

基于GPS的大功率电磁发射机时间同步装置的研制

电磁法勘探是地球物理勘探中一种重要的手段，而在电磁法勘探仪器的研制中，设计发射机和接收机之间的同步又是其中一项非常关键的技术。由于大功率电磁发射机工作时会时间同步装置产生强电磁干扰，因此指出了现有时间同步方案的不足，设计了一种新型的基于GPS的时间同步装置，对其工作原理和系统组成进行了阐述，重点介绍了时间同步装置在强电磁干扰下且GPS信号失效情况下仍保持较长时间高准确度输出的解决方案。该时间同步装置不仅适用于电磁法勘探仪器，而且可以广泛应用于电力、通信和计算机网络等需要高准确度实时同步的场合。

韩磊 张一鸣 朱学政 郑起佳/北京工业大学电子信息与控制工程学院



韩磊/硕士研究生

关键词/Keywords

电磁法勘探·
强电磁干扰·
GPS·
时间同步·

电磁法是通过获取大地介质对射入电磁场的响应来获得地下地质体或矿体电导率结构信息的方法。金属矿通常具有良好的导电性，因此电磁法勘探是寻找金属矿最为有效的地球物理勘探手段。对于电磁法勘探而言，离不开可靠的电磁勘探仪器装备。而在电磁法勘探仪器的研制中，设计发射机和接收机之间的同步又是其中一项非常关键的技术，因为在实际的野外实验中，接收机和发射机都按照事先设定好的频率表自动进行信号的发射与接收，无须手动操作，所以需要保证发射与接收的同步。

关于同步方式，目前最常用的方法是采用GPS进行同步。在发射机和接收机中分别采用相同的GPS芯片，由于GPS输出的时间准确度很高，并且GPS同

步不受距离及地形影响，因此采用GPS是一种比较好的同步方式。然而现有的GPS时间同步装置经常会忽略GPS找星的问题，同时对GPS信号的依赖性都较强，它们多是在假设GPS信号一定能找到且不会失效的前提下设计的。GPS卫星信号在空间传播时，若信号条件不理想，如在室内和森林等低信噪下，遮挡和干扰等现象较严重，导致GPS接收芯片接收到的GPS信号功率受到严重的衰弱，其可捕获卫星数量明显减少。当捕获到的卫星数量低于一定值时，GPS接收芯片就无法准确地获得GPS时间信息；此外GPS芯片易受外界环境的影响，特别是在强电磁环境下其输出的秒脉冲信号会夹杂扰动信号，有可能导致秒脉冲(PPS)失效，装置就不能正常运行。因此在GPS同步装置的设计过程中应设法提高GPS找星的能力，确保GPS芯片能够捕获到足够多的卫星信号；同时不能认为GPS信号是永远可靠的，一旦GPS秒脉冲丢失，同步装置自身应能够生成连续的高准确度秒脉冲来维持准确可靠的同步。

本装置提出了一种基于GPS的时间同步装置设计方案。在GPS信号正常时，同步装置以DSP作为系统处理的核心，利用GPS芯片产生的秒脉冲作为时间同步的基准；而在GPS秒脉冲丢失后，利用FPGA高速处理的特性，对高性能恒温晶振(OCXO)频率倍频后进行计数，使同步装置自身产生高准确度的秒脉冲，待GPS信号恢复正常后，再次

国家重大科研装备研制项目(No.ZDYZ2012-1-05-01)，深部探测技术与实验研究专项(No.201311193-06)。

以GPS芯片产生的秒脉冲作为同步的基准。所设计的GPS时间同步装置实现了高准确度时间信号输出，即便是在GPS信号出现异常时，同步装置自身也能产生连续的秒脉冲，保证GPS时间的同步。

GPS时间同步装置整体结构设计

GPS时间同步装置由GPS接收模块、控制和处理模块（DSP&FPGA）和显示模块（上位机）

等部分组成，总体结构如图1所示。GPS接收模块的串口数据送入控制和处理核心单元，经DSP解码后得到标准的时间信号，同时又利用接收模块的秒脉冲作为同步信号得到UTC（世界标准时），并送到上位机中显示。另外在GPS秒脉冲丢失后，FPGA通过计数模块为系统提供连续的秒脉冲信号（图中信号3），确保系统输出高准确度的时间信号。

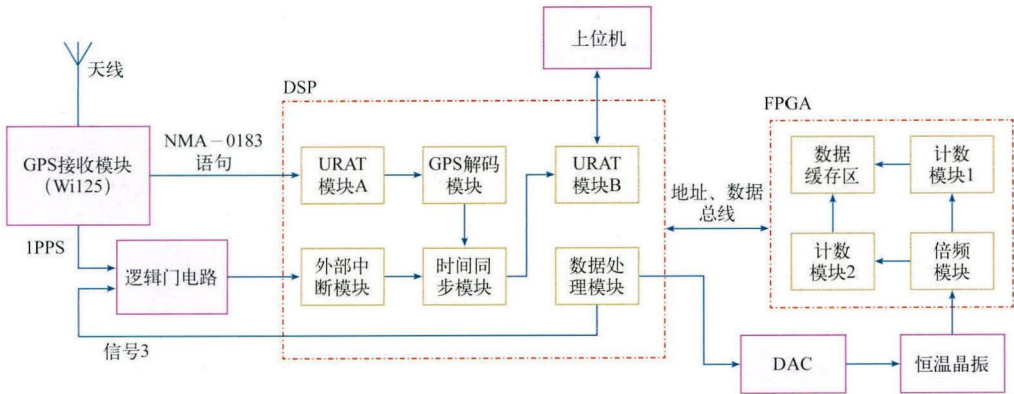


图1 GPS时间同步装置框图

GPS接收模块

该模块的主要功能是捕捉GPS卫星信号，并将接收到的卫星信号转化为秒脉冲，并和串行数据送入控制和处理核心单元。

GPS卫星信号在空间中传播时，如果遇到障碍物，其信号功率会减弱或消失，因此将会影响到接收芯片对卫星信号的捕捉，所以应设法提高同步装置捕捉到GPS卫星信号的能力。本设计采用了以下两种改进方法：①将GPS天线放到开阔且没有遮挡的地带，以减小障碍物对卫星信号功率的衰弱。②增大GPS接收芯片的射频供应电压（由3.3 V增加到5 V），提高接收芯片对卫星信号的接收能力。

GPS接收芯片选用的是美国CONNOR-WINFIELD公司的Wi125，这是一种集成度高、抗干扰能力强的卫星定位芯片，其定位时间快，定位准确度高，时间准确度达到25 ns。

Wi125通过天线接收卫星时钟信号，经过解调、处理后输出如图2和图3所示的秒脉冲和串行

数据（NMEA-0183语句），其中串行数据中包含着GPS时间和定位等信息。

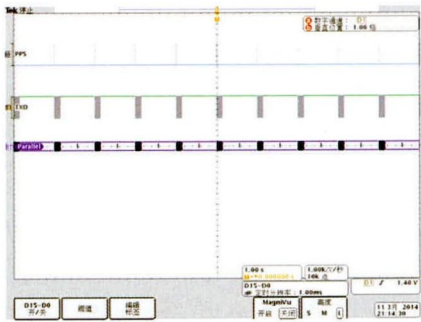


图2 秒脉冲和串行数据波形

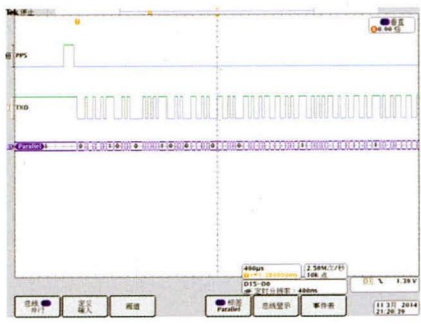


图3 完整的串行数据波形

控制和处理模块 (DSP&FPGA)

该模块主要功能是在GPS信号正常时，DSP将GPS接收模块传来的NMEA-0183语句进行解调得到标准的时间信号，再利用接收模块的秒脉冲作为同步信号得到UTC；而在GPS秒脉冲丢失后，通过计数模块为系统提供连续的秒脉冲，确保系统输出高准确度的同步时间，并传送给上位机显示。

在器件选择上，DSP选用了TI公司的TMS320F2812，主频达到150 MHz，大部分指令周期为6.67 ns，数据处理速度快，同时片内集成了功能强大的I/O口和许多外设功能。丰富的时间管理器、SCI模块和中断模块为本装置的设计提供了极大的便利。

FPGA选用了Altera公司的Cyclone II系列FPGA器件，其内部时钟频率可以达到几百兆赫兹，再加上并行处理的特性，可以达到很高的处理速度，非常适合应用于对时间准确度有较高要求的实时系统。

为了使本模块输出高准确度和可靠的同步时钟，需要考虑同步装置在强电磁环境下，GPS接收模块在传送秒脉冲时有可能夹杂干扰，必须设法消除脉冲干扰，避免跳秒现象的出现；同时在GPS秒脉冲丢失的情况下，同步装置必须自身产生秒脉冲，此秒脉冲在有GPS信号时不起作用，在失去GPS信号时代替GPS信号提供秒脉冲输出；另外无论有无GPS信号，都要设法保证输出脉冲的准确度。

通过以上分析，DSP不能对GPS芯片产生的秒脉冲直接进行处理，而是需要对秒脉冲进行硬件和软件上的处理后，再交由DSP处理。图4为秒脉冲硬件处理电路，图5为处理后的秒脉冲信号生成原理。

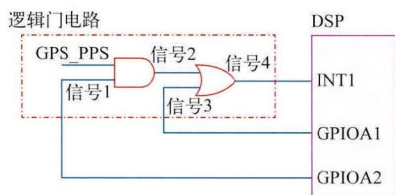


图4 秒脉冲逻辑门电路

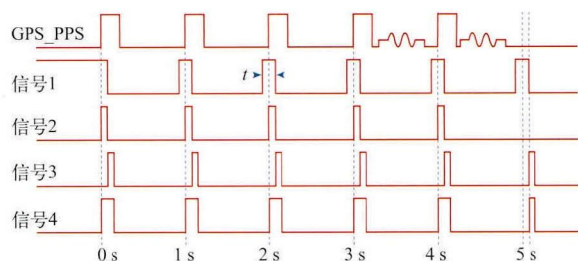


图5 秒脉冲生成原理

图5中的信号3就是同步装置自身产生的秒脉冲（相比GPS秒脉冲滞后 $t/2$ ，确保在GPS信号正常时不起作用），依靠FPGA对恒温晶振频率的计数实现，所以该秒脉冲的准确度取决于恒温晶振的准确度。选用的恒温晶振频率是12.288 MHz，其频率准确度达到小数点后9个数量级，日老化率 $\leq \pm 0.5 \times 10^{-9}$ ，温度稳定度 $< \pm 5 \times 10^{-9}$ ，且带有反馈调节，使其具有很高的频率准确度和稳定性，本装置与使用普通晶振的装置相比，大大提高了同步准确度、温度稳定性和时间稳定性。

GPS信号正常时（工作模式1，图5中0~3 s），输入信号经过逻辑电路后，输出的信号4和GPS秒脉冲（GPS_PPS）是同步的，确保GPS_PPS被准确无误地送到DSP的外部中断中，经过DSP时钟模块的处理，系统能够输出准确的时间信号。

在GPS信号被干扰、但秒脉冲还未丢失的情况下（工作模式2，图5中3~4 s），其波形如图6所示。由DSP产生的信号1只在GPS秒脉冲上升沿的两侧，且波形非常窄，所以信号1和GPS_PPS经过“与”门后，只要GPS信号秒脉冲正常，GPS秒脉冲就可以顺利通过“与”门，而在信号1窄脉冲之外的脉冲干扰就会被屏蔽，由于窄脉冲的宽度非

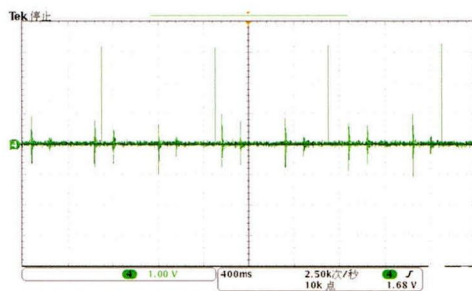


图6 秒脉冲在强电磁环境下被干扰的波形（秒脉冲未丢失）

常小, 所以该电路可以很好地消除干扰脉冲。

在GPS信号被干扰、秒脉冲信号也丢失的情况下(工作模式3, 图5中4~5s), 其波形如图7所示。装置自身产生的秒脉冲信号3代替GPS信号提供秒脉冲输出。GPS秒脉冲丢失后, 信号3与信号2经过“或”门使信号4得到了一个脉冲信号, 该秒脉冲信号相比实际GPS_PPS延迟了 $t/2$ 时间, 在下一秒调整计数时间, 计时 $(1-t/2)$ 时间, 消除延时偏差, 实现时间同步。

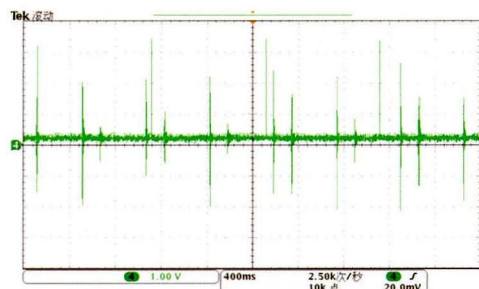


图7 秒脉冲在强电磁环境下被干扰的波形(秒脉冲丢失)

经过上述处理, 装置即使失去GPS信号也不会失去正常工作所需的秒脉冲, 待GPS秒脉冲信号恢复正常后再切换到工作模式1运转, 该同步装置既考虑了GPS由于外界干扰可能造成同步脉冲消失, 又防止了突变干扰信号被误认为同步信号现象的发生。

尽管选用的恒温晶振准确度非常的高, 但单位时间的偏差较稳定, 存在一定的累计偏差, 再加上老化的因素, 长期使用后频率输出会有偏移。需要将晶振单位时间的偏差测量估算出来, 利用晶振可以反馈调节的特性(恒温晶振自带电压反馈控制引脚), 实现对恒温晶振频率的闭环控制, 测量方法如下: 利用FPGA可并行处理的特性, 再加入一路计数器(计数模块2), 计算相邻两个GPS秒脉冲时间内FPGA对倍频后的恒温晶振频率计数值(当GPS信号正常时, 计数模块2工作; 当GPS秒脉冲丢失后, 计数模块2停止工作), 假定晶振频率标称值为 f , FPGA中晶振倍频系数为 a , 相邻两个GPS秒脉冲时间内FPGA对倍频后的恒温晶振频率计算值为 f_1 , 倍频后的晶振单位时间的偏差测量值为 f_{err} , 则

$$f_{err} = f_1 - fa \quad (1)$$

$$\bar{f}_{err} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{err}(i) \quad (2)$$

式中, $\bar{f}_{err}$ 为 f_{err} 的均值, 这部分运算在DSP中完成, 根据算出的晶振频率偏差值, 运用PID算法算出反馈电压, 实现对恒温晶振频率的闭环控制, 修正恒温晶振的频率, 图8为恒温晶振反馈控制原理。

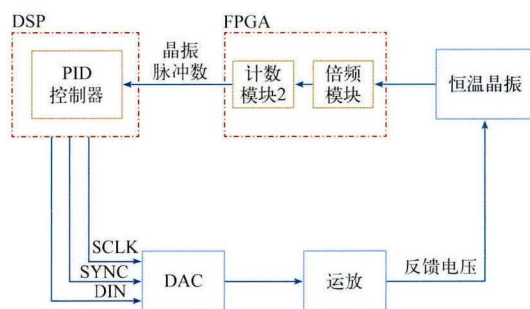


图8 恒温晶振反馈控制原理

经过反馈调节, 恒温晶振频率的偏差会逐渐减小, 其准确度得到进一步提升, 但这个偏差并不能完全消除, 因而同步装置自身产生的秒脉冲相比GPS接收模块输出的秒脉冲基准信号存在一定的时间偏差 Δt , 满足

$$\Delta t = \frac{f_2}{f_1} - 1 + t \quad (3)$$

f_2 为FPGA计数模块1的计数上限, 满足

$$f_2 = fa \quad (4)$$

为消除偏差 Δt , 必须对计数模块1的计数上限进行实时调整, 由于 f_1 不是恒定的, 不能对 f_2 进行突变式修正, 而应对 f_2 采用微调的方式进行调整, 以保证在GPS信号正常时同步装置自身产生的秒脉冲与GPS接收模块输出的秒脉冲基准信号偏差值逐步趋于恒定值 t 。

通过对恒温晶振频率的反馈控制和对FPGA计数模块1计数值的调整, 同步装置自身产生的秒脉冲准确度进一步得到提高, 同步性得到改善。

上位机操作界面

图9为上位机操作界面, 主要功能是实时显示GPS时间, 并向下位机发送发射数据和控制命令。

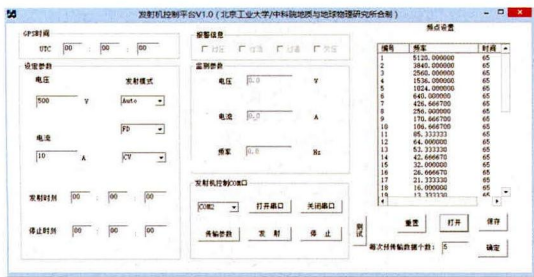


图9 上位机操作界面

发射机工作前，上位机向下位机发送发射波形的频率及其每个频率对应的发射时长，下位机根据发射频率的顺序及发射时长能够自动确定每个发射频率的具体发射时间。由于接收机接收频率的顺序及时长和发射机完全一致，所以如果发射机和接收机的GPS时间同步，那么在任意时刻发射机的发射频率和接收机的接收频率一致；而当发射机和接收机的GPS时间不同步时，在某一时刻发射频率和接收频率就有可能不同，这将会导致接收错误，所以可以通过判断在任意时刻发射频率和接收频率是否一致来确定发射机和接收机的GPS时间是否同步。

测试结果

为了验证时间同步装置的可靠性，使用本装置的大功率电磁发射机参加过多次野外勘探实验，实验结果表明在强电磁环境下被干扰的GPS秒脉冲（见图6和图7）经过逻辑电路处理后得到如图10所示的秒脉冲波形。从图中可以看到，经过

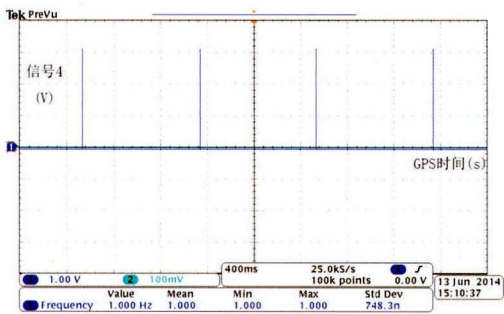


图10 秒脉冲在强电磁干扰环境下经过逻辑门电路处理后的波形

逻辑电路处理后图6中秒脉冲夹杂的扰动信号被消除，且没有出现跳秒的现象；图7中丢失的秒脉冲信号经过逻辑电路处理后，由同步装置自身产生同步的脉冲信号，确保系统输出高准确度的时间。

另外通过对大量发射和接收数据的处理，表明发射机和接收机在任意相同时刻发射波形的频率和采样波形的频率基本一致，如下表所示。由此说明发射机和接收机的GPS时间是同步的，且该时间同步装置可靠。

表 任意相同时刻发射机输出波形的频率和接收机采样波形的频率对比

GPS时间	发射频率/Hz	接收频率/Hz
9: 00: 00	9 600	9 600.5
9: 01: 10	7 680	7 680.2
9: 05: 15	1 920	1 920.1
9: 10: 07	256	256
9: 15: 08	16	16
9: 30: 02	9 600	9 600.5
9: 35: 05	1 920	1 920
9: 36: 58	1 280	1 280
10: 02: 53	5 120	5 120.3

结束语

在现有时间同步方案的基础上，提出了一种新的高准确度GPS时间同步方法，所设计的应用于电磁勘探的GPS时间同步装置，在强电磁干扰下无论GPS信号是否正常，都能保持相当高的准确度和可靠性，且使用本装置的大功率电磁发射机参加过多次野外勘探实验，通过对发射和接收数据的处理，表明在任意相同时刻发射机输出波形的频率和接收机采样波形的频率基本一致，说明发射机和接收机的时间是同步的，且该同步装置输出的GPS时间可靠。综上所述，本文所设计的GPS时间同步装置适用于电磁勘探中，而且可以广泛应用于电力、通信和计算机网络等需要高准确度实时同步的场合，因此具有很大的应用前景。

(收稿日期：2014-11-25) EA