

多源相位控制自适应跟踪算法研究*

张道东^{1,2} 杨仕勇^{1,2} 蒲红平^{1,2,3} 鲁朝升¹ 郑晓霞^{2,3}

(1.四川轻化工大学自动化与信息工程学院 宜宾 643002; 2.人工智能四川省重点实验室 宜宾 643002;
3.成都航空职业技术学院汽车工程学院 成都 610100)

摘要: 为了改善频率源的相位噪声,本文提出一种频率和相位相同的独立源合成的方法。由于硬件的不一致性,独立源之间存在一定的相位差,所以合路频率源的相位噪声不接近理论值,甚至恶化。在本文中,从数学上证明了将频率和相位相同的多个频率源信号结合起来可以改善频率源的相位噪声的可行性,并利用 MATLAB 进行理论仿真;针对两个频率源相位的相位差或不同步问题,提出了一种自适应跟踪算法来实现两个频率源之间的相位同步,最后给出该算法理论仿真结果。从理论证明和仿真结果中分析,合成频率源信号的相位噪声得到提升,相比与初始频率源的幅度提升了 3 dB;本文提出自适应跟踪算法可以控制两个初始频率源的相位差小于 10° ,达到预期效果。

关键词: 频率源;相位噪声;相位差;自适应跟踪算法

中图分类号: TP202 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Study on adaptive tracking algorithm for multi-source phases controlling

Zhang Daodong^{1,2} Yang Shiyong^{1,2} Pu Hongping^{1,2,3} Lu Chaosheng¹ Zheng Xiaoxia^{2,3}

(1. College of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 643002, China;
2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin 643002, China;
3. School of Automotive Engineering, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China)

Abstract: A method of combining independent frequency sources of the same frequency and phase is proposed to improve the phase noise of the frequency source. Due to the inconsistency of the hardware, however, there is a certain phase difference between independent sources, so the phase noise of the combined frequency source is not close to the theoretical value and is even degraded. This paper proves that combining multiple frequency sources the frequency and phase of which are equal or approximate can improve the phase noise performance of the frequency source, and carries out the theoretical simulation with MATLAB. Aimed at the problem of phase non-synchronization or phase difference between two frequency sources, an adaptive tracking algorithm was proposed to realize the phase synchronization between two different frequency sources. Finally, this paper provided the theoretical simulation results of the proposed algorithm. From the theoretical proof and simulation results, relative to the initial frequency source, the phase noise of the combined frequency source signal is improved by 3 dB. In this paper, an adaptive tracking algorithm was also proposed. The algorithm can control the phase difference between the two initial frequency sources to be less than 10° , the expected effect of which has been achieved.

Keywords: frequency source; phase noise; phase difference; adaptive tracking algorithm

0 引言

频率源是雷达通信和测量仪器等领域中电子设备的核心部件,随着现代科技和设计工艺的迅速发展,各种电子设备对频率源的要求越来越高,而相位噪声是衡量频率源信号的重要指标,是衡量频率信号短期内稳定性的关键^[1]。

频率源在实际工程中,由于器件的非线性和温度等因素的影响,导致频率源的相位和幅度都会受到一定程度的影响^[2]。同时由于现代的技术手段和制造工艺的限制,无法通过硬件设施提升频率源的相位噪声性能。湖北工业大学的吴铁洲等^[3]提出一种数字锁相放大器与 Kalman 滤波相结合的方法对弱光声信号进行降噪。中国电子科技集团公司

收稿日期:2022-08-18

* 基金项目:人工智能四川省重点实验室(2020RZY01,2021RYY02)、厅市共建智能终端四川省重点实验室开放课题(SCITLAB-20011)、四川轻化工大学项目(Y2022134)资助

第二十六所的成斌等^[4]提出的一种联合补偿的动态相位噪声优化设计方法。南京电子技术研究所的李春利^[5]提出一种多源功率合成的方法改善频率源的相位噪声性能。在本文中,通过查阅大量文献,介绍了信号相位噪声的数学模型^[6-7]。然后,对多个具有独立噪声的频率源信号的线性组合模型进行分析。多个频率源的相位不同步问题。最后,针对实际工程中出现的相位不同步问题,提出一种基于Kalman滤波的自适应跟踪算法用以解决相位不同步问题。

1 信号功率合成理论

1.1 信号相位噪声定义及模型

相位噪声主要描述了信号的相位产生的随机起伏,包括了相位抖动和高斯白噪声。大多数的相位噪声都是由频率源信号引起的,所以从频域出发,相位噪声可以反应信号的频率稳定性,是评价信号频率源性能的重要指标之一。

在实际工程中,由于频率源系统的输出信号并不是理想化的正弦波信号,所以将其视为调幅调相的信号,数学表达式如下:

$$U(t) = V_0(t) \sin[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中: $V_0(t)$ 表示信号的幅度瞬时值, ω_0 表示信号的角频率, $\varphi(t)$ 表示波动的相位瞬时值。

在频域上,一般相位噪声采用功率谱密度的单边带噪声形式表征,包括3个要素^[8]: 1) 偏移载波中心频率 f_0 的某个频率 f_m ; 2) 以偏移频率 f_m 为中心的1 Hz带宽内的功率谱密度; 3) 相对载波信号功率的噪声功率。数学表达式为:

$$L(f) = \frac{P_{SSB}}{P_0} \times \frac{1}{BW} \quad (2)$$

式中: P_{SSB} 表示偏移频率 f_m 处的单边噪声功率; P_0 表示载波信号功率; $BW = 1$ Hz。

信号相位噪声定义如图1所示。

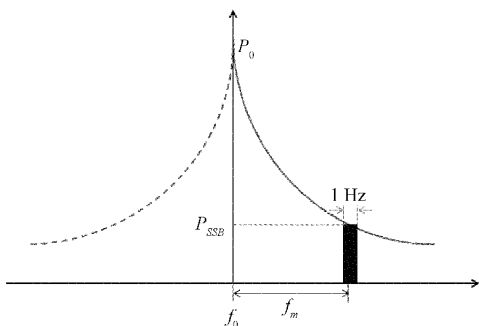


图1 信号相位噪声定义示意图

1.2 频率源相位噪声提升方法分析

虽然多路信号频率源合成可以实现提升相位噪声性能的效果^[9]。但是在实际工程中,频率源的输出信号相位会受到非线性器件和温度等一系列的外部影响,对合成的频率源的相位噪声结果造成一定的偏差^[10]。因此需要对相位噪声进行实时补偿,抵消部分相位噪声偏差,从而得到更好的效果。

根据LC振荡器的振幅恢复机制,幅度调制(amplitude modulation, AM)噪声远小于相位调制(phase modulation, PM)噪声^[11],因此在研究相位噪声时,通常将AM噪声忽略不计,主要研究PM噪声引起的相位噪声的影响。因此本文只考虑相位抖动带来的影响,将幅度值视为常数 V_0 。

设两路频率源信号如下:

$$U_1(t) = V_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_1(t)) \quad (3)$$

$$U_2(t) = V_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_2(t)) \quad (4)$$

在理想无损条件下,将式(3)和(4)线性相加可得如下:

$$U(t) = V_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_1(t)) + V_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_2(t)) \quad (5)$$

将式(5)展开化简可得如下:

$$U(t) = 2V_0 \cos\left(\frac{\varphi_1(t) - \varphi_2(t)}{2}\right) \sin\left(\omega_0 t + \frac{\varphi_1(t) + \varphi_2(t)}{2}\right) \quad (6)$$

上式为两个相似频率源的合路信号,其幅值为: $2V_0 \cos\left(\frac{\varphi_1(t) - \varphi_2(t)}{2}\right)$, 相位为 $\frac{\varphi_1(t) + \varphi_2(t)}{2}$ 。

当 $U(t)$ 达到最大值时,其信号功率也达到最大值,因此设目标函数:

$$\text{Max } E(\varphi_1, \varphi_2) = 2V \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \quad (7)$$

要使目标函数 $\text{Max } E(\varphi_1, \varphi_2)$ 取得最大值,则有 $\cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) = 1$, 即 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$ 。

1.3 合路频率源相位噪声机理分析

假设频率源1和频率源2的相位分别是 φ_1 和 φ_2 , 令 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, 且两路信号的幅度和频率相同,分别是 V_0 和 ω_0 。由信号能量公式可知,原始频率源的平均功率为:

$$P_1 = P_2 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} U_1^2(t) dt = \frac{V_0^2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_1) dt = \frac{V_0^2}{2T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi_1)] dt = \frac{V_0^2}{2} \quad (8)$$

在理论上,功分比1:1的合路器(或功分器),即任意一路输出的功率是输入功率的1/2,将其转换成以dB为单位的对数运算形式:

$$10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} = 10 \times \lg 2^{-1} = -3 \text{ dB}$$

即输出功率相比输入减少了3 dB。因此合路频率源的电压合路系数 α 为:

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} \Rightarrow \frac{(\alpha U)^2}{U^2} = \frac{1}{2} \Rightarrow \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (9)$$

根据式(9)可得,合路频率源的平均功率为:

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} (\alpha U)^2(t) dt = \frac{2V_0^2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \sin^2(\omega_0 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}) dt = \frac{V_0^2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi)] dt = V_0^2 \quad (10)$$

由上述可知,如果两个相同或近似频率和相位的独立

输入信号线性合成,则线性合成后的频率源信号功率是两个未合成的频率源信号功率的两倍。将两者之比转换为对数形式: $10\lg P/P_1 = 10\lg 2 = 3 \text{ dB}$, 即合路频率源功率比原始频率功率增加 3 dB。由于两个原始频率源信号的相位抖动具有不相干性^[12],所以合路频率源信号的增益直接体现在相位噪声上。

因此,为了采用该方法改善相位噪声性能,必须保证两个输入独立频率源信号之间的相位是同步或相位差趋近于 0。在下一节中,设计一种自适应跟踪控制算法用于解决两个线性合成的独立输入信号之间的相位差问题。

2 频率源相位自适应跟踪算法原理

由前文可知,该算法主要是跟踪控制两个频率源信号的相位。也就是跟踪控制两个信号的相位差值 $|\varphi_1 - \varphi_2|$ 达到最小值。在实际应用中,由于存在各种影响因素导致系统噪声和测量噪声的模型不准确^[13]。为了实现相位的跟踪控制,提出一种基于 Kalman 滤波器的自适应跟踪算法,其包括了预测和更新两个部分。该算法根据上一时刻状态对下一时刻进行最优估计,利用观测状态和最优估计状态,通过实时更新协方差矩阵进行相位预测校正,可以准确的预测系统状态^[14]。

2.1 系统模型

假设频率源 1 和频率源 2 的初始相位分别是 φ_1 和 φ_2 , 为了便于数学表达,表示为矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$, 且两个频率源的高斯白噪声 \boldsymbol{w} 是独立的。因此,离散线性系统模型的状态方程和观测方程如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}_k = \boldsymbol{F}\boldsymbol{\varphi}_{k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{k-1} + \boldsymbol{w}_{k-1} \\ \boldsymbol{Y}_k = \boldsymbol{H}\boldsymbol{\varphi}_k + \boldsymbol{v}_k \end{cases} \quad (11)$$

其中, \boldsymbol{F} 和 \boldsymbol{B} 表示方程的状态转移矩阵和控制转移矩阵; \boldsymbol{H} 表示方程的观测转移矩阵。 $\boldsymbol{\varphi}_k$ 和 \boldsymbol{y}_k 表示 k 时刻的状态变量和观测变量, \boldsymbol{u}_k 表示 k 时刻的控制输入变量。 \boldsymbol{w}_{k-1} 表示 $k-1$ 时刻的状态过程噪声,其符合 $N(0, \sigma_{\varphi}^2)$ 的正态分布,且相互独立; \boldsymbol{v}_k 表示 k 时刻的观测噪声,其符合 $N(0, \sigma_y^2)$ 的正态分布,且与 \boldsymbol{w} 独立。

为了便于接下来算法流程分析,下面给出算法使用的主要符号列表,如表 1 所示。

表 1 算法主要符号简介

符号	意义
$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_k$	k 时刻的状态预测矩阵
$\hat{\boldsymbol{P}}_k$	k 时刻的状态协方差预测矩阵
$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_k$	k 时刻的状态估计更新矩阵
\boldsymbol{K}_k	k 时刻的增益更新矩阵
$\bar{\boldsymbol{P}}_k$	k 时刻的状态协方差更新矩阵
\boldsymbol{Q}_k	k 时刻的状态过程噪声协方差矩阵
\boldsymbol{R}_k	k 时刻的观测噪声协方差矩阵

2.2 初始条件

由于系统的初始状态矩阵 $\boldsymbol{\varphi}_0$ 是随机的,并且系统的初始状态矩阵 $\boldsymbol{\varphi}_0$ 与系统噪声和测量噪声是独立的,因此初始状态矩阵 $\boldsymbol{\varphi}_0$ 具有已知的均值和协方差矩阵。因此系统的初始条件为:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\varphi}}_0 = \boldsymbol{E}[\boldsymbol{\varphi}_0] \\ \hat{\boldsymbol{P}}_0 = \boldsymbol{E}[(\hat{\boldsymbol{\varphi}}_0 - \boldsymbol{\varphi}_0)(\hat{\boldsymbol{\varphi}}_0 - \boldsymbol{\varphi}_0)^T] \end{cases} \quad (12)$$

2.3 自适应跟踪算法分析

1) 状态估计与状态协方差的预测

根据上一时刻的最优状态估计矩阵和系统控制输入矩阵,预测当前时刻的系统状态矩阵。状态矩阵的预测方程为:

$$\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_k = \boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{k-1} \quad (13)$$

根据上一时刻的最优状态估计协方差更新矩阵,预测当前时刻的状态协方差矩阵。状态协方差矩阵的预测方程为:

$$\bar{\boldsymbol{P}}_k = \boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{P}}_{k-1}\boldsymbol{F} + \boldsymbol{Q}_{k-1} \quad (14)$$

2) Kalman 增益与状态估计更新

Kalman 增益 \boldsymbol{K} 起到校正的作用^[15],根据系统执行控制过程的残差,决定系统状态偏向于估计值还是观测值,从而达到消噪目的。Kalman 增益 \boldsymbol{K} 更新方程为:

$$\boldsymbol{K}_k = \bar{\boldsymbol{P}}_k\boldsymbol{H}^T(\boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{P}}_k\boldsymbol{H}^T + \boldsymbol{R}_k)^{-1} \quad (15)$$

根据当前时刻状态估计预测矩阵和残差作为修正项对上一时刻的状态估计矩阵进行修正,得到当前时刻的状态估计矩阵。因此,状态估计的更新方程为:

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_k = \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_k + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{Y}_k - \boldsymbol{H}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_k) \quad (16)$$

3) 状态估计协方差更新

根据当前时刻的状态协方差预测矩阵和 Kalman 增益 \boldsymbol{K} ,对上一时刻的状态协方差更新矩阵进行更新。

$$\bar{\boldsymbol{P}}_k = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})\bar{\boldsymbol{P}}_k \quad (17)$$

4) 状态估计信号流程

根据式(16)和(17),将自适应跟踪算法的状态估计更新矩阵转换为:

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_k = \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_k + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{Y}_k - \boldsymbol{H}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_k) = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_k + \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{Y}_k = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})(\boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{k-1}) + \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{Y}_k \quad (18)$$

式中: \boldsymbol{I} 是单位矩阵。

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{k-1} = \boldsymbol{z}^{-1}\hat{\boldsymbol{\varphi}}_k \quad (19)$$

其中, \boldsymbol{z}^{-1} 是单位时间延迟算子,表示 $i+1$ 时刻的状态估计值传递给 i 时刻的状态估计值。

根据式(11)、(18)和(19),用图 2 所示的信号流程图来表示所提出的自适应跟踪算法。该信号流程图表明该算法是一个随机反馈系统,反馈的存在对该算法的收敛行为有重要的影响。

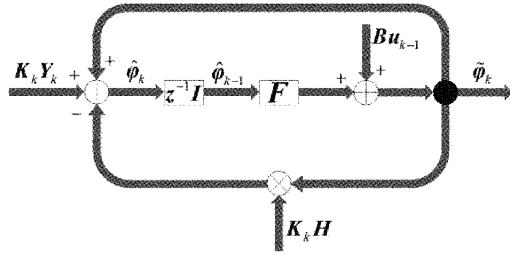


图2 信号流图

3 仿真实验分析

3.1 相位噪声性能提升对比仿真

本文利用 MATLAB 仿真软件对两个频率源信号和频率源的合路信号进行功率谱密度仿真,因为本文设计的相位自适应跟踪算法控制两个频率源的相位差值在 10° 以内,故假设 3 种情况:1)两个频率源信号的相位相差 0° 即 $\varphi_1 = \varphi_2$; 2)两个频率源信号的相位相差 10° 即 $|\varphi_1 - \varphi_2| = 10^\circ$; 3)两个频率源信号的相位相差 90° 即 $|\varphi_1 - \varphi_2| = 90^\circ$ 。以上 3 种情况的理论仿真结果如图 3~5 所示。

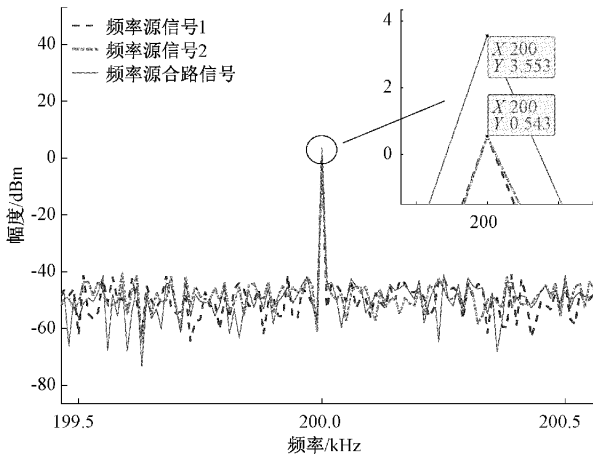


图3 功率谱密度-频率源相位相差 0°

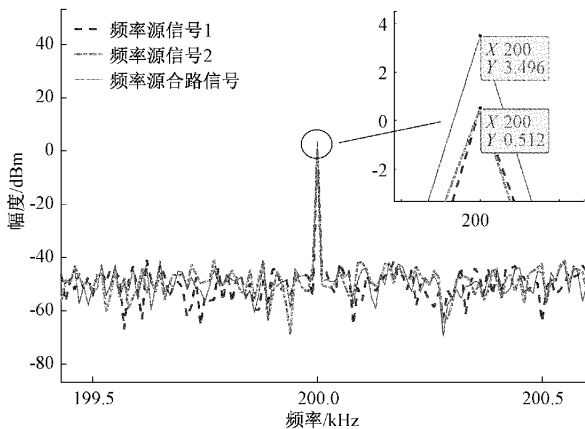


图4 功率谱密度-频率源相位相差 10°

分析图 3~5 仿真结果可以发现,当功率近似且频率相等的两个独立频率源信号进行线性相加,其相位差值为 0°

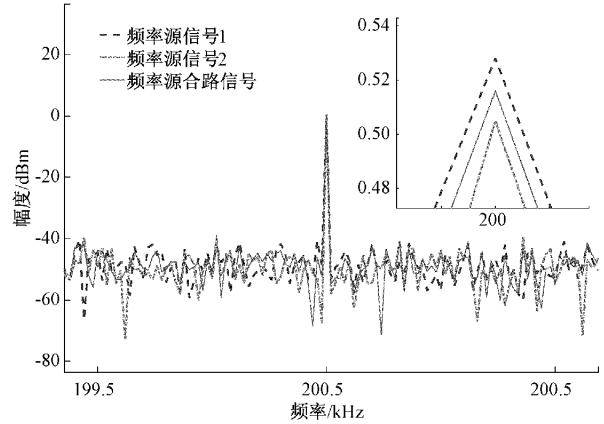


图5 功率谱密度-频率源相位相差 90°

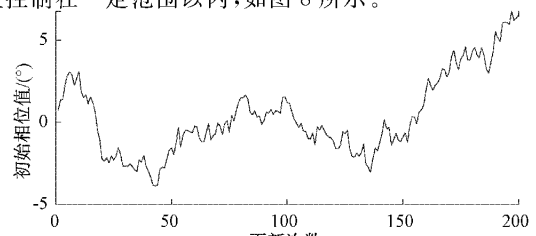
时,合路频率源信号的相位噪声性能得到明显提升,其幅度提升 3 dB;当两个独立频率源信号的相位差值等于 10° 时,其相位噪声性能得到提升,频率源的合路信号的幅值也得到大约 3 dB 的增益;当两个独立频率源信号的相位差值为 90° 时,其相位噪声性能明显没有得到提升。

综上,比较图 3、4 仿真分析结果,当功率近似且频率相等的两个独立频率源信号进行线性组合,其相位差值小于 10° 时,则线性组合信号功率是可以得到提升的,并且接近理论值。

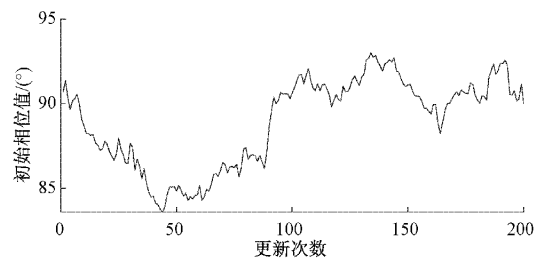
3.2 相位控制自适应跟踪仿真

为了验证该算法的理论可行性,本文仿真软件采用 MATLAB 进行理论仿真分析。

假设两路频率源的初始相位值分别是 $\varphi_1 = 0^\circ$ 和 $\varphi_2 = 90^\circ$,分别做了如下 3 项工作:1)对两路初始频率源信号的相位进行加噪仿真,如图 6 所示;2)对两路初始频率源的相位差值进行状态观测和状态跟踪仿真,如图 7 所示;3)对相位差进行自适应跟踪控制仿真,使两个初始频率源的相位差值控制在一定范围以内,如图 8 所示。



(a) 频率源1相位初始值



(b) 频率源2相位初始值

图6 双路频率源初始相位值

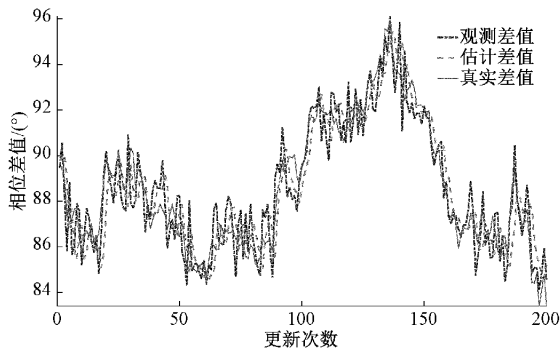


图 7 合路频率源的相位差值

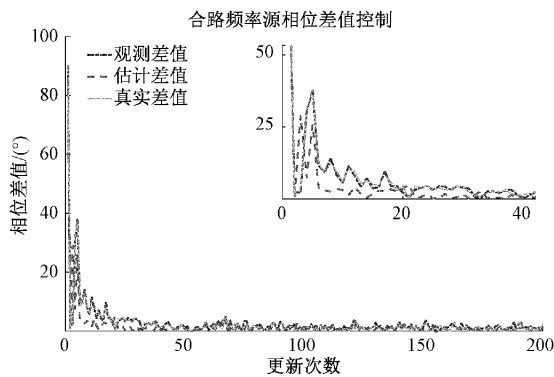


图 8 合路频率源的相位差值自适应控制

由图 6 可知,当频率相等且功率近似的两个初始频率源的相位加入噪声后,频率源的相位值都会发生偏移或浮动。频率源 1 的相位值在初始相位 0° 左右进行一定范围内的偏移或浮动;频率源 2 的相位值在初始相位 90° 左右发生一定范围的偏移或浮动。

由图 7 仿真结果可知,利用本文提出的卡尔曼滤波的自适应跟踪算法对两个初始频率源的相位差值进行跟踪观察,该算法可以实现跟踪两个频率源相位差值的效果。由仿真结果可知,两个独立频率源的相位值在没有加入控制的情况下,两个独立频率源信号的相位差值在初始相位差值 90° 上下进行一定范围内偏移或浮动。

由图 8 可知,经过 40 次的迭代更新之后,基于卡尔曼滤波的自适应跟踪算法有效地跟踪和控制两个频率源的相位差值,使其保持控制在 10° 以内。根据图 3 和 4 的仿真分析结果,说明基于 Kalman 滤波的自适应跟踪算法可以达到预期效果,使合成信号频率源的相位噪声性得到明显提升,使其幅度提升 3 dB。

4 结 论

通过理论分析和理论仿真,证明了本文提出的一种基于 Kalman 滤波的自适应跟踪算法,该算法可以解决多路频率源的初始相位不同步问题,实现多路频率源初始相位同步,从而达到由多路合成频率源可以提升相位噪声指标

的目的。本算法解决了多路频率源的初始相位不同步问题,同时修正频率源合路后的相位误差。因此在对相位噪声要求较高的电子设备中,可以采用该算法实现多路频率源相位同步的方式,从而提升合成频率源的相位噪声指标。后期可以开展实际工程实验,对本文算法在不同环境温度(参考文献[5]提出)影响下的自适应性进行实际工程验证,根据实际工程验证情况对本算法进行相应的修订,以实现该算法的工程适用性。

参考文献

- [1] 张占荣,王云飞,屈美霞,等. 数字锁相环的相位噪声分析[J]. 电气传动, 2021,51(11):15-19.
- [2] 廖长春. 微组装锁相频率源小型化设计[D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [3] 吴铁洲,李炎,祁军,等. 卡尔曼滤波结合数字锁相放大器的弱光声信号降噪方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10):98-102.
- [4] 成斌,沈文渊,叶锋,等. 一种联合补偿的动态相位噪声优化设计方法[J]. 压电与声光, 2020,42(2):178-181,185.
- [5] 李春利. 频率源相位噪声性能提升方法研究[J]. 现代雷达, 2021,43(1):76-80.
- [6] 杨东营,张超,社会文. 脉冲调制信号相位噪声测试[J]. 电声技术, 2021,45(7):77-80.
- [7] 张志鑫. 基于信号源与频谱仪的相位噪声测试软件设计[J]. 国外电子测量技术, 2012,31(3):65-67.
- [8] 江平,叶宝盛. 低抖动时钟产生电路设计[J]. 舰船电子对抗, 2016,39(5):117-120.
- [9] 李春利. 频率源相位噪声性能提升方法研究[J]. 现代雷达, 2021,43(1):76-80.
- [10] 黄刚,陈昌明,聂海,等. 一种 C 波段跳频频率源设计[J]. 现代雷达, 2015,37(9):71-74.
- [11] PODDAR A K, ROHDE U L, APTE A M. How low can they go: Oscillator phase noise model, theoretical, experimental validation, and phase noise measurements[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013,14(6):50-72.
- [12] 杨俊,许强. 频率源的相位噪声对雷达系统性能的影响[J]. 舰船电子对抗, 2016,39(1):58-61.
- [13] 徐明威,张禹,李延斌. 一种六维力传感器的信号噪声处理技术[J]. 现代信息技术, 2021,5(23):33-36.
- [14] 李健良,张婷婷,陶知非,等. 基于改进 Camshift 与 Kalman 滤波融合的领航车辆跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(6):131-139.
- [15] 栾欣雨,樊铀,陈娟. 基于卡尔曼滤波的迭代学习控制方法研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022,49(2):99-106.

作者简介

张道东,硕士,主要研究方向为信号检测与处理和状态估计控制。

E-mail:320085404310@stu.suse.edu.cn

杨仕勇, 硕士, 主要研究方向为信号检测与处理和自适应控制。

E-mail:321081104117@stu.suse.edu.cn

蒲红平(通信作者), 副教授, 主要研究方向为大数据分析、智能控制、智能信号分析与处理、工业自动化研究与工程应用。

E-mail:redapplep@sina.com

鲁朝升, 硕士, 主要研究方向为信号检测和信号处理。

E-mail:704554867@qq.com

郑晓霞, 讲师, 主要研究方向为自适应控制和信号检测与处理。

E-mail:zhengxiaoxiacap@sina.com