数字发射在航空电磁仪中的应用

周锡华^{1,2},熊盛青²,张虹³,金龙哲²

(1. 中国地质大学,北京 100083;2. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083;3. 北京信息 工程学院,北京 100085)

摘 要:讨论了航空电磁仪工作原理、数字发射机以及数字发射多频的原理,介绍了数字发射在航空电磁仪的应用。 航空电磁仪发射机由于采用了最新的数字发射技术,减少了系统的重量、使用更灵活、零漂更小、噪声水平更低,提 高了电磁测量系统的技术指标和测量能力。

关键词:航空电磁仪;数字发射技术;宽带;多频率

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918 (2007) 06 - 0564 - 04

航空电磁系统从 20 世纪 40 年代产生以来,取 得了巨大的技术进步。过去的系统绝大多数使用谐 振模式线圈作为发射和接收天线,发射机和发射线 圈配套使用,由一个发射线圈和一个接收线圈组成 的频率域系统只能产生一个频率的信号。目前,航 空电磁系统均采用宽带技术,通过数字发射机在1 个线圈可以发射多个频率(一般为5~6个频率,最 多可达 10 个频率,频率范围 200 Hz~195 kHz),也 可以为时间域电磁系统发射方波、半正弦波、三角波 和近方波等,并且出现了 100% 数字化的电磁系统。 发射和接收数字系统的引入,使航空电磁系统的信 噪比不断提高,使仪器结构简化。

数字发射的产生得益于现代电子技术的发展, 新型 D 类功率放大不仅工作效率高、尺寸小、重量 轻,而且工作于开关方式(也称为开关功率放大), 使得数字化驱动成为现实。可用其通过各种不同波 形组合所形成的发射驱动系列,很容易地在单发射 系统(一个发射机和一个线圈)中产生多个频率或 所需要的波形,实现发射数字化。

1 航空电磁仪发射机基本工作原理

不管是模拟发射,还是数字发射,航空电磁仪发 射机主要包括:波形发生器、驱动级、输出级和电源 4部分(图1)。根据具体的需要,发射机波形发生 器产生占空比不同、波形不同的各类波形,如三角 波、矩形波等。驱动级主要提供一定的驱动能力,使 得输出能够产生比较大的电流。输出级是发射机的 核心部分,采用不同的输出方式,可以输出各种不同

收稿日期:2007-09-01

结果的发射波形。除了上述主要部分外,发射机内 部还有同步信号电路、输出保护电路等。根据发射 机的工作方式,将航空电磁仪发射机分为模拟发射 机和数字发射机。



图1 发射机工作原理

1.1 模拟发射机

在以往的电磁系统中,绝大多数使用 LC 谐振 模式线圈作为它们的发射和接收天线,由一个发射 线圈和一个接收线圈组成的频率域系统只能产生一 个频率的信号。发射驱动信号来源于波形发生器, 该波形发生器只能产生周期性的单一波形(如三角 波、矩形波等),发射机输出回路有多种多样的电路 形式。用可控硅组成的输出回路可产生 1/4 正弦波 后沿,发射回路如图 2。



图 2 可控硅组成的输出回路原理

这种电路的优点是通过提高发射和接收线圈 Q 值(品质因子),提高发射效率和增加接收的信噪 比。但严重的问题是系统稳定性差,而且提高信噪 比和发射效率能力有限。此外,对于5个频率的频 率域电磁测量系统,其探头需要携带15个线圈(每 一个频率需1个发射、2个接收线圈)。很显然装载 这么多线圈使得探头既笨重又庞大,连线和减小串 音很困难。因为每个频率都有自己独立的电子系 统,在很宽的频率范围内校正每一个频率都是很困 难的。

每一个谐振线圈的主要信号强度与它的 Q 值 有关,共振越好,其 Q 值越高。它是 LC 谐振回路谐 振频率的电压放大因子。对发射来说,提高发射电 流 Q 倍,可使发射回路小型化,减小倍频干扰。对 接收来说,将接收信噪比提高 Q 倍,但相当严重地 降低了发射、接收的幅度和相位的稳定性(线圈中 的 L 和 C 值变化影响严重)。在典型的频率域电磁 谐振系统中,Q 值为 10~30,通常高 Q 值提供了必 要的信号强度,反之 Q 值越小,其温度稳定性越差; 对于每一频率来说,校正是件困难的事;它们的漂移 特性也各不相同,在后处理过程中,需要多次对每一 测线进行水平调整和微调整;对于线圈之间的串音 那就更为重要了,由于每一个线圈都是独立的,在整 个频率范围内进行校正来获得一个持续的、一致带 宽的电磁谱是困难的。

1.2 数字发射机

数字电磁系统去除了现有电磁系统中的一些弱 点,采用单线圈系统来运行宽带多频率的工作方式。

数字发射机采用 H 桥型 D 类功率放大电路,如 图 3 所示,SW1 和 SW2 是由 MOSFET 组成的功率放 大器,这些功率放大器分别在 SW1 和 SW2 的脉冲 驱动下高速地开和关。根据电压峰值、所需电流的 大小、二极管反向恢复时间、开关损耗和导通损耗来 选择 MOSFET。当 SW1 开启时,此时 SW2 处于关闭 状态,电流迅速地通过线圈 L,在 L 上形成正向输 出;当 SW2 开启时,此时 SW1 处于关闭状态,电流 在线圈 L 上形成反向输出。为了在输出端获得与 输入信号相同的波形,首先要根据输入信号来获取 不同占空比的驱动序列(如图 4 中的 SW1 和 SW2 驱动),通过这些驱动序列来驱动 H 桥两臂上的功 率放大器,最后在输出级对这些调制信号进行解调, 最终在线圈 L 中产生与输入信号相同且经过功率 放大后的输出信号。

理论上讲,D 类放大工作效率能达到 100%,但 实际上由于电路和设计的不完善,D 类放大的效率



图 3 电磁测量系统 H 桥型 D 类放大工作原理 接近 90%。电路效率越高,其功率损失越少。所有 这一切可使电路做得更小。

在设计的带宽里,所有线圈反应宽缓(如 Q = 1),通过高电压驱动发射线圈和接收级采用低噪声的放大器来弥补 Q 值的不足。

2 数字发射多频率的工作原理

数字发射在频率域和时间域电磁系统中的工作 是可编程的。计算机首先配置系统,然后将勘查所 需的频率参数提供给系统,并将这个参数保存起来。 基于这些频率,处理器构建一个高速的数字开关序 列一位流一在发射线圈中产生多频率电流波形。在 多频率的频率域工作时,发射电流波形

$$I(t) = \sum A_n \sin(2\pi f_n t) =$$

它是各正弦波的合成波形,在频率f,时,其幅度为 A_n,t为时间。发射波形在基本周期内精确持续地工 作着,为了减少电力线的影响,需选择合适的基本周 期。在电力线为 60 Hz 的地区,典型的基本周期为 1/30 s,在 50 Hz 的地区为1/25 s。基本周期可以整 数倍地扩大或缩小,所选择的基本周期决定着勘查 时获得的基本数据率。由于发射电流在开始和结束 时均为0,因此所选择的每一个频率必须是基本频 率的整数倍。该式表示的发射电流是由驱动数字开 关的位流(驱动序列)产生的,该数字开关驱动功率 放大器,使之在发射线圈中产生所需要的发射波形。

在以下的讨论中假设基本周期为 1/30。当发 射机开关频率为 384 kHz 时,发射序列在基本周期 内有 12 800 步(384 000/30),以此来获得所需要的 电流波形。图 4 展示了一个在基本周期内 7 个频率 (0.27~47.97 kHz)电流波形的例子,可以清楚地看 到,在基本周期里,0.27 kHz 具有 9 个(270/30)循 环,高频部分看不清楚,理想的电流波形与实际波形 (PWM 输出)重合。图 5 详细地显示了前 40 个点的 电流幅值,该曲线是由上式计算而来的,而实际曲线



图 5 前 40 个步长放大的电流波型(每个步长为1/38400s) 是由发射序列产生的开关动作来实现的。

图6展示了图4中电流波形的幅度谱,图中显 示了波形中的所有7个频率,其噪声本底来自于发 射时的开关效应。由于通电线圈会产生磁场,因此 电流与频率成反比,然而接收线圈与此相反,由于感 应电压与磁场的时间导数成正比,所以感应电压与 频率也成正比。因此,在整个带宽范围内,自由空间 的信号谱或多或少比较平坦。





在基本周期内,不管是信号还是参考信号,每一 个通道都要完成接收、放大、模数转换和输出,时间 的长短取决于基本频率和模数转换的速率。如果需 要的话,可以不开发射,测量勘查地区系统带宽内的 环境噪声谱,通过傅立叶变换来获得噪声源频率,这 样可以选择合适的测量频率,避免测区内噪声频率 的影响。同时还可以采用无源探测,研究测量地区 的电磁干扰源。

另外,每一个基本周期可通过编程来达到更多 的功能,例如系统可以关闭某一频率,而其他频率可 以不受干扰地继续工作。该特性允许把许多频率集 成到一起,却可以使它们在不同的时间段内工作。 同样在有共面和同轴的情况下,可以选择某一工作 方式(同轴或共面)。在一个简单的组件中,这种工 作的多样性为获得有源和无源的传感器开辟了一个 新的途径。

电磁勘查中最显著的应用是监测测区的动力 线,以便区别天然异常与人工干扰。用测区动力线 频率通过转褶方法,将其从接收到的时间序列中除 去,因此避免噪声频率的影响。

3 数字发射在航空电磁仪中的应用

在现代的航空电磁测量系统中,无论是频率域 测量系统,还是时间域测量系统,数字发射均得到广 泛的应用,还出现了完全数字化的电磁系统。新一 代可编程、宽带的航空频率域电磁系统,基于实际时 间序列分析技术,采用一套线圈产生和接收所有频 率。比起传统的不同频率采用不同线圈的电磁系统 来说,更能预见它的工作特性。最杰出的是系统能 够产生稳定带宽的谱数据,这是因为所有频率共享 相同的线圈参数(电感、电阻和时间常数)、几何状 态和模拟通道,并通过专门设计来减少电力线感应 噪声的影响。由此频率域电磁测量系统技术指标得 到提高:如噪声水平好于2×10-6,时间常数为0.1 s,零点漂移约 10 × 10⁻⁶ ppm/h。例如;美国 Geophex 公司的 GEM-2A 频率域电磁测量系统,加拿大 Aeroquest 公司的 Impulse 频率域电磁测量系统,澳 大利亚 WGC 和 CRC AMET 共同研制的固定翼飞机 吊舱式数字电磁系统 TEMPEST 等。

同样随着数字发射技术在时间域电磁系统中的 应用,系统可以产生更强的发射器激励,可以在更高 的频率或更低的基频上工作,允许测量的响应在时 间上更晚,有效地减少噪声水平。例如:加拿大 Geotech 公司生产的 VTEM 航空时间域电磁系统,加 拿大 Aeroquest 公司生产的 AeroTEM 时间域电磁测 量系统,加拿大原 Geoterrex-dighem 有限公司生产的 数字时间域电磁系统 GEOTEMR 电磁系统等。

GEM-2A 电磁测量系统使用一套线圈来产生多 频率的电磁系统,系统采用软件驱动,可重新配置频 率域或时间域工作方式,它还可以采用无源的方式 获得环境噪声谱。由于探头重量轻、仪器设备小,在 较高的高度上,系统可获得好的测量效果,或者可使 用更小的直升机来进行勘查飞行。

Impulse 频率域电磁测量系统天线组合采用的 是水平共面模式和垂直同轴模式,每个模式使用一 套线圈来产生多频率的电磁系统,发射控制和信号 处理,均采用数字化技术,有效地克服了串音,降低 了噪声,减少了发射极的损坏。发射功率高,伴有 30 次/s 的高数据输出率。整个系统工作稳定性好, 性能可靠。TEMPEST 电磁系统主要特点是:

(1)方波发射,通电和断电时间各 50%,收录信 号采用 75 kHz 的高采样率,应用先进的信号处理技 术,获得了很低的噪声水平,改进了地面响应和数据 处理;

(2)测量地下地质体的电磁响应频率范围是25 Hz~37.5 kHz,覆盖了高频系统和低频系统的频率 范围,宽脉冲提高了对地下导电体的鉴别能力;

(3)精确监视系统几何形态变化给地下响应带 来的影响,包括测量发射线圈与接收线圈的方向,用 来补偿由于系统几何形态变化给地下响应带来的影 响。主要技术指标:基频 25 Hz,发射线圈面积 186 m²,发射脉冲宽度 10 ms,断电时间 10 ms,峰值电流 300 A,最大发射磁矩 55 800 Am²,采样间隔 13 μs, 半周期采样 1 500 次,飞行高度 120 m,探测深度可 达到 400 m。

4 结论

在矿藏贮量分析中,值得争论的是如何将有用 矿藏与其他东西区分开来,传统的电磁系统没有足够的带宽或频谱来满足这样的要求,而如今宽带电 磁系统已经提升了这方面的能力,基于电磁谱的反 应,新系统能够收集用来探测、划分和识别实际矿藏 的连续带宽内的数据。事实上,电磁系统使用一套 线圈发射所有频率和接收所有频率的信号,比起传 统的一个谐振线圈产生一个频率的电磁系统来说, 新系统有如下特性:①使用单线圈系统来运行宽带 多频率的工作方式;②内部频率谱完善;③在所有频 率中可预知漂移特征;④轻型的探头和更小的主机。 最杰出的是该系统能够产生稳定带宽的谐数据,该 谱成分作为探测、描述和识别实际矿藏的潜在手段。

参考文献:

- [1] Smith K Mark, Lai Zheren, et al. A New PWM Controller with One-Cycle Response [J]. IEEE transaction on Power Electronics, 1999,14(1).
- [2] Sayed-Amr El-Hamamsy. Design of High-Efficiency RF Class-D Power Amplifier [J]. IEEE transaction on power electronics, 1994,9(3).
- [3] Won J, Oren A, Funak F. A programmable broadband helicoptertowed electro-magnetic sensor[J]. Geophysics, 2003,68(6).
- [4] Larry. IMPULSE Helicopter Electro-Magnetic Survey System[R]. IMPULSE Manual, 2003.
- [5] Won I J, Keiswetter D A, Fields G, et al. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor [J]. J Environ Engin Geophys, 1996(1):129.
- [6] Franc Cermelj. Design of a class D-Amplifier, a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of bachelor of engineering in electrical engineering at the University of Newcastle [R]. Australia, University of Newcastle.
- [7] 郭良德.西方国家航空物探技术的若干进展[J].物探与化探, 2000,24(5):341.
- [8] 张洪瑞,范正国.2000 年来西方国家航空物探技术的若干进展
 [J].物探与化探,2007,31(1):1.
- [9] 赵凯华,陈熙谋.电磁学[M].北京;人民教育出版社,1978.

THE APPLICATION OF DIGITAL TRANSMISSION TO AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEM

ZHOU Xi-hua^{1,2}, XIONG Sheng-qing², ZHANG Hong³, JIN Long-zhe²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. Beijing Information Technology Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: This paper has briefly discussed working principles of the electromagnetic system, the digital transmitter and the multi – frequency digital transmitting technology, and also dealt with the application of digital transmission to the electromagnetic system. The technical performance and survey capability of the electromanetic system have been greatly improved by introducing the up – to – date digital transmitting technology, which reduces the weight of the system, increases the flexibility and lowers the system drift and noise level.

Key words: airborne electromaganetic system; digital transmission; application

作者简介:周锡华(1964-),男,江苏南通人,教授级高级工程师,1986年毕业于成都地质学院放射性物探专业,现任职于中国国土资源航空物探遥感中心,1997年获中国地质大学(北京)计算机应用专业硕士学位,现在中国地质大学(北京)攻读博士学位,主要从事地球物理探测技术、探测仪器以及计算机应用技术等领域的研究开发与应用,发表论文多篇。