



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110168930 B

(45) 授权公告日 2023. 09. 08

(21) 申请号 201780071853.6  
 (22) 申请日 2017.11.21  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 110168930 A  
 (43) 申请公布日 2019.08.23  
 (30) 优先权数据  
 62/425,035 2016.11.21 US  
 62/427,641 2016.11.29 US  
 (85) PCT国际申请进入国家阶段日  
 2019.05.21  
 (86) PCT国际申请的申请数据  
 PCT/US2017/062744 2017.11.21  
 (87) PCT国际申请的公布数据  
 WO2018/094380 EN 2018.05.24  
 (73) 专利权人 混合信号设备股份有限公司  
 地址 美国加利福尼亚  
 (72) 发明人 T·于 A·玛迪塞提  
 (74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所  
 有限公司 11038  
 专利代理师 张丹

(51) Int.Cl.  
 H03F 3/217 (2006.01)  
 H03K 7/08 (2006.01)  
 H04B 10/2575 (2013.01)  
 H04B 14/06 (2006.01)  
 H03M 3/00 (2006.01)  
 H03M 3/02 (2006.01)  
 H04B 10/00 (2013.01)  
 H03F 3/19 (2006.01)

(56) 对比文件  
 CN 1795615 A, 2006.06.28  
 US 2017310338 A1, 2017.10.26  
 US 2017317686 A1, 2017.11.02  
 WO 2016063038 A1, 2016.04.28  
 US 8949699 B1, 2015.02.03  
 CN 105814801 A, 2016.07.27  
 US 6724249 B1, 2004.04.20  
 US 2012161864 A1, 2012.06.28  
 US 8294605 B1, 2012.10.23

审查员 朱壹

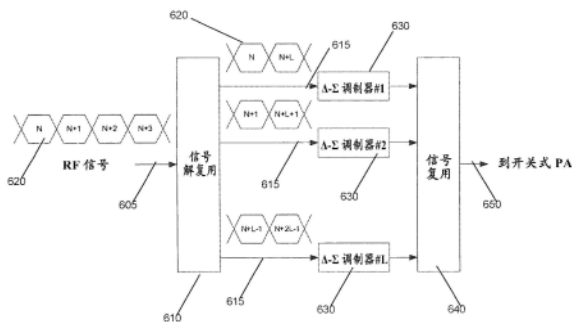
权利要求书3页 说明书9页 附图16页

(54) 发明名称

用于RF应用的高效率功率放大器架构

(57) 摘要

公开了一种并行  $\Delta - \Sigma$  调制器架构。并行  $\Delta - \Sigma$  调制器架构包括信号解复用器, 该信号解复用器被配置为接收输入信号并且解复用输入信号以输出多个流, 并行执行的多个  $\Delta - \Sigma$  调制器, 每个  $\Delta - \Sigma$  调制器被配置为从多个流中接收流并且生成  $\Delta - \Sigma$  调制输出, 以及信号复用器, 该信号复用器被配置为从多个  $\Delta - \Sigma$  调制器接收多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出, 并且将多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出一起复用到脉冲序列中。



1. 一种并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 包括:

信号解复用器, 所述信号解复用器被配置为接收输入信号, 所述输入信号包括多个符号, 每个符号包括在符号的开始处的具有符号的结束的重复的循环前缀, 其中所述循环前缀由接收器丢弃;

其中所述信号解复用器进一步被配置为将所述输入信号在符号边界处解复用为多个符号流;

多个  $\Delta - \Sigma$  调制器1到L, 其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器被配置为从所述多个符号流接收符号流并且生成  $\Delta - \Sigma$  调制输出, 其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器以信号解复用器的全时钟速度的1/L倍接收新符号; 以及

信号复用器, 该信号复用器被配置为从所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器接收多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出, 并且将所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出一起复用到脉冲序列中。

2. 根据权利要求1所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述输入信号是正交频分复用OFDM调制信号。

3. 根据权利要求2所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中:

OFDM信号包括多个符号; 以及

所述信号解复用器使用所述多个符号解复用所述输入信号, 并且所述信号复用器使用所述多个符号复用所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出。

4. 根据权利要求1所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述输入信号从包括复合基带信号、RF信号和WiFi基带信号的组中选出。

5. 根据权利要求1所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 还包括开关式功率放大器, 所述开关式功率放大器被配置为接收所述脉冲序列以用于信号放大。

6. 根据权利要求1所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 还包括上变频器, 所述上变频器被配置为接收所述脉冲序列。

7. 根据权利要求1所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的  $\Delta - \Sigma$  调制器的时钟频率是脉冲序列输出频率的整数分频。

8. 根据权利要求1所述的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的每个  $\Delta - \Sigma$  调制器包括噪声整形滤波器。

9. 根据权利要求1所述的  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器输出驱动开关式功率放大器PA的三电平信号  $(-1, 0, 1)$ , 其中 '1' 表示所述开关式PA输出正电压脉冲, '-1' 表示所述开关式PA输出负电压脉冲, 以及 '0' 表示所述PA关断。

10. 根据权利要求1所述的  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的  $\Delta - \Sigma$  调制器的输出驱动线性放大器, 其中所述输出从包括恒定幅度信号和零状态信号的组中选出, 其中所述零状态信号关闭幅度。

11. 根据权利要求1所述的  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的  $\Delta - \Sigma$  调制器的输出驱动开关式功率放大器PA, 其中所述输出包括多个离散信号电平。

12. 根据权利要求1所述的  $\Delta - \Sigma$  调制器, 其中所述  $\Delta - \Sigma$  调制器的等效过采样比增大N, 其中N等于并行  $\Delta - \Sigma$  调制器的数量。

13. 一种开关式功率放大器系统, 包括:

信号编码器, 所述信号编码器包括  $\Delta - \Sigma$  调制器;

开关式功率放大器；

重建滤波器；

其中所述  $\Delta - \Sigma$  调制器包括：

信号解复用器，所述信号解复用器被配置为接收输入信号并且将所述输入信号在符号边界处解复用为多个符号流，所述输入信号包括多个符号，每个符号包括在符号的开始处的具有符号的结束的重复的循环前缀；

多个  $\Delta - \Sigma$  调制器1到L，其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器被配置为从所述多个符号流接收符号流并且生成  $\Delta - \Sigma$  调制输出，其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器以信号解复用器的全时钟速度的1/L倍接收新符号；以及

信号复用器，所述信号复用器被配置为从所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器接收多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出，并且将所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出一起复用到脉冲序列中。

14. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中所述输入信号是正交频分复用OFDM调制信号。

15. 根据权利要求14所述的开关式功率放大器系统，其中：

OFDM信号包括多个符号；以及

所述信号解复用器使用所述多个符号解复用所述输入信号，并且所述信号复用器使用所述多个符号复用所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出。

16. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中所述输入信号从包括复合基带信号、RF信号和WiFi基带信号的组中选出。

17. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，还包括上变频器，所述上变频器被配置为接收所述脉冲序列。

18. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的  $\Delta - \Sigma$  调制器的时钟频率是脉冲序列输出频率的整数分频。

19. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的每个  $\Delta - \Sigma$  调制器包括噪声整形滤波器。

20. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器输出驱动所述开关式功率放大器PA的三电平信号(-1, 0, 1)，其中‘1’表示所述开关式PA输出正电压脉冲，‘-1’表示所述开关式PA输出负电压脉冲，以及‘0’表示所述PA关断。

21. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的  $\Delta - \Sigma$  调制器的输出驱动所述开关式功率放大器PA，其中所述输出包括多个离散信号电平。

22. 根据权利要求13所述的开关式功率放大器系统，其中  $\Delta - \Sigma$  调制器的等效过采样比增大N，其中N等于并行  $\Delta - \Sigma$  调制器的数量。

23. 一种线性功率放大器系统，包括：

信号编码器，所述信号编码器包括  $\Delta - \Sigma$  调制器；

线性功率放大器PA；

重建滤波器；

其中所述  $\Delta - \Sigma$  调制器包括：

信号解复用器，所述信号解复用器被配置为接收输入信号并且将所述输入信号在符号边界处解复用为多个符号流，所述输入信号包括多个符号，其中每个符号包括在符号的开

始处的具有符号的结束的重复的循环前缀;

多个  $\Delta - \Sigma$  调制器1到L,其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器被配置为从所述多个符号流中接收符号流并且生成  $\Delta - \Sigma$  调制输出,其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器以信号解复用器的全时钟速度的1/L倍接收新符号;以及

信号复用器,所述信号复用器被配置为从所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器接收多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出,并且将所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出一起复用到脉冲序列中;以及

其中所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制器中的  $\Delta - \Sigma$  调制器的输出驱动所述线性功率放大器PA,其中所述输出包括多个离散信号电平。

24. 根据权利要求23所述的线性功率放大器系统,其中所述输入信号是正交频分复用OFDM调制信号,其中:

OFDM信号包括多个符号;以及

所述信号解复用器使用所述多个符号解复用所述输入信号,并且所述信号复用器使用所述多个符号复用所述多个  $\Delta - \Sigma$  调制输出。

## 用于RF应用的高效率功率放大器架构

### 技术领域

[0001] 本发明涉及  $\Delta - \Sigma$  调制器,并且更具体地涉及用于提高功率放大器中的功率转换效率的并行  $\Delta - \Sigma$  调制器架构。

### 背景技术

[0002] 射频功率放大器(RF功率放大器)是将低功率射频信号转换为较高功率信号类型的电子放大器。存在用于区分功率放大器的电特性和运行方法的功率放大器的许多类别。相应地,功率放大器的类别主要集中在两个基本组中。第一是形成更常见的A、B、AB和C的放大器类别的经典控制的导通角放大器,其由输出波形的某部分上它们的导通状态的长度定义,使得输出级晶体管的运行位于“完全导通”和“完全关断”之间的某处。

[0003] 第二组放大器是类别D、E、F、G、S、T等其它更新的所谓的“开关”放大器,其使用数字电路和脉冲宽度调制(PWM)以在“完全导通”和“完全关断”之间不断地切换信号,从而努力将输出驱动到晶体管的饱和区和截止区中。

[0004] 不同类型的功率放大器架构可以包括不同类型的部件。例如,S类型功率放大器通过  $\Delta - \Sigma$  调制器转换模拟输入信号为数字方波脉冲,并且在最终被带通滤波器滤波之前放大它们以增大输出功率。

[0005] 特别地, $\Delta - \Sigma$  调制是用于编码模拟信号为数字信号的方法,如在模拟到数字(ADC)转换器中所发现的。 $\Delta - \Sigma$  调制也可以用于传递高比特数低频率的数字信号到较低比特数较高频率的数字信号,如在数字到模拟(DAC)运行中所发现的。由于其成本效率和降低的电路复杂性,该技术在诸如转换器、频率合成器、开关式电源和电动机控制器的现代电子部件中很流行。

[0006] 另外, $\Delta - \Sigma$  调制器可以使用噪声整形降低噪声并且使用滤波提高信号分辨率。在噪声整形中,噪声由噪声整形滤波器滤波。这意味着噪声在感兴趣的频率内降低并且在感兴趣的频率外增大。结果,信号的分辨率增大。在  $\Delta - \Sigma$  调制器中,可以以过采样速率执行噪声整形滤波。通过从  $\Delta - \Sigma$  调制器的输入信号中减去估计的带内噪声实现噪声整形。减去估计的带内噪声是通过调制器中的反馈路径完成的。可以在调制器之后放置后噪声整形滤波器,该滤波器削减来自感兴趣的频率之外的噪声,这进而提高信号的分辨率。

[0007] 如此, $\Delta - \Sigma$  调制器可以提供不太复杂且成本有效的方式以在许多包括但不限于ADC、DAC、频率合成器、开关式电源和电动机控制器的电子部件中执行模拟到数字(A/D)和数字到模拟(D/A)转换。

### 发明内容

[0008] 根据本发明的实施例的系统和方法使用并行  $\Delta - \Sigma$  调制器以用于提高功率放大器中的功率转换效率。根据一个实施例,并行  $\Delta - \Sigma$  调制器包括:信号解复用器,该信号解复用器被配置为接收输入信号并且解复用输入信号为符号边界处的数个符号流;数个  $\Delta - \Sigma$  调制器,其中每个  $\Delta - \Sigma$  调制器被配置为从数个符号流中接收符号流并且生成  $\Delta - \Sigma$  调制输

出;以及信号复用器,该信号复用器被配置为从数个 $\Delta - \Sigma$ 调制器接收数个 $\Delta - \Sigma$ 调制输出,并且将数个 $\Delta - \Sigma$ 调制输出一起复用到脉冲序列中。

[0009] 在进一步的实施例中,输入信号是正交频分复用(OFDM)调制信号。

[0010] 在又进一步的实施例中,OFDM信号包括数个符号,以及信号解复用器使用数个符号解复用输入信号,并且信号复用器使用数个符号复用数个 $\Delta - \Sigma$ 调制输出。

[0011] 在另一个实施例中,输入信号从包括复合基带信号、RF信号和WiFi基带信号的组中选出。

[0012] 在又一个实施例中, $\Delta - \Sigma$ 调制器包括开关式功率放大器,该开关式功率放大器被配置为接收用于信号放大的脉冲序列。

[0013] 在再一个实施例中, $\Delta - \Sigma$ 调制器包括上变频器,该上变频器被配置为接收脉冲序列。

[0014] 在又另一个实施例中,数个 $\Delta - \Sigma$ 调制器中的 $\Delta - \Sigma$ 调制器的时钟频率是脉冲序列输出频率的整数分频。

[0015] 在进一步的实施例中,数个 $\Delta - \Sigma$ 调制器中的每个 $\Delta - \Sigma$ 调制器包括无约束的噪声整形滤波器。

[0016] 在又再进一步的实施例中,每个 $\Delta - \Sigma$ 调制器输出驱动开关式功率放大器(PA)的三电平信号(-1,0,1),其中‘1’表示开关式PA输出正电压脉冲,‘-1’表示开关式PA输出负电压脉冲,以及‘0’表示PA关断。

[0017] 在又一个实施例中,数个 $\Delta - \Sigma$ 调制器中的 $\Delta - \Sigma$ 调制器的输出驱动线性放大器,其中输出从包括恒定幅度信号和零状态信号的组中选出,其中零状态信号关闭幅度。

[0018] 在再进一步的实施例中,数个 $\Delta - \Sigma$ 调制器中的 $\Delta - \Sigma$ 调制器的输出驱动开关式功率放大器(PA),其中输出包括数个离散信号电平。

[0019] 在进一步的另一个实施例中, $\Delta - \Sigma$ 调制器设计是无约束的,并且 $\Delta - \Sigma$ 调制器的等效过采样比增大N,其中N等于并行 $\Delta - \Sigma$ 调制器的数量。

[0020] 在一个实施例中,开关式功率放大器系统包括:信号编码器,该信号编码器包括 $\Delta - \Sigma$ 调制器;开关式功率放大器;重建滤波器;其中 $\Delta - \Sigma$ 调制器包括:信号解复用器,该信号解复用器被配置为接收输入信号并且解复用输入信号为符号边界处的多个符号流;多个 $\Delta - \Sigma$ 调制器,其中每个 $\Delta - \Sigma$ 调制器被配置为从多个符号流接收符号流并且生成 $\Delta - \Sigma$ 调制输出;以及信号复用器,该信号复用器被配置为从多个 $\Delta - \Sigma$ 调制器接收多个 $\Delta - \Sigma$ 调制输出,并且将多个 $\Delta - \Sigma$ 调制输出一起复用到脉冲序列中。

[0021] 在进一步的实施例中,输入信号是正交频分复用(OFDM)调制信号。

[0022] 在再进一步的实施例中,OFDM信号包括多个符号;以及信号解复用器使用多个符号解复用输入信号,并且信号复用器使用多个符号复用多个 $\Delta - \Sigma$ 调制输出。

[0023] 在再进一步的实施例中,输入信号从包括复合基带信号、RF信号和WiFi基带信号的组中选出。

[0024] 在又进一步的实施例中,开关式功率放大器系统包括上变频器,该上变频器被配置为接收脉冲序列。

[0025] 在另一个实施例中,多个 $\Delta - \Sigma$ 调制器中的 $\Delta - \Sigma$ 调制器的时钟频率是脉冲序列输出频率的整数分频。

[0026] 在另一个实施例中,数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器中的每个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器包括无约束的噪声整形滤波器。

[0027] 在再一个实施例中,每个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器输出驱动开关式功率放大器(PA)的三电平信号(-1,0,1),其中‘1’表示开关式PA输出正电压脉冲,‘-1’表示开关式PA输出负电压脉冲,以及‘0’表示PA关断。

[0028] 在又另一个进一步的实施例中,数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器中的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的输出驱动开关式功率放大器(PA),其中输出包括多个离散信号电平。

[0029] 在再进一步的实施例中, $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器设计是无约束的,并且 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的等效过采样比增大N,其中N等于并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的数量。

[0030] 在一个实施例中,线性功率放大器系统包括:信号编码器,该信号编码器包括 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器;线性功率放大器(PA);重建滤波器;其中 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器包括:信号解复用器,该信号解复用器被配置为接收输入信号并且解复用输入信号为符号边界处的数个符号流;数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器,其中每个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器被配置为从数个符号流中接收符号流并且生成 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制输出;以及信号复用器,该信号复用器被配置为从数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器接收数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制输出,并且将数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制输出一起复用到脉冲序列中;以及其中数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器中的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的输出驱动线性功率放大器(PA),其中输出包括多个离散信号电平。

[0031] 在进一步的实施例中,输入信号是正交频分复用(OFDM)调制信号,其中OFDM信号包括多个符号;以及信号解复用器使用数个符号解复用输入信号,并且信号复用器使用数个符号复用数个 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制输出。

## 附图说明

[0032] 图1示出包络跟踪功率放大器系统的示例架构。

[0033] 图2示出开关式PA系统的示例。

[0034] 图3示出用误差反馈架构实现的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的示例。

[0035] 图4示出根据本发明的实施例的OFDM调制器的示例

[0036] 图5示出根据本发明的实施例的在时域中的OFDM信号的示例。

[0037] 图6示出根据本发明的实施例的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器架构。

[0038] 图7示出根据本发明的实施例的设计用于在载波频率5.7GHz的WiFi系统的噪声整形滤波器的示例。

[0039] 图8示出根据本发明的实施例的WiFi开关式PA设计。

[0040] 图9示出 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器输出的示例。

[0041] 图10示出根据本发明的实施例的三个输出电平的直方图。

[0042] 图11示出根据本发明的实施例的输出频谱。

[0043] 图12示出根据本发明的实施例的传输信号星座图。

[0044] 图13示出根据本发明的实施例的具有基带信号输入的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器。

[0045] 图14示出根据本发明的实施例的具有上变频器的功率放大器架构。

[0046] 图15示出根据本发明的实施例的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的输出。

[0047] 图16示出根据本发明的实施例的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构在RF带中的应用。

## 具体实施方式

[0048] 现在转到附图,示出根据本发明的各种实施例的用于在用于RF应用的PA架构中实现高效率的功率放大器(PA)系统和方法。

[0049] 放大器的最重要的参数之一是其功率转换效率。功率转换效率是放大器多么有效地将从DC源提取的功率转换为传递到负载的有用信号(例如,RF信号)功率的量度。未转换为有用信号功率的功率通常耗散为热;并且对于具有低效率的功率放大器,高水平的热耗散导致的热和机械要求经常是它们的设计中的限制因素。

[0050] 这样,功率放大器可以与它们的功率转换效率相关地根据以下两组分类(除上述类别的放大器之外):1)线性放大器,以及2)非线性放大器。顾名思义,线性放大器在放大器输出保持好的信号线性度。然而,与非线性放大器相比,线性放大器通常具有较低的功率转换效率。非线性放大器可以以信号线性度退化为代价实现高功率转换效率。它传统上用在传输具有恒定幅度包络的信号的通信系统中,诸如采用频率调制(FM)的系统。在使用更宽带宽和更多带宽有效调制的现代通信系统中,线性性能很重要,所以几乎总是使用线性放大器。另一方面,带宽有效调制转换为信号的更高的峰值与平均功率比(PAPR)。线性PA功率转换效率通常随着信号PAPR的增大而退化。例如,假设系统的剩余部分为理想电路系统,A类别PA功率转换效率可以估计为 $10^{-(\text{PAPR}/10)}$ 。对于在电压轨之间摆动的正弦信号,效率通常为50%(PAPR为3dB)。对于通常的LTE或WiFi信号,PAPR可以在8到10dB之间。在10dB的PAPR下,功率转换效率为10%。为了输出250mW的RF功率,PA消耗2.5W,其中2.25W或90%耗散为热。

[0051] 已经提出了几种功率放大器架构以提高功率转换效率。一个示例是包络跟踪功率放大器。包络跟踪描述了一种RF放大器设计方法,其中连续调节应用到RF功率放大器的电源电压,以增大放大器在每个传输瞬间在相对于所要求的功率的峰值效率处运行的时间的比例。图1中示出包络跟踪功率放大器系统的示例架构。本领域技术人员将理解,功率放大器系统100可以体现为硬件部件,或者硬件和固件和/或软件部件的结合。进一步的,本领域技术人员将理解,功率放大器系统100仅是包络跟踪功率放大器系统的表示,并且确切部件和/或所执行的处理在实现包络跟踪的各种其他系统中可以是不同的。

[0052] 如所示,包络跟踪系统100包括主RF路径101和包络整形信号生成路径102。在主RF路径101处同相位(I)信号110和正交(Q)信号115可以用于产生传到RF放大器125的复合RF信号120。

[0053] 包络整形信号生成路径102是可以生成包络整形信号的信号链。它由几个部件组成,包括幅度计算器140、前包络增益电路145、包络整形电路150、后包络增益/偏移电路155和/或DAC 160,以生成适合于放大器运行和当前信号条件的信号。

[0054] 包络跟踪调制器/源170可以调制到功率放大器125的电压,使得放大器在其最大效率点处运行。

[0055] 关于延迟平衡,通过各种信号路径101和102的延迟可以意味着RF信号和包络整形信号各自具有它们自己的延迟。这些延迟可能需要被补偿以同步RF包络和包络跟踪调制器/源。

[0056] 在实现好的功率转换效率的同时,包络跟踪PA架构存在几个缺点,包括以下:

[0057] • 包络跟踪电源的宽带宽要求:电源跟踪带宽通常需要比信号带宽宽两到三倍。

随着通信系统为了更高的吞吐量走向更宽的带宽信道,即使不是不可能实现,这个要求也变得非常困难。

[0058] • 主RF路径和包络信号路径之间的失配:这个失配可以是时变的。为了始终匹配这两路径,通常需要具有输出监视的背景校准算法。这增加了整个PA系统的实质复杂性。

[0059] 最近,开关式PA架构(例如,类别D、E、F和S等其它)已经呈现为高功率转换效率PA设计的流行选择。开关式PA可以与数字信号处理兼容,并且理想地与调谐输出负载100%有效。图2中示出开关式PA系统的示例。本领域技术人员将理解,开关式PA系统200可以体现为硬件部件,或硬件和固件和/或软件部件的结合。进一步的,本领域技术人员将理解,开关式PA系统200仅是开关式PA系统的表示,并且确切部件和/或所执行的处理在各种其他开关式PA系统中可以是不同的。

[0060] 如图2所示,开关式PA系统200包括以下三个主要部件:1) 信号编码器,其通常使用带通 $\Delta - \Sigma$ 调制器205实现;2) 开关式功率放大器210;以及3) 重建滤波器或带通滤波器220。信号编码器205转换RF信号为包括非常快的开关脉冲序列的序列。这个脉冲序列可以用于控制开关式功率放大器210。开关式功率放大器215可以几乎总是运行在饱和区中,所以它非常有能效。理想的开关式放大器的理论功率转换效率为100%。由于放大器输入为脉冲序列,因此即使开关式功率放大器可能运行在非线性模式中,它也不会影响输出信号的线性度。输出信号的线性度由信号编码器决定。

[0061] 开关式PA(D类别)已在音频频率上非常流行,在现实应用中实现接近其理论上100%的转换效率。音频频率通常低于RF传输和在几MHz的通常的D类别PA开关的频率。另一方面,微波频率范围中的RF放大器通常运行在多GHz频率。因此,已开发了新类别的开关式PA(例如,类别E、F和S等其它)以实现更快的开关速度。

[0062] 出于几个原因,实现多GHz开关频率会是具有挑战性的。首先,开关式功率放大器通常需要以至少是输出频带的频率的三倍的频率开关,并且经常以超过10GHz的频率开关。随着氮化镓(GaN)处理的发展,这些量级的开关速度已成为可能。包括Qorvo, Inc. 和Northrop Grumman Corporation在内的几家公司提供GaN功率晶体管开关,其可以在高达65V的电压下以超过几十GHz的频率开关。进一步的,带通 $\Delta - \Sigma$ 调制器可能需要以至少是输出频率的两倍的开关频率运行。

[0063] 误差反馈架构可以是用于 $\Delta - \Sigma$ 调制的流行的实现选择(例如,出于执行数字到模拟转换的目的)。如下面进一步讨论的,这种 $\Delta - \Sigma$ 调制器不能以GHz频率开关。图3是根据误差反馈架构实现的 $\Delta - \Sigma$ 调制器的示例。如图3所示,可以在每个时钟循环计算量化误差,并且该量化误差可以用于计算下一个量化器输入。因而, $\Delta - \Sigma$ 调制器的速度受到反馈路径计算的延迟的限制。这个延迟通常取决于反馈传递函数的复杂度和晶体管延迟。期望晶体管延迟不会在未来显著提高。因而, $\Delta - \Sigma$ 调制器限于几百MHz。然而,如上所述,根据本发明的各种实施例设想了使用情况,其中需要开关式PA $\Delta - \Sigma$ 调制器以超过10GHz的速度开关。本领域技术人员将认识到,图3中仅示出理解误差反馈路径所必需的 $\Delta - \Sigma$ 调制器300的部件。进一步的,图3中所示的部件和/或处理可以由硬件部件、或硬件和固件和/或软件部件的结合实现。

[0064] 如图3所示, $\Delta - \Sigma$ 调制器300包括加法器部件305,该加法器部件305接收 $\Delta - \Sigma$ 调制器输入信号310和滤波后的误差信号350。输入信号310和滤波后的误差信号350由加法器

305结合以输出校正输入信号330。校正输入信号可以由1-比特截断器部件315和加法器部件325接收。1-比特截断器部件315生成 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器输出信号320,该 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器输出信号320被提供为输出并被加法器部件325接收。加法器部件325结合校正输入信号和输出信号以生成误差信号340。 $H_e$ 335是误差反馈传递函数。可以通过误差反馈传递函数 $H_e$ 335根据误差信号计算和滤波量化器误差,以生成滤波后的误差信号。滤波后的误差信号被提供给加法器部件305,以与 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器输入信号310相加以用于量化。

[0065] 2017年3月27日提交的题为“Systems and Methods for Fast Delta Sigma Modulation Using Parallel Path Feedback Loops”的美国专利申请15/470,805公开了用于 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器噪声整形滤波器的内插滤波器架构,其公开内容通过引用全部并入本文中。使用内插滤波器作为噪声整形滤波器可以允许以较低的时钟速度的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的并行实现。大多任何任意高速 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器可以使用根据本发明的许多实施例描述的并行架构实现,如下面详细描述。然而,将噪声整形滤波器的选择限制到内插滤波器可能是 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器设计的主要约束,因为使用内插滤波器架构设计具有宽带宽和尖锐抑制两者的噪声整形滤波器会是困难的。

[0066] 相应地,本发明的许多实施例提供没有对噪声整形滤波器的内插滤波器约束的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器架构实现。下面详细描述用于并行实现的信号调制结构。

[0067] 并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器架构

[0068] 现有的设备技术通常将开关式PA开关速度限制在大约10GHz。这将开关式PA的运行频率限制为几GHz,而诸如5G的更新的标准已经在为了更多带宽而探索高达100GHz的毫米波频率。相应地,为了允许在高于10GHz的频率运行, $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的许多实施例可以扩展为包括上变频器。上变频信号可以通过线性PA(类别A、A/B、B和C)放大。假设根据本发明的许多实施例的后 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器信号具有比源信号低得多的PAPR或更有利的幅度分布,则PA效率可以显著提高。

[0069] 在许多实施例中,并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构可以应用于放大正交频分复用(OFDM)信号的大多所有PA类别(例如,类别A、A/B、B、C、D、E、F、S等其它)。 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制可以是降低由OFDM调制导致的高PAPR而不会使传递的信号误差矢量幅度(EVM)劣化的有效方式。PAPR的每一dB降低可以转化为PA效率的1dB提高。相应地,根据本发明的某些实施例的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构的实现可以提供PAPR的大约3dB的降低或PA效率的100%的提高。

[0070] 用于OFDM的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器架构

[0071] 大多数现代宽带通信系统基于OFDM及其变体。例如,4G LTE下行链路利用OFDMA,并且上行链路是SC-FDMA。同样,大多所有高速WiFi技术,包括标准802.11a、802.11n、802.11ac等其它都基于OFDM。OFDM也用于线缆和地面系统以及许多新兴的通信标准。图4示出根据本发明的实施例的OFDM调制器的示例。比特流405可以生成有效载荷比特,并且它们可以被映射到符号映射器410中的星座点。串行/并行415可以用于在IFFT 420之前转换串行符号流为矢量。并行/串行425可以用于将IFFT输出从矢量形式转换回串行流。循环前缀可以在添加循环前缀430中添加。上采样块435可以用于上采样数字信号到更高的采样率。上采样块输出436可以在基带内,并且也可以被认为是基带OFDM调制信号。基带OFDM调制信号可以用混频器440上转换到RF带。载波可以由DDFS445生成。混频器输出441可以被认为是RF带OFDM调制信号,并且它可以直接转换为具有高速DAC的RF信号。尽管图4示出特别的

OFDM调制器,但是根据本发明的实施例,可以利用各种OFDM调制器中的任何以适合具体应用的要求。

[0072] 图5示出时域中的OFDM调制信号的示例。基于OFDM的系统的关键特征是向符号添加循环前缀。循环前缀是指具有结束的重复的符号的前缀。在每个OFDM信号的开始处添加循环前缀。图5示出对于每个符号N到符号(N+L+1),添加到符号N 510的循环前缀505。循环前缀通常由接收器丢弃。然而,循环前缀可以用于几种目的。

[0073] 首先,循环前缀可以用作保护间隔,由此其消除来自先前符号的符号间干扰。而且,作为符号的结束的重复,它可以允许频率选择性多路径信道的线性卷积被建模为循环卷积,其进而可以使用离散傅里叶变换被变换到频域。这个方法允许简单的频域处理,诸如信道估计和均衡。

[0074] 根据本发明的许多实施例的功率放大器包含为了提高了功率转换效率的并行 $\Delta-\Sigma$ 调制器架构。在图6中示出可以在根据本发明的实施例的功率放大器中采用的并行 $\Delta-\Sigma$ 调制器架构的示例。如图6所示,使用信号解复用器610解复用输入的OFDM调制信号605为符号620的多个流615。每个符号620包括上采样IFFT输出及其循环前缀。每个信号流615由以全时钟速度的部分运行的 $\Delta-\Sigma$ 调制器630处理,使得 $\Delta-\Sigma$ 调制器时钟频率可以是最终脉冲序列输出频率的整数分频。在一些实施例中,信号解复用器可以并行输出符号,使得输出处于全时钟速度,并且1到L的并行 $\Delta-\Sigma$ 调制器中的每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器630(1到L)可以使用以1/L的时钟速度运行的时钟信号以读取输入信号。在某些实施例中,每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器1到L 630可以以交错的时钟信号运行,该交错的时钟信号相对于彼此偏移1/L时钟周期。例如,信号解复用器610可以以16GHz的时钟速度输出符号,并且每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器可以以1GHz的时钟速度运行,其中总共16个 $\Delta-\Sigma$ 调制器并行运行。在一些实施例中, $\Delta-\Sigma$ 调制器630可以使用相同的时钟信号。在某些实施例中, $\Delta-\Sigma$ 调制器630可以各自使用相对于彼此交错的不同的时钟信号。每个时钟信号可以相对于彼此交错的量可以是信号解复用器610的全时钟速度的1/L倍的相移,其中L是并行运行的 $\Delta-\Sigma$ 调制器的数量。例如,在信号解复用器610的16GHz的全时钟速度,每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器1到L 630可以具有以1GHz运行的时钟信号,并且每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器可以具有相对于彼此的1/L时钟信号的相移。因而,在这个示例中,每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器将以信号解复用器610的全时钟速度的1/16接收新符号。

[0075] 这些 $\Delta-\Sigma$ 调制器630的输出使用信号复用器640一起复用到一个脉冲序列650中。为了信号的放大,这个脉冲序列650可以馈入开关式PA。在图6所示的并行实现中,每个 $\Delta-\Sigma$ 调制器的噪声整形滤波器可以是未约束的。这为设计人员给出了另一自由度以设计非常宽带宽的噪声整形滤波器或多带噪声整形滤波器。图7示出为载波频率5.7GHz的WiFi系统设计的噪声整形滤波器的示例。

[0076] 噪声整形滤波器 $H(z) = \frac{1+2.4754z^{-1}+3.5299z^{-2}+2.4754z^{-3}+z^{-4}}{1+2.2231z^{-1}+2.8504z^{-2}+1.8179z^{-3}+0.6660z^{-4}}$

[0077] 本领域技术人员将理解,图6中示出的并行 $\Delta-\Sigma$ 调制器架构可以体现为硬件部件,或硬件和固件和/或软件部件的结合。进一步的,尽管图6示出特别的并行 $\Delta-\Sigma$ 调制器架构,但是根据本发明的实施例,可以利用各种并行 $\Delta-\Sigma$ 调制器架构中的任何以适合具体应用的要求。

[0078] 在许多实施例中,开关式PA设计可以与各种通信技术一起被利用,包括WiFi标准

802.11a、802.11n、802.11ac等其它。图8示出根据本发明的实施例的WiFi开关式PA设计的示例。如图8所示，首先使用调制器和RF上转换器805上转换WiFi基带信号为数字域中的RF频率。峰值与平均比(PAPR)部件810可以用于控制峰值信号功率。数字RF信号可以用 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器815编码。 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器815输出三电平信号(-1,0,1)，其驱动开关式功率放大器820以输出放大器输出825。尽管图8示出WiFi系统的示例，根据本发明的各种实施例，这个设计可以推广到适合具体应用的要求的各种基于OFDM的系统中的任何。

[0079] 图9示出 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器输出的示例。如图9所示，‘1’表示开关式PA输出正电压脉冲，以及‘-1’表示开关式PA输出负电压脉冲。‘0’表示PA关断。在许多实施例中，假设PA可以关断或输出单个电平，则不需要回退并且功率转换效率非常高。

[0080] 图10示出根据本发明的实施例的3个输出电平的直方图。如图10所示，PA大部分时间关断，并且不耗散功率。‘0’状态(关断状态)降低到PA的DC功率并且提高了整体的功率效率。在许多实施例中，功率编码器效率可以定义为期望的信号功率与总功率的比。在图10所示的情况下， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器之后的功率编码器效率为56%。那是输入信号的3倍。鉴于大部分误差功率是带外的，可以使用调谐PA设计以抑制带外能量。在理论上，这个调谐开关式PA的功率转换效率可以达到100%。输出频谱如图11所示，并且传输信号星座图如图12所示。

[0081] 在许多实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构也可以应用于基带信号。在基带中执行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制可以允许更高频率转换，使得最终的调制信号可以显著更高(例如，高于10GHz)。具有根据本发明的实施例的基带信号输入的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器在图13中示出。使用信号解复用器1310解复用输入基带OFDM调制信号1305为符号1305的多个流1311。每个信号流1311由以全时钟速度的部分运行的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1315处理。这些 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1315的输出可以使用信号复用器1320一起复用到一个脉冲序列1330中。为了RF转换，这个脉冲序列1330可以馈入上变频器。如图13所示， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1315的全时钟速度应该是最终载波频率的整数分频。例如，如果发送器载波频率是5.7GHz，则 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1315全时钟速度的可能选择包括5.7GHz、2.85GHz、1.9GHz或5.7GHz的其他整数分频。 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器时钟速度依赖于系统的性能要求被选择。尽管图13示出应用于基带信号的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构，但是并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构可以应用于根据本发明的各种实施例的适合具体应用的要求的各种不同的输入信号。

[0082] 在许多实施例中，PA架构可以使用上变频器以提高功率转换效率。图14示出根据本发明的实施例的利用上变频器的PA架构的示例。基带信号1401由PAPR降低部件1405处理。它然后用 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1410编码。 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1410可以输出0或恒定功率信号。在这个示例中，选择圆上的6个相等间隔的星座点。尽管图14示出具有上变频器的特别的PA架构，但是根据本发明的各种实施例，可以利用各种PA架构中的任何以适合具体应用的要求。

[0083] 图15中示出根据实施例的图14中示出的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的输出的示例。如所示，‘0’表示PA关断或者没有信号被传输。非零表示PA接通。假设PA关断或者具有恒定幅度信号作为其输出，则功率转换效率非常高。‘0’状态(关断状态)降低到PA的DC功率并且提高整体功率效率。鉴于大部分误差功率是带外的，可以使用调谐PA设计以抑制带外能量。使用B类别PA为例，放大这个信号的功率转换效率可以达到B类别的理论极限或78%。

[0084] 在许多实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构可以应用于各种不同的应用。图16示出根据本发明的实施例的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构在RF带中的应用的示例。如图16所示， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器1610正在用PAPR降低部件1610对RF带中的信号起作用。可以利用各种处理执行PAPR降低，

并且其大多全部生成噪声。在许多实施例中， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制可以以带外噪声增长为代价来抑制带内噪声。在许多实施例中，通过使 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器与PAPR降低部件一起工作导致较低的PAPR而不会使期望的信号的SNR劣化。当用诸如A类别PA的线性PA放大这个信号时，PAPR中的1dB降低可以转化为功率转换效率中的1dB增益。尽管图16示出RF带中的特别的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构，但是根据本发明的各种实施例，可以利用各种信号带的任何中的各种并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构中的任何以适合具体应用的要求。

[0085] 上述各种高效率功率放大器架构与现有的PA设计相比具有许多优点。特别地，许多实施例的并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构使得对RF信号本身的非常高速的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制成为可能。这使得开关式PA设计用于多GHz频带。进一步的，在许多实施例中，在多电平 $\Delta$ - $\Sigma$ 输出中存在‘0’状态，其关断PA以节省功率。结合调谐输出负载，根据本发明的许多实施例的开关式PA可以接近100%的效率。

[0086] 类似地，根据本发明的许多实施例的开关式PA是前馈的，并且因而不需要例如在包络跟踪PA架构中的反馈监视。相应地，开关式PA的许多实施例的设计复杂性可以显著降低。

[0087] 另外，在许多实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构可以与上变频器配对以生成较高频率的输出。根据本发明的许多实施例的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器可以输出‘0’或恒定幅度信号。具有恒定幅度信号可以允许线性PA以其峰值效率运行。‘0’状态可以允许PA关断并且节省功率。在本发明的许多实施例中，使用具有调谐的B类别PA的 $\Delta$ - $\Sigma$ 架构，功率转换效率可以接近B类别放大器的峰值效率或78%。

[0088] 在许多实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构可以与PAPR降低块配对以获得更低的PAPR比。在许多实施例中， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器可以以带外噪声增长为代价抑制带内噪声。这可以允许来自PAPR降低的更高噪声容限并且降低最终的PAPR比。来自PAPR的降低的这种功率转换效率增益可以应用于适合给定应用要求的任何类别的PA。

[0089] 在许多实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构允许反馈路径的并行计算，并且因而能够利用并行化实现更快的有效速度。在几个实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构也利用OFDM调制中的OFDM符号之间的保护间隔。多个 $\Delta$ - $\Sigma$ 处理器可以用于同时处理多个OFDM符号。进一步的，在许多实施例中， $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器可能不再受反馈路径的设备延迟的限制。相应地，计算的数量可以与串行计算相同，而没有用于并行化的开销。

[0090] 在许多实施例中，并行 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制架构可以在应用在直接-RF转换、开关式PA和PAPR降低等各种其他应用中的情况下实现非常高速的 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器速度。尽管已经在某些具体方面描述了本发明，但是对于本领域技术人员来说许多其他修改和变化将是清楚的。因此，应该理解，本发明可以不同于具体描述地实行，包括实施方式的各种变化。因而，本发明的实施例应该在所有方面都被认为是说明性的而非限制性的。

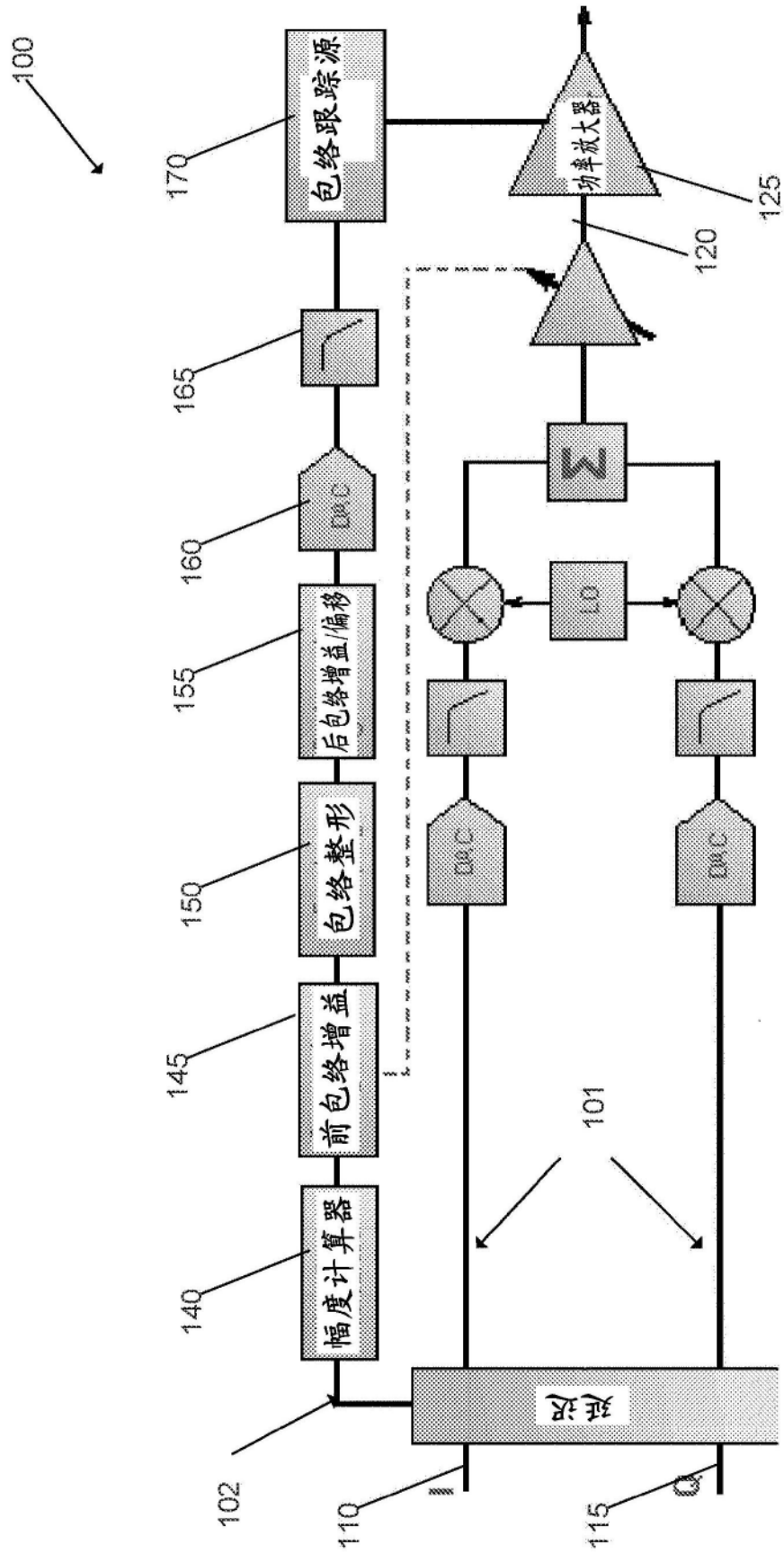


图1

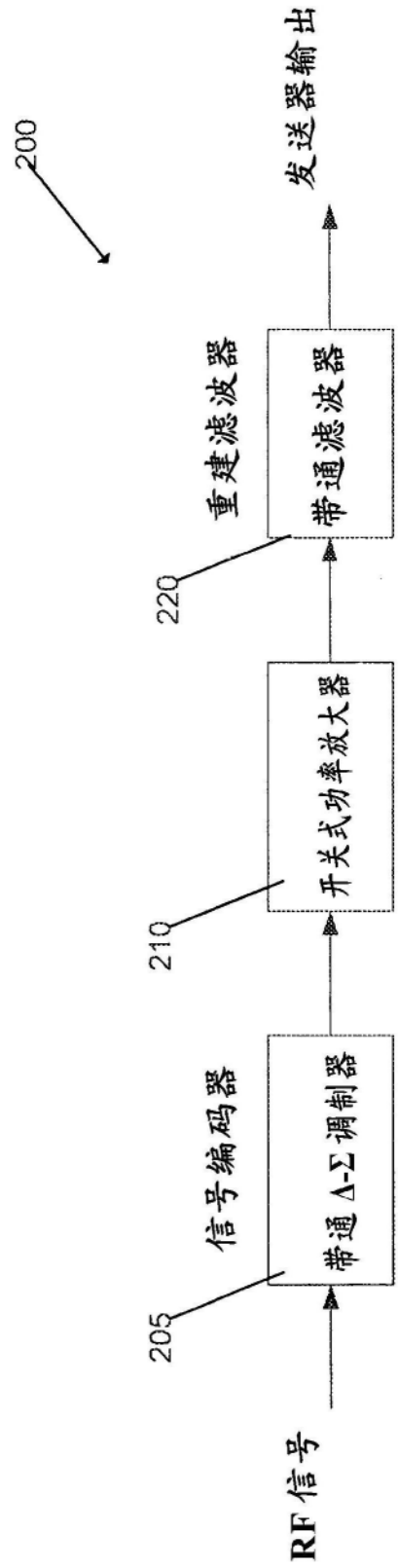


图2

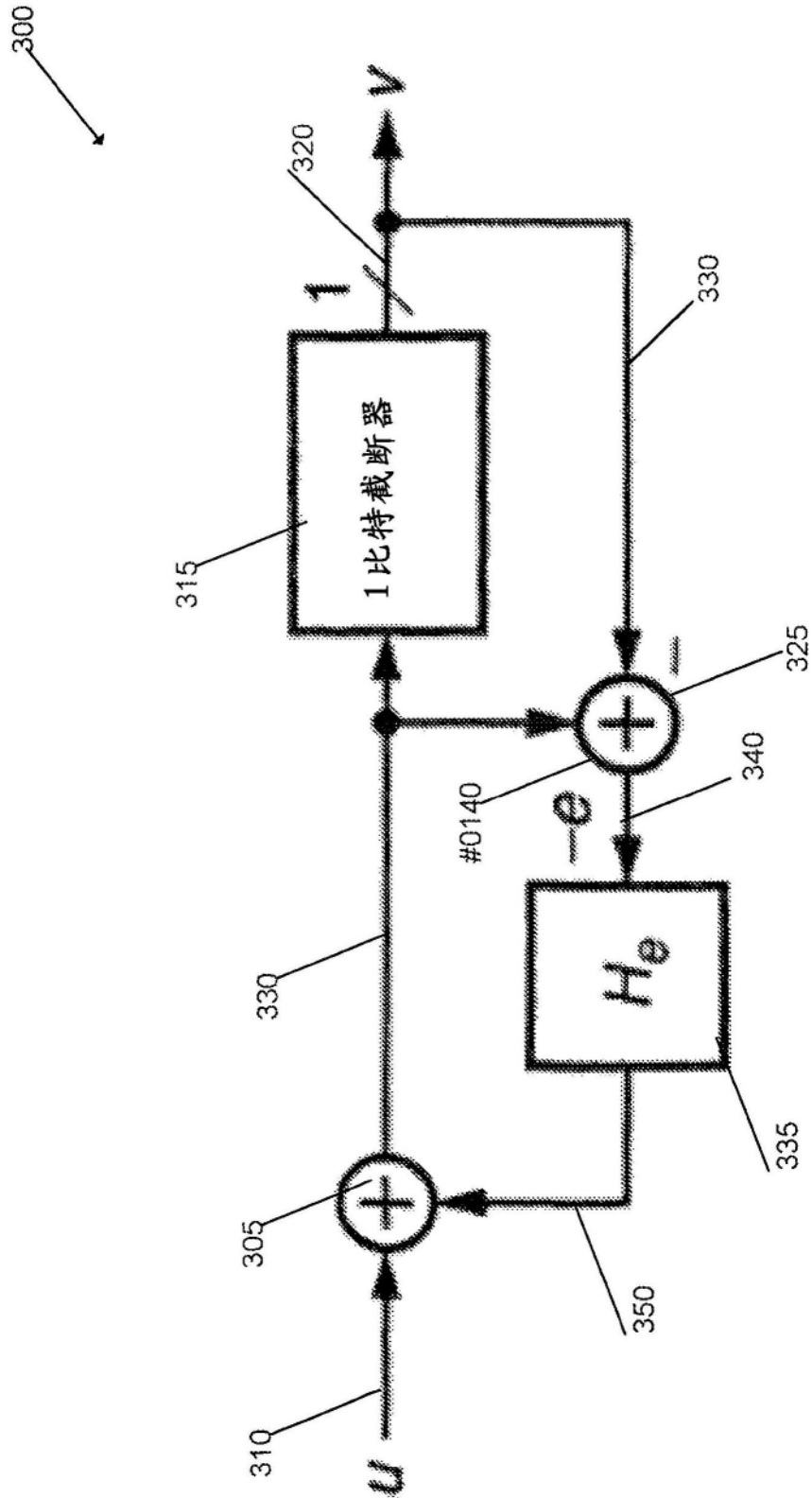


图3

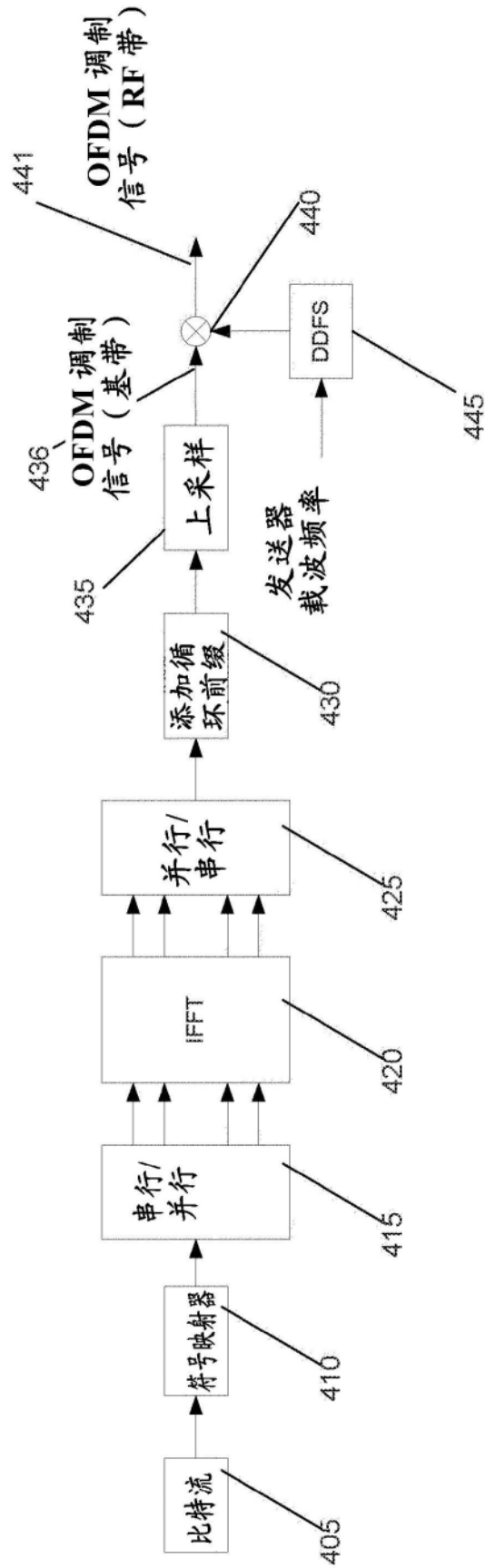


图4

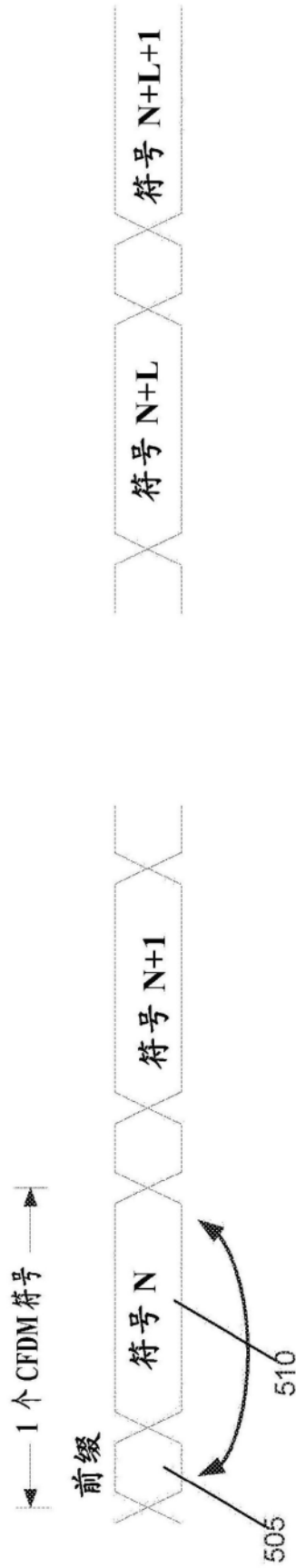


图5

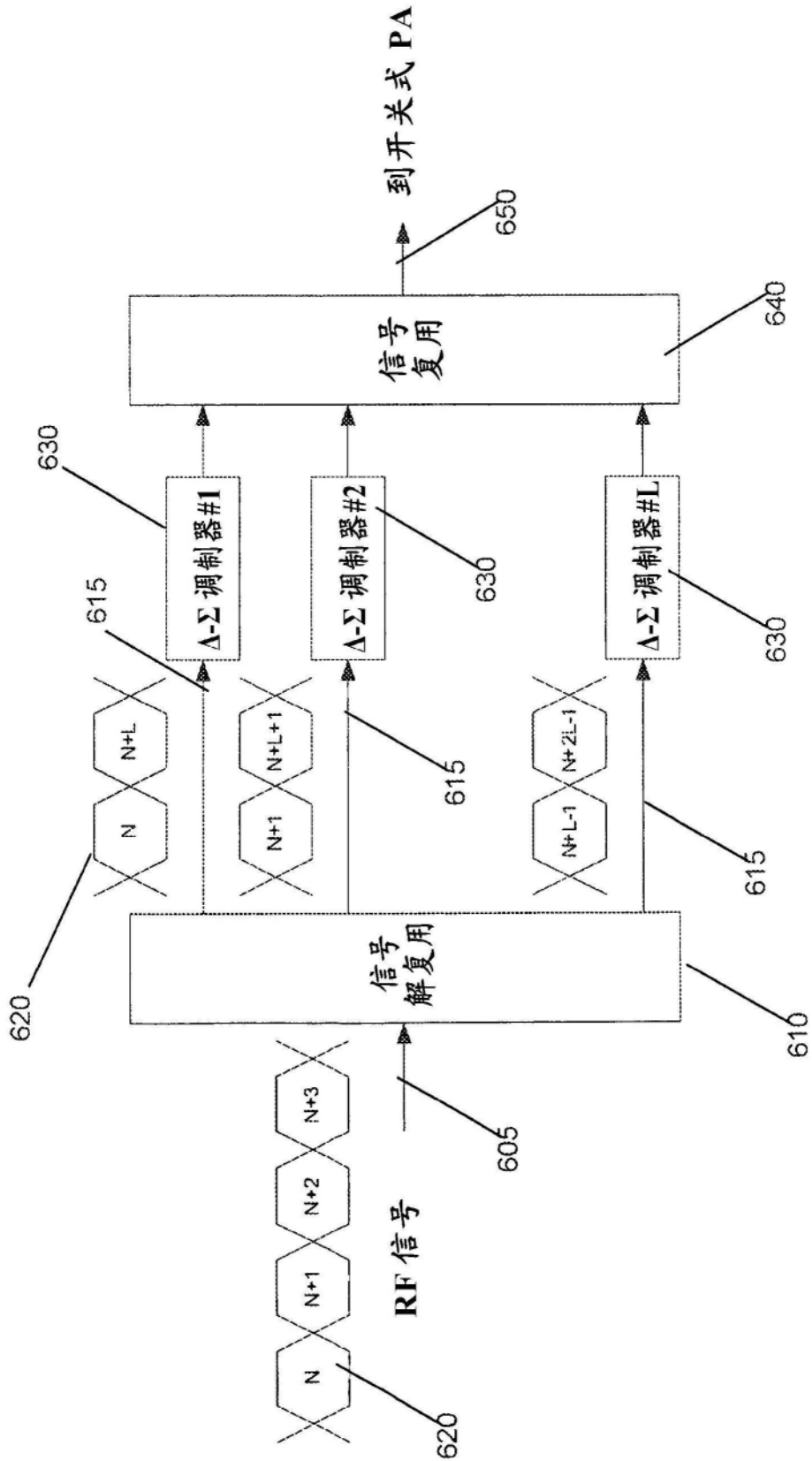


图6

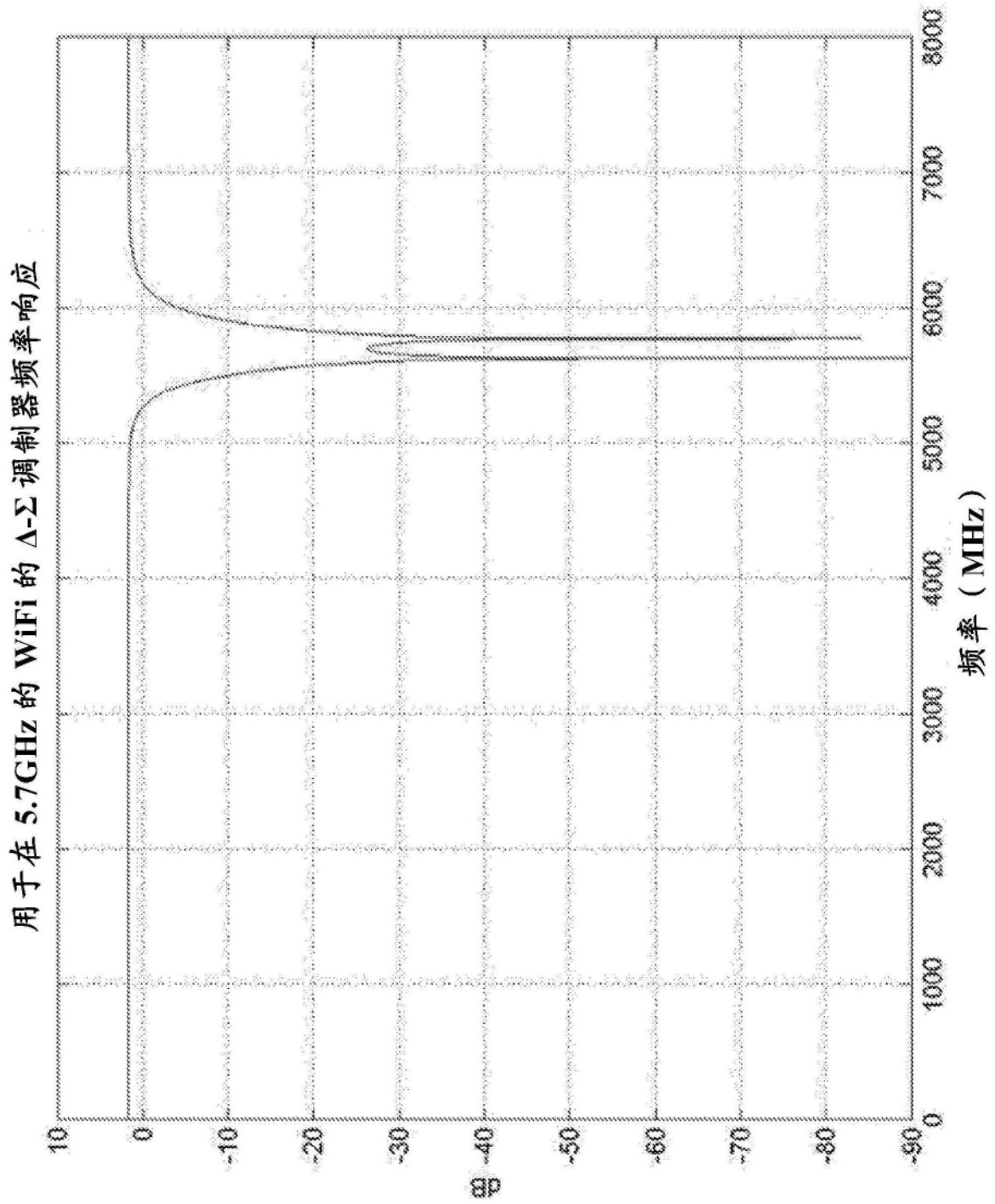


图7

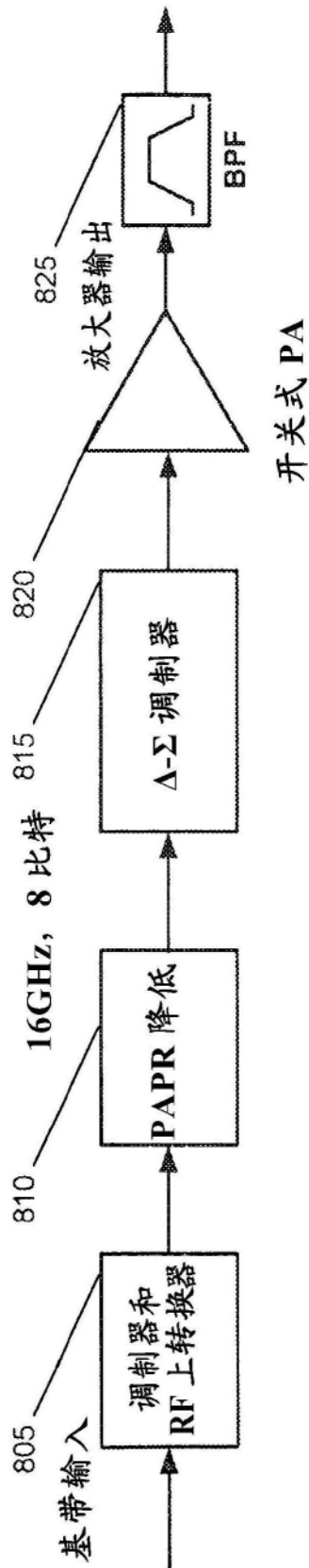


图8

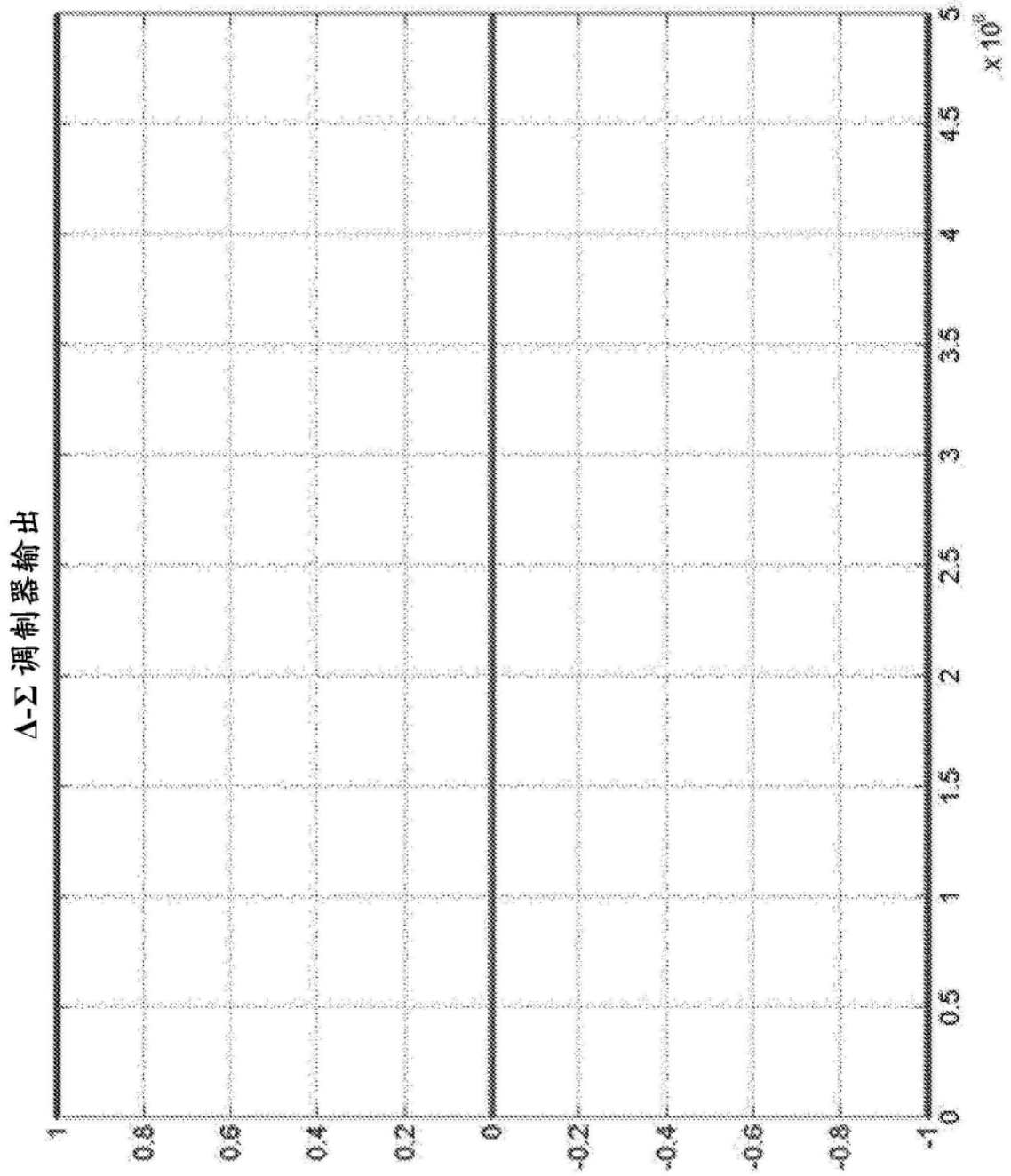


图9

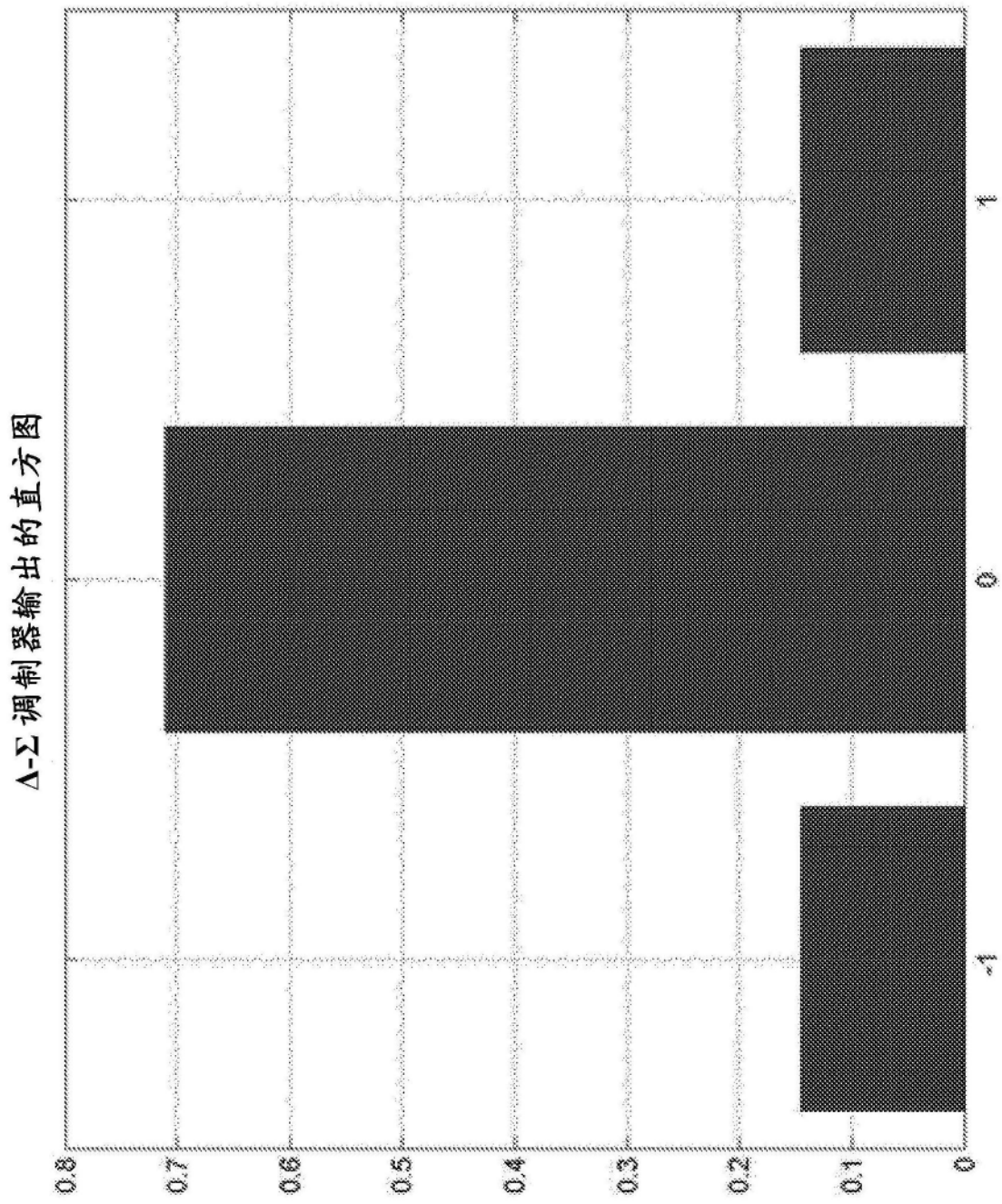


图10

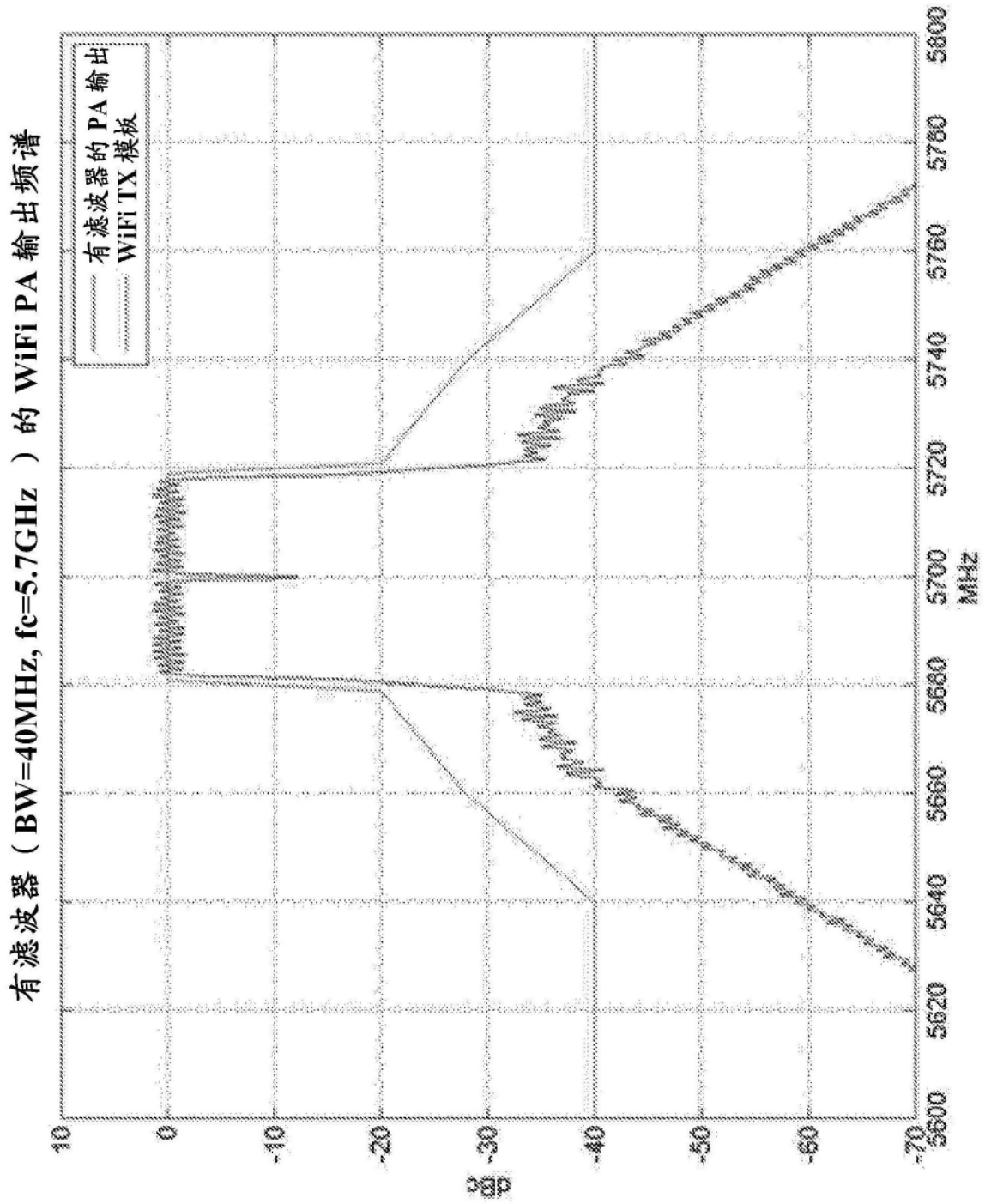


图11

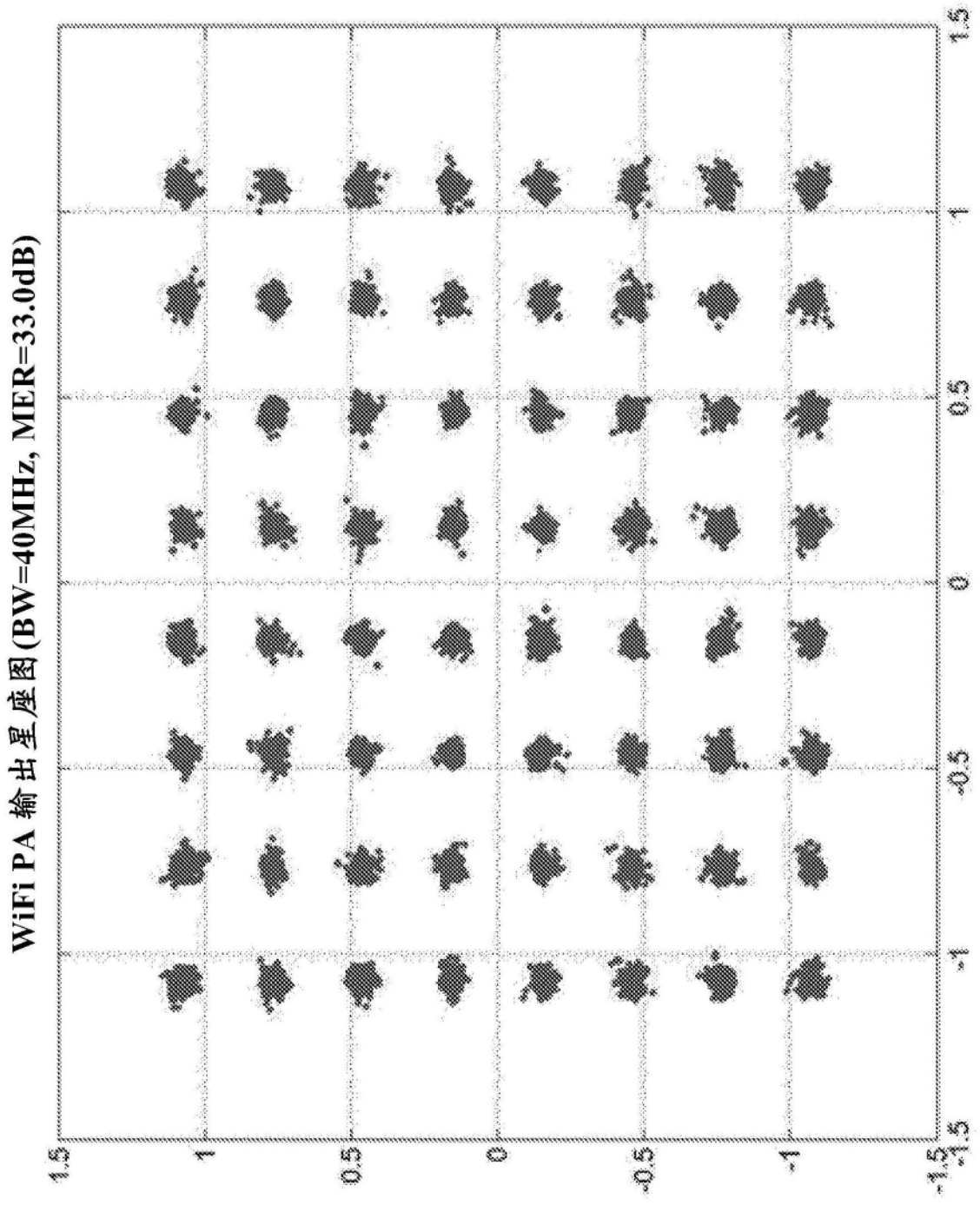


图12



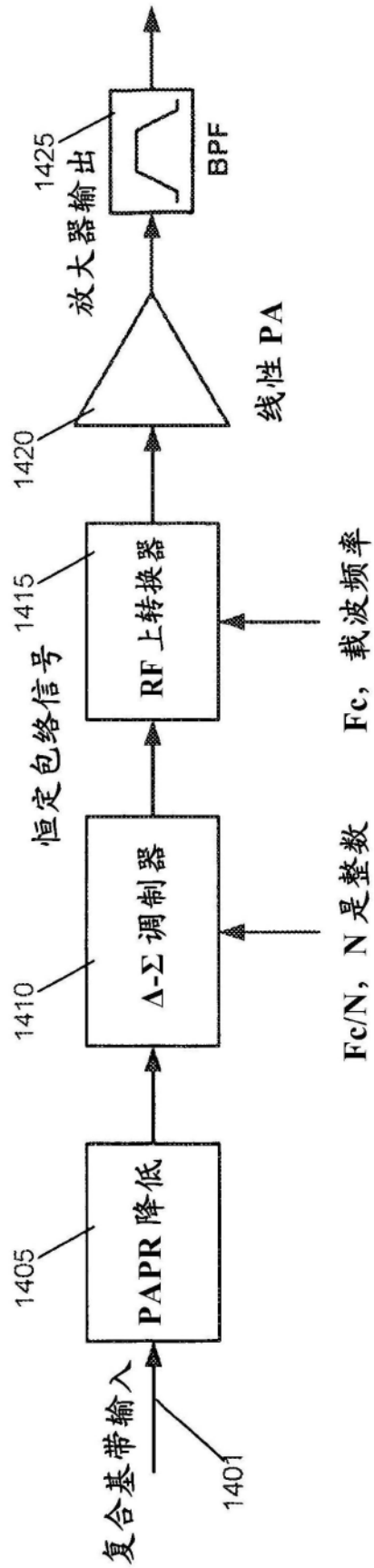


图14

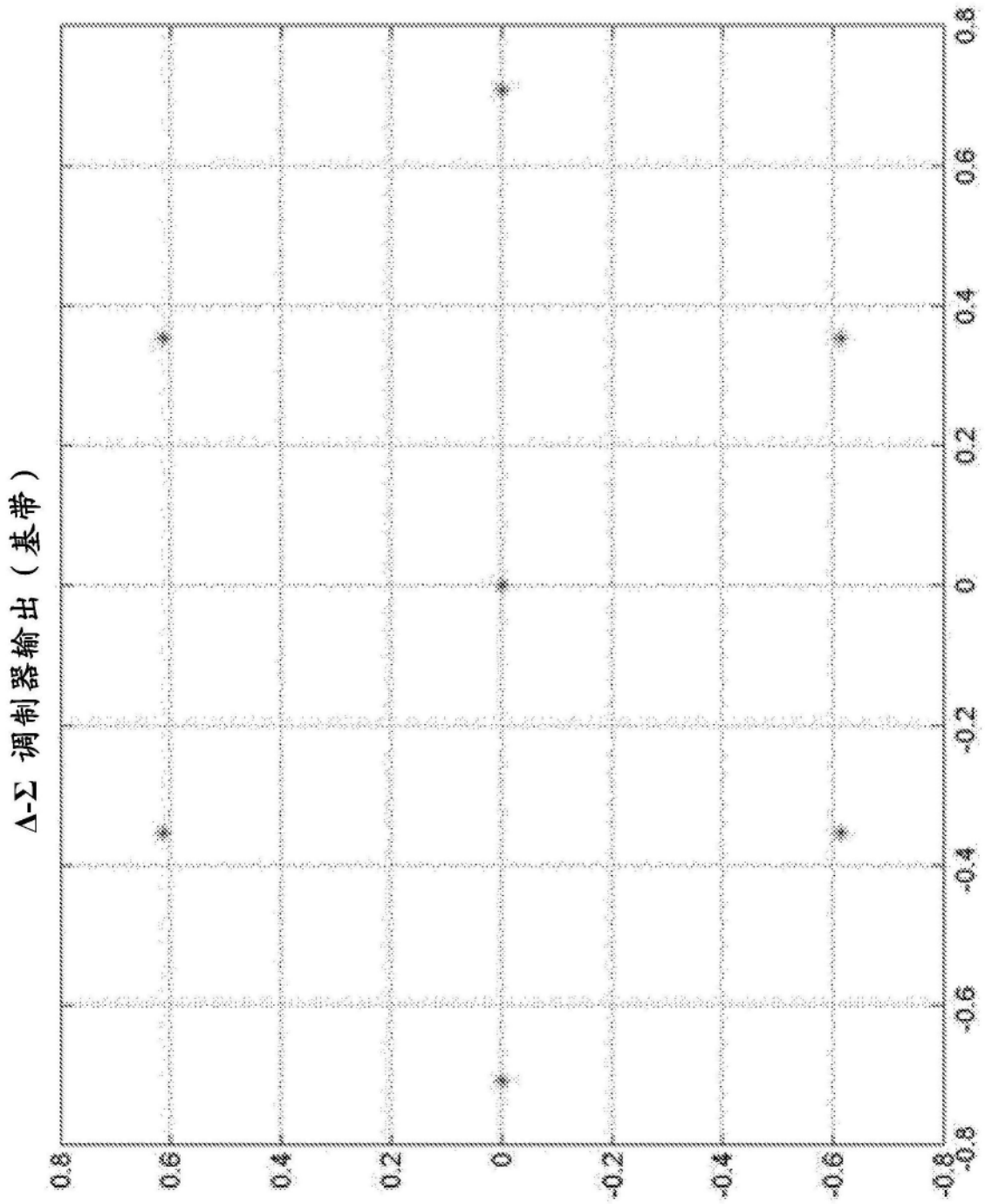


图15

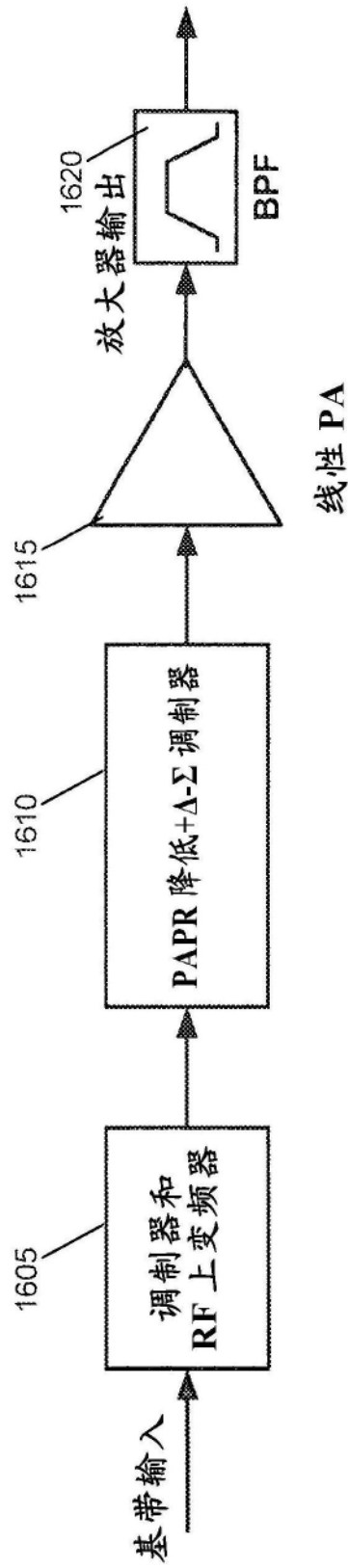


图16