



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1957555 B

(45) 授权公告日 2010.12.08

(21) 申请号 200580016118.2

(22) 申请日 2005.04.20

(30) 优先权数据

60/572,694 2004.05.20 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2006.11.20

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2005/013250 2005.04.20

(87) PCT申请的公布数据

W02005/117326 EN 2005.12.08

(73) 专利权人 埃克森美孚上游研究公司

地址 美国德克萨斯州

(72) 发明人 吕新友 L·J·斯尔恩卡

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

代理人 赵蓉民 薛峰

(51) Int. Cl.

H04L 7/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1378652 A, 2002.11.06, 全文.

US 5357253 A, 1994.10.18, 全文.

WO 03/104844 A1, 2003.12.18, 全文.

US 6326793 B1, 2001.12.04, 全文.

US 2002/0172329 A1, 2002.11.21, 全文.

CN 1325031 A, 2001.12.05, 说明书第2页第

7-22行、第3页第16-29行、第4页第1-2、10-15行及其附图1、4.

P. M. DUNCAN*, ET AL. "THE DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF A WIDEBAND ELECTROMAGNETIC SOUNDING SYSTEM USING A PSEUDO-NOISE SOURCE". GEOPHYSICS 45 8. 1980, 45(8), 1276-1296.

LUCY MACGREGOR, ET AL. "ELECTRICAL RESISTIVITY STRUCTURE OF THE VALUFA RIDGE, LAU BASIN, FROM MARINE CONTROLLED-SOURCE ELECTROMAGNETIC SOUNDING". GEOPHYS. J. INT. (2001) 146. 2001, 217-236.

S. ELLINGSRUD, ET AL. "REMOTE SENSING OF HYDROCARBON LAYERS BY SEABED LOGGING (SBL): RESULTS FROM A CRUISE OFFSHORE ANGOLA". THE LEADING EDGE 21 10. 2002, 21(10), 972-982.

T. EIDESMO, ET AL. "SEA BED LOGGING (SBL), A NEW METHOD FOR REMOTE AND DIRECT IDENTIFICATION OF HYDROCARBON FILLED LAYERS IN DEEP WATER AREAS". FIRST BREAK 20 3. 2002, 20(3), 144-152.

审查员 苗雨

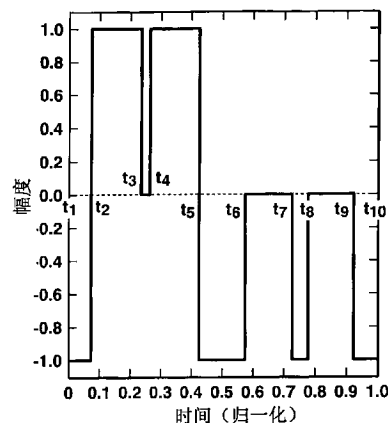
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 8 页

(54) 发明名称

产生用于受控源电磁测量的对数频谱波形的
方法和装置

(57) 摘要

用于受控源电磁测量的波形。所述波形具有包括三个或更多个频率的频谱,这些频率在对数频率刻度上以基本相等的间隔隔开,并跨越大约一个十倍频程或更多的带宽,所述频率中的至少三个具有大致相等的相应幅度。



1. 一种产生用于地下电磁测量的周期源波形的方法,其包括切换基本为恒定电压的直流电源,并按预先选择的顺序改变所述直流电源的输出极性,所述顺序被设计为提供一个频谱,该频谱包括在对数频率刻度上以基本相同的间隔隔开的三个或更多个频率,且覆盖大约一个十倍频程或更多的带宽,所述频率中的至少三个具有相应的幅度 A,其基本等于或大于所述频谱中任何其它频率的幅度,所述三个或更多个频率中的剩余频率具有至少 0.2A 的相应幅度。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述周期源波形具有周期 T,且所述预先选择的顺序为下列顺序,以所示出的次序进行或与其相反的次序进行:

- a) 将所述直流电源打开为第一输出极性,持续时间为 $19/256T$;
- b) 将所述直流电源反转至第二输出极性,持续时间为 $41/256T$;
- c) 将所述直流电源关断,持续时间为 $T/32$;
- d) 将所述直流电源打开为所述第二输出极性,持续时间为 $41/256T$;
- e) 将所述直流电源反转到所述第一输出极性,持续时间为 $39/256T$;
- f) 将所述直流电源关断,持续时间为 $19/128T$;
- g) 将所述直流电源打开为所述第一输出极性,持续时间为 $13/256T$;
- h) 将所述直流电源关断,持续时间为 $19/128T$;和
- i) 将所述直流电源打开为所述第一输出极性,持续时间为 $19/256T$ 。

3. 根据权利要求 2 所述的方法,其中所述第一输出极性为负,所述第二输出极性为正。

4. 根据权利要求 2 所述的方法,其中所述第一输出极性为正,所述第二输出极性为负。

5. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述周期源波形具有周期 T,且所述预先选择的顺序为下列顺序,以所示出的次序进行或以与其相反的次序进行:

- a) 将所述直流电源关断,持续时间为 $3/256T$;
- b) 将所述直流电源打开为第一输出极性,持续时间为 $9/128T$;
- c) 将所述极性反转至第二输出极性,持续时间为 $85/256T$;
- d) 将所述直流电源反转到所述第一输出极性,持续时间为 $5/64T$;
- e) 将所述直流电源关断,持续时间为 $5/512T$;
- f) 将所述直流电源打开为所述第一输出极性,持续时间为 $45/512T$;
- g) 将所述直流电源反转至第二输出极性,持续时间为 $35/512T$;
- h) 将所述直流电源反转至所述第一输出极性,持续时间为 $15/256T$;
- i) 将所述直流电源关断,持续时间为 $7/128T$;
- j) 将所述直流电源打开为所述第一输出极性,持续时间为 $33/512T$;
- k) 将所述直流电源反转至第二输出极性,持续时间为 $37/512T$;
- l) 将所述直流电源反转至所述第一输出极性,持续时间为 $5/64T$;和
- m) 将所述直流电源关断,持续时间为 $7/512T$ 。

6. 根据权利要求 5 所述的方法,其中所述第一输出极性为负,所述第二输出极性为正。

7. 根据权利要求 5 所述的方法,其中所述第一输出极性为正,所述第二输出极性为负。

8. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述直流电源为电池或其他直流电源。

9. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述直流电源通过对一交流电压源进行整流合成一直流输出。

产生用于受控源电磁测量的对数频谱波形的的方法和装置

[0001] 相关申请的交叉参考

[0002] 本申请要求 2004 年 5 月 20 日提交的美国临时专利申请第 60/572,694 号的权益。

技术领域

[0003] 本发明一般涉及地球物理勘探领域,特别是涉及对地下结构进行的受控源电磁 (“CSEM”) 测量。具体地,本发明是用于产生 CSEM 场的改进源波形。

背景技术

[0004] 受控源电磁地球物理测量使用人造源产生电磁场激励地球,并在地球表面、海底、大气中或钻孔内配置接收器仪器来测量产生的电场和磁场,即地球对激励源的响应。图 1 说明了离岸 CSEM 测量的基本组成。船在海底区域 13 上拖着潜入水中的 CSEM 发射器 11。然后对接收器 12 测量到的电场和磁场进行分析,以确定地下或海底的地球结构的电阻率。该技术一直应用在滨岸矿物勘探、海洋结构研究和离岸石油和矿产资源勘探中。参见 A.D. Chave, S. Constable and R. N. Edwards, in *Electromagnetic Method in Applied Geophysics* (ed. M. N. Nambighian), Vol. 2, 931-966, Society of Exploration Geophysicists; L. MacGregor, M. Sinha, and S. Constable, *Geophy. J. Im.* 146, 217-236 (2001); 以及 S. Ellingsrud, T. Eidesmo, S. Johansen, M. C. Sinha, L. M. MacGregor, and S. Constable, *The Leading Edge*, 972-982 (2002); T. Eidesmo, S. Ellingsrud, L. M. MacGregor, S. Constable, M. C. Sinha, S. Johansen, F. N. Kong, and H. Westerdahl, *First Break* 20.3, 144-152 (2002)。

[0005] 发射器通过将选择的低频率周期波形的电流注入地球或海水 / 海底中而产生电磁 (EM) 场。对于内陆和空中 CSEM 测量,通常在频率范围为 0.1Hz 到 50kHz 内进行。由于海底具有低电阻率,离岸 CSEM 测量通常在低频率范围 (0.01Hz 到 100Hz) 内进行,以探测到足够的深度。发射波形的形状决定了其频谱。换言之,发射器波形控制频率内容,组成频率的分布和相对幅度。这是根据傅立叶分析得到的,其中任一函数能够被表示成不同频率的一系列正弦或余弦函数。函数与正弦波越不相似,则项数越多,因此在傅立叶扩展中需要更多的频率来得到该函数良好近似。较低频率比较高频率更能穿透到地球表面下更深的地方。在目前的测量中,由于操作源飞机或船只的费用很高,所以飞机搭载发射器在地球表面上飞行或船只拖动发射器都仅仅沿每一测量线进行一次。由于地球各个深度都包含电结构,所以很希望使用一致的高功率的多个源频率,从而使得仅进行一次源拖动就能探测到一定的深度范围。因此,为了高效获得数据并尽可能满足测量目标,希望发射器波形具有一定的特征。其频谱应该具有多个频率,分散在足够大的频率范围 (带宽) 以探测感兴趣的深度范围。以每个这样的频率发射的能量尽可能或根据实际应相等。

[0006] 可使用多种波形。最简单的一个为正弦波,但其只包含一个频率。方波为一种简单且目前使用广泛的波形,尤其是示于图 2A 的对称波形,其正负极性具有相同的时间持续值。这种简单的波形从技术角度上易于产生,且能够提供有用的频率范围,所以已经用于

CSEM 工作中;参见 L. M. MacGregor, Electromagnetic investigation of the Reykjanes Ridge near 58° North, Ph. D. Dissertation, Cambridge, 84-86 (1997)。对称的方波在其频率中只有奇次谐波,且随着频率的增加,谐波幅度迅速减小,如图 2B 所示。由于受到固定发送器功率的限制,很难收集高次谐波的高信噪比数据,除非将极多周期的数据相加。图 2A 的横坐标值进行了标准化或归一化,以使波形的周期统一,纵坐标值也进行了归一化,以具有统一的幅度。图 2B 所示频谱的频率值通过除以基本频率,也进行了归一化,即为波形的重复周期的倒数。对于本文所有示出波形和频谱的附图都进行了同样类型的归一化。

[0007] 由 Constalbe 和 Cox 设计的特殊波形,其一次和三次谐波具有相同且相对较大的幅度(以此频率发射功率)。图 3A 和图 3B 分别示出了这种“Cox”波形及其频谱。令人遗憾的是,这两种谐波所覆盖的频带很窄[3:1 比率],且随着频率增加,高次谐波的幅度减小很快。

[0008] 伪随机二进制序列(“PRBS”)波形已为人们所知,其能提供跨越更宽频带的更有用的频率。如,参考 P. M. Duncan et al., Geophysics 45, 1276-1296 (1980); 以及 S. L. Helwig, et al., SEG Annual Meeting Extended Abstracts, 283-285 (1999)。图 4A 所示为四级移位寄存器产生的 PRBS,图 4B 所示为其频谱。由 PRBS 提供的频率在线性频率刻度上均匀间隔开。

[0009] 用于针对一定的地下电磁成像问题设计最优时域发射器波形的通用数值方法已在 (Cherkaeva, E. and Tripp, A. C., SEG Annual Meeting Extended Abstracts, 438-441 (1997)) 中进行了教导。本领域技术人员很容易得到这种优化波形的傅立叶变换频率。然而,Cherkaeva 和 Tripp 的方法需要目标性质和深度的先验说明,且在所教导的探测单埋藏层的例子中,所述波形包含单一频率,其幅度随时间正弦地变化。

[0010] 在与此处描述的发明相关但没有直接应用的技术中, Hombostel 和 Thompson (美国专利第 6, 477, 113 号)教导了将专门的电磁源波形使用在电磁地震地球物理应用中,其中将源波形的频谱设计为与广播源频谱之外的频率有最小相关性。

发明内容

[0011] 在一个实施例中,本发明是用于电磁测量的周期源波形,该波形的频谱包括四个或更多个频率,这些在对数频率刻度上以基本相等的间隔隔开,且覆盖大约一个十倍频程或更多的带宽,所述频率中的至少三个具有相应的幅度 A,其基本等于或大于频谱中的任何其它频率的幅度,所述四个或更多个频率中的剩余频率具有至少为 0. 2A 的相应幅度。

[0012] 在另一个实施例中,本发明是用于电磁测量的周期源波形,该波形具有周期 T,且包括方波脉冲片段和零幅度片段,所述方波脉冲的幅度全都基本相同,所述片段具有的极性、大致的时间持续值以及大致的连接顺序如下:

[0013] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $19/256 T$;

[0014] 第二极性的方波脉冲,持续时间为 $41/256 T$;

[0015] 零幅度,持续时间为 $T/32$;

[0016] 第二极性的方波脉冲,持续时间为 $41/256 T$;

[0017] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $39/256 T$;

[0018] 零幅度,持续时间为 $19/128 T$;

- [0019] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $1^3/_{256}T$;
- [0020] 零幅度,持续时间为 $1^9/_{128}T$;和
- [0021] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $1^9/_{256}T$ 。
- [0022] 在第三实施例中,本发明是用于电磁测量的周期源波形,该波形具有周期 T ,并包括方波片段和零幅度片段,所述方波脉冲的幅度全都是基本相同的,所述片段居于的极性、大致的时间持续值以及大致的连接顺序如下 :
- [0023] 零幅度,持续时间为 $3/_{256}T$;
- [0024] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $9/_{128}T$;
- [0025] 第二极性的方波脉冲,持续时间为 $8^5/_{256}T$;
- [0026] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $5/_{64}T$;
- [0027] 零幅度,持续时间为 $5/_{512}T$;
- [0028] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $4^5/_{512}T$;
- [0029] 第二极性的方波脉冲,持续时间为 $3^5/_{512}T$;
- [0030] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $1^5/_{256}T$;
- [0031] 零幅度,持续时间为 $7/_{128}T$;
- [0032] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $3^3/_{512}T$;
- [0033] 第二极性的方波脉冲,持续时间为 $3^7/_{512}T$;
- [0034] 第一极性的方波脉冲,持续时间为 $5/_{64}T$;和
- [0035] 零幅度,持续时间为 $7/_{512}T$ 。
- [0036] 本发明替换性实施例可通过反转上面所述的片段顺序来产生,而且对于这两种顺序,将第一极性指定为正,将第二极性指定为负,或者将极性反转。这些对称性适用于本发明的任一实施例。本发明任一波形的任一时间移动也会产生本发明的一个实施例。
- [0037] 在另一实施例中,本发明是产生上述任一波形的任一方法。

附图说明

- [0038] 通过参考下文的详细描述以及附图,可以更好地理解本发明及其优点,附图中 :
- [0039] 图 1 是一个示意图,说明了使用水平电偶极子源进行离岸受控源电磁测量 ;
- [0040] 图 2A 和 2B 分别是一个对称方波的曲线图及其频谱图 ;
- [0041] 图 3A 和 3B 分别是 Cox 和 Constabel 为 CSEM 测量设计的波形的曲线图及其频谱图 ;
- [0042] 图 4A 和 4B 分别是使用 4 级伪随机二进制序列的二进制编码波形的曲线图及其频谱图 ;
- [0043] 图 5A 和 5B 分别是本发明一个具体实施例中波形的曲线图及其频谱图 ;
- [0044] 图 6A 和 6B 分别是本发明另一具体实施例中波形的曲线图及其频谱图 ;
- [0045] 图 7A 和 7B 分别是本发明又一具体实施例中波形的曲线图及其频谱图 ;
- [0046] 图 8 是使用整流正弦曲线产生的图 5A 实施例的波形的曲线图,即来自发射设备的准直流电压或电流。
- [0047] 下面将结合本发明的优选实施例对其进行描述。然而,尽管下文的描述是针对本发明的一个具体实施例或具体使用作出的,但其仅是说明性的,不能被解释为对本发明范

围的限制。相反,其应覆盖所有包括在所附权利要求定义的本发明的精神和范围内的替换、修改或等同实施例。

具体实施方式

[0048] 本发明的实质在于:用于 CSEM 测量的源波形应优选具有这样的频谱,在该频谱中,具有较大相关幅度的期望频率在对数刻度上基本上均匀地间隔开(即,以大致相等的间隔),并覆盖一有用带宽。众所周知,对于低频电磁场而言,根据集肤效应现象,随着频率和介质导电性的降低,有效探测深度增加(J. A. .Stratton, Electromagnetic Theory, MacGraw-Hill(1941);B. R. Spies, Geophysics 54, 872-888(1989))。因为大多数 CSEM 数据在距源相对较远的地方收集得到,所以近场几何效应可以忽略,当深度大于一些源电偶极子长度时,一定频率的电磁场会随深度呈指数衰减。本发明使 CSEM 测量能够在一次源拖动中利用多个频率获得更深的探测深度,并对地下某一深度进行采样(在浅层深度上的密度要大于更深处的密度),这与低频电磁场的扩散特性是一致的。

[0049] 本发明的一个实施例是图 5A 所示的波形。该波形的开始时间,零幅度与时间轴交点和结束时间为 $t_1 = 0.0$, $t_2 = 19/256$, $t_3 = 15/164$, $t_4 = 17/64$, $t_5 = 109/256$, $t_6 = 37/64$, $t_7 = 93/128$, $t_8 = 199/256$, $t_9 = 237/256$, $t_{10} = 1.0$, 这里 $t_1, t_2, \dots, t_{10}$ 是以该波形的可调周期 (T) 的分数表示的归一化时间。该波形可以按表 1 构造成。

[0050] 表 1

归一化的时间	归一化幅度
t_1-t_2	-1.0
t_2-t_3	1.0
t_3-t_4	0.0
t_4-t_5	1.0
t_5-t_6	-1.0
t_6-t_7	0.0
t_7-t_8	-1.0
t_8-t_9	0.0
t_9-t_{10}	-1.0

[0051] 该波形的频谱如图 5B 所示。表 2 列出了五个最大幅度的归一化频率和幅度。本发明的波形有 3 个频率的幅度几乎精确相同,其在图 5B 的对数刻度上有恒定的间隔。最大的五个幅度的频率几乎均匀地 分布在 对数刻度上,并覆盖超过一个十倍频程的频带。

[0052] 表 2

归一化频率	1	2	4	10	16
幅度	0.611	0.610	0.610	0.307	0.174

[0053] 本发明的又一实施例是图 6A 所示的波形。该波形的零幅度和时间轴相交在 $t_1 = 0.0$, $t_2 = 3/256$, $t_3 = 21/256$, $t_4 = 53/128$, $t_5 = 63/128$, $t_6 = 257/512$, $t_7 = 151/256$, $t_8 = 337/512$, $t_9 = 367/512$, $t_{10} = 395/512$, $t_{11} = 107/128$, $t_{12} = 465/512$, $t_{13} = 505/512$, $t_{14} = 1.0$, 这里 $t_1, t_2, \dots, t_{14}$ 是以该波形的可调周期 (T) 的分数表示的归一化时间。该波形可以根据表 3 构造成。

[0054] 表 3

归一化的时间	归一化幅度
--------	-------

t_1-t_2	0.0
t_2-t_3	-1.0
t_3-t_4	1.0
t_4-t_5	-1.0
t_5-t_6	0.0
t_6-t_7	-1.0
t_7-t_8	1.0
t_8-t_9	-1.0
t_9-t_{10}	0.0
$t_{10}-t_{11}$	-1.0
$t_{11}-t_{12}$	1.0
$t_{12}-t_{13}$	-1.0
$t_{13}-t_{14}$	0.0

[0055] 该波形的频谱如图 6B 所示。表 4 列出了四个最大幅度的归一化的频率和幅度。本发明的波形有 4 个频率的幅度几乎精确相同,其在图 5B 的对数刻度上有恒定的间隔。这 4 个频率所覆盖的带宽大约为一个十倍频程。

[0056]

表 4

归一化频率	1	2	4	8
幅度	0.596	0.598	0.595	0.595

[0057] 本发明的这些对数频谱波形因此满足了先前所述的 CSEM 波形的标准和本发明的附加要求,即在对数刻度上基本均匀地间隔开。使用这种波形,允许通过更好的频率分布利用一个源通道来探测更广的深度范围。

[0058] 对图 5A 和 6A 中的波形进行某些对称性改动还分别产生了图 5B 和 6B 的频谱,因此同样是本发明的优选实施例。例如,通过时间轴将任一波形进行反射 (reflect),即将极性反转,就可产生这种替换性实施例。类似地,通过 $t = T/2$ 线将任一波形进行反射。图 5A 或 6A 中波形的这种变形是本发明等同实施例。这两种波形还具有在时间刻度上平移不变的特性。

[0059] 可稍微对图 5A 所示的本发明的波形的时间轴的截取做些改动,可能高达 $\pm 5\%$ 或该范围内,而不会对频谱产生实质性影响。类似地,在幅度恒定不变的情况下,在高达 $\pm 10\%$ 或该范围内不会对频谱产生影响,其是许多用户认为不可接受的。也对极性反转的斜率进行类似的考虑。除了图 5A 和 6A 所示的具体实施例之外,在本发明的实施例中,波形优选具有至少三个频率 (在其傅立叶分解中),它们的幅度基本相同 (优选为 $\pm 20\%$,更优选地为 $\pm 10\%$),且在对数频率刻度上以基本相同 (相同的优选公差) 隔开。频谱中的其它频率具有较小的相应幅度。所述至少三个幅度相等的频率覆盖大约一个十倍频程或更多的带宽,或者,如果不是,所述频谱具有一个或多个附加频率,其幅度优选为幅度相等的频率的幅度的至少 20%,更优选地为至少 30%,其也以同样的基本相等 (在对数刻度上) 的频率彼此隔开并与前三个频率隔开,以使所有的 4 个或更多个这样的频率覆盖大约一个十倍频程或更多的带宽。如此处所使用的,“大约一个十倍频程”优选意味着最高频率和最低频率的比率至少为 8 : 1。对于一个具体应用,本发明的使用者将能够在上面推荐的公差中确定多大范围是可接受的。

[0060] 本领域技术人员将能设计出满足前述规范的许多波形 (除了图 5A 和 6A 的两个

具体实施例之外)。所有类似波形也包括在本发明的范围内。例如,其频谱具有五个在对数刻度上以严格相等的间隔隔开的峰值,并且具有几乎相等的相应幅度的波形,就是具有下述开始 时间、零幅度时间和结束时间(以周期的分数表示)的波形:0,0.017578125,0.037109375,0.080078125,0.171875,0.197265625,0.298828125,0.32421875,0.4140625,0.458984375,0.478515625,0.521484375,0.533203125,0.583984375,0.611328125,0.6328125,0.662109375,0.705078125,0.7421875,0.755859375,0.7890625,0.83203125,0.865234375,0.888671875,0.91015625,0.962890625,0.978515625 和 1,所述间隔(分别)具有下述归一化幅度,定义为:-1,0,-1,1,0,1,0,1,-1,0,-1,0,-1,1,0,1,-1,0,-1,0,-1,1,0,1,-1,0,-1,0,-1,1,0,1,-1,0 和 -1。此波形及其频谱在图 7A 和 7B 中示出。本领域技术人员能开发自己的产生具有均匀对数频谱的其它波形的的方法。一个方法就是将周期 T 分割成 N 个片段。每一片段可能的幅度限制在 -1、0 或 1。然后一个接一个地按照前面所述的标准检查幅度和间隔的不同组合。或者,也可以开始于具有一定数量的零交叉点的初始波形,然后调整零交叉点的位置,保持幅度固定,并检查每种情况的频谱。无论哪种方法,实验将占据很大部分,但经验的增加会增加成功的概率。实验者会发现幅度和几乎相等幅度频率的数量之间相存在折衷。优选的波形将取决于诸如测量目标和设备能力等因素。

[0061] 本发明的波形被合成,该合成通过对正弦波进行整流或者在给定时间进行切换,从而形成本发明波形的整流后的交流形式,如针对图 5A 波形的情况示于图 8 中的。或者,该波形可通过切换真正的直流(DC)电动源(如电池)来产生。本领域技术人员将很容易理解产生本发明波形的各种实际方法,所有这些方法都被认为是本发明方法的实施例。因为波形频谱中的最低频率(具有很大的关联幅度)通常为周期波形本身的频率(即 $1/T$),所以能通过调整波形的周期来控制可用源带宽所处的频率范围。

[0062] 出于图解说明的目的,上文的描述针对了本发明的具体实施例。然而,本领域技术人员将会意识到,对本文所述实施例进行许多修改和改动是可能的。例如,将本发明改进的波形用于空气传播应用,或地球表面的时域数据处理时,对同时穿过几个感兴趣的深度都是很有价值的。如所述权利要求所定义的,所有这样的修改和改动都处于本发明的范围内。

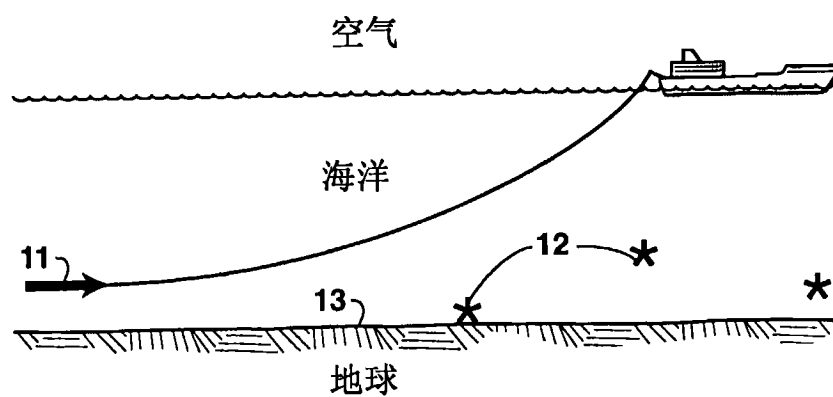


图 1 (现有技术)

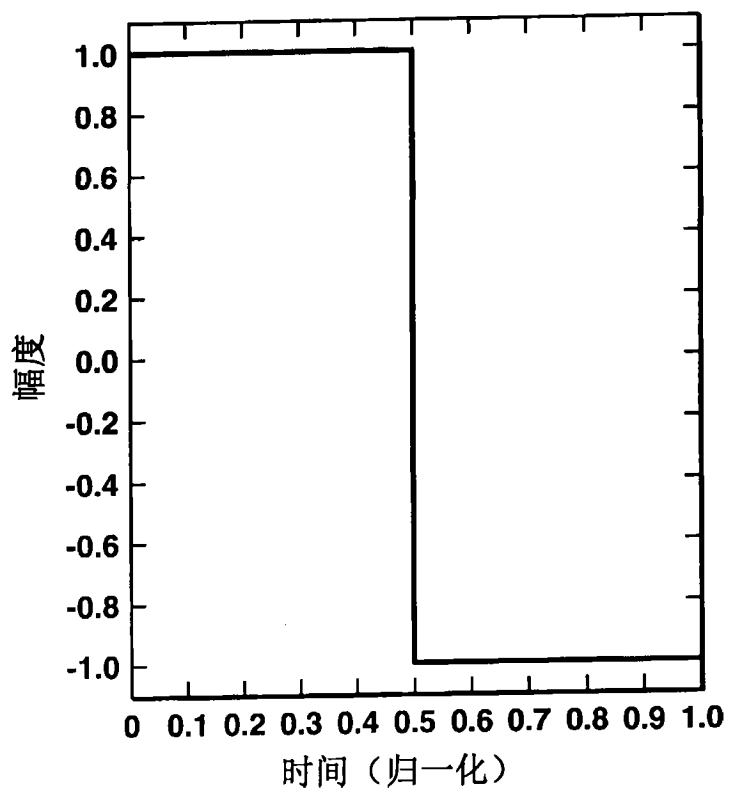


图 2A (现有技术)

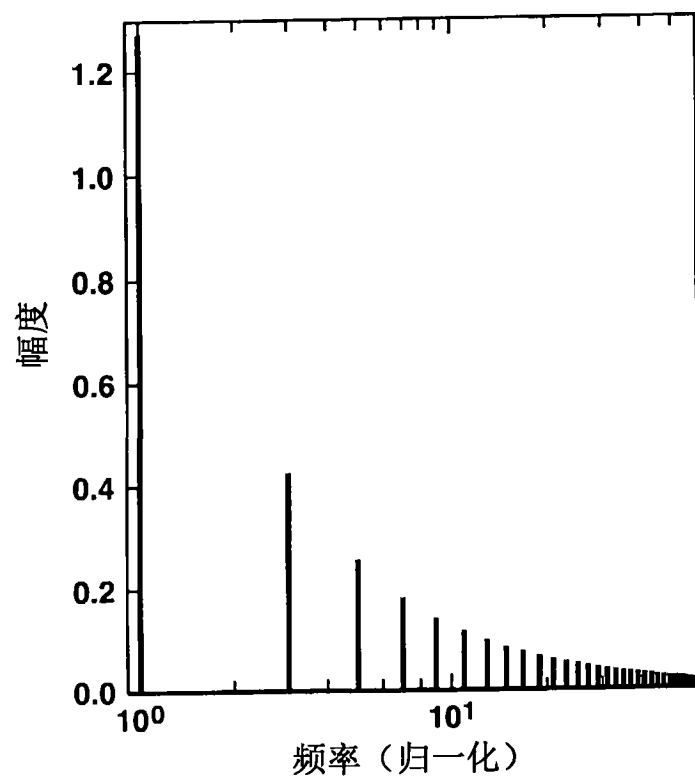


图 2B (现有技术)

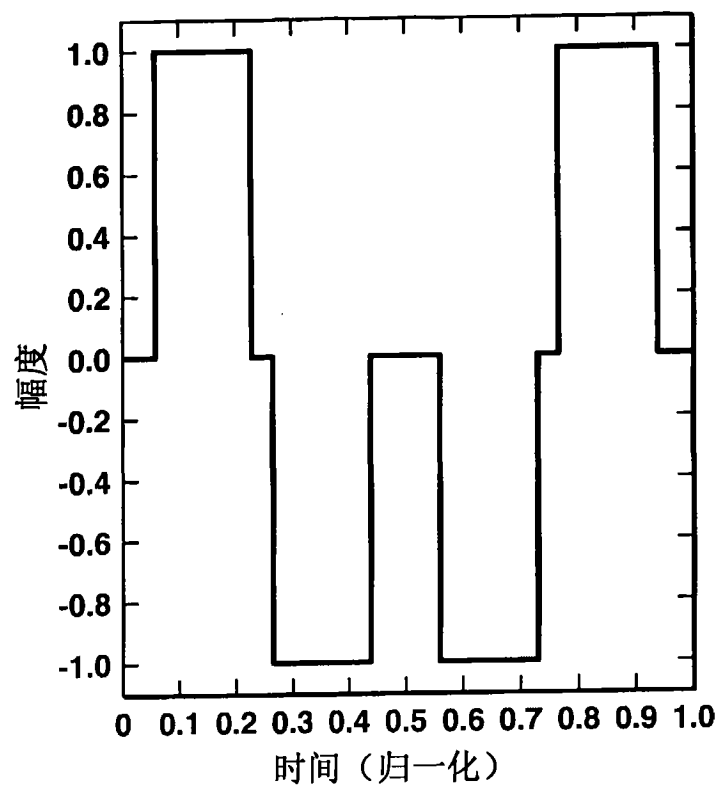


图 3A (现有技术)

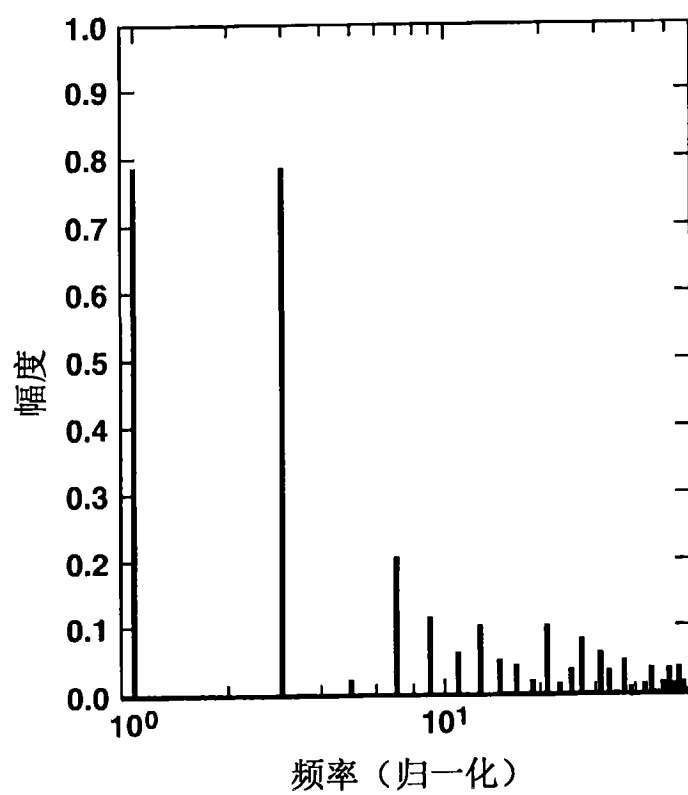


图 3B (现有技术)

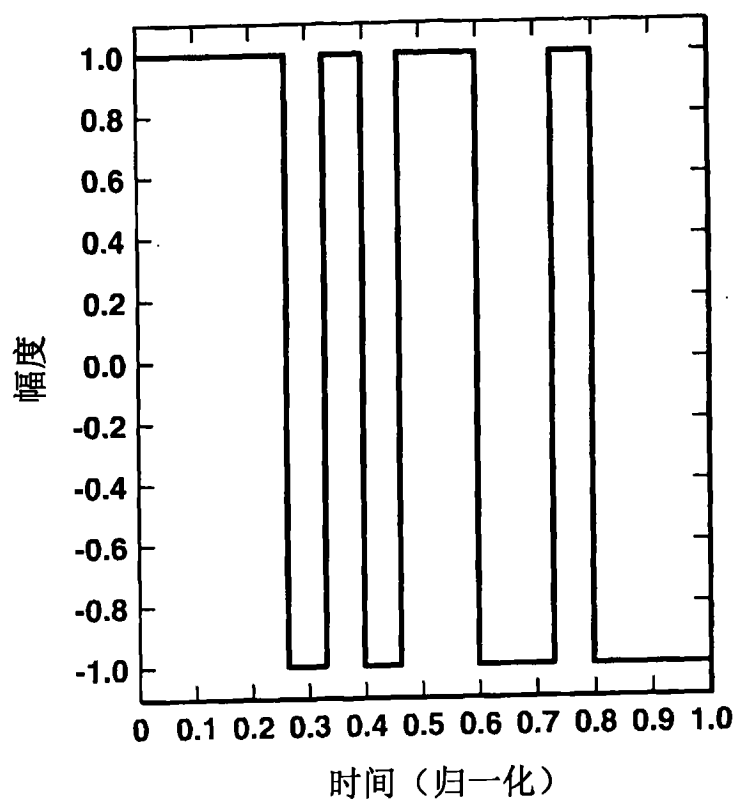


图 4A (现有技术)

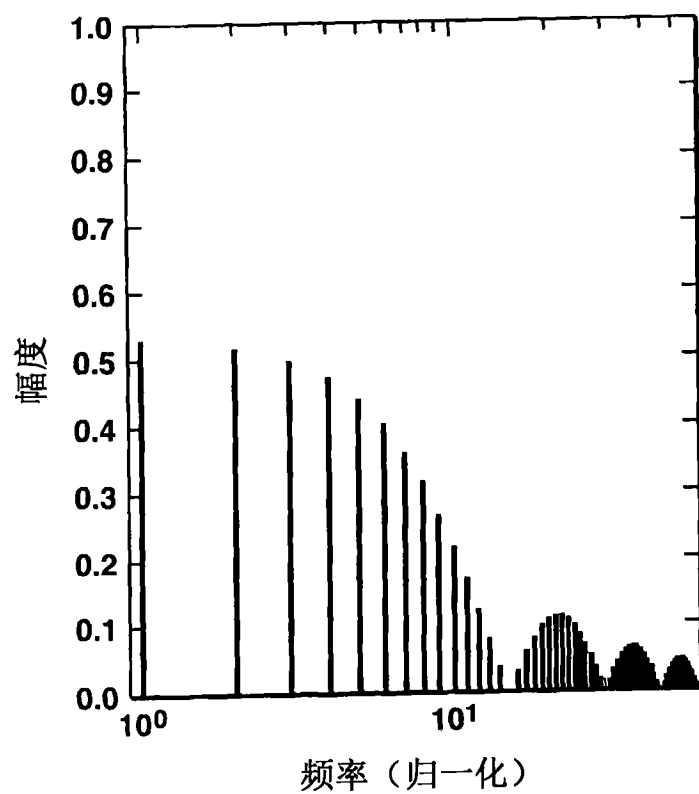


图 4B (现有技术)

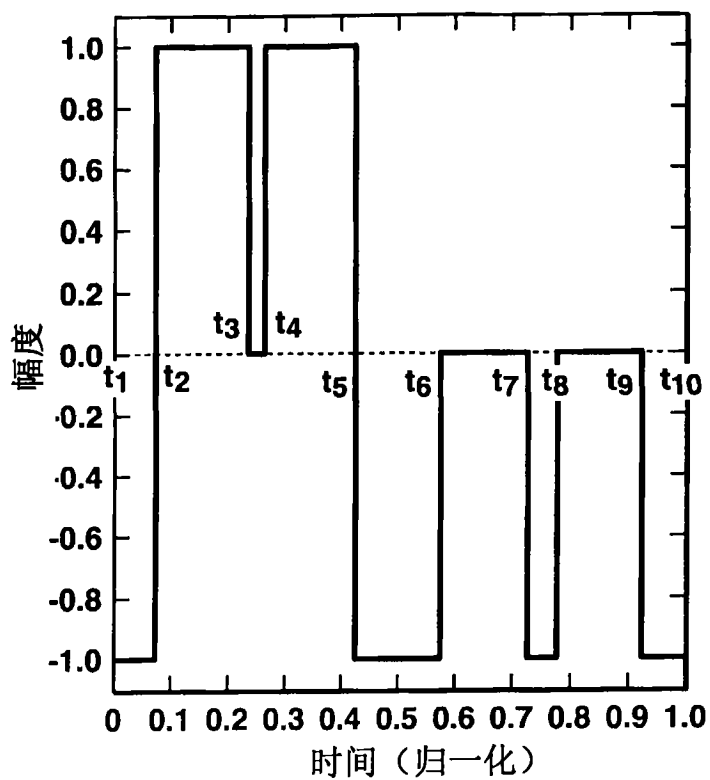


图 5A

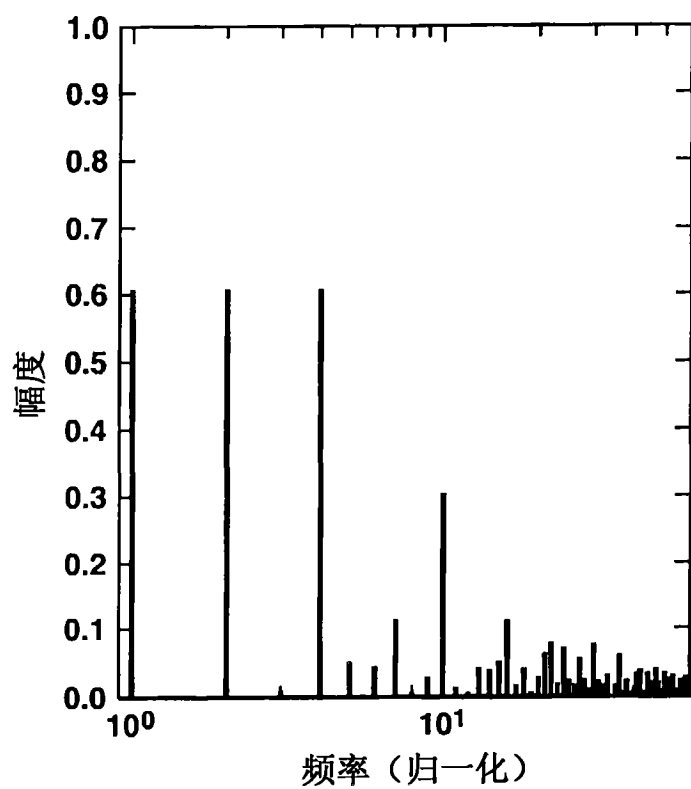


图 5B

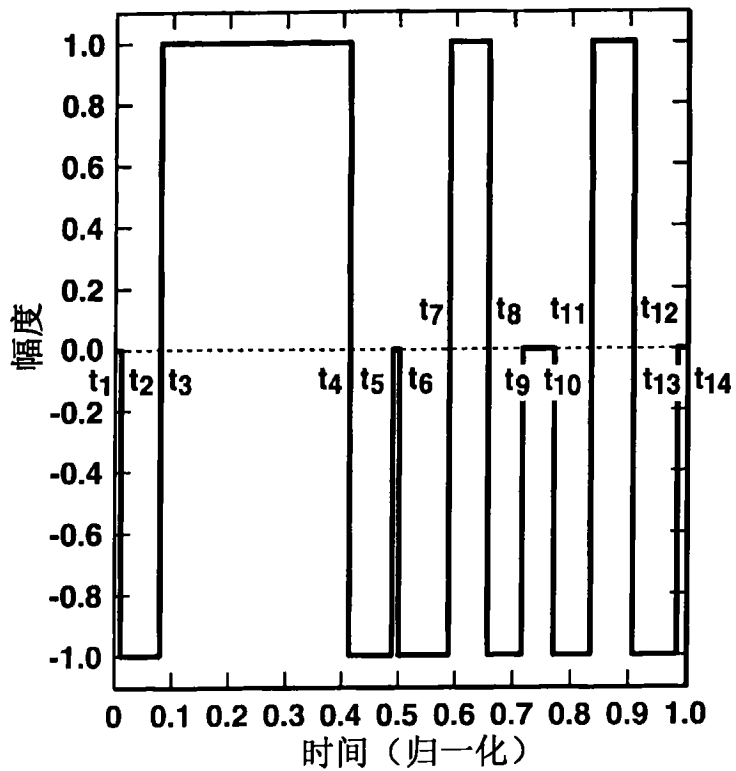


图 6A

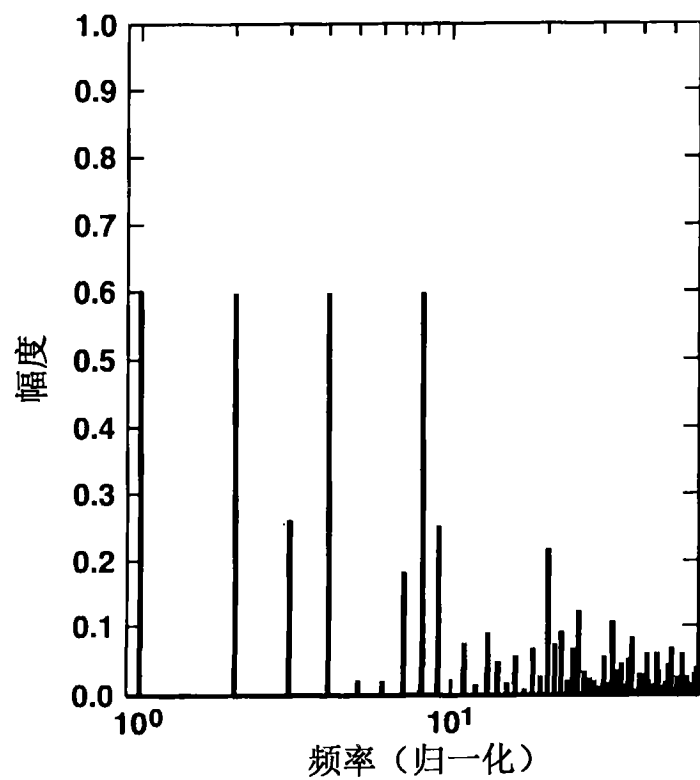


图 6B

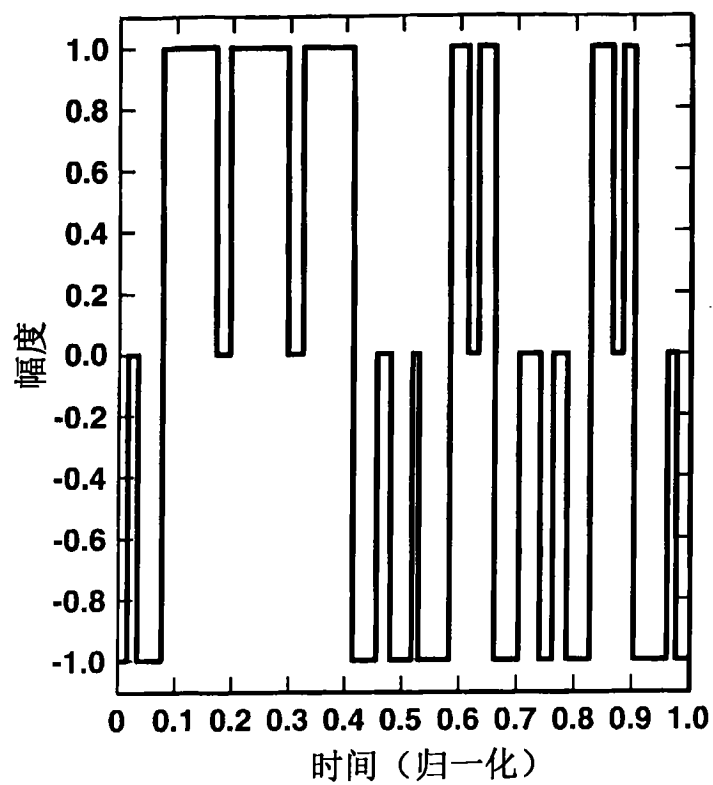


图 7A

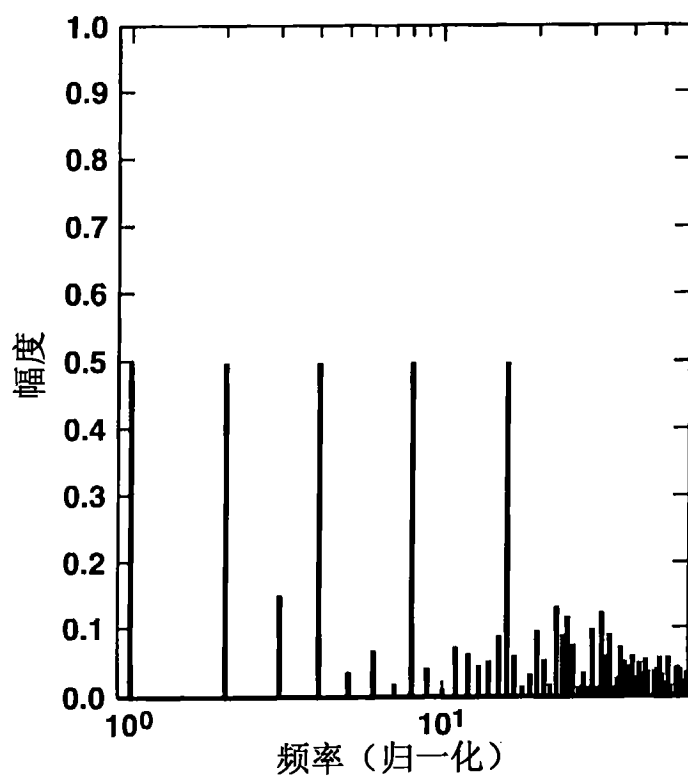


图 7B

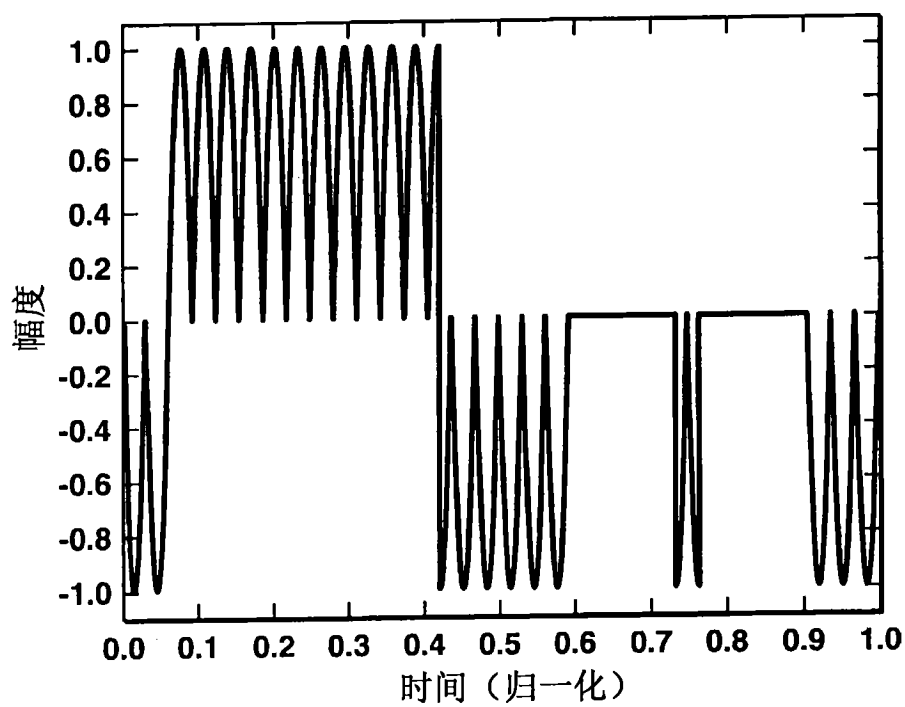


图 8