



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105411622 B

(45)授权公告日 2016.08.17

(21)申请号 201510881774.4

(22)申请日 2015.12.03

(73)专利权人 西安邮电大学

地址 710062 陕西省西安市长安南路563号

(72)发明人 刘睿

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任  
公司 61200

代理人 刘强

(51)Int.Cl.

A61B 8/00(2006.01)

审查员 郑其蔚

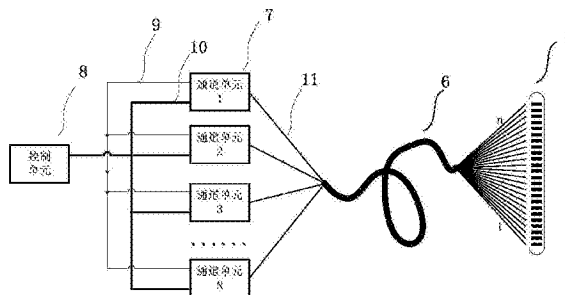
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统

(57)摘要

本发明公开了一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统,该系统包括数据控制单元、多个通道单元、换能器和数据总线;所述数据控制单元控制多个通道单元,每个通道单元对应一个换能器的一个阵元;所述数据控制单元产生全局的基准时钟信号,同时通过数据总线将每个通道单元所须的相位和幅度控制信息发送给通道单元。本发明的系统及其控制方法具有高精度相移控制,高效率的通道驱动,一体化的驱动通道相位补偿,阵元相位幅度分离控制的优点。



1. 一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法,其特征在于:通过对输入基准时钟(9)和通道输出信号(11)的采样进行相位比较(49),输出信号的平均幅度正比于相位差(50);相位差(50)和相位控制信号(15)进行求差(51)处理,并利用得到的差值(52)去控制振荡频率产生振荡信号(54);反馈环路锁定时,相位差(50)就和相位控制信号(15)的幅值一一对应;通过相位控制信号的幅值控制通道输出信号(11)和输入基准时钟(9)之间的相位差。

2. 根据权利要求1所述的用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法,其特征在于:所述振荡信号(54)用于驱动开关产生放大信号,并激励阵元;幅度控制信号(14)直接控制压控电压源产生放大信号所需要的电压激励开关;开关输出的信号通过滤波网络(57)消除高频分量后激励阵元,同时滤波后信号反馈至相位比较部分,滤波导致的相关相位偏差将会被整个相位控制环路自动补偿。

3. 一种用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于,包括:数据控制单元(8)、多个通道单元(7)、换能器(5)和数据总线(10);所述数据控制单元(8)控制多个通道单元(7),每个通道单元(7)对应一个换能器(5)的一个阵元;所述数据控制单元(8)产生全局的基准时钟信号(9),同时通过数据总线(10)将每个通道单元(7)所需的相位和幅度控制信息发送给通道单元(7);

所述通道单元(7)包括锁相环(20)、减法器(24)、第一数模转换器(13)、第二数模转换器(12)、程控电压源(23)、E类放大器(16)、低通滤波器(25);所述减法器(24)的正相端连接锁相环(20),所述减法器(24)反相端连接第一数模转换器(13),所述减法器(24)的输出端连接回锁相环(20)中;所述第一数模转换器(13)和第二数模转换器(12)的输入端同时连接至数据总线;所述第二数模转换器(12)的输出端连接至程控电压源(23)的输入端;程控电压源(23)的输出端连接至E类放大器(16)的电源;锁相环(20)的输出端连接至E类放大器(16)的输入端;所述E类放大器(16)的输出端连接低通滤波器(25)的输入端;所述低通滤波器(25)的输出得到一个通道的输出信号(11)驱动换能器(5)的一个阵元。

4. 根据权利要求3所述的用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于,所述基准时钟信号(9)的频率等于超声换能器发射信号频率。

5. 根据权利要求3所述的用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于,所述通道单元(7)根据数据总线(10)下发的相位控制信息和幅度控制信息,对基准时钟信号(9)进行相应的相移和功率驱动并控制基准时钟信号(9)幅度,产生通道输出信号(11),通过连接电缆(6)驱动换能器(5)的对应阵元。

6. 根据权利要求5所述的用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于,每个通道单元(7)采用基于锁相环的高精度相移产生,利用开关放大驱动方式进行功率放大,利用锁相环组成闭环补偿驱动附加相位。

7. 根据权利要求3所述的用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于,所述低通滤波器(25)是阻容构成的无源低通滤波器。

8. 根据权利要求3所述的用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于,所述锁相环(20)由鉴相器(22)、压控振荡器(18)和环路滤波器(21)组成;所述鉴相器(22)的输入端连接全局时钟信号(9),鉴相器(22)的另一个输入连接输出信号(11),鉴相器(22)的输出端连接减法器(24)的正相端;减法器(24)的输出通过环路滤波器(21)连接锁相环中的压控

振荡器(18);压控振荡器(18)的输出连接E类放大器(16)的输入端。

9.一种根据权利要求3-8任意一项所述的用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其特征在于:

利用数据控制单元(8),控制多个通道单元(7),数据控制单元(8)产生全局的基准时钟信号(9),同时通过数据总线(10)将每个通道单元(7)所需的相位和幅度控制信息发送给通道单元(7);

通道单元(7)负责根据数据总线(10)下发的相位控制信息和幅度控制信息,对基准时钟信号(9)进行相应的相移和功率驱动并控制基准时钟信号(9)幅度,产生通道输出信号(11),通过连接电缆(6)驱动换能器(5)的对应阵元;

数据总线(10)根据不同的地址寻址控制第一数模转换器(13)和第二数模转换器(12),产生相位控制信号(15)和幅度控制信号(14),输入的数字量和第一数模转换器(13)和第二数模转换器(12)的输出值之间保持线性关系,相位控制信号(15)独立控制通道输出信号(11)相对于基准时钟信号(9)在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内产生相移,幅度控制信号(14)直接作用于程控电压源(23);程控电压源(23)的输出直接作用于E类放大器(16)的漏级;使E类放大器(16)的输出幅度由E类放大器(16)的漏级电压决定,即:幅度控制数字量借助于幅度控制信号(14)线性的控制通道输出信号(11)的幅度,实现输出信号的幅度控制;所述程控电压源(23)的输出与幅度控制信号(14)呈线性关系。

## 一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于信号处理技术领域,涉及超声相控阵连续波发射的系统,尤其是一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统。

### 背景技术

[0002] 超声连续波在相控阵超声成像、医学相控阵超声治疗等领域有广泛的应用。超声成像检测领域中采用连续波发射,运动目标反射超声波,由于多普勒现象产生多普勒频移,通过检测频率偏移可以得到运动目标的运动信息。医学彩色超声诊断仪中的连续波血流检测以及工业中的流速流量测量就是利用这种机理进行的检测。

[0003] 连续波在医学超声治疗领域中也有重要的应用,连续波由于持续时间长,将能量传送到人体内部,利用热效应或者空化效应使局部病变组织变性灭活,达到治疗的目的。

[0004] 检测和治疗应用中,焦点位置以及焦点形状控制即超声波束控制是影响检测和治疗效果的关键因素。在超声检测领域中控制超声波束聚焦于被检测目标位置,可以获得最大的回波信号,提升信噪比,检测精度和灵敏度都最大。医学超声治疗领域对于超声波束的控制就更加重要,超声的焦点必须正确的聚焦于需要治疗的病变组织,保证治疗效果,同时降低正常组织的损伤。

[0005] 聚焦焦点的位置及形状通过控制发射信号的幅度和相位实现的。如图1所示,建立4所示坐标系,2所指的为具有n个阵元的阵列换能器,换能器阵元 $E_1 \sim E_n$ ,其位置分别为 $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1 \sim n$ )。图中1所指为需要聚焦的焦点F位置为 $(x_f, y_f, z_f)$ 。3所指的为阵元到焦点的距离,其中,对于第i个阵元,探头阵元位置到焦点位置的距离为 $l_i$  ( $i=1 \sim n$ )。如果每个阵元的激励信号都是连续正弦波,而且和第1个通道的相位差 $\Delta$ 满足等式①,那么所有信号在F点同相相加,幅度最大,实现聚焦。

$$[0006] \quad \Delta = (-2\pi) \cdot D((l_i - l_1)/(cT)) \quad \text{①}$$

[0007] 其中: $D(\cdot)$ 表示取一个数的小数部分。 $c$ 表示超声波的声速, $T$ 表示发射连续正弦波的周期。

[0008] 上述是对于单焦点的情况,可见单一的焦点,相位差可以改变焦点的位置。阵元的幅度会影响焦点的形状。对于简单的情况,均匀线阵阵元的驱动信号幅度和聚焦焦点的形状分布之间是一对傅里叶变换关系。对于更复杂的情况,中国专利200510096069.X提出了一种通过控制阵元相位和幅度同时产生多个焦点的方法。可以看到,焦点的控制能力完全由控制系统的相位和幅度的控制能力决定。对于超声连续波而言,相位和延时满足如下关系:

$$[0009] \quad \Delta = \Theta / ((2\pi) * f) \quad \text{②}$$

[0010] 式中, $\Delta$ 为延时值,单位为秒(s); $\Theta$ 为相移值,单位为弧度; $\pi$ 是圆周率; $f$ 为当前连续波的工作频率。

[0011] 从②中可以看到,固定 $f$ ,延时值和相移存在一一对应的线性关系。因此,对于连续波,控制相移等同于控制时延,反之亦然,其次后续不加区分的使用相移和时移,二者有相

同的效果。

[0012] 阵元的相位和幅度控制的精度和控制方式是超声连续波系统与控制方法的关键性能,对于复杂焦点形状,例如多焦点,要求控制系统能够实现高精度的相位和幅度的控制。另外,由于相位主要对聚焦焦点的位置起作用,幅度对于聚焦焦点的形状起作用,因此要求控制方法和系统能够独立的调整相位和幅度,这样提供了最大的自由度可以独立的优化焦点的位置和形状。

[0013] 目前进行相移控制方法中最简单的是利用模拟延时线实现。由于电感电容组成的网络对于交流信号具有相移作用,采用不同阻值的电感电容搭配就可以实现不同的相移。这种方法最大的缺点是实际上能用的电感电容值是离散的,并不是每个相移的每个控制点都能得到合适的电感、电容的值,而且模拟器件的值随温度时间会变化,而且器件本身具有一定的容差,这从根本上限制了这种方法在高精度相移中的应用。

[0014] 利用对高频脉冲计数实现相移是另一种常用的方法。如果发射频率为 $f_0$ ,采用 $n$ 倍的 $f_0$ 计数,通过设定初始计数值就可以实现 $2\pi/n$ 精度的相移。这种方法的优点是简单可靠,缺点是实现的相位控制精度较低,如果需要高精度相移,计数脉冲信号的频率很高,难以实现。比如对于2MHz的发射信号,如果需要的相移精度为8位(256阶),计数脉冲需要512MHz,如果发射频率或者相移精度进一步提高,计数脉冲的频率也会进一步升高,这都对实现的器件提出了很高的要求。因此这种方法不适合高频高精度的应用。

[0015] 利用数字延时器产生延时也是常用的方法之一。诸如AD9501等器件,产生时间延时的原理是通过产生一个随幅度时间线性增长的三角波,同时设定一个阈值电压;利用高速比较器对设定的阈值电压和三角波幅值进行比较。当三角波的幅值超过设定阈值时,产生一个输出脉冲;由于三角波的幅值和时间之间保持线形关系,通过改变设定电压阈值就可以控制时间延时。这种方法有三个方面的缺点:其一,三角波的产生是依赖于模拟积分器,利用恒定电流在电容上积分产生,电容值的偏移会影响三角波的斜率,从而导致延时值的偏离;其二,由于这种方法的基本原理是依赖比较器对两个电压进行比较,系统的噪声水平会影响比较器的输出,输出延时的抖动由系统噪声水平决定;其三,对于频率比较高的情况,积分电容比较小,杂散电容影响很大,这限制了这种方法在高频场景下的应用。上述缺点决定了这一类方法不能应用于要求高频高精度延时的工作场景。

[0016] 中国专利CN1596432A中公布了一种产生相移的方法。该方法采用两路具有一定相位偏差的正弦波信号作为基准信号,通过两路基准信号的线性叠加得到输出信号。按照三角公式,输出信号还是正弦波,只是相位发生了变化。变化的相位和两路基准信号的加权值有关系。同时输出信号的幅度由两路基准信号的加权值决定。这种方法原理很简单,但是为了保证最终的相移,两路基准信号之间的相位关系必须保证,同时两路基准信号权值的相互比例关系的误差会直接影响输出信号的相移。权值上噪声的叠加会影响输出信号的相移。另外,由于输出信号的幅度和相移同时由两路基准信号权值决定,输出信号相移和幅度的调整并不彼此独立。

[0017] 控制器的输出信号用来驱动超声换能器,用于主动发射能量到给定区域。超声检测成像领域为了提高检测灵敏度要求将更高的能量发射到目标靶点处,而超声治疗领域为了取得好的治疗效果,也要求系统有大的功率容量。比如,超声治疗应用中要求,超声换能器每个阵元的输出功率达到数瓦,系统的输出达到10瓦以上。这就要求输出信号采用高效

的驱动形式。驱动效率以及驱动发射过程中的相位畸变是表征系统发射性能的关键指标。

[0018] 常用的功率驱动方式包括线性驱动放大和开关驱动放大方式。线性驱动放大器可以较好的保证信号波形形状,采用A类、B类或者AB类。由于是线性放大,输出信号的幅度由功率驱动前级信号决定。虽然具有低失真、幅度调整容易的好处,但是效率较低,其效率随输出信号幅度的降低迅速降低,驱动器发热大,大功率阵元数较多的相控阵驱动条件下不能使用。

[0019] 开关驱动放大方式工作在D类或者E类方式下,驱动芯片工作在开关状态,要不是开通,要不是关闭,系统驱动过程中的损耗主要是开关损耗,效率高达90%以上。效率高,发热小使得相应的驱动相应功率的体积减少,便于集成,适用于通道数较多的阵列(相控阵)驱动。开关驱动放大方式的一个问题是输出信号的幅度调整不如线性驱动方式容易,必须采用漏集(射集)调制的方式。

[0020] 开关驱动放大方式的输出是方波,必须进行滤波后才能够驱动阵元工作,采用电感电容构成的无源网络进行滤波。滤波网络的引入也会带来一个附加的相移,其值是由电感电容值决定的。由于电感电容的值都具有一定的分散性,这个附加相移也是具有一定的分散性的,这个分散性导致了相移控制精度变差。

[0021] 可以看到,一种相位控制精度高、相位和幅度分离控制、驱动效率高、驱动附加相位补偿的连续波相控阵发射控制的系统和方法,对于需要精确控制相位幅度的场合诸如相控阵超声波血流探测、超声波治疗等领域是十分关键的,而且目前没有现有的解决方法和系统。

## 发明内容

[0022] 本发明的目的在于克服上述现有技术的缺点,提供一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统,其具有高精度相移控制,高效率的通道驱动,一体化的驱动通道相位补偿,阵元相位幅度分离控制的优点。

[0023] 本发明的目的是通过以下技术方案来实现的:

[0024] 本发明首先提出一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法:通过对输入基准时钟和通道输出信号的采样进行相位比较,输出信号的平均幅度正比于相位差;相位差和相位控制信号进行求差处理,并利用得到的差值去控制振荡频率产生振荡信号;反馈环路锁定时,相位差就和相位控制信号的幅值一一对应;通过相位控制信号的幅值控制通道输出信号和输入基准时钟之间的相位差。

[0025] 进一步的,上述振荡信号用于驱动开关产生放大信号,并激励阵元;幅度控制信号直接控制压控电压源产生放大信号所需要的电压激励开关;开关输出的信号通过滤波网络消除高频分量后激励阵元,同时滤波后信号反馈至相位比较部分,滤波导致的相关相位偏差将会被整个相位控制环路自动补偿。

[0026] 为了实现上述控制方法,本发明提出一种用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其包括:数据控制单元、多个通道单元、换能器和数据总线;所述数据控制单元控制多个通道单元,每个通道单元对应一个换能器的一个阵元;所述数据控制单元产生全局的基准时钟信号,同时通过数据总线将每个通道单元所须的相位和幅度控制信息发送给通道单元。

[0027] 上述基准时钟信号的频率等于超声换能器发射信号频率。

[0028] 上述通道单元根据数据总线下发的相位控制信息和幅度控制信息,对基准时钟信号进行相应的相移和功率驱动并控制基准时钟信号幅度,产生通道输出信号,通过连接电缆驱动换能器的对应阵元。

[0029] 进一步的,以上每个通道单元采用基于锁相环的高精度相移产生,利用开关放大驱动方式进行功率放大,利用锁相环组成闭环补偿驱动附加相位。

[0030] 上述通道单元包括锁相环、减法器、第一数模转换器、第二数模转换器、程控电压源、E类放大器、低通滤波器;所述减法器的正相端连接锁相环,所述减法器反相端连接第一数模转换器,所述减法器的输出端连接回锁相环中;所述第一数模转换器和第二数模转换器的输入端同时连接至数据总线;所述第二数模转换器的输出端连接至程控电压源的输入端;程控电压源的输出端连接至E类放大器的电源;锁相环的输出端连接至E类放大器的输入端;所述E类放大器的输出端连接低通滤波器的输入端;所述低通滤波器的输出得到一个通道的输出信号驱动换能器的一个阵元。

[0031] 上述低通滤波器是阻容构成的无源低通滤波器。

[0032] 上述锁相环由鉴相器、压控振荡器和环路滤波器组成;所述鉴相器的输入端连接全局时钟信号,鉴相器的另一个输入连接输出信号,鉴相器的输出端连接减法器的正相端;减法器的输出通过环路滤波器连接锁相环中的压控振荡器;压控振荡器的输出连接E类放大器的输入端。

[0033] 上述用于控制超声相控阵连续波发射的系统,具体如下:

[0034] 利用数据控制单元,控制多个通道单元,数据控制单元产生全局的基准时钟信号,同时通过数据总线将每个通道单元所须的相位和幅度控制信息发送给通道单元;

[0035] 通道单元负责根据数据总线下发的相位控制信息和幅度控制信息,对基准时钟信号进行相应的相移和功率驱动并控制基准时钟信号幅度,产生通道输出信号,通过连接电缆驱动换能器的对应阵元;

[0036] 数据总线根据不同的地址寻址控制第一数模转换器和第二数模转换器,产生相位控制信号和幅度控制信号,输入的数字量和第一数模转换器和第二数模转换器的输出值之间保持线性关系,相位控制信号独立控制通道输出信号相对于基准时钟信号在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内产生相移,幅度控制信号直接作用于程控电压源;程控电压源的输出直接作用于E类放大器的漏级;使E类放大器的输出幅度由E类放大器的漏级电压决定,即:幅度控制数字量借助于幅度控制信号线形的控制通道输出信号的幅度,实现输出信号的幅度控制。

[0037] 进一步,以上所述程控电压源的输出与幅度控制信号呈线性关系。

[0038] 本发明具有以下有益效果:

[0039] (1)该方法具有相位和幅度控制参量连续可调的优点。

[0040] (2)相位控制简单,对于不同的频率,相同的相位偏差对应的控制量不变的优点。

[0041] (3)每个通道的输出波形的幅度和相位都可以通过电压控制,可以方便的通过数模电压转换器件实现,控制简单。

[0042] (4)由于从方法原理上说幅度和相位的控制都是连续的,采用高精度的数模电压转换器件就可以提升控制精度,方法和系统从本质上具有控制精度高的优点。

[0043] (5)采用开关驱动器,工作功耗小,输出信号的幅度调节可以通过开关驱动器的电

源电压调节进行控制。控制简单,效率高,调节连续,功耗低。

[0044] (6)采用闭环锁相环控制方法,抵消了开关驱动以及后续滤波引起的附加相移,保证了相移精度。

### 附图说明

- [0045] 图1是阵元聚焦延时计算方法示意图;  
[0046] 图2是连续波相控阵发射控制系统和方法的示意图;  
[0047] 图3是通道单元的原理示意图;  
[0048] 图4是一个32通道连续波相控阵发射控制系统的实施例;  
[0049] 图5是800K~1400K共7个频率点的电压相位控制测量结果;  
[0050] 图6是本发明控制方法的原理框图。

### 具体实施方式

[0051] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述:

[0052] 参见图6:本发明用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法,是通过对输入基准时钟9和通道输出信号11的采样进行相位比较49,输出信号的平均幅度正比于相位差(50);相位差50和相位控制信号15进行求差51处理,并利用得到的差值52去控制振荡频率产生振荡信号54;反馈环路锁定时,相位差50就和相位控制信号15的幅值一一对应;通过相位控制信号的幅值控制通道输出信号11和输入基准时钟9之间的相位差。所述振荡信号54用于驱动开关产生放大信号,并激励阵元;幅度控制信号14直接控制压控电压源产生放大信号所需要的电压激励开关;开关输出的信号通过滤波网络57消除高频分量后激励阵元,同时滤波后信号反馈至相位比较部分,滤波导致的相关相位偏差将会被整个相位控制环路自动补偿。

[0053] 参见图2:本发明用于控制超声相控阵连续波发射的系统,其包括:数据控制单元8、多个通道单元7、换能器5和数据总线10;所述数据控制单元8控制多个通道单元7,每个通道单元7对应一个换能器5的一个阵元;所述数据控制单元8产生全局的基准时钟信号9,同时通过数据总线10将每个通道单元7所须的相位和幅度控制信息发送给通道单元7。

[0054] 其中基准时钟信号9的频率等于超声换能器发射信号频率。通道单元7根据数据总线10下发的相位控制信息和幅度控制信息,对基准时钟信号9进行相应的相移和功率驱动并控制基准时钟信号9幅度,产生通道输出信号11,通过连接电缆6驱动换能器5的对应阵元。

[0055] 以上每个通道单元7采用基于锁相环的高精度相移产生,利用开关放大驱动方式进行功率放大,利用锁相环组成闭环补偿驱动附加相位。

[0056] 参见图3:本发明的通道单元7包括锁相环20、减法器24、第一数模转换器13、第二数模转换器12、程控电压源23、E类放大器16、低通滤波器25;所述减法器24的正相端连接锁相环20,所述减法器24反相端连接第一数模转换器13,所述减法器24的输出端连接回锁相环20中;所述第一数模转换器13和第二数模转换器12的输入端同时连接至数据总线;所述第二数模转换器12的输出端连接至程控电压源23的输入端;程控电压源23的输出端连接至E类放大器16的电源;锁相环20的输出端连接至E类放大器16的输入端;所述E类放大器16的

输出端连接低通滤波器25的输入端；所述低通滤波器25的输出得到一个通道的输出信号11驱动换能器5的一个阵元。其中在本发明的最佳实施例中，低通滤波器25是阻容构成的无源低通滤波器。

[0057] 如图3所示，本发明的锁相环20由鉴相器22、压控振荡器18和环路滤波器21组成；所述鉴相器22的输入端连接全局时钟信号9，鉴相器22的另一个输入连接输出信号11，鉴相器22的输出端连接减法器24的正相端；减法器24的输出通过环路滤波器21连接锁相环中的压控振荡器18；压控振荡器18的输出连接E类放大器16的输入端。

[0058] 综上所述，本发明是利用数据控制单元8，控制多个通道单元7，每个通道单元对应一个换能器5的一个阵元。数据控制单元8产生全局的基准时钟信号9，同时通过数据总线10将每个通道所须的相位和幅度控制信息发送给通道单元。控制单元产生的全局基准时钟信号9的频率等于超声换能器发射信号频率，同时作为一个基准，每个通道的相移都是基于这个信号。

[0059] 通道单元负责根据数据总线10下发的相位控制信息和幅度控制信息，对基准时钟信号9进行相应的相移和功率驱动并控制其幅度，产生通道输出信号11，通过连接电缆6驱动换能器5的对应阵元。

[0060] 每个通道单元采用基于锁相环(PLL)的高精度相移产生，利用开关放大驱动方式进行功率放大，利用PLL组成闭环补偿驱动附加相位。通道单元的详细结构在图3中给出。

[0061] 数据总线10根据不同的地址寻址控制第一和二数模转换器13和12，产生相位控制信号15和幅度控制信号14，输入的数字量和数模转换器的输出值13、12之间保持线性关系。相位控制信号15独立控制11相对于信号9在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内产生相移。幅度控制信号14直接作用于程控电压源23。程控电压源的输出与信号14呈线性关系。23的输出直接作用于E类放大器16的漏级(集电极)。由于E类放大器工作在开关状态，16的输出幅度完全由E类放大器的漏级(集电极)电压决定。也就是说，幅度控制数字量借助于电压14线性的控制了输出信号11的幅度，实现输出信号的幅度控制。

[0062] 鉴相器22、环路滤波器21和压控振荡器18构成锁相环20，其基准输入就是信号9。鉴相器22对两路输入信号9和通道输出信号11进行比较，其输出波形的直流分量电压17正比于输出信号11和基准时钟信号9之间的相位差。通过减法器24将17和相位控制信号15相减得到差值信号19，通过环路滤波器21滤除输出19中的高频分量和干扰后，控制压控振荡器18，其输出振荡波形26输出给16进行功率放大。16的输出通过低通滤波器25滤除高次谐波分量后产生输出信号11，如前面提到的，低通滤波器25会引入一个附加相移，从后面的分析可以看到这个相移是可以通过整个环路补偿掉。

[0063] 假定锁相环20工作在锁定状态，信号19的电压为：

$$[0064] \quad V_d(s) = K_d(\theta_i(s) - \theta_o(s)) = K_d\theta_e(s) \quad (3)$$

[0065]  $K_d$ 是鉴相器22增益，单位为伏/弧度， $\theta_i(s)$ 是基准时钟信号9的相位，单位为弧度， $\theta_o(s)$ 是通道输出信号11的相位， $\theta_e(s)$ 表示基准时钟信号9和通道输出信号11之间的相移，基准时钟信号9的频率为 $\omega_c$ 。

[0066] 设相位控制信号15电压为 $V_k(s)$ ，信号19的电压为： $V_c(s) = V_d(s) + V_k(s) = K_d\theta_e(s) + V_k(s)$ 。

[0067] 环路滤波器的传输函数用 $F(\cdot)$ 表示，环路滤波器的输出，也就是压控振荡器的输

入为：

$$[0068] \quad V_c(s) = F(\cdot) [K_d \theta_e(s) + V_k(s)] \quad (4)$$

[0069] 压控振荡器18输出频率为：

$$[0070] \quad \omega = \omega_0 + K_o \cdot V_c(s)$$

$$[0071] \quad (5)$$

$$[0072] \quad = \omega_0 + K_o F(0) [K_d \theta_e(s) + V_k(s)]$$

[0073] 其中  $\omega_0$  为压控振荡器的中心频率，设置为基准时钟信号的频率附近。 $K_o$  为压控振荡器的灵敏度，单位为弧度/秒伏。环路稳定时，环路滤波器的增益表现为0频处的增益，用  $F(0)$  表示。

[0074] 如果低通滤波和E类功放在信号驱动环节加入的附加相移为  $\beta$ ，信号11可以表示为： $\omega_0 + K_o F(0) [K_d \theta_e(s) + V_k(s)] + \beta$  (6)

[0075] 结合鉴相器处于稳定状态的假设，可以得到等式：

$$[0076] \quad \theta_e(s) = \omega_c - (\omega_0 + K_o F(0) [K_d \theta_e(s) + V_k(s)] + \beta) \quad (7)$$

[0077] 推导得到：

$$[0078] \quad \theta_e(s) = \frac{\omega_c - \omega_0 - \beta - K_o F(0) V_k(s)}{1 + K_o F(0) K_d} = \frac{\omega_c - \omega_0 - \beta}{1 + K_o F(0) K_d} - \frac{K_o F(0) V_k(s)}{1 + K_o F(0) K_d} \quad (8)$$

[0079] 选择环路滤波器直流增益  $F(0)$  远远大于1， $\frac{\omega_c - \omega_0 - \beta}{1 + K_o F(0) K_d}$  趋向于零，则：

$$[0080] \quad \theta_e(s) = -\frac{V_k(s)}{K_d} \quad (9)$$

[0081] 输出信号11和基准时钟信号9之间相移在滤波器直流增益  $F(0)$  远远大于1的情况下，和相位控制电压15成比例，比例因子为  $-\frac{1}{K_d}$ 。这样用相位控制数字量直接控制了输出

信号的相移，同时也消除了低通滤波和E类功放在信号驱动环节加入的附加相移为  $\beta$  的影响。方法本身和超声信号频率没有关系，可以适用于不同频率的超声连续波产生。提高数模转换器的转换精度可以直接提升相位控制精度。

[0082] 从上面的分析可以看出，本发明提出的系统和方法具有高精度相移控制，高效率的通道驱动，一体化的驱动通道相位补偿，阵元相位幅度分离控制等优点。

[0083] 实施例：

[0084] 以下结合一个32通道连续波相控阵发射控制系统的具体实现，对本发明进行详细说明，系统结构参见图4。

[0085] 图4中，采用STM32F103作为智能控制主机29对整个系统进行控制，29通过RS232串行连接总线37和外部进行通讯，接收32通道控制所需的相位幅度控制信息。系统中共有32个通道单元，产生32路相位幅度可独立控制的信号。为了简化，图4中只画出了第1、2和32通道单元。图中41所指的是第1通道单元，42所指的是第2通道单元，43所指的是第32通道单元。38是41的输出，39是42的输出，40是43的输出。所有通道单元的内部结构都相同，利用第1通道单元即41所指的进行说明。

[0086] 图中32所指的是以T1的双路12位数模转换器DAC7562为核心的数模转换调理电路,DAC7562和29通过SPI总线进行通讯,29将第1通道控制所需的幅度和相位信息写入DAC7562的控制寄存器中。其中相位控制信息写入DAC7562中通道A对应的寄存器中;幅度控制信息写入DAC7562中通道B对应的寄存器中。DAC7562的通道A的输出经过放大得到45就是相位的控制信息的模拟量,DAC7562的通道B的输出经过放大得到46就是幅度的控制信息的模拟量。

[0087] 30是NXP锁相环芯片74HCT9046A,其内部包含一个鉴相器和一个压控振荡器(VCO)。31是以MAXIM的放大器MAX4238为核心搭建成的一个减法积分器。其对30的鉴相器输出44和32的输出通道A,即相位控制模拟量45进行相减,再进行积分,其直流的增益为无穷大。

[0088] 31的输出(即积分器的输出)连接30内的压控振荡器的输入,控制压控振荡器产生振荡信号46。

[0089] 32的通道B的输出46控制UC3842产生发射驱动所需的漏级电压47。34是以TC6320和相应的驱动电路构成的E类放大器,其漏级连接47。34的输出信号的幅度便由47的值决定。34的输入连接信号46,由30中的压控振荡器产生。34的输出48通过一个电感电容组成的滤波网络35后产生信号38,作为通道单元1的输出信号直接激励换能器阵元。信号38同时连接30鉴相器的输入,作为反馈控制相位产生。

[0090] 图5给出了800K~1400K共7个频率点的电压相位控制测量结果,R1是理想控制线,B2是实际测量数据。可以看到不同的频率点,相位电压的控制特性B2是一致的。B2相对于R1的偏移,由于控制特性偏移的一致性,通过存储相位电压控制关系,对于所需相位延时查表内插得到所需的控制电压,可以精确控制相位延时。

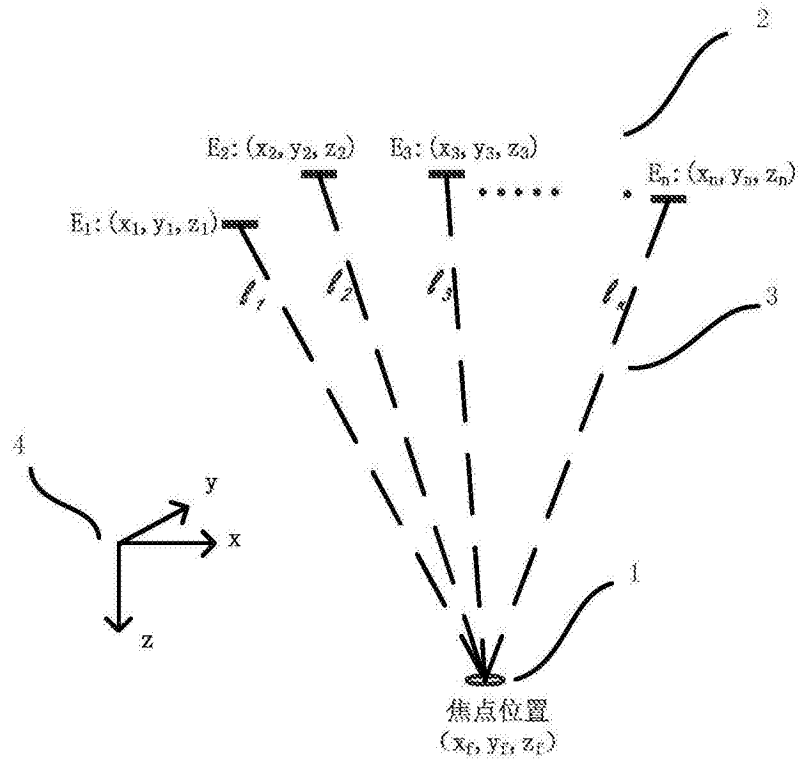


图1

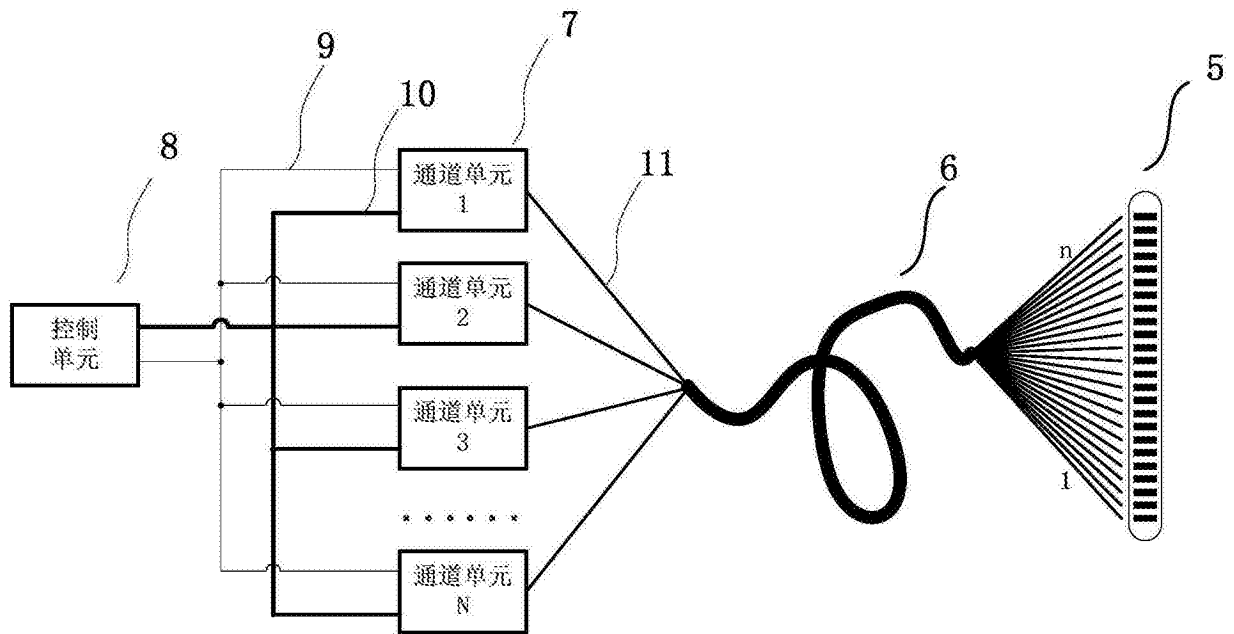


图2

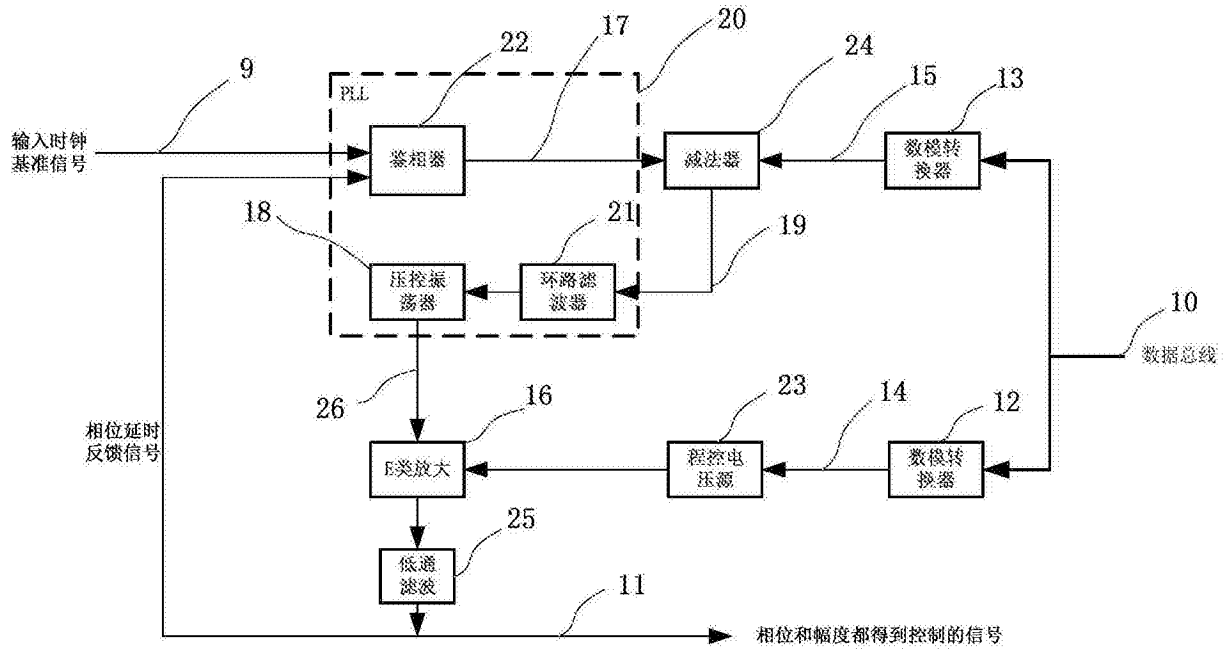


图3

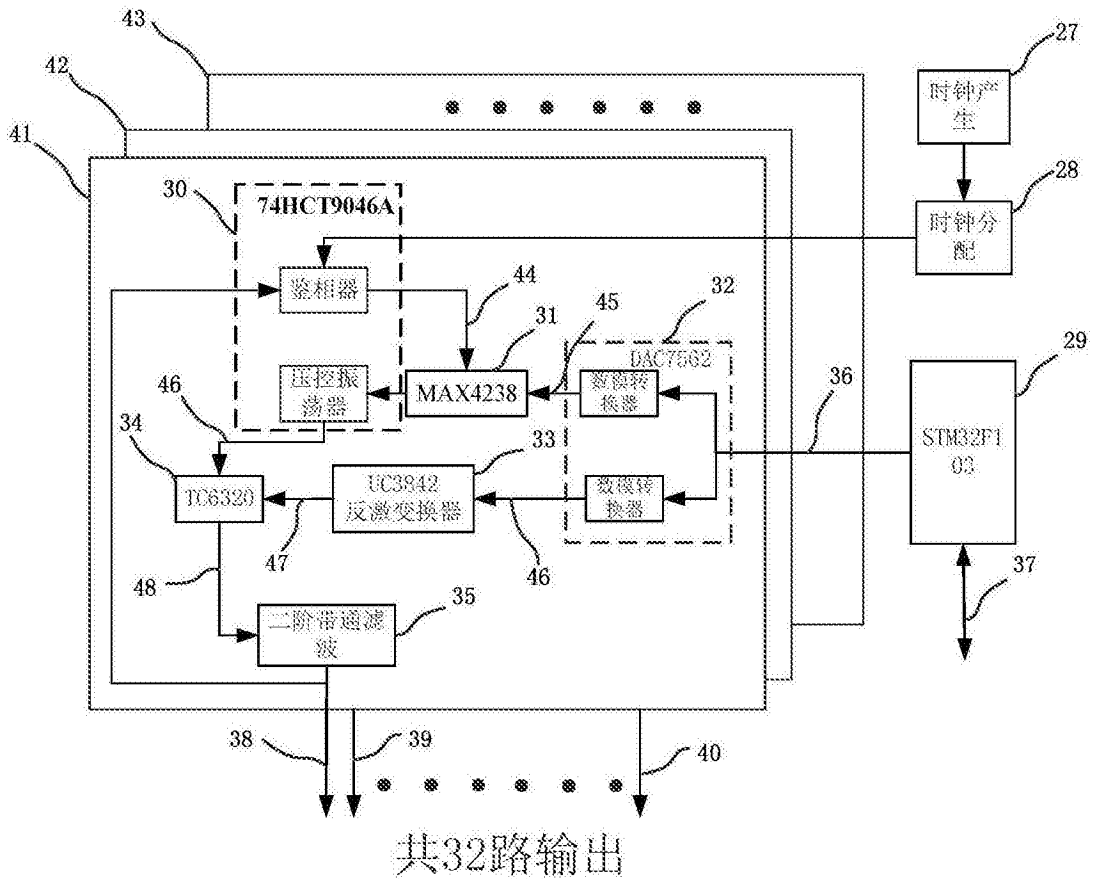


图4

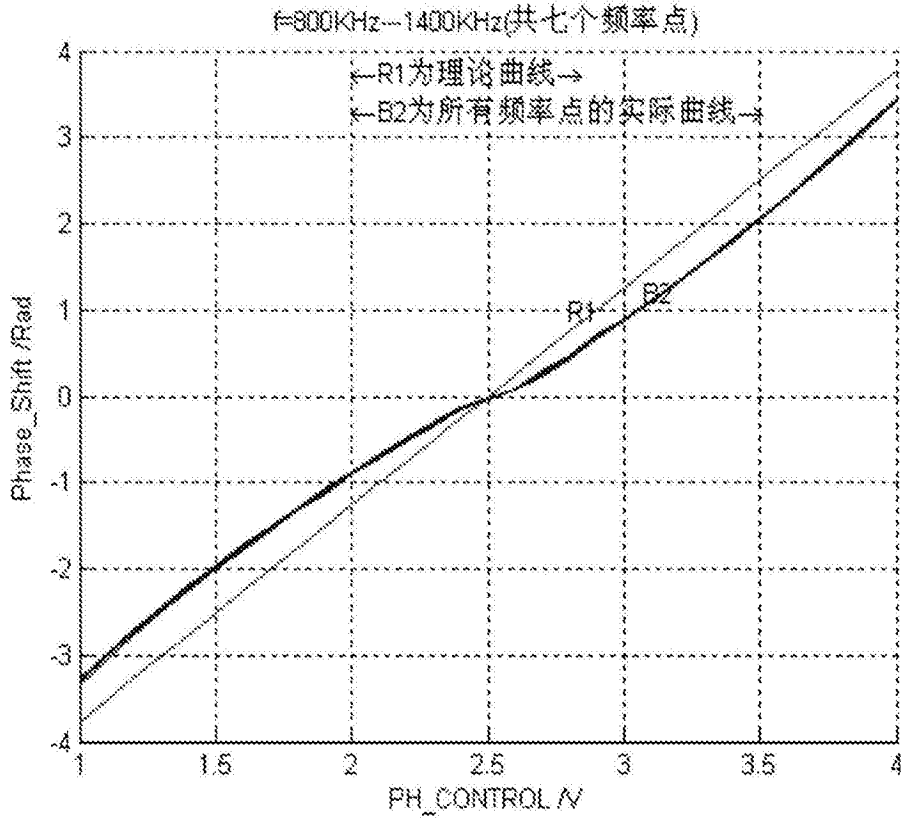


图5

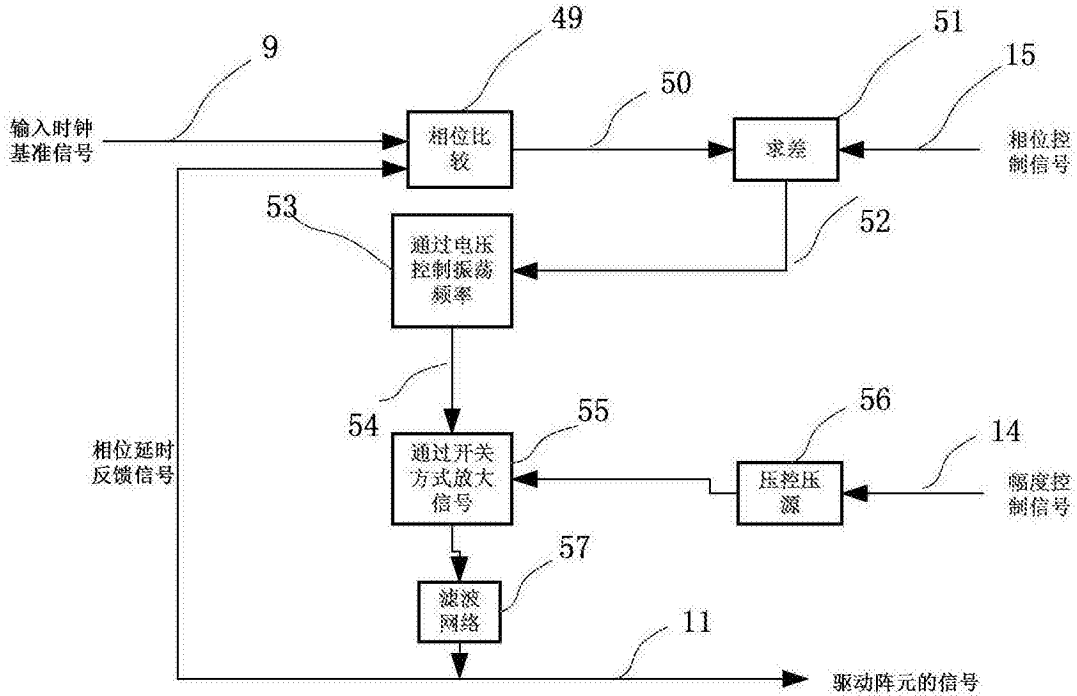


图6

专利名称(译)	一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统		
公开(公告)号	<a href="#">CN105411622B</a>	公开(公告)日	2016-08-17
申请号	CN201510881774.4	申请日	2015-12-03
[标]申请(专利权)人(译)	西安邮电大学		
申请(专利权)人(译)	西安邮电大学		
当前申请(专利权)人(译)	西安邮电大学		
[标]发明人	刘睿		
发明人	刘睿		
IPC分类号	A61B8/00		
代理人(译)	刘强		
其他公开文献	CN105411622A		
外部链接	<a href="#">Espacenet</a> <a href="#">SIPO</a>		

摘要(译)

本发明公开了一种用于控制超声相控阵连续波发射的控制方法及系统，该系统包括数据控制单元、多个通道单元、换能器和数据总线；所述数据控制单元控制多个通道单元，每个通道单元对应一个换能器的一个阵元；所述数据控制单元产生全局的基准时钟信号，同时通过数据总线将每个通道单元所需的相位和幅度控制信息发送给通道单元。本发明的系统及其控制方法具有高精度相移控制，高效率的通道驱动，一体化的驱动通道相位补偿，阵元相位幅度分离控制的优点。

