

周璧华,郭建明,邱实等. 闪电电场变化测量仪研究. 地球物理学报, 2012, 55(4):1114-1120, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 006.

Zhou B H, Guo J M, Qiu S, et al. Research of the lightning electric field change meter. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4):1114-1120, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 006.

闪电电场变化测量仪研究

周璧华,郭建明*,邱 实,李炎新,朱凯鄂

解放军理工大学,南京 210007

摘 要 分析了现有闪电电场变化测量仪存在的不足之处,提出了采用一台测量仪同时获得闪电电场快、慢变化特性的技术方案,通过对测量仪天线、电路、传输方式的优化,大大降低了系统的复杂程度,提高了可靠性;采用全介质光缆传输信号,可避免在信号传输过程中因电磁耦合带来的干扰;采用系统函数逆变换反演被测电场时域特性,既可省去一套专测电场慢变化的仪器,且弥补了以往“电场慢变化测量仪”性能的不足. 测量结果表明,快变化测量系统的测量带宽为 80 Hz~87. 5 MHz. 采用研制成的电场变化测量仪对自然闪电进行多次测量后,将反演运算得到的波形与实测波形对比,验证了所提方案的可行性和技术上的先进性.

关键词 雷电电磁脉冲、电场变化测量仪,光隔离,系统函数,逆变换

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 006 中图分类号 P427 收稿日期 2011-02-25,2011-09-26 收修定稿

Research of the lightning electric field change meter

ZHOU Bi-Hua, GUO Jian-Ming*, QIU Shi, LI Yan-Xin, ZHU Kai-E

PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China

Abstract Some disadvantages of the existing lightning electric field change meter are analyzed. Brand new concept of using one set of lightning electric field change meter to get both the slow and fast changes information of the lightning is provided. By optimizing the antenna, the circuit and the transmission method, the instrument is greatly simplified while the stability is improved. Fiber is used to transmit the signal to avoid the electromagnetic interference during the transmission process. System function is used to figure out the total change waveform of the lightning, so a single set of instrument could replace the traditional ‘fast’ and ‘slow’ antennas. Moreover, it avoids some flaws of the ‘slow’ antenna. Calibration experiment shows that the bandwidth of the new system is 80 Hz~87. 5 MHz. The new instrument has been used to measure the electric field change of the natural lightning. The feasibility of the concept and the advantages of the technique are proved by the comparison between the calculated waveform and the measured waveforms.

Keywords LEMP, Electric-field change meter, Optical isolation, System function, Inverse transform

基金项目 国家自然科学基金项目(60971063)资助.

作者简介 周璧华,女,1940年9月生,1965年毕业于北京邮电学院,教授、博士生导师,主要研究方向为高功率电磁环境及其防护.
E-mail:s-zbh@163.net

*** 通讯作者** 郭建明,男,1982年8月生,解放军理工大学电磁环境效应及光电工程国家级重点实验室硕士研究生,主要研究方向雷电预警与防护. E-mail:gjm162@163.com

1 引 言

雷电是自然界的一种强烈的放电现象,随着微电子设备的广泛应用和微电子器件集成度的不断提高,雷电放电电流电磁辐射形成的雷电电磁脉冲对电子、电气设备及系统造成的毁伤越来越严重,故对包括雷电电磁脉冲(Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP)在内的电场测量问题受到了研究者的关注^[1-2]. 对于雷电条件下电场的测量,可追溯到 1916 年 Wilson 设计的电场变化仪“原型”^[1]. 直到 1960 年,Kitagawa 和 Brook 首次提出采用两种不同时间常数的电场变化仪来记录闪电电场的变化,这就是“快”、“慢”电场变化仪的来历^[2]. 1974 年 Arthur A. Few 在美国申请了电场变化仪专利^[3]. 之后的几十年中,电场变化仪被广泛应用于自然闪电电场以及人工引雷电场的测量^[4-10],虽经多次改进,但其基本原理和结构(见图 1、图 2)一直沿用至今^[11-12]. 张广庶、王怀斌等分别于 2002 年 2004 年申请的“慢电场变化测量仪”和“快电场变化探测仪”的发明专利和实用新型专利^[13-14],虽然对快慢天线的调理电路进行了改进,提高了信噪比,展宽了频带,但分别对闪电电场的慢变化和快变化进行测量并未改变. 时至今日,随着高速、大容量芯片的不断涌现及其功能的不断提升,通过一台仪器测量,全面获得闪电电场慢变化和快变化的信息已有可能. 另外,出于对观测人员和设备安全等问题的考虑,电场变化测量仪的传感部分和记录部分一般相距较远,其间的信号传输必须通过电缆,由此带来的问题是,电缆自身及其接插件对 LEMP 的耦合,往往会对被测电场信号形成较强干扰. 为此,本研究完成了以下工作:其一,采用一副圆形平板天线,按电场快变化测量仪设计,包括电场慢变化在内的被测真实电场信号则采用其实测波形通过系统函数反演实时获得;其二,减小了平板天线的尺寸,去掉了支撑天线的绝缘立柱,整个电场变化测量仪集成为一扁圆状小盒,从而使整个电场变化测量仪体积大大缩小,并稳定了影响系统灵敏度和系统函数的天线电容值;其三,信号传输改用光隔离系统,将电场变化测量仪输出端的电信号通过光发射机变为光信号,经光纤传输至记录设备端口处再经光接收机转变为电信号. 如此研制成的电场变化测量仪将快、慢两种电场变化的测量融为一体,且缩小了体积,稳定了天线的电容值,便于做防水处理,信号传输采用光隔离技术后又

避免了电缆传输带来的干扰.

2 闪电电场变化测量仪的原理

闪电电场变化测量仪一般采用与电场垂直的金属圆板作为天线,其结构和电原理图分别如图 1、图 2 所示.

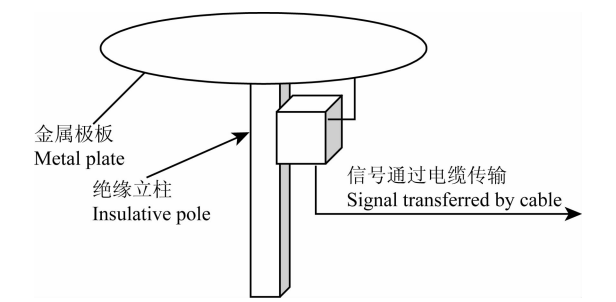


图 1 传统的闪电电场变化仪结构图
Fig. 1 Traditional lightning electric field change meter structure figure

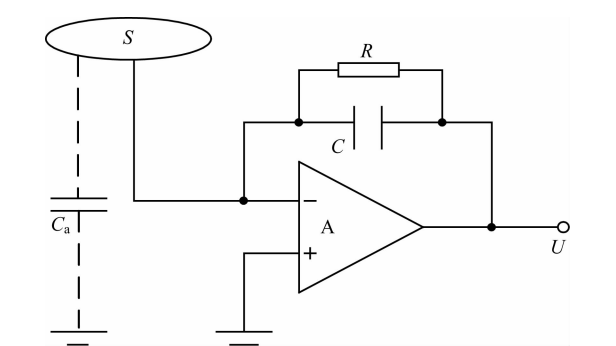


图 2 闪电电场变化测量仪电原理图
Fig. 2 Principle circuit diagram of lightning electric field change meter

将面积为 S 的平板天线(直径一般为 300 mm 上下)接入负反馈放大电路中,反馈部分采用 RC 电路,天线的对地电容设为 C_a . 空气的介电常数为 ϵ_0 , 当环境电场变化 ΔE ,由高斯定律,在圆盘表面感应产生的电荷量即为 $\epsilon_0 \Delta ES$. 将此感应信号经调理电路(电荷放大器)处理即转变为电压信号,对电压信号中的频率分量 ω 而言,当满足 $\omega \gg (R \cdot C)^{-1}$,输出电压变化量 ΔU 与外界电场强度变化量 ΔE 满足式(1)^[12]:

$$\Delta U = \frac{\epsilon_0 S}{c} \Delta E. \tag{1}$$

采用图 1 所示电场变化测量仪即可将 ΔU 传输至信号采集和实时处理终端设备的输入端,完成对 LEMP 电场的采集和实时处理. 快、慢电场变化测量仪的区别仅取决于 RC 参数的选择.

3 闪电电场变化测量仪的研制

光隔离 LEMP 电场变化测量仪测量系统框图及实物如图 3、图 4 所示,其天线为直径 120 mm 的

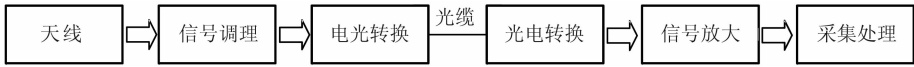


图 3 闪电电场变化测量仪系统框图
Fig. 3 System figure of lightning electric field change meter

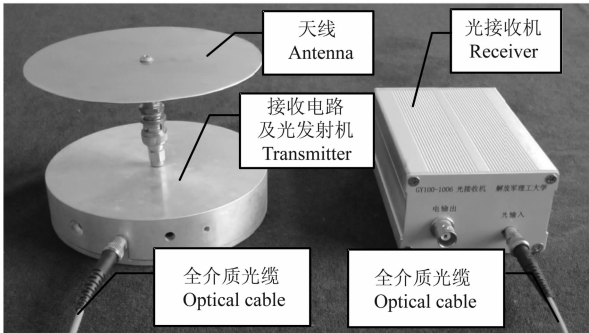


图 4 闪电电场变化测量仪实物照片

Fig. 4 Picture of practical optical isolated meter for measuring lightning electric field change

3.1 天线 C_a 的设计

作为闪电电场接收天线的金属圆板与接地的金属圆盒上表面构成了平行板电容器,其电容值设为 C_a ,由图 2 可见, C_a 与 RC 电路中的 C 之间是串联关系,任意时刻它们上的电荷量相等,当两电容分别充电至 U_a 和 U ,即有: $CU = C_a U_a$,故 $U = C_a U_a / C$; C_a 的量值可按平行板电容器计算,当平行板电容器两极板之间的距离为 d ,则 $C_a = \epsilon_0 S / d$, $U_a = Ed$, $C_a U_a = \epsilon_0 SE$,而 $U = C_a U_a / C = \epsilon_0 SE / C$,从而也可导出与式(1)相一致的结果.可见, C_a 的大小将直接影响测量系统的灵敏度, C_a / C 值越大,系统灵敏度就越高.同时,测量系统的准确度在很大程度上取决于 C_a 值的稳定性,诸如大气湿度、天线与接地平面间的距离等环境因素均会影响 C_a 值的大小.

若将该电场变化测量仪看作一个线性时不变系统,其系统函数可用式(2)表示:

$$H(\omega) = \frac{U(\omega)}{E(\omega)} = \frac{j\omega C_a R}{j\omega(C_a + C)R + 1} \approx \frac{j\omega C_a R}{j\omega CR + 1} = \frac{j\omega \epsilon SR}{j\omega \tau + 1}, \quad (2)$$

由式(2)还可看出, C_a 的大小将直接影响本测量系统的系统函数,从而影响测量结果.考虑到传统闪电快、慢电场变化测量仪的平板天线尺寸较大,与地面

金属圆板,用来接收 LEMP 电场信号;调理电路由场效应管放大电路和 RC 积分回路组成,将天线接收的信号转变成电压信号;电光转换由半导体发光二极管完成,经全介质光缆传输至远端,经光电二极管及放大电路转变为电信号后供采集接收.

间的距离受地面平整度及平行情况的影响, C_a 的数值具有一定的不确定性,由此形成的误差不可忽视甚至是严重的.固定 C_a ,即稳定了系统函数,故将本电场变化测量仪调理电路的金属屏蔽外壳设计为扁圆柱形,利用其上表面作为电容 C_a 的一个电极, C_a 的另一电极则为圆板天线,两电极面积相等,如图 4 所示.采用专门设计的刚性连接头的芯线与圆板天线相连接,稳定可靠的结构加上周到的防水、防潮处理,可确保 C_a 值稳定,从而提高了系统的稳定性.

3.2 调理电路及信号传输设计

(1)调理电路部分.传统电场变化测量仪分别设计为快、慢两种,电场快变化测量仪主要考虑采集速度对外电场快变化部分的响应,而电场慢变化测量仪则主要考虑对低频电场大幅度变化的适应,需要将增益设计成宽量程的.这涉及到 RC 电路参数的设计,主要是 C 值的确定.按电场快变化测量仪的设计思路确定 C 值,测量结果采用系统函数反演,便可得出包括电场慢变化特性在内的被测电场全部时域特性.

放大电路选用场效应管放大器,其噪声低,同时供电电压较低,采用体积小的锂电池供电,既可摆脱对交流供电的依赖,降低设备的复杂程度,且可避免工频干扰.

(2)电光-光电转换部分.由一组电光-光电转换器件完成,选用低噪声、线性度好且频带宽的半导体发光器件,即可将放大电路输出的电压变化转化为光强度的变化,实现电光转换.与此相配套的光电转换器件置于光纤的对应端,其输出经适当放大即可满足信号采集的需求.

3.3 系统防水处理

本系统要在雷雨环境中使用,故对设备必须进行防水处理.将闪电电场变化测量仪放入全封闭的塑料罩中,只在罩的侧面留有光缆的过孔,在雷雨环境中实际使用的效果表明防雨效果良好,经实际测

量对比验证,防水罩的使用并没有对测量波形造成影响。

3.4 真实电场信号的求解

由所测电场快变化信号反演求解电场真实信号(含慢变化)的系统设计:记所测快变化信号为 $u_f(t)$, 其频谱函数为 $U_f(\omega)$, 系统函数为 $H_f^{-1}(\omega)$, 则由电场快变化测试结果求解被测真实电场时域特性的运算程序如图 5 所示^[15]。

$$u_f(t) \xrightarrow{\text{FFT}} U_f(\omega) \xrightarrow{H_f^{-1}(\omega)} E(\omega) \xrightarrow{\text{IFFT}} E(t)$$

图 5 由快天线测试数据反演外场被测信号运算流程
Fig. 5 Flow process diagram for inversing fast antenna data to the measured electric field signal

由测得的电压信号 $u_f(t)$ 经傅里叶变换得出 $U_f(\omega)$, 由式(2), 可得对输出电场频域特性进行逆变换的算式为^[16]

$$H_f^{-1}(\omega) = \frac{j\omega\tau_f + 1}{j\omega\epsilon SR} = \frac{\tau_f}{\epsilon SR} + \frac{1}{j\omega\epsilon SR} \quad (3)$$

于是, 由电场快变化测试结果求解真实电场时域特性的表达式如下^[16]:

$$E(t) = F^{-1}[U_f(\omega)H_f^{-1}(\omega)] = \frac{1}{\epsilon SR}[\tau_f u_f(t) + \int_0^t u_f(\xi)d\xi - \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} u_f(\xi)d\xi] \quad (4)$$

采用系统函数逆变换求解包括慢变化在内的真实电场时域特性, 免除了多用一台电场慢变化测量仪进行测量带来的麻烦, 这对闪电电场的测量无疑具有十分重要的意义。因为闪电电场慢变化测量仪所测信号的频率下限为几赫兹, 这就意味着电场慢变化测量仪的时间常数必须设计为秒级, 系统的时间常数是由 RC 确定的, 而 R 电阻值的提高受到环境湿度的限制, 一般只能通过提高 C 的电容值来增加系统的时间常数。根据式(1), C 值增加势必降低系统的灵敏度, 即系统灵敏度与带宽是一对矛盾, 故在系统设计时无法同时满足高灵敏度与宽带宽的要

求。采用所测电场快变化信号反演求解电场真实信号(含慢变化)的系统设计克服了这一技术难点。

4 闪电电场变化测量仪的幅频响应

闪电电场变化测量仪的幅频响应包括高频响应和低频响应, 其低频响应根据测量仪的放电时间常数即可确定, 而高频响应必须直接测量。本文采用方波发生器、TEM 传输室和数字示波器组成的时域标定系统, 对闪电电场快变化测量仪的脉冲响应进行了测试, 结果表明, 闪电电场快变化测量仪的上截止频率为 87.5 MHz。同时, 根据快变化测量仪的 RC 放电时间常数计算得出的下截止频率为 80 Hz, 故可确定闪电电场快变化测量仪的响应频带为 80 Hz~87.5 MHz。

4.1 系统高频响应测试

测量系统高频响应的时域标定系统如图 6a 所示, TEM 传输室的外形见图 6b, 电场仪高度为 0.125 m, 置于高 0.5 m 的工作空间; TEM 传输室的输入端接 ENS-24XA 型方波脉冲发生器; 输出端通过匹配负载和衰减器与 Agilent9000 数字示波器输入端相接, 用以监测 TEM 传输室内的电场波形。衰减器的输出与电场仪的测量信号由示波器同步记录。示波器模拟带宽为 4 GHz, 由示波器测得的 TEM 传输室工作空间的方波波形如图 7a 所示, 其上升时间 $t_r < 1$ ns, 脉宽 $t_w = 1$ μ s; 示波器测得的闪电电场快变化测量仪输出波形见图 7b。将图 7b 中方波的上升沿展开, 得到的波形见图 8a, 图 8a 中所显示的上升时间 $t_r \approx 4$ ns, 由该图估计闪电电场快变化测量仪高频截止频率: $f_h = 0.35/t_r = 0.35/4$ ns = 87.5 MHz。为进一步得到系统的频率响应, 分别对图 7a、图 7b 所示激励信号和响应信号做傅里叶变换然后相除, 得到系统的幅频响应:

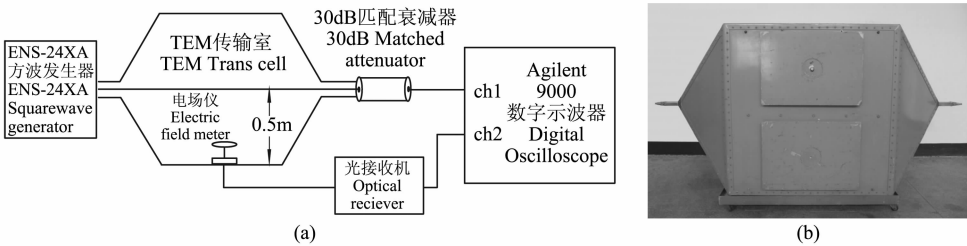


图 6 系统高频响应测试图
(a)测量系统示意图;(b)TEM 传输室照片。
Fig. 6 Test of high frequency response
(a) Test system figure; (b) TEM cell photo.

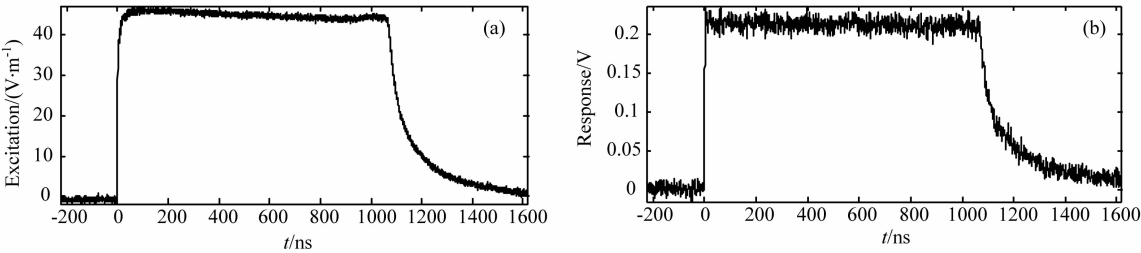


图 7 测量系统高频响应时域测量结果
(a)方波发生器输出波形;(b)闪电电场快变化测量仪输出波形。
Fig. 7 Time measured waveform of system high frequency response
(a) Waveform of square wave; (b) Waveform of output of Lightning Electric Field Change Meter.

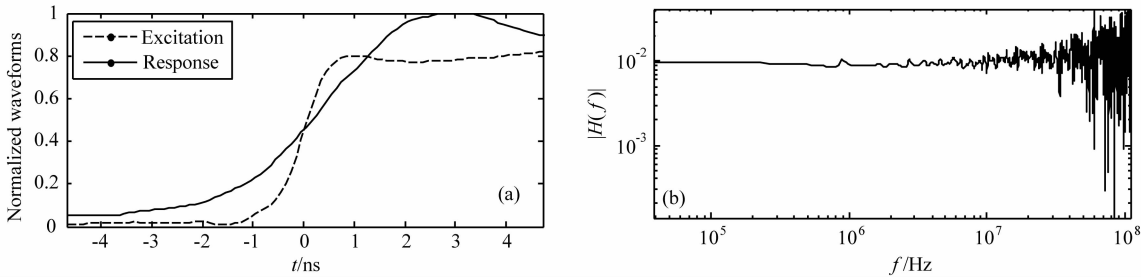


图 8 系统高频响应图
(a)图 7b 的上升沿部分;(b)闪电电场快变化测量仪的系统响应。
Fig. 8 High frequency response of the system
(a) Rising edge of Fig. 7b; (b) System response of Lightning Electric Field Change Meter.

$$|H(f)| = \left| \frac{Y_{7b}(f)}{X_{7a}(f)} \right|,$$

其中, $X_{7a}(f)$ 、 $Y_{7b}(f)$ 分别为激励和响应信号的频谱. $H(f)$ 的特性如图 8b 所示, 由图可见, 闪电电场快变化测量仪在 10 MHz 内具有平滑的频率响应.

4.2 系统的低频响应计算

闪电电场变化测量仪的低频截止频率由阶跃信号的放电时间常数 τ 确定. 在放电时间常数 τ 确定的情况下, 对应 -3 dB 低频截止频率 $f=1/(2\pi\tau)$. 闪电电场快变化测量仪、慢变化测量仪的 RC 放电时间常数分别为 2 ms 和 5 s. 根据计算得出的下截止频率分别为 80 Hz 和 0.032 Hz. 故可确定, 闪电电场快变化测量仪的 -3 dB 带宽为 80 Hz ~87.5 MHz.

5 闪电电场变化测量仪的实际应用

2010 年 9 月 3 日和 2010 年 8 月 24 日在南京发生 3 次雷暴过程, 采用上述研制成功的闪电电场变化测量仪及电场慢变化测量仪同时进行了测量(时间常数分别为 2 ms 和 5 s), 测得大量波形, 从中取出两组列于图 9. 并采用电场快变化波形数据经系

统函数逆变换求解得出被测电场时域特性, 进而得出电场慢变化波形, 将其一并列出以便与实测慢变化电场波形进行比较.

图 9a 为实测电场快变化波形, 图 9b 为实测电场慢变化波形, 图 9c 为根据电场快变化波形反演得出的电场慢变化波形. 由图可见, 图 9c 与图 9b 中的波形一致性很好.

通过仔细对比发现, 实测的电场慢变化波形与反演后得到的波形区别仅在于: 在波形的尾部或是两次回击时间间隔较长(200 ms 以上)情况下, 实测波形较之反演后所得波形有下降趋势, 原因在于: 电场慢变化测量仪所设计的时间常数虽然很长, 但在实际测量中电容器所充电荷仍会放电, 无法在无外信号输入的情况下长时间保持电容上的电荷不发生变化, 而通过反演进而得出的电场慢波形就不存在这个问题了, 故能真实反映实际电场的慢变化, 即电荷的变化情况. 可见, 采用一套电场变化测量仪对闪电电场进行测量, 然后通过系统函数逆变换反演还原电场并得出慢变化信号, 不仅可完成快、慢两套电场变化测量仪的全部功能, 而且能够更加真实地反映电场的慢变化情况, 性能更优.

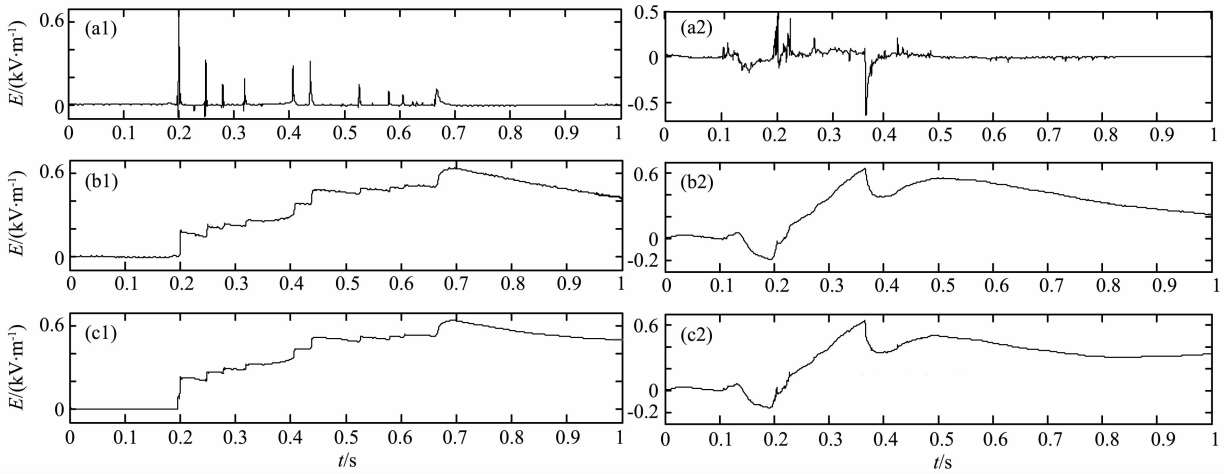


图 9 两次闪电实测及反演后得出的地面垂直电场慢变化波形对比

(a1,b1,c1)2010-09-03 13:23:00 地闪实测及反演后所得电场慢变化波形;(a2,b2,c2)2010-08-24 20:10:10 云闪实测及反演后所得电场慢变化波形。(a1,a2) 实测电场快变化波形;(b1,b2) 实测电场慢变化波形;(c1,c2) 反演电场慢变化波形。

Fig. 9 Comparison of the measured and the calculated waveforms of two LEMP vertical electric fields on the earth (a1,b1,c1)2010-09-03 13:23:00 measured and calculated waveform of LEMP vertical electric field of CG lightning on the earth;(a2,b2,c2)2010-08-24 20:10:10 measured and calculated waveform of LEMP vertical electric field of CC lightning on the earth. (a1,a2) Measured electric field fast change waveform;(b1,b2) Measured electric field slow change waveform;(c1,c2) Calculated electric field slow change waveform.

6 结 论

本文分析了现有闪电电场变化仪的不足之处,提出了采用一台闪电电场变化测量仪同时获得闪电电场快、慢变化特性的方案,并研制成功一种新型闪电电场变化测量仪。该测量仪通过对天线、电路、传输方式的优化,大大降低了系统的复杂程度,提高了可靠性,可以在恶劣的天气环境中工作,是一种理想的闪电电场测量系统。由于采用全介质光缆传输信号,从而避免了在信号传输过程中由于电磁耦合带来的干扰;采用系统函数逆变换反演,进而得出电场慢变化特性,不仅省去了一套专测电场慢变化的仪器,而且弥补了以往“慢电场变化测量仪”性能的不足。通过对自然雷的多次测量,获得地闪和云闪的一系列地面垂直电场快、慢变化波形,将实测快变化波形经运算得出电场慢变化波形,与实测慢变化波形进行比较,二者的一致性非常好,证实了所提出的采用一套闪电电场变化测量仪获得闪电电场快慢变化时域特性的可行性和技术上的先进性,为闪电电场测量和研究提供了崭新的技术手段。

参考文献 (References)

[1] Wilson C T R. On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1916, 92(644): 555-574.

[2] Kitagawa N, Brook M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. *J. Geophys. Res.*, 1960, 65 (4): 1189-1201.

[3] Electrical Field Change Meter. Arthur A Few. Int. Cl. ² G01R 31/02. United States. 3, 919, 636. Apr. 29. 1974.

[4] Villanueva Y, Rakov V A, Uman M A, et al. Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(D7): 14353-14360.

[5] Heidler F, Hopf C. Measurement results of the electric fields in cloud-to-ground lightning in nearby Munich, Germany. *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, 1998, 40 (4): 436-443.

[6] 张义军, 董万胜, 张广庶等. 空中人工引发雷电先导过程的特征分析. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 446-449. Zhang Y J, Dong W S, Zhang G S, et al. Characteristics of the leading processes to the artificial induced lightning in the air. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(4): 446-449.

[7] Jerauld J, Rakov V A, Uman M A, et al. Multiple-station measurements of electric and magnetic fields due to natural lightning. *Proc. Int. Conf. on Lightning and Static Elec. (ICOLSE)*, Blackpool, United Kingdom, 2003.

[8] Jerauld J E. Properties of natural cloud-to-ground lightning inferred from multiple-station measurements of close electric and magnetic fields and field derivatives [Ph. D. thesis]. Florida: University of Florida, 2007.

[9] Shao X, Stanley M, Regan A, et al. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(10): 1273-1288.

[10] Parker N G, Krider E P. A portable, PC-based system for

making optical and electromagnetic measurements of lightning. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(6): 739-751.

[11] Golde R H. Lightning: vol 1, Physics of Lightning, vol 2, Lightning Protection. New York: Academic Press, 1977: 351-375.

[12] Macgorman D R, Rust W D. The Electrical Nature of Storms. New York: Oxford University Press, 1998: 105-145.

[13] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. 闪电慢电场变化测量仪. 发明人: 王怀斌, 刘欣生, 鄒秀书等. Int. C1⁷: G01R 29/00 G01R 29/12 中国专利. CN 2488071Y. 2002-4-24. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of Chinese Academy of Sciences. Slow Electric Field Change Meter (in Chinese). Inventers: Wang H B, Liu X S, Qie X S, et al. Int. C1⁷: G01R 29/00 G01R 29/12. Chinese Patent. CN 2488071Y. Apr. 24. 2002.

[14] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. 快电场变化探测仪. 发明人: 张广庶, 王怀斌, 鄒秀书等. Int. C1⁷: G01R 29/00 G01W 1/00. 中国专利 CN 1488949A. 2004-04-14. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of Chinese Academy of Sciences. Fast Electric Field Change Meter (in Chinese). Inventers: Zhang G S, Wang H B, Qie X S, et al. Int. C1⁷: G01R 29/00 G01W 1/00. Chinese patent. CN 1488949A. April. 14. 2004.

[15] Ljung L. System Identification Theory for the User, Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 79-127.

[16] 邱实, 周璧华, 郭建明等. 闪电电场测量研究. 电波科学学报, 2011, 26(1): 79-83. Qiu S, Zhou B H, Guo J M, et al. Measurement of lightning electric field changes. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2011, 26(1): 79-83.

(本文编辑 何 燕)