

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 2 月 22 日 (22.02.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/032495 A1

(51) 国际专利分类号:
H03L 7/06 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2016/095978

(22) 国际申请日: 2016 年 8 月 19 日 (19.08.2016)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 北京大学深圳研究生院 (PEKING UNIVERSITY SHENZHEN GRADUATE SCHOOL) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽深圳大学城北大湾区, Guangdong 518055 (CN)。

(72) 发明人: 汪波 (WANG, Bo); 中国广东省深圳市南山区西丽深圳大学城北大湾区, Guangdong 518055 (CN)。 黄继攀 (HUANG, Jipan); 中国广东省深圳市南山区西丽深圳大学城北大湾区, Guangdong 518055 (CN)。 王新安 (WANG, Xinan); 中国广东省深圳市南山区西丽深圳大学城北大湾区, Guangdong 518055 (CN)。 陈红英 (CHEN,

Hongying); 中国广东省深圳市南山区西丽深圳大学城北大湾区, Guangdong 518055 (CN)。

(74) 代理人: 深圳鼎合诚知识产权代理有限公司 (DHC IP ATTORNEYS); 中国广东省深圳福田区金田路与福华路交汇处现代国际大厦2201, Guangdong 518048 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: ANALOG COMPUTING DEVICE IN TIME MODE

(54) 发明名称: 一种时间模式的模拟计算装置

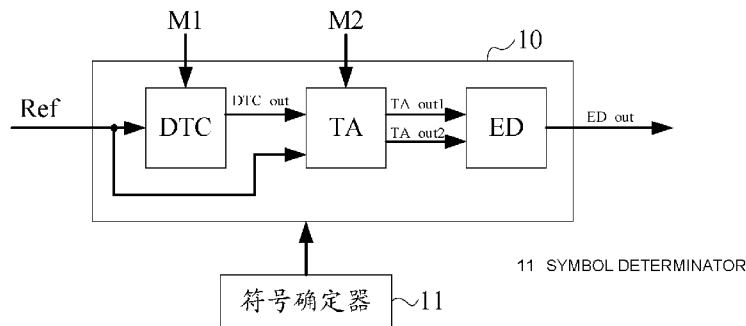


图 1

(57) Abstract: An analog computing device in time mode, comprising at least one multiplication unit (10), the multiplication unit (10) comprising: a digital-to-time converter (DTC), inputting a reference signal (Ref) and a digital signal M1, for outputting a signal, the time delay between the signal and the reference signal (Ref) being |M1|; a time amplifier (TA), inputting the reference signal (Ref) and the output signal of the digital-to-time converter (DTC), for amplifying the time delay between two signals, the two signals being the reference signal (Ref) and the output signal of the digital-to-time converter (DTC), by |M2| times and then respectively outputting the two signals, M2 being the amplification factor of the time amplifier; an edge detector (ED), for detecting the edge of the two signals outputted by the time amplifier (TA), so as to output a signal whose pulse width is equal to the time delay between the two signals. The computing device can be realized on the basis of a digital integrated circuit, and represent numerical values using time. The computation is done in one step.

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种时间模式的模拟计算装置，其包括至少一个乘法单元(10)，所述乘法单元(10)包括：数字到时间转换器(DTC)，输入一参考信号(Ref)以及数字信号M1，用于输出一个与所述参考信号(Ref)之间时延为|M1|的信号；时间放大器(TA)，输入所述参考信号(Ref)以及数字到时间转换器(DTC)的输出信号，用于将所述参考信号(Ref)与数字到时间转换器(DTC)的输出信号这两个信号之间的时延放大|M2|倍后再分别输出这两个信号，其中M2为时间放大器的放大倍数；边沿检测器(ED)，用于检测所述时间放大器(TA)输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于所述两个信号之间时延的信号。上述计算装置可以基于数字集成电路来实现，并且以时间进行数值的表示，运算一步到位。

一种时间模式的模拟计算装置

技术领域

本发明涉及一种时间模式的模拟计算装置。

背景技术

集成电路一般分为模拟集成电路和数字集成电路。由于模拟电路无法随着摩尔定律的节奏等比例地减小，随着工艺尺寸的减小，模拟电路还有电容漏电增大、电源电压降低和需要手工设计版图等问题。而数字集成电路本身具有高精度、良好的噪声隔绝性、灵活性、可编程性和自动化的设计工具等优点，更重要的是可以随着工艺节点的进步其开关速度变得更快。因此，从集成电路本身来说，数字集成电路是优于模拟集成电路的，现实中模拟集成电路正在被数字集成电路逐渐取代。

当用电路实现数值计算时，一般涉及到两个问题，一个是数值的表示，另一个是实现的电路。

当用模拟集成电路来实现数值计算时，优点是可以使用模拟集成电路中的模拟量来表示数值，缺点就是如上所述的模拟集成电路本身的缺点。具体地，可以采用模拟集成电路中的电压和电流来表示数值大小，并且利用电压和电流之间的关系实现相应的计算功能，例如，可以以运算放大器作为基本运算单元，电压乘以电导等于电流，从而实现乘法操作；若干条电路支路汇聚到一个节点，所有流入节点的电流等于流出该节点的电流，从而实现加法操作，这样的乘法和加法操作都是瞬时完成的，而不是分成许多不同的步骤来共同完成的，因此用模拟集成电路来实现数值计算时，计算速度快，并且效率高。但是，如上所述，模拟集成电路——尤其是大规模的模拟集成电路，其设计非常复杂，所有的电路版图需手工完成，耗费时日，而且电路的一致性无法得到有效保障。

当用数字集成电路来实现数值计算时，优点是如上所述的数字集成电路本身的优点，而缺点就是各数值需要用若干比特位来表示，要保证一定的计算精度就一定会消耗大量的电路资源、面积，并引起了功耗大量消耗；另外，在数字集成电路中，各计算操作会分成很多更小的运算来实现，这样需要的时钟周期就会很多，计算效率不高。

发明内容

根据第一方面，一种实施例中提供一种时间模式的模拟计算装置，包括至少一个乘法单元，所述乘法单元包括：

数字到时间转换器，输入一参考信号以及数字信号 M1，用于输出一个与所述参考信号之间时延为|M1|的信号；

时间放大器，输入所述参考信号以及数字到时间转换器的输出信号，

用于将所述参考信号与数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M2|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M2$ 为时间放大器的放大倍数；

边沿检测器，用于检测所述时间放大器输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于所述两个信号之间时延的信号。

根据第二方面，一种实施例中提供一种时间模式的模拟计算装置，其特征在于，包括级联的第一乘法单元和第二乘法单元：

所述第一乘法单元包括：

第一数字到时间转换器，输入一参考信号以及数字信号 $M1$ ，用于输出一个与所述参考信号之间时延为 $|M1|$ 的信号；

第一时间放大器，输入所述参考信号以及第一数字到时间转换器的输出信号，用于将所述参考信号与第一数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M2|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M2$ 为第一时间放大器的放大倍数；

第一边沿检测器，用于检测所述第一时间放大器输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于所述两个信号之间时延的信号；

所述第二乘法单元包括：

第二数字到时间转换器，输入第一边沿检测器的输出信号以及数字信号 $M3$ ，用于输出一个与所述第一边沿检测器的输出信号之间时延为 $|M3|$ 的信号；

第二时间放大器，输入第一边沿检测器和第二数字到时间转换器的输出信号，用于将所述第一边沿检测器的输出信号与第一数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M4|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M4$ 为第二时间放大器的放大倍数；

第二边沿检测器，用于检测所述第二时间放大器输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号或输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号。

依据上述实施的时间模式的模拟计算装置，由于以时间作为模拟数值，一次操作即可完成运算，大大提高了运算效率；由于以时间差表示数值，随着器件速度的提升，信号边沿越来越陡峭，所表示的数值也会越来越精确；由于数字到时间转换器 DTC、时间放大器 TA 以及边沿检测器 ED 等都可以用数字集成电路实现，可以用现有的 EDA 工具自动布局布线，大大加快设计进程；适用于带符号位的计算。

附图说明

图 1 是本申请实施例 1 中时间模式的模拟计算装置的一种结构示意图；

图 2 是本申请实施例 1 中时间模式的模拟计算装置的一种时序图；

图 3 是本申请实施例 2 中时间模式的模拟计算装置的一种结构示意图；

图 4 是本申请实施例 2 中时间模式的模拟计算装置的第一种结构示意图；

图 5 是本申请实施例 2 中时间模式的模拟计算装置的第二种结构示意图；

图 6 是本申请实施例 2 中时间模式的模拟计算装置的第三种结构示意图；

图 7 是本申请实施例 3 中时间模式的模拟计算装置进行计算结果存储时的原理示意图；

图 8 是本申请实施例 3 中时间模式的模拟计算装置的一种结构示意图。

具体实施方式

本申请结合模拟电路和数字电路的优点，提出一种以时间模式计算的发明构思：一方面，本申请采用连续的时间作为物理量来表示数值，因此可以像模拟量那样通过一次运算就可以得出结果，因此大大加快了运算速度；另一方面，本申请的具体实现电路可以数字集成电路，从而可以利用大规模集成电路进行设计以及保证电路的一致性。下面通过若干实施例并结合相关附图进行说明。

实施例 1

请参照图 1 和 2，本实施提出一种时间模式的模拟计算装置（以下简称模拟计算装置），本模拟计算装置包括至少一个乘法单元 10，乘法单元 10 包括数字到时间转换器（DTC，Digital to Time Converter）、时间放大器（TA，Time Amplifier）和边沿检测器（ED，Edge Detector），在一实施例中，还可以包括符号确定器 11。下面以模拟计算装置包括一个乘法单元 10 为例进行说明。

数字到时间转换器 DTC 是把数字形式（例如，M1）转换时间形式（例如， Δt_1 ），具体地，数字到时间转换器 DTC 需要一个参考脉冲信号（例如，Ref）作为输入，输出的信号脉冲与输入的参考脉冲信号的时延通过输入的一个数字信号（M1）来控制，这样就可以用输出的信号脉冲与输入的参考脉冲信号的时延来表示输入的数字信号（M1）的值。因此，在一实施例中，数字到时间转换器 DTC 有两个输入端，分别输入一参考信号 Ref 以及数字信号 M1，输出一个与参考信号 Ref 之间时延为|M1|的信号，这样，数字到时间转换器 DTC 的输出信号与参考信号 Ref 之间时延就可以用来表示数字信号 M1 的大小。

时间放大器 TA 有两个输入端和两个输出端，用于将分别从两个输

入端输入的信号之间的时延放大后再将这两个信号通过两个输出端分别输出。在一实施例中，时间放大器 TA 输入上述的参考信号 Ref 和数字到时间转换器 DTC 的输出信号，将参考信号 Ref 与数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M2|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 M2 为时间放大器 TA 的放大倍数，在一实施例中，时间放大器 TA 的放大倍数是可以根据不同需求来设置不同值的。由于参考信号 Ref 与数字到时间转换器的输出信号之间的时延为 $|M1|$ ，因此经过时间放大器 TA 的处理后，这两个信号之间的时延变为 $|M1*M2|$ ，从而实现了将两个数值相乘的运算。需要说明的是，虽然 M2 为时间放大器 TA 的放大倍数，这并不意味着 M2 为一个大于 1 的数值，M2 也可以为等于 1 或小于 1 的数值，甚至可以为负数。

边沿检测器 ED 用于检测时间放大器 TA 输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于上述两个信号之间时延的信号。如上所述，时间放大器 TA 输出的两个信号之间的时延为 $|M1*M2|$ ，因此边沿检测器 ED 这时需要提取出这两个信号之间的时延，具体地，边沿检测器 ED 通过检测这两个信号的边沿，来提取这两个信号的时延，从而输出一个脉冲宽度等于上述两个信号之间时延 $|M1*M2|$ 的信号，在一实施例中，如图 2 所示，时间放大器 TA 的两个输出端 TA out1 和 TA out2，边沿检测器 ED 可以检测这两个输出端输出信号的上升沿，也可以检测这两个输出端输出信号的下降沿，从而提取出这两个信号的时延，以输出一个脉冲宽度等于上述两个信号之间时延的信号。在一实施例中，边沿检测器 ED 可以由鉴相器 (PD, Phase Detector) 或鉴频鉴相器 (PFD, Phase Frequency Detector) 等来实现，用于比较时间放大器 TA 输出的两个信号边沿之间的时间差，并把它转换为一个方波信号的脉宽。以鉴频鉴相器 PFD 为例，鉴频鉴相器 PFD 的输入端可以设置为上边沿有效或者下边沿有效，这样增加了设置的灵活性，以便于处理带符号位的计算，当其中一个输入端口出现了有效的信号边沿时，其对应的输出信号变为高电平，当另一个输入端口接着出现了有效信号边沿时，其对应的输出信号也变为高电平，但是这个高电平是不稳定的，瞬时就会变成低电平。因为，这两个输出信号被送到一个与非门的输入端，其输出信号接入鉴频鉴相器 PFD 的复位端口。因此当第二个有效边沿到达时，与非门输出变为低电平（有效电平），鉴频鉴相器 PFD 复位，那么鉴频鉴相器 PFD 的输出瞬时都变为低电平。这样，输出的方波宽度等于第一个有效边沿和第二个有效边沿之间的时间差。这样就实现了一个时间宽度可调的方波信号，这两个边沿之间的时间宽度对应于 $|M1*M2|$ 。

符号确定器 11 用于根据 M1 和 M2 的正符号或负符号的个数来确定边沿检测器 ED 输出信号的正负符号。不妨以正符号为例，当 M1 和 M2

的正符号个数为偶数个时,则符号确定器 11 确定边沿检测器 ED 输出信号为正,反之,则符号确定器 11 确定边沿检测器 ED 输出信号为负。需要说明的,这里的偶数包括 0。如上所述,符号确定器 11 是为了确定边沿检测器 ED 输出信号的正负符号,若是只将本实施例的模拟计算装置用于正数的计算,只不必引入符号确定器 11。

以上的模拟计算装置实现了乘法运算,在一实施例中,本实施例的模拟计算装置还可以包括多个时间放大器 TA,各时间放大器 TA 进行级联,首级时间放大器 TA 输入参考信号 Ref 以及数字到时间转换器 DTC 的输出信号,尾级时间放大器 TA 向边沿检测器 ED 输出信号,中间各时间放大器 TA,前一级的时间放大器 TA 的两个输出端分别与后一级的时间放大器 TA 的两个输入端相连。多个时间放大器 TA 可以实现幂运算。

实施例 2

请参照图 3,本实施的模拟计算装置包括两个级联的乘法单元:第一乘法单元 21 和第二乘法单元 22,可以用来实现乘加运算、加法运算和减法运算等。

第一乘法单元 21 包括第一数字到时间转换器 DTC1、第一时间放大器 TA1 和第一边沿检测器 ED1。

第一数字到时间转换器 DTC1 输入一参考信号 Ref 以及数字信号 M1,用于输出一个与参考信号 Ref 之间时延为 $|M1|$ 的信号。

第一时间放大器 TA1 输入上述参考信号 Ref 以及第一数字到时间转换器的输出信号,用于将参考信号 Ref 与第一数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M2|$ 倍后再分别输出这两个信号,其中 M2 为第一时间放大器的放大倍数。这样,第一时间放大器 TA1 输出的两个信号之间的时延就为 $|M1*M2|$ 。

第一边沿检测器 ED1 用于检测第一时间放大器 TA1 输出的两个信号的边沿,以输出一个脉冲宽度等于上述两个信号之间时延的信号。这样,第一边沿检测器 ED1 输出了一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|$ 的信号。

第二乘法单元 22 包括第二数字到时间转换器 DTC2、第二时间放大器 TA2 和第二边沿检测器 ED2。

第二数字到时间转换器 DTC2 输入第一边沿检测器 ED1 的输出信号以及数字信号 M3,用于输出一个与第一边沿检测器 ED1 的输出信号之间时延为 $|M3|$ 的信号。在第二乘法单元 22 中,实质上是将第一边沿检测器 ED1 的输出信号作为参考信号来使用。

第二时间放大器 TA2 输入第一边沿检测器 ED1 和第二数字到时间转换器的输出信号,用于将第一边沿检测器 ED1 的输出信号与第一数字

到时间转换器 DTC1 的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M4|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M4$ 为第二时间放大器的放大倍数。这样，第二时间放大器 TA2 输出的两个信号之间的时延就为 $|M3*M4|$ 。

第二边沿检测器 ED2 用于检测第二时间放大器 TA2 输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号或输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号。

本实施例的模拟计算装置是为了实现 $M1*M2+M3*M4$ ，这包括确定 $M1*M2+M3*M4$ 的大小，即 $|M1*M2+M3*M4|$ 的值；还包括确定 $M1*M2+M3*M4$ 的符号，即为 $|M1*M2+M3*M4|$ 这个值赋一个正号还是负号。 $M1*M2+M3*M4$ 的绝对值以及符号，根据 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 符号的不同而有不同。请参见下表 1 和表 2，穷举了 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 所有的符号以及对应的计算结果。

	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4	情况 5	情况 6	情况 7	情况 8
M1 符号	+	-	+	-	+	-	+	-
M2 符号	+	-	+	-	-	+	-	+
M3 符号	+	-	-	+	+	-	-	+
M4 符号	+	-	-	+	-	+	+	-
$M1*M2+M3*M4$ 符号	+	+	+	+	-	-	-	-

表 1

	情况 9	情况 10	情况 11	情况 12	情况 13	情况 14	情况 15	情况 16
M1 符号	+	+	-	-	+	-	+	-
M2 符号	+	+	-	-	-	+	-	+
M3 符号	+	-	+	-	+	+	-	-
M4 符号	-	+	-	+	+	+	-	-
$M1*M2+M3*M4$ 符号	不定	不定	不定	不定	不定	不定	不定	不定

表 2

分析表 1 可知，情况 1~8 中， $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 的正符号/负符号为偶数时， $M1*M2+M3*M4$ 的大小为 $|M1*M2|+|M3*M4|$ ，进一步地，在情况 1~8 中，当 $M1$ 和 $M2$ 为相同符号且 $M3$ 和 $M4$ 为相同符号时（实际上，当 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 的正符号/负符号为偶数时，若 $M1$ 和 $M2$

为相同符号, 则 $M3$ 和 $M4$ 必为相同符号, 反过来也一样), $M1*M2+M3*M4$ 的符号为正, 当 $M1$ 和 $M2$ 为不同符号且 $M3$ 和 $M4$ 为不同符号时 (实际上, 当 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 的正符号/负符号为偶数时, 若 $M1$ 和 $M2$ 为不同符号, 则 $M3$ 和 $M4$ 必为不同符号, 反过来也一样), $M1*M2+M3*M4$ 的符号为负。所以情况 1~4 的计算结果是一样的, 大小都为 $|M1*M2|+|M3*M4|$, 且符号为正; 情况 5~8 的计算结果是一样的, 大小都为 $|M1*M2|+|M3*M4|$, 且符号为负。图 4 为表 1 中情况 1~8 中计算 $M1*M2+M3*M4$ 的时序。

分析表 2 可知, 情况 9~16 中, $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 的正符号/负符号为奇数时, $M1*M2+M3*M4$ 的大小为 $||M1*M2|-|M3*M4||$, 而符号则视 $|M1*M2|$ 和 $|M3*M4|$ 两者的大小而定。在情况 9~12 中, $M1*M2$ 为正, $M3*M4$ 为负, 因此当 $|M1*M2|$ 大于 $|M3*M4|$ 时, $M1*M2+M3*M4$ 的计算结果为正, 当 $|M1*M2|$ 小于 $|M3*M4|$ 时, $M1*M2+M3*M4$ 的计算结果为负。在情况 13~16 中, $M1*M2$ 为负, $M3*M4$ 为正, 因此当 $|M1*M2|$ 大于 $|M3*M4|$ 时, $M1*M2+M3*M4$ 的计算结果为负, 当 $|M1*M2|$ 小于 $|M3*M4|$ 时, $M1*M2+M3*M4$ 的计算结果为正。图 5 和图 6 为表 2 中情况 9~16 中计算 $M1*M2+M3*M4$ 的时序, 可以看到, $|M1*M2|$ 小于 $|M3*M4|$, 反映到时序上, 就是第一信号 (TA2 out1) 的下降沿先于第二信号 (TA2 out2) 的上升沿到来, 如图 5 所示; $|M1*M2|$ 大于 $|M3*M4|$, 反映到时序上, 就是第一信号 (TA2 out1) 的下降沿不先于第二信号 (TA2 out2) 的上升沿到来, 如图 6 所示, 其中第一信号 (即图 4、5 和 6 中的 TA2 out1) 为第一边沿检测器的输出信号 (即图 4、5 和 6 中的 ED1 out1) 经过第二时间放大器处理后输出的信号, 第二信号 (即图 4、5 和 6 中的 TA2 out2) 为第二数字到时间转换器的输出信号 (即图 4、5 和 6 中的 DTC2 out) 经过第二时间放大器处理后输出的信号。

因此, 在考虑 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 的符号的情况下, 本实施例的模拟计算装置还包括边沿确定器 23 和符号确定器 24。

边沿确定器 23 是为了确定第二边沿检测器 ED2 是输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号还是输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号, 在一实施例中, 它用于根据 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 和 $M4$ 的正符号或负符号的个数来使第二边沿检测器 ED2 是检测第二时间放大器 TA2 输出的第一信号的上升沿以及第二信号的下降沿, 从而输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号, 还是检测第二时间放大器 TA2 输出的第一信号的下降沿以及第二信号的上升沿, 从而输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号; 其中第一信号 (即图 4、5 和 6 中的 TA2 out1) 为第一边沿检测器的输出信号 (即图 4、5 和 6 中的 ED1 out1) 经过第二时间放大器处理后输出的信号, 第二信号 (即图

4、5 和 6 中的 TA2 out2) 为第二数字到时间转换器的输出信号 (即图 4、5 和 6 中的 DTC2 out) 经过第二时间放大器处理后输出的信号。在一具体实施例中, 边沿确定器 23 当 M1、M2、M3 和 M4 的正符号或负符号的个数为偶数 (本申请中偶数包括 0) 个时, 使第二边沿检测器 ED2 检测第二时间放大器 TA2 输出的第一信号的上升沿以及第二信号的下降沿, 从而输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号, 例如, 如图 4 所示, 为当 M1、M2、M3 和 M4 都为正数时的情况。边沿确定器 23 当 M1、M2、M3 和 M4 的正符号或负符号的个数为奇数个时, 使第二边沿检测器 ED2 检测第二时间放大器 TA2 输出的第一信号的下降沿以及第二信号的上升沿, 从而输出一个冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号, 例如, 图 5 和图 6 为 M1、M3 和 M4 为正数, M2 为负数的情况。

符号确定器 24 用于根据 M1、M2、M3 和 M4 的正符号或负符号来确定第二边沿检测器 ED2 输出信号的正负符号。在一具体实施例中, 符号确定器 24 当 M1、M2、M3 和 M4 的正符号或负符号的个数为偶数个时, 若 M1 和 M2 为同符号, 且 M3 和 M4 也为同符号, 则标记第二边沿检测器 ED2 输出信号为正, 若 M1 和 M2 为不同符号, 且 M3 和 M4 也为不同符号, 则标记第二边沿检测器 ED2 输出信号为负。符号确定器 24 当 M1、M2、M3 和 M4 的正符号或负符号的个数为奇数个时, 若第一信号的下降沿先于第二信号的上升沿到来, 则当 M3 和 M4 符号相同时, 标记第二边沿检测器 ED2 输出信号为正, 当 M3 和 M4 符号不不同时, 标记第二边沿检测器 ED2 输出信号为负; 若第一信号的下降沿不先于第二信号的上升沿到来, 则当 M1 和 M2 符号相同时, 标记第二边沿检测器 ED2 输出信号为正, 当 M1 和 M2 符号不不同时, 标记第二边沿检测器 ED2 输出信号为负。

如上所述, 沿确定器 23 和符号确定器 24 是为了确定第二边沿检测器 ED2 的输出结果的绝对值以及正负号, 若是本实施例的模拟计算装置只用于计算正数, 则没有必要引入沿确定器 23 和符号确定器 24, 并且第二边沿检测器 ED2 直接输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号。

在本实施例中, 将 M2 和 M4 设置为 1, 则可以实现 $M1+M3$ 的运算, 将 M2 设置为 1, M4 设置为 -1, 则可以实现 $M1-M3$ 的操作。

实施例 3

在实施例 1 或 2 的基础上, 本实施例的模拟计算装置还包括用于存储计算结果的装置。

如实施例 1 和 2 所描述的, 计算的结果是以方波信号的脉宽形式来表示的 (参见图 2、4、5 和 6), 因此可以用利用一控制电路, 此控制电

路利用这个方波信号来控制一个振荡器电路的输出。如图 7 所示, 在计算结果的脉宽时间内, 振荡器电路的波形允许输出, 否则不输出信号, 即在计算结果的脉宽时间内, 会输出一定数量的振荡器电路的脉冲信号, 而且振荡器电路输出的脉冲的个数与计算结果的脉宽成正比, 即与计算结果成正比。把这些脉冲信号送入两个非挥发连续阻变器件 (RRAM/忆阻器), 来控制 and 改变其电阻阻值。其中一个阻变器件用于存储计算结果的绝对值(RRAM value), 而另外一个阻变器件用于存储计算结果的符号(RRAM sign)。当这些阻变器件处于 reset 状态时, 它的阻值的变化量与脉冲个数成正比, 而且是一个连续的近似线性的变化, 这样计算结果与电阻值的变化量成正比。而且掉电后, 电阻的阻值维持不变, 从而实现了计算结果的存储。需要调取计算结果时, 只需读取电阻在输入脉冲前和输入脉冲后的阻值变化量就可以反推出脉冲个数以及计算结果。在一实施例中, 计算结果的绝对数值 (不包括符号位) 可以存储在一个精度较高的能区分出足够多阻态的阻变器件里; 而计算结果的符号位只需存储在一个精度较低的只要能区分出高阻和低阻两种状态的阻变器件里。需要指出的是, 本申请仅仅需要一个振荡器, 而不是每个阻变器件都需要一个振荡器。只需把这个振荡器的波形通过控制电路连接到不同的阻变器件上, 由控制电路来选择输出多少个脉冲到阻变器件上。由于整个是以同一振荡器作为始终参考源, 因此振荡器的频率偏差会相互抵消, 不会对归一化后的结果产生影响。

因此, 根据上面的构思, 在实施例 1 或 2 的基础上, 如图 8 (图 8 是以实施例 2 为例) 所示, 本实施例的模拟计算装置还可以包括用于存储计算结果数值的非挥发连续阻变器件 RRAM1 以及存储计算结果符号的非挥发连续阻变器件 RRAM2。本实施例的模拟计算装置还可以包括控制器 31 和振荡器 32, 控制器 31 用于在输出结果的脉宽时间内将振荡器 32 输出的脉冲分别写入阻变器件 RRAM1 和 RRAM2 中。

本申请公开的模拟计算装置, 是纯时间形式的模拟计算, 它以时间放大器 TA 完成相乘运算, 仅需一次运算, 而无需分成多步完成; 以时间延迟送入下一级乘法单元中完成相加 (累加) 运算, 以选择不同的信号边沿来完成带符号位的运算 (相加或者相减), 三个或以上的连续乘加运算可以反复利用实施例 2 中的两级乘法单元, 而无需每次乘加计算都分配一个乘法单元; 在计算结果存储时, 把时间差转换为脉冲个数以及电阻值的变化, 然后存储在非挥发性阻变器件的方法。因此, 本申请的模拟计算装置, 以时间作为模拟数值, 一次操作即可完成运算, 大大提高了运算效率; 以时间差表示数值, 随着器件速度的提升, 信号边沿越来越陡峭, 所表示的数值也会越来越精确; 数字到时间转换器 DTC、

时间 放大器 TA 以及边沿检测器 ED 等都可以用数字集成电路实现, 可以用现有的 EDA 工具自动布局布线, 大大加快设计进程; 适用于带符号位的计算; 把时间差转换为非挥发性阻变器件的阻值, 只需两个阻变器件即可完成任一数值的存储, 大大优于传统数字存储器需要很多个元件表示多个比特位来存储一个数值的方案。

以上应用了具体个例对本发明进行阐述, 只是用于帮助理解本发明, 并不用以限制本发明。对于本领域的一般技术人员, 依据本发明的思想, 可以对上述具体实施方式的变化。

权 利 要 求

1. 一种时间模式的模拟计算装置，其特征在于，包括至少一个乘法单元，所述乘法单元包括：

数字到时间转换器，输入一参考信号以及数字信号 $M1$ ，用于输出一个与所述参考信号之间时延为 $|M1|$ 的信号；

时间放大器，输入所述参考信号以及数字到时间转换器的输出信号，用于将所述参考信号与数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M2|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M2$ 为时间放大器的放大倍数；

边沿检测器，用于检测所述时间放大器输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于所述两个信号之间时延的信号。

2. 如权利要求 1 所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，还包括符号确定器，用于根据 $M1$ 和 $M2$ 的正符号或负符号的个数来确定所述边沿检测器输出信号的正负符号。

3. 如权利要求 1 所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，所述时间放大器为多个，各时间放大器进行级联，首级时间放大器输入所述参考信号以及数字到时间转换器的输出信号，尾级时间放大器向边沿检测器输出信号。

4. 一种时间模式的模拟计算装置，其特征在于，包括级联的第一乘法单元和第二乘法单元；

所述第一乘法单元包括：

第一数字到时间转换器，输入一参考信号以及数字信号 $M1$ ，用于输出一个与所述参考信号之间时延为 $|M1|$ 的信号；

第一时间放大器，输入所述参考信号以及第一数字到时间转换器的输出信号，用于将所述参考信号与第一数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M2|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M2$ 为第一时间放大器的放大倍数；

第一边沿检测器，用于检测所述第一时间放大器输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于所述两个信号之间时延的信号；

所述第二乘法单元包括：

第二数字到时间转换器，输入第一边沿检测器的输出信号以及数字信号 $M3$ ，用于输出一个与所述第一边沿检测器的输出信号之间时延为 $|M3|$ 的信号；

第二时间放大器，输入第一边沿检测器和第二数字到时间转换器的输出信号，用于将所述第一边沿检测器的输出信号与第一数字到时间转换器的输出信号这两个信号之间的时延放大 $|M4|$ 倍后再分别输出这两个信号，其中 $M4$ 为第二时间放大器的放大倍数；

第二边沿检测器，用于检测所述第二时间放大器输出的两个信号的边沿，以输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号或输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号。

5. 如权利要求4所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，还包括边沿确定器，用于根据M1、M2、M3和M4的正符号或负符号的个数来使第二边沿检测器检测第二时间放大器输出的第一信号的上升沿以及第二信号的下降沿，从而输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号，还是检测第二时间放大器输出的第一信号的下降沿以及第二信号的上升沿，从而输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号；其中第一信号为第一边沿检测器的输出信号经过第二时间放大器处理后输出的信号，第二信号为第二数字到时间转换器的输出信号经过第二时间放大器处理后输出的信号。

6. 如权利要求5所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，所述边沿确定器当M1、M2、M3和M4的正符号或负符号的个数为偶数个时，使第二边沿检测器检测第二时间放大器输出的第一信号的上升沿以及第二信号的下降沿，从而输出一个脉冲宽度等于 $|M1*M2|+|M3*M4|$ 的信号；以及，当M1、M2、M3和M4的正符号或负符号的个数为奇数个时，使第二边沿检测器检测第二时间放大器输出的第一信号的下降沿以及第二信号的上升沿，从而输出一个脉冲宽度等于 $||M1*M2|-|M3*M4||$ 的信号。

7. 如权利要求6所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，还包括符号确定器，用于根据M1、M2、M3和M4的正符号或负符号来确定所述第二边沿检测器输出信号的正负符号。

8. 如权利要求7所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于：

所述符号确定器当M1、M2、M3和M4的正符号或负符号的个数为偶数个时，若M1和M2为同符号，且M3和M4也为同符号，则标记所述第二边沿检测器输出信号为正，若M1和M2为不同符号，且M3和M4也为不同符号，则标记所述第二边沿检测器输出信号为负；

所述符号确定器当M1、M2、M3和M4的正符号或负符号的个数为奇数个时，若第一信号的下降沿先于第二信号的上升沿到来，则当M3和M4符号相同时，标记第二边沿检测器输出信号为正，当M3和M4符号不相同，标记第二边沿检测器输出信号为负；若第一信号的下降沿不先于第二信号的上升沿到来，则当M1和M2符号相同时，标记第二边沿检测器输出信号为正，当M1和M2符号不相同，标记第二边沿检测器输出信号为负。

9. 如权利要求1至8中任一项所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，还包括用于存储计算结果数值的非挥发连续阻变器件以及存

储计算结果符号的非挥发连续阻变器件。

10. 如权利要求 9 所述的时间模式的模拟计算装置，其特征在于，还包括控制器和振荡器，所述控制器用于在输出结果的脉宽时间内将振荡器输出的脉冲写入所述非挥发连续阻变器件中。

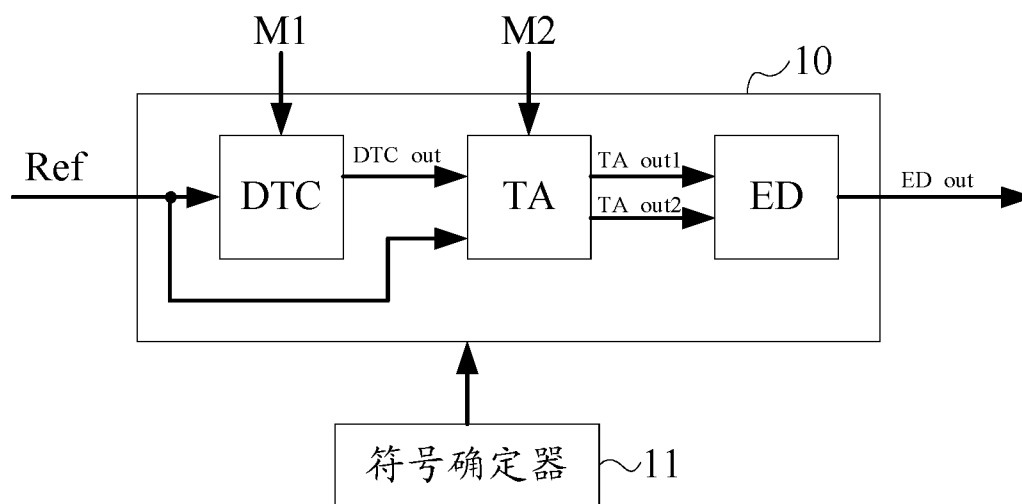


图 1

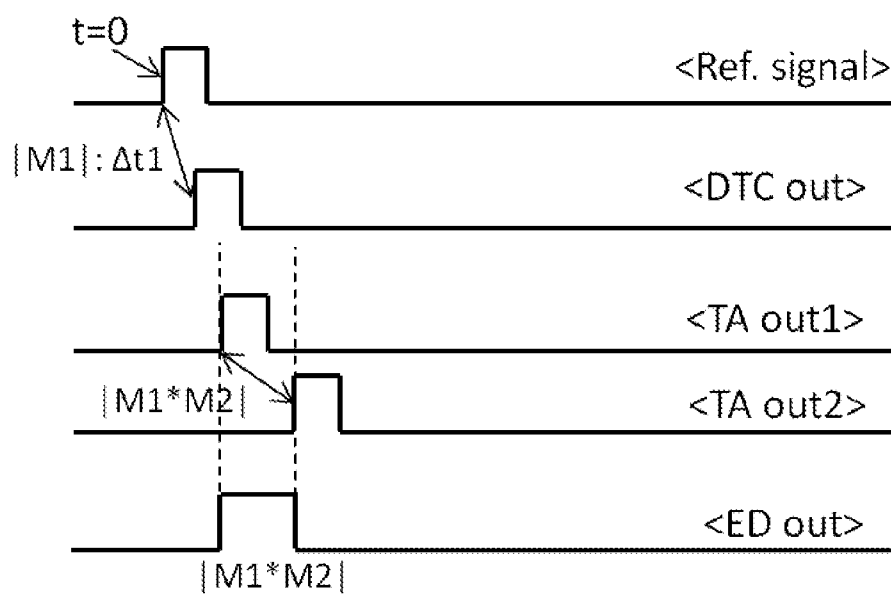


图 2

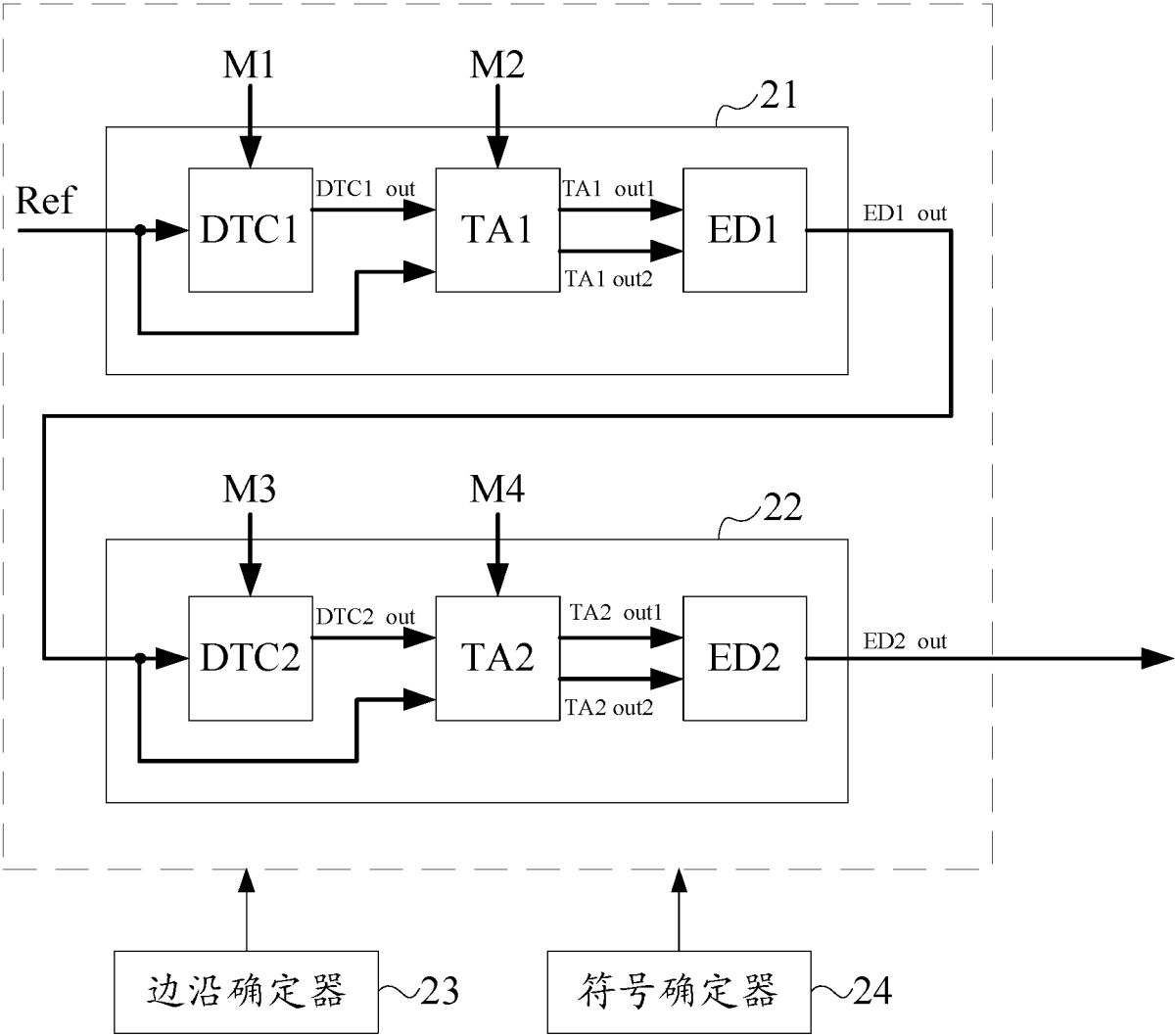


图 3

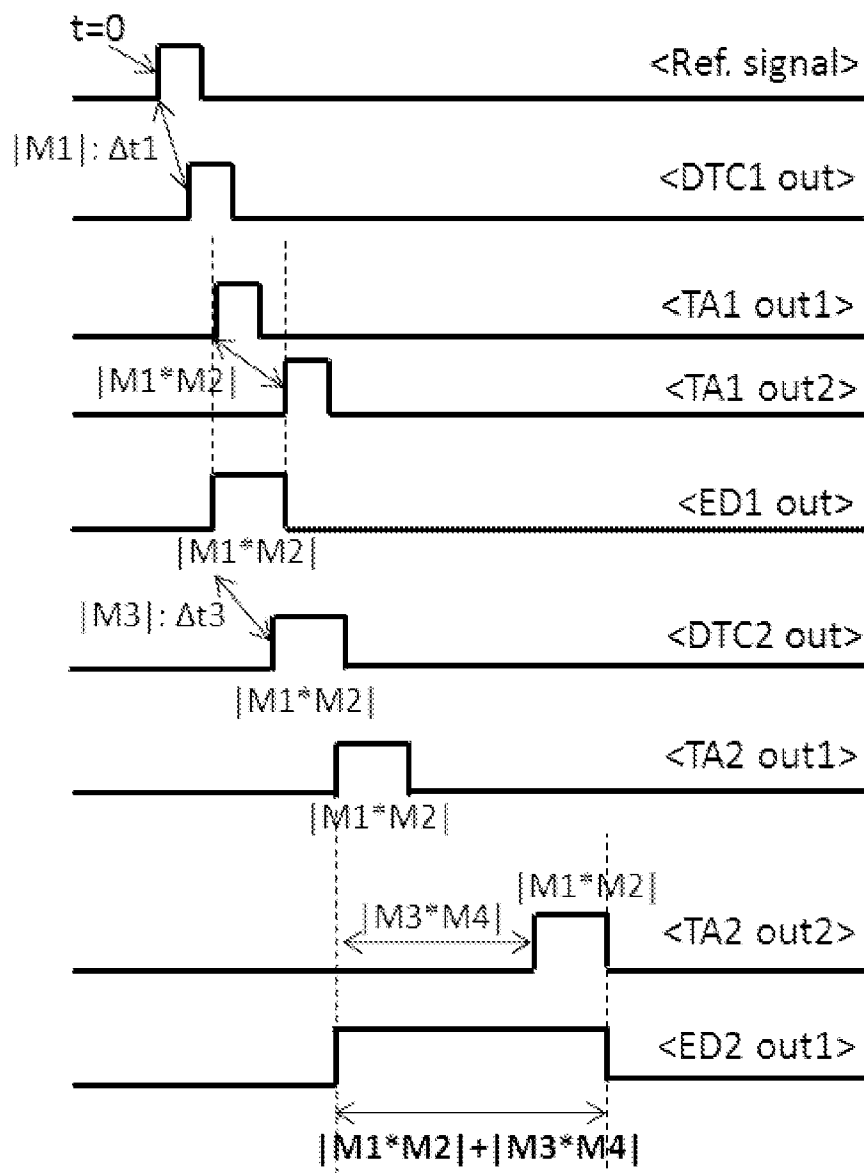


图 4

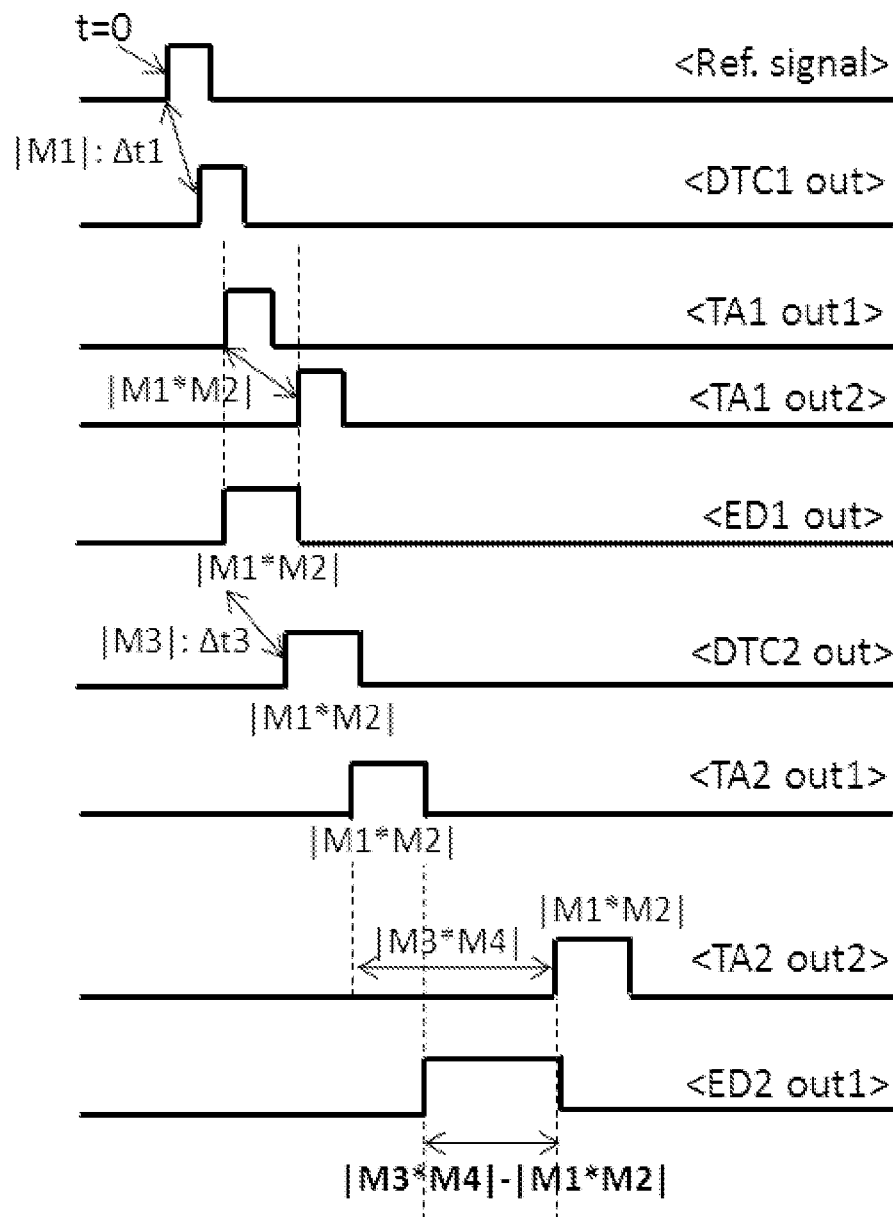


图 5

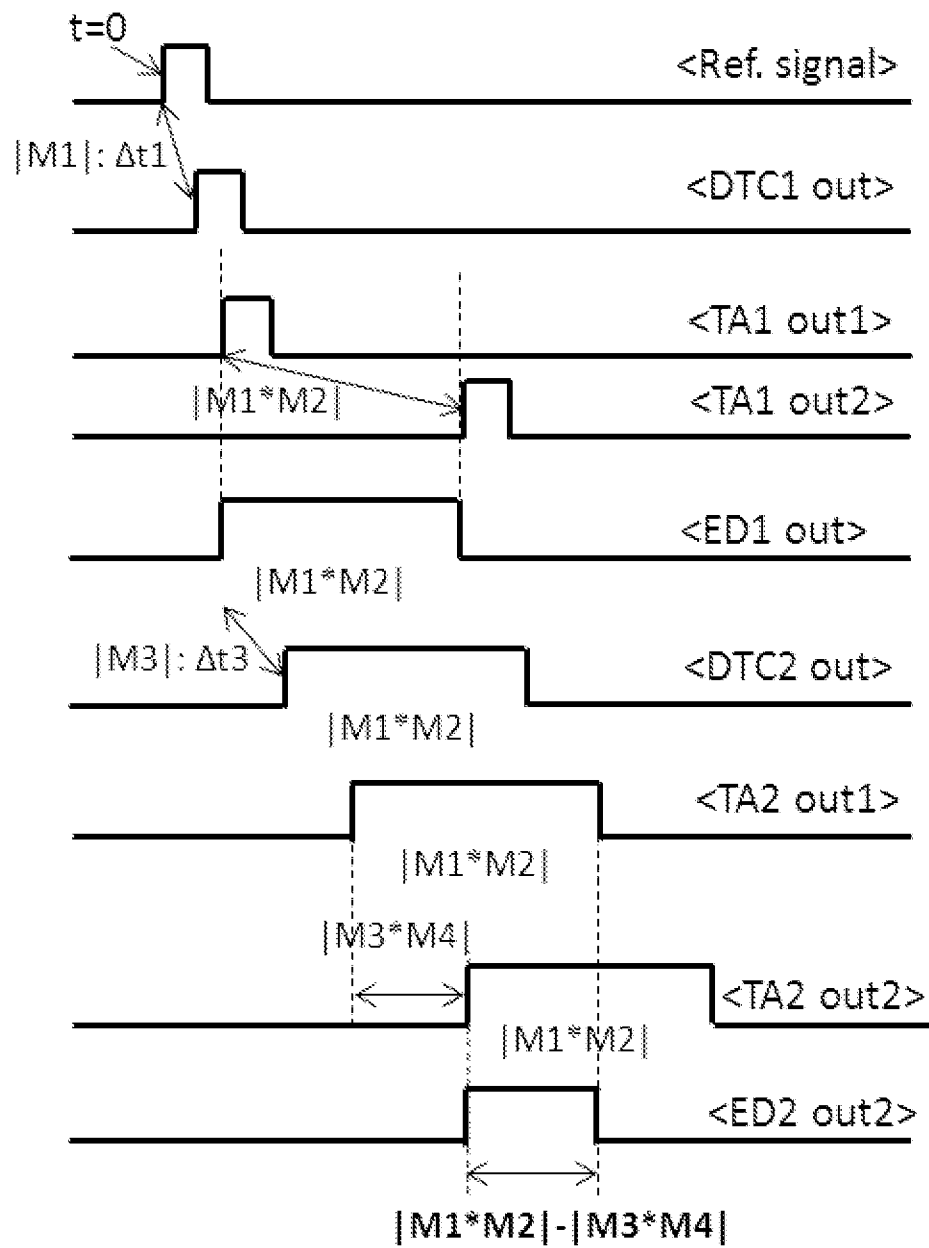


图 6

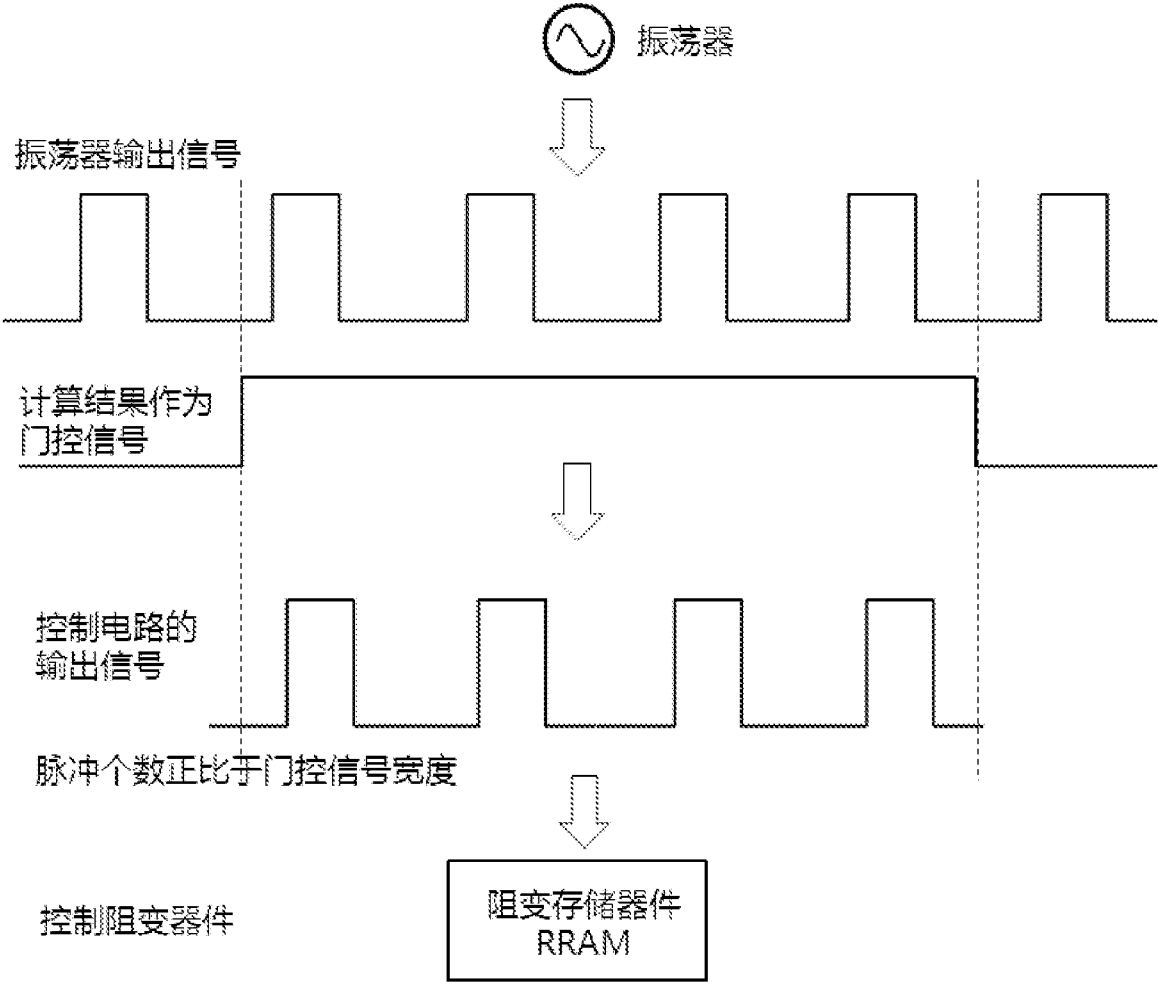


图 7

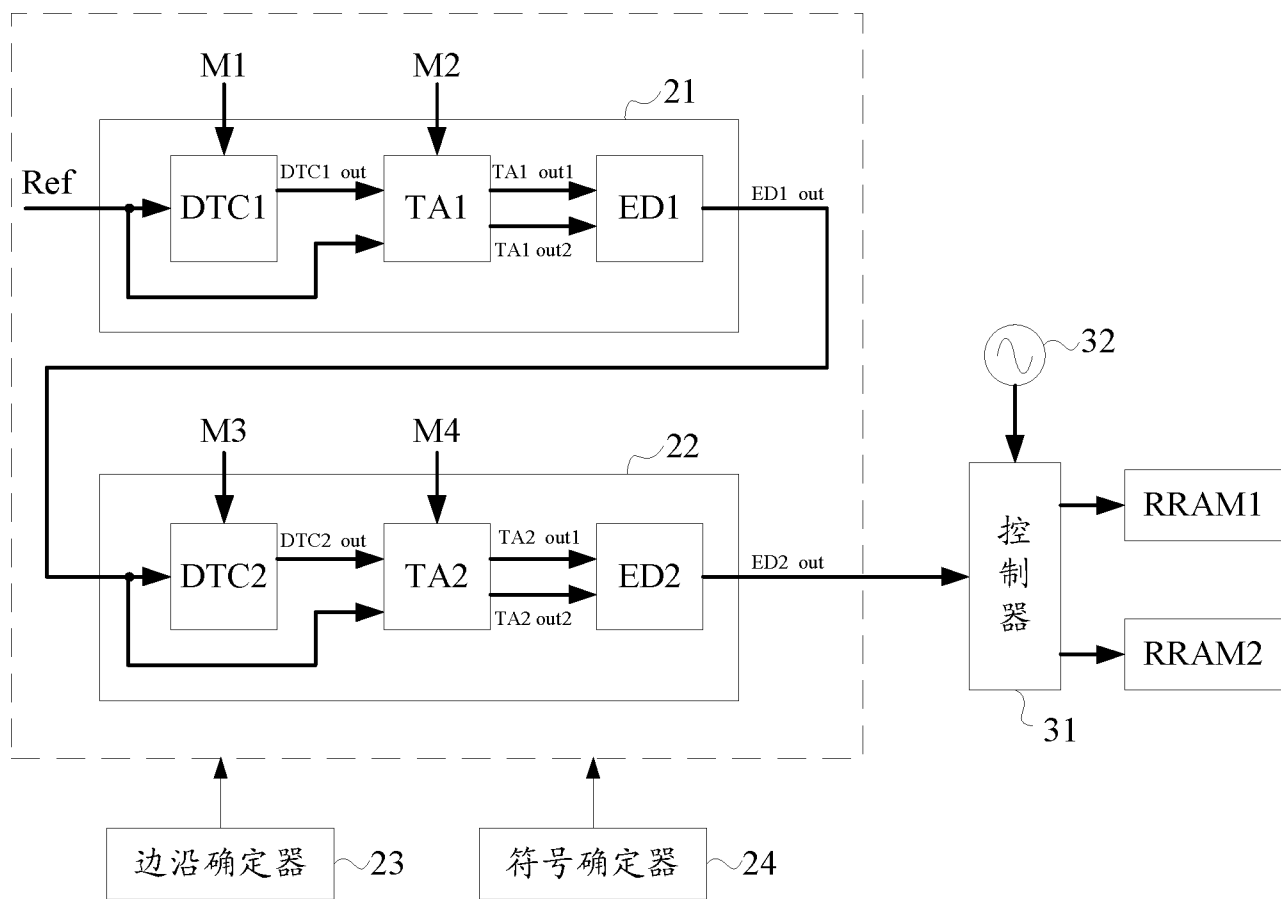


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/095978

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H03L 7/06 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H03L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, GOOGLE: 时延, 延迟, 乘法, 放大, 边沿, 边缘, 数字时间转换, 数字, 时间, 转换, delay, amplify, edge, digital, time, converter, DTC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102111149 A (NXP B.V.), 29 June 2011 (29.06.2011), description, paragraphs [0061]-[0093], and figures 3 and 4	1-10
A	CN 103444084 A (INTEL MOBILE COMMUNICATIONS GMBH), 11 December 2013 (11.12.2013), entire document	1-10
A	CN 104378112 A (INTEL IP CORPORATION), 25 February 2015 (25.02.2015), entire document	1-10
A	US 8994573 B2 (INTEL MOBILE COMMUNICATIONS GMBH), 31 March 2015 (31.03.2015), entire document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 27 April 2017	Date of mailing of the international search report 22 May 2017
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer LI, Na Telephone No.: (86-10) 62414068

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/095978

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102111149 A	29 June 2011	EP 2339753 A1	29 June 2011
		US 2011156783 A1	30 June 2011
		EP 2339753 B1	04 July 2012
		US 8362815 B2	29 January 2013
CN 103444084 A	11 December 2013	DE 102011089426 A1	27 June 2013
		WO 2013092867 A1	27 June 2013
		US 2014002288 A1	02 January 2014
		US 9077375 B2	07 July 2015
CN 104378112 A	25 February 2015	US 2015049840 A1	19 February 2015
		US 9071304 B2	30 June 2015
		DE 102014012120 A1	19 February 2015
US 8994573 B2	31 March 2015	DE 102014103349 A1	18 September 2014
		US 2014266822 A1	18 September 2014

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/095978

A. 主题的分类 H03L 7/06 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) H03L 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI, GOOGLE: 时延, 延迟, 乘法, 放大, 边沿, 边缘, 数字时间转换, 数字, 时间, 转换, delay, amplify, edge, digital, time, converter, DTC																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 102111149 A (NXP股份有限公司) 2011年 6月 29日 (2011 - 06 - 29) 说明书第[0061]-[0093]段, 图3, 4</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103444084 A (英特尔移动通信有限责任公司) 2013年 12月 11日 (2013 - 12 - 11) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104378112 A (英特尔IP公司) 2015年 2月 25日 (2015 - 02 - 25) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 8994573 B2 (INTEL MOBILE COMMUNICATIONS GMBH) 2015年 3月 31日 (2015 - 03 - 31) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 102111149 A (NXP股份有限公司) 2011年 6月 29日 (2011 - 06 - 29) 说明书第[0061]-[0093]段, 图3, 4	1-10	A	CN 103444084 A (英特尔移动通信有限责任公司) 2013年 12月 11日 (2013 - 12 - 11) 全文	1-10	A	CN 104378112 A (英特尔IP公司) 2015年 2月 25日 (2015 - 02 - 25) 全文	1-10	A	US 8994573 B2 (INTEL MOBILE COMMUNICATIONS GMBH) 2015年 3月 31日 (2015 - 03 - 31) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
A	CN 102111149 A (NXP股份有限公司) 2011年 6月 29日 (2011 - 06 - 29) 说明书第[0061]-[0093]段, 图3, 4	1-10															
A	CN 103444084 A (英特尔移动通信有限责任公司) 2013年 12月 11日 (2013 - 12 - 11) 全文	1-10															
A	CN 104378112 A (英特尔IP公司) 2015年 2月 25日 (2015 - 02 - 25) 全文	1-10															
A	US 8994573 B2 (INTEL MOBILE COMMUNICATIONS GMBH) 2015年 3月 31日 (2015 - 03 - 31) 全文	1-10															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。 <table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件													
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
国际检索实际完成的日期 2017年 4月 27日		国际检索报告邮寄日期 2017年 5月 22日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		受权官员 李娜 电话号码 (86-10) 62414068															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/095978

检索报告引用的专利文件				公布日 (年/月/日)		同族专利		公布日 (年/月/日)	
CN	102111149	A	2011年 6月 29日	EP	2339753	A1		2011年 6月 29日	
				US	2011156783	A1		2011年 6月 30日	
				EP	2339753	B1		2012年 7月 4日	
				US	8362815	B2		2013年 1月 29日	
CN	103444084	A	2013年 12月 11日	DE	102011089426	A1		2013年 6月 27日	
				WO	2013092867	A1		2013年 6月 27日	
				US	2014002288	A1		2014年 1月 2日	
				US	9077375	B2		2015年 7月 7日	
CN	104378112	A	2015年 2月 25日	US	2015049840	A1		2015年 2月 19日	
				US	9071304	B2		2015年 6月 30日	
				DE	102014012120	A1		2015年 2月 19日	
US	8994573	B2	2015年 3月 31日	DE	102014103349	A1		2014年 9月 18日	
				US	2014266822	A1		2014年 9月 18日	