

# 光栅莫尔条纹信号细分方法设计与 Simulink 仿真

杨华晖<sup>1,2</sup> 冯伟利<sup>3</sup> 刘 福<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 石家庄 050003;  
3. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

**摘要** 根据计量光栅莫尔条纹信号高精度细分的要求, 提出了一种基于 ADC 幅值采样和相位解算的光栅细分方法, 并利用 Simulink 搭建仿真模型, 使两路正余弦信号通过正余切变换、幅值采样、固定相位步长细分等处理后输出为两路正交编码信号。仿真实验表明, 该细分方法在输入理想信号情况下细分倍数主要与 ADC 采样精度有关, 提高 ADC 采样位数可有效提高最大细分倍数。通过在两路时变  $\sin/\cos$  信号中添加幅值不等、相位不正交以及高次谐波分量等干扰噪声的仿真实验, 验证了该方法的细分精度与信号质量有关。

**关键词** 仿真建模 幅值采样 相位解算 莫尔条纹细分 噪声干扰

## Subdivision Design of Grating Moire Fringes and Simulation by Simulink

YANG Hua-hui<sup>1,2</sup> FENG Wei-li<sup>3</sup> LIU Fu<sup>2</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003;  
2. Ordnance Technological Research Institute, Shijiazhuang 050003;  
3. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076)

**Abstract** According to the high precision subdivision requirements of metrological grating Moiré fringes, a subdivision method of grating based on ADC amplitude sampling and phase resolution was established. And the simulation model of this subdivision method was established to convert the sin & cosine signals into two quadrature encoding signals after positive cotangent transforming, the amplitude sampling phase dividing in fixed step size and other processing method. The results of simulation experiments show that the interpolation of this method is related to accuracy of ADC with the ideal signal inputting and the maximal interpolation can be increased up to 1000 by improving the ADC sampling digit. The simulation experiment also verified that subdivision precision mainly depends on the signal quality by adding noise interference including unequal amplitude error, quadrature phase shift error and high-order harmonic components to the dynamic sin & cosine ideal signals.

**Key words** Simulation modeling Amplitude sampling Phase resolution Subdivision of moire fringe Noise interference

# 1 引言

在精密仪器与测试领域,计量光栅以其稳定性好、抗干扰能力强等优点而得到广泛应用,并且随着精密检测技术对仪器分辨率以及测试速度要求的提高,光栅莫尔条纹细分技术需要在高速追踪和纳米级测量方面有所突破<sup>[1-3]</sup>。光栅测量技术在位移、角度计量方面的应用主要是以光栅迭合所形成的莫尔条纹信号为基础的,经光电元件转换,使输出转变为随透射光强周期变化的电信号<sup>[4]</sup>。

光栅细分可分为光学细分、机械细分和电子细分三种方法,当前基于高速处理芯片(如 FPGA、DSP 等)的电子细分方法逐渐代替了移相电阻链细分、锁相倍频细分和载波调制细分等传统的细分方法<sup>[5,6]</sup>,其主要可以分为基于幅值采样和相位解算两种。电子细分的另外一个优点是可以利用补偿算法降低电子细分误差,提高测量精度<sup>[7]</sup>。当前电子细分方法主要有 CORDIC 算法在相位角度软细分中的应用<sup>[8]</sup>、基于神经网络的光栅细分算法<sup>[9]</sup>、CCD 直接细分光栅信号<sup>[10]</sup>、智能锁相技术<sup>[11]</sup>以及基于预测理论的光栅细分算法<sup>[12]</sup>等,但以上细分算法多数是基于数学模型直接求解细分后光栅位移的距离或角度,输出信号较多,不利于后期处理。本文提出

了一种通过正切幅值采样数值求解周期信号内相位值,最后输出两路正交编码脉冲信号的细分方法<sup>[13]</sup>,正向移动时编码信号如图 1 所示,并利用 Simulink 搭建仿真模型,验证该方法的可行性,进而分析理想细分倍数和有噪声干扰的情况。



图 1 正交编码脉冲信号示意图(正向)

# 2 系统仿真模型

## 2.1 总体设计

仿真模型采用两路相位差 90°的正弦信号和余弦信号作为系统输入。如图 2 所示,整个仿真系统由区间分割模块、信号预处理模块、鉴相细分模块和信号输出模块四部分组成,其中区间细分模块和信号预处理模块都是以两路正余弦信号作为输入,前者输出用于区间选择的二进制数据编码,后者输出用于幅值采样的正余切信号。鉴相细分模块是该系统设计的核心,用于将幅值采样的数据转换为对应的细分相位信息,并输出经过细分后的锯齿波信号。信号输出模型内部通过查找表法将细分锯齿波信号处理为两路正交编码信号分别为 CHA 和 CHB。

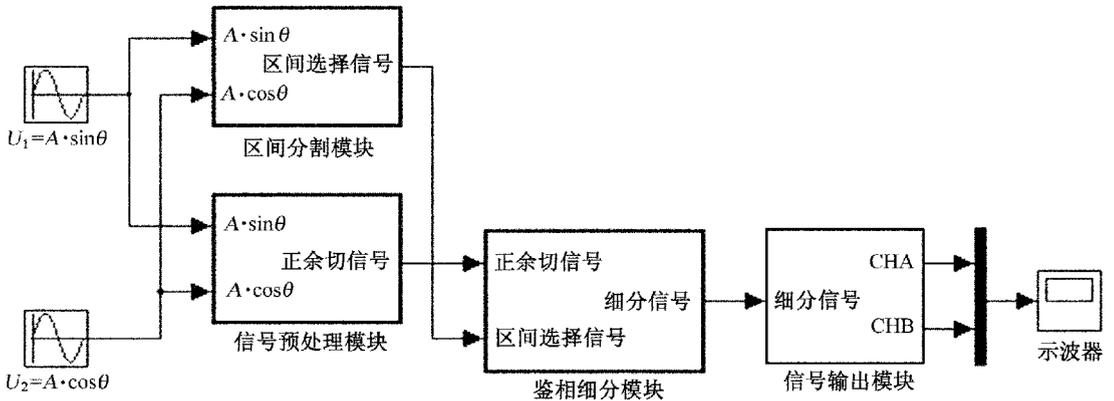


图 2 仿真模型总体设计图

该模型与实际光栅尺输出信号相比,理论上缺少了零位信号,该信号一般由固定参考标记光电元件发出。由于模型中只需要对光栅细分效果进行验证分析,因此不再考虑零位信号的处理和输出。其次可以根据 CHA 和 CHB 的相位信息判断光栅移动的方向,因此系统模型不需要再输出辨向信号。

## 2.2 信号预处理模块

光栅莫尔条纹细分的前提是分割与相角  $\theta$  具有对应关系的线性函数,如式(1)所示,系统的两路输入信号模型表示为

$$\begin{cases} U_1 = A \sin \theta \\ U_2 = A \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中： $A$ ——输入信号幅值； $\theta$ ——相位角。

由于正余弦信号在函数极值点处的线性度不好，不利于 AD 器件进行采样后的相位解算，因此需要对原始信号进行预处理，将两路信号转换为线性度较好的幅值采样函数，通常有公式(2)和公式(3)两种处理方法

$$\Delta U = |A \sin(\theta)| - |A \cos(\theta)| \quad (2)$$

$$U_{\Delta} = \begin{cases} \frac{|A \sin \theta|}{|A \cos \theta|} = |\tan \theta| & U_1 \leq U_2 \\ \frac{|A \cos \theta|}{|A \sin \theta|} = |\cot \theta| & U_1 \geq U_2 \end{cases} \quad (3)$$

比较以上两种信号处理的方法，式(3)的变化范围是 $[-A, +A]$ ，因此需要在预知正余弦信号幅值

$A$  大小的情况下才能进行采样编码；式(4)的处理为正切函数，在区间 $[0, +\pi/4]$ 内的线性度较好，且变化幅值在 $[0, 1]$ 范围内，整个周期内波形接近三角波，因此该模块选择  $U_{\Delta}$  作为信号预处理的输出信号。

该模块仿真模型如图 3 所示，对两路信号取绝对值，再通过 if 模块判断两路信号幅值大小，选择处理信号的子模块，子模块内将正余弦解算为  $U_{\Delta}$  函数后输出。取两路输入信号的幅值  $A = 0.5V$ ，角频率  $\omega = \pi/4$ ，仿真时间 8.0s，采用固定步长连续求解器，在系统模型中观察  $U_1$ 、 $U_2$  和  $U_{\Delta}$  波形，如图 4 所示。

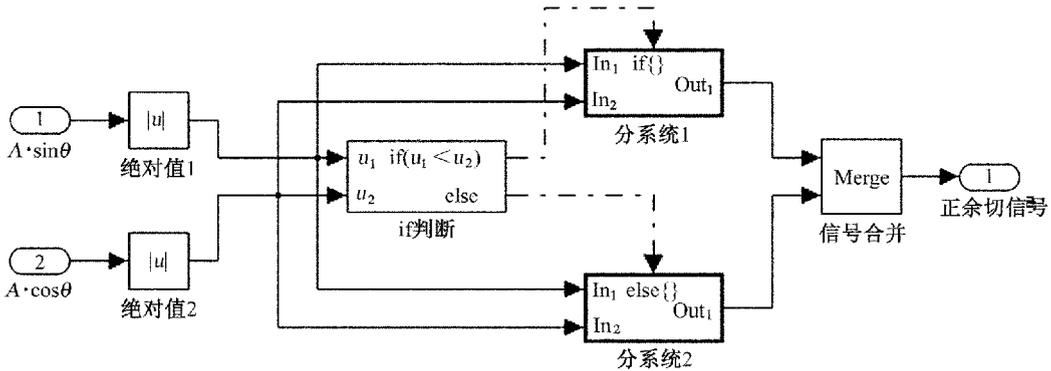


图 3 信号预处理模块

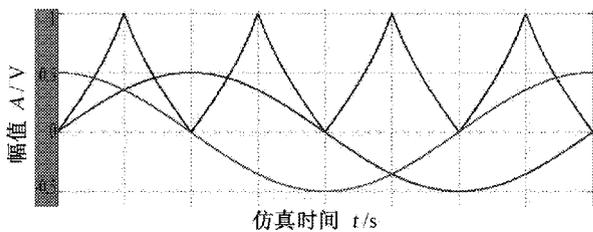


图 4 sin/cos 信号与正余切信号

### 2.3 区间分割模块

原始信号经预处理模块转换为正余切信号后，每个周期内被近似分割为 8 个线性度较好的函数区域，每个区域起始相位差为  $\pi/4$ ，因此需要根据粗分的 8 个区间对信号进行分割<sup>[14]</sup>，进而在区间内根据采样幅值大小求解相位。每个周期区间的分割方法可以根据  $U_1$ 、 $U_2$  以及  $|U_1| - |U_2|$  正负值来确定，如表 1 所示。

如图 5 所示，该模块仿真模型的两个零位比较器将输入信号转换为 uint8 型的数字量，用示波器观

察三路零位比较器的输出，图 6 为示波器观察到的波形图。后两路输出信号经移位运算器后送入加法器，区间分割信号结果为 uint8 型 00000000 到 00000111，方便后续模块选择分割的区间。

表 1 区间分割及相位角求解

区间	$U_1$	$U_2$	$ U_2  -  U_1 $	相位角
1	+	+	+	$\arctan(x/2^n)$
2	-	+	+	$\pi/2 - \arctan(x/2^n)$
3	-	-	+	$\pi/2 + \arctan(x/2^n)$
4	+	-	+	$\pi - \arctan(x/2^n)$
5	+	-	-	$\pi + \arctan(x/2^n)$
6	-	-	-	$3\pi/2 - \arctan(x/2^n)$
7	-	+	-	$3\pi/2 + \arctan(x/2^n)$
8	+	+	-	$2\pi - \arctan(x/2^n)$

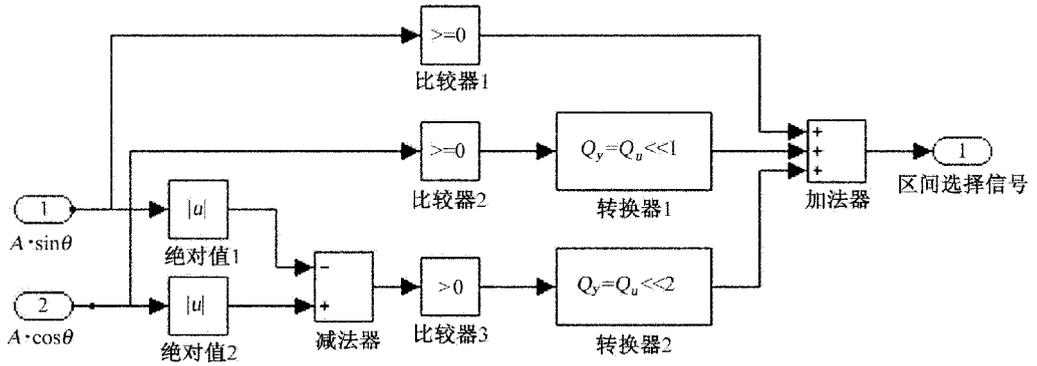


图5 区间分割模块



图6 区间分割信号输出波形

### 2.4 鉴相细分模块

鉴相细分模块的思路是:首先精确计算每个区间内采样幅值对应的相位角,其次除以最小细分相位步长得到与相位相关的一组数列,最后通过除4取余的方法得到一组细分后的锯齿波,仿真模型如图7所示。

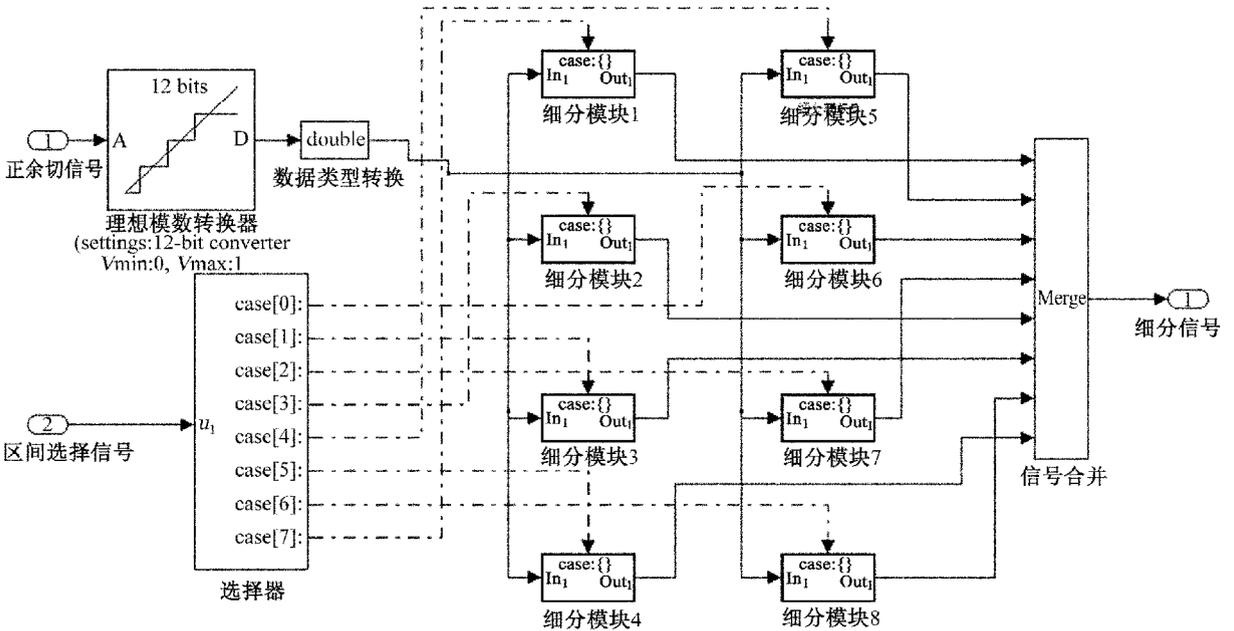


图7 鉴相细分模块

以第一区间细分算法为例:预处理模块输出的正切信号经12位AD器件采样后,先经过数据类型转换输出double型采样数据。Case模块输入区间分割的uint8信号,用于选择分系统1处理采集的数据,假设采样值为 $x$ ,此时对应细分数为 $M$ (可为实数),AD采样位数 $n$ ,周期最大细分数 $N$ ,细分时最

小相位间隔 $\theta$ ,则在该区间内有式(4)

$$\begin{aligned}
 M &= \arctan\left(\frac{x}{2^N}\right) / \theta = \arctan\left(\frac{x}{2^N}\right) / \left(\frac{2\pi}{N}\right) \\
 &= N \cdot \arctan\left(\frac{x}{2^N}\right) / 2\pi
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

求解出 $M$ 后,取 $[M \% 4]$ 的数列值,其中 $\%$ 表

示模运算,  $[M \% 4]$  表示对模运算后的小数取整。得到幅值在  $[0, 4]$  内变化的一组实数序列, 利用示波器观察此时输出数列的波形, 取采样时间在  $0.5\text{s}$  以内的波形进行观察, 如图 8 所示。由图形可以看到, 随着仿真时间的增加, 余数序列呈周期性锯齿波变化。当光栅正向移动时, 锯齿波有正斜率递增波形, 当光栅反向移动时, 锯齿波有负斜率递减波形, 两种变化波形是后续辩向计数算法的基础。

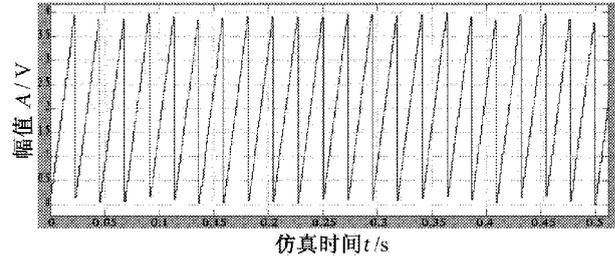


图 8 细分输出的锯齿波(正向)

根据粗细分分割的区间, 采样幅值在不同区间的相位解算方法略有不同, 具体求解公式如表 1 相位角一栏所示。模型 8 个子系统分别利用不同区间相位角的公式, 求解出采样幅值对应的细分数  $M$ , 再利用  $[M \% 4]$  方法得到精细分后的锯齿波。

### 2.5 输出模块设计

输出模块的设计是将细分后的锯齿波处理成两路正交编码信号, 当光栅正向转动时 CHA 和 CHB 编码序列分别为“0110”和“0011”, 反向转动时编码序列为“0110”和“1100”, 因此该模块采用查找表方式设计, 如图 9 所示。由于锯齿波信号在光栅正向转动和反向转动时输出分别为递增波形和递减波形, 因此查找表内只需要设计为“0110”和“1100”两组输出序列, 输出序列再经一个零位比较器将信号转化为 boolean 数据类型。设此时细分倍数  $N = 400$ , 在系统设计图中用示波器观察 CHA 和 CHB 输出, 仿真时间  $0.1\text{s}$  内的波形如图 10 所示。

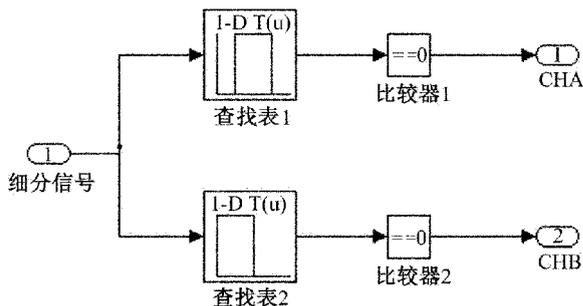


图 9 输出模块设计图

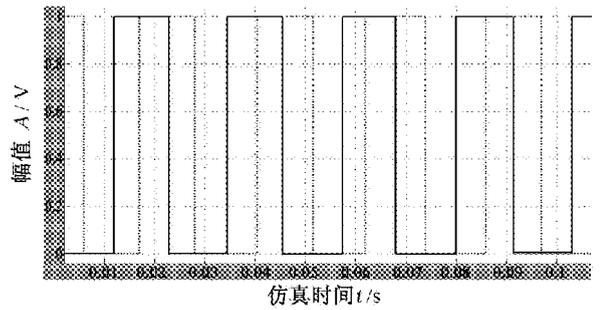


图 10 CHA/CHB 仿真输出波形

## 3 仿真与分析

实际光栅莫尔条纹信号不可避免地受到直流电平漂移、两路幅值信号不等、非正交性误差以及高次谐波、少量白噪声等多种因素的影响, 另外由于光栅在运行过程中并不能保持恒定, 因此输出的两路  $\sin/\cos$  信号在时域内不再是规则的正余弦曲线, 这些干扰条件对光栅的细分效果可能都会产生影响, 使得输出的 CHA 和 CHB 信号发生编码不正交等问题。

### 3.1 理想信号条件下仿真

为验证该算法的细分效果, 利用上述搭建的 simulink 模型首先对不添加噪声信号的光栅莫尔条纹信号进行细分仿真, 即输入两路理想的正余弦信号, ADC 采样位数设置为 8。为了便于观察, 仿真实验中对每个粗细分区间内进行 5 倍细分, 且一个信号周期内有 8 个粗细分的正余切信号区间, 因此整体细分倍数为 40。仿真运行后示波器观察波形如图 11 所示, 此时 ADC 的采样位数可以很好地满足细分要求。对于在每个 CHA 和 CHB 输出的脉冲信号细分区间内, 至少需要 ADC 的四次的采样数据, 因此对采样位数  $n$  位的 ADC 来说, 细分倍数  $N$  一般不超过式(5)所示条件。在 Simulink 仿真中进一步提高 ADC 采样位数, 经仿真实验验证  $n = 12$  情况下细分倍数可达到 600 倍以上。

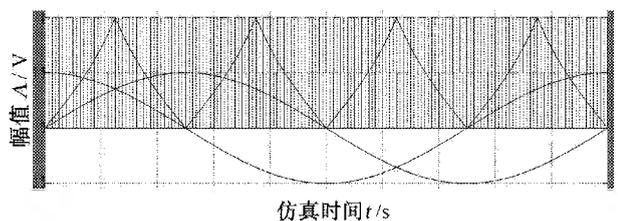


图 11 周期内 40 细分时输出波形汇总

$$N \leq \frac{2^n}{4} = 2^{n-2} \quad (5)$$

另外光栅莫尔条纹输出的两路  $\sin/\cos$  信号频率  $f_M$  较高,但一般不大于 1MHz,如果要在在此基础上进行 ADC 采样和算法函数的处理,则细分倍数还应受到 ADC 采样时间  $t_s$  和高性能处理芯片(DSP、PGA)信号处理速度  $t_p$  的限制,如式(6)所示, $T$  为系统最高采样时间。

$$\begin{cases} t_M > 4N \cdot t_s \\ (t_s + t_p) < T \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2 噪声干扰情况仿真

本文为进一步验证该细分方法在噪声干扰情况下的细分效果,考虑到实际光栅信号最主要影响因素包括幅值不等、非正交性、高次谐波以及由于光栅转速变化造成输出时变  $\sin/\cos$  的信号。因此在 Simulink 模型中采用时变正弦余弦信号输入,并添加上述三种影响因素,其中高次谐波以二次、三次谐波为主,用示波器观察两路输入信号模型以及预处理模块输出的正余切信号,如图 12 所示。

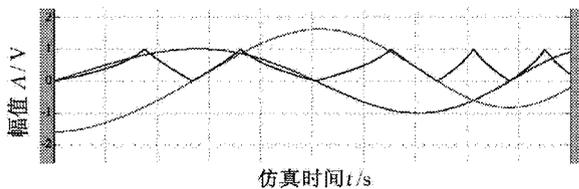


图 12 添加干扰后信号

在上述干扰情况下,取 CHA 和 CHB 信号在 1.0 秒仿真时间内的输出波形进行观察,如图 13 所示,发现正交编码信号的输出频率与正切信号的频率变化较一致,ADC 采样数据精度在满足细分条件的情况下可以很好地细分光栅莫尔条纹信号。此时调整 ADC 采样位数和最小细分相位步长,细分倍数可以达到 400 以上。如果继续增大误差项,尤其是在信号正交性严重失真以及高次谐波分量增大的情况下,预处理模块输出的正切信号则可能发生跳变,锯齿波信号幅值难以在  $[0, 4]$  范围内保持规律变化,两路编码信号 CHA 和 CHB 输出也随之发生紊乱,最高细分倍数受到严重影响,调整 ADC 采样位数也无法满足细分要求,此时光栅细分精度主要取决于输入信号的质量。

## 4 结束语

本文探讨了在粗细分区间内对正切信号采样和相位解算的一种莫尔条纹细分方法,并在基于 Sim-

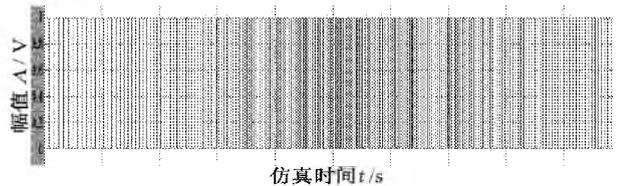


图 13 干扰情况输出的 CHA/CHB

ulink 仿真环境下对细分系统进行建模和仿真,仿真结果验证了该细分方法的可行性,提高 ADC 采样位数可实现细分理想光栅信号的高倍数细分。最后考虑实际情况信号中含有各种误差因素,在时变  $\sin/\cos$  信号中添加噪声,验证了该细分方法的实际可靠性,对后续具体电路实现提供参考。

### 参考文献

- [1] 郭雨梅,孟凡波,邱燕霖.锁相倍频细分中光栅位移跟踪速度与分辨率的关系[J].仪表技术与传感器,2012,(11):136~138.
- [2] 徐从裕,余晓芬.基于互补函数算式的光栅快速细分方法[J].电子测量与仪器学报,2006,(3):6~9.
- [3] 余文新,胡小唐,邹自强.一种高分辨率和高频响的光栅纳米测量细分方法[J].天津大学学报,2002,35(1):1~4.
- [4] 崔骥,李怀琼,陈钱.光栅莫尔条纹信号的细分与辨向新技术[J].光学技术,2000,26(4):294~296.
- [5] 常丽.莫尔条纹纳米级细分关键技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学.
- [6] 郑忠杰,陈德传.正弦波光栅尺信号的方波相移式细分法及应用[J].传感技术学报,2014,27(10):1439~1442.
- [7] 乔栋,续志军,吴宏圣,等.绝对式光栅尺细分误差补偿方法[J].光学学报,2015,35(1):1~7.
- [8] 胡晓东,彭琅,雷明等.一种光栅信号细分算法的 FPGA 实现[J].光子学报,2011,40(3):407~412.
- [9] 郭雨梅,关蕊,钟媛.基于径向神经网络的光栅细分方法[J].沈阳工业大学学报,2011,33(2):193~197.
- [10] 何树荣,肖宗扬.CCD 直接细分光栅位移传感器的研究[J].光学技术,1999,(3):1~3.
- [11] 郭雨梅,苏升.基于智能数字锁相技术的光栅细分方法[J].仪表技术与传感器,2015,(1):104~107.
- [12] 刘浩,冯济琴,陈自然,等.基于预测理论的光栅信号精密细分方法研究[J].传感技术学报,2015,28(4):469~473.
- [13] 程文涛,于连栋,费业泰.光栅信号鉴相细分模块的设计与 Simulink 仿真[J].系统仿真学报,2010,22(8):2006~200.
- [14] 罗华,高山,李翔龙.粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J].光学精密工程,2007,15(2):283~288.