Russian Institute of Space Device Engineering. GLONASS Interface Control Document(5.1st ed)[S]. 2008.
- [32] European Union. European GNSS Open Service Signal in Space Interface Control Document(2nd ed)[S]. 2021.
- [33] 高星伟. GPS/GLONASS 网络 RTK 的算法研究与程序实现[J]. 导航定位学报, 2003(2): 8.
- [34] LANDIS G P, WHITE J. Limitation of GPS receiver calibrations[C]//Proceedings of 34th Annual Precise Time

- and Time Interval(PTTI) Meeting, Manassas: ION, 2002: 325-332.
- [35] 冯富元. GPS 信号模拟源及测试技术研究和实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [36] BOULTON P, READ A, WONG R. Formal verification testing of Galileo RF constellation simulators[C] // Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation(ION GNSS 2007), Manassas: ION, 2007: 1564-1575.
- [37] GRUNERT U, THOELERT S, DENKS H, et al. Using of spirent GPS/Galileo HW simulator for timing receiver calibration[C]//Position, Location and Navigation Symposium, New York: IEEE/ION, 2008: 77-81.
- [38] PROIA A, CIBIEL G. Progress report of CNES activities regarding the absolute calibration method[C]//Proceedings of the 42th Annual Precise Time and Time Interval(PTTI) Systems and Applications Meeting, Manassas: ION, 2010: 541-556.
- [39] PROIA A, CIBIEL G, WHITE J, et al. Absolute calibration of GNSS time transfer systems: NR Land CNES techniques comparison[C] // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum(FCS), Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.