

文章编号:1001-893X(2012)07-1133-04

一种新的平滑频率扫描方式及其实现^{*}

雷 鸣

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:工程中常用的匀速频率扫描方式在频率拐点处的瞬时频率变化率较大,针对此缺点,提出了一种新的频率扫描方式——平滑频率扫描,并推导出平滑扫描的数学表达式。利用 MATLAB 进行建模仿真表明,平滑频率扫描可以有效减少扫描在频率拐点处的瞬时频率变化率,提高接收端的捕获概率。实际工程应用证明,该平滑频率扫描方式有效可行。

关键词:频率扫描;平滑频率扫描;匀速频率扫描;瞬时频率;捕获概率

中图分类号:TN911.72 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.017

A New Smooth Frequency-sweeping Method and its Realization

LEI Ming

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: In view of the disadvantage that the even frequency-sweeping which is used widely in practice now has big instantaneous frequency change rate on frequency inflection point, a new smooth realization mode of frequency sweeping called smooth frequency-sweeping is proposed, and the math formula is derived. Simulation of the smooth frequency-sweeping with MATLAB shows that using this method can effectively reduce the change rate of instantaneous frequency scanning at the frequency inflection point, and effectively improve the capture probability of receiver. Practical engineering application proves that the above implementation is effective and feasible.

Key words: frequency-sweeping; smooth frequency-sweeping; even frequency-sweeping; instantaneous frequency; capture probability

1 引 言

频率扫描信号是指信号合成器输出信号的频率在某时间段(扫描时间内)随时间按某种规律变化的信号。频率扫描方式在测试、测量等领域得到了非常广泛的应用,起着举足轻重的作用^[1]。

当前工程中的频率扫描通常采用匀速的频率扫描方式。匀速的频率扫描是以固定的扫描速率在一定的频率范围内进行频率扫描^[2]。扫描到频率范围的上限和下限时,频率扫描方向发生翻转,此时的瞬时频率变化率较大,提高了接收端捕获和接收信号的难度。本文根据实际工程应用的需求,提出了一种新的频率扫描方式——平滑频率扫描方式。

2 工作原理

当前的工程中通常采用的匀速频率扫描方式时

域波形图如图 1 所示。

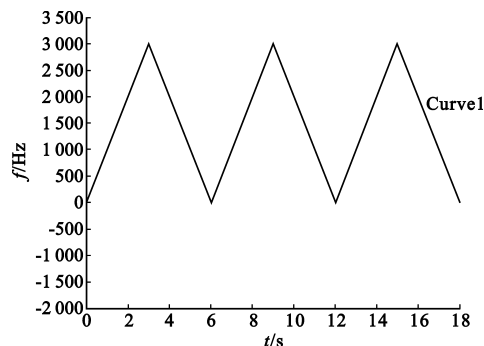


图 1 匀速频率扫描时域波形图

Fig.1 The even frequency-sweeping time domain waveform

图 1 中 curve1 为匀速频率扫描的频率的时域波形曲线。在扫描到频率的最高点和最低点(也即频率的拐点)时刻,瞬时频率变化率产生突跳,影响了

^{*} 收稿日期:2012-05-09;修回日期:2012-06-11

接收端对扫描信号的捕获和锁定。

本文是在直接数字合成技术的基础上进行频率扫描信号的合成。直接数字合成频率扫描信号的主要参数有起始频率 F_0 、终止频率 F_2 和扫描速率 f_v ，因此，信号的瞬时频率可以表示为

$$F(t) = F_0 + (F_2 - F_0) \cdot f(t) \tag{1}$$

式中, $f(t)$ 决定扫描的规律, 且满足在 $t = 0$ 时, $f(t) = 0$; 在 $t = T$ 时, $f(t) = 1$ 。在匀速扫描时, $f(t) = f_v t$ ^[3-4], 其中扫描的频率范围为 f_d , $f_d = F_2 - F_0$ 。

匀速频率扫描的数学公式表示为

$$f(t) = \begin{cases} f_v t, & \text{扫描方向为正向} \\ -f_v t, & \text{扫描方向为负向} \end{cases} \tag{2}$$

本文研究的平滑频率扫描方式的数学曲线图如图 2 所示。

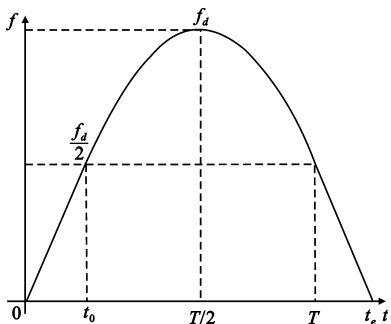


图 2 平滑扫描的数学曲线图

Fig.2 The smooth frequency-sweeping math curve waveform

在图 2 中的时间区间被划分为 $[0, t_0]$ 、 $[t_0, T]$ 和 $[T, t_e]$ 3 个部分, 其中 $[0, t_0]$ 和 $[T, t_e]$ 为匀速扫描部分, $[t_0, T]$ 部分为本文研究的平滑频率扫描部分。假设平滑频率扫描部分为一个二次曲线, 平滑扫描的频率区间为 $[\frac{f_d}{2}, f_d]$ 。

平滑频率扫描曲线的二次曲线数学表达式为

$$f(t) = at^2 + bt \tag{3}$$

将公式(3)求导可得扫描的瞬时频率变化率

$$f'(t) = 2at + b \tag{4}$$

由图 2 可以看出, 在 $t = \frac{T}{2}$ 处, 平滑曲线的最高点扫描的瞬时频率变化率为 0, 也即 $f'(t) = 0$ 。

$$f'(\frac{T}{2}) = 2a \times \frac{T}{2} + b = 0 \tag{5}$$

从而得出

$$T = -\frac{b}{a} \tag{6}$$

根据瞬时扫描频率的变化率不会产生突变的原

则, 在平滑曲线的起始时刻, 扫描的瞬时频率变化率等于匀速扫描的瞬时频率变化率 f_v :

$$f'(t_0) = f_v \tag{7}$$

从而得出

$$b = f_v \tag{8}$$

又由于在 $t = \frac{T}{2}$ 时, 平滑扫描到的频率范围为 $\frac{f_d}{2}$, 可推导出

$$f(\frac{T}{2}) = a(\frac{T}{2})^2 + b(\frac{T}{2}) = \frac{f_d}{2} \tag{9}$$

将公式(6)和(9)代入得:

$$a = \frac{-f_v^2}{2f_d} \tag{10}$$

整个扫描曲线的数学表达式为

$$F(t) = \begin{cases} F_0 + f_v t, & \text{匀速扫描} \\ F_0 + \frac{-f_v^2}{2f_d} t^2 + f_v t, & \text{平滑扫描} \end{cases} \tag{11}$$

通过公式(6)、公式(8)和公式(10)得出平滑扫描曲线的扫描时间为

$$T = \frac{f_v}{\frac{f_v^2}{2f_d}} = \frac{2f_d}{f_v} \tag{12}$$

则整个曲线的扫描时间为

$$T_{\text{total}} = T_{\text{even}} + T_{\text{smooth}} = \frac{f_d}{f_v} + \frac{2f_d}{f_v} = \frac{3f_d}{f_v} \tag{13}$$

公式(13)表明平滑扫描扫描时间是匀速扫描扫描时间的 1.5 倍。

公式(11)中整个扫描曲线的瞬时频率变化率的范围在 $[0, f_v]$ 以内, 其中在频率的上限和下限处的瞬时频率变化率为 0, 较匀速频率扫描方式有极大改善。

3 平滑频率扫描的实现

本文中所用的电路原理框图如图 3 所示。

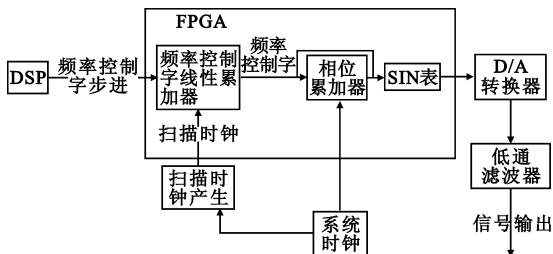


图 3 电路原理框图

Fig.3 The circuit schematic diagram

实现流程是 DSP 实时计算频率控制字的步进写入到 FPGA 的频率控制字线性累加器中。频率控制字线性累加器以扫描时钟产生器输出的扫描时钟为工作时钟,对频率控制字进行累加输出频率控制字。根据直接数字合成波形的原理,系统钟的上升沿每触发一次,相位累加器就累加一次频率控制字的值,然后以相位累加器输出为地址去查寻波形幅度的存储表,得到相应的一个幅度值,随着时钟沿的一个个到来,波形存储表的值被依次读出,产生了一个数字序列,该数字序列通过 D/A 转换器和低通滤波器后,输出需要的数字合成信号。实现中直接采用了 SIN 表代替波形存储器,则输出的信号波形为正弦波。

如果选择 N 位的相位累加器,系统时钟为 F_{sysclk} ,频率控制字为 F_{word} ,那么合成信号的频率 F_{out} 可表示为

$$F_{\text{out}} = \frac{F_{\text{sysclk}} \cdot F_{\text{word}}}{2^N} \tag{14}$$

当相位累加器的位数 N 和系统时钟 F_{sysclk} 固定时,合成信号的频率只与频率控制字 F_{word} 有关。

本次工程实现中选择的是 48 位的相位累加器,300 MHz 的系统时钟。DSP 选用的是 TMS320c6713,每隔 1 ms 计算一次频率控制字的步进置入到频率控制字线性累加器中。由图 3 可以看出,计算频率控制字的步进是整个工程实现的关键。在图 2 的 $[0, t_o]$ 和 $[T, t_e]$ 时间区间为匀速扫描部分,这期间频率的控制字以匀速的步进递增,DSP 控制输出的频率控制字步进保持不变。而在 $[t_o, T]$ 时间区间是平滑频率扫描部分,该区间频率控制字的步进实时变化,必须利用 DSP 根据公式(4)、公式(11)和公式(14)计算出频率控制字步进,实现公式为

$$F_{\text{word}} = \frac{2^N \times (f_v - \frac{f_v t}{f_d})}{F_{\text{sysclk}}} \tag{15}$$

通过上述的工程实现,实际测量输出信号的频率呈平滑曲线变化。

4 MATLAB 仿真

将公式(11)在 MATLAB 中进行了数学仿真,设置扫描速率 $f_v = 100 \text{ Hz/s}$,起始频率 $F_0 = 0 \text{ Hz}$,扫描频率范围 $f_d = \pm 1\,000 \text{ Hz}$,则仿真出来的波形图如图 4~5 所示。

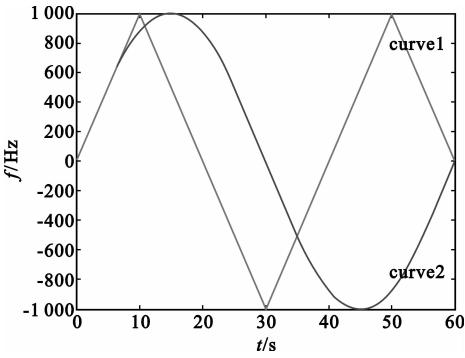


图 4 匀速和平滑频率扫描仿真时域波形图
Fig. 4 The even frequency-sweeping and smooth frequency-sweeping time domain waveform

图 4 中 curve1 为匀速扫描的频率曲线,curve2 为平滑扫描的频率曲线。

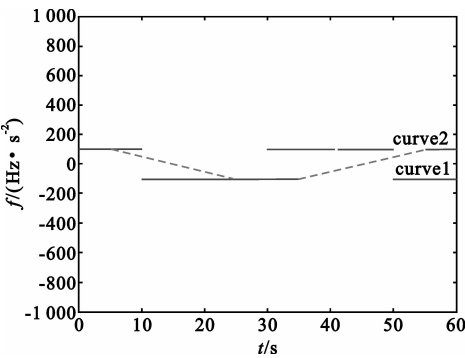


图 5 匀速和平滑频率扫描瞬时频率变化率仿真时域波形图
Fig. 5 The instantaneous frequency change of even frequency-sweeping and smooth frequency-sweeping time domain waveform

图 5 中 curve1 为匀速扫描的瞬时频率变化率的曲线,curve2 为平滑扫描的瞬时频率变化率的曲线。

从仿真图形可以看出,平滑扫描的频率曲线平滑,且瞬时频率变化率是连续平滑的,中间没有突跳,满足最初的设计要求。

5 结束语

本文在常用的匀速频率扫描的基础上提出了一种新的平滑频率扫描方式。该方式在整个扫描过程中,扫描频率的变化率是连续平滑的,成功地解决了匀速频率扫描方式在频率拐点处的瞬时频率变化率有突跳的问题,降低了接收端的捕获难度。该方式可以直接在匀速频率扫描的电路上设计实现,实现起来容易且可移植性较强。目前,该方式已经经过实际的工程验证,有效地提高了整个工程的指标性能,在工程中可以广泛采用。

参考文献:

[1]

范家庆,沈祝平.扫描测量技术[M].北京:电子工业出版社,1992.
FAN Jia-qing, SHEN Zhu-ping. Sweep & Measurement Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1992. (in Chinese)

[2]

吴义华,宋克柱,何正森.时钟抖动测量方法[J].数据采集与处理,2006,21(1):99-102.
WU Yi-hua, SONG Ke-zhu, HE Zheng-miao. Clock Jitter Measurement Method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2006, 21(1): 99-102. (in Chinese)

[3]

付平,张毅刚,刘旺.频率扫描信号的一种数字实现方法[J].测控技术,2002,21(6):11-13.
FU Ping, ZHANG Yi-gang, LIU Wang. Digital Realization Method of Frequency Sweep Signal[J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21(6): 11-13. (in Chinese)

[4]

Pedersen P C. Digital Generation of Coherent Sweep Signals[J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 1990, 49(3): 90-95.

作者简介:

雷 鸣(1978—),女,四川都江堰人,2009年于电子科技大学获工程硕士学位,现为工程师,主要从事航天测控方面的研究。
LEI Ming was born in Dujiangyan, Sichuan Province, in 1978. She received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. She is now an engineer. Her research concerns space TT&C.
Email: lei_ming_2012_4@163.com

勘误表

期数	页码	错误	正确
5	663	李国汉,王可人,张 颂 (解放军电子工程学院 信息系, 合肥 230037)	李国汉 ¹ ,王可人 ¹ ,张 颂 ² (1.解放军电子工程学院 信息系,合肥 230037; 2.总参陆航研究所,北京 101121)
5	663	LI Guo-han, WANG Ke-ren, ZHANG Song (Information Department, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)	LI Guo-han ¹ , WANG Ke-ren ¹ , ZHANG Song ² (1.Information Department, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2.The Army Aviation Research Institute of Headquarters of General Staff, Beijing 101121, China)
6	953	式中, c 为光在真空中的传播速度; L 为微带矩形贴片的实际长度; Δl 是由边缘效应引起的电纳可用 BD 单元边长为45.8 mm, GNSS 单元边长为36 mm中延伸长度; ϵ_r 为基板相对介电常数。经过软件优化, 中间两个单元重叠放置在一起, GNSS 单元位于顶层, BD 单元置于底层, 而馈电仍然是分开实现。	式中, c 为光在真空中的传播速度, L 为微带矩形贴片的实际长度, Δl 是由边缘效应引起的电纳可用延伸长度, ϵ_r 为基板相对介电常数。经过软件优化, BD 单元边长为45.8 mm, GNSS 单元边长为36 mm。中间两个单元重叠放置在一起, GNSS 单元位于顶层, BD 单元置于底层, 而馈电仍然是分开实现。
6	953		
6	957		