清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：超高速、高精度数控振荡器(NCO)设计

系 别：电子工程系

专 业：电子信息科学与技术

姓 名：杨一雄

指导教师：杨华中 教授

2017 年 5 月 28 日

关于学位论文使用授权的说明



中文摘要

在目前众多的基于无线传感器网络的应用中，时钟同步技术是一个非常关键的技术。时钟同步技术可以用来实现任务调度，统计数据分布，协调动作与通信等功能。由于无线传感器网络具有低功耗、分布式、节点数量大等特点，因此越来越多的传感器网络节点开始采用太阳能自供能的电源方案。

本文通过研究太阳能的时间分布信息，提出了一种基于太阳信标的时钟同步方案。这项技术依托于传感器节点对于太阳能的采集，不需要大规模的射频收发同步以及其他的额外操作，在分布式的传感器节点内部算法复杂度低，平均功耗低。由于很多无线传感器网络应用的主要任务是数据采集，因此这项时钟同步技术可以满足基于太阳能自供能的传感器节点对于采样时钟的需求。

关键词：时钟同步；太阳能；无线传感器网络

ABSTRACT

Time synchronization technology stands in a very critical position of today’s wireless sensor network applications. Time synchronization technology is used in the area of task scheduling, data synchronization, task coordination, and communication functions. Since WSN system is concerned to be distributed, lower power consumed, and of large amount, more and more WSN sensor nodes adopt to use the power management system based on solar energy harvesting.

In this article, we studies the time distribution of solar energy information, and proposes a time synchronization scheme based on the solar beacon. This technology works according to the solar information collected by WSN sensor node, without too much radio frequency transmitting and receiving, which causes a very low power consumption. The synchronization is mainly realized in the server and the algorithm in the sensor node is of less complexity. Considering that a large quantity of WSN application is used for data acquisition, this time synchronization technology is able to meet the sample clock requirement of WSN sensor nodes based on solar energy harvesting.

Keywords: Clock Synchronization; Solar; Sensor Network

目 录

[第1章 引言 5](#_Toc390423703)

[1.1 无线传感器网络 5](#_Toc390423704)

[1.2 时钟同步技术 6](#_Toc390423705)

[1.3 需求分析与主要工作 7](#_Toc390423706)

[第2章 传统的时钟同步技术 10](#_Toc390423707)

[2.1 无线传感器网络的时钟同步技术概述 10](#_Toc390423708)

[2.1.1 网络时间协议（NTP） 10](#_Toc390423709)

[2.1.2 全球定位方法（GPS） 11](#_Toc390423710)

[2.1.3 广播式时钟同步技术 11](#_Toc390423711)

[2.1.4 多跳转发式时钟同步技术 13](#_Toc390423712)

[2.2 传统无线传感网时钟同步技术评价标准 14](#_Toc390423713)

[2.3 本章小结 15](#_Toc390423714)

[第3章 基于太阳信标的时钟同步技术的建模与算法 16](#_Toc390423715)

[3.1 概述 16](#_Toc390423716)

[3.2 时钟延时校准 16](#_Toc390423717)

[3.2.1 采样时钟延时校准算法 16](#_Toc390423718)

[3.2.2 影响因素分析 18](#_Toc390423719)

[3.3 时钟频偏修正 24](#_Toc390423720)

[3.3.1 采样时钟频偏修正算法 24](#_Toc390423721)

[3.4 算法优化分析 26](#_Toc390423722)

[3.5 本章小结 26](#_Toc390423723)

[第4章 硬件平台与实验 28](#_Toc390423724)

[4.1 硬件平台 28](#_Toc390423725)

[4.1.1 硬件架构方案 28](#_Toc390423726)

[4.1.2 硬件模块选型与配置 29](#_Toc390423727)

[4.1.3 硬件平台工作流程设计 35](#_Toc390423728)

[4.2 实验设计与结果 37](#_Toc390423729)

[4.2.1 时钟延时校准实验 37](#_Toc390423730)

[4.2.2 时钟频偏修正实验设计 48](#_Toc390423731)

[4.3 本章小结 50](#_Toc390423732)

[第5章 总 结 52](#_Toc390423733)

[5.1 论文工作总结 52](#_Toc390423734)

[5.2 未来工作展望 52](#_Toc390423735)

[插图索引 54](#_Toc390423736)

[表格索引 56](#_Toc390423737)

[参考文献 57](#_Toc390423738)

[致 谢 59](#_Toc390423739)

[声 明 60](#_Toc390423740)

[附录A 外文资料的调研阅读报告或书面翻译 61](#_Toc390423741)

# 基于直接数字式的振荡器设计

## Rom-Cordic 混合结构设计

直接数字综合器在频率分辨率、捷变性能上取得较大成功，但较锁相环式振荡器，传统DDS仍存在时钟频率受限，输出杂散性能不佳等情况。

为了提高DDS的时钟频率和杂散性能，本文采用了基于Rom的查找表和基于Cordic的角度旋转法结合的思路，系统的面积功耗有限增长的情况下，极大减少了查找表的寻址深度，在频率分辨率不变的情况下提高了查表速率。

### 系统架构

预留系统架构图

图x显示了DDS的系统框图。它的输入为16 bit的频率控制字(fcw)和相位控制字(pcw)，用于更改系统输出的正弦波频率和初始相位。相位累加器(PA)根据fcw 和 pcw 生成16 bit 的数字相位，表示相位在(0, 2pi) 区间内所占比例。

由于三角函数的对称性，利用(0, 1/4pi) 区间正、余弦函数值，通过对称操作即可表示正弦函数的值域。相位压缩模块(PC)提取出3 bit 对称操作控制字(mcw)，13bit 伪相位phi’ 输出至PAC, 用于查找表寻址和控制旋转角度。

PAC包括384-byte的查找表和7组角度旋转电路。Phi’的1~6位用于查找表寻址，获得粗分辨率单频信号。Phi’ 的7~13位用于控制旋转角度，对粗分辨率单频信号进行修正，获得细分辨率单频信号最后通过对称操作模块，将细分辨率信号从(0,1/4 pi) 映射到(0, 2 pi)区间，最后输出。

### 相位累加器(PA)设计

相位累加器(PA)接收外部输入的fcw 和 pcw，生成线性增长的相位。图x所示，PA由一个16 bit 加法器和16 bit 寄存器构成，输出16 bit相位phi

预留PA框图

PA生成的相位满足公式x

phi(n\*delta\_t) = fcw \* n + pcw

根据公式 x ，输出信号的中心频率满足f0 = fcw/2^M \* F\_clk，其中M = 16表示加法的位数，F\_clk是系统时钟频率。系统的频率分辨率为 delta\_phi = F\_clk/2^M，可见要加强频率分辨率，首先需提高加法器位数。

pcw的作用是在系统重置后对相位赋初值。重置结束后，相位初值不受pcw影响，不能随时更改相位。

### 相位压缩器(PC)设计

预留相位划分图

图x展示为数字相位的区域：其中MSB1 ~ MSB3用于对称操作， MSB4 ~ MSB9用于查找表寻址，MSB10 ~ MSB16用于角度旋转。如图x所示，需要将任意相角的向量映射到(0, 1/4 pi)区间，需要对上述相位进行变换。

预留向量对称图

相位phi的前3位表示向量所在的8分区间，利用区间信息可将该向量对折至(0, 1/4 pi)区间。因此直接取MSB1~MSB3作为对称操作控制字(scw)，输出至对称操作模块。

根据图x，为计算出伪相角phi’，需利用MSB4~MSB16。根据对称关系，若MSB3 值为1，则反转MSB4~MSB16 作为phi’，否则phi’取MSB4~MSB16。Phi’的前6位作为查找表地址(la)，后7位作为旋转控制字(rcw)，分别输出至Rom 和 旋转电路用于确定伪向量

### 相位幅度转换器(PAC)设计

查找表是将相位转化成幅度的重要模块，根据地址输出粗分辨率的信号。查找表需要将(0, 1/4 pi)区间内的正、余弦幅度X0 = cos()，Y0 = sin() 输出。与参考文献x相似，查找表额外存储了两组函数X\_Q = 1/4 pi \*cos() 和Y\_Q = 1/4 pi \* sin()，以替代之后的乘法操作。

预留PAC框图

根据公式x，为了防止溢出，写入值需要理论值与常数K相乘得到。具体设计中，X\_R，Y\_R的长度为16 bit，而X\_Q和Y\_Q量化位数为8bit，因此单次查表的带宽为48 bit。

如图x，角度旋转电路接收查找表输出和旋转控制字(rcw)，最终将向量(X\_R, Y\_R)旋转至修正值(X, Y)。根据1.1.1中的误差分析，角度旋转将带来杂散性能的增益，rcw 每提升一位。

公式x显示，改进Cordic算法由多次矩阵乘法迭代产生的，迭代操作可由多个旋转电路级联构成。公式x中，矩阵乘法操作包括两次加法和两次移位，因此在设计旋转电路时，选取两个移位器和两个16 bit加法器构成，如图x。

预留旋转电路框图

### 对称输出电路

## 时钟延时校准

### 采样时钟延时校准算法

解决无线传感网的时钟同步问题，首先要解决的问题是节点时钟的校准。由于无线传感网是由大量的分布式节点自组织建立起来的网络，因此系统在开启工作或掉电重启的过程中并不能保证每一个节点都可以同步的开启。这就导致了第一个层次的时钟误差。



图 3.1 时钟延时示意图

如上图所示，其中A是信标节点，B是传感器节点。由于系统在开启的过程中不能保证同步开启，所以不同的节点采样时钟A，B之间存在一个延时。在理想情况下，两个时间波形A，B是相似的，其变化趋势是一致的（幅值可能存在一定的差异）。实际情况中，A，B分别是两个离散的时间序列，因此可以通过计算一定的方法来确定两序列之间的延时。

**方法一：计算欧几里得距离**

用两个不同序列的欧几里得距离关于序列的延时的函数模型可以表示为：

其中。为了消除延时后不同维度引起的误差，将欧氏距离取方均根值：

在给定序列A，B的条件下，计算函数的最大值就是理想的时钟同步点，此时对应的就是理想的延时。

**方法二：计算皮尔逊相关系数**

用两个离散序列的皮尔逊相关系数关于序列的延时的函数模型可以表示为：

即：

其中：

是节点B的采样时钟周期。

在给定两个序列A，B的情况下，函数取得最大值的点就是理论上的时钟同步点，对应的就是理论上可以计算得到的延时。

由于信标A的采样时钟频率为，所以，在最理想的情况下传感器节点B的时钟精度可以被限定在时间之内。由此可知这个算法的局限性在于如果节点的采样时钟频率较低，则不同的节点可能不会在同一个时刻上，而是会采样在相互的采样时钟间隔内采样。因此在序列匹配的过程中会产生误差，限制时钟同步的精度。在这个思路的基础上，如果作为信标节点的太阳能时间序列A具有更高的采样精度，则序列匹配和时钟同步的效果会更好。



图 3.2 高采样率信标示意图

如上图所示，如果信标节点A的时钟采样精度为，那么依照计算皮尔逊相关系数的方法，其函数表达式为：

除了信标时钟序列A的坐标系数外，与原始的表达式基本一致。同样计算出函数的最大值点，对应的就是理想的延时。由于信标采样时钟频率提高到了原来的倍，因此每一个匹配点的理想浮动范围即是原始方法的，精度提高了倍。

### 影响因素分析

有一些因素对于这种基于太阳能的时钟延时校准算法有比较大的影响，如太阳的变化率、较大的时钟频偏、较大传感器测试噪声等。

**（1）太阳能的变化率**

从3.2.1中所描述的算法可知，时钟延时校准的主要依据是太阳能曲线的相关性，也即是会受到太阳能的变化率的影响。算法中所描述的皮尔逊相关系数的表达式可以表示如下：

其中主要太阳能的变化率对于序列A、B的一阶、二阶中心距而言没有直接的影响。但是会影响到序列A、B的互相关项。对于连续波形而言，A、B波形的互相关项关于时钟有延迟修正量的函数可以表示为：

如果认为A，B波形变化趋势一致，即

则有：

其中是实际的时钟延迟。

由表达式可知，如果相关函数的稳定性随波形的变化率不同而改变，对于极端的情况，如果波形的变化率恒为0，则相关函数不随的改变而改变；当波形不为0，但是比较低时，计算出来的相关函数的值相对比较平稳，没有突出峰值，因此不易寻找搜索精确的时钟延时测量值。如果波形的变化率很大，则k值的改变会极大的改变相关函数的值，相关函数的波形起伏明显，峰值突出，易于确定延时的位置。所以对一个完整的波形而言，不同波段的变化率的模表征了波形不同波段在计算相关系数时的权值，影响到了时钟延时校准的效果。

相比于太阳能的变化率，影响到时钟延时校准的外界因素主要是噪声与干扰，其中噪声指的是由于环境因素和传感器精度所引发的稳定的波形抖动，而干扰则指的是对于某一个节点而言，由外界环境因素引起的非全局的突变。由前文分析可知，对于理想情况下，只要太阳能的变化率非零，就可以通过就计算波形相关度的方式来实现波形的匹配与始终延时的消除。但是由于噪声的存在，所以实际算法对于太阳能变化率的需求存在上界。假设噪声为理想的加性高斯白噪声，那么噪声越大，则噪声低频分量强度就越高，这就限制太阳能变化率的频率范围不能过大，高频分量不能过多。

另一个比较明显的外界因素是干扰。干扰的来源主要是不可预测的外界环境因素。对于受干扰的节点所测试到的波形而言，干扰的幅度较大，其变化率范围比较大，基本包含了太阳能的变化率范围。对于频率低于太阳能变化率的干扰，比如长时间的遮挡、大面积的阴影等，太阳能的变化率如果保持在一个比较高的水平，则可以通过滤波去除干扰的影响。但是对于大部分的其他干扰而言，如果仅仅依靠无后效性的数据处理算法，那么干扰对于波形匹配的影响往往是难以消除大的。所以在缺少大量数据的学习分析的前提下，最好的处理干扰的办法就是去除有干扰的波形。

因此，太阳能曲线的变化率越高，则波形的抗噪声干扰的能力越高。在实际测试时发现，太阳能的变化效果随时间而位置的不同而变化。从时间上看，清晨和黄昏时段，太阳能基本处于单调变化，变化率较高。正午的太阳能变化率处于正负浮动的截断，测试数据变化比较明显。此外，正午阳光充足，受到全局的环境干扰时变化比较明显，比如云朵的遮挡、阴天等情况，此时进行时钟延时校准的效果也比较明显。从位置上看，有阳光直射的位置，光照强度比较高，相对而言太阳能的变化比较明显。但是同时室外环境比较复杂，经常会受到比较强的反射、折射以及阴影遮挡的影响，导致波形的不匹配。与之相比室内环境没有阳光直射，阳光强度较低，变化不明显。同时，室内环境相对比较稳定，在没有人等因素的影响的情况下一般不会出现比较明显的干扰，但是由于变化率降低，室内环境中稳定的噪声是影响时钟延时校准的主要因素。

**（2）时钟频偏**

在嵌入式系统中，存在时钟漂移从而导致时钟频偏是无法避免的。一般的晶振时钟漂移约在40ppm左右，而RC振荡电路产生的时钟漂移则大得多，根据不同的电路设计而有所不同。在理想的情况下，测试时间长度为，其中是传感器节点的采样时钟频率。假设信标节点的采样频率是传感器节点采样频率的倍，则根据3.2.1中的分析可知，信标节点采样波形A和传感器节点采样波形B的皮尔逊相关系数可以表示为：

从统计学的角度讲，采样时钟频率的频偏主要影响到采样的间隔和采样点的时域位置，对于整个序列的统计规律没有明显的影响，因此当采样时间足够长，采样点数足够多时，序列A、B的统计规律不变按，、、、的值不会因为频偏而又有明显浮动。唯一影响到的是序列A、B的相关项。在没有频率偏移的理想情况下，序列A、B的相关系数最大时，两个序列的采样点所处的位置，应该是两个波形差值后变化趋势基本相同的位置。（如图）如图所示，相关系数最大时，相对采样点所处在的实际时域位置之间的时间间隔满足关系式：

由于相关系数的理论最大值应该位于两个序列的变化趋势完全匹配的时候，因此此时计算得到相关系数，距离理论最大值最近，往往也是离散相关系数序列的最大值，符合3.2.1中的理论推导。



图 3.3 序列相关最大值位置

如果考虑到序列B相对于序列A的频偏，因此两个序列的时钟周期满足关系式：

所以：

因此在进行离散序列相关系数计算时，实际的波形对应关系如图所示。由于波形B的周期长度不是精确的长度，所以B序列被扭曲了，产生了较大的形变。



图 3.4 扭曲的节点序列

由**（1）**中的分析可知，在考虑连续波形的情况下，影响到相关系数的主要项是波形A、B的互相关项：

如果再加上对于B时钟漂移的修正，即伸缩扭曲了曲线B，则有：

根据**（1）**对于太阳能变化率的影响分析可知，不同波段的太阳能变化率表征了太阳能曲线在计算相关系数时的权值。由于始终漂移的存在，波形B产生了系数为k的波形伸缩效果，实际上相当于改变了B曲线太阳能的变化率。

对于离散波形而言，由于理想的时钟延时校准精度为，所以当传感器节点采样时钟频率的频偏取值为：

采样时间长度取值：

时，时钟延时的校准精度的理论值可以达到理想值。



图 3.5 时钟校准精度与频偏的关系

根据上文的分析，不妨先假设波形变化率的绝对值恒定，因此，如果继续保持上述的频偏采样，当采样时钟的长度取值范围为：

时，原始的校准位置误差为。

根据以上关系式，反过来也可以进行推导，即如果测试结果误差为，则实际的平均频偏最小值会达到：

但是从图（b）中可以看出，匹配波形的中心点的精度可以保证在理想的。那么推广到普通的太阳能波形变化曲线，可以认为匹配精确地点位于整个采样时间序列的**重心**。

## 时钟频偏修正

### 采样时钟频偏修正算法

在理想的情况下，可以假设节点的本地时钟是精确地，不存在频偏和相位漂移。因此在这个假设下，完成3.1.1中所描述的算法，就可以实现对于无线传感网系统的时钟同步。但是在实际情况下，尤其是SoC中没有晶振的RC时钟发生器，时钟序列是不稳定的，存在比较明显的时钟漂移。因此，在消除了3.2.1中的序列延迟后，还应该补充优化算法来修正采样时钟的频偏。

首先要估算时钟频偏的粒度。正如前文所提及的，对于不同的无线传感网节点而言，时钟的偏移差距是很大的。这里主要有两种情况：

（1）由标准晶振产生的时钟。

在一个嵌入式系统中，系统时钟往往是由晶体振荡器电路产生的，因此可以保证很高的时钟精度。对于一般的晶振而言，晶振精度约为1~100ppm，典型值为40ppm，即或。因此对于数据采集的时钟来讲，其时钟精度是有保障的。此时的时钟频偏往往来自于其他的因素，如环境因素、处理器定时器误差等因素。

但是由于晶振不易被集成，因此工艺难度大、成本高，在一些需要高精度数据的领域中会被常常用到，如国防、航空[18]等。

（2）由RC振荡器产生的时钟

由于晶振不易被集成，因此目前的低成本嵌入式SoC中，使用“RC+振荡器”电路产生时钟的情况比比皆是。相比于晶振电路，RC振荡器的Q值低，幅频响应通带较宽，因此时钟漂移大，频偏高，时钟很不稳定。再加上环境因素和定时器设计等软件因素也会产生影响。因此，这种传感网电路有必要进行时钟频偏的修正。



图 3.6 置信点示意图

对于时钟延时校准而言，在采样的波形中，太阳能变化率较大的区域往往可以更好实现波形的匹配（分析见3.2.2），从而可以更加精确地实现时钟延时的校准。这些区域中的点被称为时钟延时校准的**置信点**。在一段波形中往往会有多个置信点，选择这些区域的置信点进行校准，就可以在这段波形中找到多个校准同步后的高精度时间点。如图3.6所示，信标时钟序列A的采样率是节点时钟序列B的采样率的倍。图中的点，就是经过第一步时钟延时校准后的置信点，对于有限的时钟频偏而言可以认为是精确地时钟同步点。因此，通过高采样率的信标节点时钟序列A可以计算出两个相邻置信点的时间间隔：

而这段时间间隔里，序列B中对应的周期数为。那么，可以计算出来序列B在这段时间间隔中的实际时钟周期为：

从而修正对应的序列B在点，之间的时钟频偏：

假设时钟频偏在较短的时间间隔内可以认为是线性变化。那么根据这个基本原理，信标采样时钟频率为，因此可以计算得到这个算法对频偏估计的理论精度为：

## 算法优化分析

根据以上算法设计和精度误差分析内容，可以看出，基于太阳信标的时钟同步算法的局限性主要集中在以下几点：

（1）算法依赖于太阳能曲线的变化趋势，曲线变化率的大小对于算法的性能有比较大的影响，而实际的太阳能变化曲线受天气和环境的影响很大，这一点制约了算法的精度和适用范围。

（2）时钟延时校准算法受外界的噪声影响比较大。现有的理论算法对于误差的修正能力有限。

（3）系统采样时钟的频偏对于时钟延时校准算法的影响比较大。从而也会影响到第二部分时钟频偏修正算法的精度。

（4）整个算法对于外界的异常干扰的处理缺乏手段。一旦发生这种强度比较大、持续时间比较长的干扰，服务器就需要提出整段的数据来去除干扰因素。

针对这些问题，可以提出几点改进方案如下：

（1）可以通过大量的数据分析，找到每天中太阳能变化比较明显的时间段，比如清晨、正午、黄昏等时间段进行集中的时间同步，然后通过这些区域的同步置信点来完善其他时间段的时间同步。

（2）可以在节点段针对太阳能不变化，自适应的选取一部分变化率比较大的点作为置信点。

（3）调研提出更加有效的序列匹配算法。

（4）通过机器学习等大数据分析的方法研究干扰对于时钟同步的影响并在算法中加入修正因子。

## 本章小结

这种基于太阳信标的时钟同步的方法不同于传统的时钟同步方法。传统的时钟同步实质上等价于修改了分支节点的本地时钟，使得不同的节点严格的依照经过校准的全局同步时钟执行工作。但是由于无线传感器网络独特的应用需求，传感器节点的任务主要是数据采集和部分数据计算，所以不同节点之间在任务执行方面的时钟同步需求不大。基于这种考虑，本文的时钟同步算法将同步的工作重点由任务调度同步转移到了数据同步。实际的数据同步对于传感器的测试同步需求不高，所以这种同步方式完全可以适用于新一代的无线传感网系统之中。

基于太阳信标的时钟同步算法分为两个主要部分，分别是基于采样时钟序列的时钟延时校准和基于延时校准的时钟频偏修正。本章主要描述了两种算法的主要思路、数学模型和理论推导，从理论上保证了算法的可行性。然后通过实验和假设对算法实现的精度和误差进行了详尽的分析，并最终针对这些不足提出了改进优化的方向。

基于太阳信标的时钟同步算法的同步数据可以和传感器节点采集的数据一起发回服务器终端，因此完全避免了传统时钟同步技术中对间歇性射频收发同步信号的功耗损失。而对于测试数据依赖于太阳能数据的节点，可以认为这种同步算法完全是凭借现有的全部数据实现的，消除了大部分的射频功耗。这对于对能量效率需求较高的太阳能自供能节点而言是有很大的优势的。