

Detection for Time Difference Rate by Measuring Phase Difference on Motion Platform

Tao Yu

Shanghai Research Institute of Microwave Equipment, Shanghai
Email: tyt0803@163.com

Received: Aug. 5th, 2013; revised: Aug. 13^h, 2013; accepted: Aug. 28th, 2013

Copyright © 2013 Tao Yu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: A new method for detection of time difference rate using short baseline array on airborne platform is presented by measuring the phase shift in multichannel way. The time difference expression based on phase difference measurement can be solved according to phase difference and time difference location equation. Further, the time difference rate based on phase difference measurement can be derived by differential and making use of the functional relationship between phase shift and Doppler shift. On the other hand, the time difference rate based on frequency difference measurement can be obtained if we do the differential analyzer for direction finding formula. The analog calculation validates that derived formula of time difference rate are all correct. The elementary error analysis shows that the measurement accuracy of time difference rate based on phase difference or frequency difference is higher for having the light velocity whose order of magnitude is enormous in denominator of formula. The major contribution in this paper is that the time difference rate on airborne platform can be in real time detected by phase interferometry with short-baseline array.

Keywords: Time Difference Rate; Phase Difference Location; Doppler Shift; Single Observer Passive Localization; Short Baseline

运动平台上时差变化率的相差检测

郁涛

上海微波设备研究所, 上海
Email: tyt0803@163.com

收稿日期: 2013年8月5日; 修回日期: 2013年8月13日; 录用日期: 2013年8月28日

摘要: 提出了一种利用机载短基线阵列, 以及通过多通道相移测量获得时差变化率的新方法。由相差与时差定位方程即可解出基于相差检测的时差表示式, 通过微分, 并利用相移与频移间的函数关系即可得到仅基于相差检测的时差变化率。另一方面, 如对测向公式进行微分运算, 则又可得到仅基于频差检测的时差变化率。模拟计算验证了所导出的时差变化率测算公式都是正确性的。初步的误差分析说明, 由于分母上具有量级很大的光速, 故基于相差或频差的时差变化率的检测应具有较高的测量精度。新方法将能用于解决在机载平台上时差变化率难以实时检测的问题。

关键词: 时差变化率; 相差定位; 多普勒频移; 单站无源定位; 短基线

1. 引言

最近的研究表明, 在单站无源定位中引入时差及

变化率将有助于提高定位精度, 且基于时差及变化率的无源定位方法具有对宽窄带信号均适用的优点^[1-4]。

但在一般情况下，时差变化率是一个需要通过时间序列的连续测量而间接得到的物理量，如此采样检测的方式将难以应用于运动平台对运动目标的实时探测。事实上，在机载单站短基线应用的情况下，对时差的测量即是一件很困难的事情。

本文基于相移与频移间的函数关系^[5]从理论上证明：机载站的时差及变化率可以间接通过相差测量而获得。同时基于对路程差的不同检测方式，通过对近似测向式的微分证明时差变化率亦可通过对频差的检测而获得。

2. 微分证明

2.1. 相差检测公式

如图 1 所示，设在运动平台上安置有一个双基阵列，阵列的间距为 d_i ，且基线的方向和运动平台的轴线平行。利用相位干涉仪对目标进行无源探测，如对应于每个径向距离 r_i ，鉴相单元所测得的相移是 ϕ_i ，则有基于相移测量的相差定位方程：

$$\Delta r_i = r_i - r_{i+1} = \lambda \left(n_i - n_{i+1} + \frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{2\pi} \right) \quad (1)$$

式中： Δr_i 为程差； r_i 为径向距离； n_i 为波长的整周数； ϕ_i 为鉴相单元所测得的相移。

另由时差定位方程得：

$$\Delta r_i = r_i - r_{i+1} = v_c \Delta t_i \quad (2)$$

式中： Δt_i 为时差； v_c 为光速。

两式联解，即可得到基于相差检测的时差测算式：

$$\Delta t_i = \frac{\lambda}{v_c} \left(\Delta n_i + \frac{\Delta \phi_i}{2\pi} \right) \quad (3)$$

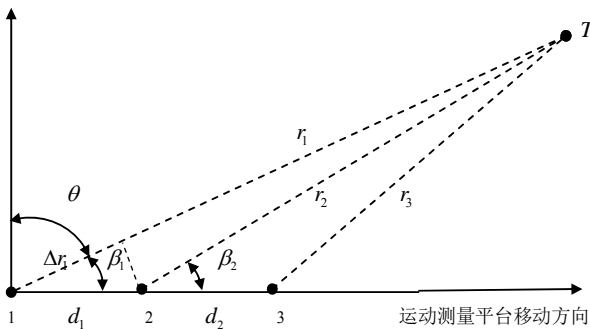


Figure 1. One dimensional double-baseline array on airborne platform

图 1. 机载一维双基线阵列

式中： $\Delta n_i = n_i - n_{i+1}$ 是程差所包含的波长整周数； $\Delta \phi_i = \phi_i - \phi_{i+1}$ 为两阵元之间的相位差。

进一步，在基于相差检测的时差表示式两边微分后有：

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial t} = \frac{\lambda}{2\pi v_c} \frac{\partial \Delta \phi_i}{\partial t} \quad (4)$$

利用相位变化率与相差之间的关系式^[6]：

$$\frac{\partial \Delta \phi}{\partial t} = 2\pi v \left[\left(\frac{\Delta n_i}{d_i} - \frac{\Delta n_{(i+1)}}{d_{(i+1)}} \right) + \left(\frac{\Delta \phi_i}{2\pi d_i} - \frac{\Delta \phi_{(i+1)}}{2\pi d_{(i+1)}} \right) \right] \quad (5)$$

即可得到基于相差检测的时差变化率为：

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial t} = \frac{\lambda v}{v_c} \left[\left(\frac{\Delta n_i}{d_i} - \frac{\Delta n_{(i+1)}}{d_{(i+1)}} \right) + \left(\frac{\Delta \phi_i}{2\pi d_i} - \frac{\Delta \phi_{(i+1)}}{2\pi d_{(i+1)}} \right) \right] \quad (6)$$

若基线相等则有：

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial t} = \frac{\lambda v}{v_c} \left[(\Delta n_i - \Delta n_{i+1}) + \frac{(\Delta \phi_i - \Delta \phi_{i+1})}{2\pi} \right] \quad (7)$$

2.2. 频差检测公式

对基本测向公式：

$$\sin \theta_i \approx \frac{\Delta r_i}{d_i}$$

如其所包含的程差是由时差测量确定的，则可得：

$$\Delta t_i \approx \frac{d_i}{v_c} \sin \theta_i \quad (8)$$

通过微分得到含有角速度的时差变化率：

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial t} = \frac{\omega_i d_i}{v_c} \cos \theta_i \quad (9)$$

如将程差看作是由径向距离之差确定的，则通过对基本测向公式微分，又可得到：

$$\omega_i \cos \theta_i \approx \frac{\lambda \Delta f_{di}}{d_i} \quad (10)$$

从中可解出角速度为：

$$\omega_i \approx \frac{\lambda \Delta f_{di}}{d_i \cos \theta_i} \quad (11)$$

代入式(9)，消去角速度，即得到仅基于频差测量的时差变化率：

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial t} = \frac{\lambda \Delta f_{di}}{d_i \cos \theta_i} \frac{d_i}{v_c} \cos \theta_i = \frac{\lambda \Delta f_{di}}{v_c} \quad (12)$$

2.3. 相对计算误差

根据图 1 所示的几何关系, 先预设中间阵元的径向距离 r_2 , 阵元间距 d , 并以图中所示一维阵列的中间阵元为到达角的测量起始基准, 使到达角 θ 在规定的区间内线性变化。随后, 利用三角函数依次解出其余的径向距离和前置角。

利用: $\omega_i r_i = v \cos \theta_i$, 将式(9)改写为:

$$\frac{\partial \Delta t_i}{\partial t} = \frac{\omega_i d_i}{v_c} \cos \theta_i = \frac{v d_i}{v_c r_i} \cos^2 \theta_i \quad (13)$$

将此时差表示式近似作为理论值, 用于和式(7)与(12)进行相对计算误差的比较。在此基础上, 一方面用向零方向取整函数求得各个径向距离的波长整周数:

$$n_1 = \text{FIX}(r_1/\lambda)$$

$$n_2 = \text{FIX}(r_2/\lambda)$$

$$n_3 = \text{FIX}(r_3/\lambda)$$

解出数值小于 π 的相移理论值:

$$\phi_1 = 2\pi(r_1/\lambda - n_1)$$

$$\phi_2 = 2\pi(r_2/\lambda - n_2)$$

$$\phi_3 = 2\pi(r_3/\lambda - n_3)$$

将 n_i 和 ϕ_i 的理论计算值代入式(7)即可解得基于相差检测的时差变化率。

另一方面, 利用多普勒频移公式: $\lambda f_d = v \cos \beta$, 解出对应于各个径向距离上的多普勒频移, 由此解出多普勒频差 Δf_d 。

图 2 给出了式(7)和(12)与近似理论值的比较结果, 由此验证了基于相差或频差检测的时差变化率的计算式都是正确的。同时, 从图中可见, 相差或频差检测的相对计算误差也是基本相同的。且模拟验证还表明, 选择第一、第二阵元间的频差用于测算能获得更小的相对计算误差。

2.4. 测量精度

设有:

$$F_\phi = \frac{\lambda v}{d v_c} \left[(\Delta n_1 - \Delta n_2) + \frac{(\Delta \phi_1 - \Delta \phi_2)}{2\pi} \right] \quad (14)$$

根据误差估计和合成理论, 通过对各个参量求偏

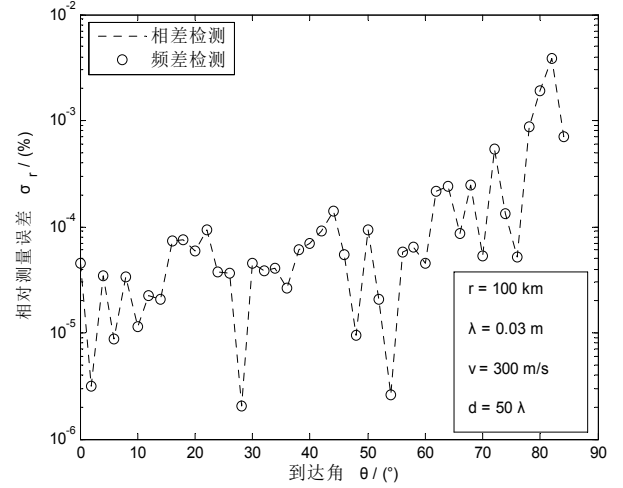


Figure 2. Relative calculation error based on detecting for phase and frequency difference
图 2. 基于相差与频差检测的相对计算误差

微分可求得的时差变化率测算公式中的各误差分量为:

$$\frac{\partial F_\phi}{\partial \Delta \phi_1} = \frac{\lambda v}{2\pi d v_c} \quad (15)$$

$$\frac{\partial F_\phi}{\partial \Delta \phi_2} = -\frac{\lambda v}{2\pi d v_c} \quad (16)$$

$$\frac{\partial F_\phi}{\partial v} = \frac{\lambda}{d v_c} \left[(\Delta n_1 - \Delta n_2) + \frac{(\Delta \phi_1 - \Delta \phi_2)}{2\pi} \right] \quad (17)$$

由相位差和速度所产生的绝对测量误差是:

$$\sigma_t = \sqrt{\left(\frac{\partial F_\phi}{\partial v} \sigma_v \right)^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial F_\phi}{\partial \Delta \phi_i} \sigma_\phi \right)^2} \quad (18)$$

式中: σ_v 为速度测量误差的均方根值, 分析计算时取 $\sigma_v = 0.1 \text{ m/s}$; σ_ϕ 为相位差测量误差的均方根值, 单位为弧度, 且一般工程测量可达到:

$$\sigma_\phi = (2 \sim 20)\pi/180 \text{ 弧度}.$$

从误差分量来看, 增加基线长度和降低运动速度都能降低测量误差, 但限于目前的技术水准, 基线长度的增加是很有限的。图 3 给出了不同飞行速度时的测量误差, 显然, 低速能获得更好的测量精度。

3. 结语

尽管短基线时差测量技术有了很大的进展, 但在机载短基线应用的情况下, 由于在短基线两端的时差很小, 故按现有的时差测量技术, 想不通过载机平台

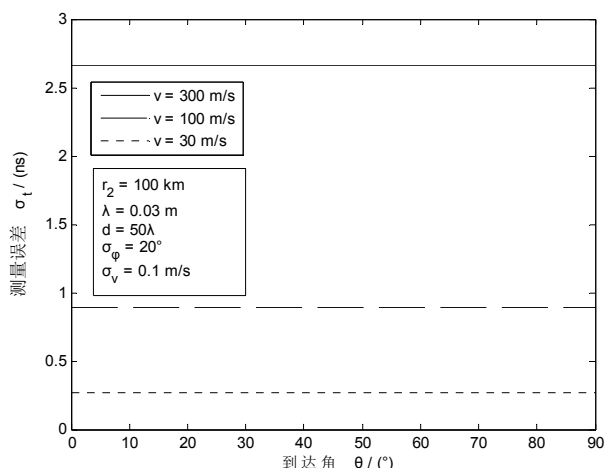


Figure 3. Measuring error for different flight speed
图 3. 不同飞行速度时的测量误差

的连续飞行获得时间序列，对时差变化率的实时检测还是难以实现的。同时，本文为验证所导出的公式是否正确时，仅是从理论计算上证明频差检测时差变化率公式的正确性，事实上，对于短基线应用，频差一般也是难以检测的。

显然，目前仅有相差测量方法适用于短基线应用，并且还是一种相当成熟的测量技术。如本文的探索研究是正确的，则就意味着采用相差测量技术即可

在机载平台上实现对时差变化率的实时检测。但本文的研究在目前还只是一种纯理论的分析，如何获得应用还有待继续努力，其中所存在的一个问题是相差测量方式一般仅能应用于检测窄带信号，这显然和时差及变化率可适用于宽带信号的特性是不一致的，这事实上也意味着基于相差测量获得时差变化率的工作方式可能并不适应对宽带信号的探测。

参考文献 (References)

- [1] 贾兴江, 郭福成, 周一宇. 基于短时时差序列的无源定位方法[J]. 航空学报, 2011, 48(2): 291-298.
- [2] 应文, 李冬海, 胡德秀. 一种基于时差变化率的单站无源定位方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(1): 27-30, 48.
- [3] 霍光, 李冬海. 一种对固定宽带辐射源的机载单站无源定位方法[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(4): 31-35.
- [4] 应文, 李冬海, 胡德秀. 基于时差和时差变化率的宽带信号单站无源定位方法[J]. 电子信息对抗技术, 2012, 27(2): 14-17.
- [5] T. Yu. Airborne passive localization method based on Doppler-phase interference measurement. In: I. Padron, Ed., Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy, InTech Publisher, Rijeka, 2012: 133-168.
- [6] 郁涛. 相位差变化率的多通道相移检测[J]. 国际航空航天科学, 2013, 1(1): 1-5.