



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101803113 B

(45) 授权公告日 2013. 09. 18

(21) 申请号 200880106538. 3

(22) 申请日 2008. 07. 18

(30) 优先权数据

0714179. 9 2007. 07. 20 GB

07252896. 1 2007. 07. 20 EP

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 03. 11

(86) PCT申请的申请数据

PCT/GB2008/050593 2008. 07. 18

(87) PCT申请的公布数据

W02009/013527 EN 2009. 01. 29

(73) 专利权人 阿斯特里姆有限公司

地址 英国赫特福德郡

(72) 发明人 安东尼·邓肯·克雷格

西蒙·约翰·斯特兰

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

代理人 戎志敏

(51) Int. Cl.

H01Q 1/28 (2006. 01)

H01Q 3/26 (2006. 01)

H01Q 21/00 (2006. 01)

H01Q 21/06 (2006. 01)

H01Q 25/00 (2006. 01)

H01Q 21/22 (2006. 01)

审查员 韩雪莲

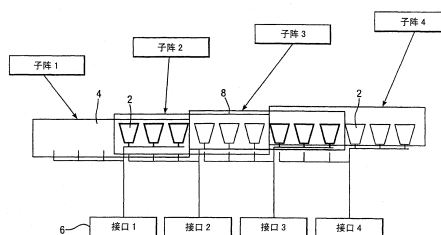
权利要求书3页 说明书9页 附图13页

(54) 发明名称

用于使通讯卫星的相控阵天线内的可重新配置波束形成网络处理简化的系统

(57) 摘要

一种具有相控阵天线的通讯卫星,其中,通过将相控阵分成两级来简化所述相控阵内的波束形成功能,其中,子阵级涉及固定的或频率不变的重叠子阵集合,主级在预定的覆盖区内典型地以多个可重新配置的点波束的形式来提供主方向图重新配置。关键优点在于,与传统的相控阵(其中针对阵列的每个单元应用幅度和相位控制)相比,显著减小了第二级波束形成控制点的数目(在此应用独立的幅度和相位)。子阵级波束形成可以以模拟技术来实现。主波束形成可以以数字技术来实现,其中 A/D 或 D/A 转换、频率(解)复用和数字波束行程的关键处理功能均随着控制点的数目而变化。



1. 一种针对通讯空间飞行器的天线进行波束形成的方法,所述天线包括相控阵天线,所述天线在预定义的地理区域内提供多个通信波束,所述方法包括:

以多个天线单元的形式提供相控阵天线,每个天线单元具有天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系;以及将所述天线单元分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集,以及至少一些或全部天线单元参与多于一个子阵,

向每个子阵的单元分配相应的子阵波束形成权重,以及向每个子阵针对所述多个通信波束分配相应的主波束形成权重,使得天线的合成辐射方向图在所述区域内提供所述多个通信波束,

其中,通过最优化过程来确定最小天线方向性值,所述最优化过程包括通过迭代来改变所述子阵波束形成权重以及在每次所述迭代处确定波束方向性。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述天线被定尺寸为在全球范围上提供覆盖,所述区域包括所述全球范围的有限部分。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述区域包括两个或更多个地理上分离的范围。

4. 根据权利要求2或3所述的方法,其中,所述空间飞行器是地球同步卫星。

5. 根据权利要求1-3中的任一项所述的方法,其中,所述多个通信波束是点波束,每个通信波束具有至少预定的最小天线方向性值。

6. 根据权利要求1所述的方法,其中,根据波束边缘方向性与旁瓣电平相组合,将所述主波束形成权重进一步最优化。

7. 根据权利要求1-3和6中任一项所述的方法,其中,向每个子阵分配权重集合,所述权重集合与分派给其他子阵的集合相同。

8. 根据权利要求1-3和6中任一项所述的方法,其中,所述子阵波束形成权重是模拟形式的,所述主波束形成权重是数字形式的。

9. 一种相控阵天线,所述天线在预定义的地理区域上提供覆盖并在所述区域内提供多个波束,并且所述天线包括:

多个天线单元,每个天线单元具有天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系,所述天线单元被分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集以及至少一些天线单元参与多于一个子阵,

子阵波束形成网络,向每个子阵的单元分配相应的子阵波束形成权重,以及

主波束形成网络,向每个子阵针对所述多个波束中每一个波束分配主波束形成权重,以便在所述区域内产生所述多个波束,

其中,分配给每个子阵的子阵波束形成权重已经被最优化,以便通过最优化过程来达到针对所述多个波束的方向性的所需级别,其中通过迭代来改变所述子阵波束形成权重的值,并且在每次迭代处确定分配给所述子阵的主波束形成权重值。

10. 根据权利要求9所述的相控阵天线,其中,所述多个波束中的至少一些具有需要的方向性值,所述需要的方向性值是至少预定最小值。

11. 根据权利要求9或10所述的相控阵天线,其中,每个所述子阵具有与分配给其他子阵的子阵波束形成权重集合实质上相似的子阵波束形成权重集合。

12. 根据权利要求9或10所述的相控阵天线,其中,所述子阵具有实质上相似的几何配

置。

13. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述多个波束是通信波束,所述相控阵天线是针对通讯空间飞行器的。

14. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述天线被定尺寸为在全球范围上提供覆盖,所述区域包括所述全球范围的有限部分或多于一个部分。

15. 根据权利要求 13 所述的相控阵天线,其中,所述通讯空间飞行器是地球同步卫星。

16. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述相控阵天线是以两个维度形成的,每个子阵在这两个维度上延伸。

17. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,分配给每个子阵的子阵波束形成权重具有已经被最优化的值,以通过最优化过程来达到针对所述多个波束的所述方向性的所需级别,其中通过迭代来改变所述子阵波束形成权重的值,并且在每次迭代处确定分配给所述子阵的主波束形成权重值。

18. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述子阵波束形成网络向每个子阵分派权重集合,所述权重集合与分派给其他子阵的集合相同。

19. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述子阵波束形成网络包括耦合至每个天线单元的相应模拟相移装置和相应模拟增益移位装置。

20. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述相控阵天线具有接收功能,所述子阵波束形成网络针对每个子阵包括:针对所述子阵的单元信号的信号组合装置,用于向子阵输出端口提供组合后的输出信号。

21. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述相控阵天线具有接收功能,并且包括:下变频装置,用于对子阵输出信号进行下变频或用于对独立单元信号进行下变频。

22. 根据权利要求 20 所述的相控阵天线,包括:模数转换装置,用于将每个子阵的输出信号数字化;频率解复用装置,用于将每个子阵输出信号解复用成多个信道信号;以及针对所述多个信道中每个信道的耦合的相应数字波束形成网络,用于接收来自每个子阵输出的相应信道信号,以及布置用于向每个所述信道信号应用复权重并对加权后的信道信号进行求和,以提供信道输出信号。

23. 根据权利要求 22 所述的相控阵天线,包括:针对所述多个信道之一的多个数字波束形成网络,用于针对所述信道提供多个信道输出以进行频率重用。

24. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,包括:模数转换装置,用于将每个子阵的输出信号数字化;以及包括耦合的 FFT 装置,用于接收数字化的信号以及并入所述主波束形成网络,并且布置用于提供表示点波束阵列的输出。

25. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述子阵波束形成网络是数字形式的。

26. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述主波束形成网络和所述子阵波束形成网络都是模拟形式的。

27. 根据权利要求 9 或 10 所述的相控阵天线,其中,所述相控阵天线具有发射功能,并且,针对每个子阵,所述子阵波束形成网络包括:信号分布装置,耦合至子阵的输入端口,用于提供子阵的单元信号。

28. 根据权利要求 27 所述的相控阵天线,包括:针对多个通信信道中每个通信信道的

相应数字波束形成网络,布置用于向每个所述信道信号应用复权重;针对每个信道信号的数模装置,用于将所述信道信号转换成模拟形式;以及复用装置,用于对所述信道信号进行组合,并且耦合至每个所述输入端口。

29. 一种确定相控阵天线的波束形成参数的最优化方法,所述天线在预定的地理区域上提供覆盖,以及在所述区域内提供多个波束,所述天线具有多个天线单元,每个天线单元提供天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系,所述天线单元被分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集以及至少一些天线单元参与多于一个子阵,所述最优化方法包括:

第一步骤,将分配给每个子阵的子阵波束形成权重设置为初始值,以及

第二步骤,确定分配给所述子阵的主波束形成权重值,以在所述多个波束中的至少一些的位置处提供方向性值;以及

迭代执行所述第一步骤和所述第二步骤,包括改变所述子阵波束形成权重的值,直到达到所述多个波束的所述方向性的所需级别为止。

30. 根据权利要求 29 所述的最优化方法,其中,在所述第二步骤中,确定所述主波束形成权重值,以提供所述位置处方向性的峰值。

31. 根据权利要求 29 或 30 所述的最优化方法,包括:基于点波束方向性需求来确定整个天线尺寸。

32. 根据权利要求 29 或 30 所述的最优化方法,包括:基于栅瓣排除地区的尺寸来确定单个单元尺寸和/或间距。

33. 根据权利要求 29 或 30 所述的最优化方法,包括:根据所述区域的最大尺寸来确定所述子阵的端口的间距。

34. 根据权利要求 29 或 30 所述的最优化方法,包括:通过如权利要求 29 所述的最优化方法的迭代来确定子阵的尺寸和重叠的程度。

35. 根据权利要求 29 或 30 所述的最优化方法,其中,将每个子阵内的初始权重设置为全部相等,或设置为使所述区域中的最小子阵方向性最大化。

36. 根据权利要求 29 或 30 所述的最优化方法,包括进一步的最优化,其中,根据波束边缘方向性与旁瓣电平相结合,将主波束形成权重最优化。

用于使通讯卫星的相控阵天线内的可重新配置波束形成网络处理简化的系统

技术领域

[0001] 本发明总体涉及通讯空间飞行器的相控阵天线的波束形成,具体涉及通信卫星的相控阵天线内的可重新配置波束形成网络处理的简化。

背景技术

[0002] 卫星通信的明显趋势倾向于使用多个点波束覆盖,以便提供高增益(以降低功率并以小终端来操作)并支持空间频率重用(以提高带宽受限的系统内的吞吐量)。明确地已知通过数字波束形成技术利用多元天线系统来定义这种窄点波束,该数字波束形成技术包括向针对每个通信频率信道的单元分派复信号权重以控制点波束参数:参见 A. M. Bishop 等的“The INMARSAT 4 Digital Processor and Next Generation Developments”, 23rd AIAA ICSSC, Rome, Italy, September 2005。问题在于,尽管在启用数字处理器技术方面不断改进,然而与在更宽的带宽上提供更多的更窄点波束的需求相关联的波束形成和相关处理方面的要求也不断提高。

[0003] 可以提供这种覆盖的重要的天线类别是直接辐射阵列(DRA)形式或成像辐射阵列(IRA)形式的相控阵天线。关于 DRA,天线可以包括由典型地但不必须相同的天线单元组成的二维阵列,每个天线单元具有相应的单元信号(工作在发射或接收模式下)。在 IRA 中,利用天线“光学器件”(例如,抛物面反射器)来扩大主 DRA 的孔径直径。出于本说明的目的,术语“相控阵天线”包括 DRA、IRA 和其他阵列,其具有多个天线单元,每个天线单元提供天线单元信号,这些天线单元信号与其他天线单元信号具有相位关系和幅度关系。由于对波束形成网络内的单元尺寸和相位权重的控制,相控阵天线提供了在灵活性和可重新配置性方面的高性能。然而还公知的是,相控阵是复杂的、巨大的并且昂贵的。与备选的天线类型(例如,阵馈反射器天线(AFR))相比,相控阵天线典型地需要更多的辐射单元,并从而需要更高的波束形成复杂度和成本。

[0004] 波束形成网络为每个天线单元(并且潜在地基于独立的频率信道)提供幅度和相位控制(等同于数字域的复权重),使得波束形成复杂度随着单元的数目而缩放。甚至下一代板上数字处理器也不能支持为以下相控阵提供完全灵活的波束形成所需的复杂性:所述相控阵设计用于产生(例如)在带宽 500MHz 频率 20GHz 下覆盖欧洲的、直径为 0.5 的 100 个波束,这是当前商业需要。

[0005] 已知以多种方式来简化相控阵天线结构。具体地,已知将相控阵天线分成子阵,这可以提供在结构和信号处理上的简化。在 Jeffrey S. Herd 等的“Design considerations and Results for an Overlapped Sub-array Radar Antenna”, 2005 IEEE Aerospace Conference, pp. 1087-1092 中描述了重叠子阵。

发明内容

[0006] 第一方面,本发明提供了一种针对通讯空间飞行器的天线进行波束形成的方法,

所述天线包括相控阵天线,所述天线在预定的地理区域内提供多个通信波束,所述方法包括:

[0007] 以多个天线单元的形式提供相控阵天线,每个天线单元具有天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系;以及将所述天线单元分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集以及参与多于一个子阵的至少一些或全部天线单元,

[0008] 向每个子阵的单元分配相应的子阵波束形成权重,以及向每个子阵针对所述多个波束分配相应的主波束形成权重,使得天线的复合辐射方向图在所述区域内提供所述多个波束。

[0009] 第二方面,本发明提供了一种通讯空间飞行器的相控阵天线,用于在预定的地理区域上提供覆盖,所述天线在所述区域内提供多个通信波束,并且所述天线包括:

[0010] 多个天线单元,每个天线单元具有天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系,所述天线单元被分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集以及参与多于一个子阵的天线单元的至少一些,

[0011] 子阵波束形成网络,向每个子阵的单元分配相应的子阵波束形成权重,以及

[0012] 主波束形成网络,向每个子阵针对所述多个通信波束中每一个通信波束分配主波束形成权重,以便在所述区域内产生所述多个通信波束。

[0013] 出于本说明的目的,术语“子集”指的是由一些但不是全部天线单元组成的组。

[0014] 在一般情况下,除了在天线边缘处的一些天线单元以外,所有天线单元都将参与多于一个子阵。

[0015] 术语“方向性”是本领域技术人员公知的,然而为了避免混淆,这里将其理解为天线产生的辐射方向图的特性。在发射情况下,可以将“方向性”看作是给定方向上的天线功率通量密度与在天线图方向将是各向同性的情况下可以产生的功率通量密度之比。通常以 dBi 来表示(分贝各向同性)。

[0016] 根据本发明产生的通信波束可以是点波束,具有非常窄的带宽;在以下示例中,实现了 0.5° 的直径。

[0017] 所述预定的地理区域可以不包括单一的连接的区域。其可以从连接的范围(即,欧洲)到若干非连接的范围(即,欧洲的子集加上加那利群岛)而可重新配置的,或甚至在多个非连接的范围上是固定的。通过在具有多个输出的子阵级提供波束形成器,天线可以提供由两个或更多个独立可重新配置的区域覆盖。

[0018] 本发明的相控阵天线还可以用作接收天线、发射天线、或用于接收和发射功能两者。每个所述子阵具有端口(备选地,这里是“控制点”,用于确定波束形成权重),所述端口在天线处于接收模式的情况下起到输出端口作用,以及在天线处于发射模式的情况下起到输入端口的作用。在接收模式的情况下,每个子阵包括求和功能,用于将子阵的加权后的单元信号组合成单个输出,在输出功能的情况下,每个子阵包括划分功能,用于将单个输入分派给每个单元权重。

[0019] 本发明的另一方面涉及一种相控阵天线,所述相控阵天线由多个重叠子阵构成,在预定的地理区域内具有最优化的波束形成,以及涉及一种对这样的相控阵天线的波束形成特性进行最优化的过程。

[0020] 相应地,在第三方面,本发明提供了一种确定相控阵天线的波束形成参数的最优化过程,所述天线在预定的地理区域上提供覆盖,以及在所述区域内提供多个波束,所述天线具有多个天线单元,每个天线单元提供天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系,所述天线单元被分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集以及天线单元中的至少一些参与多于一个子阵,

[0021] 所述最优化过程包括:

[0022] 第一步骤,将分配给每个所述子阵的子阵波束形成权重设置为初始值,以及

[0023] 第二步骤,确定分配给所述子阵的主波束形成权重值,以在所述波束中的至少一些的位置处提供方向性值;以及

[0024] 迭代所述第一步骤和所述第二步骤,包括改变所述子阵波束形成权重的值,直到达到所述波束的所述方向性的所需级别为止。

[0025] 在第四方面,本发明提供了一种相控阵天线,所述天线在预定的地理区域上提供覆盖,以及在所述区域内提供多个波束,所述天线具有:多个天线单元,每个天线单元提供天线单元信号,所述天线单元信号与其他单元信号具有相位关系和幅度关系,所述天线单元被分成多个重叠子阵,每个子阵包括相控阵的所有天线单元的子集以及天线单元中的至少一些参与多于一个子阵,

[0026] 其中,分配给每个子阵的子阵波束形成权重已经被最优化,以便通过最优化过程来达到针对所述多个波束的所述方向性的所需级别,其中通过迭代来改变所述子阵波束形成权重的值,并且在每次迭代处确定分配给所述子阵的主波束形成权重值。

[0027] 根据本发明的最优化的特征是,所述最优化包括:在子阵波束形成权重的值的每次迭代处,利用主波束形成权重值来确定方向性值。

[0028] 优选地,所述波束的全部或至少一些具有所述所需的方向性值,所述所需的方向性值是至少预定最小值,如以下将说明的。

[0029] 其他所述子阵实质上需要彼此相同,具体地,具有实质上相似的权重设置,具有分配给相应天线单元的幅度和相位,具体地,具有相似的几何配置。然而,情况并不需要如此:子阵不需要包括相同的单元集合,子阵不需要具有实现在这些单元上的相同幅度和相位集合。实际上,如果将子阵实现为经由 MEMS 或类似组件而可重新配置的,则子阵可以彼此不同,但是以增多的最优化步骤为代价。此外,基础阵列本身不需要包括位于规则栅格上的单元,也不需要包括位于规则多边形外形上的单元、也不需要相同的单元。

[0030] 因此,本发明提供了一种方案,采用这种方案,可以通过将相控阵分成两级来简化该相控阵内的波束形成功能,其中,子阵级(与物理阵列相邻)涉及固定的或频率不变的重叠子阵集合,主级在预定的覆盖区内典型地以多个可重新配置的点波束的形式提供了主要方向图重新配置。关键优点在于,与传统的相控阵(其中针对阵列的每个单元应用幅度和相位控制)相比,显著减小了主波束形成级控制点的数目(在此应用独立的幅度和相位信号)。在数字地执行主波束形成和相关处理的情况下,主波束形成控制点数目减小将处理简化到了使得容易在当前数字技术的限制内容容易实现的程度。

[0031] 子阵波束形成可以以模拟或数字技术来实现,但是优选地,可以使用模拟技术。类似地,主波束形成器级可以以模拟或数字技术来实现,但主要优点与数字系统相关,在所述数字系统中 A/D 或 D/A 转换、频率(解)复用和数字波束形成的处理功能均随着控制点的

数目而变化。尽管本发明本身适于混合模拟 / 数字波束形成实现,然而这并不是必要特征。本发明的全模拟或全数字版本都是可行的。

附图说明

[0032] 现在将参考附图来描述本发明的优选实施例,其中:

[0033] 图 1 示出了被分成重叠子阵的相控阵天线的示意图;

[0034] 图 2 示出了根据本发明优选实施例的波束形成网络的示意性框图,所述波束形成网络耦合至处于接收操作模式下并且被分成重叠子阵的相控阵天线;

[0035] 图 3 示出了根据本发明第一优选实施例的波束形成网络的示意性框图,所述波束形成网络耦合至处于发送操作模式并且被分成重叠子阵的相控阵天线;

[0036] 图 4 示出了根据本发明第二优选实施例的波束形成网络的示意性框图,所述波束形成网络耦合至被分成重叠子阵的相控阵天线;

[0037] 图 5 示出了根据本发明第三优选实施例的波束形成网络的示意性框图,所述波束形成网络耦合至被分为重叠子阵的相控阵天线;

[0038] 图 6 示出了本发明的波束形成权重的最优化过程中的主要步骤的流程图;

[0039] 图 7 是相控阵天线的示例的面的图示,示出了天线单元被分成重叠子阵;

[0040] 图 8 示出了预定义的地球地理区域欧洲,其中 100 个点波束覆盖该区域;

[0041] 图 9 示出了在方向性方面欧洲区域的覆盖的图,所述覆盖是由本发明的单个子阵的示例产生的;

[0042] 图 10 示出了在方向性方面欧洲区域的覆盖的图,所述覆盖是由本发明示例的相控阵天线的子阵的叠加产生的;

[0043] 图 11 和 12 示出了在方向性方面本发明示例所产生的点波束的图;以及

[0044] 图 13 是图 12 的重新最优化的点波束的图。

具体实施方式

[0045] 直接辐射相控阵具有单元间距,所述单元间距被选择为使得它们不在某一限定的视场内产生栅瓣。对于工作在同步轨道中的卫星,通常有必要(为了减轻干扰)使栅瓣远离地球。这与通常对于天线能在可见地球上的任何位置扫描波束的需求一起意味着单元间距不应超过 2-3 个波长。另一方面,与阵列设计用于产生的波束的角度大小成反比来确定该阵列的总尺寸。为了提供 0.5 度的点波束,在所选频率 20GHz 下可以需要大约 2.4m 直径的总孔径。在大约 3.3cm(在 20GHz 下 2.2 个波长)的单元间距下,需要超过 4000 个单元。

[0046] 由于上述原因,提供被具体设计并定尺寸为刚好仅覆盖欧洲区域的相控阵天线是不实际的。另一方面,可以使用 150 个馈送的量级针对类似的性能来设计 ARF 反射器天线(不存在栅瓣的问题),该 ARF 反射器天线被设计为刚好覆盖包含 100 个波束在内的欧洲区域。很明显,对于这两个天线架构需要在波束形成布置的复杂度方面的很大差异。这防止了广泛采用相控阵技术,尽管相控阵天线被看作是非常灵活且可重新配置的。

[0047] 降低相控阵复杂度的一种方式是通过将单元形成到非重叠的群(“子阵”)(典型地,相同的子阵)中,其中每个子阵中的单元具有一些固定的幅度和相位权重(通常是均匀的幅度、相等的相位),来减少相控阵中确定波束形成权重所需的有源控制点(天线端

口)的数目,使得有源控制点的数目由等于每个子阵中单元的平均数的因子所减少。这种方法的缺点是降低了天线的扫描性能,使得指向感兴趣的覆盖区边缘的波束性能降低。此外,天线的栅瓣角间距现在与子阵之间的间距相对应,而不与单个单元之间的间距相对应,使得失去了避免栅瓣落到地球上的可能性。

[0048] 本发明避免了上述两种缺点,而不增加控制点的数目。这是通过增大子阵的尺寸而不是增大间距的尺寸来实现的。因此,子阵“重叠”,并且每个单元参与多个子阵。然而,减少了控制点(端口)的数目。参考图 1,示出了重叠子阵的示例,该重叠子阵的示例包括由天线单元 2 组成的线性阵列。形成了 4 个子阵,每个子阵包括 6 个单元,每个子阵具有控制点/相应接口端口 6。来自每个子阵的三个单元 8 还形成了相邻子阵(在每一侧)的一部分,使得在天线主体、中央部分中,(例如,在该线性阵列中的)每个单元都参与两个子阵。

[0049] 这种方法的优点是,首先,更大的子阵(不受这些子阵的物理间距的限制)针对独立子阵的方向图的最优化提供了更大的范围。这可以包括,绘制所述方向图的轮廓,使得该方向图在覆盖区外部的区域中提供低方向性,从而主动抑制栅瓣。还可以包括针对覆盖区内的增强的扫描性能进行最优化,对于此点来说,波束扫描损耗可以忽略地仅比 un-decimated 阵列的扫描性能略微差。(指定区域内的)性能本质上等于全阵列的性能,然而主要波束形成的复杂度降低了较大因子(在下述示例中是大约 20)。通过极大地简化主波束形成器来执行波束级波束形成。在子阵级(例如由模拟装置)实现的波束形成可以是固定的,或可以允许偶尔的重新配置(例如,经由微电子机械系统(MEMS)或单片微波集成电路(MMIC)组件),以重新配置从地球上一个区域到另一区域(例如,从欧洲到美国)的总覆盖区。

[0050] 其次,本发明的关键特征是,针对所需的覆盖来定制子阵自身的复权重。例如,可以具体地针对欧洲覆盖的详细形状来最优化子阵权重,结果,针对欧洲高度最优化了总天线的扫描性能,使得如栅瓣抑制所需的,在欧洲内存在非常小的扫描损耗以及在欧洲外部存在快速的性能下降。

[0051] 本发明还在数字与模拟技术之间的划分方面具有多种高级变体。第一变体假定针对子阵波束形成使用模拟技术,针对主波束形成使用数字技术。该架构与接收(图 2)和发射(图 3)情况两者有关。

[0052] 现在参考图 2,本发明的第一实施例阵列包括被配置在接收模式下的相控阵天线,以及包括直接辐射阵列(DRA),所述直接辐射阵列(DRA)具有由 NE 个天线单元 20 的 2 维阵列(在图 2 中仅示出了一维)形成的孔径。该阵列典型地是平面的但不必须是平面的。也可以等同地使用共形天线阵(即,在该阵列中,将单元置于通常针对另一用途而已经存在的某一非平面表面上)。该阵列包括在单元中央位置的规则几何形状(但并非实质上地),通常是在六边形栅格的正方形或矩形上;这里描述假定方形栅格。

[0053] 每个单元向相应的低噪放大器(LNA)22 提供接收单元信号,并进行相关的滤波以在发生传输时阻止放大器的饱和。

[0054] 单元向 NS 个子阵波束形成网络 24(BFN)的集合提供输入,所述 NS 个子阵波束形成网络 24(BFN)是以模拟技术来实现的(典型地,针对 RF(GHz),但备选地针对在早期阶段发生下变频的低 IF,在这种情况下,网络 24 的组件可以是低技术要求的。在该特定示例

中,如所示的,每个子阵 24 包括 4 个相邻的几何上类似的单元,每个子阵与相邻子阵重叠两个单元。每个单元从而在所示的直线方向上参与两个子阵,使得子阵之间的间距是单元间距的 2 倍。在第二方向上存在类似的子阵布置,使得在该阵列的区域上,子阵的数目 N_S 比单元的数目 N_E 少因子 4。然而,子阵可以根据需要是任何尺寸的,每个子阵的单元可以不彼此相邻,但是可以分布在天线面上。

[0055] 每个子阵波束形成网络 25 包括耦合至单元输入的相应幅度加权设备和相位加权设备,之后是求和设备,所述求和设备对加权后的单元贡献进行求和,以在输出端口 26 处提供总子阵输出。典型地但不必须地,可以将相同的权重设置应用于每个子阵。子阵所形成的辐射方向图可以对可由总 DRA 系统形成的方向图提供包络,使得子阵方向图覆盖以下区域:需要在该区域内形成点波束的栅格,并且此外需要可以限制该区域以外的增益以便限制干扰。在一个变体中,子阵内的权重可以是随时间而恒定的。在第二变体中,这些权重可以是可控的,在这种情况下,变得可以在轨道中时实现覆盖包络的总重新配置。如以下更具体地描述的,通过最优化过程来确定复子阵权重的精确值。

[0056] 每个子阵输出或控制点 26 连接至下变频器 28,以将 RF 信号降低至 IF 频率。下变频需要公共本地振荡器频率源 30 维持在子阵信号之间的相位跟踪。频带滤波器 32 将子阵信号限制到感兴趣的整个频带,A/D 转换器 34 将每个子阵信号转换成数字采样序列。

[0057] 下变频典型地针对每个子阵将感兴趣的频带置于接近零频率处(考虑信号的带宽和 ADC 34 的采样速率)。A/D 转换器的采样速率是感兴趣的频带的带宽的至少两倍,并且可以包括子阵的实采样(每子阵单个 A/D)或复采样(正交操作的每子阵 A/D 对)。复采样需要在 A/D 转换之前将输入信号转换成 IQ 格式,并且这可以在下变频阶段 28 以现有方式进行,在所述下变频阶段 28 中以相位正交来提供本地振荡器信号。

[0058] 感兴趣的整个频带包含 K 个窄带信道,这 K 个窄带信道包含在如子阵方向图所限定的总覆盖区内形成的点波束系列内。在解复用器 36 中将每个数字化的子阵信号进行数字频率解复得到 K 个单独的信道。有利地,每个信道信号将典型地包括在与信道带宽一致的复采样速率的解复用器中的抽取,以简化后续处理。

[0059] 存在与 K 个信道中的每个信道相关联的数字波束形成网络(BFN)38,该数字波束形成网络(BFN)38 连接至每个解复用器 36 的输出,以便收集相应信道的所有分量。每个数字 BFN 将来自每个子阵的采样输入乘以复系数(等同于在模拟方面的幅度和相位控制),并对加权后的输出进行求和以形成总信道输出信号。针对给定信道对复权重的选择确定了针对该信道的波束特性。例如,为了在给定方向形成点波束,假定已经确定了子阵权重,利用本领域技术人员公知的技术来选择权重,使得在重叠的子阵的集合上存在均匀的相位梯度,从而使得子阵方向图在所需方向上相干地增加。因此,DBFN 权重的选择可以用于:响应于改变的信息量方向图或响应于在波束特性(大小和形状)上执行更一般的控制,来操纵可用点波束方向之间的容量。在另一变体中,可以由多个点波束来重用给定的频率信道,在这种情况下,针对给定的信道存在多个 DBFN,每个 DBFN 形成单独的波束,对于该单独的波束存在足够的间距以便限制相互干扰。

[0060] 本发明的关键特征是,与对 N_E 个主单元中的每个单元进行数字采样和处理的相控阵系统相比,重叠子阵的使用使得简化了总架构内的数字处理。具体地,下变频器、频带滤波器、A/D 转换器和频率解复用器的数目从 N_E 减小到 N_S (即,在本示例中减小了因子 4),

此外数字 BFN 的大小类似地从 N_e 减小到 N_s 。这种简化转化为实际实现中质量和功率的减小,在给定相关数字启用技术的状态的情况下,这可以导致用于空间飞行器的可行性与不可行性之间的差异。

[0061] 对于以下描述的欧洲点波束的特定示例,控制点的数目比单元的数目(4000)小大约因子 20。这意味着数字处理复杂度的显著降低,这可以使这样的系统可行。

[0062] 现在参考图 3,图 3 是图 2 的等效架构,然而对于发射模式,将 K 个通信窄带信道中的每个馈送至相应的数字波束形成网络 (DBFN) 40, 在所述数字波束形成网络 (DBFN) 40 应用加权以限定点波束。在由 N_s 个 K 路数字频率复用器 42 组成的系列中对加权后的信道进行复用。每个复用器的输出耦合至相应的 D/A 转换器 44,模拟输出馈送至频带滤波器 46 和上变频器 48,以将复用后的信号转换至 RF 频率。将 RF 信号应用到子阵 52 的输入端口 50。每个子阵具有波束形成网络 54,在波束形成网络 54 利用分路器将该信号分成独立的天线单元信号(在本情况中是 4 个),对每个信号进行相应的幅度和相位加权。在求和设备 56 中将加权后的单元信号与来自另一子阵 52 的相应单元信号相组合,并经由高功率放大器 (HPA) 58 馈送至辐射单元 20。

[0063] DBFN 40 和子阵波束形成网络 52 的功能与图 2 的接收情况下的相同,以下将不做详细描述。

[0064] 在其他数字处理架构存在其他变化。一个示例涉及一种高效方法,该方法进行数字波束形成,从而 FFT(快速傅里叶变换)用于形成点波束的规则栅格。数字化的子阵输出形成了至 FFT 的输入,而来自 FFT 的输出表示点波束的规则栅格。同样,重叠子阵方法提供了在 A/D 数目和 FFT 维度方面的简化。

[0065] 在第二主要实施例(实现方式变体)中,如图 4 所示,子阵波束形成和主波束形成都是使用数字技术来实现的。在图 4 中,以相同的参考数字来表示与图 2 中的部件相类似的部件。在图 4 中,每个单元 20 耦合至模块 60,模块 60 包括低噪放大器、下变频器、带通滤波器、ADC,即,模块 40 替换了图 2 的单元 22、28-34。因此, N_e 个单元 20 中的每一个具有模拟接收功能,所述模拟接收功能包括 LNA、整个频带滤波以及下变频。以与图 2 相同的方式,在 A/D 转换器中对每个数字单元信号进行数字采样。

[0066] 重叠子阵方案与图 2 的相同,其中 4 个单元在所示的直线方向上形成子阵。针对每个子阵提供数字波束形成网络 62;利用一系列复加权和数字求和在数字上实现波束形成。与图 2 的模拟权重的情况一样,权重可以是固定的或可变的,然而该方法使其本身非常适于可变权重实现方式。在 66 处对子阵输出进行频率解复用,并以数字波束形成网络 68 来将其波束形成为点波束阵列。

[0067] 与没有子阵的数字实现系统相比,该方法的优点较不显著。A/D 转换器和相关接收链的数目增大到 N_e ,但是仍然存在减少了(具有高处理负载的)频率解复用器的数目和主数字 BFN 的大小的优点。

[0068] 在第三主要实施例(实现方式变体)中,如图 5 所示,子阵波束形成和主波束形成都是使用模拟技术来实现的。在图 5 中,以相同的参考数字来表示与图 2 中的部件类似的部件。在图 5 中,如图 2 所示子阵 24 具有子阵模拟波束形成网络的集合。子阵 BFN 的输出 26 形成至模拟 BFN 布置 70 的输入,以下将不对其做详细描述,因为这对于本领域技术人员来说是显而易见的。与没有子阵的完全模拟实现方式相比,该方法的优点在于减小了模拟

BFN 70 的大小。

[0069] 参考图 6, 图 6 示出了用于确定子阵和主波束形成权重的特性的最优化过程的流程图:

[0070] 步骤 1(71): 基于点波束方向性需要 (对于该示例, $\sim 52.5\text{dBi}$ 峰值) 来确定总天线尺寸

[0071] 步骤 2(72): 基于栅瓣排除地区的大小或全球范围配置需要 (对于该示例, 可见地球) 来确定独立单元尺寸

[0072] 步骤 3(74): 根据要覆盖的地理区域 (在该实例中, 欧洲) 的最大尺寸来确定子阵的控制点 (端口) 间距

[0073] 步骤 4(76): 通过设置到初始预定值以及随后在必要时通过迭代来确定子阵的大小 (重叠的程度), 所述迭代包括以下步骤 5 至 7。

[0074] 步骤 5(78): 将子阵内的初始权重设置为全部相等, 或设置为使的覆盖区内的最小子阵方向性最大化。在该示例中, 所有子阵具有相同的权重, 但这不是必须的, 并且以不相同的子阵可以实现性能提高。

[0075] 步骤 6(80): 基于当前子阵内权重 (所述子阵内部的权重), 在所需的点波束 (在本示例中, 100 个点波束) 的位置处计算峰值方向性。如下所述, 在给定子阵内权重的情况下, 如下所述在子阵控制点上直接确定外部权重。在仅有非常小的性能损耗的情况下, 将子阵中心看作是分离的单元, 其中向子阵应用相等的幅度并根据子阵中心位置和所需的波束点方向来确定相位。为了应用完全缜密的确定, 将需要其他矩阵处理, 这对于本领域技术人员来说将是显而易见的。

[0076] 步骤 7(82): 基于某些合适的质量标准, 性能是否已汇聚到 (本地) 最大?

[0077] 如果是, 则记录结果并停止 (84)

[0078] 否则, 迭代子阵内权重 (86)。如果对于所有子阵内权重都是否, 则迭代大小 (步骤 4), 并且如果必要的话迭代子阵的间距 (步骤 3)。

[0079] 示例

[0080] 参考图 8, 图 8 示出了针对 100 个点波束的欧洲覆盖的所需布置, 从地理位置 7°E 指向 17°E 、 48.5°N 的瞄准点。

[0081] 对于天线的初始设计考虑:

[0082] 以 2.4m 的 DRA 孔径 (与 AFR 反射器的大小是可相比的)、 2.12 波长的单元间距开始。单元间距确定了在天线被扫描时天线的性能损耗的量。即, 在地球的中心和边缘之间每个独立单元的性能的下降导致了不可恢复的性能损耗。另一方面, 单元越小, 则所需的单元越多, 因此存在权衡, 该权衡通常对于同步卫星来说导致单元大小在 $2-3$ 波长范围内。

[0083] 覆盖范围是 6.75°E/W 、 3.12°N/S

[0084] 单元 2.12 波长, 尝试在方形单元晶格上由 3E/W 和 6N/S 形成重叠子阵。

[0085] 这生成了如图 7 所示包含 4349 个单元和 249 个控制点的阵列。亮的峰值示出了控制点, 细小的结构示出了独立单元。

[0086] 关于子阵的选择, 为了在重叠的程度与子阵的模拟 RF 复杂度之间折中, 将子阵选择为占用 2×2 个控制点矩形。除了在阵列边缘以外, 每个单元参与 4 个子阵。每个子阵包含 $12 \times 6 = 72$ 个单元。

[0087] 参考图 7, 示出了近似圆形轮廓的平面相控阵, 直径为 2.4m, 包括大约 4000 个单元。单元被分组成由 72 个单元组成的、重叠的子阵, 在一个方向上相隔六个单元, 在另一方向上相隔三个单元。子阵可以被实现为互扣瓦 (interlocking tile) 的形式, 每个单元参与四个子阵。

[0088] 子阵中每个单元具有权重, 所述权重被初始地最优化, 以通过以上参考图 6 描述的过程使 100 个波束中心位置处可用的最小点波束峰值方向性最大化。

[0089] 简单地截短部分组装的子阵; 所组装的单元上的权重与完整子阵上单元的权重相同。

[0090] 还可以执行最优化以抑制潜在栅瓣方向上的方向性。

[0091] 结果示出了, 当子阵包括 2×2 个控制点单元时, 在子阵单元上的幅度和相位最优化之后, 100 个方向中的任一方向上的最小方向性是 52.60dBi。

[0092] 2.12 波长单元 (根据该简单模型) 具有峰值方向性 16.7dBi, 在 4° 处 ~ 0.3 dBi 的下降 (roll off)。

[0093] 因此, 对于所有 4349 个单元的最佳可能最小值是 ~ 52.8 dBi

[0094] 当子阵包括 1×1 个单元时 (即, 它们不重叠), 最佳可实现看似是来自 249 个控制点的 50.4dBi。

[0095] 图 9 示出了点波束峰值对单个子阵方向的图。图 9 示出了子阵的波束位于欧洲区域的中心。其他子阵将提供类似幅度的波束。图 10 示出了合成子阵方向图, 将注意, 在欧洲区域内存在非常高的方向性, 该方向性在该区域外快速下降。在子阵之间的相对定相产生了点波束。在图 11 和 12 中示出了两个特定点波束。

[0096] 对于后续点波束最优化, 保持以上最优化的内部子阵权重, 同时针对 100 个波束来最优化 249 个子阵上的权重:

[0097] 针对的目标是将波束边缘方向性与旁瓣电平相组合。对于这 100 个 0.45° 波束, 最优化的峰值方向性典型地是 52dBi, 大约在最大可能方向性以下 0.5dB, 据推测是由于波束略微大于来自该孔径的最小可能, 并且旁瓣最优化需要特定的边缘椎体。

[0098] 图 13 示出了图 12 的点波束的重新最优化的结果。

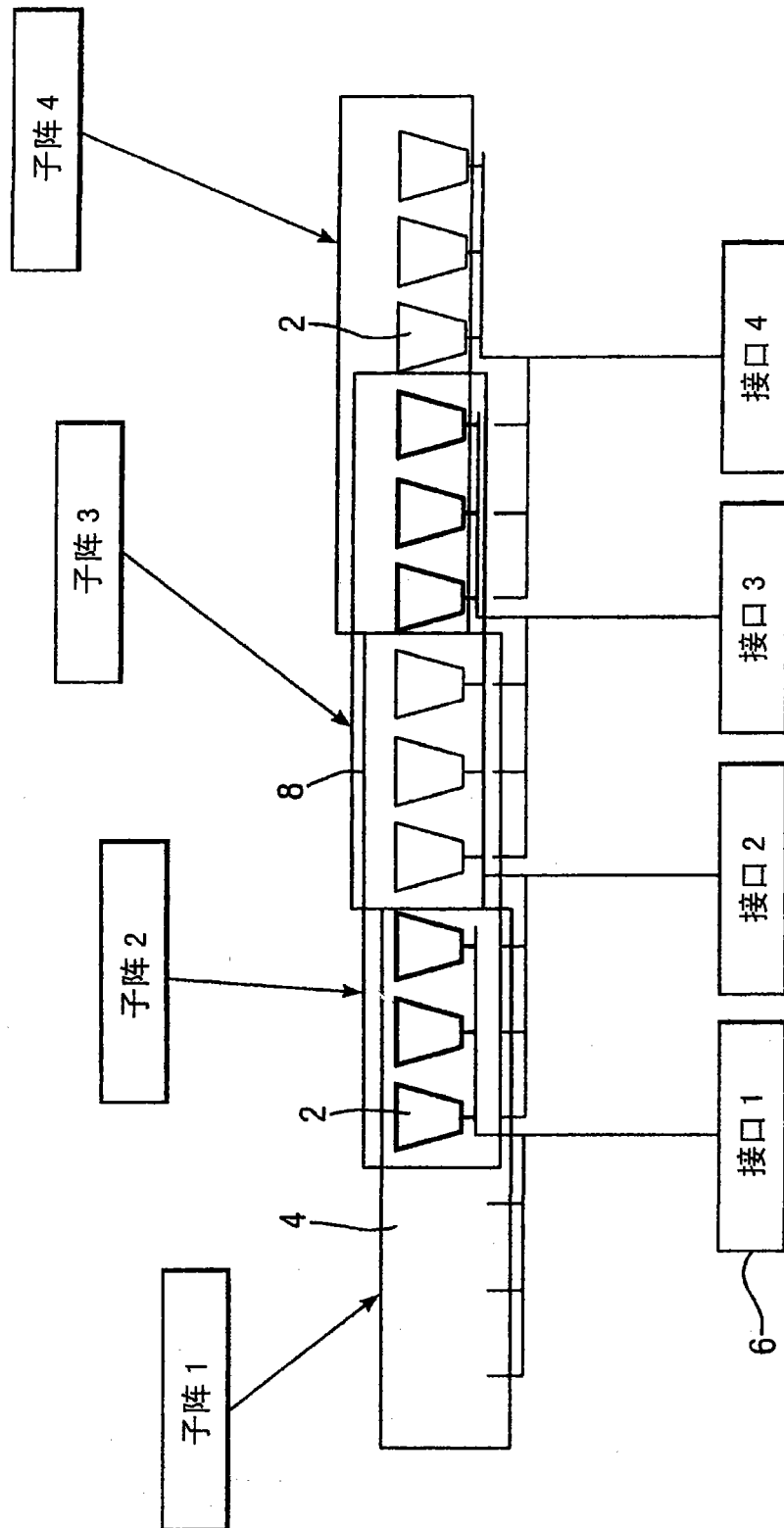


图 1

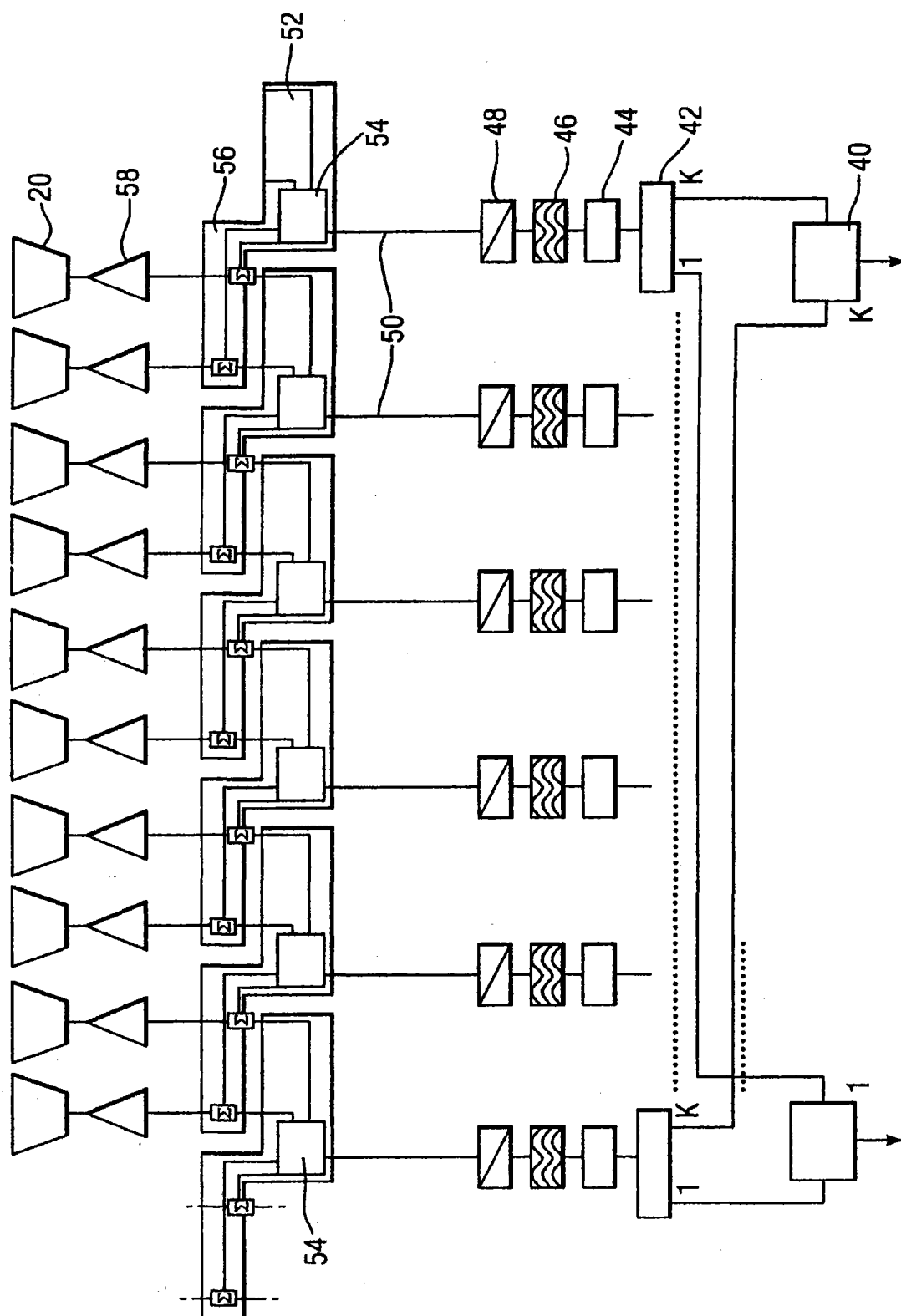


图 3

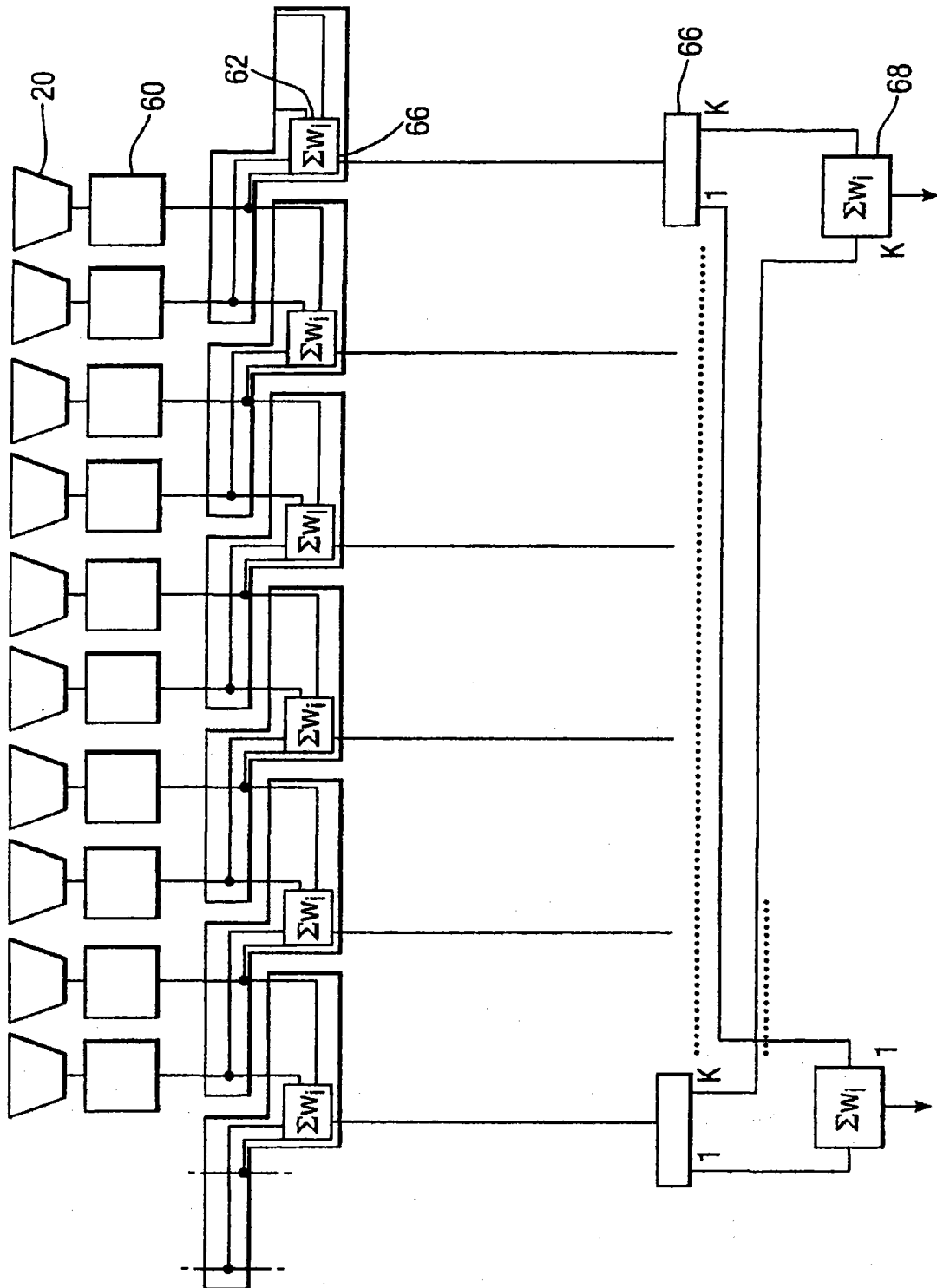


图 4

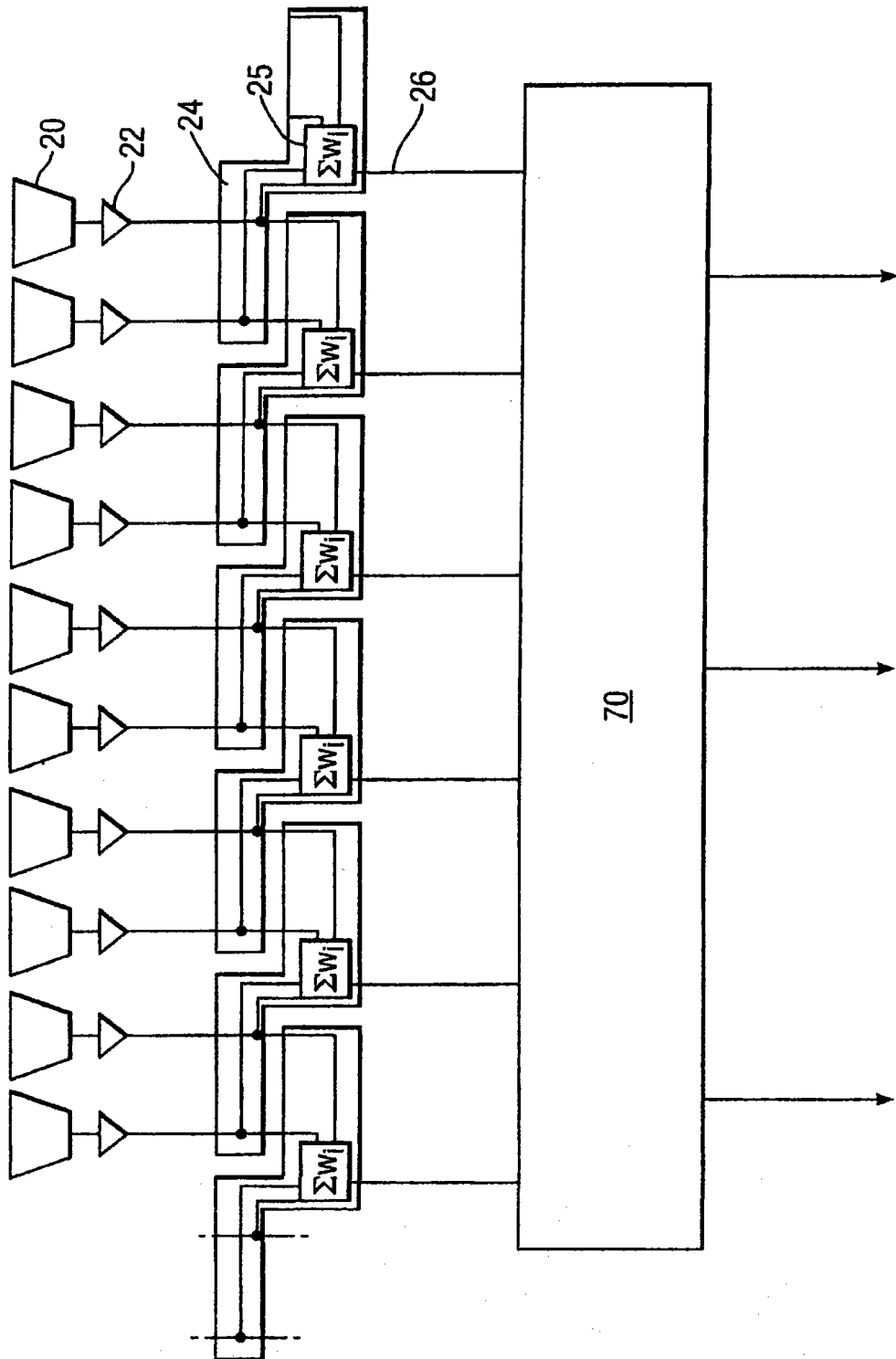


图 5

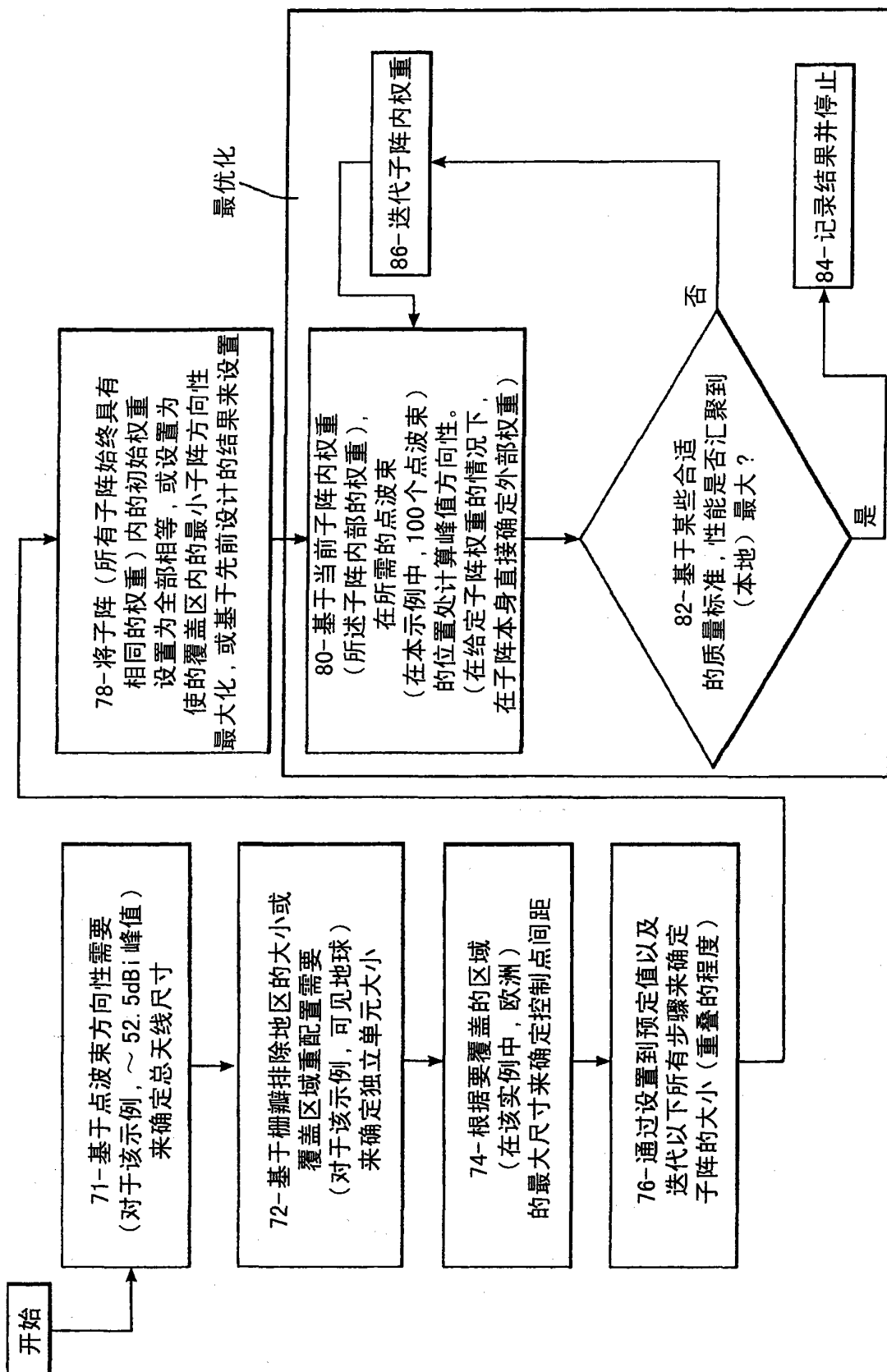


图 6

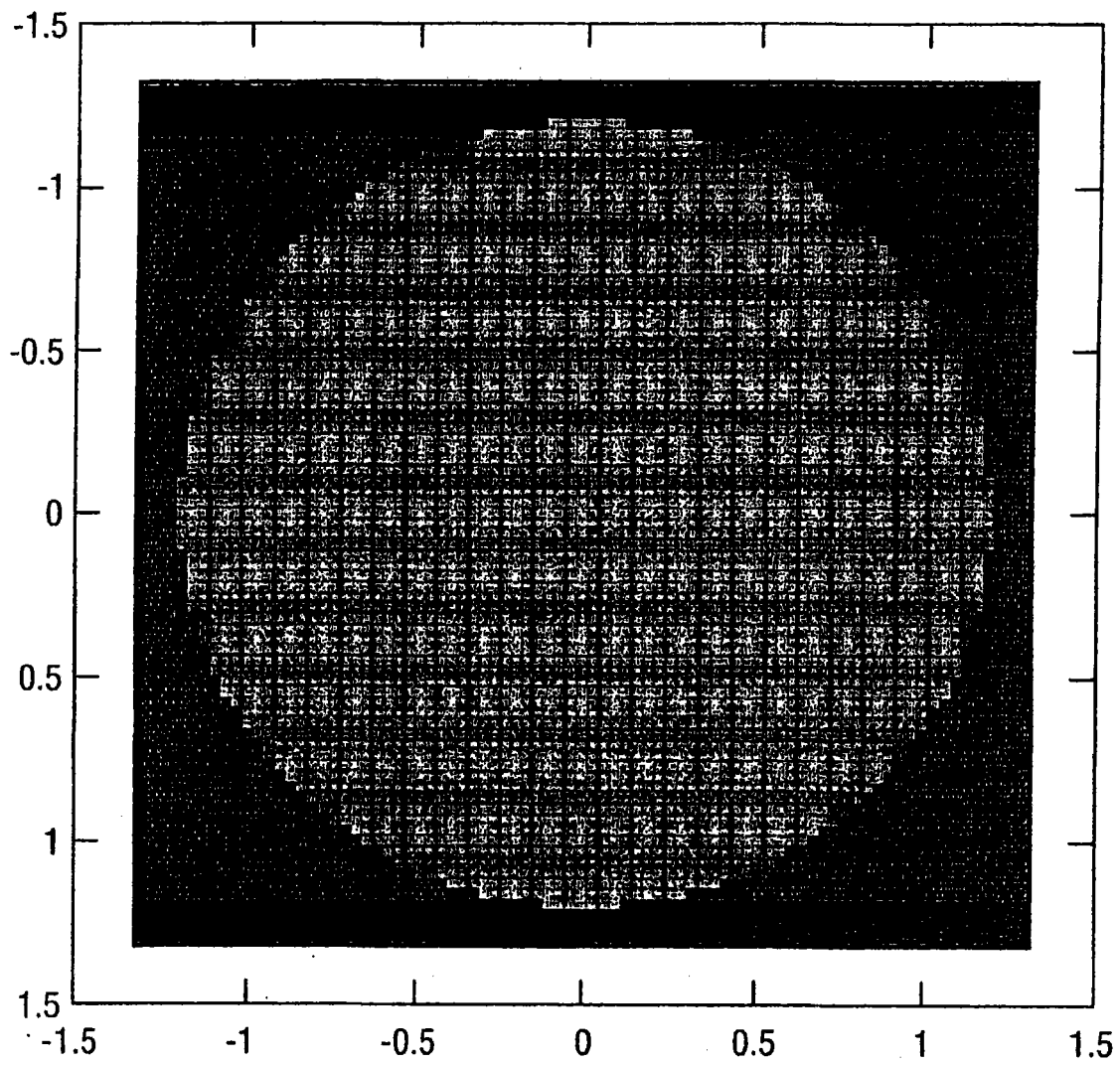


图 7

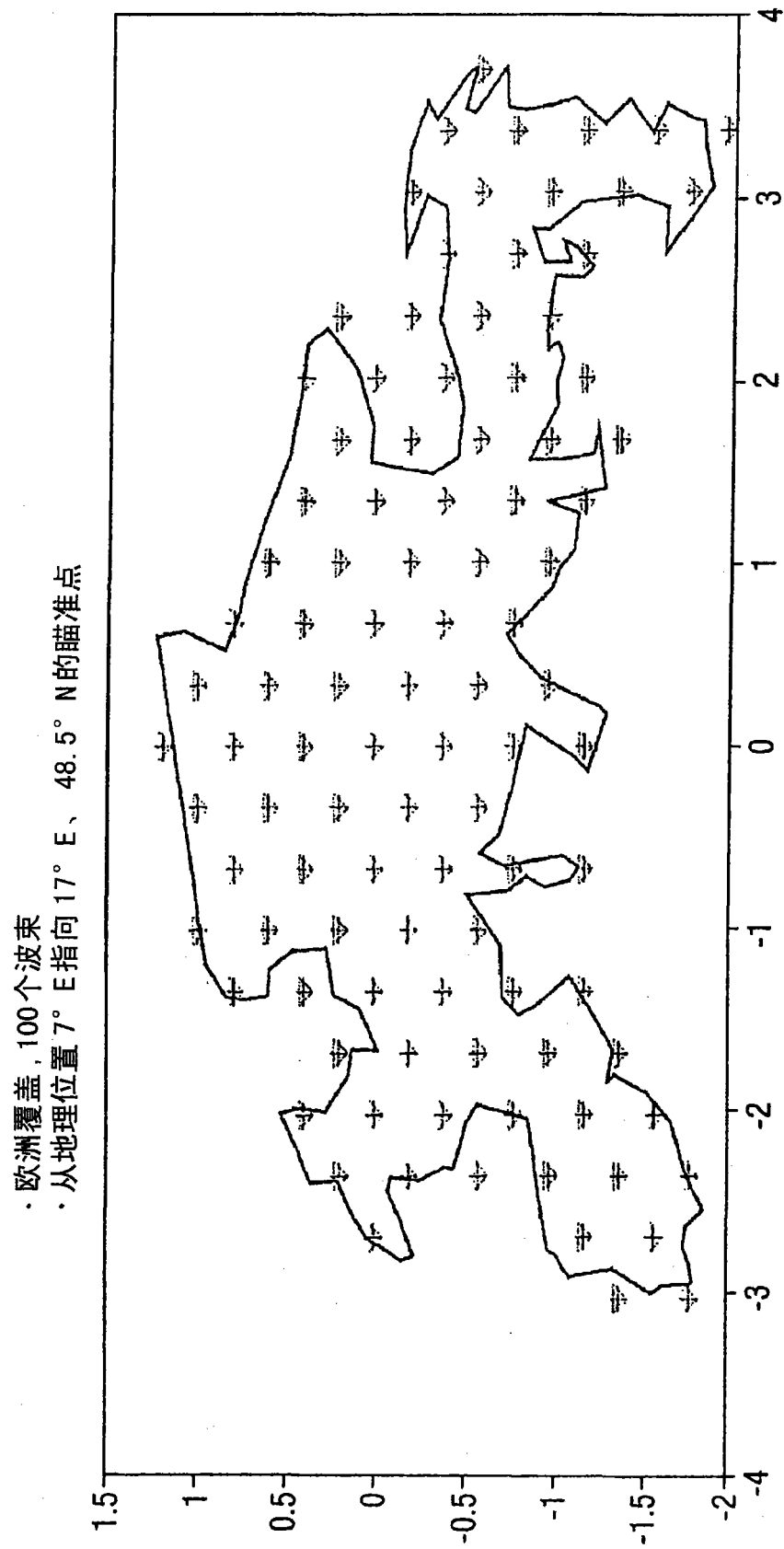


图 8

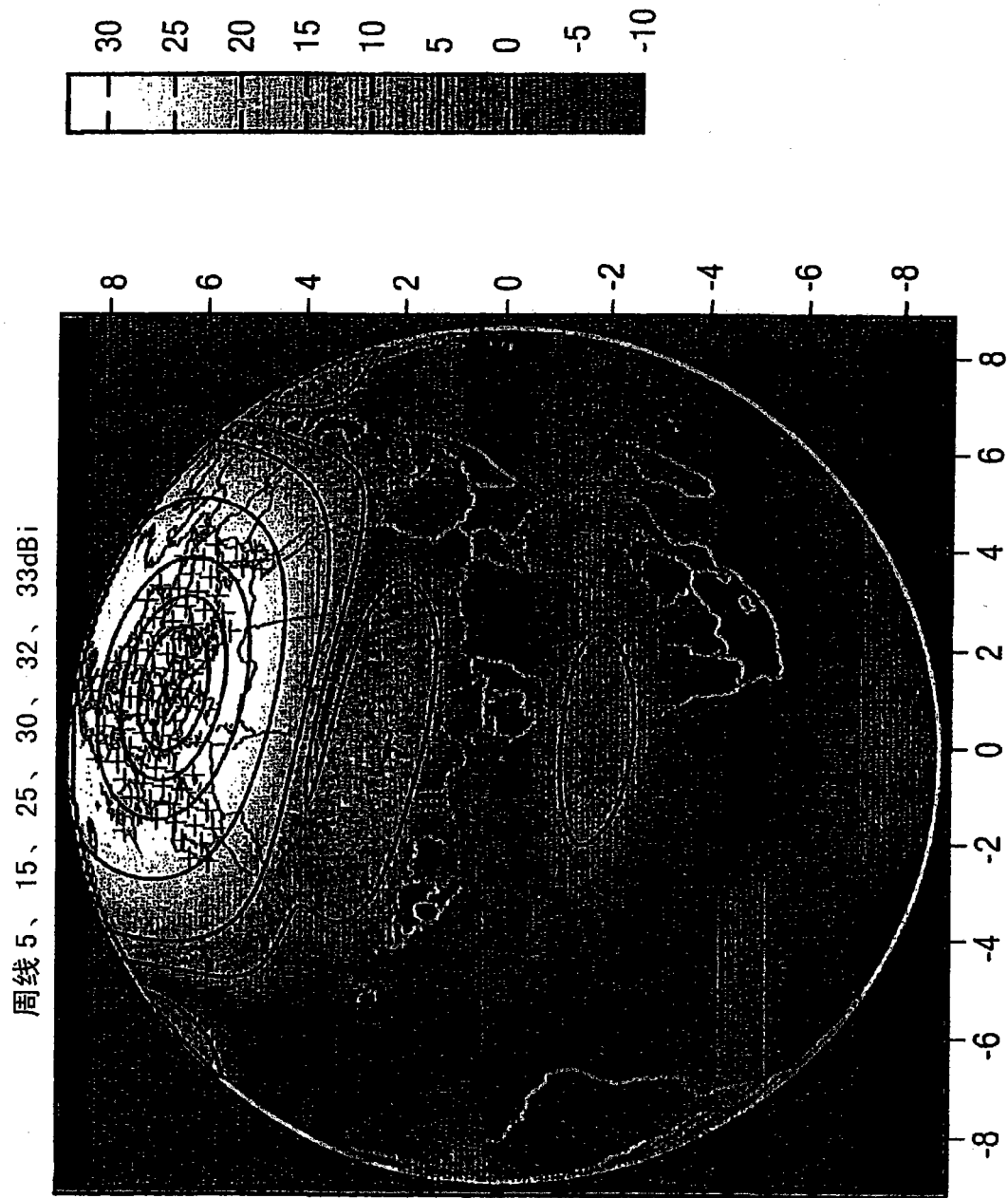


图 9

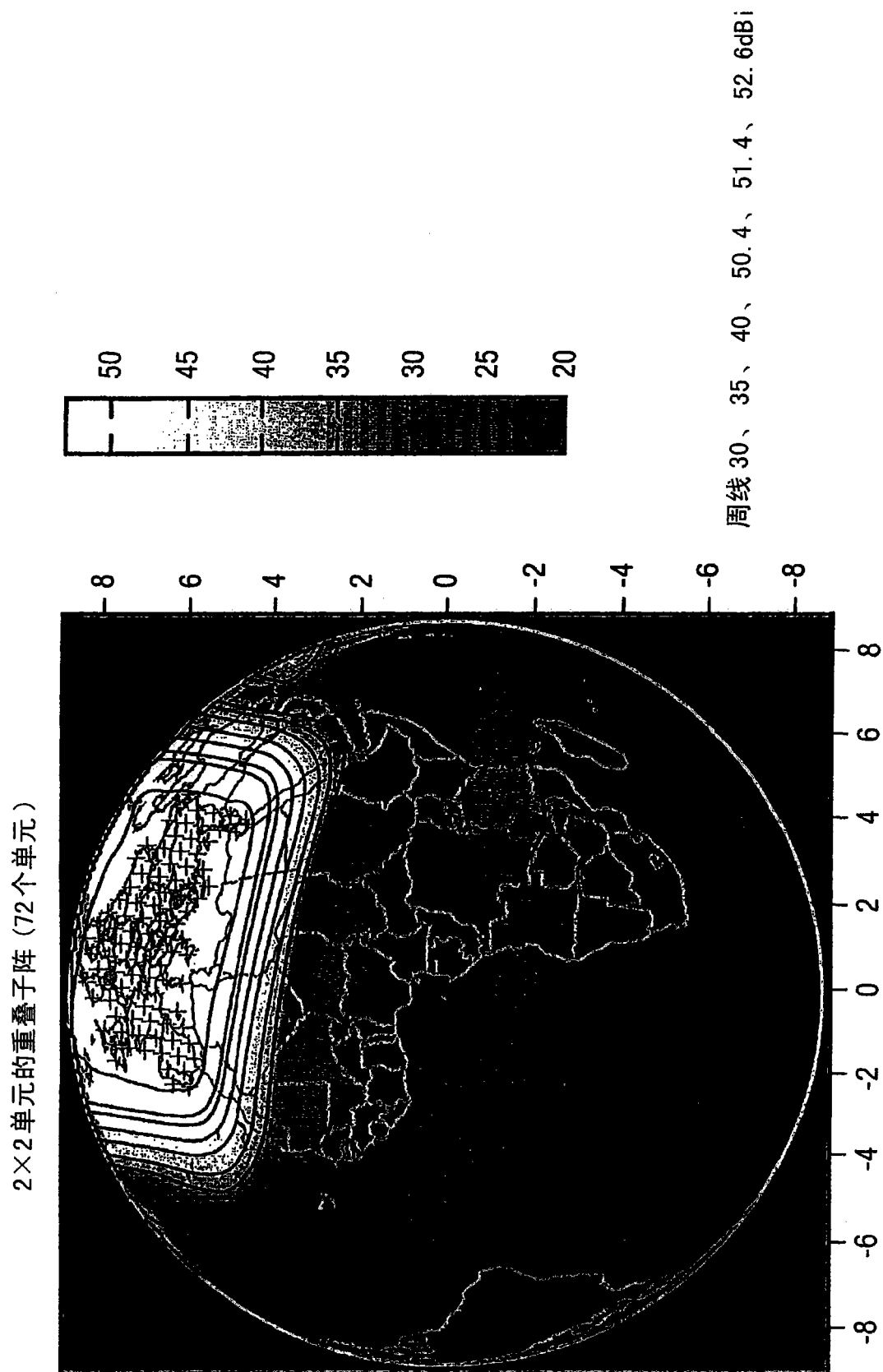


图 10

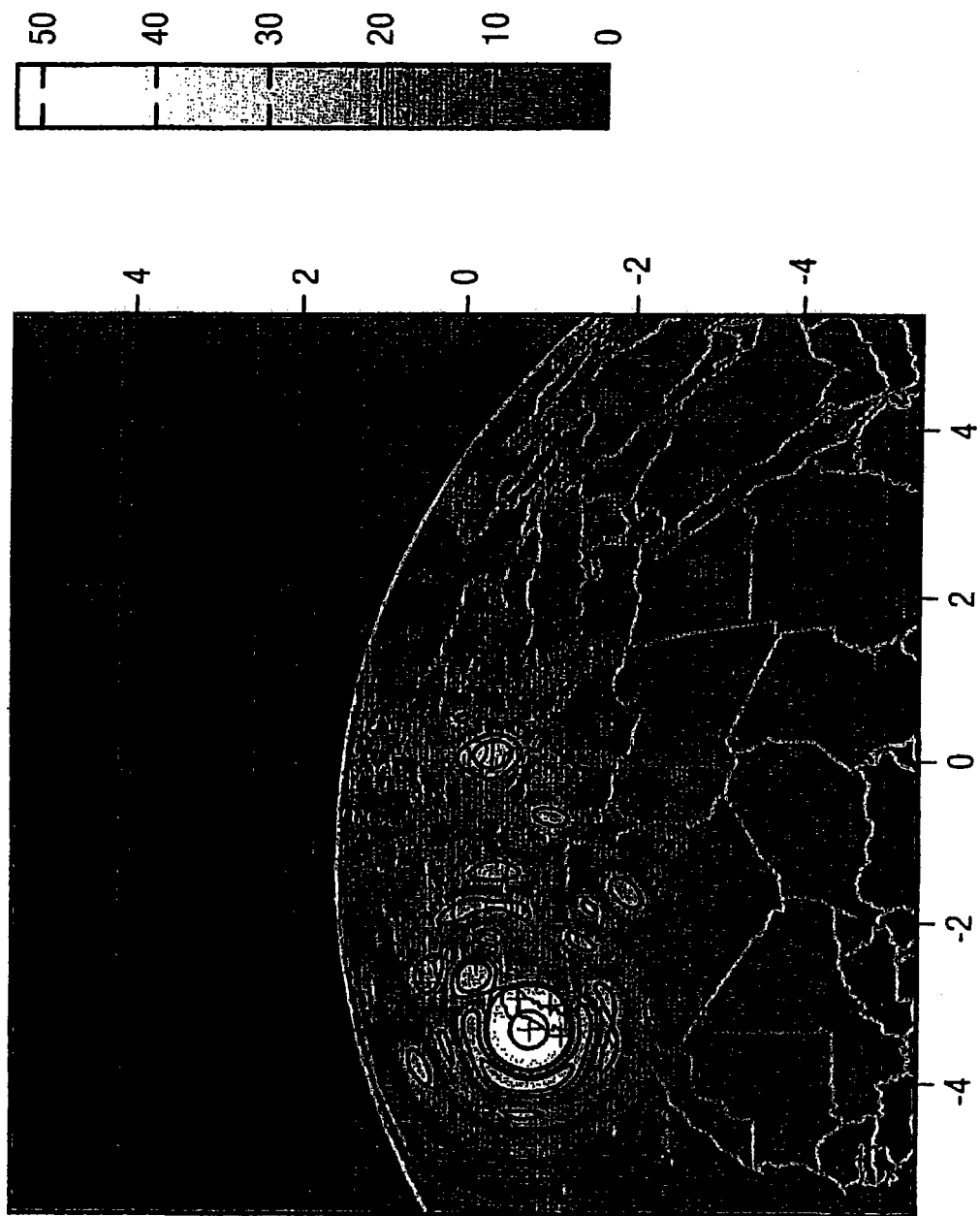


图 11

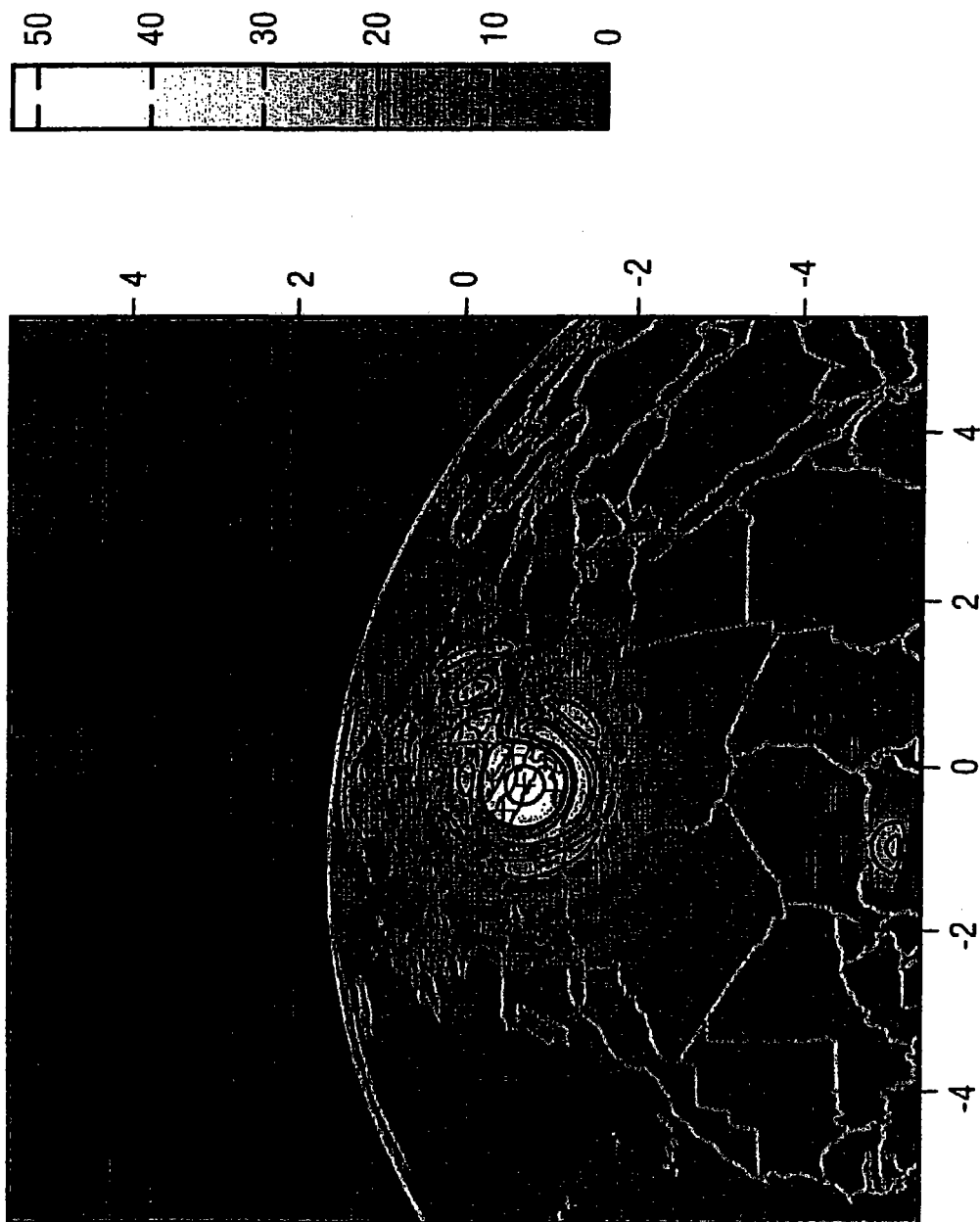


图 12

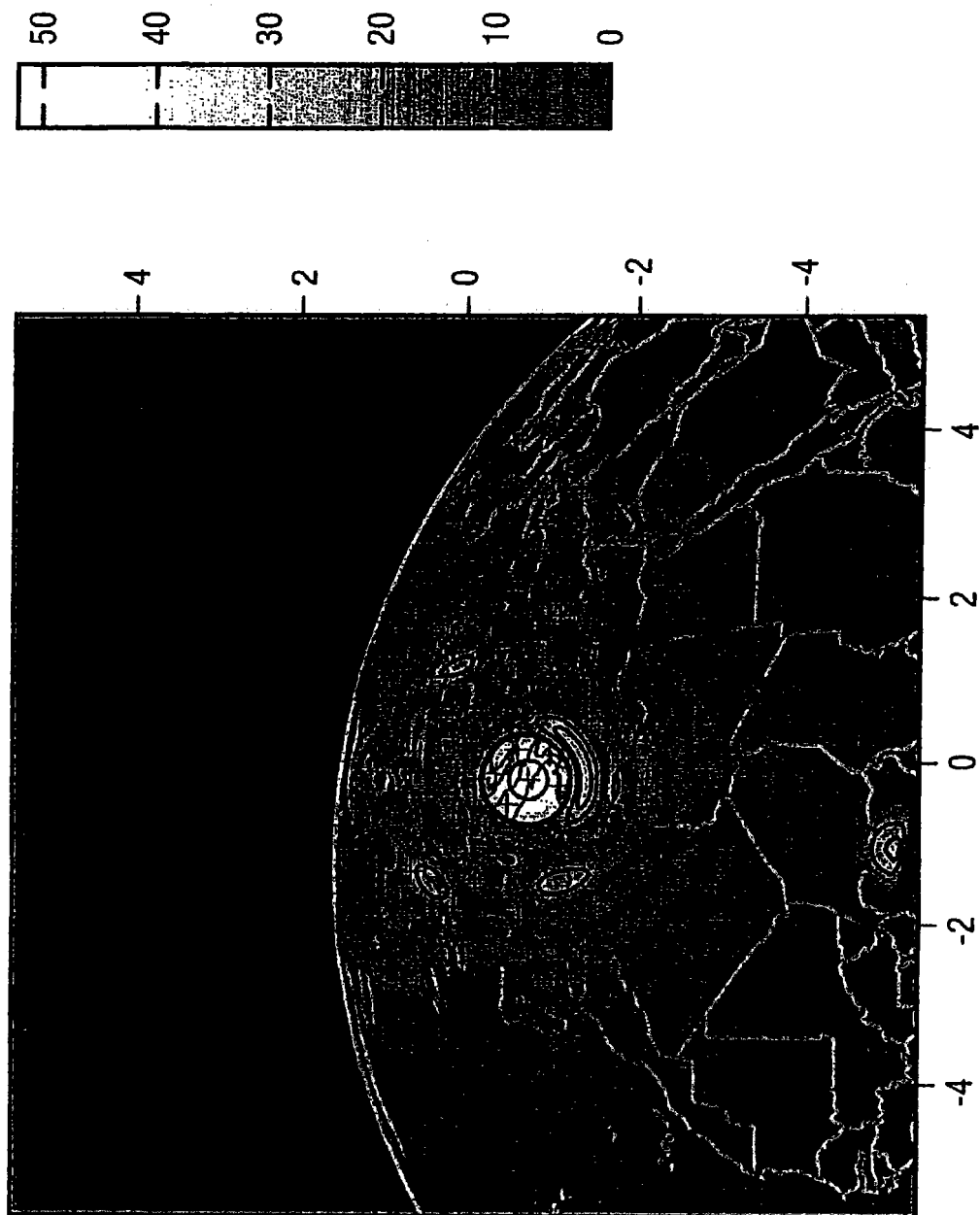


图 13