

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.024

## 干涉仪相位差抖动分析

孔德强<sup>1,3</sup>, 刘作学<sup>2</sup>, 田战丽<sup>4</sup>

(1. 装备指挥技术学院 研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 信息装备系, 北京 101416;  
3. 中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066001; 4. 秦皇岛富通电子, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 相位差的准确度直接关系到干涉仪测向的准确性, 并影响整个测向系统的测向精度。在介绍干扰仪测向原理的基础上, 着重分析了莱斯因子和采样速度对相位差抖动的影响, 阐述了测向系统选址的基本原则。理论推导与仿真结果表明, 相位差的抖动随莱斯因子增大而减小; 数字化对信号相位差抖动的影响随采样频率的提高而减小。

**关键词:** 电子对抗; 干涉仪测向; 误差分析

**中图分类号:** TP302.7 **文献标识码:** A

## Analysis on Interferometer Phase Difference Vibration

KONG De-qiang<sup>1,3</sup>, LIU Zuo-xue<sup>2</sup>, TIAN Zhan-li<sup>4</sup>

(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;  
2. Dept. of Information Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;  
3. No. 91404 Unit of PLA, Qinhuangdao 066001, China; 4. Qinhuangdao Futong Electron, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** The accuracy of the phase difference is directly related to the accuracy of the interferometer and the entire system. Introduced the basic principles of the interferometer direction finder, based on analyzing the effects of rice factor to the phase jitter, expatiated the basic principles of site selection theoretically. The theoretical derivation and simulation result shows that the phase difference decreased when rice factor improving. The digital influence on phase difference decreased when sampling frequency improving.

**Keywords:** Electronic countermeasures; Interferometer direction finder; Error analysis

### 0 引言

在测向体制中, 基于相位测量的干涉仪技术具有测向精度高、算法简单、速度快等优点, 广泛应用于电子对抗装备中。干涉仪法测向的实质是利用无线电波在测向基线上形成的相位差来确定来波方向, 系统的关键是保证相位差的准确性和精确性。天线与接收机之间的不平衡性以及接收机的内部噪声等都会产生附加相移<sup>[1]</sup>。故着重分析莱斯因子和采样速率对相位差抖动的影响, 以减少相位差抖动。

### 1 莱斯因子对相位差的影响

在测向系统的实际应用场合, 多径效应是影响测向精度的重要因素。测向的基本要求是接收的信号中有直射波或占主导地位的反射或绕射波, 此时合成多径信号的相位概率密度函数为<sup>[2]</sup>:

$$p_{\theta}(\theta|\theta_0) = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{r_s^2}{\sigma^2}\right] + \frac{r_s \cos(\theta_0 - \theta)}{2\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{r_s^2 \sin^2(\theta_0 - \theta)}{2\sigma^2}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{r_s \cos(\theta_0 - \theta)}{\sigma}\right)\right] \quad (1)$$

其中,  $\sigma^2$  为多径干扰项的功率;  $r_s^2$  为主信号功率,  $\theta_0$  为主信号的初始相位,  $\operatorname{erf}(\cdot)$  为误差函数。

定义莱斯因子为主分量相对于多径分量的功率比, 是莱斯统计模型的核心参数<sup>[3-5]</sup>, 表示为  $K = r_s^2 / \sigma^2$ , 则:

$$p_{\theta}(\theta|\theta_0) = \frac{1}{2\pi} \exp[-K] + \frac{\sqrt{K} \cos(\theta_0 - \theta)}{2\sqrt{\pi}} \exp[-K \sin^2(\theta_0 - \theta)] \left[1 + \operatorname{erf}\left(\sqrt{K} \cos(\theta_0 - \theta)\right)\right] \quad (2)$$

当  $K \gg 1$  时, 接收信号相位将与主信号一致, 多径信号对主信号相位的扰动较小 (即  $\theta - \theta_0$  较小), 又由于  $X \rightarrow \infty$  时, 误差函数满足  $\operatorname{erf}(x) \rightarrow 1$ <sup>[6]</sup>, 所以相位的条件概率可以简化为:

$$p_{\theta}(\theta) \approx \sqrt{\frac{K}{\pi}} \exp[-K(\theta - \theta_0)^2] \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 接收相位服从  $N(\theta_0, 1/2K)$  的概率分布。对于相位测向系统, 假设各天线单元接收测向信号相互独立, 信号相位分别服从参数为  $N(\theta_0, 1/2K)$ 、 $N(\theta_0', 1/2K)$  的正态分布, 由二维变量的函数分布的相关知识可知, 两天线接收信号的相位

收稿日期: 2009-07-24; 修回日期: 2009-08-31

作者简介: 孔德强 (1982-), 男, 河南人, 装备指挥学院在读硕士研究生, 助理工程师, 从事通信对抗、无线电传播及无源定位等研究。

差服从参数为  $N(\theta_0-\theta'_0, 1/2K)$  的正态分布<sup>[7]</sup>, 即:

$$p_{\Phi}(\theta/\Phi) \approx \sqrt{K}/\sqrt{2\pi} \exp\left[-K(\theta-\Phi)^2/2\right] \quad (4)$$

其中,  $\Phi=\theta_0-\theta'_0=2\pi l \sin\theta/\lambda$ , 为干涉仪测向公式。当  $K$  取不同值时, 对相位差的概率分布进行仿真, 如图 1。

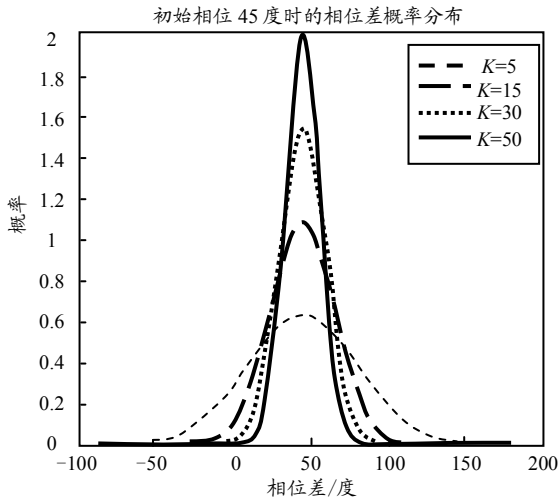


图 1 不同  $K$  值对应的相位差的概率分布

由图 1 可知,  $K$  值越大, 测得的相位差抖动越小。因此, 在测向设备选址时应考虑环境对信道莱斯因子的影响, 选择地势平坦开阔、周围无障碍物的地方, 以降低测向系统周围环境对电波传播信道的不良影响, 增大接收信号中直射分量的比重, 使  $K$  值较大, 从而减小相位差的抖动。

## 2 采样速率对相位差的影响

设由路径差  $\Delta R$  引起的时延为  $\tau$ , 设采样间隔为  $\Delta t$ , 则两通道信号分别为:

$$x_1(n) = s(n\Delta t) \quad (5)$$

$$x_2(n) = s(n\Delta t - \tau) \quad (6)$$

2 个天线的信号时延表示为  $\tau=m\Delta t+\Delta\tau$ , 则式 (6) 可变为:

$$x_2(n) = s(n\Delta t - (m\Delta t + \Delta\tau)) \quad (7)$$

其中,  $m$  为正整数,  $\Delta\tau < \Delta t$ , 对式 (5)、式 (7) 做离散傅立叶变换得<sup>[8]</sup>:

$$X_1(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp\left(-i\frac{2\pi}{N}kn\right) \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (8)$$

$$X_2(k) \approx \exp\left(-j2\pi\frac{k\tau}{N\Delta t}\right) \exp\left(j2\pi\frac{k\tau}{N\Delta t}\right) \quad (9)$$

$$\left(\left(1-\frac{|\Delta\tau|}{\Delta t}\right) + \frac{|\Delta\tau|}{\Delta t} \exp\left(-j2\pi\frac{k\text{sign}(\Delta\tau)}{N}\right)\right) X_1(k)$$

其中,  $N$  为采样点数,  $k$  为信号频率。令:

$$X(k) = \exp\left(j2\pi\frac{k\tau}{N\Delta t}\right) \left(\left(1-\frac{|\Delta\tau|}{\Delta t}\right) + \frac{|\Delta\tau|}{\Delta t} \exp\left(-j2\pi\frac{k\text{sign}(\Delta\tau)}{N}\right)\right) \quad (10)$$

则式 (9) 可表示为:

$$X_2(k) = \exp\left(-j2\pi\frac{k\tau}{N\Delta t}\right) X(k) X_1(k) \quad (11)$$

对式 (11) 两边取相位, 得:

$$\Phi(X_2(k)) - \Phi(X_1(k)) = -2\pi\frac{k\tau}{N\Delta t} + \Phi(X(k)) \quad (12)$$

由于两天线接收信号的相位差可表述为  $-2\pi k\tau/N\Delta t$ , 因此, 数字化引起的相位差抖动为  $\Phi(X(k))$ , 结合式 (10), 得:

$$\Phi(X(k)) = 2\pi f \frac{k\Delta\tau}{N\Delta t} + \arctan\left(\frac{-\text{sign}(\Delta\tau) \frac{|\Delta\tau|}{\Delta t} \sin 2\pi \frac{k}{N}}{1 - \frac{|\Delta\tau|}{\Delta t} + \frac{|\Delta\tau|}{\Delta t} \cos 2\pi \frac{k}{N}}\right) \quad (13)$$

令  $1/f=k/N$ ,  $f$  表示采样频率与信号频率的比值;  $\rho=\Delta\tau/\Delta t$ , 式 (13) 可变为:

$$\Phi(X(k)) = \Phi(f, \rho) = 2\pi f \rho - \arctan\left(\frac{\rho \sin 2\pi / f}{1 - |\rho| + |\rho| \cos 2\pi / f}\right) \quad (14)$$

对不同的采样倍数, 相位差抖动与  $\rho$  的关系如图 2。

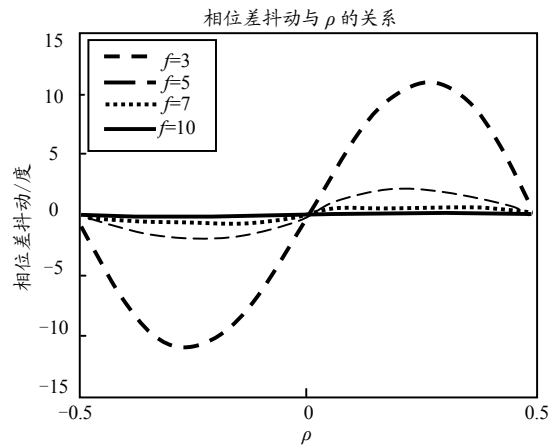


图 2 数字化引起的相位差抖动

由图 2 可知, 随着采样频率的提高, 数字化对测向误差的影响减小, 10 倍采样时数字化引起的误差就可以忽略; 当采样间隔能够被时延整除时, 数字化引起的相位差误差最小。

若两天线的路径差为 3 m, 引起的时延  $\tau=10^{-8}$  s, 工程应用中的采样间隔一般大于  $10^{-8}$  s, 由此判定  $\tau = \Delta\tau < \Delta t$ , 设信号带宽 100 kHz, 采样倍数  $f$ , 则采样间隔为  $\Delta t=1/(100k * f)$ , 得:

$$\rho = \Delta\tau / \Delta t = 10^{-8} / (100k * f) \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14), 可得采样倍数与数字化引起的相位差抖动的关系, 如图 3。

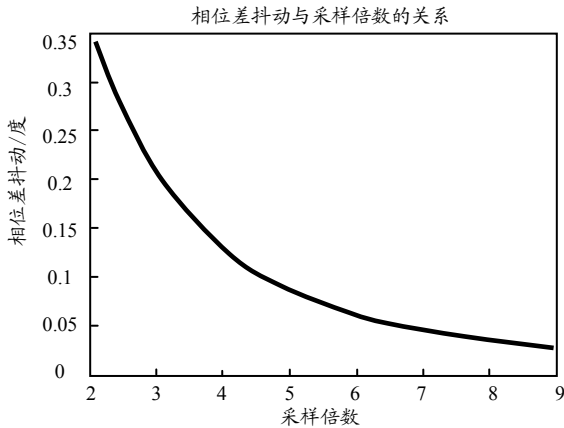


图 3 采样率与数字化造成的相位差抖动的关系

由图 3 可知, 随着采样倍数的提高, 数字化引起的相位差抖动减小。在工程应用中, 采样倍数的选取需要结合系统其它指标综合考虑。

### 3 结束语

通过理论推导与仿真结果表明: 1) 相位差的抖动随莱斯因子增大而减小, 由此得出系统选址的基

\*\*\*\*\*

(上接第 73 页)

航空相机综合控制系统向相机传送的数据字包括 2 大类: 一类为控制字, 一类为飞机的状态字。控制字只需严格按相机和侦察任务管理系统通信协议编码即可。由于该控制系统的飞机状态字为仿真数据, 只能遵照协议编写, 这些状态字的编码格式有 BCD 码和 BNR 码 2 种。BCD 码格式如表 2, 其

表 2 BCD 码数据字格式

32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	1		
P	SSM		字符 1				字符 2				字符 3				字符 4				字符 5				SDI	LABEL			

表 3 BNR 码数据字格式

32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	1				
P	SSM	MSB																						LSB	SDI	LABEL			

### 4 结论

经整机调试, 该系统运行可靠, 外场条件下完全可替代各厂家所生产的专用检查仪, 减少了航空相机保障设备的数量; 可以同时检测侦察任务舱内的多台相机, 提高了检测效率; 由于采用可视化的操作界面, 全中文信息显示, 整个检测过程只需单击鼠标即可完成, 因而操作简单, 使用方便; 当相机发生故障时, 信息窗口给出提示, 此时可单击按钮查看详细故障信息, 同时将故障信息自动保存在文件中, 供相关人员查阅。为了减少人的参与程度,

本原则; 2) 数字化对信号相位差抖动的影响随采样频率的提高而减小。

### 参考文献:

- [1] 吴宝东, 陈舒. 基于相位干涉仪测向系统的相位误差分析[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(3): 74-76.
- [2] 罗冰, 郭立. 多径衰落条件下两种常规测向方法的误差分析[J]. 航空电子技术, 2006, 37(1): 1-5.
- [3] Yunfei Chen, Beaulieu, N.C. Maximum likelihood estimation of the K factor in Ricean fading channels[J]. Communications Letters, IEEE, Dec. 2005: 1040-1042.
- [4] Greenstein, L.J., Michelson, D.G., Erceg, V. Moment-method estimation of the Ricean K-factor. Communications Letters, IEEE, 1999, 3(6): 175-176.
- [5] Ghasem Azemi, Alireza Naimi. Moment-based Ricean K-factor estimation in the presence of shadowing[J]. Signal Processing and Its Applications, 2007. ISSPA 2007. 9th International Symposium on. Feb. 2007.
- [6] 图马, 欧阳芳锐, 张玉平. 工程数学手册 (第 4 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 452-453.
- [7] 胡细宝, 王丽霞. 概率论与数理统计[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001: 117-124.
- [8] 王国华, 李长满, 许剑锋. 数字化宽带测向系统中的相位差测量及误差分析[J]. 电子技术, 2009(1): 61-64.

数据区为 11-29 位, 分成 5 段, 最高位十进制数只含 3 位二进制, 因此其最大值为 7, 其余均包含 4 位。BNR 码格式如表 3, 数据区为 11-29 位, 29 位 (MSB) 为最高位, 当该位为 1 时, 代表其值为该数据字对应的参数最大值的 1/2, 从高位依次往下所代表的含义都是其前一位的 1/2, 按着此原则编写数据字即可。

提高软件的工作效率, 下一步, 将增加相关的声光报警和信息提示, 争取实现检测“一键操作”。

### 参考文献:

- [1] 王勇, 于宏坤. 机载计算机系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 94-97.
- [2] 赵育良, 张国栋. 基于 ARINC429 总线的某型 CCD 航空相机总线数据接口板[J]. 兵工自动化, 2008, 27(8): 7-8.
- [3] ARINC Protocol Tutorial. ARINC429 Tutorial [Z/OL]. Condor Engineering, 2002. <http://www.condoreng.com>
- [4] AEC429-PCI/CPCI 用户手册[Z]. 北京神州飞航科技有限责任公司, 2008.