

文章编号:1673-1522(2020)04-0340-05

DOI: 10.7682/j.issn.1673-1522.2020.04.009

四路鉴相器瞬时测频解模糊方法研究

李国君¹,朱泽龙¹,岳付昌²

(1. 92941 部队;2. 91475 部队,辽宁 葫芦岛 125001)

摘要:比相法瞬时测频在电子对抗和空馈式雷达目标模拟领域占据重要地位。首先,介绍了比相法瞬时测频原理,设计了利用四路鉴相器实现瞬时测频的方法,并重点研究了四路鉴相器由低位向高位解模糊方法,给出了解模糊前后鉴相器二进制位构成和具体解模糊过程,该方法具有重要的工程参考价值。

关键词:比相法;瞬时测频;解模糊

中图分类号:TN957

文献标志码:A

微波信号频率测量在电子对抗和空馈式雷达目标模拟领域占据重要地位。比相法瞬时测频实时测量到达脉冲信号载频,为信号上下变频提供参考信号,是后续信号检测和处理的基础,对脉冲信号而言,具有高频率截获概率、高测频精度等突出优点^[1-4]。

比相法数字瞬时频率测量典型电路包括放大器、功分器、鉴相器和量化编码电路等^[5]。因为角度信息的重复等原因,实际工程中测得的角度变化范围控制在 360° 内。为解决角度信息的模糊和多值,一般采用多个测频单元组合使用^[6]。本文主要研究四路鉴相器解模糊问题,采用由低位向高位解模糊,并给出了具体实现方法。

1 比相法瞬时测频原理

比相法瞬时测频是目前应用较广泛的一种瞬时测频技术,其核心是把信号的频率信息转换成相位信息(角度信息);然后,根据相位所对应幅度信息推算出信号频率^[7-9]。

基本测频单元主要由 2 部分构成,包括 1 个功分器和 2 条长度不等的延迟传输线,基本组成如图 1 所示。

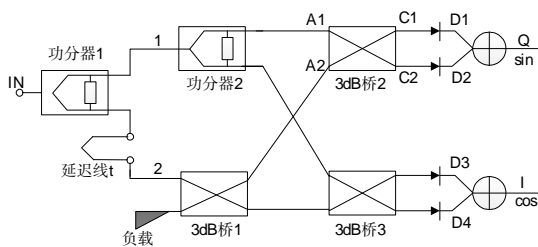


图1 基本测频单元组成图

Fig.1 Diagram of basic frequency measurement unit

功分器将 1 路信号分解为 2 路,然后分别经过不同长度的传输线(1 路不延时,另 1 路延迟特定时间),2 路信号对应一确定相位差 $\Delta\phi$,可表示为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi l}{c} f. \quad (1)$$

式(1)中: l 为延迟线长度; c 为光速; f 为信号频率。

相位差 $\Delta\phi$ 是一个正比于频率的量,其延迟线长度越大,2 路信号的相位差越大。在完成频率到相位的转换后,接下来的问题是如何将得到的相位差值转换成可以测量的幅度信息。完成频率到幅度转换的器件为鉴相器^[10-14],鉴相器是一个简单的和差合路器,因为 2 个高频信号在叠加时,合成信号的幅度与信号的相位差有关,因而可以用它来表示 2 路信号的相位差。为了消除信号本身幅度对测量结果的影响,就须要同时获得这 2 个信号的和与差,最常用的器件是 3dB 定向耦合器,它能够将输入信号分为 2 个等幅且具有 90° 相位差的信号。

假设定向耦合器 2 个输入信号用复数表示为 $A_1 e^{j\varphi_1}$ 和 $A_2 e^{j\varphi_2}$,则定向耦合器的另 2 个端口的输出将分别是:

$$B_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [A_1 e^{j\varphi_1} + A_2 e^{j(\varphi_2 - \frac{\pi}{2})}]; \quad (2)$$

$$B_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot [A_1 e^{j(\varphi_1 - \frac{\pi}{2})} + A_2 e^{j\varphi_2}]. \quad (3)$$

图 1 中,假设输入的微波信号为:

$$s(t) = A \cdot \sin(\omega t). \quad (4)$$

延迟线延迟时间为 τ ,通过功分器后,在 A1 和 A2 处得到的 2 路信号为:

$$s_{A1}(t) = A \sin(\omega t); \quad (5)$$

收稿日期: 2019-12-28; 修回日期: 2020-07-22

作者简介: 李国君 (1978-), 男, 高工, 硕士。

$$s_{A2}(t) = A \sin(\omega t - \omega\tau) \quad (6)$$

2路信号通过3dB定向耦合器之后,在C1和C2处得到的2路信号为:

$$s_{C1}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin\left(\omega t - \omega\tau - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} A \cos\left[\frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} + \omega\tau)\right] \sin\left[\omega t - \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} + \omega\tau)\right]; \quad (7)$$

$$s_{C2}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin(\omega t - \omega\tau) = \sqrt{2} A \cos\left[\frac{1}{2}(\omega\tau - \frac{\pi}{2})\right] \sin\left[\omega t - \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} + \omega\tau)\right] \quad (8)$$

经过平方率检波和低通滤波之后,D1处和D2处的信号形式为:

$$s_{D1}(t) = 1/2 \cdot KA^2 [1 - \sin(\omega\tau)]; \quad (9)$$

$$s_{D2}(t) = 1/2 \cdot KA^2 [1 + \sin(\omega\tau)] \quad (10)$$

同理,可以得到在D3处和D4处的检波信号形式为:

$$s_{D3}(t) = 1/2 \cdot KA^2 [1 - \cos(\omega\tau)]; \quad (11)$$

$$s_{D4}(t) = 1/2 \cdot KA^2 [1 + \cos(\omega\tau)] \quad (12)$$

式(10)和式(9)相减得:

$$U_Q = KA^2 \sin(\omega\tau) \quad (13)$$

式(11)和式(12)相减得:

$$U_I = KA^2 \cos(\omega\tau) \quad (14)$$

在生成呈正弦、余弦变化的信号后,工程实现中一般不直接按式(13)、(14)计算反三角函数,而是将加权后正余弦信号经量化电阻网络数字化,得到代表相位值的多位二进制数,具体方法可见文献[15-17]。

2 四路鉴相器瞬时测频具体实现

在鉴相器中,延迟线长度的选择是一个重要问题,通常选择延迟比的范围在2:1到8:1之间,小的延迟比要求更多的微波鉴相器,对每个鉴相器输出信号数字量化时,可用较低的分辨率,降低了对数字编码电路的要求。大的延迟比可减少鉴相器数目,但对每个鉴相器输出信号数字量化时要用较高的分辨率,会增加数字编码电路的复杂度。

为保证高测频精度和低系统复杂度,工程上一般采用延迟比为4:1。鉴相器数量为4个,前3个鉴相器分别提供四位编码输出,第4个鉴相器提供六位编码输出,解模糊后相位码数为12位,利用四路鉴相器实现瞬时测频原理图如图2所示。

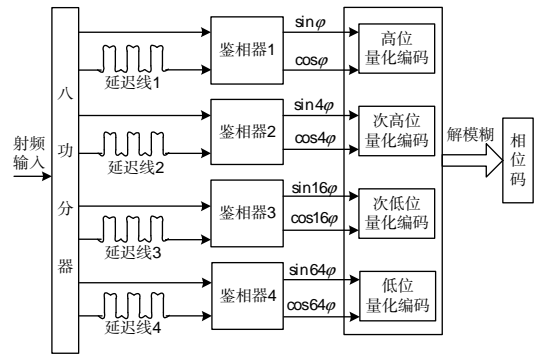


图2 四路鉴相器测频电路组成图

Fig.2 Circuit composition of 4 routes phase discriminator frequency measurement

3 多鉴相器测频解模糊方法

采用多鉴相器法进行测频时,会出现测频模糊问题,以第1路和第2路测频为例,第1路测频相位变化为0~2π,当延迟比为4:1时,第2路相位变化为0~8π,第3、4路鉴相器相位变化以此类推^[18-20]。采用四路鉴相器实现瞬时测频时,短延迟支路输出代码是整个相位代码的高位,长延迟支路的输出代码是整个相位代码低位,解模糊方法采用由低位向高位解模糊方法,具体解模糊过程如下:

四路鉴相器输出相位码由高位向低位分别为φ₁、φ₂、φ₃、φ₄,将每个鉴相器编码补齐为12位。具体方法如表1所示。

表1 四路鉴相器解模糊编码方法

Tab.1 Coding method of solving ambiguity for 4 routes phase discriminator

鉴相码值	解模糊前编码	解模糊编码
φ ₁	a ₁₁ a ₁₀ a ₉ a ₈	a ₁₁ a ₁₀ a ₉ a ₈ 00000000
φ ₂	b ₇ b ₆ b ₅ b ₄	××b ₇ b ₆ b ₅ b ₄ 000000
φ ₃	c ₇ c ₆ c ₅ c ₄	××××c ₇ c ₆ c ₅ c ₄ 0000
φ ₄	d ₅ d ₄ d ₃ d ₂ d ₁ d ₀	××××××d ₅ d ₄ d ₃ d ₂ d ₁ d ₀

在φ₂~φ₄编码中,××表示数值存在模糊和不确定性,具体值可能为0或1,解模糊步骤如下:

- 1)利用φ₄码解φ₃码的模糊,得到中间对位的φ₅码;
- 2)利用φ₅码解φ₂码的模糊,得到中间对位的φ₆码;
- 3)利用φ₆码解φ₁码的模糊,得到最终相位码φ₇,根据φ₇码可得利用四路鉴相器测频的输入射频信号频率。

4 解模糊算法典型实现

4.1 解模糊算法举例

在12位四路鉴相器输出编码中,最低有效位相位编码值为 $2\pi/2^{12}$,即 $\pi/2048$,假设 ϕ_1 至 ϕ_4 解模糊前编码分别为:100100000000、XX01100000、XXX10100000、XXXXXX101100。

1) ϕ_4 码解 ϕ_3 码的模糊。取 ϕ_3 的前8位,即 $\phi'_3=10100000$, ϕ_4 的前8位为 $\phi'_4=\times\times 101100$,其中 $\times\times$ 代表4种可能数值分别为00、01、10、11,令 $\phi(k)=|\phi'_3-\phi'_4|$,其中绝对值最小时所对应的 $\times\times$ 值即为中间对位后的 ϕ_5 码值,经计算10码对应相位差最小, ϕ_5 码值为 $\phi_5=10101100$ 。

2) ϕ_5 码解 ϕ_2 码的模糊。取 ϕ_2 的前10位,即 $\phi'_2=0110000000$, ϕ_5 的前10位 $\phi'_5=\times\times 10101100$ 。其中, $\times\times$ 代表4种可能数值分别为00、01、10、11,令

$$|\phi_3-\phi_4|=\left|\frac{\pi}{16}(c_7-d_7)+\frac{\pi}{32}(c_6-d_6)+\frac{\pi}{64}(c_5-d_5)+\frac{\pi}{128}(c_4-d_4)-\frac{\pi}{256}d_3-\frac{\pi}{512}d_2-\frac{\pi}{1024}d_1-\frac{\pi}{2048}d_0\right|。(15)$$

根据式(15),如果 $d_0\sim d_5$ 均为1、 $c_4\sim c_5$ 均为0,当 $c_7=d_7$ 、 $c_6=d_6$ 时,此时相位差绝对值为 $63\pi/2048$,当 $c_7=d_7$ 、 $c_6=1$ 、 $d_6=0$ 时,此时相位差绝对值为 $\pi/2048$,解模糊结果应为 $\phi'_4=c_7d_6d_5d_4d_3d_2d_1d_0$,而不是直接对位的 $c_7c_6d_5d_4d_3d_2d_1d_0$ 。

对上述问题,从原理上进一步分析,为使问题简化,以4位相位码为例,4位相位码是将 2π 弧度共分成16份,具体如图3所示,每4位相位码表示相位值落在不同相位区间,如0000在图3中1部分,代表的相位值在 $0\sim\pi/8$ 范围内,1111在图3中16部分,代表的相位值在 $15\pi/8\sim 2\pi$ 范围内。

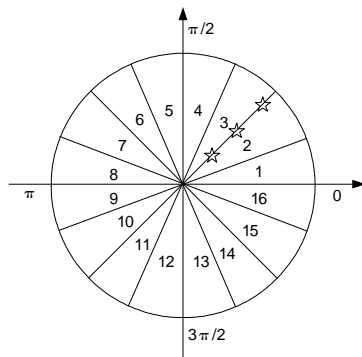


图3 4位相位码弧度划分原理图

Fig.3 Radian division of 4 bite phase code

对于某一具体相位值,该值可能落在图3中第2相位区间和第3相位区间的交线上,如图3中星号所

$\phi(k)=|\phi'_2-\phi'_3|$,其中绝对值最小时所对应的 $\times\times$ 值即为中间对位后的 ϕ_6 码值,经计算01码对应相位差最小, ϕ_6 码值为 $\phi_6=0110101100$ 。

3) ϕ_6 码解 ϕ_1 码的模糊。取 ϕ_1 的前12位, ϕ_6 的前12位为 $\phi'_6=\times\times 0110101100$,与 ϕ_1 码进行解模糊,计算过程与1、2相同,经计算10码对应相位差最小,最终的相位码 ϕ 码值为 $\phi=100110101100$ 。

4.2 解模糊结果分析

如果取 $\phi_1\sim\phi_4$ 编码输出的编码值按照由高位至低位拼接的相位码即 $a_{11}a_{10}b_9b_8c_7c_6d_5d_4d_3d_2d_1d_0$,该值与解模糊结果是相同的,这只是适用于4.1中举例所用编码的结果,不具有普遍性。

为了说明该问题,以 ϕ_4 码解 ϕ_3 码的模糊过程为例,假设 ϕ_4 码解模糊时前8位为 $\phi'_4=d_7d_6d_5d_4d_3d_2d_1d_0$ ($\times\times$ 用 d_7d_6 表示), ϕ_3 的前8位为 $\phi_3=c_7c_6c_5c_40000$, $|\phi_3-\phi_4|$ 可表示为

示,此时相位编码出现就会出现模糊,增加相位编码位数时,即是将整个 2π 弧度继续划分成更小的相位区间,并实现模糊相位的重排,通过缩小相位值区间范围的方法,能够解决相位模糊问题。

5 结束语

比相法瞬时测频是解决实时频率测量的重要方法,本文从瞬时测频原理出发,设计了比相法瞬时测频的具体实现方式,并对四路鉴相器测频解模糊问题进行了深入研究,给出了典型算法举例,分析了解模糊结果,具有一定的理论深度,可为工程技术人员提供有益参考。

参考文献:

[1] 项正山,唐龙.基于AD采样量化编码体制的IFM设计[J].电子信息对抗技术,2013,28(3):79-82.
XIANG ZHENGSHAN, TANG LONG. Design of the IFM receiver based on AD sampling quantization coding system[J]. Electronic Warfare Technology, 2013, 28(3): 79-82. (in Chinese)

[2] 方国军.相参雷达目标模拟系统中的宽带射频接收技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
FANG GUOJUN. Research of wide-band RF receive technology in the coherent radar target simulation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronau-

- tics, 2011. (in Chinese)
- [3] 顾雨婷. 转发式雷达目标模拟器设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
GU YUTING. The save-to-send simulator of radar targets design and implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 刘丽明, 姚啸, 赵建鹏. 典型雷达信号对瞬时测频接收机的影响[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(4): 363-366.
LIU LIMING, YAO XIAO, ZHAO JIANPENG. Influence of typical radar signals on instantaneous frequency measurement receiver[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2018, 33(4): 363-366. (in Chinese)
- [5] 段小翔. 干涉比相法瞬时测频技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
DUAN XIAOXIANG. Instantaneous frequency measurement research on interference phase comparison method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 刘新群. 基于FPGA的数字瞬时测频接收机研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
LIU XINQUN. Digital instantaneous frequency measurement receiver based on FPGA[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 邓磊. X波段宽带测频相关器技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2006.
DENG LEI. Research on X band broadband microwave correlator used in digital instantaneous frequency measurement[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006. (in Chinese)
- [8] 王春雷, 张学成. 基于新式宽频鉴相器瞬时测频电路的设计[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(1): 106-108.
WANG CHUNLEI, ZHANG XUECHENG. Design of IFM circuit based on new wide-band phase discriminator [J]. Shipboard Electronic countermeasure, 2013, 36(1): 106-108. (in Chinese)
- [9] 曹晓娟. 基于FPGA的数字比相技术与开发[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
CAO XIAOJUAN. Research and development of FPGA-based digital phase comparison technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 何冠良, 张娟, 张玉喜. 数字式干涉仪高精度鉴相技术[J]. 雷达与对抗, 2015, 35(4): 43-45.
HE GUANLIANG, ZHANG JUAN, ZHANG YUXI. High-precision phase discrimination technology for digital interferometer[J]. Radar & ECM, 2015, 35(4): 43-45. (in Chinese)
- [11] 蔡雪芳, 王燕. 小型微波鉴相器的设计[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(2): 63-65.
CAI XUEFANG, WANG YAN. A design of small microwave phase discriminator[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(2): 63-65. (in Chinese)
- [12] 朱明辉, 司斌, 张从霞, 等. 一种基于FPGA的并行结构瞬时测频方法[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 42-45.
ZHU MINGHUI, SI BIN, ZHANG CONGXIA, et al. A method of instantaneous frequency measurement based on parallel architecture of FPGA[J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(5): 42-45. (in Chinese)
- [13] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 5版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 121-125.
DING LUFEI, GENG FULU, CHEN JIANCHUN. Radar principles[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 121-125. (in Chinese)
- [14] 涂正林, 刘恩凯. AD8302在鉴相系统中的应用[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(4): 113-116.
TU ZHENGLIN, LIU ENKAI. Application of AD8302 to phase detection system[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2016, 39(4): 113-116. (in Chinese)
- [15] 曾小红. 瞬时测频接收机的应用研究与工程实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
ZENG XIAOHONG. Application research and project design of instantaneous frequency measurement receiver [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [16] 贺平. 雷达对抗原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 38-56.
HE PING. Radar warfare principles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 38-56. (in Chinese)
- [17] 刘隆和, 应朝龙, 姜永华. 瞬时测频技术及其应用[J]. 国外电子测量技术, 1998(3): 8-10.
LIU LONGHE, YING CHAOLONG, JIANG YONGHUA. Instantaneous frequency measurement technology and applications[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 1998(3): 8-10. (in Chinese)
- [18] 唐永年. 雷达对抗工程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 184-199.
TANG YONGNIAN. Radar countermeasure engineering

- [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012: 184-199. (in Chinese)
- [19] 范敏. 新编码体制的瞬时测频组件设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- FAN MIN. Design and realization of instantaneous frequency measurement module based on new coding method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [20] 贺泽军. 宽带瞬时测频接收机射频前端研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- HE ZEJUN. Research on RF front-end of wideband instantaneous frequency measurement receiver[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

Research on Solving Ambiguity Method of Instantaneous Frequency Measurement 4 Routes Phase Discriminator

LI Guojun¹, ZHU Zelong¹, YUE Fuchang²

(1. The 92941st Unit of PLA; 2. PLA, 2. The 91475th Unit of PLA, Huludao Liaoning 125001, China)

Abstract: The phase comparison method of instantaneous frequency measurement plays an important role in the field electronic countermeasures and air-fed radar target simulation. Firstly, the principle of instantaneous frequency measurement by phase comparison method is introduced, and a method for realizing instantaneous frequency measurement by using a 4 routes phase discriminator is designed. The method of solving ambiguity from low-bit to high-bit is emphatically studied. The binary bit composition of the before and after phase discriminators and the specific process of ambiguity resolution are given, which has important engineering reference value.

Key words: phase comparison method; instantaneous frequency measurement; solving ambiguity

简讯:

我国舰载机战斗力建设大事记

2012年11月23日,歼-15首次在辽宁舰进行着舰测试和起飞测试成功。之后,戴明盟被中央军委授予“航母战斗机英雄试飞员”荣誉称号。

2013年6月18日,歼-15再次在辽宁舰起降,并进行首次驻舰飞行,标志着中国成为世界上第三个能够独立培养舰载战斗机飞行员的国家。

2013年12月初,歼-15正式入列中国人民解放军海军航空兵。

2015年9月3日,歼-15编队参加“9.3”阅兵,接受祖国和人民的检阅。

2016年11月30日上午,中央军委追授张超同志“逐梦海天的强军先锋”荣誉称号命名大会在海军舰载机部队举行。

2016年12月24日,歼-15随辽宁舰航母编队出第一岛链,赴西太平洋海域开展远海训练。

2017年6月,歼-15随辽宁舰编队参加跨区机动训练和解放军进驻香港二十周年庆祝活动。

2017年7月30日,歼-15编队参加朱日和沙场阅兵。

2017年秋,海军舰载机部队组织歼-15夜间着舰训练,攻克夜间起降技术难关。

2018年4月12日,歼-15编队参加南海大阅兵。

2019年3月20日,歼-15进行伙伴空中加油,整体作战能力再次加强。

2019年4月23日,歼-15参加人民海军成立70周年海上阅兵。

2019年10月1日,5架新涂装“中国海军”字样的歼-15组成楔形舰载机梯队,米秒不差地飞过天安门上空,接受习主席检阅。

2020年4月,歼-15随辽宁舰执行航母编队实战化部署训练,飞行架次、训练难度、对抗强度均取得突破。