



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104062663 B

(45) 授权公告日 2016.06.29

(21) 申请号 201410336422.6

(22) 申请日 2014.07.15

(66) 本国优先权数据

201410087914.6 2014.03.12 CN

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72) 发明人 李海森 朱建军 周天 魏玉阔

陈宝伟 徐超 杜伟东 么彬 魏波

(51) Int. Cl.

G01S 15/88(2006.01)

(56) 对比文件

US 5052222 A, 1991.10.01, 全文.

US 2004/0003958 A1, 2004.01.08, 全文.

CN 201043997 Y, 2008.04.02, 全文.

CN 102749622 A, 2012.10.24, 全文.

R. T. DeKeyzer et al.. A Comparison of

Acoustic Imagery of Sea Floor Features

Using a Towed Side Scan Sonar and a Multibeam Echosounder. 《MTS/IEEE OCEANS 2002》.2002, 第2卷第1203-1211页.

Bin Yao et al.. Estimation of Multibeam Phase Difference Using Variable Bandwidth Filter. 《2010 IEEE International Conference on Information and Automation》.2010, 第1177-1181页.

李海森等. 多波束测深声纳技术研究新进展. 《声学技术》.2013, 第32卷(第2期), 第73-80页.

朱建军等. FrFT 解线调浅剖信号增强算法及FPGA实现. 《哈尔滨工程大学学报》.2014, 第35卷(第1期), 第102-108页.

审查员 陈曦

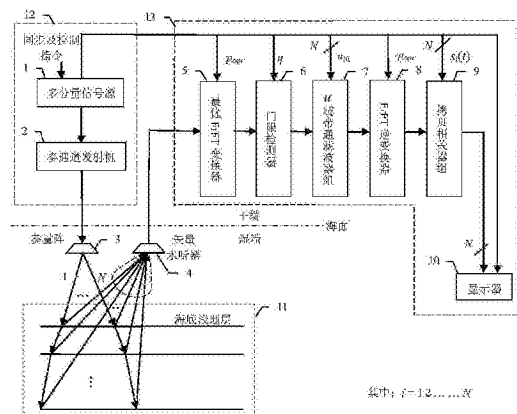
权利要求书1页 说明书6页 附图7页

(54) 发明名称

一种多波束海底浅地层剖面探测设备

(57) 摘要

本发明涉及的是一种多波束海底浅地层剖面探测设备。本发明包括干端和湿端，干端由发射模块和信号处理及显示模块构成，湿端由参量阵和矢量水听器构成。本发明基于 FrFT 技术设计频带重叠的 LFM 探测信号，利用小孔径的参量阵作为相控发射换能器，采用矢量水听器作为接收换能器，在提高系统带宽利用率的同时大大减小基阵的孔径。本发明由于能够发射频带重叠的多分量信号，使发射多波束的数量增加，系统带宽利用率和探测效率都得到了很大的提高，更适用于大面积的扫海探测；基阵孔径的减小使设备更加便携，具有更大的推广和应用价值。



CN 104062663 B

1.一种多波束海底浅地层剖面探测设备,包括干端和湿端,干端由发射模块(12)和信号处理及显示模块(13)构成,湿端由参量阵(3)和矢量水听器(4)构成,其特征在于:

发射模块(12),用于生成编码的多分量线性调频信号并驱动参量阵(3),由多分量信号源(1)和多通道发射机(2)构成;

多分量信号源(1),用于接收同步信号和控制指令,并根据控制指令,向多通道发射机(2)提供生成的编码的多分量线性调频信号,信号分量个数 N 由控制指令设置,同时向信号处理及显示模块(13)发送最优变换阶数 p_{opt} 、信号分量在分数阶傅立叶域 u 域的分布位置 u_0 、检测门限 η ;

多通道发射机(2),利用多分量信号源(1)提供的编码的多分量线性调频信号驱动参量阵(3)相控发射;

参量阵(3),将多通道发射机(2)产生的 N 个信号分量相控发射到 N 个不同的预探测方向上;

矢量水听器(4),同时接收 N 条测线上的多分量回波信号,并将接收到的多分量信号发送到信号处理及显示模块(13);

信号处理及显示模块(13),实现多分量回波信号的提取与分离,处理得到各条测线的扫迹,并显示探测得到的 N 个浅地层剖面图;

最优FrFT变换器(5),根据多分量信号源(1)提供的最优变换阶数 p_{opt} 对接收的多分量回波信号作最优FrFT变换,将变换结果取模值发送至门限检测器(6);

门限检测器(6),对最优FrFT变换器(5)发送的信号进行门限检测,选取过门限 η 的浅地层回波信号,并将过门限的信号发送至 u 域带通滤波器组(7);

u 域带通滤波器组(7),根据多分量信号源(1)提供的第 i 个信号分量在 u 域的分布位置 u_{i0} ,利用第 i 个带通滤波器对多分量回波信号进行 u 域带通滤波,在 u 域滤出第 i 个信号分量,实现所有 N 个信号分量在 u 域的提取与分离,并将提取的各信号分量发送至FrFT逆变换器(8);

FrFT逆变换器(8),用于对 u 域带通滤波器组(7)滤出的各信号分量作 $-p_{opt}$ 阶的FrFT逆变换,得到各条测线的回波信号,并发送至拷贝相关器组(9);

拷贝相关器组(9),用于对各条测线的回波信号序列作拷贝相关处理,得到各条测线上浅地层剖面的扫迹,并将 N 条扫迹发送至显示器(10)显示 N 个浅地层剖面图;

显示器(10),拷贝相关器组(9)输出的各条测线的扫迹信号会按照作拷贝相关处理的顺序依次显示到显示器(10)上。

一种多波束海底浅地层剖面探测设备

技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种多波束海底浅地层剖面探测设备。

背景技术

[0002] 与传统单波束海底浅地层探测相比,利用多波束设备进行海底浅地层探测,在提高测量效率的同时可以获得更丰富的底质信息。多波束海底浅地层剖面探测设备采用空间扫描、走航探测的工作方式。传统多波束海底浅地层探测设备通常采用向不同方向发射频带不重叠的LFM信号分量,然后对同时接收的多分量回波信号进行频域滤波,从而消除不同方向上回波信号间的混叠,以区分各分量信号的到达方向,达到同时探测多条测线的目的。但是,这种频分编码设计使得各信号分量间不能存在频谱重叠,从而使有限的系统频带内仅能设计出很少的几个LFM信号分量,限制了系统探测测线的数量,制约了多波束海底浅地层探测技术探测效率的提高。

[0003] 另外,在多波束浅地层探测设备使用的换能器基阵方面,传统多波束浅地层剖面探测设备通常采用低频大孔径基阵,体积大、重量重,不利于设备的推广应用,这是由于海底浅地层探测信号频率低,若采用空域滤波的方法接收各方向的信号分量,发射、接收波束宽度必须足够地窄,从而必将导致接收基阵孔径增大,使设备体积和成本增加,尤其不利于在小的探测平台上使用。如Calimero项目中应用的新一代多波束浅地层探测系统SBP120采用了 32×3 元发射基阵和 1×64 元接收基阵,长度都大于7m,仅限于安装在大测量船上使用。而参量阵声纳的独特优点是可以利用小尺寸换能器获得低频、宽带、低旁瓣或无旁瓣的尖锐波束,从而不仅可以达到多波束海底浅地层测量对发射低频信号的要求,而且保证了探测的分辨率。同时,由于矢量水听器工作在低频状态,且具有 $\cos\theta$ 形式的与频率无关的指向性,这意味着传感器的尺寸不再受声波波长的制约,与传统低频接收基阵相比,基阵孔径大大缩小,并且与传统基阵相比,矢量水听器可以提供更多的信息、具有适合进行浅剖测量的频率范围(通常为几百赫兹至十几千赫兹左右)。因此,采用矢量水听器作为多波束参量浅剖系统的接收基阵是一个理想的选择。本发明采用参量阵和矢量水听器作为发、收换能器,解决了传统低频基阵孔径大带来的诸多问题。

[0004] 分数阶傅立叶变换是一种重要的分数阶变换,是一种广义的傅立叶变换,直到近年其重要性才受到各国学者的关注。从本质上讲,信号在分数阶傅立叶域(通常称为u域)上的表示融合了信号在时域和频域的信息,因此FrFT被认为是一种时频分析方法,与小波变换、WVD等时频分析工具具有密切的关系。傅立叶变换是以三角函数为完备正交基,当单频正弦信号经过傅立叶变换就会在某个单频基上成为一个冲激函数。而分数阶傅立叶变换以LFM信号为完备的正交基,改变旋转角度 α ,就可以得到不同调频率的基,当LFM信号的频率变化率与某一分数阶傅立叶变换基的频率变化率相吻合时,信号的分数阶傅立叶变换就会在该变换基上形成一个冲激函数,参见图2。这一点说明LFM信号在u域上具有很好的时频聚集性。

[0005] 另外,FrFT又是一个线性变换:

$$[0006] \quad F^p[a \cdot x(t) + b \cdot y(t)] = a \cdot X_p(u) + b \cdot Y_p(u) \quad (1)$$

[0007] 其中, $x(t)$ 和 $y(t)$ 表示两个幅度归一化时域信号分量, a 和 b 分别表示量信号分量的幅度, $F^p[\]$ 表示 p 阶分数阶傅里叶变换, p 为变换阶数, $X_p(u)$ 和 $Y_p(u)$ 分别表示对应两时域信号分量的 u 域信号。因此, 多个信号分量叠加形成的多分量信号的分数阶傅立叶变换等价于各分量信号分别进行分数阶傅立叶变换后的叠加。利用上述两点即可以对多分量 LFM 信号在 u 域上进行滤波: 当各 LFM 信号分量在合适的 u 域上出现能量聚集时, 就可以用窄带滤波器将各 LFM 信号分量从多分量信号中滤出, 即实现对多分量 LFM 信号的提取与分离。这就是 LFM 信号 u 域滤波和信号提取与分离的机理, 本发明是基于这一机理设计实现的。

发明内容

[0008] 本发明的目的是为了针对传统多波束海底浅地层剖面探测设备系统带宽利用率低, 基阵体积庞大, 不利于推广应用等问题, 提出了一种多波束海底浅地层剖面探测设备。

[0009] 本发明的目的是这样实现的:

[0010] 本发明包括干端和湿端, 干端由发射模块 12 和信号处理及显示模块 13 构成, 湿端由参量阵 3 和矢量水听器 4 构成, 其特征在于:

[0011] 发射模块 12, 用于生成编码的多分量线性调频信号并驱动参量阵 3, 由多分量信号源 1 和多通道发射机 2 构成;

[0012] 多分量信号源 1, 用于接收同步信号和控制指令, 并根据控制指令, 向多通道发射机 2 提供生成的 N 个频带重合的 LFM 信号分量, 信号分量个数 N 由控制指令设置, 同时向信号处理及显示模块 13 发送最优变换阶数 p_{opt} 、信号分量在分数阶傅立叶域 u 域的分布位置 u_0 、检测门限 η ;

[0013] 多通道发射机 2, 利用多分量信号源 1 提供的 N 个线性调频编码信号驱动参量阵 3 相控发射;

[0014] 参量阵 3, 将多通道发射机 2 产生的 N 个信号分量相控发射到 N 个不同的预探测方向上;

[0015] 矢量水听器 4, 同时接收 N 条测线上的多分量回波信号, 并将接收到的多分量信号发送到信号处理及显示模块 13;

[0016] 信号处理及显示模块 13, 实现多分量回波信号的提取与分离, 处理得到各条测线的扫迹, 并显示探测得到的 N 个浅地层剖面图;

[0017] 最优 FrFT 变换器 5, 根据多分量信号源 1 提供的最优变换阶数 p_{opt} 对接收的多分量回波信号作最优 FrFT 变换, 将变换结果取模值发送至门限检测器 6;

[0018] 门限检测器 6, 对最优 FrFT 变换器 5 发送的信号进行门限检测, 选取过门限 η 的浅地层回波信号, 并将过门限的信号发送至 u 域带通滤波器组 7;

[0019] u 域带通滤波器组 7, 根据多分量信号源 1 提供的第 i 个信号分量在 u 域的分布位置 u_{i0} , 利用第 i 个带通滤波器对多分量回波信号进行 u 域带通滤波, 在 u 域滤出第 i 个信号分量, 实现所有 N 个信号分量在 u 域的提取与分离, 并将提取的各信号分量发送至 FrFT 逆变换器 8;

[0020] FrFT 逆变换器 8, 用于对 u 域带通滤波器组 7 滤出的各信号分量作 $-p_{opt}$ 阶的 FrFT 逆变换, 得到各条测线的回波信号, 并发送至拷贝相关器组 9;

[0021] 拷贝相关器组 9, 用于对各条测线的回波信号序列作拷贝相关处理, 得到各条测线

上浅地层剖面的扫迹,并将N条扫迹发送至显示器10显示N个浅地层剖面图;

[0022] 显示器10,显示多波束海底浅地层剖面探测设备探测得到的N条测线上的浅地层剖面图以及控制信息及现场参数信息。

[0023] 本发明的有益效果在于:本发明基于FrFT技术设计频带重叠的LFM探测信号,利用小孔径的参量阵作为相控发射换能器,采用矢量水听器作为接收换能器,在提高系统带宽利用率的同时大大减小基阵的孔径。本发明由于能够发射频带重叠的多分量信号,使发射多波束的数量增加,系统带宽利用率和探测效率都得到了很大的提高,更适用于大面积的扫海探测;基阵孔径的减小使设备更加便携,具有更大的推广和应用价值。

附图说明

[0024] 图1是多波束海底浅地层剖面探测设备的结构构成图。

[0025] 图2是LFM信号一个变换周期(变换阶数从0~4)的FrFT变换3D图;

[0026] 图3是频率变化率不同的二分量LFM信号的时频分布和对应其中一个信号频率变化率的FrFT;

[0027] 图4是图3情况下提取分离出的两个信号分量的时域波形及频谱;

[0028] 图5是频率变化率相同的二分量LFM信号的时频分布和最优阶FrFT;

[0029] 图6是图5情况下提取分离出的两信号分量的时域波形及频谱;

[0030] 图7是发射多分量信号中各信号分量的时域波形及频谱;

[0031] 图8是矢量水听器宽波束同时接收的多分量信号的时域波形及其频谱,信噪比SNR = -3dB;

[0032] 图9是多分量回波信号FrFT的模值;

[0033] 图10是各信号分量对应的u域带通滤波器响应;

[0034] 图11是u域滤出的第一个LFM信号分量;

[0035] 图12是u域滤出的第二个LFM信号分量;

[0036] 图13是u域滤出的第三个LFM信号分量;

[0037] 图14是经FrFT逆变换后,从多分量信号中提取出的各信号分量的时域波形及频谱。

具体实施方式

[0038] 本发明具体地说是涉及一种基于分数阶傅立叶变换(Fractional Fourier Transform,FrFT)技术的,用参量阵发射编码的多分量线性调频信号(Linear Frequency Modulation,LFM),采用矢量水听器宽波束同时接收多分量回波信号的一种多波束海底浅地层剖面高效探测设备。

[0039] 所述的多波束海底浅地层探测设备的应用背景为大面积海底浅地层剖面勘测,设备利用参量阵相控发射频带重叠的LFM信号分量进行探测,信号参数选取满足LFM信号在分数阶傅立叶域具有很好能量聚集的特性,用矢量水听器宽波束同时接收多条测线的多个回波信号分量,在分数阶傅立叶域通过u域滤波实现各信号分量的提取与分离,最终实现海底浅地层剖面的高效探测。

[0040] 本发明的多波束海底浅地层剖面探测设备的工作原理为:在每个探测同步周期,

当多分量信号源1接到开始工作的控制指令后,向多通道发射机2发送N个频带重叠的LFM信号分量发射信号分量的个数N可根据探测需求进行现场设定;多通道发射机2根据多分量信号源1提供的信号驱动参量阵3向N个不同的预探测方向依次发射N个频带重叠的LFM信号分量;各发射声波信号经海底浅地层反射产生回波信号,矢量水听器4同时接收各个探测方向的回波信号,并将此多分量回波信号传送至信号处理及显示模块13进行处理与显示。最优FrFT变换器5根据多分量信号源1传送的最优变换阶数 p_{opt} 对多分量信号作最优分数阶傅立叶变换,将信号变换到u域,通过门限检测器6在u域进行信号检测;根据多分量信号源1提供的参数,分别利用u域带通滤波器组7、FrFT逆变换器8和拷贝相关器组9对检测到的N个信号分量分别作u域带通滤波和 $-p_{opt}$ 阶FrFT逆变换,将各信号分量从多分量信号中提取分离出来,反变换到时域并经拷贝相关处理得到各探测方向海底浅地层的探测扫迹;最后将扫迹送至显示器(10)形成多波束海底浅地层探测剖面图。至此,实现了一个同步周期的多波束海底浅地层剖面探测。随着测量船的航行,实现了多条测线上海底浅地层的剖面探测。

[0041] 本实施方式的多波束海底浅地层剖面探测设备发射的N个信号分量应当满足如下准则:

[0042] 发射信号分量在u域具有很好的能量聚集特性,即采用LFM信号;

[0043] 各信号分量的频率变化率一致;

[0044] 发射各信号分量的参数可根据已制定的协议自主实现信号发射与信号处理间的协调工作。

[0045] 满足上述三点的多个分量的发射信号能够保证在u域实现多分量信号的提取分离。其中,第一点主要从提高系统带宽利用率的角度出发,只有在u域具有很好的能量聚集特性,才能保证在有限的频带上设计更多的信号分量,并实现宽波束同时接收的多个信号分量经u域带通滤波后的有效提取与分离;第二点是为了防止u域滤波时出现信号失真,因为如果各个信号分量的频率变化率不同,u域带通滤波器在对某一信号分量滤波时,会滤出其它信号分量的成分,造成提取信号的失真,可参见图3和图4,不同频率变化率时提取和分离信号分量将出现失真。另外,频率变化率设计成一致可简化处理过程,仅对某一最优变换阶数作一次FrFT变换即可,而不必对各个分量分别作FrFT变换,并且能够很好地提取、分离出各信号分量,如图5和图6所示,不仅信号不会出现失真,而且仅一次FrFT即可使所有信号分量在u域出现能量聚集,进而进行u域带通滤波等后续处理;第三点是为了使设备协调工作,可根据测量需要下达探测测线个数N(或信号分量个数,或相控方向个数)、相控方向和次序以及调整同步周期。

[0046] 所述多分量信号源1生成N个信号分量需要控制指令发送的信息包括:

[0047] ①各LFM信号分量的高低截止频率 f_{iH} 和 f_{iL} , $i=1,2,\dots,N$,确定各发射信号分量的频率范围;

[0048] ②各LFM信号分量的脉冲宽度 T_i 。确定各发射信号分量的脉冲宽度;

[0049] ③多通道发射机2相控发射信号的角度及顺序。控制多通道发射机2开始驱动参量阵3不同基元的时间,并以事先定义的顺序向不同角度相控发射不同的信号分量。

[0050] 所述矢量水听器4宽波束同时接收的多分量回波信号 $r(t)$ 可表示为:

$$[0051] \quad r(t) = \sum_{i=1}^{M_1} a_i s_1(t - \tau_i) + \sum_{j=1}^{M_2} a_j s_2(t - \tau_j) + \dots + \sum_{k=1}^{M_N} a_k s_N(t - \tau_k) + N(t) \quad (2)$$

[0052] 式中 $s_n(n=1, 2, \dots, N)$ 为向各探测方向上(各条测线上)发射的LFM信号分量, $M_n(n=1, 2, \dots, N)$ 表示第 n 个方向上(同一测线上)的回波个数, a 表示各回波信号的幅度, τ 表示回波信号的时延, $N(t)$ 表示噪声。

[0053] 所述多分量信号源1向信号处理及显示模块13传送的已知信号的信息包括:

[0054] ①最优FrFT变换和逆变换的阶数 p_{opt} 和 $-p_{opt}$ 。阶数 p_{opt} 用于设置最优FrFT变换器5,使其实现对多分量回波信号的最优分数阶傅立叶变换,使同时接收的各信号分量在 u 域都出现很好的能量聚集; $-p_{opt}$ 用于设置FrFT逆变换器8,将提取的各信号分量反变换到时域,得到提取信号的时域形式;

[0055] ②各个LFM信号分量在分数阶傅立叶域的分布位置 $u_{i0}(i=1, 2, \dots, N)$ 。用于设置 u 域带通滤波器组7对LFM信号分量进行 u 域滤波的各带通滤波器的滤波频率,不同信号分量的 u_0 不同。第 i 个信号分量的 u 域频率 u_{i0} 可表示为:

$$[0056] \quad u_{i0} = \text{round} \left\{ f_{i0} \cdot \sqrt{\frac{T}{f_s}} \cos \left[\arctan \left(k_i \cdot \frac{T}{f_s} \right) \right] \cdot \Delta x + \text{const} \right\} - \Delta N \quad (3)$$

[0057] 其中 f_{i0} 是第 i 个信号分量的中心频率, T 是处理信号的时间长度, k_i 是第 i 个信号分量的频率变化率, f_s 是信号采样频率, $\Delta x = \sqrt{T}$ 为 u 域信号量纲归一化长度, $N = T \cdot f_s$ 为信号样本点数;常数 $\text{const} = (N-1)/2+1$ (N 为奇数)、 $\text{const} = N/2+1$ (N 为偶数), ΔN 表示待提取信号分量中心频率偏离待处理信号时域中心引起的 u 域频率 u_0 的偏移量(点数)。

[0058] 当无偏移时, $\Delta N = 0$,否则:

$$[0059] \quad \Delta N = \text{round} \left\{ (\Delta \tau \cdot k) \cdot \sqrt{\frac{T}{f_s}} \cos \left[\arctan \left(k \cdot \frac{T}{f_s} \right) \right] \cdot \Delta x \right\} \quad (4)$$

[0060] 式中 $\Delta \tau$ 表示偏离的时延量(偏向右侧时 $\Delta \tau$ 为正,否则为负)。

[0061] ③检测门限 η 。用于设置门限检测器6的检测门限,可由控制指令实时更改;

[0062] ④拷贝信号分量 $s_i(t)$ 。用于拷贝相关器组9中各个拷贝相关器对FrFT逆变换器8输出的时域信号作拷贝相关处理。

[0063] 所述最优FrFT变换器5对矢量水听器4宽波束同时接收的各条测线的多分量回波信号 $r(t)$ 作 p_{opt} 阶最优FrFT变换得 $F^{p_{opt}}r(u)$ 。

[0064] 所述门限检测器6对最优FrFT变换后信号进行检测判决的方法为:

[0065] 首先对最优FrFT变换器5发送的数据取模值,得到 $|F^{p_{opt}}r(u)|$;其次,将模值与多分量信号源(1)发送的参数 η 作比较,若 $|F^{p_{opt}}r(u)| \geq \eta$,则过门限部分的信号即为有效的回波信号,并将其送至 u 域带通滤波器组7作滤波处理。

[0066] 所述 u 域带通滤波器组7的滤出的各信号分量 $S_i(u)$ 为:

$$[0067] \quad S_i(u) = F^{p_{opt}}r(u) \cdot H_{u_{i0}}(u) \quad (5)$$

[0068] 式中 $F^{p_{opt}}r(u)$ 为多分量信号 $r(t)$ 的最优阶FrFT, $H_{u_{i0}}(u)$ 是以 u_{i0} 为中心频率的 u 域带通滤波器传递函数,用于对第 i 个信号分量进行滤波处理。

[0069] 所述FrFT逆变换器8对各提取出的信号分量进行 $-p_{opt}$ 阶FrFT反变换,将 u 域信号变

换到时域,时域信号 $S_i(t)$ 为:

$$[0070] \quad S_i(t) = F^{-P_{opt}}[S_i(u)] \quad (6)$$

[0071] 所述拷贝相关器组9输出的各条测线的扫迹信号会按照作拷贝相关处理的顺序依次显示到显示器10上。

[0072] 采用本实施方式的多波束海底浅地层剖面探测设备的信号提取与分离过程参见图7至图14,以频率范围分别为2~4kHz、3~5kHz和4~6kHz,脉宽均为10ms的三个信号分量作为发射信号分量对多分量信号提取域分离处理过程进行说明。图7是参量阵3分别向三个不同方向发射的三个LFM信号的时域波形和频谱;图8是矢量水听器4宽波束同时接收多分量信号的时域波形和频谱(信噪比为-3dB),由于三个信号分量相互间存在1/2的频带重叠,已无法从频域上区分三个信号分量;图9为多分量信号经最优分数阶傅立叶变换器5后输出的3个过门限 η 的信号分量,三个信号分量在 u 域出现了很好的能量聚集,从而可在 u 域进行有效的信号分离;图10是 u 域带通滤波器组7中对应某一信号分量的 u 域带通滤波器传递函数 $H_{u_0}(u)$,根据公式(5)可实现信号分量的提取与分离;图11至图13是利用 u 域带通滤波器组7对各信号分量进行 u 域滤波后提取出的三个 u 域信号分量,实现了对三个信号分量的分离;图14为 u 域带通滤波提取出的各信号分量经FrFT逆变换器8后输出信号的时域波形及频谱。经 u 域滤波处理后,不仅提取分离出了各信号分量,而且信号能量基本不变。提取分离的各信号分量送拷贝相关器组9后则可输出各测线的扫迹信号,送显示器10显示浅地层剖面。以此例计算,若采用频分方法,2~6kHz的频带内最多能够设计出2个2kHz带宽的信号分量,而采用本方法,则可设计出3个甚至更多个2kHz带宽的信号分量,很大程度上提高了系统带宽的利用率。

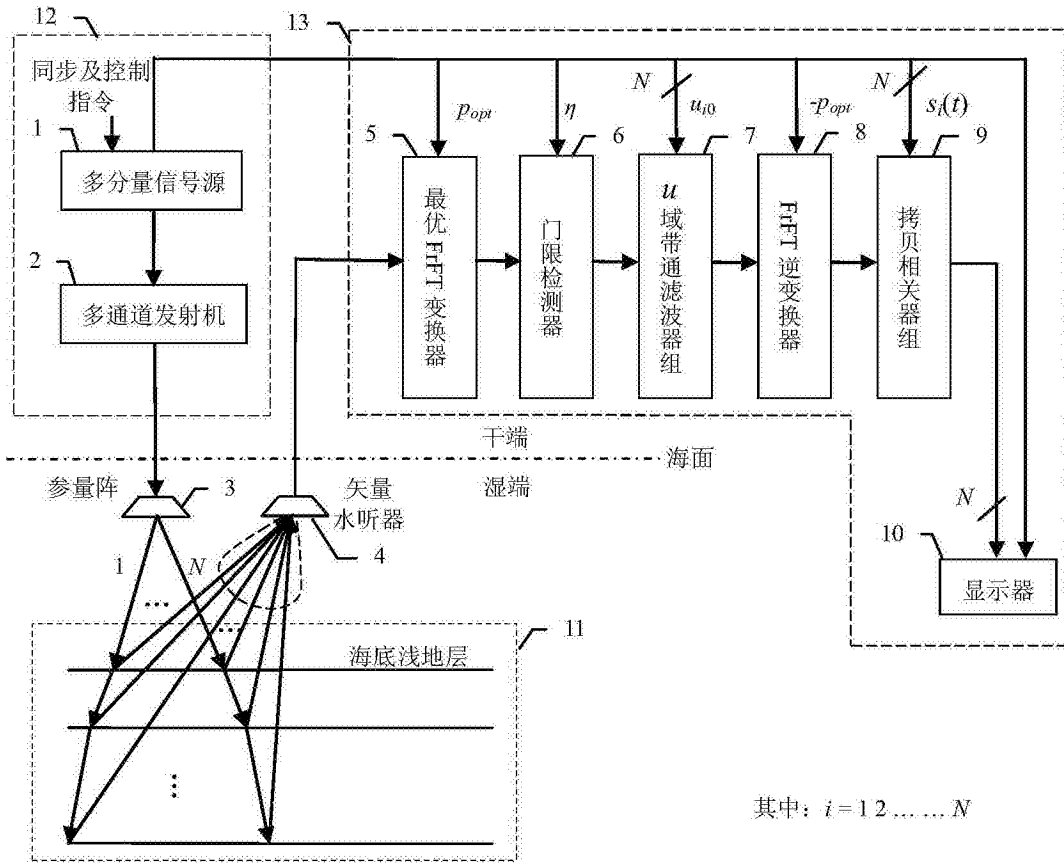


图1

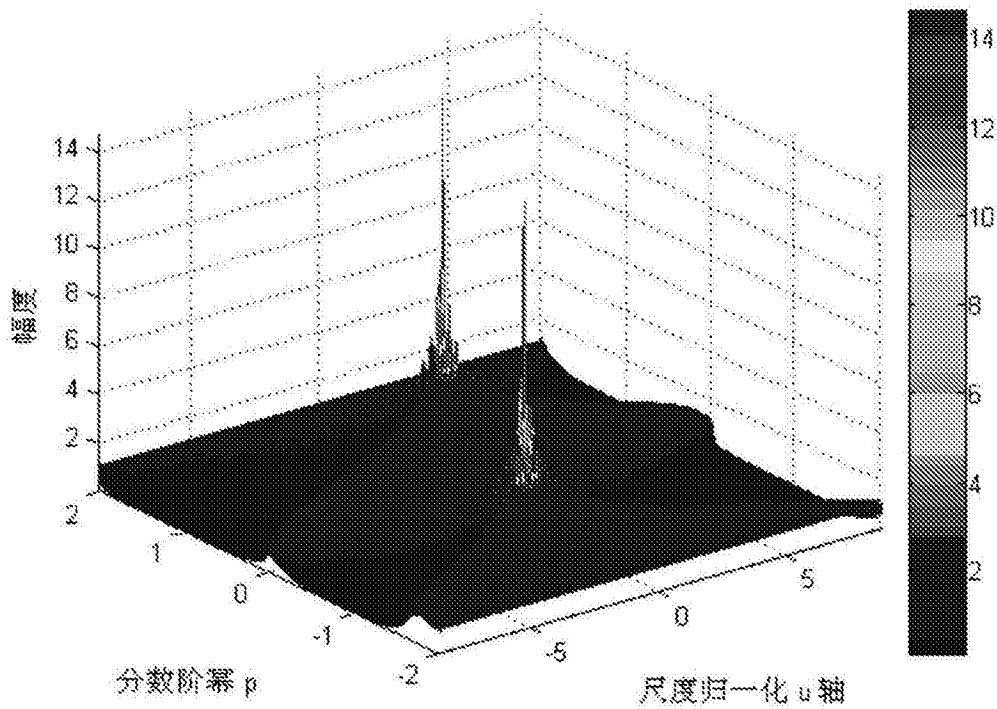


图2

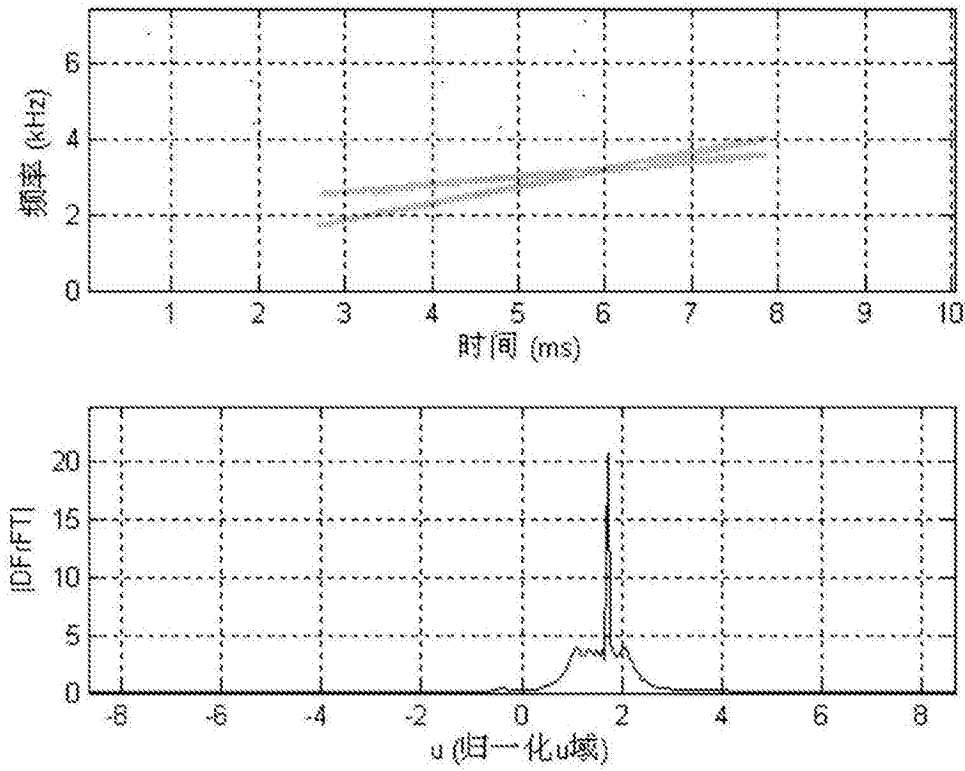


图3

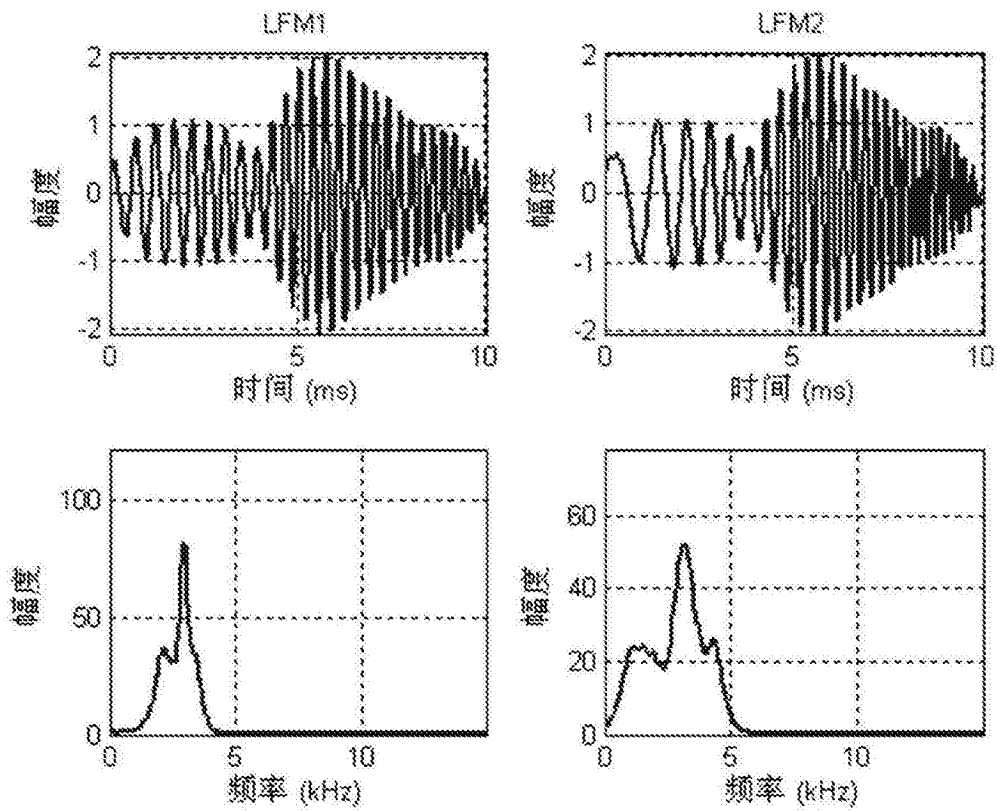


图4

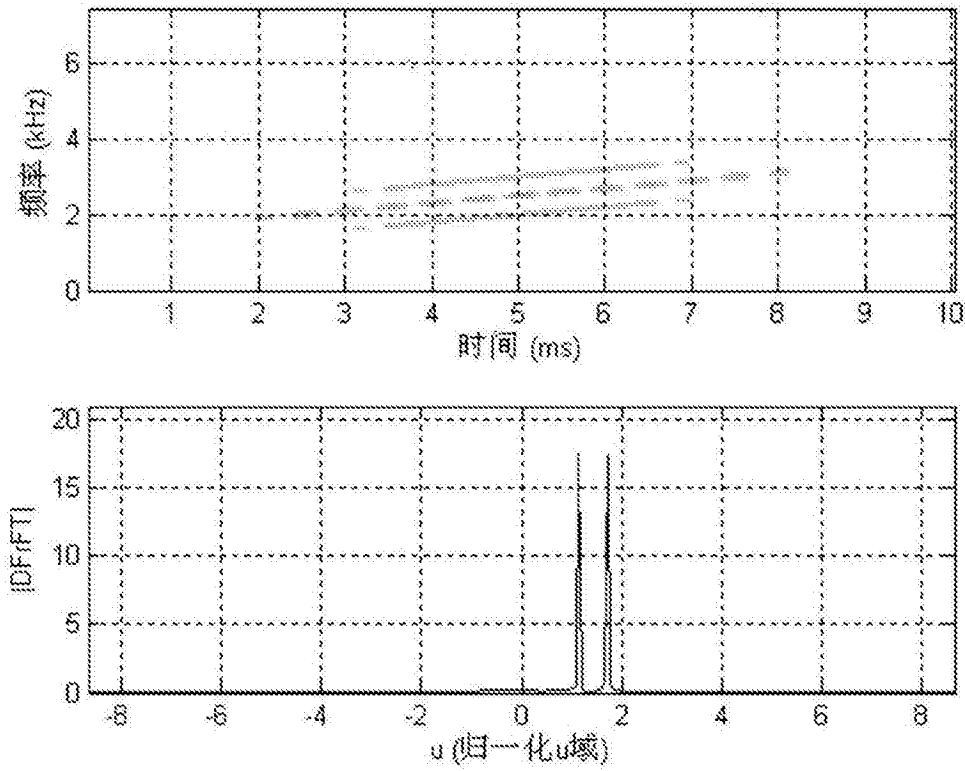


图5

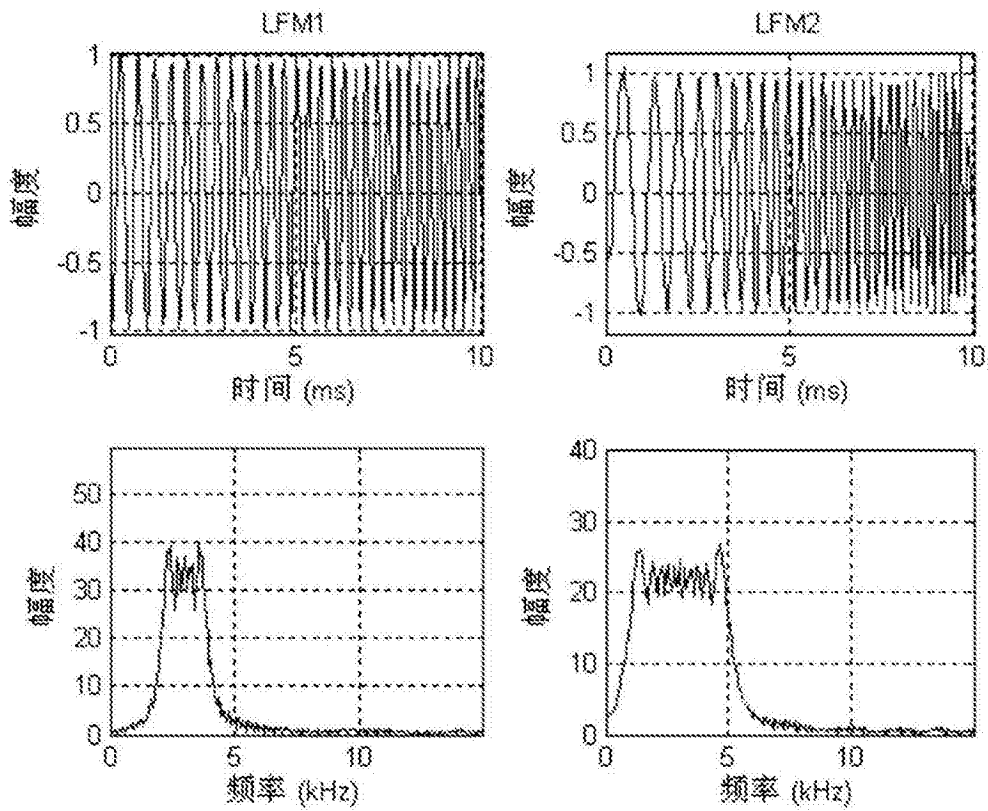


图6

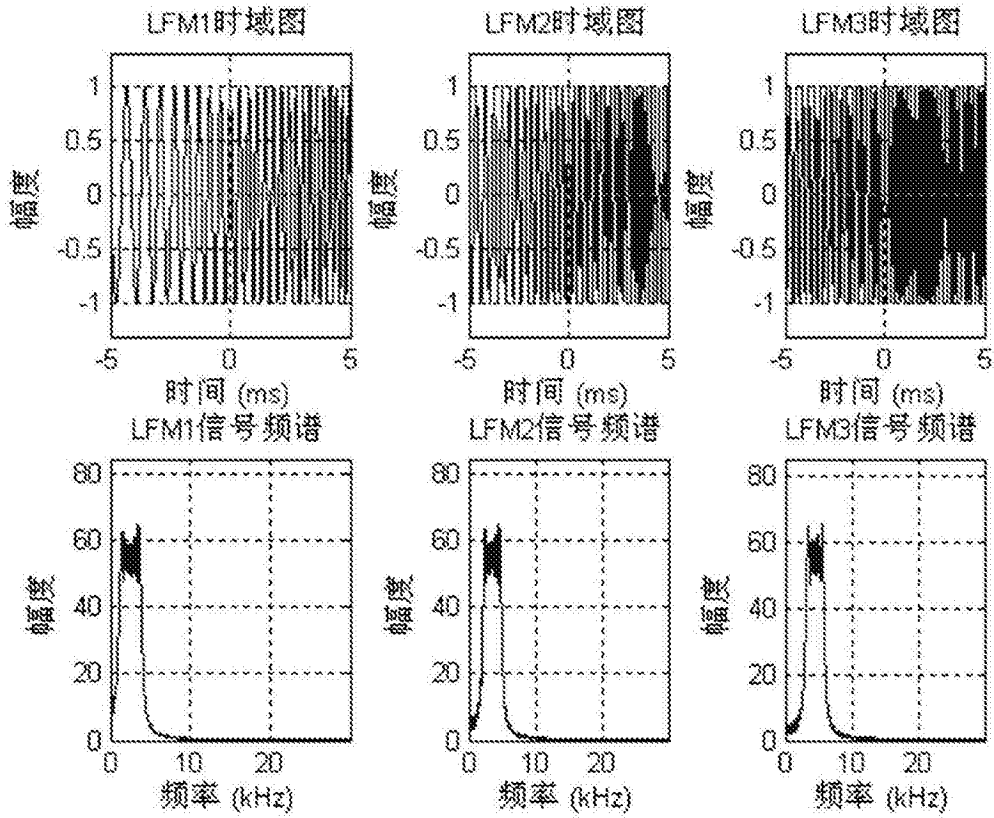


图7

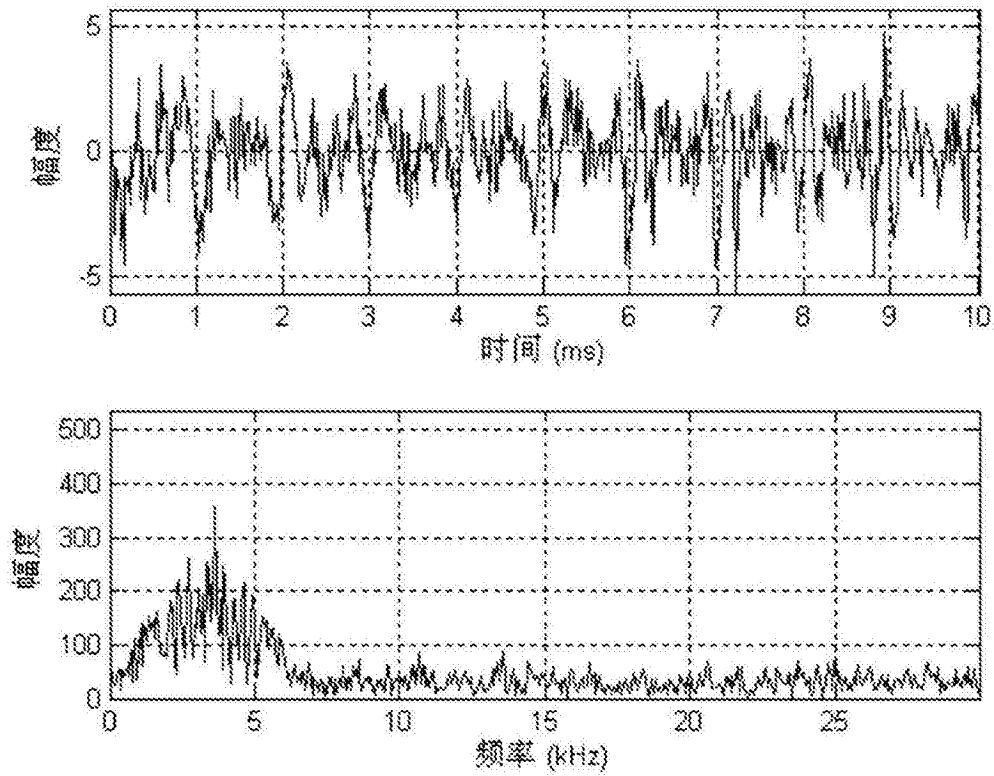


图8

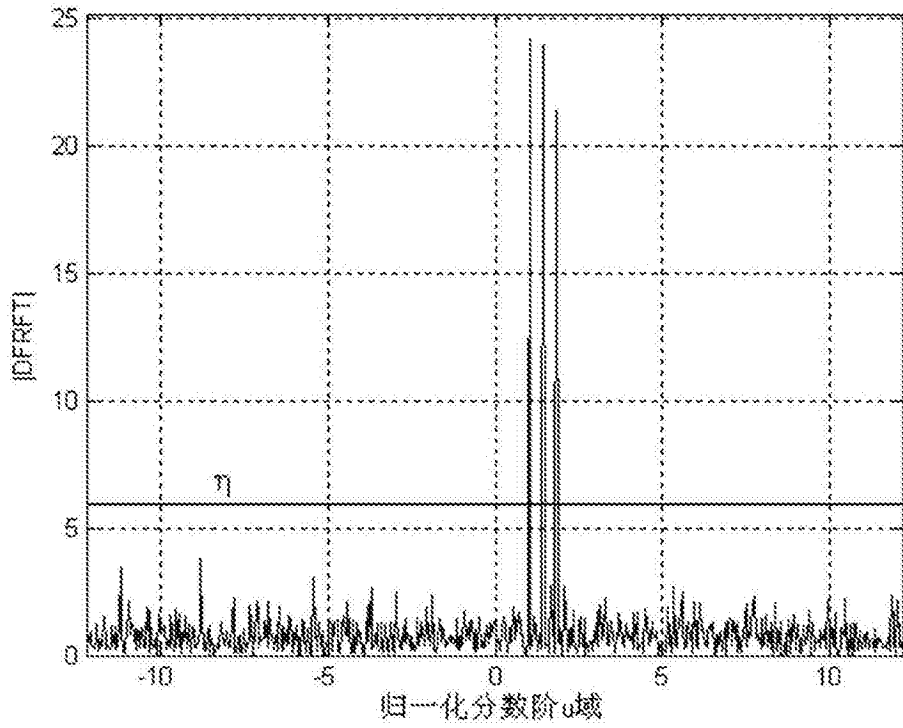


图9

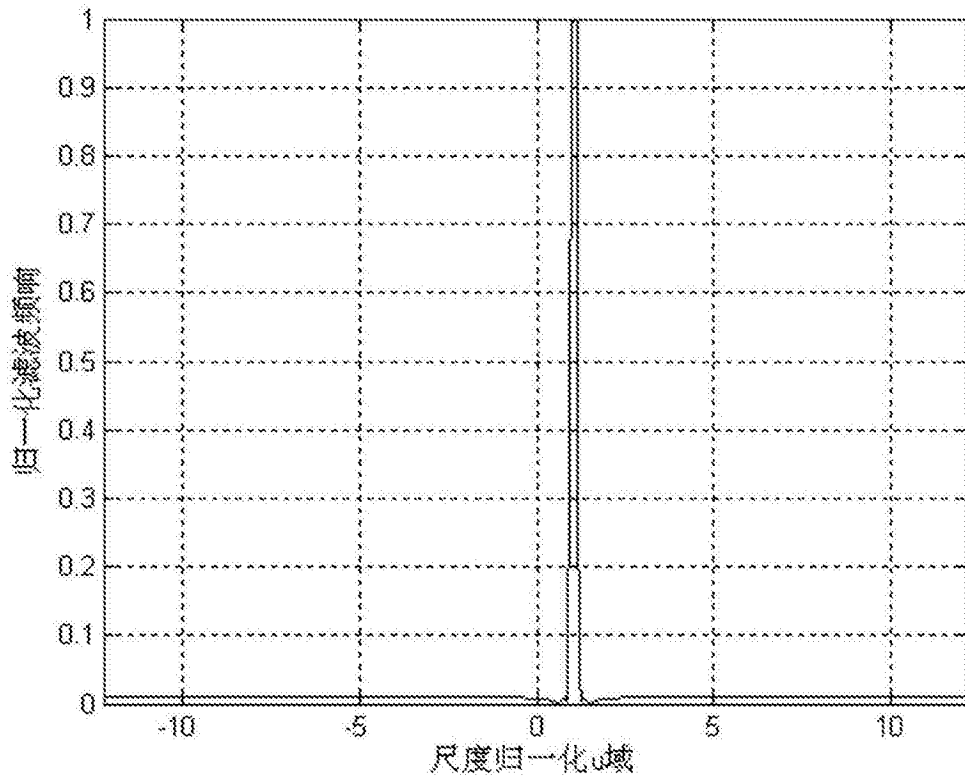


图10

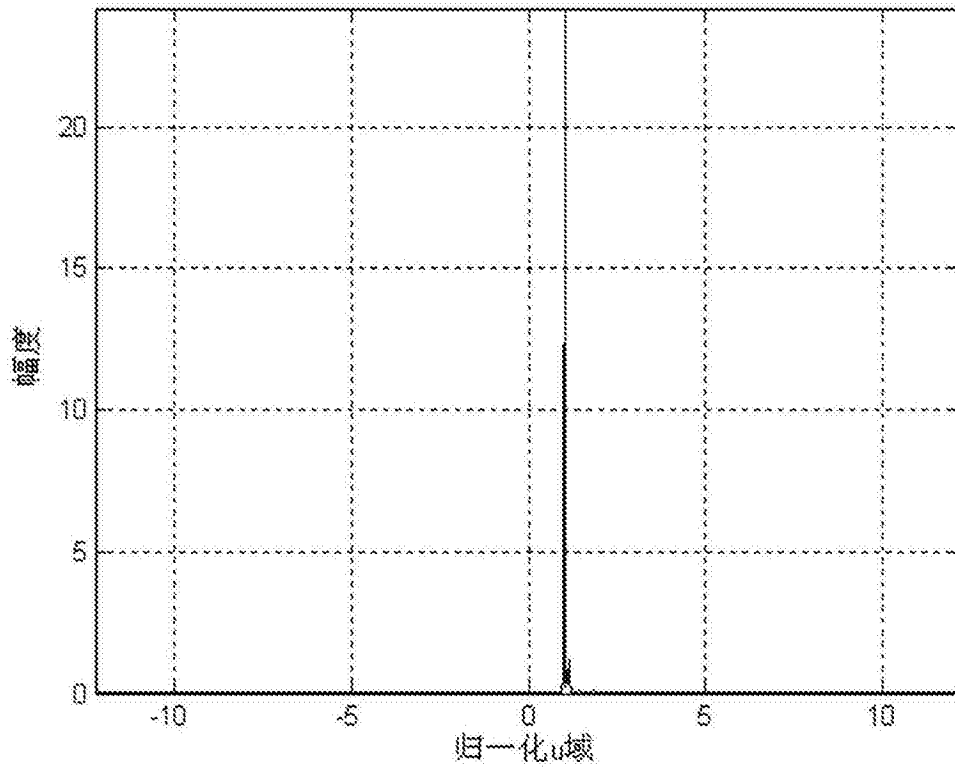


图11

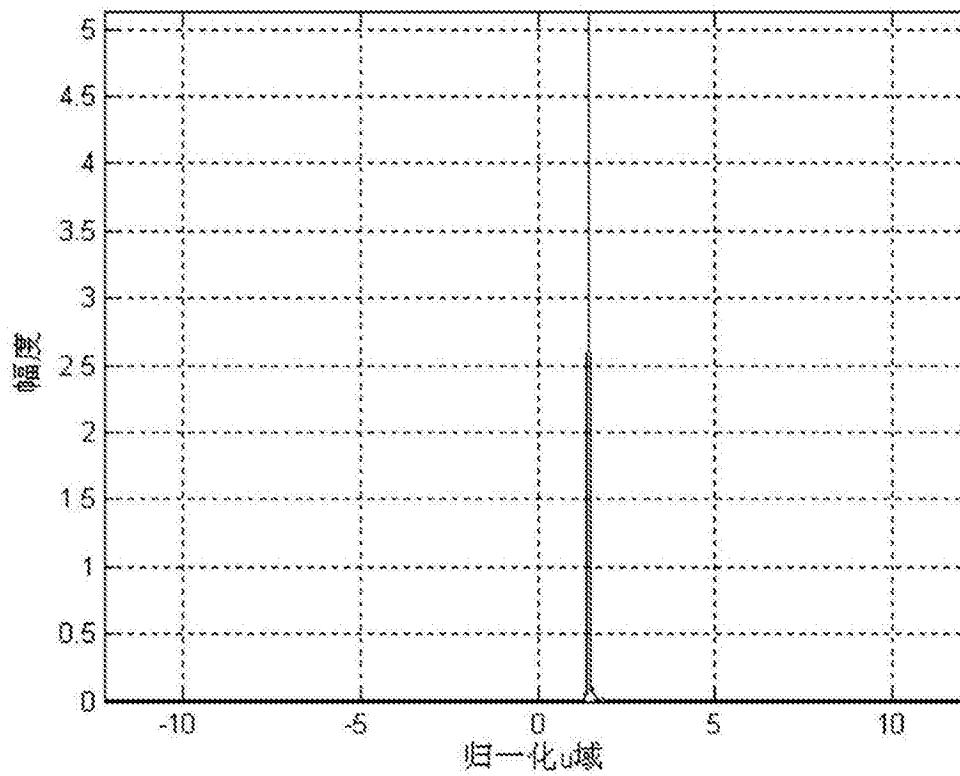


图12

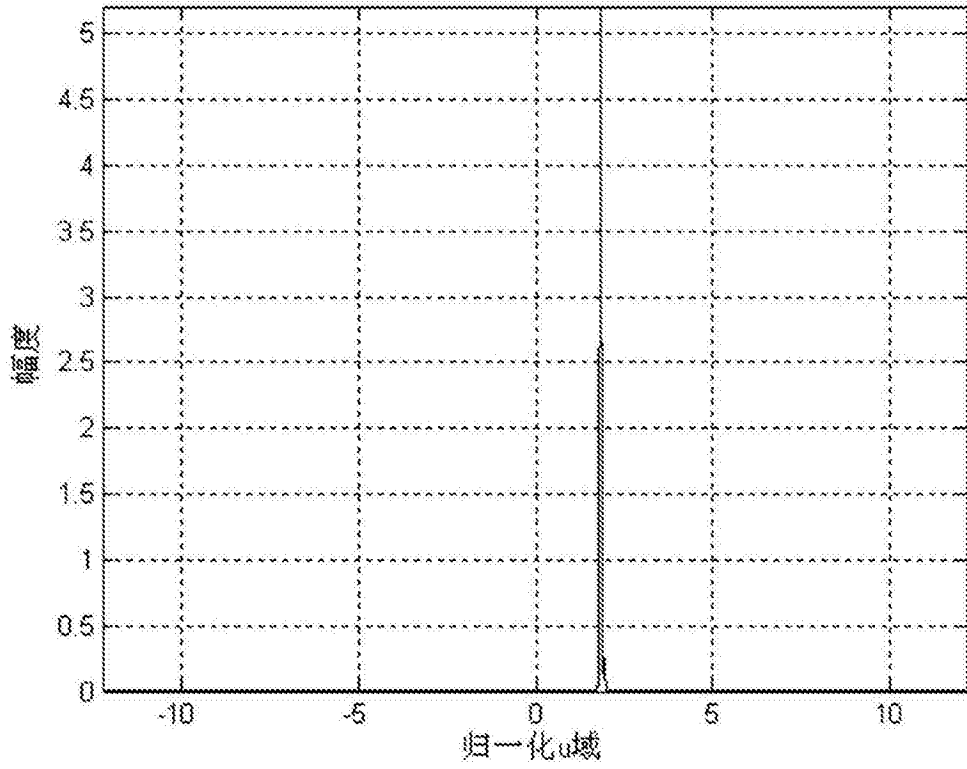


图13

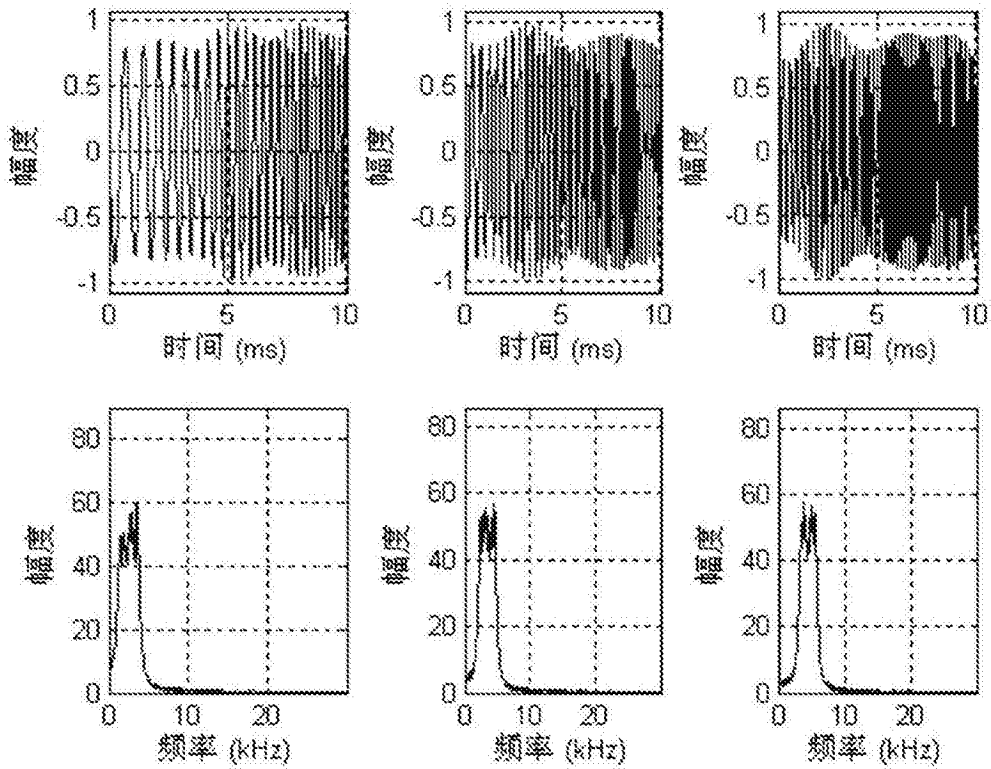


图14