

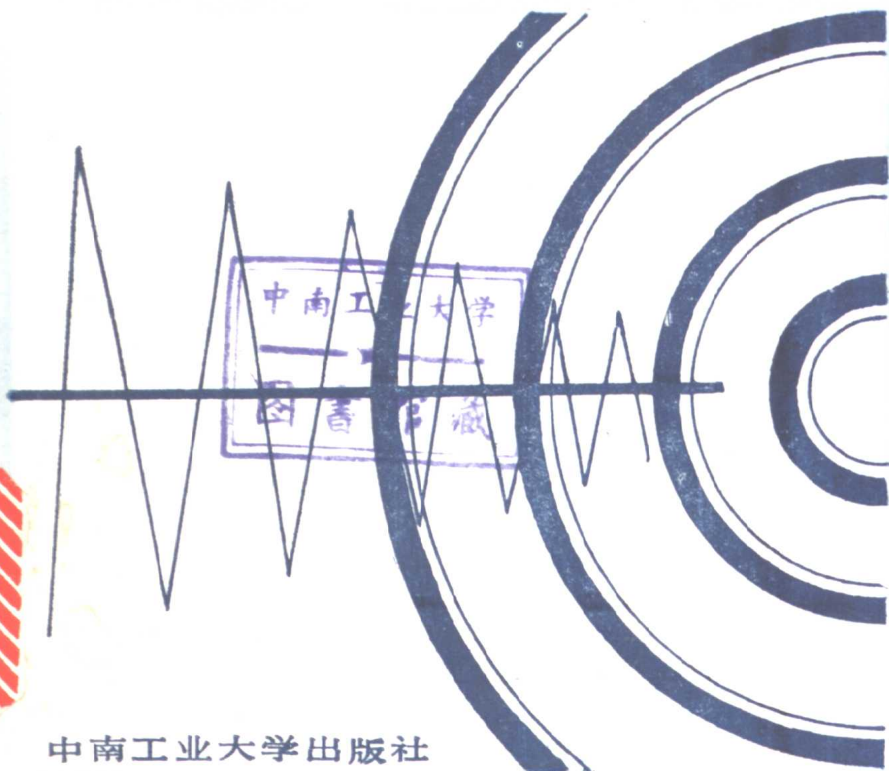
622755

脉冲

瞬变电磁法

及应用

编著 牛之琏等



中南工业大学出版社

脉冲瞬变电磁法 及应用

牛之璉 等 编著

中南工业大学出版社
1986·长沙

内 容 简 介

本书论述了脉冲瞬变电磁法的理论基础、物理模拟实验方法与技术、地面仪器系统、脉冲瞬变电磁场的特征与异常规律、野外工作方法与技术、资料解释方法、时域电磁测深、井中瞬变电磁方法、以及在我国几个矿区的应用实例分析。既反应了编者近些年的研究成果，亦精选了国内外文献内容作了充实，以便读者对该方法有一个系统、全面的了解。

本书可作为应用地球物理专业高年级学生及研究生的教学参考书，也可供从事电磁勘探科技人员和实际工作者参考。

脉冲瞬变电磁法及其应用

~~牛之建~~ 编 著
责任编辑：吴秀清

中南工业大学出版社出版发行
长沙湘相印刷厂印刷
湖南省新华书店经销

*

开本：850×1168 1/32 印张：5.5925 字数：3.5千，

1977年2月第一版

1977年7月第一次印刷

印数：0001—2000册

*

ISBN 7-81020-014-3/P·001

统一书号：13442·015

定价：1.70元

前 言

近十年来,电磁勘探方法的一个重要发展趋向,是脉冲瞬变技术(包括航空系统)的扩大应用,已用于构造填图、石油、地热、金属矿勘探以及地下水和冻土带的探测。一般认为该方法具有:探测深度大、信息丰富及工效高等优点。因此,自五十年代以来,该方法得到迅速发展,特别是对探测低阻覆盖层下的良导电地质体取得了引人注目的良好效果。在我国虽然对该方法的研究及仪器研制工作在七十年代初期已开始,但是由于未能提供性能较好的仪器供野外生产使用,它的推广应用处于停滞状况。不过可以预言,在我国也将很快地发展起来。

为了促进脉冲瞬变电磁法在我国尽快赶上世界先进水平,以及解决我国某些疑难地区的找矿手段问题,冶金部第一地质勘探公司物探大队与中南工业大学电法室共同协作,于1982年底开始着手对地面脉冲瞬变电磁法进行了研究。三年来完成了国内外文献调研,汇编了异常实例及译文专辑,使用从澳大利亚引进的SIROTEM- II 仪器进行了模拟实验研究工作,并汇编出版了“物理模拟曲线图册”。近四年来,冶勘一公司物探大队在安徽××铜矿、辽宁××铅锌矿、甘肃××铜矿及河北××磁铁矿等处进行了野外实验及生产工作,取得了引人注目的地质效果。围绕生产实践中所提出的问题,也着手了对脉冲瞬变电磁法工作方法技术、解释方法、导电围岩条件下异常的规律、时域电磁测深方法以及磁性对瞬变电磁响应的影响等课题的研究,某些成果已反映在1985年底所提交的研究成果报告中。

本书是在该研究成果报告基础上作了充实,重点写地面脉冲瞬变电磁方法技术及应用效果,有关理论基础方面的内容仅

就重点内容所涉及的问题，摘引前人或我们自己的研究成果。

本书由牛之琏副教授主编，参加编写者有刘本浩、吴其昌、张宪润、李凤初、田景尧等同志。承蒙程方道、何继善教授，许洪海、朴化荣副教授及蒋邦远、王庆乙高级工程师，阎恕、王延忠、李永年和冯悦文等工程师评阅，在此深表感谢。

由于瞬变电磁法中许多重要课题仍处于研究探索阶段，书中内容的缺点和错误在所难免，诚请读者批评指正。

编 者

一九八六年五月

目 录

概论	(1)
第一章 脉冲瞬变电磁法的数理基础	(5)
1.1 激发场源	(5)
1.2 均匀半空间的瞬变电磁响应	(10)
1.3 层状大地的瞬变电磁响应	(13)
1.4 导电等轴状地质体上的瞬变电磁响应	(15)
1.5 板状导体瞬变电磁响应的近似计算	(19)
1.6 磁性对瞬变电磁响应的影响	(26)
第二章 脉冲瞬变电磁法的模拟实验方法与 技术	(38)
2.1 物理模拟条件	(38)
2.2 空气介质中物理模拟的方法技术	(39)
2.3 模拟实验仪器	(43)
2.4 导电围岩条件下物理模拟的几个问题	(43)
第三章 地面脉冲瞬变电磁 仪器	(46)
3.1 非稳信号的测量特点	(46)
3.2 国内外仪器概况	(49)
3.3 SIROTEM—Ⅰ 仪介绍	(51)
第四章 脉冲瞬变电磁 场的 特征	(56)
4.1 脉冲瞬变电磁场的时间特性	(56)
4.2 脉冲瞬变电磁法常用装置的异常剖面曲线特征	(62)
第五章 复杂条件下脉冲瞬变电磁 异常 规律	(77)
5.1 导电覆盖层对脉冲瞬变电磁异常的影响	(77)
5.2 导电围岩对脉冲瞬变电磁异常的影响	(84)
5.3 基岩导电情况下地形的瞬变电磁响应	(90)

第六章	地面脉冲瞬变电磁法的工作方法与若干技术问题	(91)
6.1	几种常用装置的对比与选择	(91)
6.2	取样道数和叠加次数的选择	(96)
6.3	影响瞬变电磁法探测深度的几种因素	(97)
6.4	测网选择及回线的敷设	(100)
6.5	工作质量的评价	(101)
6.6	资料整理与图示	(102)
第七章	资料解释	(104)
7.1	背景场和干扰噪声的确定	(104)
7.2	资料的定性分析	(105)
7.3	资料的半定量解释	(108)
7.4	导电围岩条件下的资料解释	(114)
第八章	时域电磁测深	(116)
8.1	概述	(116)
8.2	远区和近区时域电磁测深方法的比较	(118)
8.3	视电阻率的确定及均匀半空间的视电阻率曲线特征	(121)
8.4	两层断面的视电阻率曲线特征	(126)
8.5	三层断面的视电阻率曲线特征	(129)
8.6	时域电磁测深方法的探测能力	(132)
8.7	时域电磁测深资料解释方法概述	(135)
第九章	井中脉冲瞬变电磁方法	(138)
9.1	概述	(138)
9.2	激发场源的特点	(140)
9.3	井中TEM异常的一般特征	(141)
9.4	井中TEM方位测量的异常曲线特征	(146)
9.5	井中TEM法的探测范围	(150)
第十章	实例分析	(152)
10.1	安徽××铜硫铁矿床	(152)

10.2	辽宁××铅锌矿区·····	(155)
10.3	甘肃××铜及多金属矿区外围·····	(156)
10.4	河北××铁矿·····	(159)
10.5	云驾岭南测区时域电磁测深应用成果·····	(162)
10.6	井中脉冲瞬变电磁法应用实例·····	(167)
	参考文献·····	(168)

概 论

脉冲瞬变电磁法属于时间域电磁感应法，它是利用不接地回线向地下发送一次脉冲磁场，在一次磁场间歇期间利用同一回线或另一回线接收感应二次磁场，该二次磁场是由地下良导地质体受激励引起的涡流所产生的非稳磁场。利用瞬变电磁信息寻找导电矿体的概念在西方国家首先是 J. R. Wait 1951 年提出来的，1958 年由加拿大 Barringer 公司研究的航空 INPUT 系统投入使用，二十多年来在技术上经多次改进，目前正在加拿大、澳大利亚、非洲、印度等地区采用 INPUT 系统进行矿产普查。但是在西方国家，地面脉冲瞬变电磁系统直至七十年代方出现商品仪器，至今地面系统的种类已近十种，不少仪器已装上了微处理机，并提供了在世界不少地区取得突出地质效果的实例；例如在澳大利亚 Elura 块状硫化矿上的结果，该矿埋深 100 米，上覆电阻率为 10 欧姆米的低阻覆盖层。近年来，脉冲瞬变电磁法已逐步扩大应用到井中及测深工作中，测深方面，A. A. Kaufman 和 G. V. Keller 已有专著发表(1983)^[18]，探测深度可达数公里，有可能被用于油气田的普查。在苏联，早在四十年代由 A. H. Тихонов 等人开始对瞬变过程（或称过渡过程）现象进行了理论研究，并形成了建立电磁场测深法。目前过渡过程法在苏联已广泛应用于普查良导电金属矿床，几乎各个物探队均配备有这类仪器，在理论、模拟和野外试验等方面作了大量工作，由 Ф. М. Каменецкий 主编的《金属物探过渡过程法应用指南》^[5] 反映了当前苏联的水平。仪器方面，在苏联广泛应用的是 1972 年以来研制的 МПП-3、МППУ-2 及 МПП-4 型仪器，进行深部构造探测用《ЦИКЛ-2》电测站。近几年在苏联文献中所提供的应用实

例，值得注意的是在深部找矿方面的成效，例如1970年在库尔斯克磁异常区使用 200×200 平方米的重叠回线查明了位于沉积层下部深度达500~700米的铝土矿层，发现了新的含矿地段。在我国，于七十年代初期开始研究瞬变电磁方法，长春地质学院研制的航空M-1系统已通过鉴定，并已投入使用，目前正着手研制数字化的M-2系统；理论研究方面，对于M-1系统用于地质填图及解释方法等相继有不少论文发表。研究地面系统的单位有地质矿产部物化探研究所、中国有色金属工业总公司矿产地质研究院及中南工业大学等单位，前两个单位分别研制成功了DCM-I系统及DMD-II系统。目前在国内迫切需要研制出接近世界先进水平的仪器提供野外生产。

常用的地面脉冲瞬变电磁方法工作装置如图1-1所示。重叠回线是发送线框(T_x)与接收线框(R_x)在空间相重合的装置，也可以是 T_x 与 R_x 共用同一线框(称之为共圈回线)；进行测深工作时也可用单独的小型 R_x 置于 T_x 中心点进行观测的装置(称为框内回线)；上述的这几种装置是频率域方法无法实现的装置，它们的地质效果类同，常用于普查。分离回线装置类似于频域方法中的水平线圈装置，工作时 T_x 及 R_x 沿测线同时移动，通常称为偶极装置。框-回线装置的 T_x 采用大定源回线， R_x 用小型线圈在框内、外沿测线测量磁场三分量的 $\partial B/\partial t$ 值，通常也称之为“土拉姆”装置。

一次场波形、取样道时间范围、测道数、观测参数及其计量单位等各厂家的仪器之间并不相同，例如，加拿大Crone公司的PEM系统选用梯形波，在0.15至12.8毫秒延迟时间范围内采样测量，每个观测值都用一次场未断开之前所接收到的最大信号值加以归一，并令该最大值为1000；又例如澳大利亚SIROTEM系统选用方波，在0.4至165毫秒延迟时间范围内采样观测，采用的道数可在10~32道内选取，用线圈观测的值是

用发送机供电电流加以归一的 $V(t)/I$ 值，以微伏每安作计量单位。

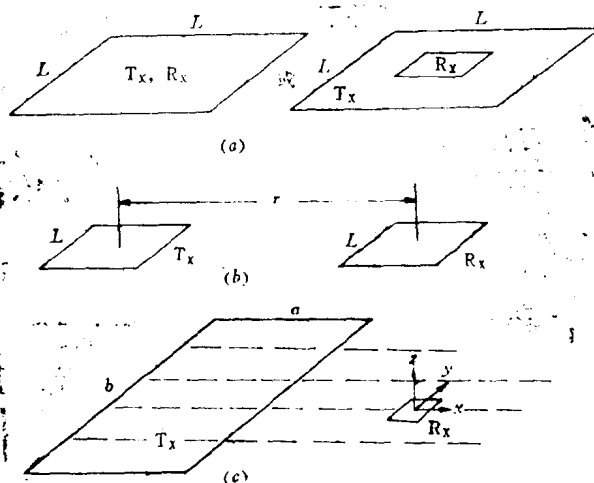


图 1-1 常用的地面脉冲瞬变电磁法工作装置

- (a) 重叠回线(共圈回线)或框内回线
- (b) 分离回线
- (c) 框-回线

就理论基础而言，频率域电磁法和时间域电磁法是相同的，两者都是研究电磁感应二次场。但是，由于时域方法在一次场不存在的情况下观测二次场，主要的噪声源不同于频域方法；就此而言，两者不等价，时域方法显示出更多的优点，比较突出的优点有以下几个方面：

1) 由于观测纯二次场，自动消除了频域方法中的主要噪声源——装置耦合噪声，噪声主要来自外界（天电及人文电磁场干扰）。因此，可采用加大功率-灵敏度的方法提高信、噪比，以提高方法的探测深度；

2) 时域方法对于导电围岩和导电覆盖层的分辨能力优于

频域方法，并且测量方法技术既快又简单，更适合勘探工作的需要；

3) 在高阻围岩条件下，没有地形引起的假异常；

4) 对线圈形状、方位和点位等要求可以放宽，测地工作简单，工效高；

5) 可使用 T_x 与 R_x 重叠（或共圈）装置工作，使与欲探测的地质体达到最佳的耦合，所得到的异常幅度大、形态简单及受旁侧影响小，提高了对地质体的横向分辨能力。

此外，近代科学技术的进展，促进了近年来时域方法的快速发展。数字技术的引用，对抑制噪声、减小观测误差和对资料的自动反演解释等均有了可能。当前，对时域方法的研究工作向解决深部地质问题的方向发展，尤其是时域电磁测深方法引人关注，这方面的研究工作在我国可以说刚刚起步，许多问题有待探索及研究。

第一章 脉冲瞬变电磁法的数理基础

1.1 激发场源

1.1.1 傅里叶级数表达式

脉冲瞬变电磁法中，激发场源的波形可采用多种形式：矩形、梯形和半正弦波等。根据傅里叶频谱分析理论，任何脉冲波均可分解成许多正弦或余弦谐波成分，而每个谐波成分对导体按频率域电磁方法中的规律激发产生电磁感应异常，即各个谐波成分激励起具有相对应振幅和相位的二次磁场。故相位上延迟的各谐波二次场叠加起来便形成人们所感兴趣的二次瞬变场，就此而言，瞬变场测量相当于频率域中多频观测的效果。利用傅里叶级数和傅里叶变换可以把脉冲波用许多谐波的离散和表示出来；几种常用脉冲波的傅里叶级数近似表达式为：

(1) 双极性矩形脉冲：

它是SIROTEM等地面系统使用的一次磁场波形(见图1-2)

用傅里叶级数表示为：

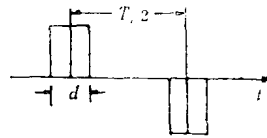


图 1-2 双极性矩形脉冲

$$H_1(t) = 4H_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\pi\delta/2)}{n\pi} \cos n\omega_0 t \quad (1-1)$$

式中 H_0 ——脉冲磁场幅值；

$\delta = 2d/T$ ， T ——脉冲系列重复周期， d ——单个脉冲持续时间；

$\omega_0 = 2\pi/T$ 。

(2) 半正弦脉冲：目前大多数航空脉冲瞬变电磁系统使用双极性半正弦脉冲系列（见图 1-3），它可表示为：

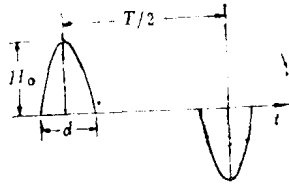


图 1-3 双极性半正弦脉冲

$$H_1(t) = H_0 \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} F_n \cos n\omega_0 t \quad (1-2)$$

式中 $F_n = \frac{8\delta \cos \pi \delta}{\pi(1-4n^2\delta^2)}$, $\delta = d/T$ 。

(3) 双极性梯形脉冲系列：它是加拿大Cronc公司PEM系统使用的波形（见图 1-4），它的傅里叶表达式为：

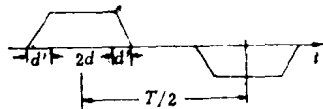


图 1-4 双极性梯形脉冲

$$H_1(t) = \frac{2d-d'}{T} H_0 \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega_0 d'/2) \sin n\omega_0 (d-d'/2) \cos n\omega_0 t}{(n\omega_0 d'/2) n\omega_0 (d-d'/2)} \quad (1-3)$$

1.1.2 几种脉冲波的频谱比较

我们已熟悉频率域方法中导体电磁响应的频率特性，它是时域方法中选择激励场源波形及参数的依据。例如，据理论计算的结果，在导电围岩的条件下，工作频率只有低于30赫兹时矿体的响应才能充分地分辨清楚。因此，地面脉冲瞬变电磁系统的一次场频谱能量应集中于5~50赫兹范围内。

为了简化问题，令脉冲系列的 $T \rightarrow \infty$ ，并且忽略单个脉冲波前、后沿的相互影响。这样，上述三种波形便简化为单个阶

跃波、半正弦波及斜阶跃波。由于简化为非周期波形，讨论频谱分布时需改用傅里叶积分，把非周期波形分解成许多简谐波的连续迭加，这三种波形的复频谱 $H_1(\omega)$ 分别为：

$$\text{阶跃波： } H_1(\omega) = -jH_0/\omega = H_c/j\omega$$

$$\text{半正弦波： } H_1(\omega) = 2H_0 \frac{\pi}{d} \frac{\cos \omega d/2}{(\pi/d)^2 - \omega^2}$$

$$\text{斜阶跃波： } H_1(\omega) = \frac{H_0}{d'\omega^2} (\cos \omega d' - 1 - j\sin \omega d')$$

图 1-5 列举了阶跃波、 $d=2$ 毫秒的半正弦波和上升时间 $d'=10$ 毫秒的斜阶跃波三种情况的频谱对比，由图可见，半正弦波在 $0\sim 500$ 赫兹内具有分布较均匀的频谱，其他两种波形频谱能量集中于 $n\sim n\times 10$ 赫兹范围之内，地面系统一般选用后两种。应该指出，矿体的二次场响应频谱并不完全决定于一次场的频谱分布状况，还决定于矿体的综合参数，这个问题在下面章节中将会讨论到。

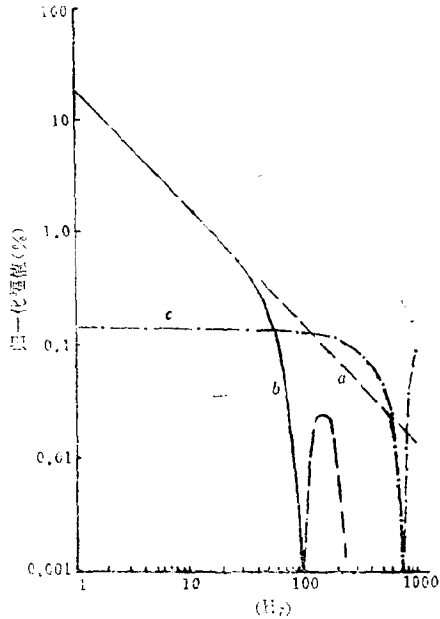


图 1-5 阶跃波 a 、斜阶跃波 b 、半正弦波 c 的频谱分布

1.1.3. SIROTEM系统一次场的频谱

对于周期函数 $H_1(t)$ 的傅里叶级数的复数式为:

$$H_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega_0 t} \quad (1-4)$$

式中 $C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} H_1(t) e^{-in\omega_0 t} dt$, 表示该周期函数的频谱。

SIROTEM系统是用图1-2所表示的脉冲系列, 若先只考虑正脉冲系列, 频谱表达式为:

$$\begin{aligned} C_n^{(+)} &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} H_1(t) e^{-in\omega_0 t} dt = \frac{H_{10}}{T} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{-in\omega_0 t} dt \\ &= \frac{H_{10}d}{T} \cdot \frac{\sin(n\omega_0 d/2)}{n\omega_0 d/2} = \frac{H_{10}d}{T} \cdot \frac{\sin(n\pi d/T)}{n\pi d/T} \end{aligned} \quad (1-5)$$

对于(1-5)式赋予负号便得到负矩形波部份的表达式。根据频谱的时移原理写出延迟半周期的负矩形波的频谱, 其表达式为

$$C_n^{(-)} = -C_n^{(+)} e^{-in\pi} \quad (1-6)$$

利用频谱的线性原理, 得到正、负交替的周期为 T 的矩形波频谱:

$$\begin{aligned} C_n &= C_n^{(+)} + C_n^{(-)} = C_n^{(+)}(1 - \cos n\pi) \\ &= \begin{cases} 2C_n^{(+)} & , \text{当}n\text{为奇数时} \\ 0 & , \text{当}n\text{为偶数时} \end{cases} \end{aligned}$$

故当 n 为奇数时,

$$C_n = 2C_n^{(+)} = \frac{2H_{10}d}{T} \cdot \frac{\sin(n\pi d/T)}{n\pi d/T} \quad (1-7)$$

可见, C_n 频谱具有 $\sin x/x$ 的图象, 如图 1-6 所示, 无论 d/T 的大小如何, 图象 (包络线) 形状不变, d/T 的大小只影响谱线之间的间隔及 C_n 的幅度, 当 d/T 减小时其间隔变小, C_n 的幅度减小, 另外, n 只能是奇数, C_n 只有奇次谐波。

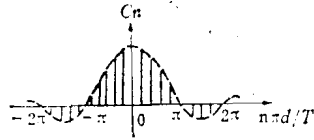


图 1-6 双极性矩形脉冲系列频谱

最后我们可写出一次场最终表达式:

$$H_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{2H_{10} \sin(n\pi d/T)}{n\pi} e^{in\omega_0 t}$$

考虑到频谱的偶函数性质, 以及 SIROTEM 系统的 $d/T = 1/4$, 得:

$$H_1(t) = H_{10} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\pi/4)}{n\pi/4} e^{in\omega_0 t} \quad (1-8)$$

对它取实部, 便得到公式 (1-1) 所表示的式子。

SIROTEM 系统的一次场脉冲持续时间 d 值是随所选择的测道数而改变, 其对应关系如下 (实测结果):

测道数: 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32

d (ms): 10 10 20 20 30 40 50 60 80 100 130 180

但是, 脉冲系列的占空比均为 1, 即 $d/T = 1/4$, 所以改变测道数并不影响频谱特征, 测道的选择主要考虑要求记录的延迟时间范围及对噪声的压制能力。SIRTEM 系统 $d = 10$ 毫秒 ~ 180 毫秒, $T = 40$ 毫秒 ~ 720 毫秒, 基频为 25 赫兹 ~ 1.4 赫兹。实际电子线路中, 产生阶跃函数的电流源实际上不能实现, 精确的频谱应考虑脉冲前、后沿上升及下降的时间。