

数字式相位差测量方法及精度分析*

邓新蒲, 卢启中, 孙仲康

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 相位差变化率是最近提出的用于快速无源定位的观测量。该文研究相位差的高精度测量方法,提出了一种正交双通道数字式的相位差测量方法。通过对信号频谱的分析,计算了测量系统输出的信噪比,从而得出了相位差测量的理论精度,随后进行仿真分析验证了理论精度。理论分析和仿真实验证明,论文提出的方法可以实现高精度的相位差测量。

关键词 无源定位; 相位干涉仪; 雷达信号处理; 相位差测量; 精度分析

中图分类号 :TN95 **文献标识码** :A

Digital Measuring for Phase Difference of Interferometer

DENG Xin-pu, LU Qi-zhong, SUN Zhong-kang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract : By employing the new measurement information—rate of phase difference measured by two-element antenna array (interferometer), a passive location systems can find the position of enemy emitters more quickly with higher precision. The accuracy of phase difference is critical to this passive location system. A digital method for measuring it is presented. Spectral analysis on the signals in the measuring system is given, and the signal to noise rate is calculated, then the theoretical accuracy of phase difference is derived. The accuracy is also verified by the simulation results given in the paper.

Key words : passive localization; interferometer; radar signal processing; phase difference measuring; accuracy analysis

用运动平台上携带的二单元天线阵(干涉仪),可以获得威胁辐射源辐射波的相位差。利用此相位差及其变化率可实现对固定和运动的辐射源的定位与跟踪^[1]。精确的相位差测量是保证快速与高精度定位与跟踪的关键^[2]。

1 相位差测量原理

如图 1 所示,干涉仪的二天线输出信号为 E_1 、 E_2 ,经接收放大后进行混频和滤波,输出的中频信号分别为 Q_1 和 I_2 。

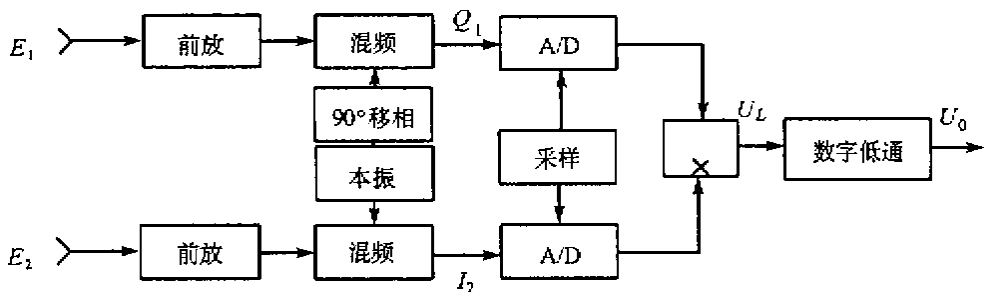


图 1 相位差测量原理

Fig.1 Principle of measuring for phase difference

* 收稿日期:2002-04-08
基金项目:国家部委基金资助项目(2000J7.2.9KG0114)
作者简介:邓新蒲(1966—)男,讲师,博士。

对于同一辐射源信号,到达二天线的信号 E_1 、 E_2 因路程差而引起相位不同,不妨设它们的幅度相同:

$$E_1 = U \sin(\omega_T t + \phi_1) + v_1 \tag{1}$$

$$E_2 = U \sin(\omega_T t + \phi_2) + v_2 \tag{2}$$

其中 ω_T 是天线接收到的辐射源信号频率, U 是信号幅度, v_1 、 v_2 是测量噪声, ϕ_1 、 ϕ_2 是信号相位。

对两路信号进行混频的本振信号相位相差 90° , 因此两个中频信号 Q_1 和 I_2 可表示为

$$Q_1 = U_m \sin(\omega_I t + \varphi_1) + n_1 = S_1 + n_1 \tag{3}$$

$$I_2 = U_m \cos(\omega_I t + \varphi_2) + n_2 = S_2 + n_2 \tag{4}$$

其中 ω_I 是中频频率; n_1 、 n_2 是叠加在信号上的带限白噪声,其带宽为中频带宽 B_I ; U_m 是辐射源信号的视频包络。 $\phi = \varphi_1 - \varphi_2 = \phi_1 - \phi_2$ 是信号 E_1 、 E_2 间的相位差。

信号 S_1 、 S_2 如图 2 所示,其频谱与噪声 n_1 、 n_2 功率谱分别如图 3、4 所示(设信号的长度为无穷)

图 3 中 $n = PW/PRI$ 是视频包络 U_m 的占空比。

Q_1 和 I_2 经 A/D 变换后的输出分别为

$$Q_{1k} = U_{mk} \sin(k \cdot \omega_I / F_s + \varphi_{1k}) + n'_{1k} = S_{1k} + n'_{1k} \tag{5}$$

$$I_{2k} = U_{mk} \cos(k \cdot \omega_I / F_s + \varphi_{2k}) + n'_{2k} = S_{2k} + n'_{2k} \tag{6}$$

其中 F_s 是采样频率; n'_{1k} 、 n'_{2k} 为 n_1 、 n_2 的采样与量化误差之和。

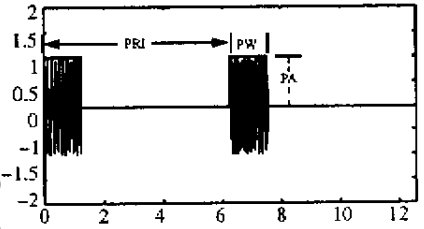


图 2 辐射源信号及其包络

Fig.2 Signal S_1 , S_2

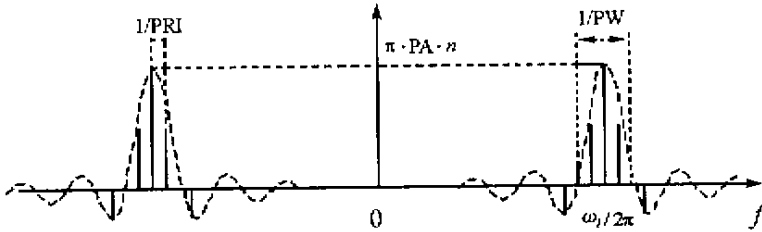


图 3 信号 S_1 、 S_2 的频谱

Fig.3 Spectrum of S_1 , S_2

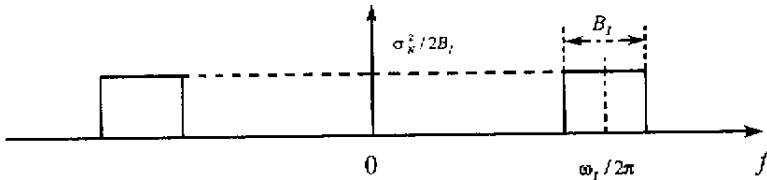


图 4 噪声 n_1 、 n_2 的功率谱密度

Fig.4 Power Spectral Density (PSD) of noise n_1 , n_2

由图 1 知:

$$U_L = Q_{1k} \cdot I_{2k} = S_{1k} \cdot S_{2k} + S_{1k} \cdot n'_{2k} + S_{2k} \cdot n'_{1k} + n'_{1k} \cdot n'_{2k} \tag{7}$$

其中

$$S_{1k} \cdot S_{2k} = U_{mk}^2 / 2 \cdot \{ \sin[2k \cdot \omega_I / F_s + \varphi_{1k} + \varphi_{2k}] + \sin \phi_k \} \tag{8}$$

(8) 式中 $\phi_k = \varphi_{1k} - \varphi_{2k}$ 。

设 $F_s > 2\omega_I / 2\pi$, 且将相位差 $\phi_k = \varphi_{1k} - \varphi_{2k}$ 近似为常数(在实际应用中,其变化率为 $0.01 \sim 10\text{Hz}$), 则 $U_L = Q_{1k} \cdot I_{2k}$ 频谱的低频分量如图 5 所示。

图5中冲激对应于信号中的直流成分 $U_{mk}^2/2 \cdot \sin\phi_k$ 其幅度为 $\pi \cdot n \cdot PA^2 \cdot \sin\phi_k$,它包含相位差信息,是有用信号。其它则视为噪声,噪声部分的频谱在图中只是近似描述。

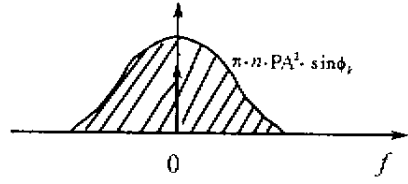


图5 $Q_{1k} \cdot I_{2k}$ 频谱的低频分量部分

Fig.5 Spectrum of $Q_{1k} \cdot I_{2k}$ in lower frequencies

图1中低通滤波器带宽 $B_L \ll PRF \ll B_I$,因此其输出为

$$U_0 = n \cdot PA^2/2 \cdot \sin\phi_k + n_3 \quad (9)$$

式中 n_3 即是低通滤波器的其它输出。

2 相位差测量精度

设图1中的采样满足采样定理,则采用连续信号来

分析相位差的测量精度,分析的结论对采样信号同样是适用的。同时这里还假设信号持续时间足够长。

信号 S_1, S_2 的功率谱如图6所示。

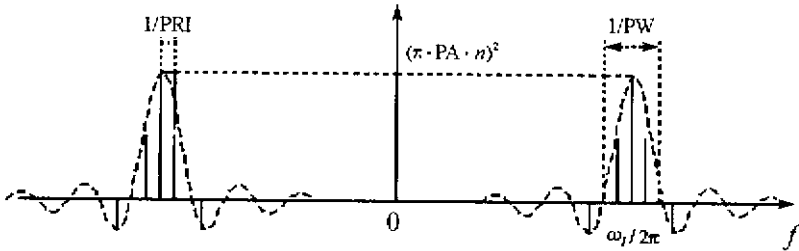


图6 信号 S_1, S_2 的功率谱

Fig.6 PSD of S_1, S_2

忽略量化误差的影响,噪声的功率谱如图4所示。

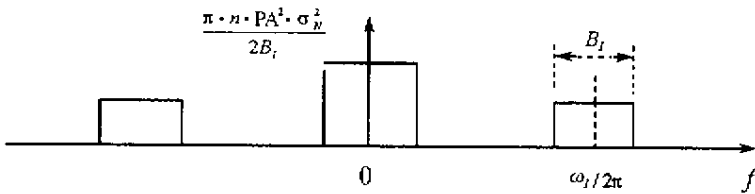


图7 信号 $S_1 \cdot n_2 (S_2 \cdot n_1)$ 的功率谱

Fig.7 PSD of $S_1 \cdot n_2 (S_2 \cdot n_1)$

若 $B_I > 1/PW$ 则有 $\sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2(k \cdot n) \approx \frac{1}{n\pi}$,因而信号 $S_1 \cdot n_2 (S_2 \cdot n_1)$ 的功率谱如图7所示, $n_1 \cdot n_2$ 的功率谱如图8所示^[3]。

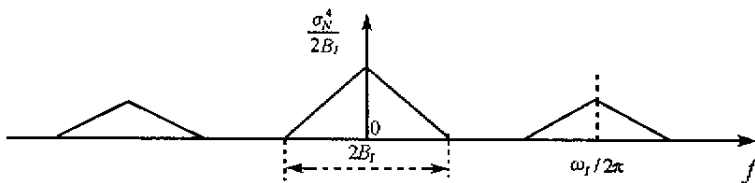


图8 信号 $n_1 \cdot n_2$ 的功率谱

Fig.8 PSD of $n_1 \cdot n_2$

设 $B_L \ll B_I$ 则其输出噪声 n_3 的功率为：

$$\sigma_{n_3}^2 \approx (2 \cdot \frac{n \cdot \pi \cdot PA^2 \cdot \sigma_N^2}{2B_I} + \frac{\sigma_N^4}{2B_I}) \cdot B_L \tag{10}$$

要实现精确的相位差测量 要求 $PA^2 \gg \sigma_N^2$ 因此上式可进一步简化为：

$$\sigma_{n_3}^2 \approx n \cdot \pi \cdot PA^2 \cdot \sigma_N^2 \frac{B_L}{B_I} \tag{11}$$

结合式(9)和(11)得输出信号 U_o 的信噪比为：

$$SNR_{out} \approx (n \cdot PA^2 / 2)^2 / (n \pi \cdot PA^2 \cdot \sigma_N^2 \frac{B_L}{B_I}) = \frac{n}{4\pi \cdot B_L} \cdot \frac{PA^2}{\sigma_N^2 / B_I} \tag{12}$$

定义 $SNR_{in} = \frac{PA^2}{\sigma_N^2 / B_I}$ 则

$$SNR_{out} \approx \frac{n \cdot SNR_{in}}{4\pi \cdot B_L} \tag{13}$$

测量误差信号是一个随机过程 因而相位差的测量方差为^[4]

$$\sigma_{\phi}^2 \propto 1 / SNR_{out} = \frac{4\pi B_L}{n \cdot SNR_{in}} \tag{14}$$

3 相位差测量精度的仿真

定义 $\sin \phi_k$ 的测量 RMS 误差为

$$RMS_{\sin \phi_k} = \sqrt{\sum_k \{ \frac{U_o(kT_s)}{n \cdot PA^2 / 2} - \sin \phi(kT_s) \}^2 / K} \tag{15}$$

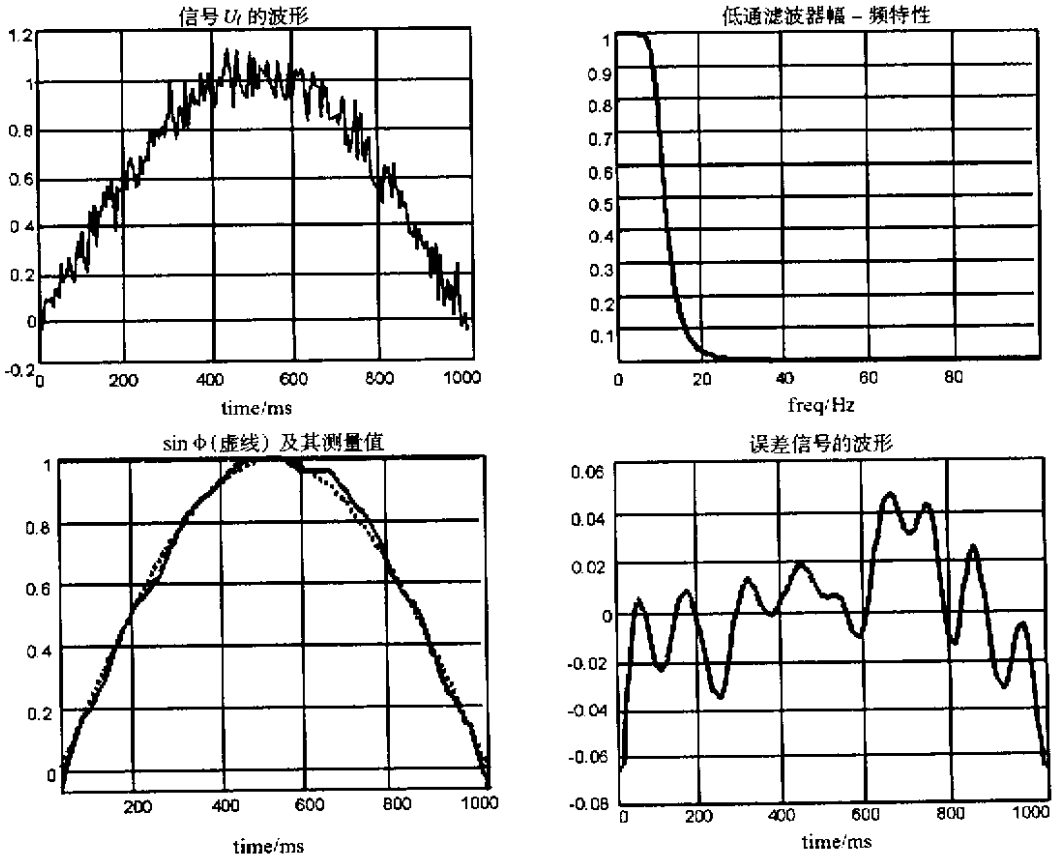


图9 仿真系统的信号波形

Fig.9 Signal waveforms in system of Fig.1

其中 T 是用于测量和信号时间长度, $K = T/T_s$, T_s 是采样间隔。

仿真按下面的参数进行: $f_l = 30\text{MHz}$, $PW = 0.33\mu\text{s}$, $PRF = 200\text{Hz}$, $PA = 1$, $SNR = 16$, A/D 的位数 N_{AD} 为 10bit, $F_s = 120\text{MHz}$, $B_l = 3\text{MHz}$, $B_L = 10\text{Hz}$, $T = 1\text{s}$ 。而 $\phi = 2\pi \cdot f_d \cdot t$, $f_d = 0.5\text{Hz}$ 。

采用如上参数, 仿真系统的部分信号波形如图 9 所示。分别改变参数 SNR、 B_L 和 n , 得到的结果分别如图 10~12。由图中可以看出, $\sin\phi_k$ 的 RMS 误差与 $SNR^{-1/2}$ 、 $B_L^{1/2}$ 、 $n^{-1/2}$ 成正比, 这与公式(14)是一致的。

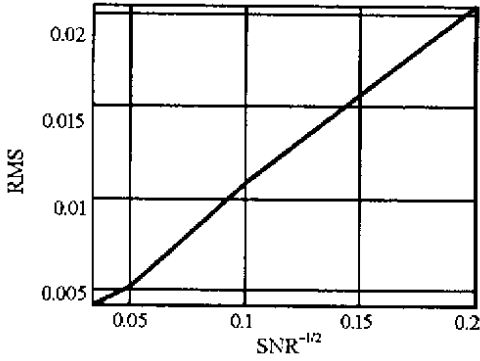


图 10 测量误差与信噪比

Fig. 10 RMS of error of $\sin\phi_k$ VS $SNR^{-1/2}$

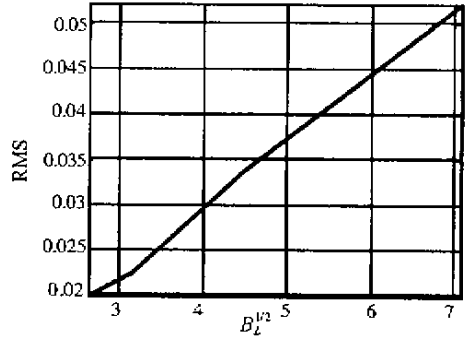


图 11 测量误差与低通带宽

Fig. 11 RMS of error of $\sin\phi_k$ VS $B_L^{-1/2}$

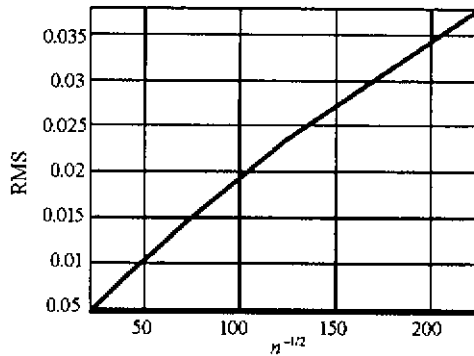


图 12 测量误差与处理的 n 数

Fig. 12 RMS of error of $\sin\phi_k$ VS $n^{-1/2}$

4 结论

- (1) 采用数字式相位差测量技术可以得到较高的相位差测量精度。
- (2) 影响相位差测量精度的主要因素是: 信噪比、脉冲包络占比和低通滤波器带宽。

参考文献:

- [1] 许耀伟, 孙仲康. 利用相位固定辐射源无源被动定位[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(3): 34-37.
- [2] 许耀伟, 孙仲康. 一种快速高精度无源定位方法的研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1998.
- [3] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 256.
- [4] 理查德 G·威利(R. G. Wiley). 电子情报 - 雷达信号[M]. 电子部第二十九所译, 1986: 94.

