

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413308

海洋电场变频调谐窄带抑制噪声的测量方法*

刘子逸, 李平, 文玉梅, 叶敬昌

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘要:海洋电场测量对于监测海洋活动、探测海底资源具有重要意义。由于海洋电场信号频率低,对于微弱的信号,电场测量不可避免受到器件的 $1/f$ 噪声和环境变频谐波噪声的影响,其中环境变频谐波噪声的频率可能非常接近待测电场信号,难以通过现有的斩波放大技术抑制。针对现有测量电路难以抑制环境变频谐波噪声的问题,提出了一种开关变频石英晶体谐振窄带抑制噪声的海洋电场测量方法,将海洋电场变频到32.768 kHz,上变频信号经过高 Q 值石英晶振实现超窄带滤波的海洋电场测量。通过对开关变频海洋电场的过程以及变频调谐窄带测量电路的选频特性进行理论分析,推导出变频调谐窄带测量输出信号的表达式。搭建了电场测量实验平台,对设计的变频调谐窄带测量电路进行了实验测试。实验结果表明,当海洋电场信号频率为0.01~0.2 Hz时,变频调谐窄带测量的灵敏度是直接测量的2.78倍,测量电路的带宽 <0.4 Hz。对于频率为0.1 Hz的海洋电场信号,变频调谐窄带测量的信噪比相比于直接测量提高了19.82 dB。这种方法不仅可以用于强噪声下微弱海洋电场信号的识别和测量,还可以用于未来海洋电场测量阵列的构建。

关键词:海洋电场测量;窄带滤波;石英晶振

中图分类号: TH89 TM93 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Measurement of narrowband noise suppression by frequency tuning of marine electric field

Liu Ziyi, Li Ping, Wen Yumei, Ye Jingchang

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Marine electric field measurement is of significant importance for monitoring marine activities and exploring seabed resources. Due to the low-frequency characteristics of marine electric field signals, weak signal measurement is inevitably affected by device $1/f$ noise and environmental frequency-conversion harmonic noise. Notably, the frequency of environmental frequency-conversion harmonic noise may closely approach that of the target electric field signals, making it difficult to suppress using existing chopper amplification techniques. To address the challenge of existing measurement circuits in suppressing environmental frequency-conversion harmonic noise in conventional measurement circuits, this article proposes a marine electric field measurement method incorporating switched-frequency conversion quartz crystal resonance narrowband noise suppression. The approach converts marine electric field to 32.768 kHz, and the up-converted signal undergoes ultra-narrowband filtering via a high- Q quartz crystal resonator. Theoretical analysis is conducted on the frequency-conversion tuning process of the marine electric field and the frequency-selective characteristics of the proposed measurement circuit, leading to the derivation of the expression for the output signal after frequency-conversion tuning narrowband processing. An experimental platform for electric field measurement is established, and the designed frequency-conversion tuning narrowband measurement circuit is tested. Experimental results show that when the marine electric field signal frequency ranges from 0.01 to 0.2 Hz, the sensitivity of the frequency-conversion tuning narrowband measurement reaches 2.78 times that of direct measurement, with a circuit bandwidth of less than 0.4 Hz. For a marine electric field signal at 0.1 Hz, the signal-to-noise ratio of the frequency-conversion tuning narrowband measurement shows a 19.82 dB improvement compared to direct measurement. This method not only enables the detection and measurement of weak marine electric field signals in strong noise environments but also provides a foundation for future deployments of marine electric field measurement arrays.

Keywords: marine electric field measurement; narrowband filtering; quartz crystal

收稿日期: 2024-9-23 Received Date: 2024-9-23

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3205703)项目资助

0 引言

海洋电场包含重要的海洋信息。洋流的运动、矿物的电化学反应、海洋生物和海底火山的活动会产生相应的海洋电场信号^[1-3],海运和军事活动所用的轮船、舰艇等同样会产生海洋电场^[4-5],海底油气资源的分布会影响海底电导率,使海洋电场发生变化^[6-8]。海洋电场测量对于监测海洋活动、侦察军事目标以及勘探油气资源等都具有重要价值。

海水对高频电磁波的衰减使电场信号频率主要集中在赫兹量级,并且电场信号的幅度通常只有微伏量级甚至更低,因此噪声抑制成为了海洋电场测量中的一个关键问题^[9]。目前,海洋电场测量最普遍使用的方法是自然电位法,该方法通过直接测量一对电极之间的电压,在已知电极距离的情况下,计算出该方向上的电场强度。申振等^[10]制备了 Ag/AgCl 电极和碳纤维电极,两种电极的自噪声在稳定后均达到了 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$ 。王泽臣等^[11]通过对碳纤维电极改性提高了其对水中离子的吸附能力,电极对 10 mHz 以下低频信号响应的线性度提高。Luo 等^[12]提出了一种多孔 Ag/AgCl 电极,多孔结构增大了电极的电化学反应活性面积,电极对的电位漂移减小至 $6.5 \mu\text{V}/24 \text{ h}$ 。王志宇等^[13]设计了一种具有较小接触电阻的钼电极,该电极的自噪声水平为 $0.67 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$ 。在与测量电极进行连接时,高输入阻抗的前置放大器存在 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的 $1/f$ 噪声,不能满足海洋微弱电场的测量需求^[14]。为减小电路 $1/f$ 噪声和漂移对测量的影响,研究者提出了基于斩波放大技术的海洋电场信号放大器。Filloux 等^[15-16]设计了一种盐桥式机械斩波结构,通过双刀双掷开关的切换实现了“水斩波”功能,将海洋电场信号调制到开关频率附近,但由于机械系统结构稳定性和功耗的限制,该技术的调制频率仅达到每小时 60 次,只能测量频率 $< 5 \text{ mHz}$ 的电场信号。Wang 等^[17-18]采用斩波放大技术,通过电子开关将低频电场信号调制到 2 kHz,采用二阶无源 RC 低通滤波器 and 一阶无源 RC 高通滤波器实现带通滤波,带通滤波器的带宽约为 40 Hz。

各类非线性电子设备产生的超高次谐波污染广泛分布在 2~150 kHz 的频率范围中^[19-21],产生的超高次谐波电流大小可达几十甚至上百 dB μA ,其中绝大部分直接流入临近电器设备成为电源干扰^[22-23]。斩波频率超过 10 kHz 时,由于斩波放大器对电源中超高次谐波的电源抑制比低于 80 dB,超高次谐波噪声会对斩波放大器输出产生 μV 量级的影响^[24-25]。超高次谐波还包含间隔 100 Hz (50 Hz 基波频率的 2 倍) 的边带谐波^[26-28],要求

抑制超高次谐波噪声的带通滤波器的带宽 $< 50 \text{ Hz}$,目前斩波放大电路已可通过二阶或更高阶的滤波器实现这样的带宽。然而在海洋电场测量中,除待测信号源产生的有用信号外,还存在其他信号源产生的环境噪声信号,两者的频率差可能仅为赫兹量级^[29-30]。斩波放大测量中,有用信号与环境噪声都被搬移至开关频率附近,变频后的有用信号与环境噪声的频率差保持不变,当开关频率达到千赫兹以上时,需要 RLC 电路的 Q 值超过 10^4 才能达到几赫兹的带宽,难以通过增加 RLC 带通滤波器的阶数实现,因此无法有效抑制环境变频谐波噪声。

针对上述问题,本研究提出变频调谐窄带抑制噪声的海洋电场信号测量方法。该方法利用开关实现海洋电场信号变频,抑制电路中的 $1/f$ 噪声。通过石英晶体谐振电路实现窄带宽的带通滤波,抑制环境变频谐波噪声对测量的影响。对开关实现电场变频以及石英谐振电路实现窄带滤波进行了理论分析,并在搭建的海洋电场测量系统中对电场测量的灵敏度和信噪比进行了测试。

1 海洋电场变频调谐测量原理

1.1 传统自然电位法的测量电路

目前普遍使用自然电位法测量海洋电场,自然电位法测量的等效电路如图 1 所示。该方法通过测量电极对 a 和 b 之间的电压,在已知电极距离的情况下,计算出该方向上的电场强度。其中, $U(t)$ 为海洋电场源的等效电压, R_1 为场源的内阻, R_2 为场源到测量电极之间海水的阻值, V_{n0} 为海洋电场的环境噪声, R_{ab} 为测量电极间海水的电阻, V_{n1} 和 V_{n2} 为电极自身的噪声, C_{d1} 、 C_{d2} 为电极海水界面的双电层电容, R_{F1} 、 R_{F2} 为界面的电荷转移电阻, R_{s1} 、 R_{s2} 为两电极自身的电阻, Z_{in} 为测量电路的输入阻抗。通常情况下,测量电路的输入阻抗 Z_{in} 远大于溶液电阻和界面阻抗。

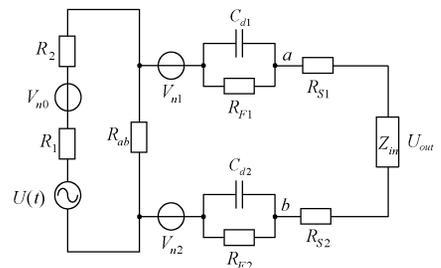


图 1 自然电位法的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the self-potential method

将两电极的电荷转移电阻 R_F 、双电层电容 C_d 与电极自身的电阻 R_s 分别为等效阻抗 Z_1 和 Z_2 。使用自然电位法进行测量时,电路的输出如式(1)所示。

$$U_{out} = \left[(U + V_{n0}) \cdot \frac{R_{ab}}{R_1 + R_2 + R_{ab}} + V_{n1} + V_{n2} \right] \cdot \frac{Z_{in}}{\frac{R_{ab} \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_{ab}} + Z_1 + Z_2 + Z_{in}} \quad (1)$$

其中,待测电场信号 U 与噪声信号 V_{n0} 、 V_{n1} 、 V_{n2} 的频率主要集中在赫兹量级,幅度在微伏量级。自然电位法中,测量电路的输出 U_{out} 包含电极和电路中的噪声,其中对测量产生主要影响的是 $1/f$ 噪声。如果将待测电场信号调制到高频,可以减小电极与电路 $1/f$ 噪声的影响,但此时环境噪声也会被调制到高频,依然会对测量的信噪比产生影响。

环境变频谐波噪声的频谱示意图如图 2 所示。设待测信号的频率为 f_x ,环境噪声信号的频率为 f_n ,两者的频率之差为 Δf ,载波信号的频率为 f_c 。图 2 中待测信号与环境噪声被调制到载波信号的一次谐波附近,两者的频率之差仍为 Δf 。海洋电场测量中,任何环境噪声都可以作为干扰源,因此环境噪声与有用信号的频率差 Δf 可能非常小,需要超窄带宽的带通滤波器以抑制噪声。

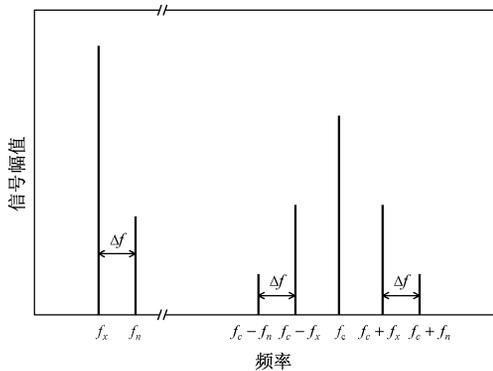


图 2 环境变频谐波噪声频谱
Fig. 2 Spectrum of the environmental frequency-conversion harmonic noise

1.2 变频调谐测量电路

海洋电场变频调谐测量系统的示意图和实验平台实物图分别如图 3 和 4 所示。电极通过 3D 打印的夹具固定在海水中,使用信号发生器 1 在两金属板上施加电压,从而在金属板之间的海水中形成电场。电极 a 作为调制电极,电极 b 和 c 作为测量电极。调制电极 a 通过开关与测量电极 c 相连,测量电极 b 和 c 的输出作为石英谐振电路的输入。

使用信号发生器 2 产生控制开关通断的方波信号,方波信号的频率和占空比由计算机控制。开关的通断分别对应调制电极 a 与测量电极 c 的连接与断开。开

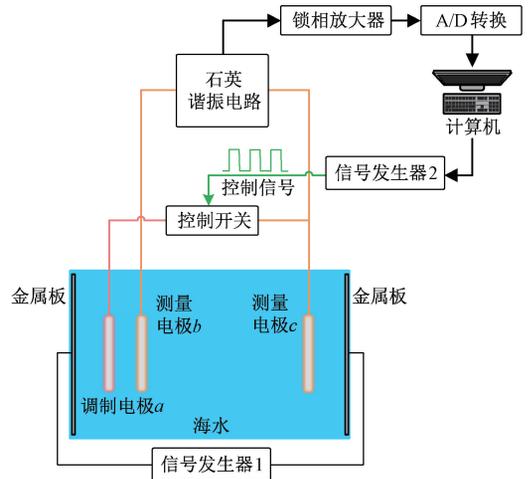


图 3 海洋电场变频调谐测量系统
Fig. 3 The marine electric field frequency tuning measurement system



图 4 实验平台
Fig. 4 Experimental platform

关导通时,电极 a 与 c 直接相连,由于电极自身的阻抗小,电极 a 与 c 几乎等势,此时电极 a 和 c 之间的电场近似被阻断;开关断开时,电极 a 与 c 断开,此时电极 a 和 c 之间的电场则不受影响。系统中 3 个电极的位置固定,并确保调制电极 a 与测量电极 b 之间的距离 \ll 测量电极 b 和 c 之间的距离,以使在开关通断前后测量电极 b 和 c 之间的电场变化幅度最大。通过锁相放大器将石英谐振电路的输出解调,锁相放大器的参考信号为信号发生器 2 的方波信号。解调后的信号经 A/D 转换并由计算机记录。

测量电路的实物图如图 5 所示,测量电路分为控制开关和石英谐振电路两部分。控制开关为场效应管,其工作频率满足测量需求。石英谐振电路包括石英晶振和负载电容,在电路中对输入信号起选频作用。

为分析石英谐振电路的输出,建立测量系统的等效电路如图 6 所示。 M 为 N 沟道增强型场效应管,将方波信号加在场效应管的栅极与源极之间,从而实现对调制电极 a 与测量电极 c 通断的控制。 M 在电路中作为开关,开关的频率以及占空比由方波信号控制。 X 为石英

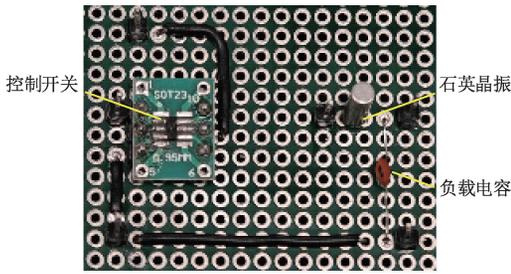


图5 测量电路

Fig. 5 Measuring circuit

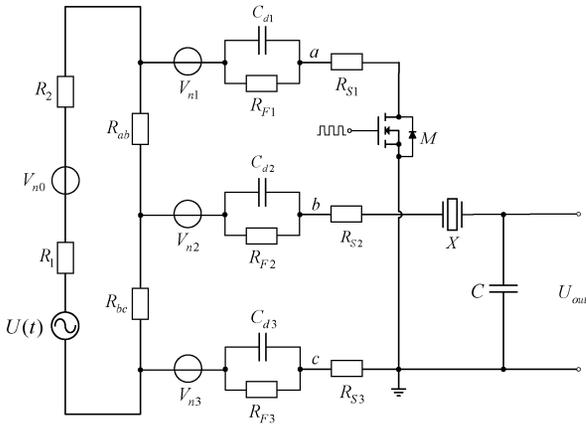


图6 测量系统的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of the measurement system

晶振, C 为负载电容, 负载电容上的电压为石英谐振电路的输出 U_{out} 。

由于电极界面的电荷转移电阻 R_{F1} 和 R_{F2} 非常小, 当电极测量的海洋电场时, 电流几乎全部流经电荷转移电阻 R_F , 可将 R_F 忽略不计。电极自身的噪声为 V_{n1} 、 V_{n2} 和 V_{n3} , 主要为 $1/f$ 噪声, 可通过电极材料和加工工艺改善, 并且在变频测量中, 待测信号被开关调制至高频, 也降低了电极自身 $1/f$ 噪声的影响。因此, 在理论分析中主要考虑环境噪声对测量信号的影响, 测量系统的等效电路图 6 可以进一步简化, 简化后的等效电路如图 7 所示。

简化后的电路中, 场效应管作为开关 S , 开关的通断由矩形波信号 $f(t)$ 控制, $f(t)$ 的时域表达如式 (2) 所示。

$$f(t) = \begin{cases} 1, & nT \leq t < nT + DT \\ 0, & nT + DT < t \leq (n+1)T \end{cases} \quad (2)$$

其中, T 为开关的周期, 开关频率为 $f_c = 1/T$, 占空比为 D 。 $f(t) = 1$ 表示开关断开, 此时海洋电场源的等效电压 $U(t)$ 在测量电极 b 和 c 之间产生对应的分压 $U_{bc}(t)$, $U_{bc}(t)$ 同时作为石英谐振电路的输入; $f(t) = 0$ 表示开关闭合, 此时 $U(t)$ 在 ac 间被近似短路, $U_{bc}(t)$ 近似为 0。开

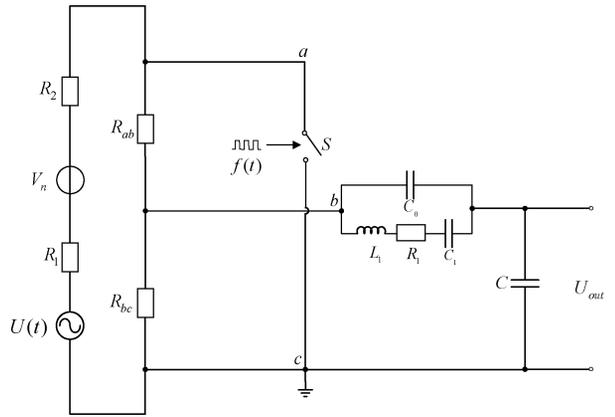


图7 简化后的等效电路

Fig. 7 Simplified equivalent circuit of the measurement system

关的断开与闭合决定 bc 间的电压大小, 开关的频率为 bc 间电压的变化频率。对于 $U(t)$ 中的任一频率的待测信号, 石英谐振电路的输入 $U_{bc}(t)$ 如式 (3) 所示。

$$U_{bc}(t) = \begin{cases} (U(t) + V_n(t)) \cdot \frac{R_{bc}}{R_1 + R_2 + R_{ab} + R_{bc}} \\ \frac{Z_{in}}{\frac{R_{bc} \cdot (R_1 + R_2 + R_{ab})}{R_1 + R_2 + R_{ab} + R_{bc}} + Z_{in}}, & nT \leq t < nT + DT \\ 0, & nT + DT \leq t < (n+1)T \end{cases} \quad (3)$$

其中, Z_{in} 为石英和负载在这一频率下的等效阻抗之和。对于任一频率的待测信号 $U(t) = A \cos \omega_x t$ 和环境噪声 $V_n(t) = B \cos \omega_n t$, 当开关频率为 $\omega_c = 2\pi f_c$ 时, 由式 (3) 可得 bc 间的电压为:

$$U_{bc}(t) = A_0 + A_1 \cos \omega_x t + A_2 \sin \omega_c t + \sum_{n=0}^{\infty} \{ A_{n1} \sin[(2n+1)\omega_c + \omega_x]t + A_{n2} \sin[(2n+1)\omega_c - \omega_x]t \} + B_1 \cos \omega_n t + \sum_{n=0}^{\infty} \{ B_{n1} \sin[(2n+1)\omega_c + \omega_n]t + B_{n2} \sin[(2n+1)\omega_c - \omega_n]t \} \quad (4)$$

其中, $A_0, A_1, A_2, A_{n1}, A_{n2}, B_1, B_{n1}, B_{n2}$ 为调制系数。石英晶振的等效电路为 L_1, R_1, C_1 这 3 个元件的串联支路与 C_0 支路的并联。其中, L_1, R_1, C_1 分别为石英的动态等效串联电感、电阻和电容, C_0 为静态电容。 f_0 为整个变频调谐测量电路的谐振频率, f_0 的表达式如式 (5) 所示。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \times \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0 + C}} = \frac{\sqrt{C_1 + C_0 + C}}{2\pi\sqrt{L_1 C_1 (C_0 + C)}} \quad (5)$$

对于输入信号 $U_{bc}(t)$, 石英谐振电路产生输出 $U_{out}(t)$, 谐振电路的传递函数 $H(s)$ 的表达式如式 (6) 所示。

$$H(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{bc}(s)} = \frac{L_1 C_1 C_0 s^3 + R_1 C_1 C_0 s^2 + (C_0 + C_1) s}{(L_1 C_1 C_0 + L_1 C_1 C) s^3 + (R_1 C_1 C_0 + R_1 C_1 C) s^2 + (C_0 + C_1 + C) s} \quad (6)$$

式(6)中谐振电路传递函数对应的波特图如图 8 所示。

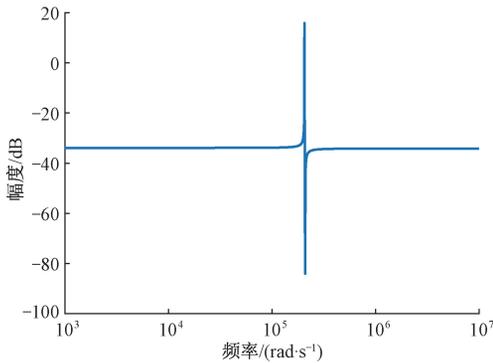


图 8 谐振电路传递函数的波特图

Fig. 8 Bode plot of the system transfer function

整个变频调谐测量电路谐振时,待测信号被开关调制到谐振频率处,即 $f_0 = f_x + f_c$ 。当待测信号 $U(t) = A \cos(2\pi f_x t)$ 与环境噪声 $V_n(t) = B \cos(2\pi f_n t)$ 的频率之差 Δf 远大于 f_0/Q (Q 为谐振电路的品质因数) 时,系统的输出 $U_{out}(t)$ 如式(7) 所示。

$$U_{out}(t) = A_o \cdot \sin(2\pi f_x + 2\pi f_c) t \quad (7)$$

其中, A_o 为待测信号经变频调谐后的系数。石英谐振的高品质因数使谐振电路具有良好的选频特性,电路的 3 dB 带宽为 $\omega_0/2\pi Q$ 。经开关变频,待测信号的频率等于测量电路的谐振频率。由于电路超窄的 3 dB 带宽,与待测信号频率相差 Δf 的环境噪声被有效抑制。在 $Q = 10^5$, $f_0 = 32.768 \times 10^3$ Hz 的条件下,当环境变频谐波与待测信号的频率间隔为 1 Hz 时,在经过谐振电路后,环境变频谐波对输出的影响降低至 16.2%。

比较式(4)和(7),信号经过石英谐振电路后,环境噪声被有效抑制而待测信号仍被保留。因此,高 Q 值的石英谐振电路具有良好的选频能力,可以通过变频调谐测量电路抑制环境变频谐波噪声并提高测量信噪比。

2 实验验证及分析

为比较直流电场下直接测量法、变频测量法和变频调谐测量法的测量波形,分别搭建实验系统如图 9(a)~(c) 所示。图 9 中使用的电极均为 Ag/AgCl 电极,图 9(b) 和(c)中使用的开关为 N 沟道增强型场效应管 2N7002,其工作频率可达 1 MHz,图 9(c)中使用圆柱形无源石英晶振,谐振频率为 $f = 32.768$ kHz,对应图 7 中石英晶振的等效电路,该石英晶振的串联电阻为 $R_1 = 30$ k Ω ,动态电容为 $C_1 = 16.19$ fF,静态电容为 $C_0 = 0.5$ pF,选取的负载电容 $C = 25$ pF。使用信号发生器在金属板上施加 5 V 的直流电压,控制开关的频率为 32.768 kHz。

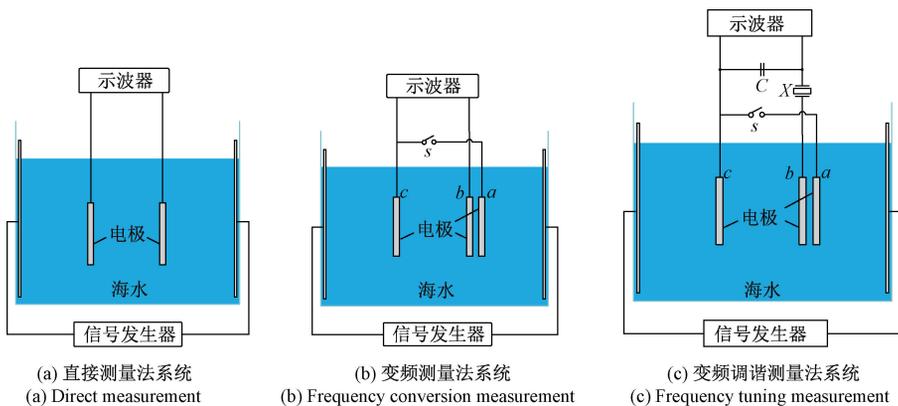


图 9 3 种测量方法的系统

Fig. 9 System of the three measurement methods

为定性说明控制开关对电场信号的调制作用以及石英谐振电路的选频能力,使用示波器记录变频测量法和变频调谐测量法的测量波形,实验结果分别如图 10(a) 和(b) 所示。图 10(a) 中示波器中出现了开关频率的信号,说明控制开关可以实现对电场信号的调制,图 10(a)

中信号不为理想方波,原因是开关调制过程中测量电极 b 和 c 上存在充放电过程,该过程的快慢取决于测量电极的动态性能。图 10(b) 通过调整开关控制信号的频率,使直流电场信号被调制到测量电路的谐振频率处,此时示波器的信号趋近于正弦信号,信号的频率为电路的谐振频

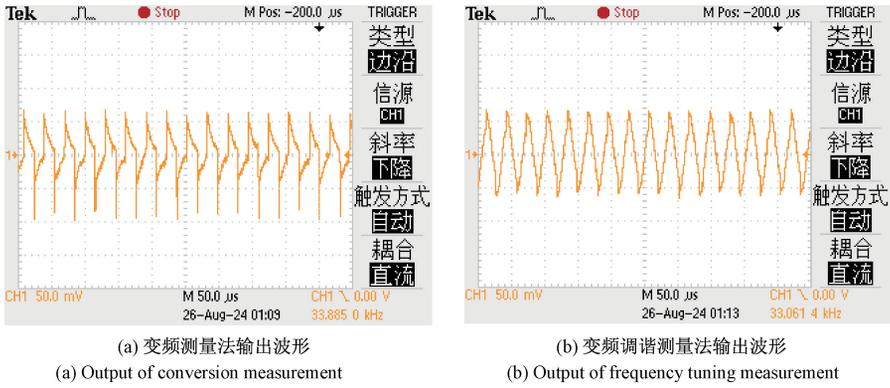


图 10 变频测量与变频调谐测量的输出波形对比

Fig. 10 Comparison of outputs from frequency conversion measurement and frequency tuning measurement

率。说明经过石英谐振电路后,谐振频率处的信号被保留,而其他频率的信号被明显抑制。

2.1 灵敏度

为比较交流电场下3种测量方法的灵敏度和信噪比,搭建实验平台如图4所示。通过NI的数据采集卡PXIe-4309记录直接测量法的输出信号,在变频测量和变

频调谐测量中电路的输出信号是高频的已调信号,该信号通过斯坦福的锁相放大器SR830解调后再由计算机记录。实验中,信号发生器施加激励信号的幅度为500 mV保持不变,激励信号的频率分别为0.01、0.05、0.1和0.2 Hz。不同频率电场下3种测量方法的输出结果对比如图11所示。

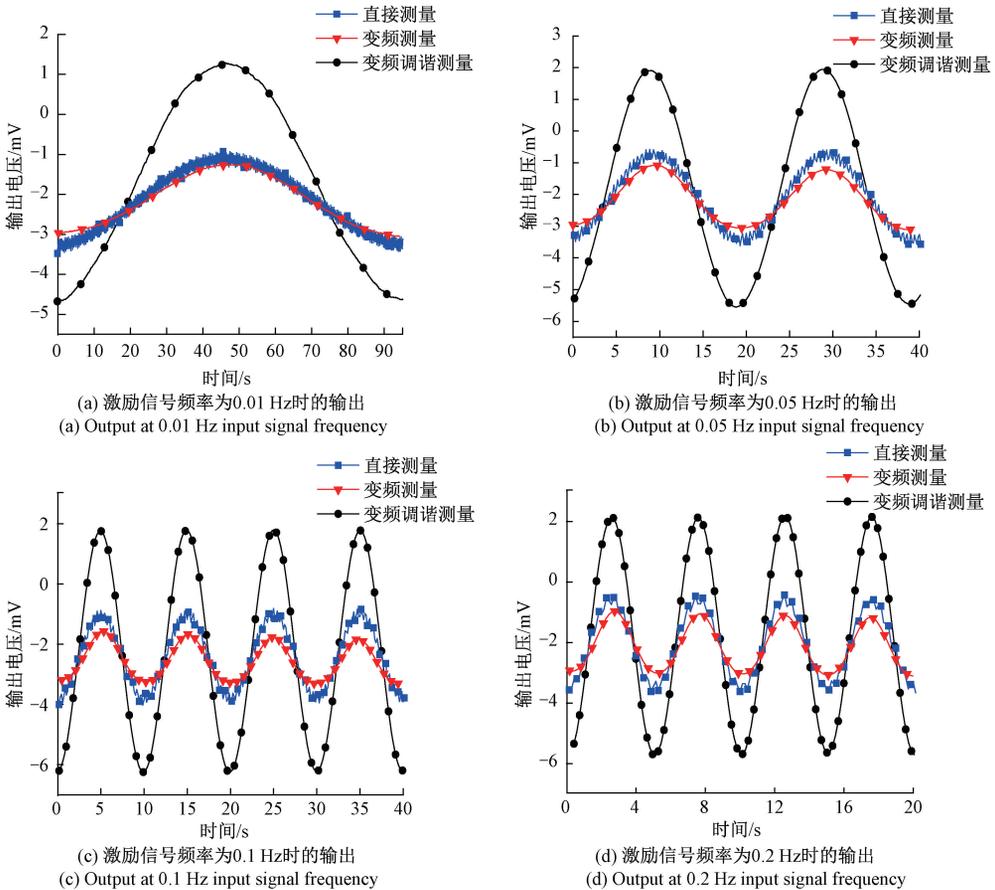


图 11 不同频率电场下3种测量方法的输出电压

Fig. 11 Output voltages of the three methods at different frequencies of electric field

变频测量和变频调谐测量中开关频率始终保持不变,对于不同频率的电场信号,直接测量、变频测量与变频调谐测量的输出信号峰峰值如图12所示。从图中可以看出,变频调谐测量输出信号的峰峰值比直接测量更高。对于0.01、0.05、0.1、0.2 Hz的电场信号,变频调谐测量的输出分别是直接测量输出的2.78、2.79、2.99、2.78倍。

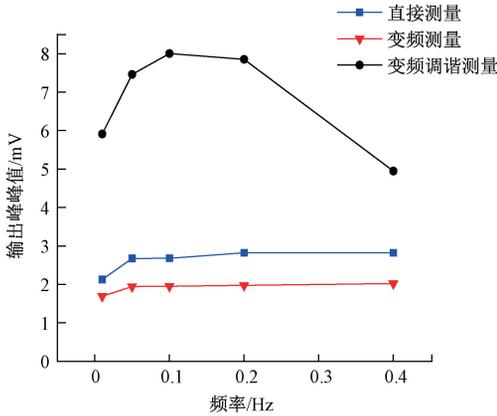


图12 不同频率电场下3种测量方法的峰峰值

Fig. 12 Peak-to-peak values of the three methods at different frequencies of the electric field

变频调谐测量中,电场信号频率达到0.1 Hz后,输出信号幅度开始衰减,电场信号频率达到0.4 Hz时,输出信号已衰减至最大电压幅度的0.707倍以下,谐振电路的-3 dB带宽<0.4 Hz。说明谐振电路具有良好的选频特性,与原理分析中推导的式(7)的结论相符。

2.2 信噪比

对于0.1 Hz的电场信号,3种测量方法的功率谱密度如图13所示。可以看出,直接测量的功率谱密度中除了包含频率为0.1 Hz的待测信号外,还存在1.08、1.62、2.16、2.69和3.23 Hz这5个明显的频率成分,这些低频

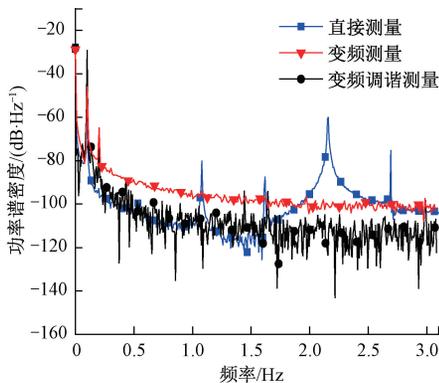


图13 待测信号为0.1 Hz时3种测量方法的功率谱密度

Fig. 13 Power spectral densities of the three methods at 0.1 Hz of the signal to be measured

噪声主要来自电极与测量电路。变频测量通过开关将待测信号调制到高频,减小了电极与测量电路低频噪声的干扰,但变频过程受环境噪声的影响,导致噪声的整体水平较高。变频调谐测量中,电场信号变频后通过具有良好选频特性的石英晶体谐振电路,使电场信号中的环境噪声得到有效抑制。

计算3种测量方法的信噪比,如式(8)所示。

$$SNR = 10 \times \lg \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (8)$$

其中, P_{signal} 为0.1 Hz的待测信号的功率, P_{noise} 为除待测信号频率外的噪声的功率。根据式(8)计算得出,直接测量的信噪比为16.81 dB,变频测量的信噪比为11.42 dB,变频调谐测量的信噪比为36.63 dB。相比于直接测量,变频调谐测量的信噪比提高了19.82 dB,相比于变频测量,变频调谐测量的信噪比提高了25.21 dB。说明变频调谐测量电路可以抑制环境变频谐波噪声,提高测量信噪比,与从式(4)和(7)中得到的结果相符合。

3 结论

针对现有测量电路难以抑制环境变频谐波噪声的问题,本研究提出了通过开关变频和石英晶体谐振实现海洋电场信号测量的方法。理论分析了通过开关实现海洋电场变频的过程以及石英谐振电路的窄带滤波特性。经实验论证,对于0.01~0.2 Hz的电场信号,变频调谐测量的灵敏度是直接测量的2.78倍以上,谐振电路的带宽<0.4 Hz。对于0.1 Hz的电场信号,变频调谐测量的信噪比相比于直接测量提高了19.82 dB。本研究提出的变频调谐测量电路具有良好的噪声抑制能力,不仅可以用于强噪声下微弱海洋电场信号的识别和测量,未来还可用于海洋电场测量阵列的构建。

参考文献

- [1] COX C. Electromagnetic induction in the oceans and inferences on the constitution of the earth[J]. *Geophysical Surveys*, 1980, 4(1): 137-156.
- [2] 申俊峰, 申旭辉, 李胜荣, 等. 矿物热电效应与火山地震之热电异常[J]. *地学前缘*, 2020, 27(5): 207-217.
SHEN J F, SHEN X H, LI SH R, et al. Relationship between the effects of mineral thermoelectricity and abnormal geoelectricity[J]. *Geological Frontiers*, 2020, 27(5): 207-217.
- [3] WALLACH A, MELANSON A, LONGTIN A, et al. Mixed selectivity coding of sensory and motor social signals in the thalamus of a weakly electric fish[J]. *Current Biology*, 2022, 32(1): 51-63.

- [4] 郑朴真, 林君, 梁尚清, 等. 基于电场检测的船涂涂层破损仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11):90-98.
ZHEN P ZH, LIN J, LIANG SH Q, et al. Simulation study on hull coating damage detection based on electric field measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11):90-98.
- [5] 包中华, 龚沈光, 李俊, 等. 一种基于负熵的舰船轴频电场信号检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10):2210-2215.
BAO ZH H, GONG SH G, LI J, et al. Novel approach for shaft-rate electric field signal detection based on negentropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10):2210-2215.
- [6] CONSTABLE S. Review paper: Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding[J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61:505-532.
- [7] 李红霞, 宋玉苏, 申振, 等. Ag/AgCl 电极海洋电场探测机理研究[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(1):57-61, 75.
LI H X, SONG Y S, SHEN ZH, et al. Research on mechanism of marine electric field detection based on Ag/AgCl electrode[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(1):57-61, 75.
- [8] CONSTABLE S, SRNKA L J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration[J]. Geophysics: Journal of the Society of Exploration Geophysicists, 2007, 72(2): WA3-WA12.
- [9] 邓明, 魏文博, 谭捍东, 等. 海底大地电磁数据采集器[J]. 地球物理学报, 2003(2):217-223.
DENG M, WEI W B, TAN H D, et al. Collector for seafloor magnetotelluric data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003(2):217-223.
- [10] 申振, 宋玉苏, 王焯焯, 等. Ag/AgCl 和碳纤维海洋电场电极的探测特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2):211-217.
SHEN ZH, SONG Y S, WANG Y X, et al. Study on the detection characteristics of Ag/AgCl and carbon fiber marine electric field electrodes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2):211-217.
- [11] 王泽臣, 林君, 辛青, 等. 新型碳纤维海洋电场电极的制备及性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9):52-60.
WANG Z CH, LIN J, XIN Q, et al. Preparation and property study of a new carbon fiber electrodes for marine electric field detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9):52-60.
- [12] LUO W, DONG H B, XU J M, et al. Development and characterization of high-stability all-solid-state porous electrodes for marine electric field sensors[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 301:111730.
- [13] 王志宇, 王顺, 方广有, 等. 一种新型海洋电场传感器的研究与设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1):57-61.
WANG ZH Y, WANG SH, FANG G Y, et al. A novel sensor for marine electric field measurement: Study and design[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1):57-61.
- [14] CHEN K, WEI W B, DENG M, et al. A seafloor electromagnetic receiver for marine magnetotellurics and marine controlled-source electromagnetic sounding[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(3):317-326.
- [15] FILLOUX J H. Electric field recording on the sea floor with short span instruments[J]. Earth Planets & Space, 2010, 26(2):269-279.
- [16] FILLOUX J H. Observation of very low frequency electromagnetic signals in the ocean[J]. Earth Planets & Space, 1980, 32(Supplement1):SI1-SI12.
- [17] WANG ZH D, DENG M, CHEN K, et al. Development and evaluation of an ultralow-noise sensor system for marine electric field measurements[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2014, 213(7):70-78.
- [18] LIU F H, CHUN SH H, CHEN R J, et al. A low-noise amplifier for submarine electric field signal based on chopping amplification technology[J]. Sensors, 2024, 24(5):1417.
- [19] TERRICHE Y, MUTARRAF M U, LAIB A, et al. A resolution-enhanced sliding matrix pencil method for evaluation of harmonics distortion in shipboard microgrids[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3):1290-1300.
- [20] RONNBERG S K, BOLLEN M H J, AMARIS H, et al. On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz-150 kHz—review and research challenges[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 150:1-10.
- [21] 李凯特, 赵伟, 李世松, 等. 超高次谐波测量方法研究进展[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3):1-9.
LI K T, ZHAO W, LI SH S, et al. Advances in supraharmomics measurement methods[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2024, 61(3):1-9.
- [22] GREVENER A, MEYER J, RÖNNBERG S, et al. Survey of supraharmomic emission of household appliances[J]. CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017, 2017(1):870-874.

- [23] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
XIAO X N, LIAO K Y, TANG S H, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.
- [24] 尹勇生, 杨悦, 高杰, 等. 一种具有纹波抑制功能的斩波稳定放大器[J]. 微电子学, 2023, 53(6): 1031-1036.
YIN Y SH, YANG Y, GAO J, et al. A chopper-stabilized amplifier with ripple suppression function[J]. Microelectronics, 2023, 53(6): 1031-1036.
- [25] 陶顺, 要海江, 宋一丹, 等. 三相 Vienna 型充电器超高次谐波产生机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 22-32.
TAO SH, YAO H J, SONG Y D, et al. Analysis of the generation mechanism of supraharmics in a three-phase Vienna charger [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 22-32.
- [26] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 超高次谐波问题及其研究现状与趋势[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 353-365.
WANG Y, LUO D J, XIAO X Y, et al. Review and development tendency of research on 2~150 kHz supraharmics[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 353-365.
- [27] 王世雨, 李绍令, 郑征, 等. 并网逆变器超高次谐波产生与传播机理分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 80-89.
WANG SH Y, LI SH L, ZHENG ZH, et al. Analysis of generation and propagation mechanism of supraharmic in grid-connected inverter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 80-89.
- [28] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 多逆变器并网下的超高次谐振特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 192-199.
WANG Y, LUO D J, XIAO X Y, et al. Analysis on supraharmic resonance characteristics with integration of multiple inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 192-199.
- [29] CHEN K, ZHAO Q X, DENG M, et al. Seawater

motion-induced electromagnetic noise reduction in marine magnetotelluric data using current meters [J]. Earth Planets and Space, 2020, 72(1): 4-14.

- [30] WANG Y, WANG D, CHI CH, et al. Ship shaft-rate electric field signal denoising method based on VMD-MSS[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(4): 544.

作者简介



刘子逸, 2020年于上海交通大学获得学士学位, 现为上海交通大学在读硕士研究生, 主要研究方向为海洋电场测量。

E-mail: yiziliu46474849@sjtu.edu.cn

Liu Ziyi received his B.Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2020. He is currently a master student at Shanghai Jiao Tong University. His main research direction is ocean electric field measurement.



李平 (通信作者), 1984年于重庆大学获得学士学位, 1995年于重庆大学获得硕士学位, 2003年于重庆大学获得博士学位, 现为上海交通大学教授, 主要研究方向为传感器技术、仪器和测量、能量采集和自供电技术。

E-mail: liping_sh@sjtu.edu.cn

Li Ping (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Chongqing University in 1984, 1995, and 2003, respectively. He is currently a professor at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include sensors and actuators, measurement and instrumentation, energy-harvesting and self-powered technology.



叶敬昌, 2017年于武汉理工大学获得学士学位, 2020年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为上海交通大学博士研究生, 主要研究方向为电场传感器、能量采集和机械设计。

E-mail: qyui1234@sjtu.edu.cn

Ye Jingchang received his B.Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2017 and M.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2020. He is currently a Ph.D. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include electric field sensors, energy harvesting, and mechanical design.