导频脉冲载波频率的快速捕获与跟踪

张江林 吕善伟 董胜波

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191) (航天科工集团二院二十五所，北京 100854)

韦志棉

(北京航空航天大学 无人驾驶飞行器设计研究所，北京 100191)

摘 要：针对短时导频脉冲载波频率的同步问题，提出一种快速捕获和跟踪方法.该方法采用相位推算法进行快速载波频率初估计，完成频率的捕获.相位推算法首先利用最小二乘法估计实采样点的相位，再应用相位解卷、一元线性回归和最小二乘法拟合求取信号频率的估值，其测频精度优于常用的Prony算法，在高信噪比情况下逼近实正弦信号的Cramer-Rao界.应用数字下变频和Kay算法实现频率的跟踪，通过建立仿真模型，验证其跟踪精度优于叉积自动频率控制环.在给出的设计实例中，对于脉宽为1 ms的导频脉冲，在信噪比大于13 dB的情况下，环路频率跟踪的最大误差小于3 Hz.

关 键 词：导频脉冲；载波同步；频率估计；相位推算法

中图分类号：TN 911.23

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)06-0643-04

Rapid frequency acquisition and tracking for pilot pulse carrier

Zhang Jianglin Lü Shanwei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Dong Shengbo

(Institute No. 25 of the Second Academy, China Aerospace Scientific and Industrial Corporation, Beijing 100854, China)

Wei Zhimian

(Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To aim at short-time pilot pulse carrier-frequency synchronization, a rapid acquisition and tracking approach was proposed. In this approach, a phase deduction frequency estimator (PDFE) was employed to perform initial carrier-frequency coarse estimation and accomplish frequency acquisition in short time. The PDFE obtains the phase angle estimation of real signal samples by least square method, and then computes the frequency value by phase unwrapping, unary linear regression and least square fitting. Its estimation accuracy exceeds Prony's method and its estimation error normalized variance approaches the Cramer-Rao bound of real sinusoid signal at high signal-to-noise ratio. Digital down conversion loop and Kay's method were adopted to perform frequency tracking, its performance exceeds cross product automatic frequency control (CPAFC) loop. The tracking accuracy was evaluated by simulation. An example was given, its maximum frequency tracking error is not more than 3 Hz at input SNR above 13dB for 1ms pilot pulse width.

Key words: pilot pulse; carrier synchronization; frequency estimation; phase deduction frequency estimator

收稿日期：2007-05-15

基金项目：国防预研课题资助项目(513250504)

作者简介：张江林(1973—)，男，吉林长春人，博士生，zh_jlin@sina.com.cn.

载波同步是通信和分布式雷达系统中一个非常重要的问题,它是进行信息传输和相干处理的前提和基础.同步性能的好坏直接影响系统的性能.载波同步的任务就是跟踪载波的频率和相位,对载波小频偏及相位的跟踪,通常最有效的方式是使用锁相环.由于产生收发载频偏差的原因包括收发机本地振荡器输出频率的不稳定性及漂移、收发端相对运动造成的多普勒频移等,在高动态情况下,频偏较大,应用锁相环无法在短时间内实现同步,需先借助锁频环跟踪载波频率,降低频差.本文针对插入导频法,在短时导频脉冲内,采用相位推算法(PDFE,Phase Deduction Frequency Estinator)和数字化锁频环分别实现载波频率的快速捕获和跟踪.通过建立数字化仿真模型,验证了方案的可行性.

1 相位推算法

正弦波频率估计是信号参数估计中的经典问题,谱估计中的周期图法、最大熵法、ARMA(Autoregressive Moving Average)模型法、最大似然法、Kay法、Prony法等均可用于频率估计.实正弦信号快速测频技术通常采用算法简单的Prony方法[1-2],在信号质量高时,此方法测频具有精度较高和速度快等特点.本文介绍另外一种高精度快速的实正弦信号相位基频率估计法:相位推算法.

1.1 算法推导[3]

设输入的单一载频离散信号为

$$s_i=\sin(\omega t_s i+\varphi) \tag{1}$$

式中,ω 为载波频率;t_s 为采样周期.观察其连续的 m 个采样点

$$s_{i+k}=\sin[\varphi+\omega t_s(i+k)]$$
$$k=0,1,\cdots,L,m-1 \tag{2}$$

引入与这段采样点的中间点相对应的相位

$$\varphi_i=\varphi+\omega t_s\left(i+\frac{m-1}{2}\right) \tag{3}$$

则式(2)可写成

$$s_{i+k}=\sin\left[\varphi_i+\omega t_s\left(k-\frac{m-1}{2}\right)\right]=$$
$$\cos\left[\omega t_s\left(k-\frac{m-1}{2}\right)\right]\cdot\sin(\varphi_i)+$$
$$\sin\left[\omega t_s\left(k-\frac{m-1}{2}\right)\right]\cdot\cos(\varphi_i) \tag{4}$$

用最小二乘法可求得 φ_i 的估值 $\hat{\varphi}_i$

$$\hat{\varphi}_i=\arctan\left[\frac{\sum_{k=0}^{m-1}\cos\left[\omega t_s\left(k-\frac{m-1}{2}\right)\right]\cdot s_{i+k}}{\sum_{k=0}^{m-1}\sin\left[\omega t_s\left(k-\frac{m-1}{2}\right)\right]\cdot s_{i+k}}\cdot\frac{1-\frac{\sin(m\omega t_s)}{m\cdot\sin(\omega t_s)}}{1+\frac{\sin(m\omega t_s)}{m\cdot\sin(\omega t_s)}}\right] \tag{5}$$

式中,ω 是频率估计的初始值,在很多情况下,使用频率的中间值作为初始值,即

$$\omega=\frac{1}{2}\cdot\frac{\omega_s}{2}=\frac{\pi f_s}{2}=\frac{\pi}{2t_s} \tag{6}$$

当 $m=2$ 时,式(5)可简化为

$$\hat{\varphi}_i=\arctan\left[\frac{s_{i+1}+s_i}{s_{i+1}-s_i}\cdot\tan\left(\frac{\omega t_s}{2}\right)\right]=$$
$$\arctan\left(\frac{s_{i+1}+s_i}{s_{i+1}-s_i}\right) \tag{7}$$

上式求出的仅仅是信号相位对于 2π 的余数,可通过相位修正序列 C_i 得到信号相位 $\hat{\varphi}'_i$

$$\left.\begin{aligned}&\hat{\varphi}'_i=\hat{\varphi}_i+C_i\\&C_i=\begin{cases}C_{i-1}-2\pi & \hat{\varphi}_i-\hat{\varphi}_{i-1}>\pi\\C_{i-1}+2\pi & \hat{\varphi}_i-\hat{\varphi}_{i-1}<-\pi\\C_{i-1} & \text{其它}\end{cases}\\&C_1=0\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

通过上式求得信号相位后,可根据式(3)用一元线性回归和最小二乘法拟合求取信号频率的估值[3]

$$\hat{f}=1/(2\pi t_s)\cdot$$
$$\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\hat{\varphi}'_i\left(i+\frac{m-1}{2}\right)\right]-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\hat{\varphi}'_i\cdot\sum_{i=1}^{N}\left(i+\frac{m-1}{2}\right)}{\sum_{i=1}^{N}\left(i+\frac{m-1}{2}\right)^2-\frac{1}{N}\left[\sum_{i=1}^{N}\left(i+\frac{m-1}{2}\right)\right]^2}=$$
$$\frac{12}{N(N^2-1)t_s}\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\hat{\varphi}'}{2\pi i}\left(i-\frac{N+1}{2}\right)\right] \tag{9}$$

1.2 测频性能仿真

为了比较相位推算法与Prony法的测频性能,分别取信噪比(SNR,Signal to Noise Ratio)为10 dB,15 dB和20 dB,对采样频率 $f_s=23$ MHz,$N=220$(10 μs)的数据进行仿真.表1、表2分别是两种测频方法的仿真结果(均为10 000次独立实验).对比两表的统计结果可以看出,相位推算法的测频精度明显优于Prony法.

在频段4~6 MHz内,相位推算法测频性能随SNR的变化情况如图1所示(10 000次独立实验).从图中可以看出,当信噪比高于13 dB时,测频最大误差小于4 kHz,误差标准差小于0.9 kHz,方差已逼近实正弦信号频率估计的Cramer-Rao界.这样,在信噪比较高时,采用相位推

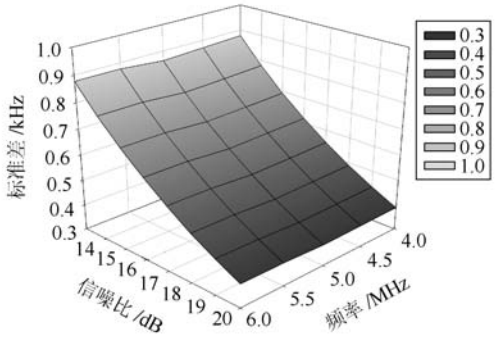
算法进行快速频率捕获是非常有效的.

表 1　相位推算法的测频性能

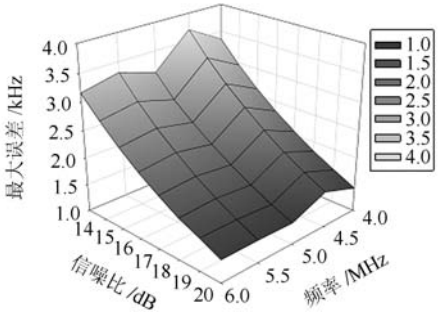
信噪比/dB	被测频率/MHz	测频误差统计/kHz 均值	标准差	最大值	最小值
10	4.0	−0.272	5.79	4.86	−156.94
	5.0	0.008	1.89	4.64	−136.48
	6.0	−1.396	13.17	4.54	−158.26
15	4.0	0.006	0.69	2.62	−2.46
	5.0	0.013	0.68	2.44	−2.30
	6.0	−0.001	0.70	2.49	−2.43
20	4.0	0.004	0.39	1.44	−1.38
	5.0	−0.007	0.38	1.39	−1.28
	6.0	−0.001	0.39	1.40	−1.41

表 2　Prony 法的测频性能

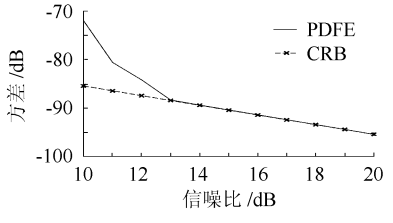
信噪比/dB	被测频率/MHz	测频误差统计/kHz 均值	标准差	最大值	最小值
10	4.0	−7.290	45.83	147.55	−219.85
	5.0	−1.212	21.19	87.07	−87.54
	6.0	0.595	19.40	92.61	−81.08
15	4.0	−1.440	14.61	49.35	−67.34
	5.0	−0.273	7.41	31.00	−27.97
	6.0	0.151	6.47	25.25	−24.79
20	4.0	−0.379	5.35	17.67	−22.78
	5.0	−0.076	2.83	12.09	−10.47
	6.0	0.044	2.48	10.04	−9.99



a　标准差



b　最大误差



c　方差

图 1　测频误差统计结果 (f_s=23 MHz, N=220)

2　数字化锁频环

载频捕获完成后,系统将进入载频跟踪环节.为了适应大动态环境,采用锁频环进行载波频率跟踪.数字化锁频环路采用数字下变频技术把中频信号变换为数字零中频信号,同时,采用数字鉴频器和数控振荡器(*NCO*, *Numerically Controlled Oscillator*),构成频率跟踪环,其组成框图如图 2 所示.

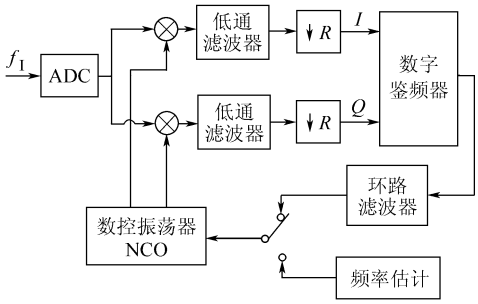


图 2　数字化锁频环路组成框图

首先中频信号经 A/D 采样转换为数字信号,再与数字本振正交相乘进行频谱搬移,然后进行低通滤波和数据抽取,以获取数字基带信号.该基带信号的频率就是中频信号与 *NCO* 的频差,数字鉴频器对其进行估计,随后改变 *NCO* 的频率控制字,使 *NCO* 输出跟上中频信号频率的变化,实现自动频率跟踪.

数字鉴频器采用 *Kay* 频率估计法[4].输入鉴频模块的正交基带信号可表示为

$$\left.\begin{aligned} I(k) &= \cos\left(2\pi k\,\frac{f}{f_{s1}}+\varphi\right) \\ Q(k) &= \sin\left(2\pi k\,\frac{f}{f_{s1}}+\varphi\right) \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中,f 为基带信号频率;f_{s1} 为基带信号速率.鉴频输出则为

$$\hat{f}=\frac{f_{s1}}{2\pi}\cdot \sum_{k=0}^{L-2}\left[w_k\cdot\arctan\frac{I(k)Q(k+1)-I(k+1)Q(k)}{I(k)I(k+1)+Q(k)Q(k+1)}\right] \tag{11a}$$

式中,w_k 为权系数[4]

$$w_k=\frac{\frac{3}{2}L}{L^2-1}\left\{1-\left[\frac{k-\left(\frac{L}{2}-1\right)}{\frac{L}{2}}\right]^2\right\} \tag{11b}$$

如果令 w_k=1,式(11a)就等效为常用的叉积自动频率控制算法(CPAFC, Cross Product automatic Frequency Control)[5-6]的多点平均.

在设计锁频环的过程中,一个关键的步骤是

跟踪环路数据速率和环路带宽的选择.为了保证环路的跟踪精度,环路的带宽会设计得较窄,同时又要保证频率捕捉的最大误差要进入跟踪带内.另外,为了提高环路的反馈速度,在保证性能的前提下,应尽量减小低通滤波器和各级抽取滤波器的阶数.图3为设计实例,中频信号经采样和下变频,转换为速率29.95 kHz的基带信号,用于抗混叠的低通滤波器的通带带宽为6 kHz.

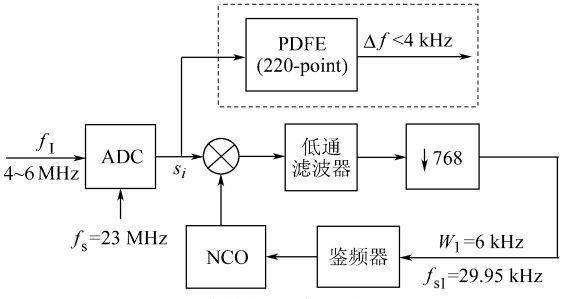
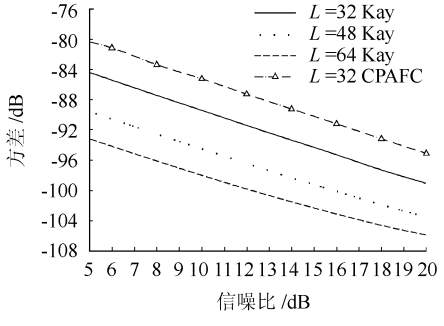


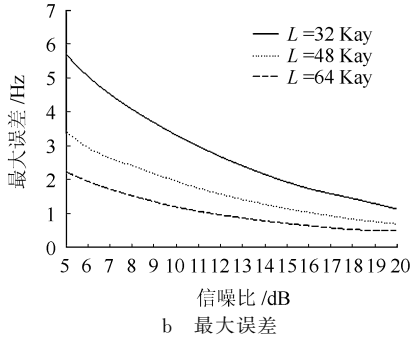
图3 环路数据速率和带宽的选择

本文使用Simulink对锁频环路进行了仿真验证,数据长度L分别取32,48和64,环路鉴频误差的方差和最大值随信噪比的变化情况如图4所示,同时给出32点平均CPAFC鉴频误差方差统计结果(均为2 000次独立实验).

从图4中可以看出,鉴频精度随着信噪比和L的增加而得到提高.当L相同时,Kay法鉴频误差方差低于CPAFC算法约4 dB,精度明显得到提高.当信噪比大于13 dB,$L=32$(脉冲宽度为1 ms)时,Kay法最大鉴频误差小于3 Hz,精度很高.在实际应用中,可根据输入信号的质量,选择适合的数据长度来满足系统需求.L越大,鉴频精度越高,但所需导频脉冲的宽度也越长.



a 方差



b 最大误差

图4 环路鉴频误差的统计结果($f_{s1}=29.95$ kHz)

3 结束语

本文提供了一种短时导频脉冲载频的快速捕捉和跟踪方法.采用相位推算法,执行频率的捕获,并利用数字锁频环实现频率跟踪.文中介绍了相位推算法的推导过程,通过仿真计算可以看出,该算法的测频准确度远高于常用的Prony方法,当输入信号信噪比大于13 dB时,已逼近实正弦信号频率估计的Cramer-Rao界.通过对使用Kay算法的数字锁频环进行仿真计算,验证了环路的频率跟踪精度优于常用的CPAFC环路,并给出误差随信噪比变化的统计结果.

参考文献(References)

[1] Tufts D W, Fiore P D. Simple, effective estimation of frequency base on Prony's method [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996, 5:2801-2804

[2] 何伟. 新型宽带数字接收机[D]. 成都:电子科技大学通信与信息工程学院,2004
He Wei. A new wide-band digital receiver[D]. Chengdu: School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2004 (in Chinese)

[3] 胡来招. 瞬时测频[M]. 北京:国防工业出版社,2002:165-173
Hu Laizhao. Instantaneous frequency measurement[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002:165-173 (in Chinese)

[4] Kay S. A fast and accurate single frequency estimator [J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(12):1987-1989

[5] Natali F D. AFC tracking algorithms [J]. IEEE Trans On Communications, 1984, 32(8):935-947

[6] 朱群. 数字化中频接收机的设计及其硬件实现[D]. 长沙:国防科学技术大学电子科学与工程学院,2004
Zhu Qun. Design and hardware realization of digital intermediate frequency receiver [D]. Changsha: School of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, 2004 (in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)