

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03801838.1

G01S 7/28

G01S 7/483

G01S 7/486

H01Q 3/26

[43] 公开日 2005 年 4 月 27 日

[11] 公开号 CN 1610840A

[22] 申请日 2003.3.26 [21] 申请号 03801838.1

[30] 优先权

[32] 2002.3.26 [33] US [31] 10/106,335

[86] 国际申请 PCT/US2003/009452 2003.3.26

[87] 国际公布 WO2003/083505 英 2003.10.9

[85] 进入国家阶段日期 2004.6.24

[71] 申请人 雷斯昂公司

地址 美国加利福尼亚

[72] 发明人 凯普瑞尔·V·可瑞克瑞恩

罗伯特·A·罗森

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商
标事务所

代理人 郭思宇

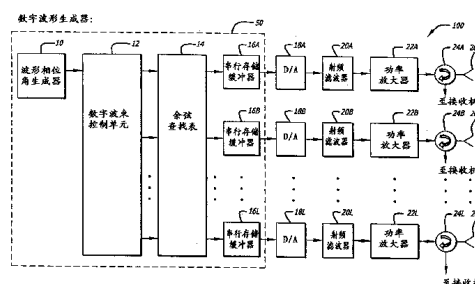
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 3 页

[54] 发明名称 高效宽带波形生成和信号处理设计

[57] 摘要

一种用于多波束点扫描天线阵列(ESA)雷达系统的高效数字宽带波束生成和信号处理系统。数字波形生成器(50)首先生成对应于将由 ESA 发射的公共信号的相位角的一系列波形相位角。然后,为了每个天线振子,通过添加时延和相位调整来调整波形相位角以控制波束。然后,通过将余弦函数应用于已调整的相位角,为每个天线振子生成数字信号。在说明性的实施例中,这使用余弦查找表(14)来实现。然后,将每个数字余弦波存储在串行存储缓冲器(16A 至 16L)内,准备转换成数字的。每个数字信号通过每个天线振子上的数模转换器(18A 至 18L)和射频滤波器(20A 至 20L)。所获得的模拟信号由功率放大器(22A 至 22L)分别放大,然后通过宽带环行器(24A 至 24L)发送给天线振子(26A 至 26L)。一旦接收,在每个天线振子(26A 至 26L)上,宽带线性放大器(30A 至 30L)和

射频滤波器(32A 至 32L)提供带宽信号的拒绝,同时为随后的模数转换器(34A 至 34L)提供放大和信号调整。通过(36A 至 36L)发送所获得的数字信号(分别用于每个振子),它将每个数字信号划分成 N 个频率信道。然后,通过组合来自每个天线振子的类似频率信道与添加的相位调整,用于每个频率信道的数字波束形成单元(38A 至 38N)形成多个数字同时波束。



1. 一种用于生成用于驱动电子扫描天线阵列 (ESA) 的各个振子的信号的系统, 包括:

信号生成器 (10), 用于生成第一数字信号; 和

数字波束控制单元 (12), 在所述第一数字信号上操作以生成用于所述天线阵列的每个单独振子的一个第二数字信号。

2. 如权利要求 1 的发明, 其中所述第一数字信号是代表将由所述 ESA 发射的公共信号的相位角的一系列波形相位角。

3. 如权利要求 1 的发明, 其中所述数字波束控制单元 (12) 包括用于向用于所述天线阵列的每个单独振子的所述第一数字信号添加相位调整的代码。

4. 如权利要求 3 的发明, 其中根据等式 $\gamma_l = 2\pi f_c t_{rl}$ 来计算用于天线振子 l 的所述相位偏移 γ_l , 其中 f_c 是所发射波束的中心频率, t_{rl} 是振子 l 的残余时间。

5. 如权利要求 1 的发明, 其中所述数字波束控制单元 (12) 包括用于向用于所述天线阵列的每个单独振子的所述第一数字信号添加时间延迟的代码。

6. 如权利要求 5 的发明, 其中根据等式 $t_l = \frac{\bar{x}_l \cdot \hat{u}_r}{c}$ 来计算用于天线振子 l 的所述时间延迟 t_l , 其中 $\hat{u}_r$ 是沿着发射波束的单位矢量, $\bar{x}_l$ 是天线振子 l 相对于天线阵列中心的位置, 和 c 是光速。

7. 如权利要求 1 的发明, 其中所述系统还包括程序 (14), 用于生成用于所述天线阵列的每个单独振子的第三数字信号, 其中所述第三数字信号是所述第二数字信号的函数。

8. 如权利要求 10 的发明, 其中所述函数是余弦。

9. 如权利要求 10 的发明, 其中所述函数通过使用查找表来实现。

10. 如权利要求 1 的发明, 其中所述系统还包括串行存储缓冲器 (16A - 16L), 用于在转换成模拟之前存储所述数字信号。

11. 如权利要求 1 的发明, 其中所述系统还包括用于每个天线振

子的数模（D/A）转换器（18A-18L），用于将所述数字信号转换成模拟信号。

高效宽带波形生成和信号处理设计

技术领域

本发明涉及雷达系统。更具体地说，本发明涉及在多波束电子扫描天线阵列雷达系统内的数字波形生成和接收波束形成。

背景技术

某些雷达应用设备同时使用多个发射和接收波束以提高它们的搜索率能力。使用多个同时波束有助于维持位置的获知能力，并允许先进的处理技术，例如地物干扰消除和先进的抗干扰能力。

可以使用电子扫描天线阵（ESA）来生成多个同时波束。一个ESA是共同工作以形成所希望的整体天线方向图的多个单独天线振子的阵列。每个天线振子辐射在相位上改变的公共信号。可以通过改变驱动单个天线振子的信号的相位来控制天线波束的方向。因而，要求沿着信号源和天线振子之间的每条路径的信号具有一个受控的相位。

常规上，ESA使用模拟天线多支管来在发射模式中将具有正确相位调整的输出信号分配给天线振子，和在接收模式中相干地组合天线振子信号分量。这种多支管包括复杂的电路，例如馈电天线、馈电分配网络和共同馈电。这些多支管可能与天线阵列内振子的数量成正比地变得很大和笨重。

已经使用巴特勒矩阵来给用于生成多个同时波束的天线阵列馈电。然而，巴特勒矩阵的缺点在于相对于当前要求更高的应用来说不足的带宽，以及本来就很复杂和笨重的设备。

因此，在本技术领域需要一种提供宽带宽、低成本和重量轻的用于多波束电子扫描天线阵列的高效波形生成的系统或方法。

发明内容

本技术领域的这种需要通过本发明的用于电子扫描天线阵列（ESA）雷达系统的高效数字宽带波形生成和信号处理设计来解决。

在发射时，数字波形生成器生成将由天线阵列的各个振子发射的信号的数字形式。为每个振子生成不同的信号。每个数字信号通过数模转换器（D/A）和每个天线振子上的射频（RF）滤波器。所获得模拟信号分别由功率放大器放大，然后通过宽带环行器发送给天线振子。

数字波形生成器首先生成一系列的对应于将要发射波形的相位的波形相位角。这对于所有的天线振子都是相同的。然后，为每个天线振子，通过添加时延和相位调整来调整波形相位角以控制此波束。然后，通过将余弦函数应用于已调整的相位角，为每个天线振子生成数字信号。在说明性的实施例中，这通过使用余弦查找表来实现。然后，将每个数字余弦波装载到串行存储缓冲器，并读出到 D/A 转换器。

一旦接收，在每个天线振子上，宽带线性放大器和射频滤波器提供带外信号的拒绝，同时为随后的模数转换器（A/D）提供放大和信号调整。通过数字频率信道化器发送所获得的数字信号（每个振子一个数字信号）。然后，组合来自每个天线振子的类似的频率信道以形成多个数字同时波束。当在发送链路中，可以使用时延和相位调整的组合来进行波束形成。

附图说明

图1是根据本发明的教导设计的宽带多波束数字雷达的发射电路的方框图。

图2是根据本发明的教导设计的数字波束控制系统的流程图。

图3是根据本发明的教导设计的宽带多波束数字雷达的接收电路的方框图。

图4是根据本发明的教导设计的数字波束形成系统的流程图。

具体实施方式

现在将参考附图描述说明性的实施例和示例性的应用以公开本

发明的有利的教导。

虽然在此参考具体应用的说明性实施例描述了本发明，应当理解本发明并不限制于此。具有本领域的普通技术和理解在此所提供的教导的人员将认识到在本发明范围内的其它修改、应用和实施例以及本发明将有显著用途的其它领域。

本发明是一种用于电子扫描天线阵列（ESA）雷达系统的高效数字宽带波形生成和信号处理设计。

在数字技术上的改进，尤其是在模数（A/D）转换器上可用的更宽的带宽和更高处理能力的处理器，现在允许实际上实现数字天线多支管，即在发射上的数字波形生成和在接收上的数字波束形成。

图 1 是根据本发明的教导设计的宽带多波束数字 ESA 雷达系统的发射电路 100 的方框图。数字波形生成器 50 生成将由天线阵列的各个振子（26A 至 26L）发射的信号的数字形式。为每个振子生成不同的信号。每个数字信号通过 D/A（18A 至 18L）和射频滤波器（20A 至 20L）。所获得的模拟信号分别由功率放大器（22A 至 22L）放大，然后通过宽带环行器（24A 至 24L）发送给相应的天线振子（26A 至 26L）。天线阵列包括 L 个单独的振子（26A 至 26L），其中 L 是一个整数。在一个说明性的例子中，天线阵列包含 1000 个振子，D/A 转换器在 40GHz 的抽样频率上工作，所发射的能量具有 10GHz 的中心频率。

假设所发射的信号是余弦（或正弦）波形，数字波形生成器首先生成与将要发射的波形的相位对应的一系列相位角。这由波形相位角生成器 10 执行，如图 1 所示。波形相位角生成器 10 生成的该系列相位角公用于所有的天线振子。然后，波形相位角由数字波束控制单元 12 调整以通过为每个天线振子（26A 至 26L）添加时延和相位调整来控制波束。因而，为每个天线振子（26A 至 26L）生成一系列的已调整相位角。然后，通过将余弦函数应用于已调整的相位角，为每个天线振子（26A 至 26L）生成一个数字信号。在图 1 所示的说明性实施例中，这通过使用余弦查找表 14 来实现。然后，将每个数字余弦波装

载到串行存储缓冲器（16A 至 16L）内，并读出到 D/A 转换器（18A 至 18L）。

波形相位角生成器 10 生成与将在雷达脉冲内发射的信号相位对应的一系列相位角 $\phi(n)$ 。这些相位角 $\phi(n)$ 公用于此阵列的所有天线振子。波形相位角生成器 10 可以通过直接数字合成器（DDS）或类似的设备实现。

然后，将波形相位角 $\phi(n)$ 输入给数字波束控制单元 12。数字波束控制单元 12 为每个天线振子添加时延和相位调整。时延允许在宽带宽上均匀的波束指向，相位调整补偿中心频率上的时延量化。为了控制所发射的雷达波束，每个天线振子必须具有添加给公共波形信号的特定相位角。这类似于在模拟波束控制系统内需要的相移，除了它是通过数字实现的。还需要数字延迟以会聚所发射的波束。否则，波束将相对于频率倾斜，即边沿频率将不指向与中心频率相同的方向。

为每个振子，将不同的相位调整和时延与波形相位角生成器 10 生成的波形相位角 $\phi(n)$ 组合以形成已调整的相位角 $\theta_l(n)$ ， $l=1$ 至 L ，其中下标 l 代表此信号所用于的天线振子（26A 至 26L）， L 是天线阵列内各个振子的总数。

图 2 是根据本发明的教导设计的数字波束控制单元 12 的流程图。数字波束控制单元 12 的输入是一系列波形相位角 $\theta(n)$ 。输出是已调整相位角 $\theta_l(n)$ ，其中 $l=1$ 至 L 。

首先，在步骤 T1，使用下面的等式计算时延 t_l ：

$$t_l = \frac{\bar{x}_l \cdot \hat{u}_T}{c} \quad (1)$$

其中 $\hat{u}_T$ 是沿着发射波束的单位矢量， $\bar{x}_l$ 是天线振子 l 相对于天线阵列中心的位置，和 c 是光速。

在步骤 T2，使用下面的等式计算量化的抽样偏移 i_l ：

$$i_l = \text{round}(t_l / t_q) \quad (2)$$

其中 t_q 是波形相位角生成器 10 的时间量化。

在步骤 T3，使用下面的等式计算残余时间 t_{rl} ：

$$t_{rl} = t_l - i_l t_q \quad (3)$$

在步骤 T4, 为振子 I 计算相位偏移 γ_i :

$$\gamma_i = 2\pi f_c t_{r,i} \quad (4)$$

其中 f_c 是所发射波束的中心频率。

最后, 在步骤 T5, 将时延 t_i 和相移 γ_i 应用于波形相位角 $\phi(n)$, 生成输出信号 $\theta_i(n)$:

$$\theta_i(n) = \phi(n - t_i) + \gamma_i \quad (5)$$

为所有的天线振子 $I = 1$ 至 L 重复这些步骤。

在优选实施例中, 用软件实现数字波束控制单元 12。可以使用单个计算机为所有的天线振子执行数字波束控制, 或者可以分别为每个振子执行, 为每个振子使用一个分立的处理器。

图 2 图示数字波束控制单元 12 的实现, 通过它来计算时延和相位调整。可选择地, 可以预先计算时延和相位调整并存储在查找表内, 或者可以为某些离散的位置予以计算并存储, 并通过内插推导出中间位置的数值。因而, 可以通过计算、查找表或者表格与内插的组合来实现数字波束控制单元 12。

在执行数字波束控制之后, 随后通过将余弦函数应用于已调整相位角 $\theta_i(n)$ ($I = 1$ 至 L) 序列中的每个已调整相位角, 为每个天线振子 (26A 至 26L) 生成数字信号 $y_i(n)$:

$$y_i(n) = \cos[\theta_i(n)] \quad (6)$$

在说明性的实施例中, 这使用余弦查找表 14 来实现。

然后, 将每个数字余弦 $y_i(n)$ 波装载到串行双存储缓冲器 (16A 至 16L) 内, 准备转换成模拟信号。因为波形通常在若干脉冲上是重复的, 而波束控制命令对于最低 1 毫秒来说通常是固定的, 所以可以在远低于 40GHz 的速率上更新串行存储器。

为了每个脉冲, 串行存储缓冲器 (16A 至 16L) 被在抽样速率 (在该例子中是 40GHz) 上读出到 D/A 转换器 (18A 至 18L)。射频滤波器 (20A 至 20L) 在每个 D/A (18A 至 18L) 之后以拒绝 D/A 生成的带外频率。然后, 由功率放大器 (22A 至 22L) 执行功率放大, 并通过宽带环行器将信号发送给天线振子 (26A 至 26L)。功率放大器和

环行器公用于 ESA 系统。

使用本发明的数字系统，每个振子仅需要 D/A 转换器、射频滤波器和功率放大器。数字波形生成器可以使用单个计算机来实现。如本领域的普通技术人员公知的，还需要高速时钟信号来驱动每个振子上的所有数字装置。不再需要模拟系统的复杂天线多支管。

图 3 是根据本发明的教导设计的宽带多波束数字雷达的接收电路 200 的方框图。所发射的信号由天线振子（26A 至 26L）和相应环行器（24A 至 24L）接收。所接收的信号由每个天线振子的线性放大器（30A 至 30L）放大，继之以射频滤波器（32A 至 32L），它提供带外信号的拒绝，模数（A/D）转换器（34A 至 34L），它将所接收的模拟信号转换成数字信号。在数字化之后，可以使用单个计算机或多个处理器执行随后的步骤。

来自每个天线振子（26A 至 26L）的数字数据被馈送给相应的频率信道化器（36A 至 36L），它将每个信号划分成 N 个不同的频带。例如，假设所接收的信号在 8GHz 至 12GHz 的范围内，每个频带可以具有 100GHz 的带宽，以便第一频率信道的范围在 8.0 至 8.1GHz，第二信道在 8.1 至 8.2GHz 范围内，依此类推。这可以使用快速傅立叶变换（FFT）来实现。本领域的普通技术人员将理解可以在这一步骤上选择执行其它操作，例如幅度加权以降低旁瓣、零添加、等等。

在频率信道化之后，数字波束形成单元（38A 至 38N）从每个天线振子提取类似的频率信道，并组合它们以形成多个数字同时波束。为每个频率信道分别地执行数字波束形成。因此，存在 N 个数字波束形成单元（38A 至 38N），其中 N 是频率信道的总数。每个数字波束形成单元（38A 至 38N）具有 L 个输入和 M 个输出，其中 L 是天线振子的总数， M 是所希望的每个信道的数字波束的数量。将来自每个天线振子的类似频率信道输入给数字波束形成单元（38A 至 38N）。例如，对应于第一频率信道的数字波束形成单元 38A 输入来自频率信道化器 36A 的第一信道输出（来自第一天线振子 26A）、来自频率信道化器 36B 的第一信道输出（来自第二天线振子 26B），依此类推，

直到来自频率信道化器 36A 的第一信道输出（来自最后一个天线振子 26L）。然后，每个数字波束形成单元（38A 至 38L）输出 M 个同时数字波束，构成总共 M×N 个波束。

图 4 是根据本发明的教导设计的数字波束形成单元 38 的流程图。第 i 数字波束形成单元 38 的输入是来自与频率信道 i 对应的 L 个频率信道化器（36A 至 36L）的输出 $z_{i,l}(n)$ ， $l=1$ 至 L。

首先，在步骤 R1，计算信道 i 的中心频率 f_{ci} ：

$$f_{ci} = \frac{f_{\text{samp}} i}{NFFT} + f_0 \quad (7)$$

其中 f_{samp} 是 A/D 转换器的抽样速率，NFFT 是 FFT 的大小，和 f_0 是本振频率。

在步骤 R2，计算信道 i 对于每个接收波束 $k=1$ 至 M 和天线振子 $l=1$ 至 L 的相移 $\phi_{i,k,l}$ ：

$$\phi_{i,k,l} = \frac{f_{ci}}{c} \bar{x}_l \cdot \hat{u}_k \quad (8)$$

其中 $\bar{x}_l$ 是天线振子 l 相对于天线阵列中心的位置， $\hat{u}_k$ 是沿着第 k 个接收波束的单位矢量，和 c 是光速。

在步骤 R3，通过在所有振子上应用相移和相加信号来计算信道 i 的接收波束 $v_{i,k}(n)$ ， $k=1$ 至 M：

$$v_{i,k}(n) = \sum_l e^{j\phi_{i,k,l}} z_{i,l}(n) \quad (9)$$

其中 $z_{i,l}(n)$ 是来自对应于频率信道 i 的第 l 个频率信道化器的输出。

为所有的信道 $i=1$ 至 N 重复这些步骤。

可选择地，当执行精确的频率信道化和需要在所关注的区域上的全部波束覆盖时，可以执行在所有振子上的 FFT。

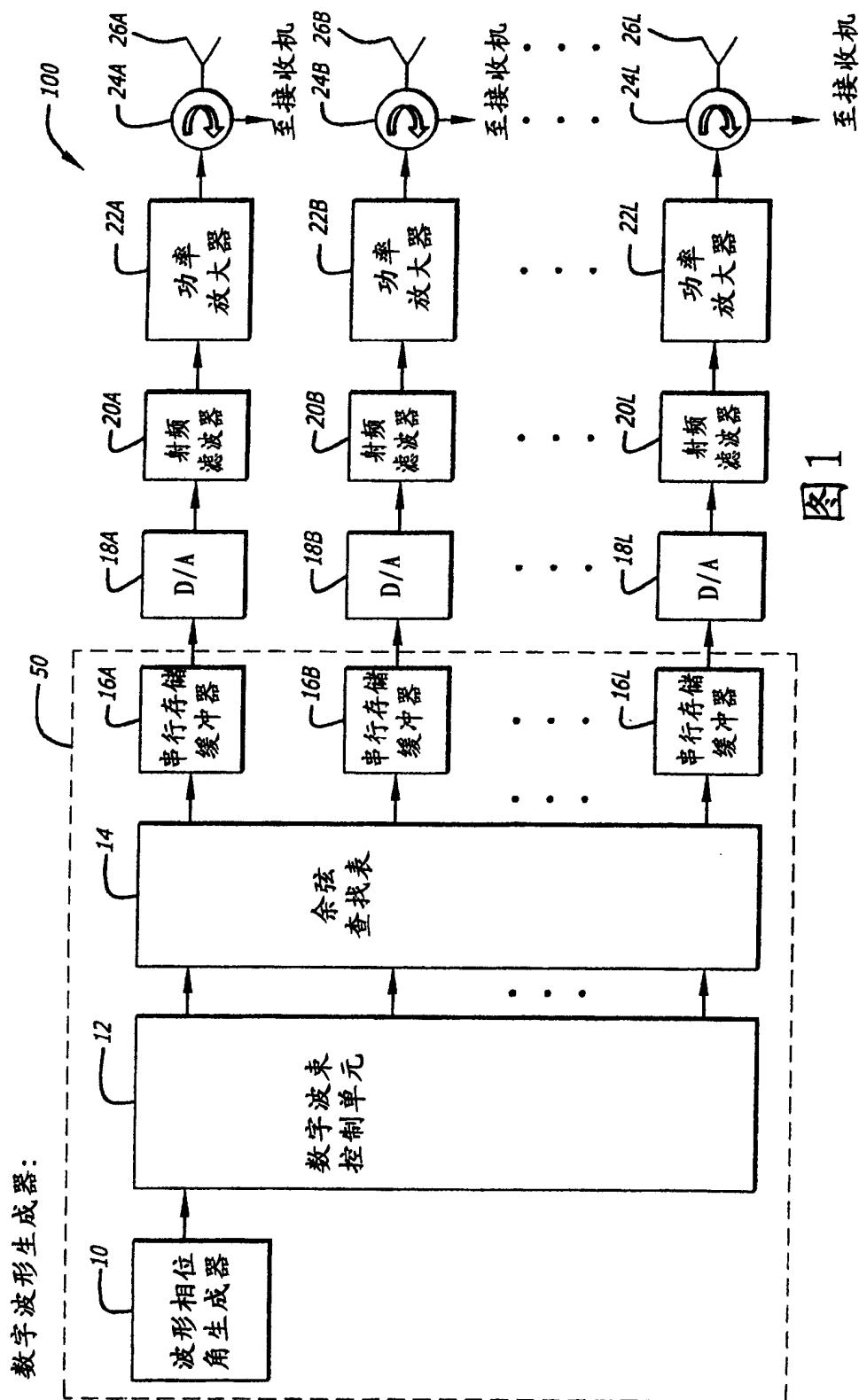
然后，可以由雷达、通信或 EW 处理单元（40A-1 至 40N-M）照常处理所形成的每个波束。这些系统主要用于雷达，但是也可以用于通信或 EW（电磁波）应用设备。

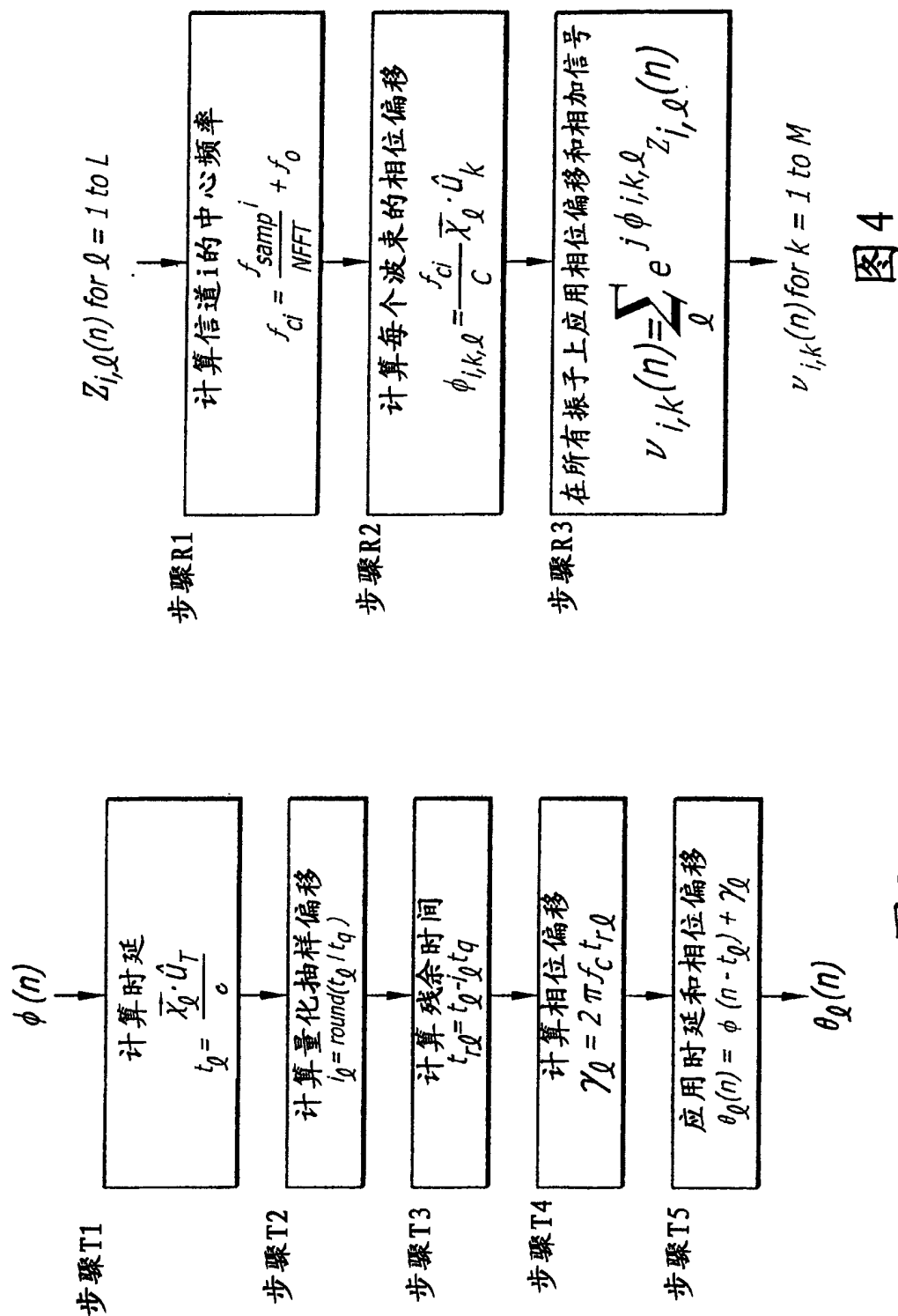
注意到在此所述的数字雷达的实现放宽了对 D/A 和 A/D 的动态范围的要求。例如，为了使用 1000 个振子和 20% 的占空因数波形实现 -140dB/Hz 的频谱纯度，4 比特的 D/A 就足够了。在类似大小的阵列接收时，6 比特的 A/D 足以实现接近有源 ESA 系统内线性放大器的

动态范围。

因而，在此已经参考具体应用的特定实施例描述了本发明。具有本领域的普通技术和获得本教导的人员将认识在其范围内的其它修改、应用和实施例。

因此，权利要求书将覆盖在本发明范围内的任何和全部的这些应用、修改和实施例。





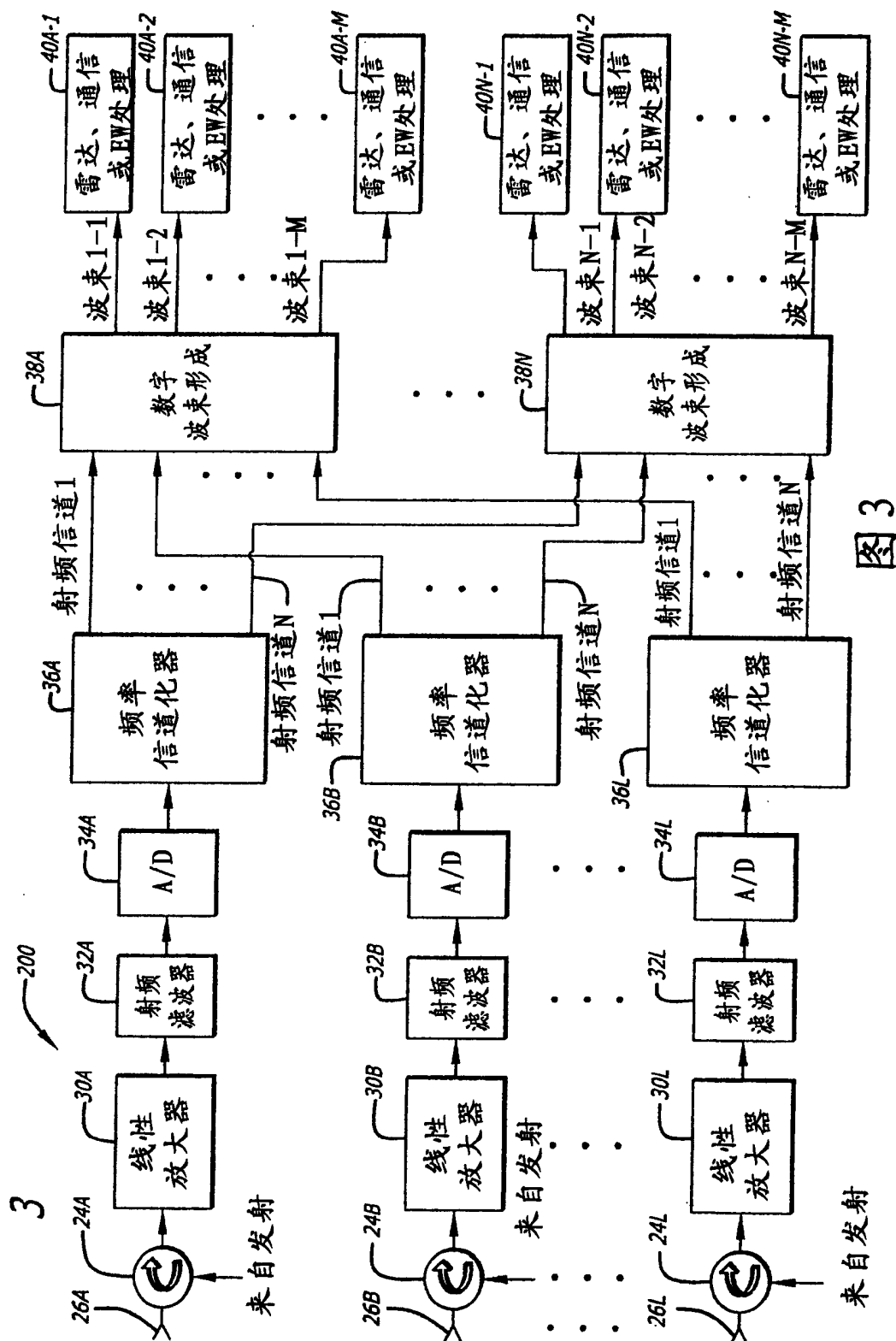


图3