



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104937427 B

(45)授权公告日 2017.09.15

(21)申请号 201380065604.8

(22)申请日 2013.10.23

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104937427 A

(43)申请公布日 2015.09.23

(30)优先权数据
20121245 2012.10.24 NO

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.06.15

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/N02013/050182 2013.10.23

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/065674 EN 2014.05.01

(73)专利权人 维尔斯坎有限公司
地址 挪威温特布罗

(72)发明人 保罗·弗兰科·梵东尼

(74)专利代理机构 北京安信方达知识产权代理有限公司 11262

代理人 韩辉峰 郑霞

(51)Int.Cl.
G01R 31/08(2006.01)
G01R 31/02(2006.01)
H04B 3/46(2015.01)

(56)对比文件
WO 2007/040406 A1,2007.04.12,
CN 1261672 A,2000.08.02,
CN 101682185 A,2010.03.24,
CN 101871975 A,2010.10.27,
US 3904839 A,1975.09.09,
US 2005/0238037 A1,2005.10.27,
林潮光.OWTSR振荡波测试系统在电缆状态
诊断中的应用.《广东科技》.2008,(第20期),

审查员 倪秀敏

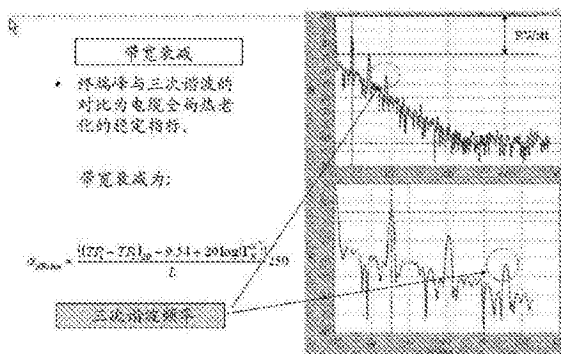
权利要求书5页 说明书16页 附图14页

(54)发明名称

监控电缆状态的方法和系统

(57)摘要

描述了监控电缆状态的方法和系统。该方法包括在电缆第一端处施加具有频率f的宽带信号波,其中该宽带信号波被电缆的至少一个电缆阻抗相位调制和幅度调制,以及采集被电缆传输和反射的相位调制和幅度调制宽带信号波。在所采集的相位和幅度调制的宽带信号波上进行信号分析。信号分析导致,确定在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置附近的区间的功率谱的相阻抗谱傅立叶变换的实部和虚部之间的关系,以及,识别在沿着电缆的这些位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的相对于所述实部和虚部的阻抗变化。分析在所识别的故障位置处的宽带信号的二阶反射可以在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处确定电缆绝缘中的所述所识别故障的局部退化的严重程度。



1. 一种用于监控电缆的状态的方法,所述方法包括:

在所述电缆的第一端施加宽带信号波,其中,所述宽带信号波被所述电缆的至少一个电缆阻抗相位调制和幅度调制;

在所述电缆的第一端采集被所述电缆传送和反射的相位调制和幅度调制的宽带信号波;

针对所采集的反射的宽带信号波,计算由幅度和相位指定的复电缆阻抗 Z_{DUT} ,所述复电缆阻抗 Z_{DUT} 为频率 f 的函数;

将计算出的复电缆阻抗变换到时域 t' 中;

在时域 t' 中计算频率 f' ,其中,频率 f' 是由于离所述电缆的一端的距离为 d 处的宽带信号波的波反射而产生的在时域 t' 中的角频率为 w' 且幅度为 A 的伪周期函数的基频,且其中,通过使用以下公式计算频率 f' :

$$f' = \frac{w'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0},$$

其中, v_0 是真空中光速,而 v_r 是所述电缆中的电信号的估计的相对相速度;

对时域 t' 中的复电缆阻抗的幅度和相位两者执行功率谱分析,以发现和定位所述电缆的绝缘的任何局部退化;

识别由于在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的宽带信号波的波反射引起的时域 t' 的功率谱中的频率分量 $f_1'', f_2'', \dots, f_n''$,所述波反射是由于所述电缆的电参数的不连续引起的;以及

通过以下公式计算每个位置 x_i :

$$x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2};$$

确定沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置附近的区间的功率谱的相阻抗谱傅立叶变换的实部和虚部之间的关系;以及

从所述实部和所述虚部识别在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处的阻抗变化。

2. 如权利要求1所述的方法,其中,识别阻抗变化包括识别下列中的至少一个:上升阻抗变化、下降阻抗变化、高阻抗尖峰或低阻抗尖峰。

3. 如权利要求1或2所述的方法,其中,当所述虚部为零且所述实部为正数的时候识别为高阻抗尖峰。

4. 如权利要求1或2所述的方法,其中,当所述虚部为零且所述实部为负数的时候识别为低阻抗尖峰。

5. 如权利要求1或2所述的方法,其中,当所述实部为零且所述虚部为正数的时候识别为上升阻抗变化。

6. 如权利要求1或2所述的方法,其中,当所述实部为零且所述虚部为负数的时候识别为下降阻抗变化。

7. 如权利要求1或2所述的方法,还包括,将具有较低阻抗的电缆段识别为在所述电缆段的始端处的下降阻抗变化,紧接着在所述电缆段的末端处的上升阻抗变化。

8. 如权利要求1或2所述的方法,还包括,将具有较高阻抗的电缆段识别为在所述电缆段的始端处的上升阻抗变化,紧接着在所述电缆段的末端处的下降阻抗变化。

9. 如权利要求1或2所述的方法,还包括,通过分析功率谱中的终端峰来确定电缆端的状态的测量,包括确定所述终端峰两边的两个凹处之间的差 dy 和所述终端峰的高度 dz 之间的关系。

10. 如权利要求9所述的方法,还包括:

使用分析器估计所述相对相速度 v_r ,其中,估计所述相对相速度 v_r 包括:

评估复电缆阻抗 Z_{DUT} 的至少两个谐振频率;

识别值分别为 f_k 和 f_{k+1} 的复电缆阻抗 Z_{DUT} 的两个连续的谐振频率;

通过使用以下公式,计算所述电缆的相对相速度 v_r 的第一值:

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

其中, L 是所述电缆的长度;

通过在时域 t' 中运用所述相对相速度 v_r 的第一值并使用以下公式,计算所述电缆的基频 f' :

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0};$$

通过找出时域 t' 中 f' 附近的可选区间的最大峰值,计算基频 f' 的第二值 f'' ;以及

通过运用以下公式,计算相对相速度的最终估计值 $v_r^{\text{最终}}$:

$$v_r^{\text{最终}} = \frac{2L}{v_0 f''}.$$

11. 一种用于监控电缆的状态的方法,所述方法包括:

在所述电缆的第一端施加宽带信号波,其中,所述宽带信号波被所述电缆的至少一个电缆阻抗相位调制和幅度调制;

在所述电缆的第一端采集被所述电缆传送和反射的相位调制和幅度调制的宽带信号波;

针对所采集的反射的宽带信号波,计算由幅度和相位指定的复电缆阻抗 Z_{DUT} ,所述复电缆阻抗 Z_{DUT} 为频率 f 的函数;

将计算出的复电缆阻抗变换到时域 t' 中;

在时域 t' 中计算频率 f' ,其中,频率 f' 是由于离所述电缆的一端的距离为 d 处的宽带信号波的波反射而产生的在时域 t' 中的角频率为 w' 且幅度为 A 的伪周期函数的基频,且其中,通过使用以下公式计算频率 f' :

$$f' = \frac{w'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0},$$

其中, v_0 是真空中光速,而 v_r 是所述电缆中的电信号的估计的相对相速度;

对时域 t' 中的复电缆阻抗的幅度和相位两者执行功率谱分析,以发现和定位所述电缆的绝缘的任何局部退化;

识别由于在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的宽带信号波的波反射引起的时域 t' 的功率谱中的频率分量 $f_1'', f_2'', \dots, f_n''$,所述波反射是由于所述电缆的电参数的不连续引

起的;以及

通过以下公式计算每个位置 x_i :

$$x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2};$$

还包括通过分析在识别的故障的位置处的宽带信号波的二阶反射,确定在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处的电缆绝缘中的所述识别的故障的局部退化的严重程度。

12. 如权利要求11所述的方法,还包括,确定在功率谱中的一阶反射峰高度和二阶反射峰高度之间的差异,并评估电缆衰减以将离终端任何距离处的任何峰的高度与终端峰的高度之间的差异相对于终端位置归一化。

13. 如权利要求11或12所述的方法,还包括,通过分析功率谱中的终端峰来确定电缆端的状态的测量,包括确定所述终端峰两边的两个凹处之间的差 dy 和所述终端峰的高度 dz 之间的关系。

14. 如权利要求13所述的方法,还包括:

使用分析器估计所述相对相速度 v_r ,其中,估计所述相对相速度 v_r 包括:

评估复电缆阻抗 Z_{DUT} 的至少两个谐振频率;

识别值分别为 f_k 和 f_{k+1} 的复电缆阻抗 Z_{DUT} 的两个连续的谐振频率;

通过使用以下公式,计算所述电缆的相对相速度 v_r 的第一值:

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

其中, L 是所述电缆的长度;

通过在时域 t' 中运用所述相对相速度 v_r 的第一值并使用以下公式,计算所述电缆的基频 f' :

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0};$$

通过找出时域 t' 中 f' 附近的可选区间的最大峰值,计算基频 f' 的第二值 f'' ;以及

通过运用以下公式,计算相对相速度的最终估计值 $v_r^{\text{最终}}$:

$$v_r^{\text{最终}} = \frac{2L}{v_0 f''}.$$

15. 一种用于监控电缆的状态的系统,所述系统包括:

用于计算由幅度和相位指定的复电缆阻抗 Z_{DUT} 的分析器,所述复电缆阻抗 Z_{DUT} 为频率 f 的函数;

信号生成装置,所述信号生成装置用于生成被电缆阻抗相位调制和幅度调制的宽带信号波,所述宽带信号波被施加到所述电缆的第一端;

采集模块,所述采集模块用于在所述电缆的所述第一端采集被所述电缆阻抗相位调制和幅度调制的宽带信号波;

变换装置,所述变换装置用于将所述复电缆阻抗 Z_{DUT} 变换到时域 t' 中;

用于在时域 t' 中计算频率 f' 的分析器,其中,频率 f' 是由于离所述电缆的一端的距离为 d 处的宽带信号波的波反射而产生的在时域 t' 中的角频率为 w' 且幅度为 A 的伪周期函数

的基频,且其中,通过使用以下公式计算频率 f' :

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0},$$

其中, v_0 是真空中光速,而 v_r 是所述电缆中的电信号的估计的相对相速度,

其中,所述分析器对在时域 t' 中的所述复电缆阻抗的幅度和相位两者执行功率谱分析,以发现和定位所述电缆的绝缘的任何局部退化,

其中,所述分析器识别由于沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的宽带信号波的波反射引起的时域 t' 的功率谱中的频率分量 $f_1'', f_2'', \dots, f_n''$,所述波反射是由于所述电缆的电参数的不连续引起的,并且

其中,所述分析器通过使用以下公式计算每个位置 x_i :

$$x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2},$$

其中,所述分析器还确定在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置附近的区间的功率谱的相阻抗谱傅立叶变换的实部和虚部之间的关系,以及

从所述实部和所述虚部识别在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处的阻抗变化。

16. 如权利要求15所述的系统,其中,识别阻抗变化包括识别下列中的至少一个:上升阻抗变化、下降阻抗变化、高阻抗尖峰或低阻抗尖峰。

17. 如权利要求15或16所述的系统,其中,当所述虚部为零且所述实部为正数的时候识别为高阻抗尖峰。

18. 如权利要求15或16所述的系统,其中,当所述虚部为零且所述实部为负数的时候识别为低阻抗尖峰。

19. 如权利要求15或16所述的系统,其中,当所述实部为零且所述虚部为正数的时候识别为上升阻抗变化。

20. 如权利要求15或16所述的系统,其中,当所述实部为零且所述虚部为负数的时候识别为下降阻抗变化。

21. 如权利要求15或16所述的系统,还包括,将具有较低阻抗的电缆段识别为在所述电缆段的始端处的下降阻抗变化,紧接着在所述电缆段的末端处的上升阻抗变化。

22. 如权利要求15或16所述的系统,还包括,将具有较高阻抗的电缆段识别为在所述电缆段的始端处的上升阻抗变化,紧接着在所述电缆段的末端处的下降阻抗变化。

23. 如权利要求15或16所述的系统,还包括,通过分析在识别的故障的位置处的宽带信号波的二阶反射,确定在沿着所述电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处的电缆绝缘中的所述识别的故障的局部退化的严重程度。

24. 如权利要求23所述的系统,还包括,确定在功率谱中的一阶反射峰高度和二阶反射峰高度之间的差异,并将离终端任何距离处的任何峰的高度与终端峰的高度之间的差异相对于终端位置归一化。

25. 如权利要求15或16所述的系统,还包含通过分析功率谱中的终端峰来确定电缆端的状态的测量,包括确定所述终端峰两边的两个凹处之间的差 dy 和所述终端峰的高度 dz 之间的关系。

26. 如权利要求15或16所述的系统,其中,

所述分析器对以下项是可操作的:

评估所述复电缆阻抗 Z_{DUT} 的至少两个谐振频率;

识别值分别为 f_k 和 f_{k+1} 的所述复电缆阻抗 Z_{DUT} 的两个连续的谐振频率;

通过使用以下公式,计算所述电缆的相对相速度 v_r 的第一值:

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

其中, L 是所述电缆的长度;

通过运用所述相对相速度 v_r 的第一值并使用以下公式,计算所述电缆的基频 f' :

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0},$$

通过找出时域 t' 中 f' 附近的可选区间的最大峰值,计算基频 f' 的第二值 f'' ;以及

通过使用以下公式,计算相对相速度的最终估计值 $v_r^{\text{最终}}$:

$$v_r^{\text{最终}} = \frac{2L}{v_0 f''}.$$

监控电缆状态的方法和系统

技术领域

[0001] 本发明提供已安装电缆所使用的基于线路谐振分析的系统和方法。例如，监控包括对电缆的状态监控和实时诊断。贯穿本说明书，本系统也被称之为LIRA（线路谐振分析系统）。电缆具有从几米到几百公里范围的长度，取决于电缆的结构和衰减。

背景技术

[0002] LIRA（线路谐振分析系统）基于传输线理论，其为已确定的和有据可查的理论，并以被称为“时域反射法”（TDR）和“频率反射法”（FDR）的其他两个已有的电缆故障检测技术为基础。

[0003] 传输线是提供发电机和负载之间的连接的电路部分。传输线的特性取决于其长度与其中传输的电信号波长 λ 的对比。波长定义如下：

$$[0004] \quad \lambda = v/f \quad (1)$$

[0005] 其中， v 是电线中电信号的速度（也称为相速度）， f 为该信号的频率。

[0006] 当传输线长度远低于波长时，如电缆短（即，几米）且信号频率低（即，几kHz）时发生的情况一样，线路对于电路特性没有影响。那么从发电机侧观察的电路阻抗（ Z_{in} ）在任何时候都与负载阻抗相等。

[0007] 然而，如果线路长度大于信号波长，（ $L \geq \lambda$ ），则线路的特性就起到重要作用，且从发电机观察的电路阻抗与负载不匹配，但是不包括一些非常特殊的情况。

[0008] 沿电缆的电压 V 和电流 I 服从被称为电报员方程（telephonists equations）的下列微分方程：

$$[0009] \quad \frac{d^2V}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V \quad (2)$$

$$[0010] \quad \frac{d^2I}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)I \quad (3)$$

[0011] 其中 ω 为信号角频率（radial frequency）， R 是导线电阻， L 是电感， C 是电容，而 G 是绝缘体电导率（insulation conductivity），全部都相对于单位长度的电缆而言。

[0012] 当一个高频信号穿过电缆时，这四个参数完全定义电缆的特性。在传输线理论中，线路的特性通常作为两个复参数的函数被研究。第一个是传播函数：

$$[0013] \quad \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4)$$

[0014] 通常写为：

$$[0015] \quad \gamma = \alpha + j\beta \quad (5)$$

[0016] 其中实部 α 为线路衰减系数，虚部 β 是传播常数，其还与相速度 v 、角频率 ω 和穿过的波长 λ 有关：

$$[0017] \quad \beta = \frac{2\pi f}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \quad (6)$$

[0018] 第二个参数是特性阻抗:

$$[0019] \quad Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (7)$$

[0020] 运用(4)和(7),并求解微分方程(2)和(3),距离末端的距离为d处的电缆的线路阻抗为:

$$[0021] \quad Z_d = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_d}{1 - \Gamma_d} \quad (8)$$

[0022] 其中 Γ_d 是广义反射系数(Generalized Reflection Coefficient):

$$[0023] \quad \Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\gamma d} \quad (9)$$

[0024] 且 Γ_L 为负载反射系数(Load Reflection Coefficient):

$$[0025] \quad \Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (10)$$

[0026] 公式(10)中的 Z_L 是电缆末端处连接的负载阻抗。

[0027] 从公式(8)、(9)和(10)中容易看出当负载与特性阻抗匹配时, $\Gamma_L = \Gamma_d = 0$,那么对于任何长度和频率, $Z_d = Z_0 = Z_L$ 。在其他所有情况下,线路阻抗是服从公式(8)的复变量,其具有图1中的曲线形状(幅度和相位是频率的函数)。

[0028] 基于传输线理论的现有方法试图通过测量作为时间的函数的V(方程(2))来定位局部电缆故障(不可能有全局退化评价),并评估从入射波到反射波的时间延迟。这些方法的例子可在美国专利4,307,267和4,630,228、以及美国专利公开2004/0039976和2005/0057259中找到。

[0029] US 7966137B2中公开了通过分析应用于电缆的多频率信号来监控电缆状态的方法和系统。所公开这种方法和系统检测沿着电缆的阻抗变化。US 7966137B2中公开的监控系统和方法被称之为LIRA技术(线路谐振分析系统)。LIRA技术提供到线路阻抗域的变换(幅度和相位二者),该域也被称为 t' 域,并在该域中运用频率分析。这个过程中包含的步骤有:

[0030] 1. 发送扩展带宽信号通过电缆,并测量其反射信号

[0031] 2. 根据发送和反射的信号,估计整个带宽的线路阻抗

[0032] 3. 分析该线路阻抗,以获取关于电缆性能、全局电缆状态、局部退化点的信息。

[0033] LIRA(线路谐振分析系统)通过分析电缆输入阻抗(见公式(8)和附图1)提高了检测灵敏度和准确性。局部退化检测和定位、还有全局退化评价由以下项提供:

[0034] 作为频率(带宽0-X MHz,其中X取决于电缆长度)的函数的线路输入阻抗的无噪声估计和线路输入阻抗的频谱分析,用以检测和定位退化点(见详细解释)。稍后详细解释这些步骤。

[0035] LIRA方法提供了在早期检测退化的可能性,对于长于几公里的电缆尤其适用。在这种情况下,LIRA可以估计所怀疑的部分的位置,且其估计误差在电缆长度的0.3%的范围内。

[0036] 此外,全局电缆状态评估是可能的,这对于在恶劣环境应用(例如核应用和航空应用)中电缆剩余寿命的估计是重要的。

[0037] 然而,US 7966137B2中所描述的方法对于在电缆终端处和已识别出阻抗变化的电缆区域中的灵敏度方面具有局限性,并且在电缆退化严重程度方面同样具有局限性。

发明内容

[0038] 本发明的目标是解决或至少减轻上面所示的问题。

[0039] 在一方面,本发明提供了监控电缆状态的方法,所述方法包括:

[0040] -在电缆第一端处施加具有频率 f 的宽带信号波,其中宽带信号波被电缆的至少一个电缆阻抗相位调制和幅度调制;

[0041] -在电缆的第一端处采集被电缆传送和反射的相位调制和幅度调制的宽带信号波;

[0042] -计算所采集的反射宽带信号波的复电缆阻抗 Z_{DUT} ,其由幅度和相位指定,是频率 f 的函数;

[0043] -将计算出的复电缆阻抗变换到时域 t' ;

[0044] -在时域 t' 中计算频率 f' ,其中,频率 f' 是由离电缆一端的距离为 d 处的宽带信号波的波反射而产生的、在时域 t' 中的角频率为 ω' 且幅度为 A 的伪周期函数的基频,且其中通过使用以下公式计算频率 f' :

$$[0045] \quad f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

[0046] 其中 v_0 是真空中光速,而 v_r 是电缆中的电信号的相对相速度的估计值;

[0047] -对时域 t' 中的复电缆阻抗的幅度和相位两者进行功率谱分析,以发现和定位电缆绝缘的任何局部退化;

[0048] -识别由于沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的宽带信号波的波反射引起的时域 t' 的功率谱中的频率分量 $f_1'', f_2'', \dots, f_n''$,所述波反射是由电缆的电参数的不连续引起的;以及

[0049] 通过以下公式计算每个位置 x_i :

$$[0050] \quad x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2}$$

[0051] -确定在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置附近的区间的功率谱的相阻抗谱傅立叶变换的实部和虚部之间的关系;以及

[0052] -识别在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处相对于所述实部和虚部的阻抗变化。

[0053] 在一个实施方案中,识别阻抗变化包括识别上升阻抗变化、下降阻抗变化、高阻抗点或低阻抗点中的至少一个。当虚部为零且实部为负数的时候识别为高阻抗点。当虚部为零且实部为正数的时候识别为低阻抗点。当实部为零且虚部为负数的时候识别为上升阻抗变化。当实部为零且虚部为正数的时候识别为下降阻抗变化。

[0054] 在一个实施方案中,所述方法可还包括将具有较低阻抗的电缆段识别为在电缆段始端处的下降阻抗变化,紧接着在电缆段的末端处的上升阻抗变化。而且,所述方法可包括将具有较高阻抗的电缆段识别为在电缆段始端处的上升阻抗变化,紧接着在电缆段的末端处的下降阻抗变化。

[0055] 在另一方面,本发明提供了用于监控电缆状态的方法,所述方法包括:

[0056] -在电缆的第一端处施加具有频率 f 的宽带信号波,其中所述宽带信号波被电缆的至少一个电缆阻抗相位调制和幅度调制;

[0057] -在电缆的第一端处采集被电缆传送和反射的相位调制和幅度调制的宽带信号波;

[0058] -估计/计算所采集的反射宽带信号波的复电缆阻抗 Z_{DUT} ,其由幅度和相位指定,是频率 f 的函数;

[0059] -将计算出的复电缆阻抗变换到时域 t' ;

[0060] -在时域 t' 中计算频率 f' ,其中,频率 f' 是由距离电缆一端的距离为 d 处的宽带信号波的波反射所产生的、在时域中的角频率为 ω' 和幅度为 A 的伪周期函数的基频,且其中通过使用以下公式计算频率 f' :

$$[0061] \quad f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

[0062] 其中, v_0 是真空中光速,而 v_r 是电缆中的电信号的相对相速度的估计值;

[0063] -对时域 t' 中的复电缆阻抗的幅度和相位两者进行功率谱分析,以发现和定位电缆绝缘的任何局部退化;

[0064] -识别由沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的宽带信号波的波反射引起的时域 t' 的功率谱中的频率分量 $f_1'', f_2'', \dots, f_n''$,其中波反射是由电缆的电参数的不连续引起的;以及

[0065] 通过以下公式计算每个位置 x_i :

$$[0066] \quad x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2}$$

[0067] 还包括,通过分析在所识别的故障位置处的宽带信号的二阶反射,确定在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处的电缆绝缘中的所述所识别的故障的局部退化的严重程度。

[0068] 在一个实施方案中,所述方法可包括确定在功率谱中的一阶反射峰高度和二阶反射峰高度之间的差异,并评估电缆衰减以使距离终端任何距离处的任何峰的高度归一化。

[0069] 此外,依照上述方面,所述方法可还包括通过分析功率谱中的终端峰(termination peak)来确定电缆端状态的测量,其中包括确定终端峰两边的两个凹处之间的差 dy 和终端峰高度 dz 之间的关系。

[0070] 在一个实施方案中,所述方法还包括使用分析器估计相对相速度 v_r 的估计值,其中估计相对相速度 v_r 的估计值包括:

[0071] -评估复电缆阻抗 Z_{DUT} 的至少两个谐振频率;

[0072] -识别值分别为 f_k 和 f_{k+1} 的复电缆阻抗 Z_{DUT} 的两个连续的谐振频率;

[0073] -通过使用以下公式,计算电缆的相对相速度 v_r 的第一值:

$$[0074] \quad v_r = 2L (f_{k+1} - f_k) / v_0$$

[0075] 其中 L 是电缆长度;

[0076] -通过在时域 t' 中运用第一相对相速度 v_r 并采用以下公式,计算电缆的基频 f' :

$$[0077] \quad f' = \frac{2L}{v_r v_0}$$

[0078] -通过找出 f' 附近的可选区间的时域 t' 中的最大峰值,计算基频 f' 的第二值 f'' ;以及

[0079] -通过运用以下公式,计算相对相速度 v_r 的最终值的估计值:

$$[0080] \quad v_r^{\text{最终}} = \frac{2L}{v_0 f''}$$

[0081] 本发明的另外一方面提供监控电缆状态的系统,所述系统包括:

[0082] 分析器,其用于计算复电缆阻抗 Z_{DUT} , Z_{DUT} 由幅度和相位指定,是频率 f 的函数;

[0083] 信号生成装置,其用于生成被电缆阻抗相位调制和幅度调制的宽带信号波,所述宽带信号波施加到电缆第一端,其中,频率 f 是宽带信号波的频率;

[0084] 采集模块,其用于在电缆第一端采集被电缆阻抗相位调制和幅度调制的宽带信号波;

[0085] 变换装置,其用于将复电缆阻抗 Z_{DUT} 变换到时域 t' ;

[0086] 分析器,其用于在时域 t' 中计算频率 f' ,其中,频率 f' 是由离电缆一端的距离为 d 处的宽带信号波的波反射而产生的、在时域中的角频率为 ω' 且幅度为 A 的伪周期函数的基频,且其中通过使用以下公式计算频率 f' :

$$[0087] \quad f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

[0088] 其中, v_0 是真空中光速,而 v_r 是电缆中的电信号的相对相速度的估计值,

[0089] 其中,所述分析器对时域 t' 的复电缆阻抗的幅度和相位两者进行功率谱分析,以发现和定位电缆绝缘的任何局部退化,

[0090] 其中,所述分析器识别由沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 处的宽带信号波的波反射引起的时域 t' 的功率谱中的频率分量 $f_1'', f_2'', \dots, f_n''$,其中波反射是由电缆的电参数的不连续引起的,并且

[0091] 其中,所述分析器通过以下公式计算每个位置 x_i :

$$[0092] \quad x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2}$$

[0093] 其中所述分析器确定在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置附近的区间的功率谱的相阻抗谱傅立叶变换的实部和虚部之间的关系,以及

[0094] -识别在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中相对于所述实部和虚部的阻抗变化。

[0095] 识别阻抗变化可包括识别上升阻抗变化、下降阻抗变化、高阻抗点和低阻抗点中的至少一个。当虚部为零且实部为负数的时候识别为高阻抗点。当虚部为零且实部为正数的时候识别为低阻抗点。当实部为零且虚部为负数的时候识别为上升阻抗变化。当实部为零且虚部为正数的时候识别出下降阻抗变化。

[0096] 在一个实施方案中,该系统还可包括将具有较低阻抗的电缆段识别为在电缆段始端处的下降阻抗变化,紧接着在电缆段的末端处的上升阻抗变化。所述系统还可包括将具

有较高阻抗的电缆段识别为在电缆段始端处的上升阻抗变化,紧接着在电缆段的末端处的下降阻抗变化。

[0097] 此外,可通过分析在所识别的故障位置处的宽带信号的二阶反射,识别在沿着电缆的位置 x_1, x_2, \dots, x_n 中的至少一个位置处的电缆绝缘中的所述所识别的故障的局部退化的严重程度。所述系统还可包括确定在功率谱中的一阶反射峰高度和二阶反射峰高度之间的差异,并相对于功率谱中的终端峰的高度归一化所述高度差异。所述系统可通过分析功率谱中的终端峰来确定电缆端状态的测量,其中包括确定终端峰两边的两个凹处之间的差 dy 和终端峰高度 dz 之间的关系。

[0098] 在该系统的另一个实施方案中,分析器对以下项是可操作的:

[0099] 评估复电缆阻抗 Z_{DUT} 的至少两个谐振频率;

[0100] 识别值分别为 f_k 和 f_{k+1} 的复电缆阻抗 Z_{DUT} 的两个连续的谐振频率;

[0101] 通过使用以下公式,计算电缆相对相速度的第一值 v_r :

$$[0102] \quad v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

[0103] 其中 L 是电缆长度;

[0104] 通过运用第一相对相速度 v_r 并使用以下公式,计算电缆的基频 f' :

$$[0105] \quad f' = \frac{2L}{v_r v_0}$$

[0106] 通过找出 f' 附近的可选区间内的时域 t' 中的最大峰值,计算基频 f' 的第二值 f'' ;以及

[0107] 通过运用以下公式,计算相对相速度 $v_r^{\text{最终}}$ 的估计值:

$$[0108] \quad v_r^{\text{最终}} = \frac{2L}{v_0 f''}$$

[0109] 本发明提供用于电缆的状态监控的系统,所述系统包括生成装置,其提供参考信号 CH_0 ;采集装置,其采集所述参考信号 CH_0 和信号 CH_1 ,所述信号 CH_1 为被电缆的电缆阻抗 Z_{DUT} 幅度调制和相位调制后的参考信号 CH_0 ;和分析装置,其计算复电缆阻抗 Z_{DUT} ,其中 Z_{DUT} 为基于参考信号 CH_0 和信号 CH_1 的所用信号频率的函数;并且,分析所述电缆阻抗,提供对电缆状态和/或电缆故障的评价。

[0110] 所述生成装置可用于提供参考信号 CH_0 ,其中 CH_0 选自由具有从 w_1 到 w_2 (都可选)的频率带宽的扫描信号组成的组。

[0111] 采集装置可以是数字存储示波器。

[0112] LIRA(线路谐振分析系统)能够监控恶劣环境条件(例如,高温、潮湿、辐射)引起的电缆绝缘的全局的、越来越严重的退化,并检测由机械作用或局部反常的环境条件引起的绝缘材料的局部退化。

[0113] LIRA系统可用于检测和监控各种电缆(电力电缆和信号电缆)的绝缘退化和线路破损;即电力发电、分配和传输中的电缆、制造工业中的电缆、航空工业中的电缆、陆地、离岸和海底安装的电缆,并确定损坏/破损的位置。可以远程实时地进行监控和检测。

[0114] 基于本发明的改进的LIRA系统关于以下两个方面提供了改进:

[0115] 1. 局部特性的严重程度的评估和对于损坏位置的电参数性能更好的了解;即,阻

抗是上升还是下降。评价阻抗是上升还是下降。这有助于评估损坏的原因。例如,水或潮湿的渗透总是导致阻抗的降低。

[0116] 2. 终端处的电缆状态,对此稍后将详细解释。

[0117] 基于本发明的改进的LIRA系统实现电缆终端处的状态监控。确定电缆端处的状态在例如石油和天然气工业、油井内、海底、核电站、电力传输分配和其他难以到达的位置的环境中尤为重要。

[0118] 本发明定义于附加的权利要求中。

附图说明

[0119] 现在将根据以下附图描述本发明的实施方案,其中:

[0120] 图1根据公式(8)示出了作为频率的函数的复数线路阻抗的幅度和相位的图形表示;

[0121] 图2示出了点检测算法的功能框图;

[0122] 图3示出了在时域 t' 中的相阻抗(phase impedance)的功率谱,其中x轴设置成与距离电缆始端处的距离($d=300$)成比例;

[0123] 图4为在时域 t' 中的相阻抗(phase impedance)的功率谱,其中由于在30cm的电缆段中的20pF的电容变化, $x=200$ 处的频率分量是可见的;

[0124] 图5是根据公式(18)的实部产生的信号,其为在时域 t' 中的角频率为 ω' 和幅度为A的阻尼正弦波。

[0125] 图6是 $A=1$ 时公式(19)的 t' 域Z的相位图;

[0126] 图7是相位函数(18)的半周期函数图;

[0127] 图8是公式(28)中的函数 $f(x)$ 的分量图;

[0128] 图9示出基于本发明的实施方案的公式(29)的前三个谐波的LIRA显示的例子;

[0129] 图10为根据本发明的实施方案的C和L对LIRA老化指标的影响的示意图;

[0130] 图11示出根据本发明的实施方案的、具有较高阻抗的电缆段的LIRA特征信号,并且此电缆段长于LIRA的分辨率;

[0131] 图12示出根据本发明的实施方案的、如图11所示的、距离电缆始端50m到60m处的阻抗增加(-5pF/m ,分辨率 $=1.5\text{m}$)的LIRA特征信号的显示图像;

[0132] 图13示出根据本发明的实施方案的、具有较低阻抗的电缆段的LIRA特征信号,其中此电缆段长于LIRA的分辨率;

[0133] 图14示出根据本发明的实施方案的、如图13所示的、距离电缆始端50m到60m处的阻抗下降($+5\text{pF/m}$,分辨率 $=1.5\text{m}$)的LIRA特征信号的显示图像;

[0134] 图15为作为单阻抗变化、负SP-的点距离(m)的函数的、在变化位置处的电缆阻抗谱(实部和虚部)的、以伏特为单位的幅度的显示图像,并且根据本发明的实施方案,其中的阻抗变化位置处的谱为纯负虚数;

[0135] 图16示出在如图15所示的变化位置处的相阻抗谱的复数值,其中根据本发明的实施方案,对于SP-该值为纯负虚数;

[0136] 图17为作为单阻抗变化、正SP+的点距离(m)的函数的、在变化位置处的电缆阻抗谱(实部和虚部)的、以伏特为单位的幅度的显示图像,并且根据本发明的实施方案,其中的

阻抗变化位置处的谱为纯正虚数；

[0137] 图18示出在如图17所示的阻抗变化位置处的相阻抗谱的复数值，其中根据本发明的实施方案，对于SP+该值为纯正虚数；

[0138] 图19示出具有较高阻抗的电缆段以及下面所示的其相应的LIRA特征信号，且根据本发明的实施方案，该电缆段短于LIRA分辨率；

[0139] 图20示出具有较低阻抗的电缆段以及下面所示的其相应的LIRA特征信号，且根据本发明的实施方案，该电缆段短于LIRA分辨率；

[0140] 图21为作为低阻抗点的点距离 (m) 的函数的、在变化位置处的电缆阻抗谱 (实部和虚部) 的、以伏特为单位的幅度显示图像，如图20所示，其中的阻抗点短于LIRA (DP-) 的分辨率；根据本发明的实施方案，该点处的谱为纯负实数；

[0141] 图22示出在根据图20和图21的阻抗变化位置处的相阻抗谱的复数值；根据本发明的实施方案，其中对于DP-该值为纯负实数；

[0142] 图23为根据本发明的实施方案，对于如图20到22所示的距离电缆始端50m处的DP-点 (对于1m为+5pF/m, 分辨率=1.5m) 的LIRA特征信号的显示图像；

[0143] 图24示出如图25所示的电缆高阻抗点的谱 (实数和虚数部分)，并且根据本发明的实施方案，其中阻抗点的长度短于LIRA (DP+) 的分辨率，且其中该点处的谱为纯正实数；

[0144] 图25示出在阻抗变化位置处的图24中的相阻抗谱的复数值；根据本发明的实施方案，其中对于DP+该复数值为纯正实数；

[0145] 图26示出根据本发明的实施方案，对于如图19、24、25所示的在距离电缆始端50m处的DP+点 (对于1m为-5pF/m, 分辨率=1.5m) 的LIRA特征信号；

[0146] 图27示出了根据本发明的实施方案的显示图像，其中显示了局部退化严重程度如何与LIRA特征信号的尖峰高度关联；

[0147] 图28示出了根据本发明的实施方案的、平衡状态下 (好电缆) $BTS=0$ 的电缆的电缆端处的平衡终端特征信号 (BTS) 的显示图像；

[0148] 图29示出根据本发明的实施方案的、具有高电容 (低阻抗) 终端的电缆的电缆端处的平衡终端特征信号 (BTS) 的显示图像，其中 ($BTS>0$)，其中 $BTS = \Delta Y / \Delta Z * 100$ ；以及

[0149] 图30示出了根据本发明的实施方案的、具有低电容 (高阻抗) 终端的电缆的电缆端处的平衡终端特征信号 (BTS) 的显示图像，其中 ($BTS<0$)。

具体实施方式

[0150] 贯穿说明书和权利要求中的术语“监控”将被广泛解释，并包含全局/局部状态监控、实时诊断和故障检测。

[0151] 基于本发明的监控和分析系统可实现为软件模块。监控系统可以在可携带硬件系统中实现。该硬件包括用于跟所要监控的电缆/电线连接的输入模块。监控和分析软件可运行该方法，并自动提供对电缆/电线的分析结果。然而，操作人员对监控和分析系统的人工干预也是可能的。

[0152] • LIRA仿真器模块。LIRA仿真器运用传输线方程 (公式1到10) 在频域内工作。另外，其使用随机模型评估电缆电参数中由于制造公差和环境变化引起的不确定性。实际电缆连接的电缆参数和负载参数为LIRA仿真器模块的输入。

[0153] 随机模型评估沿着电缆的电参数(L、C和R)并在其中使用由制作公差和环境噪声引起的统计变化(使用具有用户选择的标准偏差的正态分布)。

[0154] • LIRA分析器模块。其可工作在实际或仿真模式。第一种情况下,其采用来自采集板的信号采集模块的输入,第二种情况下,其输入来自LIRA仿真器模块。LIRA分析器是电线/电缆监控系统的核心。LIRA分析器同时在频域和时域中工作,运行以下任务:

[0155] o估计和显示线路输入阻抗的频率谱。

[0156] o计算谐振频率。谐振频率是由阻抗谱计算的,并对应于相位为零处的频率值。

[0157] o估计电缆的特性阻抗 Z_{DUT} 。 Z_{DUT} 也由阻抗谱计算出。特性阻抗是阻抗相位在任何局部最大值(或者最小值)处的阻抗幅度值。

[0158] o如未知,则估计电缆长度。

[0159] o检测局部退化区域并将其定位。

[0160] o检测负载变化。

[0161] o分析和显示频谱,以识别阻抗变化和阻抗点,计算阻抗相位谱的实部和虚部,并分析峰值高度(spike height)。

[0162] 诊断并定位局部退化

[0163] 从参考信号CH0到阻抗调制信号CH1的平均加窗传递函数(averaged windowed transfer function)计算出线路阻抗,这导致从频率的函数计算出线路阻抗 Z_{DUT} 的幅度和相位。一旦计算出线路阻抗,可以通过对复阻抗的幅度和相位分量的频率成分的检查分析电缆状态。将在下文中对此进行解释。可在硬件上计算 Z_{DUT} ,且在这种情况下我们看不见CH0和CH1。

[0164] 公式(8)为图1中的函数的数学表达式。实际上,线路阻抗 Z_d (对于距离电缆端的距离为d处的电缆)为一个复参数,且图1示出了其幅度和相位。相位的伪周期形状是由公式(9) Γ_d 的周期性引起的,其可被写为:

$$[0165] \quad \Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\alpha d} e^{-2j\beta d} \quad (12)$$

[0166] 其中,由于衰减系数 α (如果 $\alpha=0$,相位是周期性的),幅度随着d(电缆长度)降低。如果把d看作自变量,则 Γ_d 的周期(而且由此导致线路阻抗相位)为 $1/2\beta$,或者如果把 β 看作自变量(如图1中),则 Γ_d 的周期为 $1/2d$ 。

[0167] 运用公式(6)中的传播常数 β 的表达,公式(12)可被改写为:

$$[0168] \quad \Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\alpha d} e^{\frac{-2j\omega d}{v}} \quad (13)$$

$$[0169] \quad \Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\alpha d} e^{\frac{-4j\pi f d}{v}} \quad (14)$$

[0170] 其中f为沿着长度为d的电缆传播的所用信号的频率,v为电缆中的电信号的相速度。

[0171] 假设f为自变量,写出以下转换:

$$[0172] \quad f \rightarrow t' \quad (15)$$

$$[0173] \quad \frac{4\pi d}{v_r v_0} \rightarrow \omega' \quad (16)$$

[0174] 其中 $v_r = v/v_0$, v_r 为电缆中的电信号的相对相速度,且 v_0 为真空中的光速。

$$[0175] \quad \Gamma_L e^{-2\alpha d} = A \quad (17)$$

[0176] 公式(14)变为:

$$[0177] \quad \Gamma_d = A e^{-j\omega' t'} \quad (18)$$

[0178] 公式(18)为角频率为 ω' 和幅度为A的伪周期函数的数学表达式(复数表示形式)。在无损耗情况下($\alpha=0$) $A=1$,现实生活中的有损电缆的 α 为信号频率的递增函数,因此幅度A为 t' 的递减函数,导致附图1中的阻尼振荡。该方程(在 t' 域中)的频率为:

$$[0179] \quad f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0} \quad (19)$$

[0180] 其中 f' 为由距离d(电缆终端)处的波反射引起的 t' 域中的相位函数的基频。应注意的是, f' 的表达式中有时间维度,且该时间是波到达在距离d处的终端并反射回来所用的时间。在 t' 域中的阻抗相位的傅立叶变换(功率谱),看起来像,例如,附图3,其中,x轴与在公式(19)给出的基频处的d成比例。附图3中,x轴与距离电缆始端处的距离($d=300$)成比例。

[0181] 当波在距离x处遇到电缆电参数中的不连续(例如,在绝缘电介质中的小变化),则将从距离x处可见另一个反射,这将在阻抗相位的功率谱中增加一个新的频率分量,其中该频率(根据公式(19))为:

$$[0182] \quad f'' = \frac{2x}{v_r v_0} \quad (20)$$

[0183] 因此:

$$[0184] \quad \frac{f'}{f''} = \frac{d}{x} \quad (21)$$

[0185] 如果已知电缆长度,则来自阻抗相位(在 t' 域中)的功率谱的 f' 和 f'' 的信息对于计算x的位置是足够的:

$$[0186] \quad x = d \frac{f''}{f'} \quad (22)$$

[0187] 如果d是未知的,则相对相速度 v_r 的信息(根据电缆数据表或通过在同类型的电缆样本中对其进行测量)可被用于基于公式(19)计算位置x:

$$[0188] \quad x = \frac{v_r v_0 f''}{2} \quad (23)$$

[0189] 那么最终结果为在电参数(主要为介电值变化)变化(即使是很小的变化)的任何位置处的尖峰产生所用参考信号的反射波。该反射表现为线路阻抗的相位/幅度谱中的频率分量。反射波的频率为从电缆端到偏差的距离的函数。图4示出 t' 域中的相阻抗的傅立叶变换(功率谱),其中由距离电缆始端的 $x=200$ m位置处的电缆的电参数变化引起的反射在 $x=200$ m处以频率分量形式可见。该尖峰在图4的情况下是由所测电缆的30cm电缆段中的20pF的电容变化引起的。

[0190] 当对电缆进行状态监控时,在电缆电参数中可能出现若干个不连续(n)。这些不连续中的每个将在功率谱以明显的频率分量尖峰 f'' 的形式出现,并如上所述确定其位置 x_n 。

[0191] 为获得高的灵敏度和数字分辨率,运用可能的最大带宽操作是重要的,然而这却

被电缆衰减限制。带宽的典型例子是对30m电缆使用100MHz的带宽和对长于120km的电缆使用20kHz的带宽。长电缆需要窄带宽,以克服增加的电缆衰减,其为频率的函数。

[0192] 全局退化监控

[0193] 电缆状态的全局变化监控由以下方法提供:

[0194] 方法1:相对相速度估计和监控。

[0195] 方法2:CBAC方法(中心带衰减相关(Central Band Attenuation Correlation))。

[0196] 如同局部退化和诊断,用于全局退化的方法也基于对电缆使用参考信号CH0,其中参考信号具有从 w_1 到 w_2 的频率带宽,然后该参考信号被所测试电缆的电缆阻抗 Z_{DUT} 进行相位和幅度调制,获得信号CH1。

[0197] 方法1:运用LIRA通过两个步骤的过程计算相对相速度:

[0198] 1. 使用线路阻抗中的两个连续的谐振频率值获得第一个近似值,运用以下公式:

[0199] 在任何谐振中,电缆长度 L 恰好等于半波长或其任意倍数(当电缆为末端开路时这是成立的,但不同的负载电抗都能很容易地满足),或,运用公式(1):

$$[0200] \quad L = \frac{v_r v_0}{2f_k} k \quad (24)$$

[0201] 其中 L 为电缆长度, v_0 为真空中的光速, v_r 为相对相速度,而 f_k 为第 k 个谐振峰频率。

[0202] 对两个连续谐振峰运用公式(24),我们得到:

$$[0203] \quad v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0 \quad (25)$$

[0204] 电缆输入阻抗估计和谐振频率计算之后,LIRA运用公式(25)估计 v_r 的第一值。应注意的是,公式中差值项将会消除任何负载电抗变化。该值为近似值的原因 v_r 是 f 的慢函数(slow function),但其在公式(25)中假设为常数。

[0205] 2. 利用步骤1中找出的 v_r 值计算基频 f' 的近似值(t' 域,见上述描述和图3),具体根据如下公式:

$$[0206] \quad f' = \frac{2L}{v_r v_0} \quad (26)$$

[0207] LIRA在 t' 域的傅立叶变换(功率谱)中在用户可选择的 f' 附近的区间搜索最大峰 f' 。当从频谱发现 f' 的准确值(称为 f'')时,根据公式(19)求解得到的 v_r 为:

$$[0208] \quad v_r^{\text{最终}} = \frac{2L}{v_0 f''} \quad (27)$$

[0209] 其为相速度的最终和正确值。相速度随着电缆绝缘的退化而降低。

[0210] 方法2:CBAC方法(中心带衰减相关)

$$[0211] \quad \Gamma_d = A e^{-j\omega' t'} \quad (18)$$

[0212] 在 t' 域中,公式(18)(以复数表示的形式)为角频率为 ω' 和幅度为 A 的正弦波(只考虑在公式18中的复函数的实部)。如果衰减系数 α 不是0,则 A 为衰变常数且产生的信号为如图5所示的阻尼正弦波。图5示出了 t' 的函数形式的GRC(实部)。

[0213] 使用求解 Γ_d 的公式(18),代入求解输入线路阻抗 Z 的公式(8),我们得到下式:

$$[0214] \quad Z = Z_0 \frac{1 + A e^{-j\omega' t'}}{1 - A e^{-j\omega' t'}} \quad (34)$$

[0215] 公式(34)为复数函数,表示与电缆端的距离为d处的线路阻抗Z的幅度和相位。绘制在t'域中的A=1时(零衰减且终端开路或短路)的线路阻抗Z的相位,得出图6所示曲线图。

[0216] 图6中的图为角频率为 ω' (公式16)和幅度为 $\pi/2$ 的方波。如果衰减系数 α 不为零(现实情况),随着t'趋于无穷,将导致A小于1且衰变至零,公式(16)的相位形状趋于具有相同频率 ω' 的半周期函数,如图7所示。

[0217] 如果我们将该公式写为泰勒级数的形式,就可以解释这个变化:

$$[0218] \quad f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right) \quad (28)$$

[0219] 公式(28)为从周期2d的基频正弦波开始的奇次谐波的无穷和。图8绘出了这些分量和最终结果。

[0220] 从物理学上解释,在传输线中,周期为2d的基频正弦波对应来自电缆终端的第一个反射。谐波分量是由高阶反射(high order reflection)引起的,且其幅度(在t'域中)随着1/n项降低,其中n为谐波次数。因此,当未考虑衰减项时(如公式(28)中),无穷数量的反射导致方形阻抗相位,如图6和图8所示。

[0221] 加上衰减项,导致谐波幅度的越来越严重的衰减,其结果是基波相对于高次谐波的重要性增大(图7)。包含衰减项(如果终端不是开路或短路,还要包含反射系数),公式(28)变为:

$$[0222] \quad f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right) \Gamma_R^n e^{-2\alpha dn} \quad (29)$$

[0223] 沿着d积分,且转换到以dB为单位,我们得出:

$$[0224] \quad \alpha_{db/km} = \frac{((TP_1 - TP_3)_{dB} - 9.54 + 20 \log(\Gamma_R^2))}{d} 250 \quad (30)$$

[0225] 其中TP1和TP3为阻抗相位的基波和三次谐波的幅度,并且 α 为带宽正中间处的每单元长度的电缆衰减。当电缆终端短路或开路时,反射系数为1(或-1),所以在公式(30)中的log项消失。

[0226] 公式(30)示出带宽中部电缆的衰减与TP1和TP3之差称比例,LIRA可以对其进行准确估计。附图9示出前三个谐波的LIRA显示的例子。因此,终端峰与三次谐波的对比为电缆的全局热老化的稳定指标。

[0227] 在EPRI和TECNATOM的大量测试显示电缆(尤其是EPR绝缘电缆)的热老化状态与其带中部衰减之间存在很好的关联性。

[0228] 这些测试还显示低频衰减事实上没改变,特性阻抗几乎没改变(具有巨大的标准偏差),相速度趋于降低(具有巨大的标准偏差)。在所有情况中,均发现未老化的电缆的带中部衰减更大。这些结果似乎确认热老化引起电缆电感的大幅度增加和电介质电容的一些变化。

[0229] 在LIRA中, α 归一化至参考电缆长度(默认为20m),以消除长电缆和短电缆之间的差别。

[0230] 衰减系数 α 由以下公式给出:

$$[0231] \quad \alpha = K \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (31)$$

[0232] 其中R为电线电阻(不随着老化改变),C为绝缘电容,且L为电缆电感。

[0233] 公式(31)示出衰减系数 α 为绝缘电容C和电缆电感L之间的比率的函数,衰减系数 α 随着老化表现出变化。所产生的老化和 α 之间的关系可能为复数且不是单调变化的,但是单调特征对于老化指标却是一个重要的要求。

[0234] 为了解决此问题,用特性阻抗和相速度比修正衰减值,这两者均由LIRA计算出。

[0235] 当 α 除以特性阻抗 Z_0 和相对相速度 V_R 的平方时,我们得到:

$$[0236] \quad \alpha = K \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \div \sqrt{\frac{L}{C}} \div \left(\frac{K'}{\sqrt{LC}} \right)^2 = K'' C^2 = CBAC \quad (32)$$

[0237] 那么,CBAC为只对绝缘电容中的变化敏感的指标。

[0238] 如果我们代之以乘以 V_R 的平方:

$$[0239] \quad \alpha = K \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \div \sqrt{\frac{L}{C}} \times \left(\frac{K'}{\sqrt{LC}} \right)^2 = K''' L^2 \quad (33)$$

[0240] 其转变为CBAL,只对电缆电感中的变化敏感的指标。

[0241] 图10阐明了在LIRA老化指标中区分绝缘电容C和电缆电感L的影响的构思。

[0242] 电缆阻抗变化的频谱分解:用于计算点方向和尺寸的相阻抗谱中的实部-虚部关系(BTS方法)

[0243] 如上详细解释的,US 7966137B2中公开的线路谐振分析系统提供了LIRA特征信号。在图11中示出了LIRA特征信号的一个例子。LIRA特征信号沿着电缆追踪电缆阻抗的变化。LIRA特征信号是转换为距离电缆始端的距离的函数的功率谱,在电缆始端对该电缆施加了CH0信号。

[0244] 如图11中所示,LIRA特征信号识别了在图11的位置a和位置b上的电缆阻抗的变化。在图11中,LIRA分辨率以垂直线表示。然而,因为LIRA只检测电缆阻抗的变化,如图11所示,LIRA特征信号未给出如在a和b中所识别的两个电缆阻抗变化之间的电缆状态。同时由于阻抗变化在LIRA系统的分辨率范围之内,US 7966137B2中的现有技术LIRA系统可能不提供关于阻抗变化的性质的其他信息。

[0245] 电缆阻抗由于一个或多个以下参数的变化而增大(上升):

[0246] 1. 电介质电容降低

[0247] 2. 电缆自电感增大

[0248] 3. 导体或/和屏蔽电阻增大

[0249] 4. 绝缘体电导率降低(罕见)

[0250] 1和2的影响在高频更敏感,然而来自3和4的影响在低频更敏感。

[0251] 电缆阻抗中的相反方向的变化引起阻抗降低(下降)。

[0252] 阻抗变化的常有因素有:

[0253] • 温度升高(降低)(电介质电容增大(降低)),阻抗降低(增大)

[0254] • 水/潮湿渗透(电介质电容增大,阻抗降低)

[0255] • 绝缘体电阻降低(电导率增大,阻抗降低)

[0256] • 机械影响(任何方向)

[0257] • 伽玛辐射(通常阻抗增大)

[0258] 如US 7966137B2中所描述,LIRA特征信号的一个问题是特征信号中的尖峰可由下列任何因素引起。不同因素以事件名进行标识。此事件名将贯穿使用于说明书的其余部分。

[0259] LIRA的分辨率为所用带宽的函数,且对100MHz大约为1.5m。随着带宽降低,分辨率降低。

[0260] 1.SP+(单峰,正):阻抗的上升变化。当对大于实际分辨率的距离电缆阻抗具有稳定增长时,这种情况出现。这在附图11和12中示出。图11示出来自具有较高阻抗的电缆段的LIRA特征信号,且其中此段长于LIRA的分辨率。此段开始处有在LIRA特征信号分辨率范围内的阻抗变化(阻抗上升(SP+))。此阻抗上升引起LIRA特征信号中的尖峰,因为LIRA特征信号只检测沿着电缆的阻抗变化。此段结束处有其他阻抗变化,其中阻抗下降(SP-),且再次导致LIRA特征信号中的尖峰。图12示出对于如图11所示的阻抗上升(-5pF/m,分辨率=1.5m)的LIRA特征信号的显示图像。距离电缆始端50m处的第一个尖峰表示阻抗上升,阻抗下降出现在距离电缆始端60m处。

[0261] 2.SP-(单峰,负):阻抗的下降变化。当对大于LIRA的实际分辨率的距离电缆阻抗具有稳定降低时,这种情况出现。图13和14中示出较低阻抗的长段(相对于带宽)的例子。图13中两个尖峰表示低阻抗段的开始和结束。此段开始处有在LIRA特征信号分辨率范围内的阻抗变化(阻抗下降(SP-))。此阻抗下降引起特征LIRA信号中的尖峰,因为LIRA特征信号只检测沿着电缆的阻抗变化。此段结束处有其他阻抗变化,其中阻抗上升(SP+),且再次导致LIRA特征信号中的尖峰。可从附图中看出,图14中的LIRA特征信号与图12中的LIRA特征信号相同。在长于对施加在电缆的CH0信号的实际使用带宽的分辨率的距离上的电缆阻抗增加和电缆阻抗下降二者,引起了同样的LIRA特征信号;即,其为SP-尖峰之后是SP+尖峰。

[0262] 3.DP+:具有较高阻抗的短电缆段(短于实际分辨率)。这就是通常称为的“点”。在此事件中,电缆阻抗在点前面和后面相同,但在该短电缆段中较高。见图19中高阻抗点的例子和图26中相应的LIRA特征信号。可从图19看出,高阻抗点在LIRA特征信号中只引起一个尖峰。

[0263] 4.DP-:具有较低阻抗的短电缆段(短于实际分辨率)。在此事件中,电缆阻抗在点前面和后面相同,但在该短电缆段中较低。见图20中高阻抗点的例子和图23中相应的LIRA特征信号。可从图20看出,高阻抗点在LIRA特征信号中只引起一个尖峰。

[0264] 可从图11、13、19和20看出,如上所述的不同的阻抗变化在LIRA特征信号中引起相同的尖峰。概括起来,因此有普通LIRA特征信号不能区分的四种事件类型:

[0265] • SP+:上升的阻抗变化。当电缆末端开路(或连接的负载具有比电缆特性阻抗高的阻抗)时,这还包含最后的终端。

[0266] • SP-:下降的阻抗变化。当电缆短路(或连接的负载具有比电缆特性阻抗低的阻抗)时,这还包含最后的终端。

[0267] • DP+:高阻抗尖峰

[0268] • DP-:低阻抗尖峰

[0269] 用于检测四种可能事件的实部虚部关系(BTS,平衡终端特征信号(balanced termination signature))方法

[0270] 可使用实部虚部关系 (BTS, 平衡终端特征信号) 方法来检测上面列出的 (SP+、SP-、DP+、DP-) 四种可能的事件。由于遵循公式 (8), 所以线路阻抗 Z_{DUT} 是复变量。遵循公式 (8) 的作为频率函数的幅度和相位曲线的形状在图1中示出。

[0271] 本发明对于阻抗相位的傅立叶变换中的特定位置上识别的尖峰提供进一步分析, 其位置由公式 (23) 计算出, 并且在图3和4中示出。BTS方法基于在事件的位置上对阻抗相位谱傅立叶变换的实部和虚部分量的计算。

[0272] 如图15至18所示, 上升和下降 (SP+和SP-) 事件具有在事件位置的变换为纯虚数值的特征。在实部分量为0 ($Re=0$) 的同时, 虚部分量 ($Im=+90$) 对于SP+事件为正数, 且对于SP-事件为负数 ($Im=-90$)。

[0273] 高和低阻抗尖峰以符号相反的两个SP事件的紧密组合为特征; SP+后跟SP-, 或是SP-后跟SP+。这导致虚部分量 (+90+-90、-90++90) 被抵消。其结果是在事件位置上的谱变换为纯实数值, 对于DP+ (图25) 具有正实数分量和对于DP- (图22) 具有负实数分量。

[0274] DP-事件的阻抗相位谱傅立叶变换在图21中示出。该谱在此点处为纯负实数。DP+事件的阻抗相位谱傅立叶变换在图24中示出。该谱在此点处为纯正实数。

[0275] 基于本发明的LIRA系统可自动进行这些计算。如图12、14、23和26中显示的图像所示, LIRA特征信号的阻抗尖峰出现在将每个尖峰识别为SP+、SP-、DP+、DP-的显示图像上的表格中。

[0276] 对于SP和DP事件的定位准确性

[0277] 然而, 在两个SP变化事件 (SP+、SP-) 和两个DP尖峰事件 (DP+、DP-) 之间的定位过程中却具有一些区别。

[0278] 所检测到的SP+ (上升) 事件的位置是一个或多个电参数变化引起电缆阻抗增加的电缆位置。相似地, SP-事件的位置为局部阻抗降低的电缆上的位置。

[0279] 一个DP+ (DP-) 事件为SP+ (SP-) 事件的叠加, 在该SP+ (SP-) 事件之后的近于当前分辨率的距离处跟有SP- (SP+) 事件, 其中当前分辨率是由施加到电缆的信号CH1所使用的带宽导致的。为此, 所检测到的事件位置在出现变化的短电缆段的中间。

[0280] 局部退化严重程度 (DNORM算法)

[0281] 电缆绝缘的局部退化的严重程度与LIRA特征信号的尖峰高度有关。然而, 对于相同的绝缘损坏, 尖峰高度还取决于该电缆退化 (绝缘损坏) 沿着电缆的位置。LIRA特征信号中的尖峰高度随着电缆退化与应用信号CH0的电缆始端之间的距离增大而降低。这表示随着故障向电缆端移动, 尖峰高度降低。US 7966137B2中描述的LIRA系统进行的分析中, 通过绘制归一化自动补偿了该效应。

[0282] 这样的归一化对于容易地检测重大尖峰是好的特征, 但当故障 (电缆绝缘退化) 向电缆端移动, 这不像距离补偿那样可靠。本发明提供了DNORM算法, 可被表述如下:

[0283] 任何局部点 (电缆阻抗的变化) 在终端峰的另外一边产生一个镜像 (见图27)。这是由损坏部分的二阶反射引起的。功率谱中的二阶尖峰就像在距离 $2L-SL$ 处的具有相同严重程度的新的点, 其中 L 是电缆长度, SL 是点在电缆上的位置。

[0284] 由于两个点 (一个局部点和其镜像) 之间的距离是已知的 (定位点之后), 画出和计算一个趋势线 (图27中的点之间的直线) 是可能的, 该趋势线表示由于电缆衰减, 尖峰的大小如何随着距离改变。在DNORM中, 将趋势线值和终端尖峰值之间的差 (尖峰增量 (spike

delta)) 相对于终端位置 (TP) 归一化, 而不管实际的点位于哪儿。差值 (DNORM) 表示对特定点的局部退化严重程度的测量。

[0285] 终端

[0286] 施加于电缆的宽带信号 CH0 在电缆终端处被反射。来自终端的信号在点特征信号中的距离电缆始端的距离等于电缆长度的地方提供一个尖峰。从而在电缆端处发生的任何阻抗变化均在此终端尖峰/峰的阴影 (shadow) 中。使用如前面说明的 BTS 和 DBORM 方法的本发明提供确定电缆段终端为优质的还是劣质的可能性。电缆终端提供一个点 (DP+ 或 DP-)。在电缆终端处, 在终端峰两边的增量差 (delta difference) dy 和峰高 dz 之间的关系 $BTS = dy/dz * 100$ 为电缆终端绝缘状态的测量方式。

[0287] 图 28 示出对于 $BTS = 0$ 的处于平衡状态 (好电缆) 的电缆, 在该电缆端处的平衡终端特征信号 (BTS) 的显示图像。图 29 示出对于具有高电容 (低阻抗) 终端的、 $BTS > 0$ 的电缆, 在该电缆端处的平衡终端特征信号 (BTS) 的显示图像。图 30 示出对于具有低电容 (高阻抗) 终端的、 $BTS < 0$ 的电缆, 在该电缆端处的平衡终端特征信号 (BTS) 的显示图像。

[0288] 确定电缆端处的状态在例如石油和天然气工业、油井内、海底、核电站、电力传输分配和其他难以到达的位置的环境中尤为重要。

[0289] 描述本发明的最优实施方案之后, 对于本领域技术人员将变得很明显的是, 可以使用合并该思想的其他实施方案。如上面阐明的本发明的这些和其他例子旨在只作为例子, 本发明的实际范围将在下列权利要求中确定。

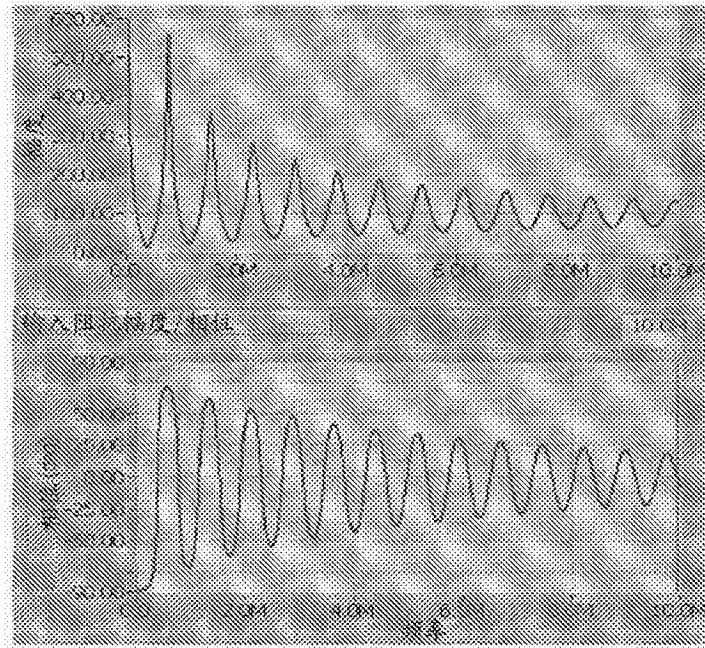


图1

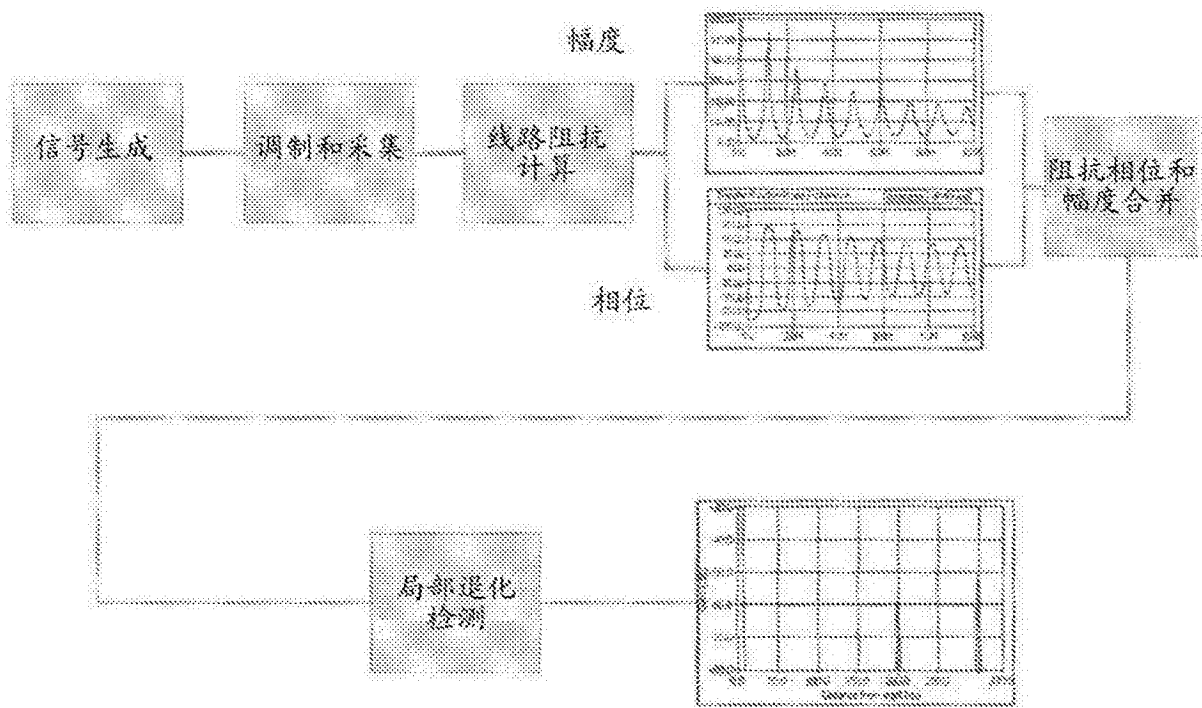


图2(现有技术)

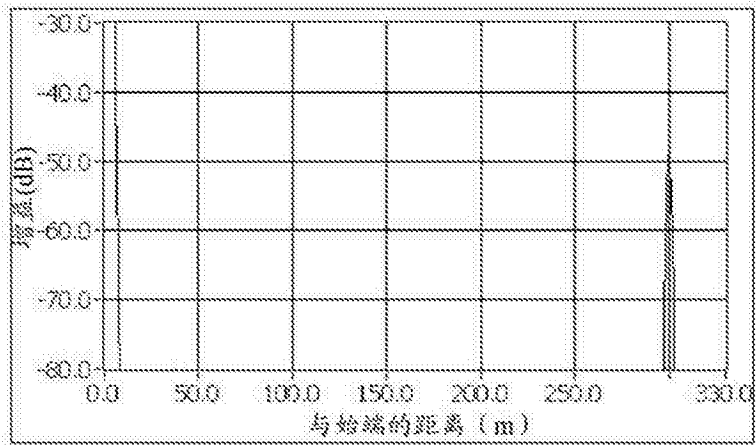


图3(现有技术)

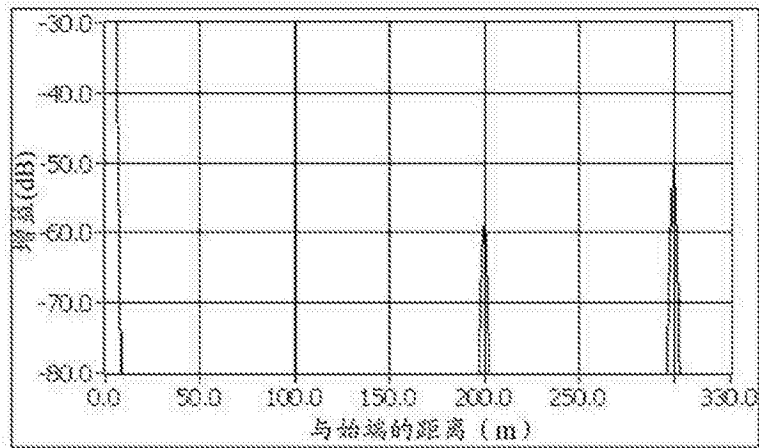


图4(现有技术)

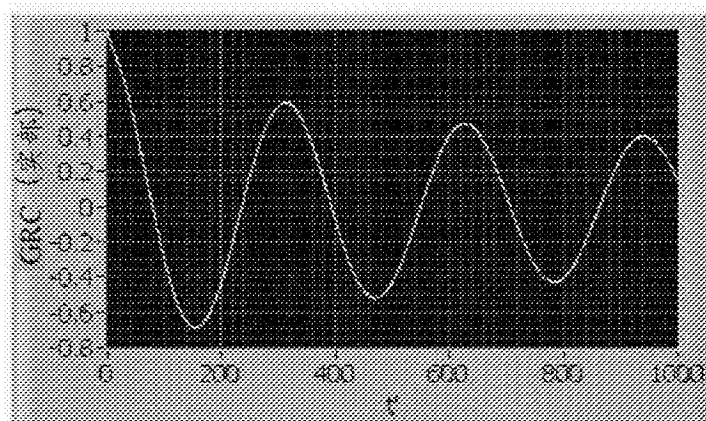


图5

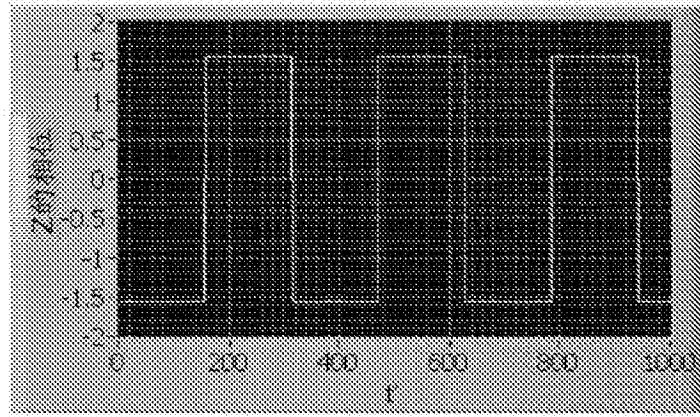


图6

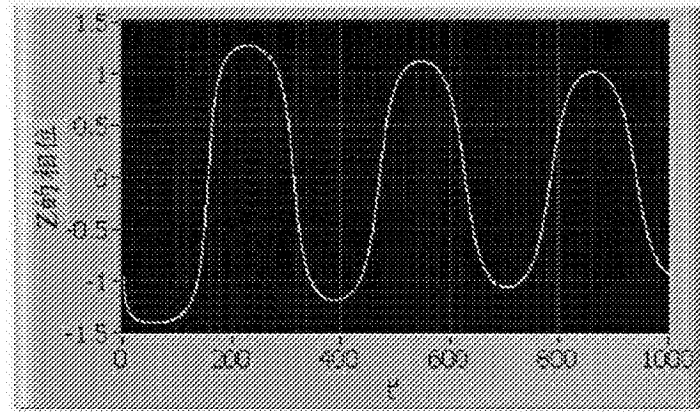


图7

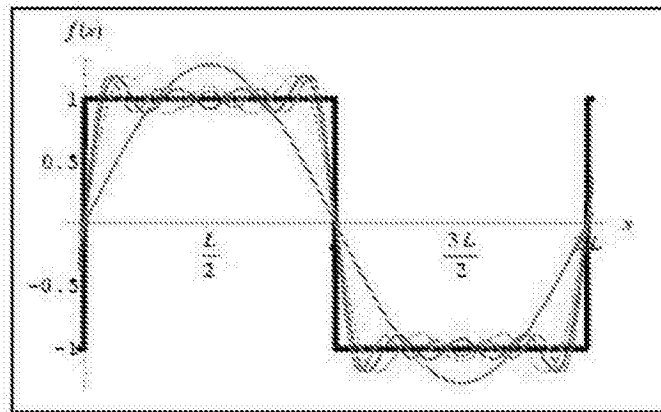


图8

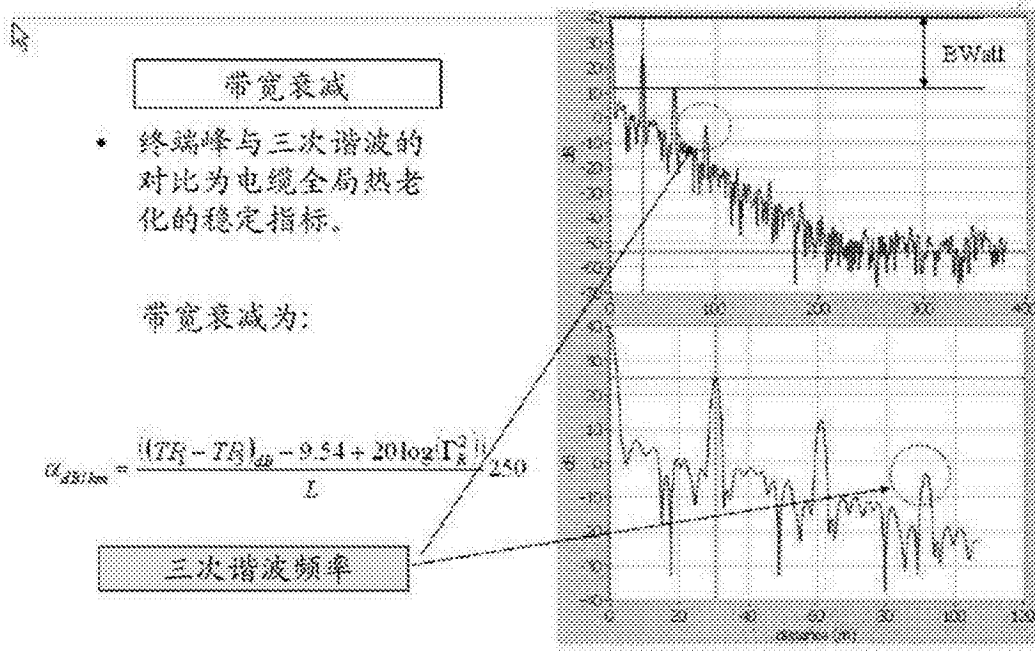


图9

区分C和L对LIRA老化指标的影响

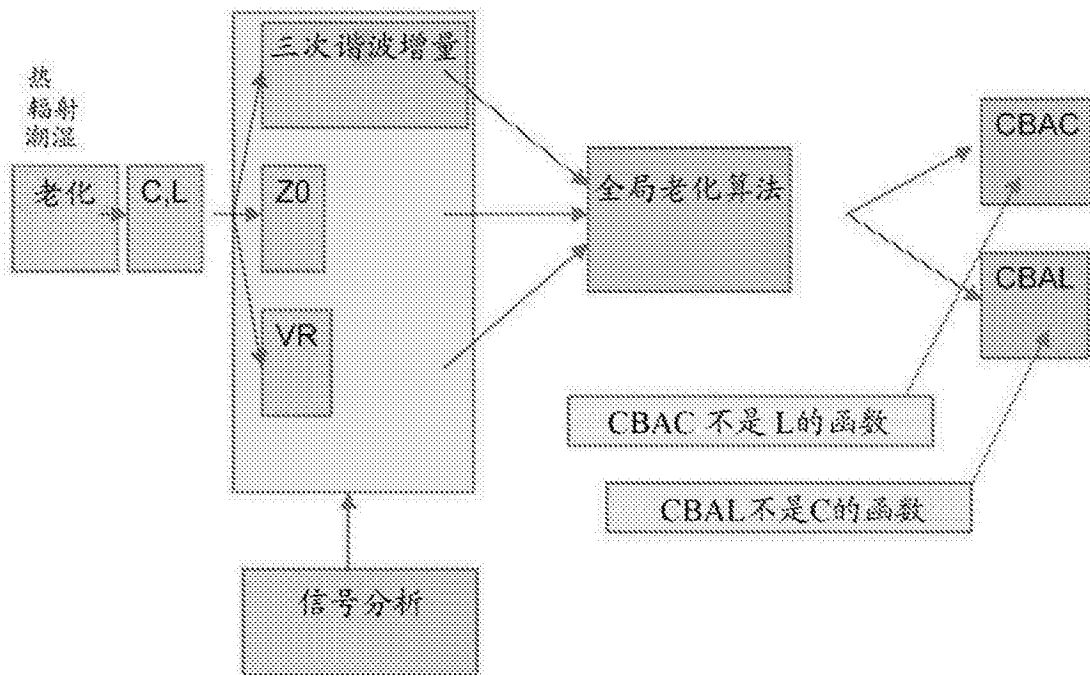


图10

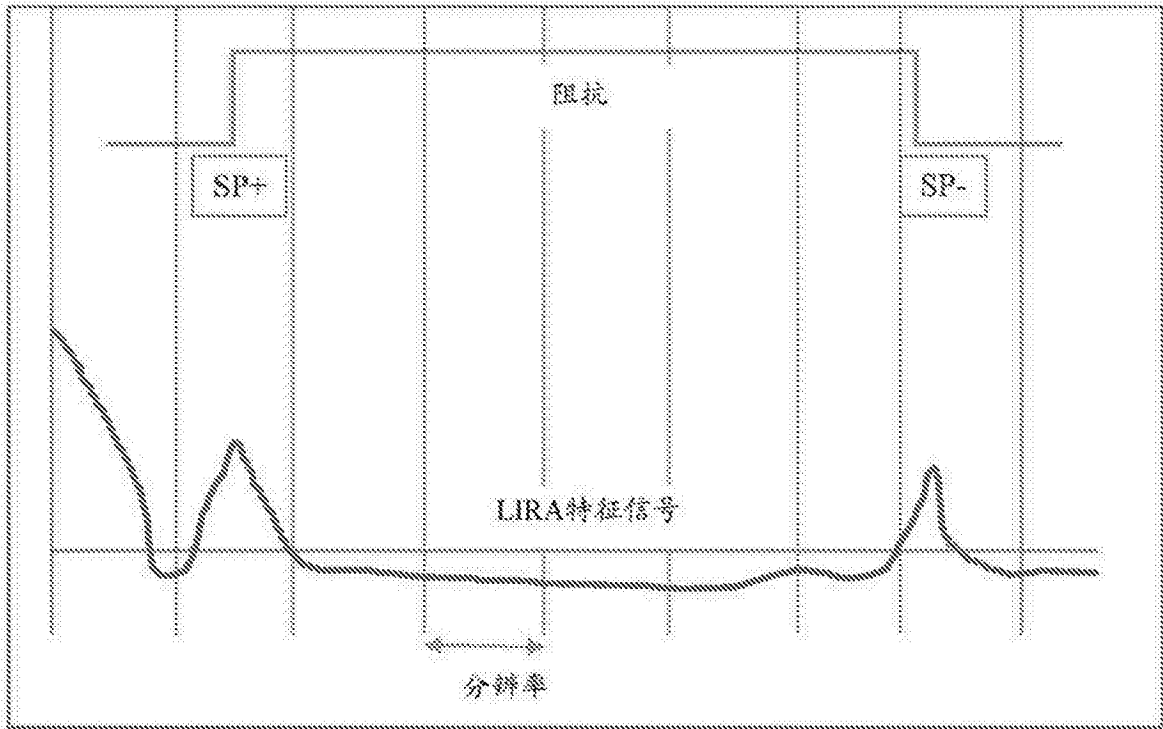


图11具有较高阻抗的段,段长于LIRA分辨率

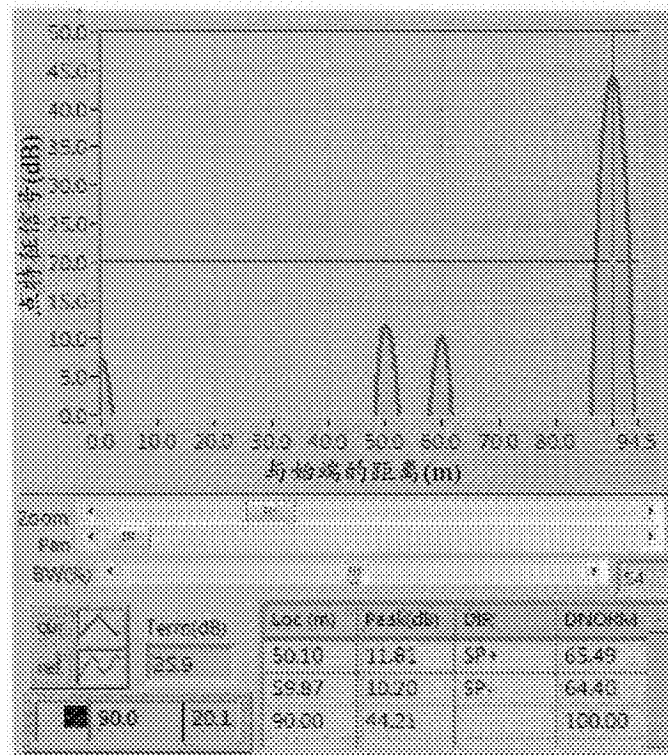


图12对于10m阻抗上升 (-5pF/m, 分辨率=1.5m) 的LIRA特征信号

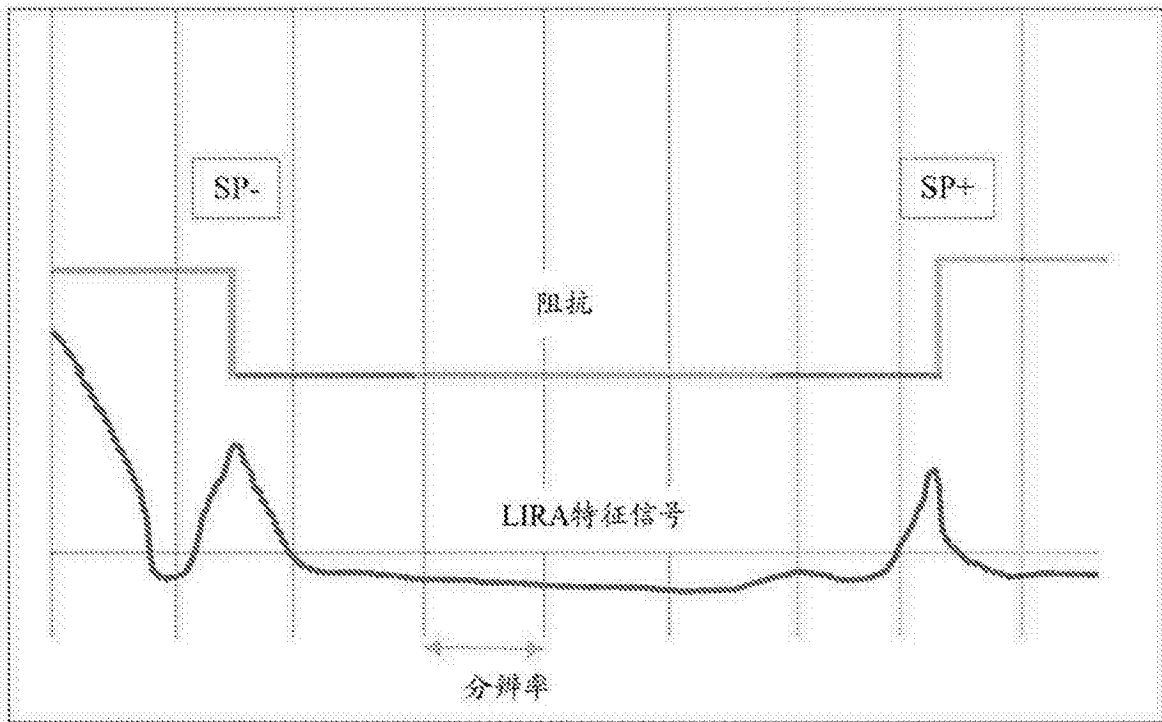


图13具有较低阻抗的段,段长于LIRA分辨率

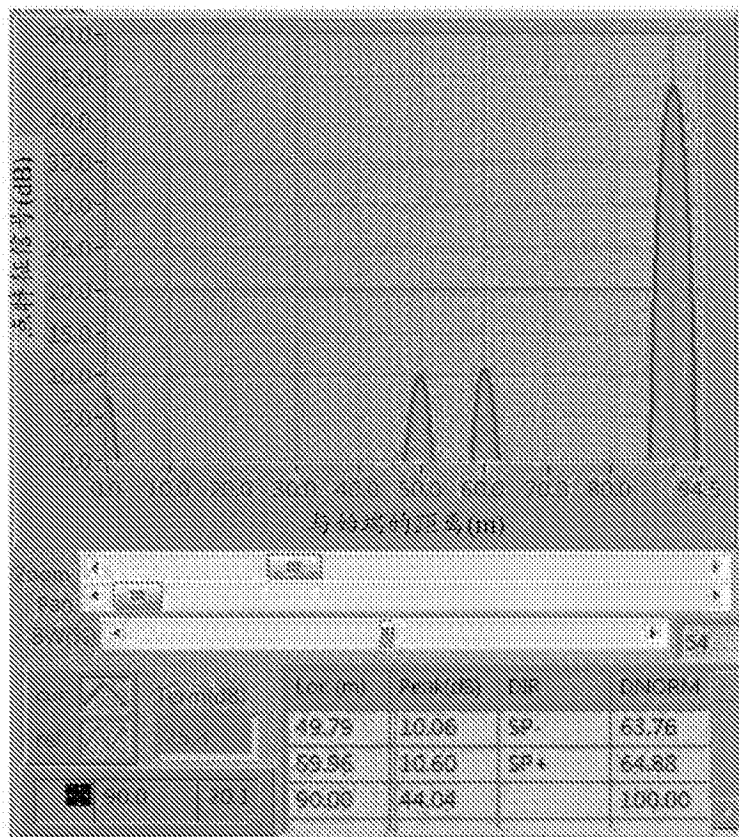


图14阻抗下降 (+5pF/m, 分辨率=1.5m) 的LIRA特征信号

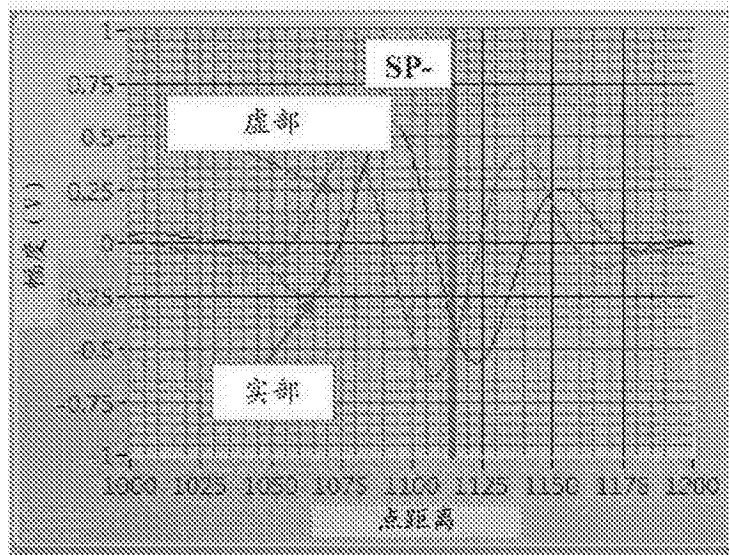


图15单阻抗变化、负 (SP-)。在变化位置处谱为纯负虚数

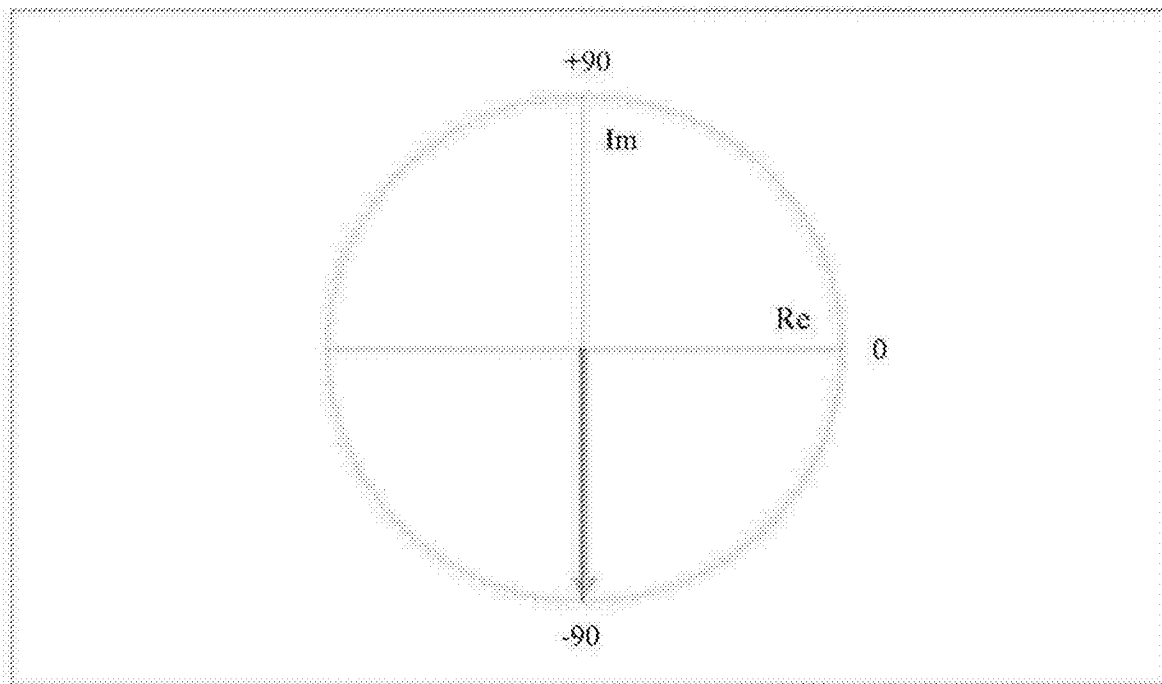


图16在变化位置处的相位阻抗谱的复数值：对于SP-为纯负虚数

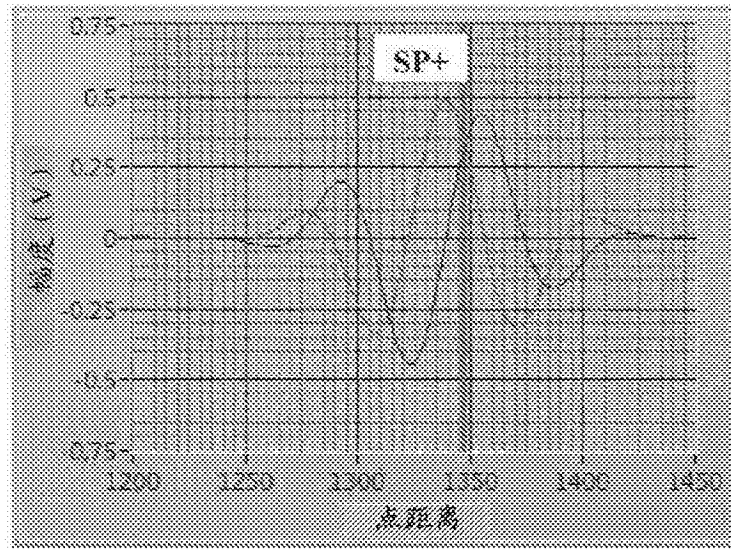


图17单阻抗变化,正 (SP+)。变化位置处的谱为纯正虚数

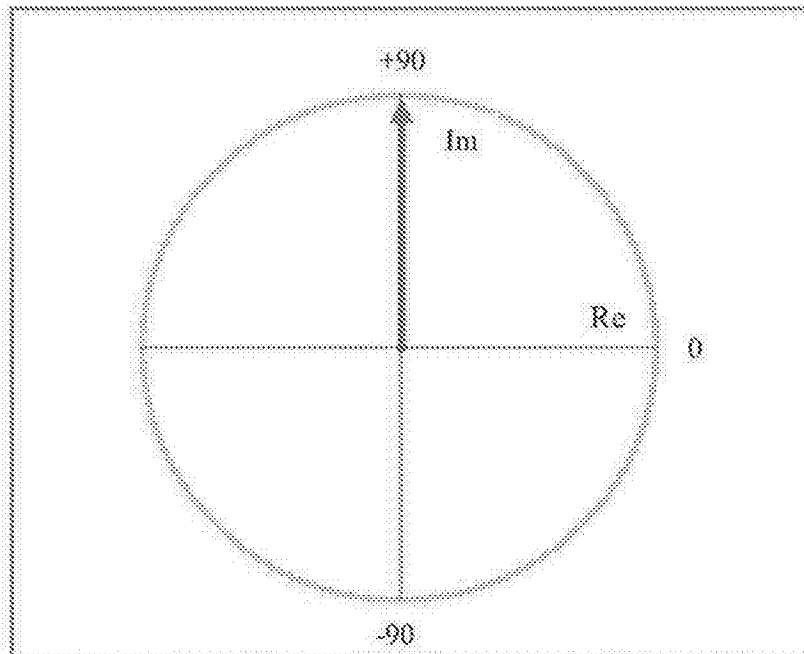


图18在变化位置处的相位阻抗谱的复数值:对于SP+为纯正虚数

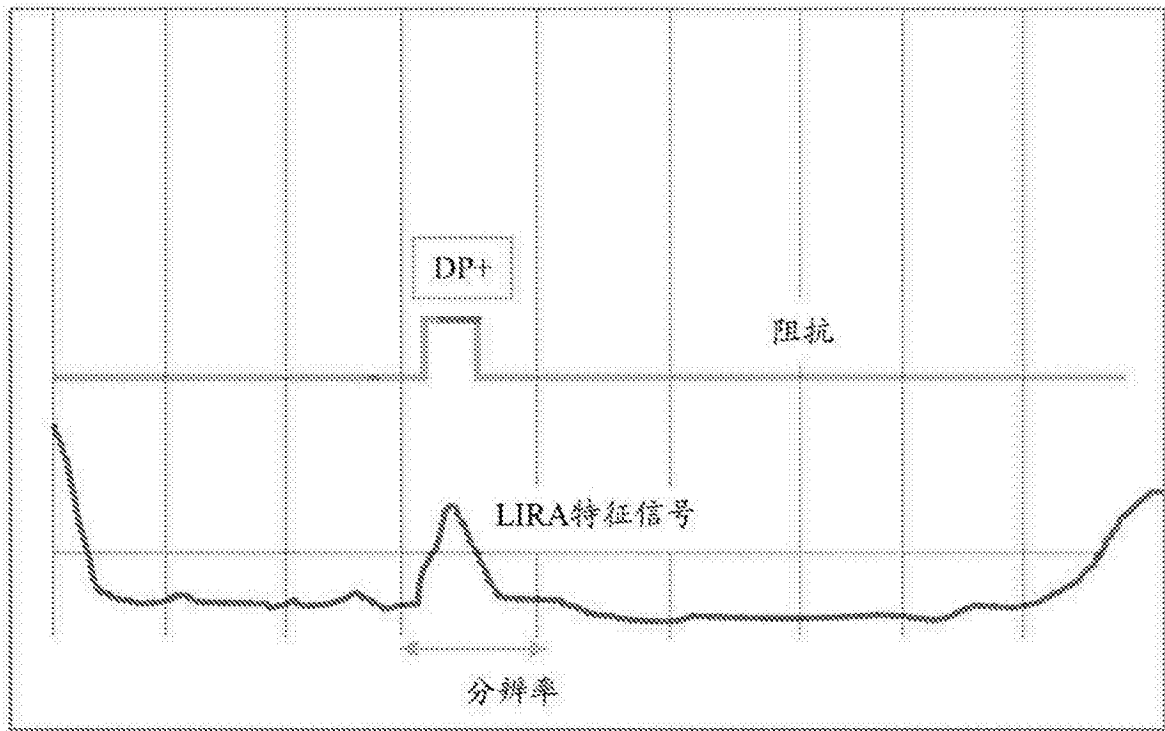


图19具有较高阻抗的段,段短于LIRA分辨率

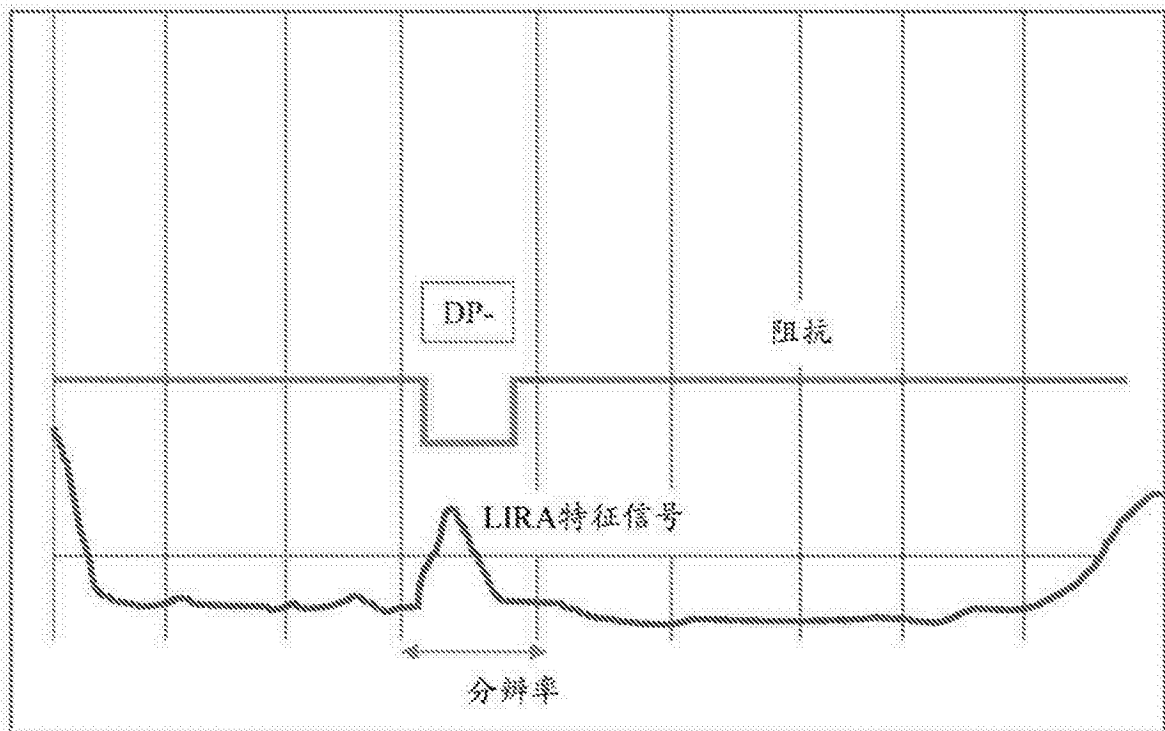


图20具有较低阻抗的段,段短于LIRA分辨率

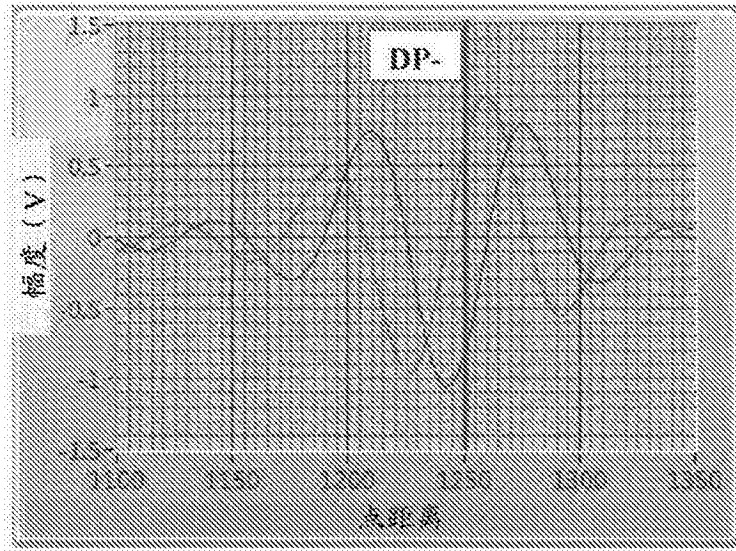


图21低阻抗点,短于分辨率(DP-)。该点处的谱为纯负实数

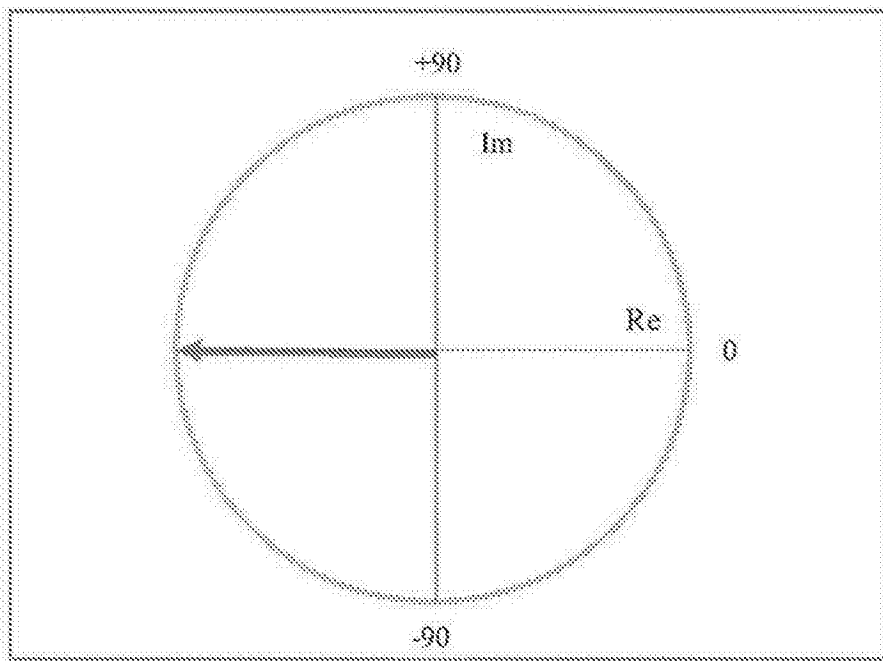


图22在变化位置处的相位阻抗谱的复数值:对于DP-为纯负实数

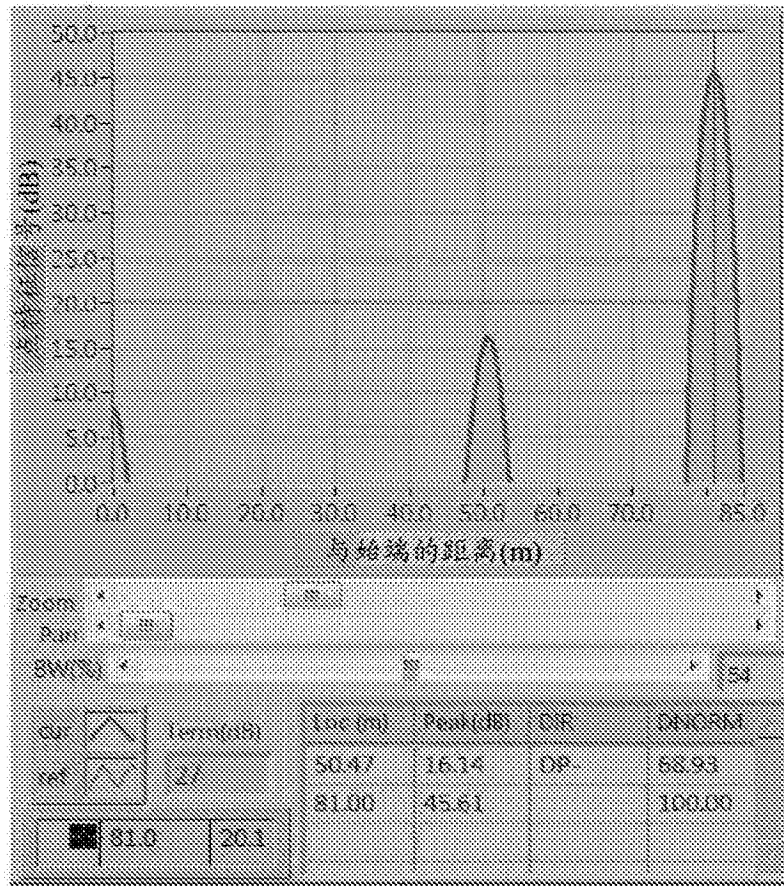


图23对于DP-点(对于1m为+5pF/m,分辨率=1.5m)的LIRA特征信号

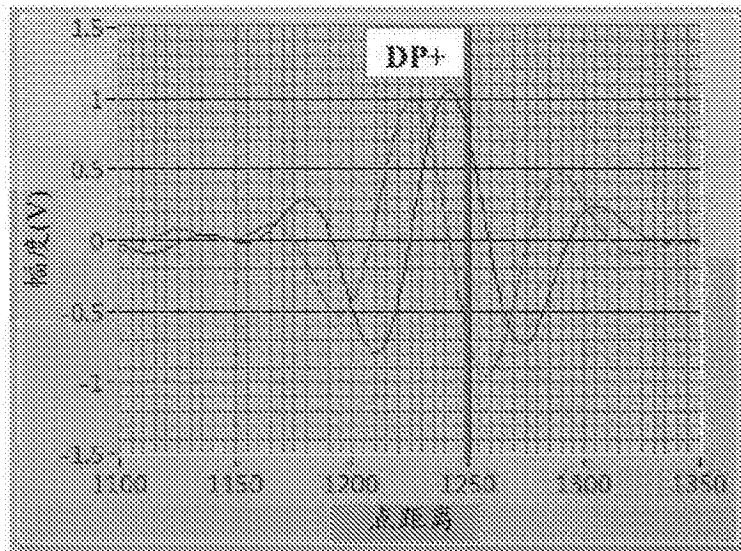


图24高阻抗点,短于分辨率(DP+)。该点处的谱为纯正实数

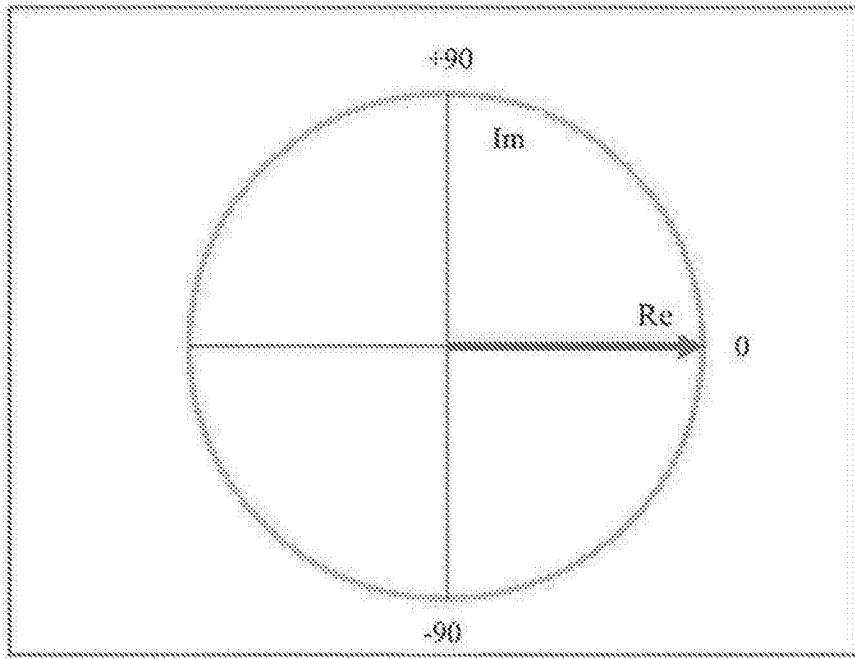


图25在变化位置处的相位阻抗谱的复数值:对于DP+为纯正实数

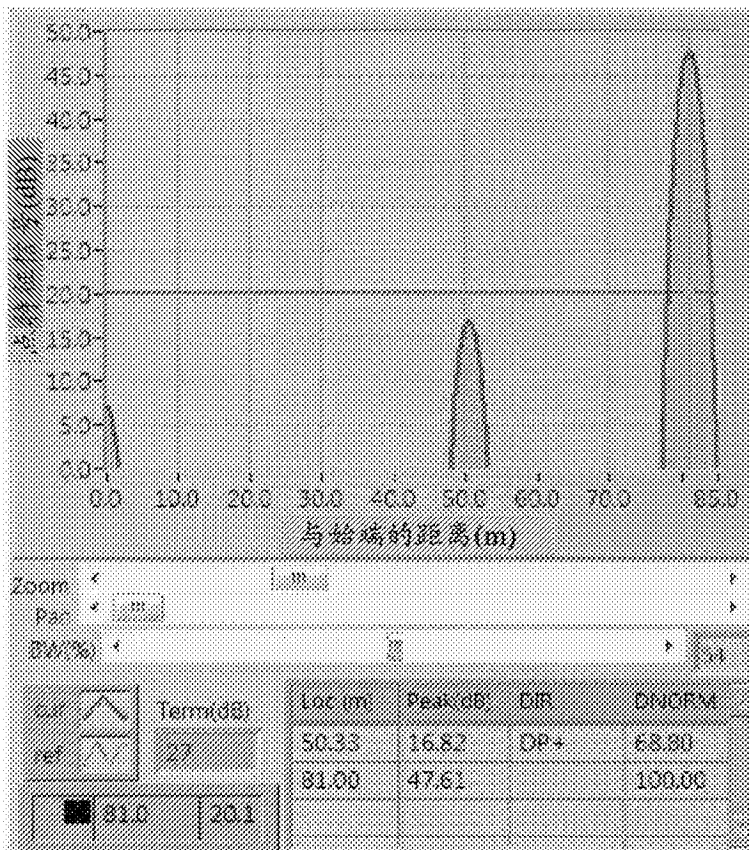


图26对于DP+点(对于1m为-5pF/m,分辨率=1.5m)的LIRA特征信号

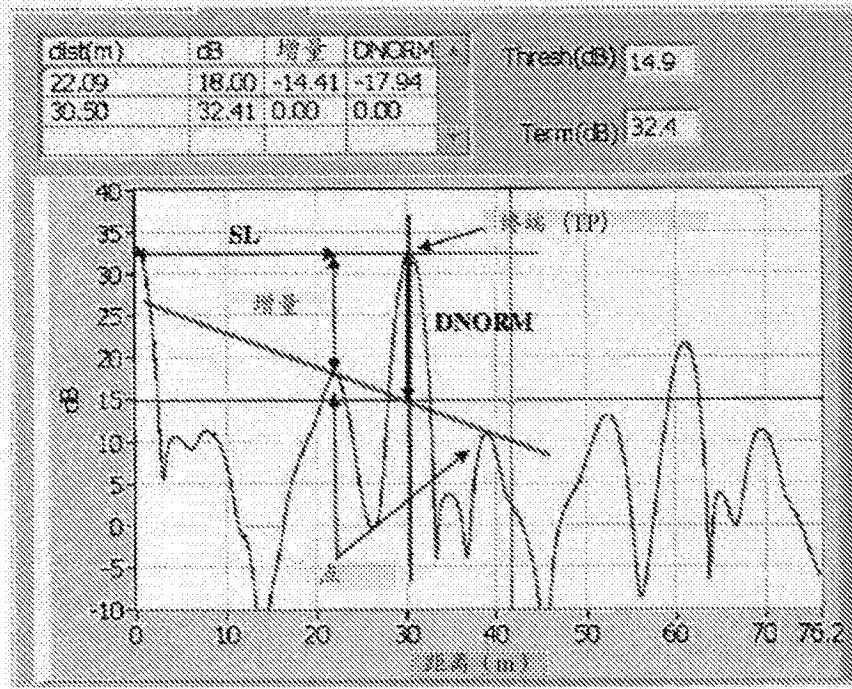


图27

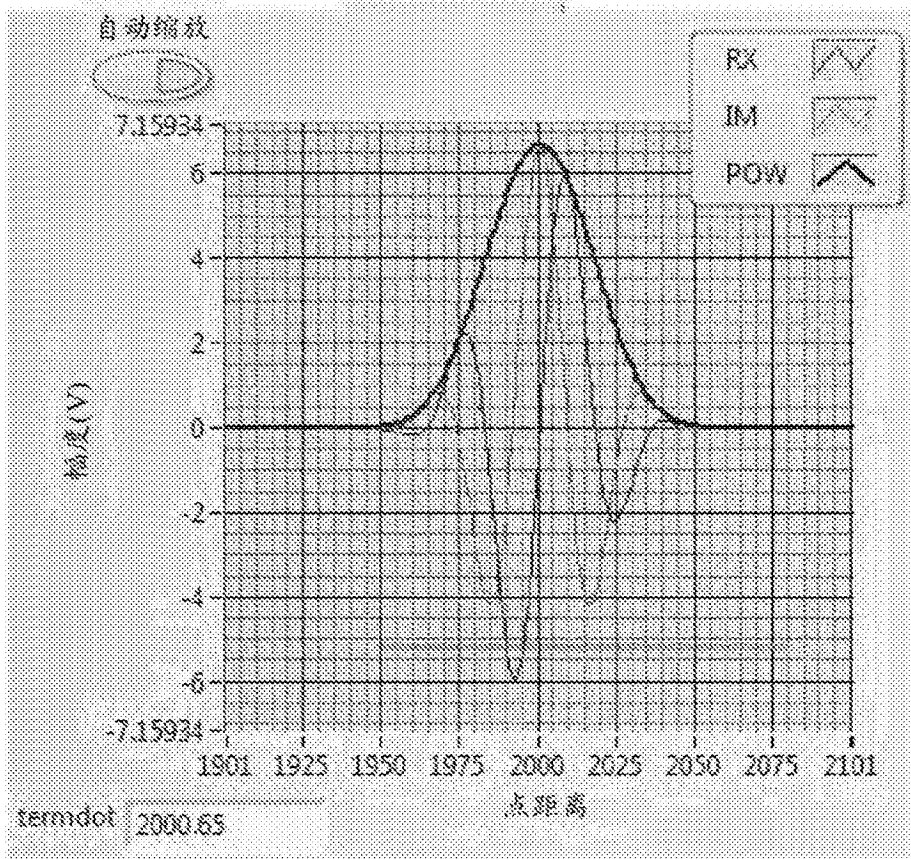


图28平衡状态下的BTS(好电缆)。BTS=0

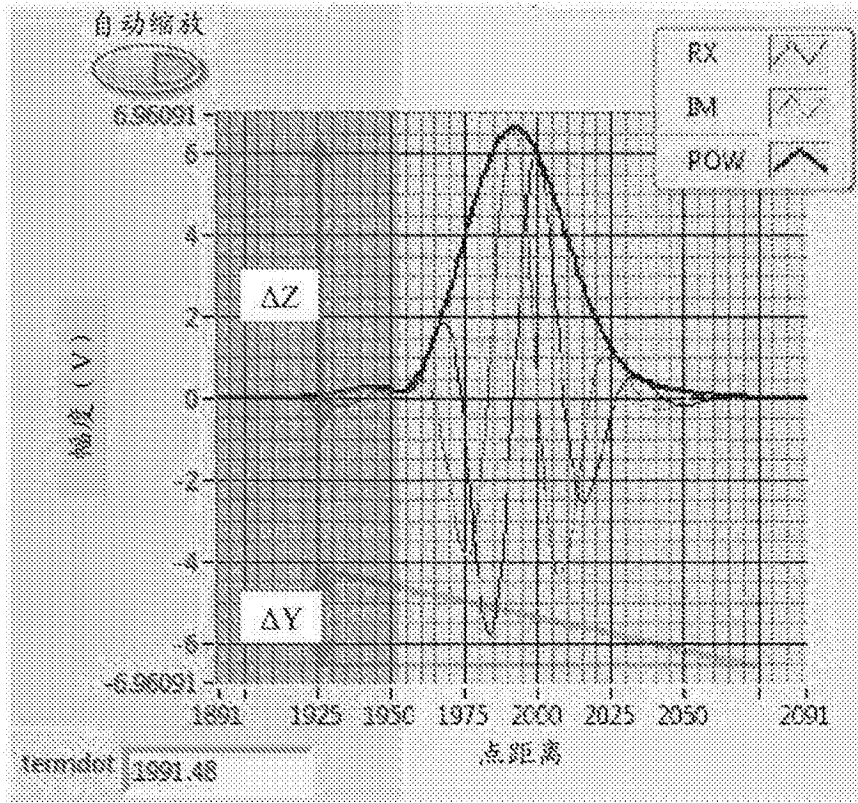


图29具有高电容(低阻抗)终端的BTS。(BTS>0) $BTS = \Delta Y / \Delta Z * 100$

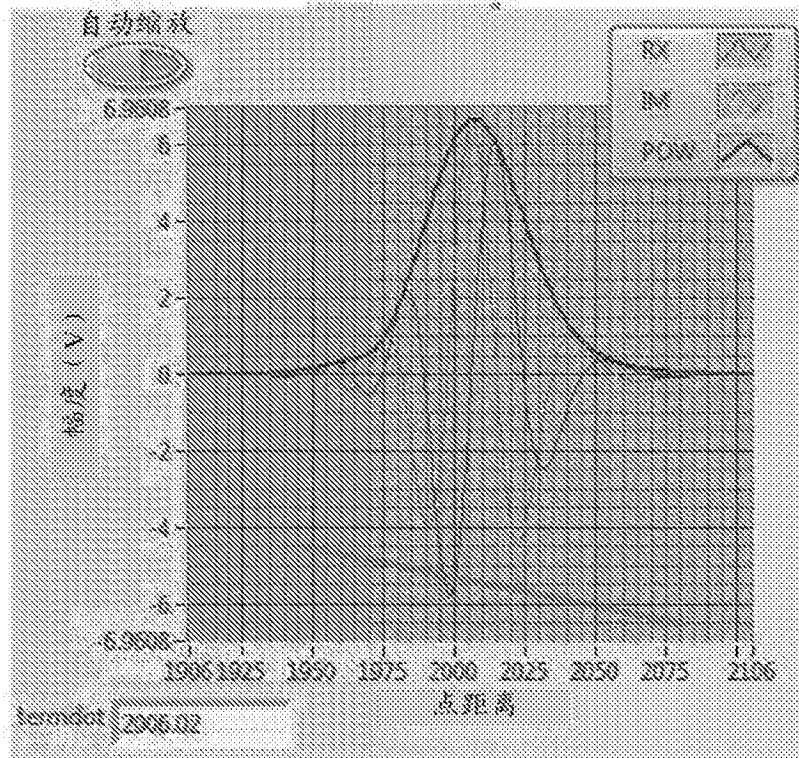


图30具有低电容(高阻抗)终端的BTS。(BTS<0)