



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105680970 A

(43) 申请公布日 2016. 06. 15

(21) 申请号 201610025611. 0

(22) 申请日 2016. 01. 15

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路 800 号

(72) 发明人 宫新保 秦冕 臧小刚

(74) 专利代理机构 上海交达专利事务所 31201

代理人 王毓理 王锡麟

(51) Int. Cl.

H04J 3/06(2006. 01)

H03L 7/08(2006. 01)

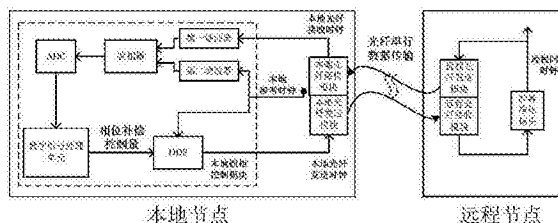
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

射电天文阵列远程光纤同步系统及其方法

(57) 摘要

一种射电天文阵列远程光纤同步系统及其方法,包括:设置于本地节点的本地锁相控制模块和设置于远程节点的时钟净化模块,其中:远程节点和本地节点通过光纤相连,本地节点将本地参考时钟和从时钟净化模块接收到的本地光纤接收时钟输入本地锁相控制模块,通过PID控制本地参考时钟进行相位调整得到本地光纤发送时钟,从而实现光纤温漂补偿,本发明通过数字化方式进行光纤温漂补偿,具有时钟同步精度高,达到皮秒量级,环境适应能力强,成本低廉,采用数字化方式传输时钟信息,抗干扰能力强,传输距离长,只需一路光纤通路就可以实现采样时钟、采样数据、系统控制指令的传输,从而实现了高度的系统集成,降低了光纤布线的复杂度。



1. 一种射电天文阵列远程光纤同步系统,其特征是,包括:设置于本地节点的本地锁相控制模块和设置于远程节点的时钟净化模块,其中:远程节点和本地节点通过光纤相连,本地节点将本地参考时钟和从时钟净化模块接收到的本地光纤接收时钟输入本地锁相控制模块,通过PID控制本地参考时钟进行相位调整得到本地光纤发送时钟;

所述的本地锁相控制模块包括:第一滤波器、第二滤波器、鉴相器、ADC、数字信号处理单元和DDS,其中:第二滤波器、鉴相器、ADC、DDS和数字信号处理单元依次串联成环路,第一滤波器两端与鉴相器和本地光纤接收模块相连,DDS连有本地光纤发送模块。

2. 根据权利要求1所述的射电天文阵列远程光纤同步系统,其特征是,所述的PID控制是指: $u(n) = K_p e(n) + K_i \int_0^t e(n) + K_d \frac{de(n)}{dt}$, 其中 $u(n)$ 为PID输出控制量, $e(n)$ 为PID输入量, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

3. 根据权利要求1所述的射电天文阵列远程光纤同步系统,其特征是,所述的远程节点设有远程光纤发送模块和远程光纤接收模块,该远程光纤发送模块与时钟净化模块和本地光纤接收模块相连,该远程光纤接收模块与时钟净化模块和本地光纤发送模块相连。

4. 根据权利要求3所述的射电天文阵列远程光纤同步系统,其特征是,所述的数字信号处理单元和ADC由FPGA实现,本地光纤接收模块和本地光纤发送模块由FPGA的GTX实现。

5. 根据权利要求4所述的射电天文阵列远程光纤同步系统,其特征是,所述的时钟净化模块将接收到的时钟信息进行消抖处理得到远程同步时钟,并反馈回本地节点。

6. 一种利用上述任一权利要求所述的射电天文阵列远程光纤同步系统进行温漂补偿的方法,其特征是,包括以下步骤:

步骤1、本地参考时钟和本地光纤接收时钟分别经过滤波器,然后经过鉴相器进行鉴相;

步骤2、将鉴相结果通过低速的模数转换器进行数字化,输入到数字信号处理单元,通过PID控制算法处理,得到相位补偿控制量;

步骤3、将相位补偿控制量输入DDS,对本地参考时钟进行相位调整,获得本地光纤发送时钟,实现光纤温漂补偿。

射电天文阵列远程光纤同步系统及其方法

技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种低频射电天文望远镜分布天线阵列领域的技术,具体是一种射电天文阵列远程光纤同步系统及其方法。

背景技术

[0002] 射电天文学的观测对象为广阔宇宙中天体辐射的微弱电磁信号。为了提升天文观测的分辨率和灵敏度,需要不断增加射电天文阵列的天线口径。现代射电天文阵列正在向着大规模、长距离、分布式的方向发展,这也对射电天文阵列的远程时钟同步性能提出了更高的要求。现代射电天文阵列的时钟同步主要用于射电天文阵列的采样时钟同步,需要在长距离,其距离一般超过1公里的阵元节点之间实现极高的时钟同步精度,通常在皮秒量级,以满足阵元节点之间的采样相干性要求;而且,现代射电天文阵列的阵列规模巨大、阵元节点数量众多,因此需要相对低廉的实现成本。

[0003] 远程时钟同步技术被广泛应用于网络传输、通信、射电天文等领域。不同领域对于时钟同步的精度要求不同,因此采用的技术实现手段也有差异。在网络传输领域,时钟同步的精度通常要求不高、一般在毫秒量级,因此主要采用的是基于网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)的时钟同步方法。在通信领域,时钟同步的精度要求一般在几十纳秒量级,因此通常采用基于空域无线的同步方式或基于GPS的时钟同步方式。而在射电天文领域,为了实现皮秒量级的远程时钟同步精度,目前比较合适的方式是光纤时钟同步技术。

[0004] 光纤时钟同步技术,即通过对光纤传输的信号进行时钟恢复,在远程接收端将光纤上传递的时钟信息提取出来,得到与本地同步的时钟信号,实现远程时钟与本地时钟同步。由于光纤具有良好的传输特性和低廉的价格,非常适合射电天文望远镜阵列的远距离、高精度时钟同步。但是由于光纤介质受温度变化会发生长度的变化,在光纤较长的情况下,会使得远程恢复的时钟产生较大的抖动。

[0005] 经过对现有技术的检索发现,L. J. Wang等人发表在2012年Nature子刊Scientific Report第二期的论文“Precise and Continuous Time and Frequency Synchronisation at the 5×10^{-19} Accuracy Level”提出了在本地节点采用原子钟作为时钟源,将时钟信息以模拟信号的形式通过光纤传输。远程节点将接收到的时钟同步信息反馈给本地节点,本地节点根据反馈的时钟信息对发送时钟进行校正,以补偿光纤长度变化给远程同步时钟带来的抖动。但该方案设备成本高,系统复杂,且传送的时钟信号为模拟信号,需要单独的光纤通路传输。

[0006] 中国专利文献号CN104917582A,公开日为2015年09月16日,公开了一种高精度时钟分发和相位自动补偿系统及其相位调节方法,该系统包括时钟分发模块Master和多个前端电子学节点Slave, Master采用光纤将时钟分发给多个Slave,其中: Master通过光纤将时钟发送到Slave, Slave接收到时钟后通过光纤将时钟重新传回到Master, Master对时钟的往返时间之和进行动态测量得到时钟的上下延时,并将测量结果发送到Slave, Slave根据测量结果对接收到的时钟进行动态相位调节,使Slave与Master保持相位同步。但该技术所

能达到的同步精度在几十皮秒量级,无法满足射电天文阵列的采样时钟同步的精度要求。

发明内容

[0007] 本发明针对现有技术存在的上述不足,提出一种射电天文阵列远程光纤同步系统及其方法。

[0008] 本发明是通过以下技术方案实现的:

[0009] 本发明涉及一种射电天文阵列远程光纤同步系统,包括:设置于本地节点的本地锁相控制模块和设置于远程节点的时钟净化模块,其中:远程节点和本地节点通过光纤相连,本地节点将本地参考时钟和从时钟净化模块接收到的本地光纤接收时钟输入本地锁相控制模块,通过PID控制本地参考时钟进行相位调整得到本地光纤发送时钟。

[0010] 所述的本地锁相控制模块包括:第一滤波器、第二滤波器、鉴相器、模数转换器(ADC)、数字信号处理单元和直接数字频率合成器(DDS),其中:第二滤波器、鉴相器、ADC、DDS和数字信号处理单元依次串联成环路,第一滤波器两端与鉴相器和本地光纤接收模块相连,DDS连有本地光纤发送模块。

[0011] 所述的PID控制是指: $u(n) = K_p e(n) + K_i \int_0^t e(n) + K_d \frac{de(n)}{dt}$,其中 $u(n)$ 为PID输出控制量, $e(n)$ 为PID输入量, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

[0012] 所述的远程节点设有远程光纤发送模块和远程光纤接收模块,该远程光纤发送模块与时钟净化模块和本地光纤接收模块相连,该远程光纤接收模块与时钟净化模块和本地光纤发送模块相连。

[0013] 所述的数字信号处理单元和ADC由现场可编程门阵列(FPGA)实现,本地光纤接收模块和本地光纤发送模块由FPGA的高速串行收发器(GTX)实现。

[0014] 所述的时钟净化模块将接收到的时钟信息进行消抖处理得到远程同步时钟,并反馈回本地节点。

[0015] 本发明涉及一种利用上述射电天文阵列远程光纤同步系统进行温漂补偿的方法,包括以下步骤:

[0016] 步骤1、本地参考时钟和本地光纤接收时钟分别经过滤波器,然后经过鉴相器进行鉴相;

[0017] 步骤2、将鉴相结果通过低速的模数转换器进行数字化,输入到数字信号处理单元,通过PID控制算法处理,得到相位补偿控制量;

[0018] 步骤3、将相位补偿控制量输入DDS,对本地参考时钟进行相位调整,获得本地光纤发送时钟,实现光纤温漂补偿。

技术效果

[0019] 与现有技术相比,本发明通过数字化方式进行光纤温漂补偿,具有时钟同步精度高,达到皮秒量级,环境适应能力强,成本低廉,采用数字化方式传输时钟信息,抗干扰能力强,传输距离长,只需一路光纤通路就可以实现采样时钟、采样数据、系统控制指令的传输,从而实现了高度的系统集成,降低了光纤布线的复杂度。

附图说明

- [0020] 图1为本发明原理结构示意图；
[0021] 图2为本发明实现结构示意图；
[0022] 图3为无温漂补偿时本地采样信号和远程采样信号的相位差变化曲线示意图；
[0023] 图4为经温漂补偿后本地采样信号和远程采样信号的相位差变化曲线示意图。

具体实施方式

[0024] 下面对本发明的实施例作详细说明,本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施,给出了详细的实施方式和具体的操作过程,但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

实施例1

[0025] 如图1所示,本实施例包括:设置于本地节点的本地锁相控制模块和设置于远程节点的时钟净化模块,其中:远程节点和本地节点通过光纤相连,本地节点将本地参考时钟和从时钟净化模块接收到的本地光纤接收时钟输入本地锁相控制模块,通过PID控制本地参考时钟进行相位调整得到本地光纤发送时钟,从而实现光纤温漂补偿。

[0026] 所述的本地锁相控制模块包括:第一滤波器、第二滤波器、鉴相器、模数转换器(ADC)、数字信号处理单元和直接数字频率合成器(DDS),其中:第二滤波器、鉴相器、ADC、DDS和数字信号处理单元依次串联成环路,第一滤波器两端与鉴相器和本地光纤接收模块相连,DDS连有本地光纤发送模块。

[0027] 所述的远程节点设有远程光纤发送模块和远程光纤接收模块,该远程光纤发送模块与时钟净化模块和本地光纤接收模块相连,该远程光纤接收模块与时钟净化模块和本地光纤发送模块相连。

[0028] 所述的本地节点将本地参考时钟作为变频采样单元的变频采样时钟,采用现场可编程门阵列(FPGA)作为核心器件,而远程同步时钟作为远程节点的变频采样单元的变频采样时钟,实现本地节点和远程节点的相干采集。

[0029] 所述的本地节点通过本地光纤接收模块,接收远程节点反馈的时钟信息,从而获得本地光纤接收时钟。将本地参考时钟和本地光纤接收时钟输入到本地锁相控制模块,处理后得到本地光纤发送时钟,将本地光纤发送时钟输出到本地光纤发送模块中,通过光纤传送到远程节点。

[0030] 所述的远程节点通过远程光纤接收模块,获得本地节点发送的时钟信息,通过时钟净化模块进行消抖处理,得到远程同步时钟,将远程同步时钟发送到远程光纤发送模块中,通过光纤反馈回本地节点。

[0031] 如图2所示,所述的本地光纤接收模块和本地光纤发送模块采用FPGA的高速串行收发器(GTX)。远程节点也采用GTX作为远程光纤接收模块和远程光纤发送模块,通过GTX的时钟数据恢复单元(CDR)提取出时钟信息。

[0032] 所述的本地参考时钟的相位为 φ_{lo} ,远程同步时钟的参考相位为 φ_{re} ,本地光纤发送时钟的参考相位为 φ_t ,本地光纤接收时钟为 φ_r 。本地节点到远程节点的光纤路径上的时钟相位差为 $\Delta\varphi$,该 $\Delta\varphi$ 会随着光纤长度变化而发生变化,从而导致接收端的时钟抖动。假设发

送链路和接收链路的光纤长度相等,则有:

$$\begin{cases} \varphi_t + \Delta\varphi = \varphi_{re} \\ \varphi_{re} + \Delta\varphi = \varphi_r \end{cases}$$

[0033] 所述的远程同步时钟由于温漂引起光纤长度变化而产生抖动,为保证 φ_{re} 和 φ_{lo} 的相参性不受 $\Delta\varphi$ 变化的影响,令 $\varphi_{lo} = \varphi_{re}$,则有: $\varphi_r - \varphi_{lo} = \varphi_{lo} - \varphi_t = \Delta\varphi$,其中 $\varphi_r - \varphi_{lo}$ 为本地光纤接收时钟和本地参考时钟的相位差, $\varphi_{lo} - \varphi_t$ 为本地光纤发送时钟和本地参考时钟相位差。只要令其相等就可以补偿由于温漂引入的光纤长度变化给远程同步时钟带来的抖动。温漂补偿方法包括以下步骤:

[0034] 步骤1、本地光纤接收时钟和本地参考时钟分别经过第一滤波器和第二滤波器,然后通过鉴相器进行鉴相;

[0035] 步骤2、将鉴相结果通过低速的ADC进行数字化,输入到数字信号处理单元通过PID算法对信号进行处理,得到相位补偿控制量;

[0036] 步骤3、将相位补偿控制量输入DDS,对本地参考时钟进行相位调整,获得本地光纤发送时钟,实现光纤温漂补偿。

[0037] 所述的第一滤波器和第二滤波器为窄带带通滤波器,以滤掉鉴相频率之外的频率分量,降低鉴相误差。

[0038] 本实施例中的低速ADC采用FPGA内部的通用ADC,即XADC实现,通过PID控制算法处理,得到相位补偿控制量。根据得到的相位补偿控制量,通过FPGA对DDS进行控制、调整本地光纤发送时钟的相位,从而实现温漂补偿。

[0039] 所述的PID控制是指: $u(n) = K_p e(n) + K_i \int_0^t e(n) + K_d \frac{de(n)}{dt}$,其中: $u(n)$ 为PID输出控制量, $e(n)$ 为PID输入量(即数字化的鉴相结果), K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

[0040] 本实施例在PID控制之前,优选对 $e(n)$ 进行数字低通滤波,从而滤掉鉴相结果的高频噪声,保证 $e(n)$ 的稳定性;对于比例系数 K_p ,积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的设置,可以进行分段处理,即在不同的输入量 $e(n)$ 的取值范围内设置不同的比例系数、积分系数和微分系数值,从而提高PID输出的相位控制的性能。

[0041] 所述的本地节点和远程节点的采样模块采用零中频的结构,选取200m长的光纤进行测试,其中变频本振为2400MHz,采样时钟为50MHz正交采样,采样输入信号为2401MHz的正弦信号。通过对光纤进行均匀加热、然后自然冷却的方式模拟环境温度变化。测试分析方法为控制本地节点和远程节点同步对输入信号进行采样,每隔15s进行采样一次,并将采样结果缓存,然后对本地采样信号和远程采样信号分别进行FFT分析,利用FFT结果计算本地采样信号和远程采样信号的相位差,根据这一结果计算出本地参考时钟和远程同步时钟之间的抖动。

[0042] 如图3所示,当不进行温漂补偿时,由于光纤长短变化,远程节点采样信号相对于本地节点的采样信号相位差如图所示。折算到时间单位后,远程同步时钟相对于本地参考时钟的抖动峰峰值为289.84ps,远程同步时钟相对于本地参考时钟的抖动均方根值为60.34ps。

[0043] 如图4所示,同样的测试条件下,采用温漂补偿时,远程节点采用信号相对于本地节点采样信号相位差如图所示。折算到时间单位后,远程同步时钟相对于本地参考时钟的

抖动峰值为22.70ps,远程同步时钟相对于本地参考时钟的抖动均方根值为3.94ps。从结果可以得出,本方法的温漂补偿系统及温漂补偿方法可以大大降低远程同步时钟的抖动,提高远程同步时钟的同步精度。

[0044] 与现有技术相比,本发明的技术效果包括:

[0045] 1)同步精度高、成本相对低廉,本发明采用的基于滤波器、鉴相器、DDS的数字化光纤温漂补偿方案,具有较高的时钟同步精度;经过测试,时钟同步精度小于5ps,可以满足射电天文阵列的采样时钟同步要求。此外,相比高精度的模拟光学控制方法,成本大大降低,比较适合射电天文阵列的大规模布阵要求;

[0046] 2)集成度高,本发明可以通过一路光纤通路完成采样时钟、采样数据、系统控制指令的传输,从而实现了数据采集、传输系统的高度集成,进一步降低了成本,非常适合于大规模射电天文阵列的分布式采集系统;

[0047] 3)环境适应能力强,本发明具有良好的温漂补偿能力,可以适应各种极端的户外环境,适合射电天文阵列布阵范围广、背景环境复杂的应用特点。

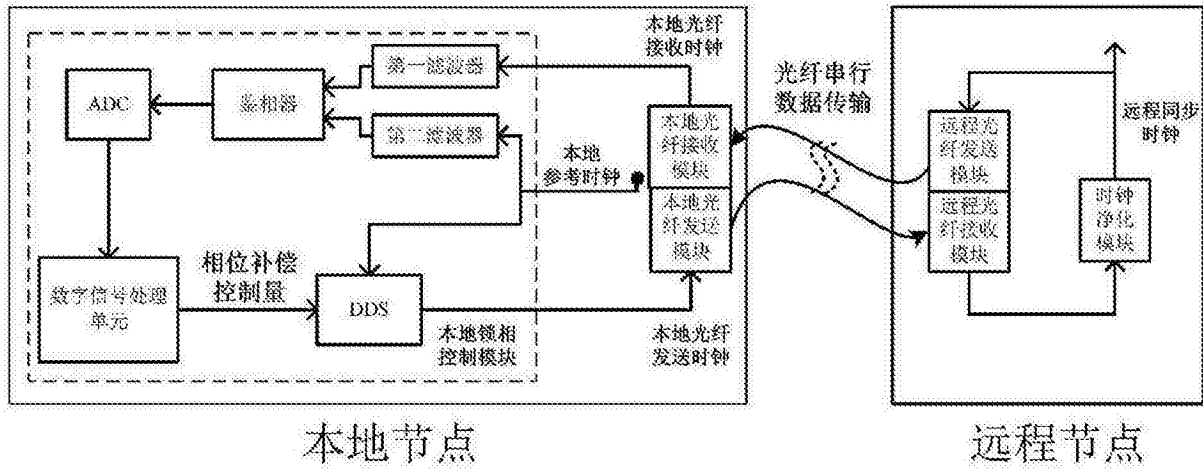


图1

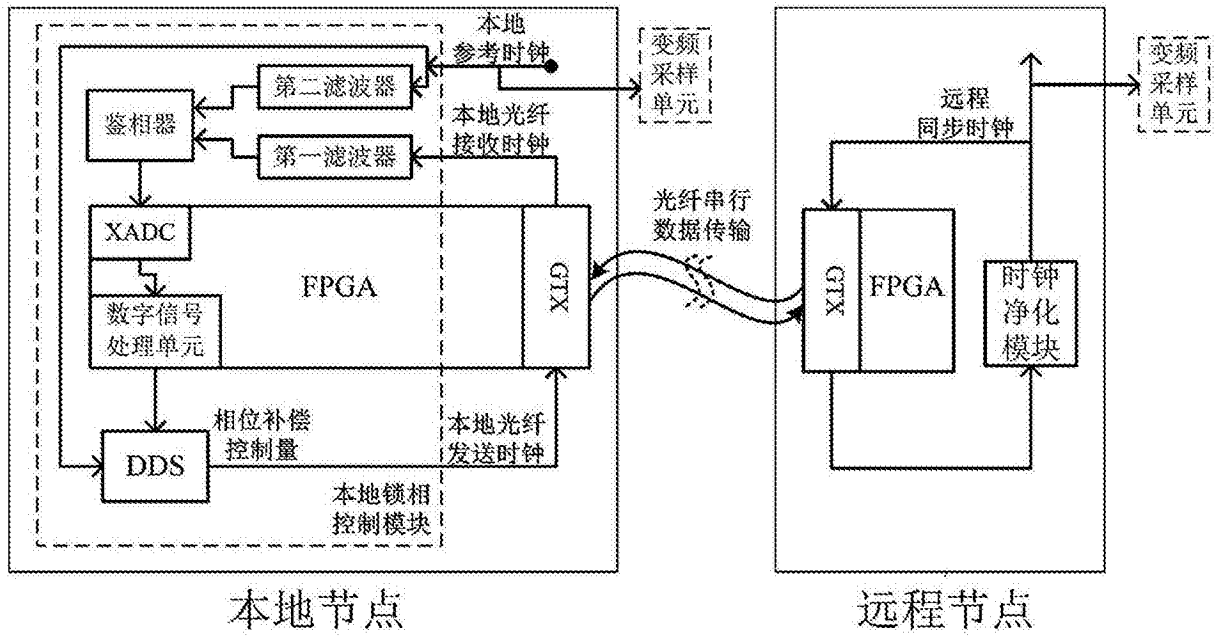


图2

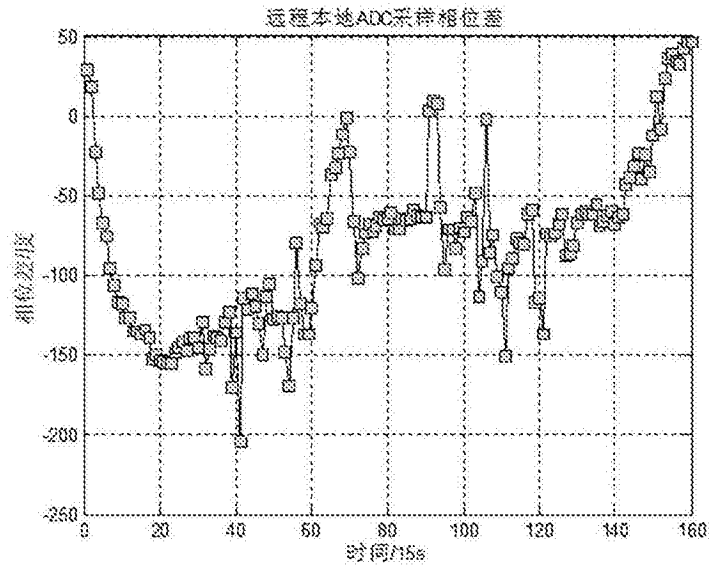


图3

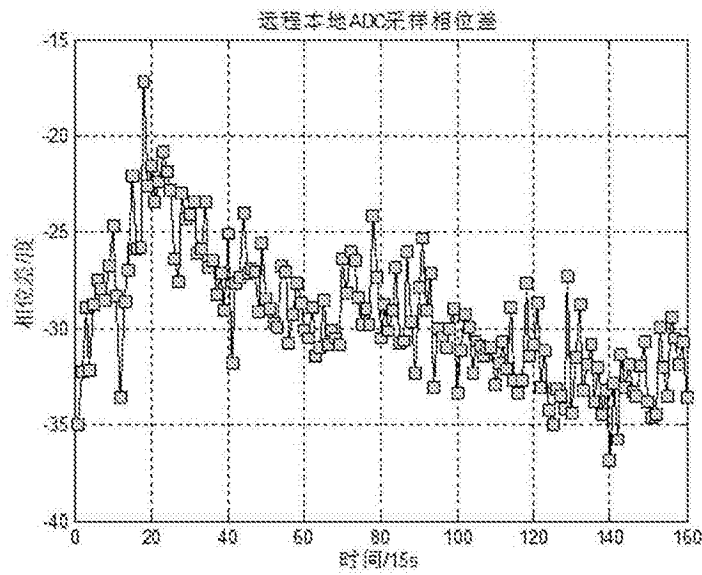


图4