

Method Obtaining Phase-Difference Rate by Multichannel Phase Difference Detection on Airborne Platform

Tao Yu

Shanghai Research Institute of Microwave Equipment, Shanghai
Email: 18001648180@163.com

Received: Apr. 15th, 2013; revised: May 7th, 2013; accepted: May 13th, 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: Based on the function relationship between phase shift and Doppler shift, this paper presents a new method obtained the phase-difference rate on airborne platform by measuring the phase shift in multichannel way. Firstly, the method that detects Doppler shift by measuring phase difference is described by making use of the mutually complementary relationship between the arrival angles obtained by direction finding based on phase interferometer and advance angle contained in Doppler shift equation. Further, the method detecting phase difference rate based on phase difference measurement is derived by differential for distance-phase difference equation. Meanwhile, it also proves theoretically that the phase difference rate can be obtained by frequency measurement. On this basis, according to the ranging method based on phase difference rate, this paper indirectly verified the correctness of the phase difference rate formula obtained based on the multi-channel phase difference measurement. Although the error analysis shows that the measurement accuracy obtained based on the multi-channel phase difference measurement is poor, multichannel phase detection can avoid the problem making measurement error worse since the space value of measured frequency difference is little and equivalent measuring time is shorter as compared with the measurement method of phase difference rate obtained by the frequency measurement based on two-channel phase demodulation. At the same time, because the phase difference rate can be obtained by single measurement in real time and the system dispenses with accumulating the adequate length of phase difference sequence by prolonging viewing time, there is no need to restrict the aircraft moving speed.

Keywords: Phase Difference Rate; Phase Difference Measurement; Doppler Shift; Airborne Passive Location

机载平台相差变化率的多通道相移检测

郁 涛

上海微波设备研究所, 上海
Email: 18001648180@163.com

收稿日期: 2013年4月15日; 修回日期: 2013年5月7日; 录用日期: 2013年5月13日

摘 要: 基于相移与频移间的函数关系, 提出了一种通过多通道相移测量获得机载平台相差变化率的新方法。首先, 利用在由相位干涉测向所给出的到达角与在多普勒频移方程中所包含的前置角之间的互余关系, 描述了频移的相差检测方法。然后进一步通过对距离-相差方程的微分导出了相差变化率的多通道相差检测方法, 并同时亦从理论上证明了相位变化率是可通过测频而获得。在此基础上, 由相差变化率测距的方法间接验证了基于多通道相差测量的相差变化率的计算公式的正确性。尽管误差分析表明基于多通道相差测量所获得的相差变化率的测量精度还较差, 但与通过双通道鉴相测频获取相位差变化率的测量方法相比, 多通道相差检测可避免因被测量的频差间隔太小, 等效测量时间很短, 使测量误差变得很大的问题。同时, 多通道相差检测的优点还在于一次测量即可实时获得相差变化率, 因无需通过延长观察时间来积累足够的相位差序列的长度, 故无需

限定载机的运动速度。

关键词：相差变化率；相差测量；多普勒频移；机载无源定位

1. 引言

相位差变化率可用于机载无源定位^[1]，目前，对相位差变化率的测量主要有两大类^[2]，一类是通过相位差序列获得的，现有的提取方法主要有差分、卡尔曼滤波及线性拟合等^[3]。另一类是通过间接测量两个比较通道鉴相输出的频差来推算出相差变化率^[4-6]。

前一类方法必须通过连续多次测量以得到足够可用的相位差序列，并需要通过延长观测时间来提高测量精度，且有可能使所得到的相位差不是线性变化的。后一类方法在机载短基线应用的情况下，因可被测量的频差间隔值太小，等效测量时间很短，从而使测量误差变得很大，由此使推算得出的相差变化率的精度难以提高。

本文基于相移与多普勒频移之间的数学融合证明^[7,8]，利用机载短基线直线阵列，通过多通道相移检测即能实时获得相差变化率。

2. 频移的相差检测

2.1. 相差定位方程

设在机载测量平台上安置有一个单基线两单元天线阵列，如图 1 所示，阵列的间距为 d ，且基线的方向和载机的轴线平行。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距离公式：

$$r_i = \lambda \left(n_i + \frac{\phi_i}{2\pi} \right), \quad (i=1,2) \quad (1)$$

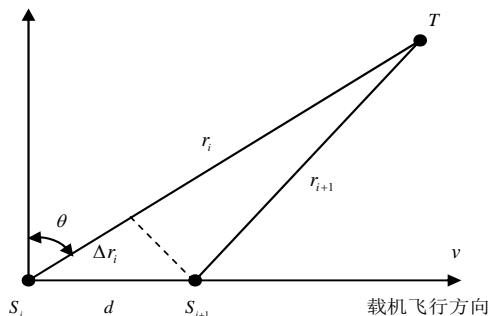


Figure 1. Airborne single baseline array
图 1. 机载单基线阵列

式中： n_i 为在径向距离上的波长整数周。

在直线阵列的各个阵元处所接收到的多普勒频移是：

$$\lambda f_{di} = v \cos \beta_i \quad (2)$$

式中： f_{di} 是多普勒频移； v 是载机的飞行速度； β_i 为前置角。

根据相移 - 距离关系(1)，即能得到在形式上与相差定位方程完全相类似的相差定位方程：

$$\begin{aligned} \Delta r_i = r_i - r_{i+1} &= \lambda \left(n_i - n_{i+1} + \frac{\phi_i - \phi_{i+1}}{2\pi} \right) \\ &= \lambda \left(\Delta n_i + \frac{\Delta \phi_i}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

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

2.2. 频移的相差检测

根据电波近似平行入射假设所得到的相移干涉测向公式为：

$$\sin \theta \approx \frac{\Delta r_i}{d} = \frac{\lambda}{d} \left(\Delta n_i + \frac{\Delta \phi_i}{2\pi} \right) \quad (4)$$

式中： θ 为目标到达角； d 为相位干涉仪的天馈阵列的基线长度。

因： $\cos \beta = \sin \theta$ ，故将基于相差检测的前置角余弦代入多普勒频移式(2)，即能得到基于相差测量的多普勒频移计算公式：

$$f_{di} = \frac{v}{d} \left(\Delta n_i + \frac{\Delta \phi_i}{2\pi} \right) \quad (5)$$

3. 相差变化率的相差检测

3.1. 相移变化率的频移与相差检测

如在相移 - 距离表示式(1)两边对时间微分，则有：

$$\frac{\partial r_i}{\partial t} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \quad (6)$$

由径向距离变化率与多普勒频移间的关系：

$$\frac{\partial r_i}{\partial t} = v_{ri} = \lambda f_{di} \quad (7)$$

可证得:

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = 2\pi f_{di} \quad (8)$$

即相移变化率可以通过对多普勒频移的测量而确定,且根据频移与相差之间的关系,其基于相差测量的检测公式为:

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = 2\pi f_{di} = \frac{2\pi v}{d} \left(\Delta n_i + \frac{\Delta \phi_i}{2\pi} \right) \quad (9)$$

3.2. 相差变化率的频差与相差检测

如在相位差 - 距离差的关系式(3)两边对时间微分,则有:

$$\frac{\partial \Delta r_i}{\partial t} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \Delta \phi_i}{\partial t} \quad (10)$$

由径向距离变化率与多普勒频移间的关系(7),即可证得,相位差变化率能通过对多普勒频差的检测而获得:

$$\frac{\partial \Delta \phi_i}{\partial t} = 2\pi \Delta f_{di} \quad (11)$$

式中: $\Delta f_{di} = f_{di} - f_{d(i+1)}$ 。

事实上,根据现有的电路设计方法,相位变化率就是通过测频而获得的,并且,根据本文的分析结果,所检测的实质上应该就是两接收通道之间的多普勒频差值。

进一步,又根据多普勒频移与相位变化率之间的关系(8)可知,对应于某一个径向距离的多普勒频移值实际上需要由两个相移值的差分才能得到,于是为获得多普勒频差就需要同时检测三个相移值,即从测量的实现方法上就需要采用如图2所示的一维三单元直

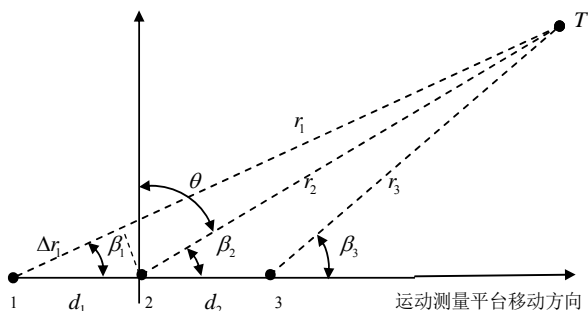


Figure 2. Airborne Doppler-phase interference array with one-dimensional double-baseline

图2. 机载一维双基线多普勒-相位干涉阵列

线阵列。

直接利用相移变化率与频移间的关系式(8),以及频移与相差之间的关系式(5),可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \phi}{\partial t} &= \frac{\partial \phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \\ &= 2\pi \left(f_{d1} - f_{d(i+1)} \right) \\ &= \frac{2\pi v}{d_i} \left(\Delta n_i + \frac{\Delta \phi_i}{2\pi} \right) - \frac{2\pi v}{d_{(i+1)}} \left(\Delta n_{(i+1)} + \frac{\Delta \phi_{(i+1)}}{2\pi} \right) \\ &= 2\pi v \left[\left(\frac{\Delta n_i}{d_i} - \frac{\Delta n_{(i+1)}}{d_{(i+1)}} \right) + \left(\frac{\Delta \phi_i}{2\pi d_i} - \frac{\Delta \phi_{(i+1)}}{2\pi d_{(i+1)}} \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

对于双基线等距直线阵列,即当: $d = d_1 = d_2$ 时,有:

$$\frac{\partial \Delta \phi}{\partial t} = \frac{2\pi v}{d} \left[(\Delta n_{12} - \Delta n_{23}) + \left(\frac{\Delta \phi_{12}}{2\pi} - \frac{\Delta \phi_{23}}{2\pi} \right) \right] \quad (13)$$

为清晰起见,式中参量的下脚标已采用对应于基线两端标号的双数字表示。

4. 模拟验证

利用基于相差变化率测距的概念间接验证了本文所导出的基于相差测量的相差变化率的正确与准确性。通过对相移干涉测向公式的微分可得到:

$$\omega \cos \theta = \frac{\lambda}{2\pi d} \frac{\partial \Delta \phi}{\partial t} \quad (14)$$

因: $\omega = \frac{v \cos \theta}{r}$, 解出测距式:

$$r = \frac{2\pi d v \cos^2 \theta}{\lambda \frac{\partial \Delta \phi}{\partial t}} \quad (15)$$

按图2的几何关系,分别将基于相差检测的方位角和相差变化率表示式代入(15),得目标至天线阵列的中间阵元的径向距离:

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{2\pi d v \cos^2 \theta}{\lambda \frac{\partial \Delta \phi}{\partial t}} \\ &= \frac{d^2}{\lambda} \frac{\left[1 - \left(\frac{\lambda}{d} \right)^2 \left(\Delta n_{12} + \frac{\Delta \phi_{12}}{2\pi} \right)^2 \right]}{\left[(\Delta n_{12} - \Delta n_{23}) + \left(\frac{\Delta \phi_{12}}{2\pi} - \frac{\Delta \phi_{23}}{2\pi} \right) \right]} \end{aligned} \quad (16)$$

通过预设径向距离 r_2 、波长 λ 、天馈阵列的基线

长度 d ，并使方位角 θ_2 在规定的区间内线性变化，即可逐次解出其余的径向距离，随后，用向零方向取整函数求得各个径向距离的波长整周数：

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

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

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

然后，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(16)解出径向距离 r_2 的测算值，并将测算值和理论值进行比较可给出测距公式的准确性，由此间接得到相差变化率的准确度。图 3 给出了不同短基线长度时径向距离的相对计算误差曲线，所用参数亦在图中标注，注意测距表示式与速度是无关的。

5. 误差分析

根据误差估计理论，由相差和速度测量误差所产生的相差变化率的测量误差是：

$$\sigma_p = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial v} \sigma_v\right)^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial u}{\partial \Delta \phi_{i(i+1)}} \sigma_\phi\right)^2} \quad (17)$$

式中： $u = \frac{\partial \Delta \phi}{\partial t}$ 为相差变化率； 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，取 $\sigma_\phi = 20\pi/180$ ，单位为弧度。

相差变化率对各个相差的偏微分为：

$$\frac{\partial u}{\partial \Delta \phi_{12}} = \frac{v}{d} \quad (18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \Delta \phi_{23}} = -\frac{v}{d} \quad (19)$$

对速度的偏微分是：

$$\frac{\partial u}{\partial v} = \frac{2\pi}{d} \left[(\Delta n_{12} - \Delta n_{23}) + \left(\frac{\Delta \phi_{12}}{2\pi} - \frac{\Delta \phi_{23}}{2\pi} \right) \right] \quad (20)$$

图 4 给出了在不同基线长度时的相差变化率的测

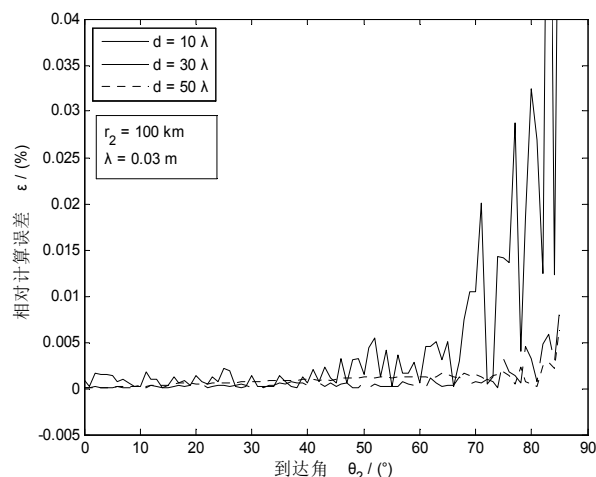


Figure 3. Relative calculate error of ranging
图 3. 测距相对计算误差

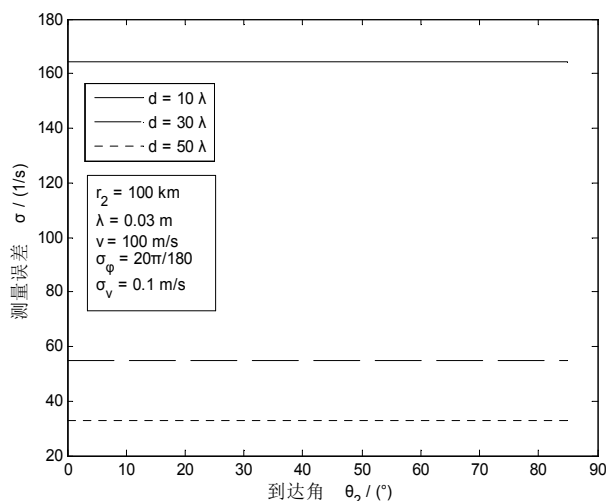


Figure 4. Measuring error for phase difference rate at the different baseline
图 4. 不同基线时的相差变化率测量误差

量误差，从中可看到，相差变化率的测量误差主要由测量相差的误差所决定，当速度和基线长度都为定值时，在整个到达角的变化范围内，相差变化率的测量误差基本上是一个常数。由于直接和速度成正比，基于相差检测的相差变化率的测量误差是比较大的。增加基线的长度或降低飞行速度都能有效降低测量误差，显然，从数学表示式即可看出，降低相差变化率测量误差的另一个有效途径是提高相差的测量精度。仿真计算时所采用的参数已在图中标示。

6. 结语

尽管初步的误差分析表明基于多通道相移测量

来检测相差变化率方法的测量误差比较大,但从工程应用的角度来看,在短基线应用的情况下,测相移比测频移更有利于提高测量精度,与通过双通道鉴相测频获取相位差变化率的测量方法相比,避免了因被测量的频差间隔值太小,等效测量时间很短,使测量误差变得很大的问题。

此外,其所具有的优点还在于实时性更好,理论上一次探测即可获得相位差变化率,与通过检测相位差序列获得相位差变化率的测量方法不同,其无需通过延长观察时间来提高测量精度。事实上,一旦观测时间较长时,相位差就有可能不是线性变化的。进一步,因测量基本上是实时的,无需通过延长观察时间来积累足够的相位差序列的长度,故无需限定载机作匀速直线运动。

参考文献 (References)

- [1] 孙仲康. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 黄登才, 丁敏. 测相位差变化率无源定位技术评述[J]. 现代雷达, 2007, 29(8): 32-34,51.
- [3] 朱伟强, 黄培康, 马琴. 基于相位差变化率测量的单站定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2108-2111.
- [4] 邓新蒲, 祁颖松. 相位差变化率的测量方法及其测量精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 20-23.
- [5] 万方, 丁建江, 郁春来. 一种雷达脉冲信号相位差变化率测量的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6): 1257-1260, 1304.
- [6] 曾催. 相位差变化率的测量方法[J]. 航天电子对抗, 2003, (6): 36-38.
- [7] 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, 2012: 133-168.
- [8] 郁涛. 机载平台相对角速度的相移检测法[J]. 天线学报, 2012, 1(2): 18-21.