



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109642944 B

(45) 授权公告日 2024.01.12

(21) 申请号 201780050432.5

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

(22) 申请日 2017.07.10

专利代理人 徐东升 赵蓉民

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109642944 A

(51) Int.CI.

G01S 13/58 (2006.01)

(43) 申请公布日 2019.04.16

G01S 13/93 (2020.01)

(30) 优先权数据

201641023530 2016.07.09 IN
15/371,754 2016.12.07 US

(56) 对比文件

US 2015084808 A1, 2015.03.26

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

CN 102790738 A, 2012.11.21

2019.02.18

US 2016131752 A1, 2016.05.12

(86) PCT国际申请的申请数据

US 2016124086 A1, 2016.05.05

PCT/US2017/041366 2017.07.10

WO 2015197226 A1, 2015.12.30

(87) PCT国际申请的公布数据

RU 2326402 C1, 2008.06.10

W02018/071077 EN 2018.04.19

CN 105572660 A, 2016.05.11

(73) 专利权人 德克萨斯仪器股份有限公司

CN 105589067 A, 2016.05.18

地址 美国德克萨斯州

CN 105339806 A, 2016.02.17

(72) 发明人 S·拉奥 K·苏布拉吉 D·王

US 2015331096 A1, 2015.11.19

A·艾哈迈德

US 2016061947 A1, 2016.03.03

JP 2014062804 A, 2014.04.10

审查员 凌辰

权利要求书2页 说明书11页 附图9页

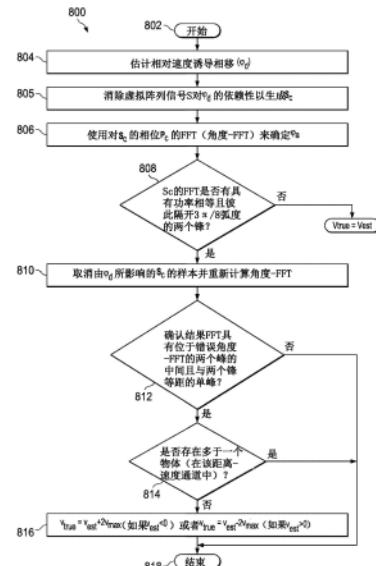
(54) 发明名称

用于包括速度模糊度分辨率的MIMO雷达中的速度检测的方法和设备

(57) 摘要

在所描述的示例中，方法(800)通过在多个接收器上接收由至少两个发射器发射并从物体反射的啁啾的至少一个帧来确定雷达检测到的物体的速度是否大于最大速度。估计每个接收器接收的对应于由每个发射器发射的啁啾(帧)的序列的信号的虚拟阵列矢量S中的速度诱导相移(Φ_d) (804)。使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c (805)。对校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换(806)以生成校正的虚拟阵列谱。分析该校正的虚拟阵列谱以检测指示物体具有大于最大速度的绝对速度的特征(808)。

CN 109642944 B



1.一种电路,其包括:

端口,所述端口适于耦合到接收器并且被配置为接收多个啁啾;

处理器,所述处理器耦合到所述端口并且被配置为:

基于由所述端口接收的所述多个啁啾,估计信号的虚拟阵列矢量S的相移 Φ_d ;

使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c ;

对所述校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换以生成校正的虚拟阵列谱;

分析所述校正的虚拟阵列谱以检测特征,所述特征指示对应于检测的特征的物体具有大于最大速度的绝对速度;以及

使用对应于所述检测的特征的相位误差矢量来校正所述校正的虚拟阵列矢量 S_c ;并对结果矩阵执行第二傅里叶变换以确定所述特征是否从所述结果矩阵中消除。

2.根据权利要求1所述的电路,其中所述处理器被配置为使用以下公式计算所述物体的速度: $v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c}$,其中 T_c 是啁啾周期并且 λ 是所述啁啾的波长;以及在 $v_{est} < 0$ 的情况下

$v_{true} = v_{est} + 2v_{max}$ 或在 $v_{est} > 0$ 的情况下 $v_{true} = v_{est} - 2v_{max}$,其中 v_{true} 是正确速度并且 v_{max} 由公式 $v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$ 确定。

3.根据权利要求1所述的电路,其中所述处理器进一步通过分析 S_c 来确定所述特征是否由多个物体导致。

4.根据权利要求1所述的电路,其中所述特征包括在校正的虚拟阵列谱中存在相等功率的两个峰,所述两个峰间隔固定的弧度值。

5.根据权利要求4所述的电路,其中所述处理器被进一步配置为取消由 Φ_d 所影响的 S_c 的每个元素并重新执行所述第一傅里叶变换以生成更新的校正的虚拟阵列谱。

6.根据权利要求5所述的电路,其中所述处理器被进一步配置为确定所述更新的校正的虚拟阵列谱具有在所述校正的虚拟阵列谱中所述两个峰中间并与所述两个峰等距的单个峰。

7.一种用于确定雷达检测到的物体的速度是否大于最大速度的方法,所述方法包括:

通过接收器接收多个啁啾;

基于接收的多个啁啾估计信号的虚拟阵列矢量S中的相移 Φ_d ;

使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c ;

对所述校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换以生成校正的虚拟阵列谱;

分析所述校正的虚拟阵列谱以检测特征,所述特征指示对应于检测的特征的物体具有大于最大速度的绝对速度;以及

使用对应于所述检测的特征的相位误差矢量来校正所述校正的虚拟阵列矢量 S_c ;并对结果矩阵执行第二傅里叶变换以确定所述特征是否从所述结果矩阵中消除。

8.根据权利要求7所述的方法,进一步包括使用以下公式确定所述物体的速度:

$v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c}$,其中 T_c 是啁啾周期并且 λ 是所述啁啾的波长;以及在 $v_{est} < 0$ 的情况下 $v_{true} = v_{est} +$

$2v_{\max}$ 或在 $v_{est} > 0$ 的情况下 $v_{true} = v_{est} - 2v_{\max}$, 其中 v_{true} 是正确速度并且 v_{\max} 由公式 $v_{\max} = \frac{\lambda}{4T_c}$ 确定。

9. 根据权利要求7所述的方法, 进一步包括通过分析 S_c 来确定所述特征是否由多个物体导致。

10. 一种雷达系统, 其包括:

接收器, 其被配置为接受多个啁啾;

处理器, 其耦合到所述接收器并且被配置为:

基于接收的多个啁啾估计信号的虚拟阵列矢量S中的相移 Φ_d ;

使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c ;

对所述校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换以生成校正的虚拟阵列谱;

分析所述校正的虚拟阵列谱以检测特征, 所述特征指示对应于检测的特征的物体具有大于最大速度的绝对速度; 以及

使用对应于所述特征的相位误差矢量来校正所述校正的虚拟阵列矢量 S_c ; 以及对结果矩阵执行第二傅里叶变换以确定所述特征是否从所述结果矩阵中消除。

11. 根据权利要求10所述的雷达系统, 其中所述处理器进一步确定所述物体的速度。

12. 根据权利要求11所述的雷达系统, 其中所述处理器进一步使用以下公式确定所述物体的速度: $v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c}$, 其中 T_c 是啁啾周期并且 λ 是所述啁啾的波长; 以及在 $v_{est} < 0$ 的情况下 $v_{true} = v_{est} + 2v_{\max}$ 或在 $v_{est} > 0$ 的情况下 $v_{true} = v_{est} - 2v_{\max}$, 其中 v_{true} 是正确速度并且 v_{\max} 由公式 $v_{\max} = \frac{\lambda}{4T_c}$ 确定。

13. 根据权利要求10所述的雷达系统, 其中所述处理器进一步被配置为通过分析 S_c 来确定所述特征是否由多个物体导致。

用于包括速度模糊度分辨率的MIMO雷达中的速度检测的方法 和设备

技术领域

[0001] 本发明总体涉及物体检测和速度确定，并且更具体地涉及调频连续波(FMCW)雷达系统中的速度检测。

背景技术

[0002] FMCW雷达的基本发射信号是频率斜波(ramp)(通常也称为“啁啾”)。啁啾是一种频率随时间线性变化的信号。例如，毫米波FMCW雷达可以发射具有4GHz带宽的啁啾，该啁啾从77GHz开始并线性地斜升到81GHz。由发射(TX)天线发射的信号从一个或多个物体反射，并且在一个或多个接收(RX)天线处接收所反射的信号。

[0003] FMCW雷达在称为帧的单元中发射一系列这种等间隔的啁啾。在RX天线处接收的对应的信号被下变频、数字化并且然后被处理以获得雷达前方的多个物体的距离、速度和到达角。

[0004] 多输入多输出(MIMO)雷达是一种改进FMCW雷达的角度估计能力的技术。使用MIMO雷达，多个TX天线发射到同一组RX天线。从多个TX天线发出的信号需要是正交的(即，不应相互干扰)。确保正交性的一些常用方法是：时分多路复用(TDM-MIMO)、频分多路复用(FDM-MIMO)和码相多路复用。在TDM-MIMO中，来自不同TX天线的信号占用不同的时隙。在FDM-MIMO中，来自多个TX天线的信号在频率上是分开的。在码相多路复用中，多个TX天线使用不同的伪随机噪声码(PN码)同时发射信号，这使得信号能够在接收器处是分开的。FDM-MIMO在发射链和接收链上都会增加额外的硬件复杂性。码相多路复用导致性能下降(由于解扩噪声)和/或显著增加计算要求(用于对内啁啾码PN序列解码)。

[0005] 因此，TDM-MIMO在提供正交性方面优于其他方法。然而，TDM-MIMO操作模式导致雷达能够测量的最大无模糊速度的减小。使用常规TDM-MIMO雷达，任何以大于最大无模糊速度(v_{max})的速度移动的物体都将具有其不正确地估计的速度。

发明内容

[0006] 在所描述的示例中，一种方法确定由雷达检测的物体的绝对速度是否大于最大值。该方法包括在多个接收器上接收由至少两个发射器发射并从物体反射的啁啾的至少一个帧。估计虚拟阵列矢量S中的速度诱导相移(φ_d)。基于每个接收器所接收的对应于由发射器所发射的啁啾(帧)的序列的信号计算S。使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c 。对校正的虚拟阵列矢量 S_c 的第一傅里叶变换生成校正的虚拟阵列谱。分析校正的虚拟阵列谱以检测指示物体具有大于最大速度的绝对速度的特征。

附图说明

[0007] 图1是FMCW雷达的示意图。

[0008] 图2是啁啾信号的曲线图。

- [0009] 图3是交错的啁啾信号的曲线图。
- [0010] 图4是另一雷达的示意图。
- [0011] 图5是具有两个发射器的雷达系统的示意图。
- [0012] 图6是示出速度和到达角的组合影响的曲线图。
- [0013] 图7是示出理想矩阵和错误校正矩阵的傅里叶变换的曲线图。
- [0014] 图8是示例实施例的方法方面的流程图。
- [0015] 图9是示例实施例的另一方法方面的流程图。
- [0016] 图10示出具有另一架构的TDM-MIMO雷达系统。
- [0017] 图11是示出用于图10的架构的理想矩阵和错误校正矩阵的傅里叶变换的曲线图。
- [0018] 图12是示出用于距离-多普勒通道 (Doppler bin) 中的两个物体的理想矩阵和错误校正矩阵的傅里叶变换的曲线图。

具体实施方式

[0019] 在附图中,除非另有说明,否则对应的数字和符号通常指代对应的部分。附图不一定按比例绘制。

[0020] 术语“耦合”可以包括与中间元件建立的连接,并且附加元件和各种连接可以存在于“耦合”的任何元件之间。

[0021] 图1是FMCW雷达100的示意图。在图1中,雷达100布置有单个发射器102,如下文关于图2所述,该单个发射器102发射帧108。帧108从物体106反射,其中反射信号110-1至110-4分别由4个接收器104-1至104-4接收。使用单个TX天线将啁啾帧发射到单个RX天线,物体相对于雷达的相对运动在横跨序列啁啾的所接收的信号中诱导相位变化(ϕ_d)。每个天线由可以部分或全部并入集成电路中的电路驱动。例如,集成电路可以使用一个或多个功率晶体管或功率模块产生信号并将信号施加到天线。驱动电路可以是分立的部件或并入模块的若干部件。在一些配置中,一个集成电路可以驱动多个天线。在其他配置中,单独的电路驱动每个天线和公共处理器以分析信号。

[0022] 图2是在RX天线上接收的啁啾信号的曲线图200。所接收的啁啾212-0是帧208中的参照啁啾和第一啁啾。所接收的啁啾212-1通过多普勒效应从其被发射时的定时相移 Φ_d 。所接收的啁啾212-2从其被发射时的定时相移 $2\phi_d$ 。因此,横跨啁啾的所接收的信号的相位存在线性进展 (progression) ($[0, \phi_d, 2\phi_d, \dots, (N-1)\phi_d]$)。当对与每个啁啾的所接收的IF信号对应的数字化样本执行距离-FFT时,将在横跨啁啾的距离-FFT(下文中进一步描述)的对应的峰中看到该相位进展。该序列在图2中描绘。为简单起见,在本说明书中,初始相位值被称为零。所接收的信号的相位的线性进展允许横跨序列啁啾使用傅里叶变换来估计 Φ_d 。可以使用快速傅里叶变换(FFT)装置和技术对横跨序列啁啾的所接收的信号完成估计。相位变化 Φ_d 与物体的速度成正比,由等式(1)给出:

$$[0023] \quad \phi_d = \frac{4\pi T_c v}{\lambda} \quad (1)$$

[0024] 其中 T_c 是啁啾周期(即从一个啁啾起始点到下一个啁啾起始点的时间),并且 λ 是对应于啁啾的起始频率的波长。

[0025] 因此,在 Φ_d 已经被估计之后(诸如通过使用FFT),可以使用等式(2)将物体的速度估计为 v_{est} :

$$[0026] v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c} \quad (2)$$

[0027] 参数 Φ_d 是相位量,只有其位于 $-\pi$ 和 π 弧度之间,才能无模糊地估计该相位量。对 Φ_d 的限制直接对能无模糊地估计的最大速度(v_{max})的值加以限制。在等式(2)中代入 $\Phi_d=\pi$ 给出等式(3),等式(3)产生 v_{max} 的以下值。

$$[0028] v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c} \quad (3)$$

[0029] 因此,能够由雷达直接测量的最大无模糊速度($\pm v_{max}$)取决于啁啾周期 T_c 。较小的 T_c 产生较高的 v_{max} 。周期 T_c 是指来自相同TX天线的连续啁啾的起始点(或任何对应点)之间的时间。因此,在所有其他方面相同的情况下,用于具有两个TX天线的TDM-MIMO雷达配置的 v_{max} 将是单个TX雷达配置的 v_{max} 的一半。图3在帧308中图示了的这一点。曲线图300包括啁啾312-0至312-(N-1),啁啾312-0至312-(N-1)由一个发射器(TX)发射并在时间上与来自第二发射器的啁啾314-0至314-(N-1)交错。 T_c 是来自一个发射器的啁啾的周期。图3图示了该周期,其中 T_c 是从啁啾312-0的末端至啁啾312-1的末端被测量的。与图2所图示的单个发射器TDM-MIMO不同,图2中的 T_c 从啁啾212-0的末端延至啁啾212-1的末端,图3中的周期 T_c 是图2中的周期 T_c 的两倍长。通常,具有M个发射器的TDM-MIMO系统具有是单个发射器系统的周期的M倍的周期。然而,如上在等式(3)中所述, v_{max} 与 T_c 成反比。因此,使用的发射天线的数量越大,最大速度 v_{max} 越低。

[0030] 在图1中,物体106直接位于发射器102和接收器104-1至104-4的前面。该示例是一种特殊情况,其中因为物体处于垂直于TDM-MIMO阵列的位置,所以所接收的啁啾将基本上在同一时间到达所有接收器。被检测的大多数物体相对于TDM-MIMO系统成一角度。

[0031] 图4是另一雷达400的示意图。图4中以与图1中的元件类似的方式编号的元件执行类似的功能。例如,元件402、404-1至404-4和406执行与图1中的元件102、104-1至104-4和106类似的功能。在图4中,物体406相对于发射器(TX)402和接收器(RX)404-1至404-4成角度 θ 。从发射器402发射的信号从物体406反射,并且接收器404-1至404-4接收该信号。接收器404-1至404-4具有间隔为 d_{ant} 的均匀间隔天线。由于信号必须经过的附加距离d,到达每个连续RX天线的信号相对于前面的天线被延迟;这种情况通过图4中的接收器404-3和接收器404-4之间的直角三角形来图示。该附加延迟转换为到达相邻RX天线的信号之间的相位差 Φ_a 。因此,在到达连续RX天线的信号的相位中存在线性进展[0、 φ_a 、 $2\varphi_a$ 、 $3\varphi_a$]。该线性进展允许诸如使用FFT估计 Φ_a 。横跨天线的相位差 Φ_a 与物体的到达角(θ)相关。已经估计 Φ_a 后,使用等式(4)估计到达角 θ :

$$[0032] \theta = \sin^{-1} \frac{\varphi_a \lambda}{2\pi d_{ant}} \quad (4)$$

[0033] 其中 d_{ant} 是相邻RX天线之间的距离。

[0034] 图5是具有两个发射器502-1和502-2的TDM-MIMO系统500的示意图。图5中以与图4中的元件类似的方式编号的元件执行类似的功能。例如,元件502、504-1至504-4和506执行

与图4中的元件402、404-1至404-4和406类似的功能。控制器与处理器508控制发射器502-1、发射器502-1和接收器504-1至504-4，并处理在接收器504-1至504-4上接收的信号。控制器与处理器508可以部分或全部并入一个或多个集成电路中。例如，集成电路可以使用一个或多个功率晶体管或功率模块生成信号并将信号施加到天线。驱动电路可以是分立的部件或是并入模块中的若干部件。在一些配置中，一个集成电路可以驱动多个天线。在其他配置中，单独的电路驱动每个天线和公共处理器以分析信号。在一些配置中，控制器部分和处理器部分形成在同一集成电路或可以是单独的集成电路。集成电路的处理器部分可以包括CPU、数字信号处理器(DSP)、混合信号处理器(MSP)、诸如ARM核的精简指令集计算机(RISC)核、微控制器或其他合适的处理器。

[0035] 如同系统500的TDM-MIMO系统使用多个发射器以增加 Φ_a 的线性相位进展的有效长度并因此改善角度估计的质量。图5图示了多个发射器的使用和角度估计的效果。来自发射器502-2的信号相对于发射器502-1必须行进附加距离D。从发射器502-2发射的啁啾相对于从发射器502-1发射的啁啾必须行进的附加距离为每个接收器天线处的信号贡献附加相位差。在图5中，发射器502-1和发射器502-2之间的间隔被选为相邻接收器天线之间的间隔的四倍。然而，本文描述的原理适用于发射器之间的任何间隔。按比例地，该附加相位差测算为 $4\Phi_a$ 。因此，对于每个接收器天线，由接收器看到的来自发射器502-1和发射器502-2的信号具有 $4\Phi_a$ 的相位差。使用这种配置，系统500操作如下：

[0036] (a) 首先，发射器502-1发射并且在接收器504-1至504-4处看到的相位分别是 $[0 \Phi_a 2\Phi_a 3\Phi_a]$ ；

[0037] (b) 随后，发射器502-2发射并且在接收器504-1至504-4处看到的相位是 $[4\Phi_a 5\Phi_a 6\Phi_a 7\Phi_a]$ 。

[0038] 从发射器502-1和发射器502-2的连续发射获得的所接收的信号可以连接在一起以创建更长的信号序列，该更长的信号序列的相位具有以下线性进展： $P=[0 \Phi_a 2\Phi_a 3\Phi_a 4\Phi_a 5\Phi_a 6\Phi_a 7\Phi_a]$ ，这提供了 Φ_a 的更好的估计。因此，在TDM-MIMO中，由于横跨多个TX天线的时分多路复用发射而在RX天线阵列处接收的信号可以被适当地排序以创建长度等于“发射天线的数量乘以接收天线的数量”的信号序列。该信号序列在本文中被称为“虚拟阵列信号”。本文中，虚拟阵列信号本身用S表示，对应于该序列的相位用P表示。

[0039] 用于生成虚拟阵列信号的一个过程首先涉及用于如下文所述的每个发射/接收器对的二维FFT(2D-FFT)处理。通过将发射的啁啾与对应的所接收的啁啾混合来获得中频(IF)信号。对与IF信号对应的数字化样本执行距离-FFT。距离-FFT解析物体的距离并产生一系列通道(bins)，每个通道对应于距离值。通道处的信号表示该距离处的物体。对于整个帧的每个发射器/接收器对上的每个啁啾进行该处理。对于每个发射器/接收器对，然后对横跨啁啾的每个距离-通道执行多普勒-FFT。该2D-FFT(即，距离-FFT，随后是多普勒-FFT)处理生成二维FFT网格，并且为每个发送器/接收器对生成一个此类2D-FFT网格。然后，通过横跨每个接收器发射器对的所有生成的2D-FFT网格拾取对应于特定距离-多普勒通道的信号样本来生成虚拟阵列信号S(参见，例如，Song等人，“经由牛顿插值增强多普勒估计用于汽车FMCW雷达”，信息与通信技术融合国际会议(CTIC)2014，第615-616页(2014)，即Song，

et al., “Enhancing Doppler estimation via newton interpolation for automotive FMCW radars”, International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) 2014, pp. 615-616 (2014)), 通过引用其全部内容并入本文。

[0040] 图6是示出速度和到达角的组合影响的曲线图600。图6中以与图5中的元件类似的方式编号的元件执行类似的功能。例如, 喇叭612-0至612-(N-1) 和喇叭614-0至614-(N-1) 执行与图3中的喇叭312-0至312-(N-1) 和喇叭314-0至314-(N-1) 类似的功能。以上关于图5的描述隐含地假设静止的物体。对于相对于雷达具有相对运动的物体, 由于相对速度和到达角, 在接收器处看到的相位偏移将有贡献。关于图6, T_c' 指的是来自相同发射天线的连续喇叭的起始点之间的时间。另外, Φ_d 指的是从相同发射天线发出的连续喇叭之间的在接收器处的速度诱导相位差。因此, 来自发射器602-1和发射器602-2(图5)的相邻发射之间的对应的速度诱导相位差是 $0.5\Phi_d$ 。当发射器602-1发射时, 四个接收器604-1至604-4处的所接收的信号的相位分别是 $[0 \ \varphi_a \ 2\varphi_a \ 3\varphi_a]$, 如集合620-1中所示。对于从发射器602-2发出的信号, 四个接收器604-1至604-4处的信号具有到达角诱导相位偏移 $[4\varphi_a \ 5\varphi_a \ 6\varphi_a \ 7\varphi_a]$ 。由于从发射器602-2的发射自发射器602-1延迟了 $0.5T_c'$, 这诱导了如集合620-2中所示的 $0.5\Phi_d$ 的附加相位。因此, 并入到达角和相对速度的影响的虚拟阵列信号S的相位P由等式(5)给出:

$$P = [0 \ \varphi_a \ 2\varphi_a \ 3\varphi_a \ 0.5\Phi_d + 4\varphi_a \ 0.5\Phi_d + 5\varphi_a \ 0.5\Phi_d + 6\varphi_a \ 0.5\Phi_d + 7\varphi_a] \quad (5)$$

[0042] 如等式(5)所示, 虚拟阵列信号S的相位P取决于到达角(经由 Φ_a)和相对速度(经由 Φ_d)。因此, 速度和到达角的估计被耦合。可以使用以下技术确定速度和到达角:

[0043] a. 步骤1

[0044] 估计相对速度诱导相位 (Φ_d)

[0045] 确定由于特定TX天线发射的连续喇叭而引起的在每个RX天线处的相位差(Φ_d)。该处理有时被称为“多普勒FFT处理”。通过FFT处理由从特定TX天线发射的喇叭引起的在RX天线处所接收的信号来完成该处理。通常, 在横跨帧中的喇叭执行多普勒-FFT之前, 首先对与每个喇叭对应的ADC样本进行距离-FFT。 Φ_d 的估计被用于使用等式(2)估计物体的速度v。实际上, 横跨所有的TX-RX天线对重复类似的处理, 并且对该结果取平均以生成 Φ_d 的更好估计(例如, 可以对横跨多个TX-RX天线对的多普勒-FFT进行非一致性平均, 然后使用该非一致性平均的FFT来估计 Φ_d)。

[0046] b. 步骤2

[0047] 多普勒校正

[0048] 步骤1中的 Φ_d 的估计被用于通过S的最后四个元素乘以 $e^{-j(\frac{\Phi_d}{2})}$ 来消除虚拟阵列信号S对 Φ_d 的依赖性。该操作创建校正的虚拟阵列信号 S_c , 该校正的虚拟阵列信号 S_c 的相位 P_c 由等式(6)给出:

$$P_c = [0 \ \varphi_a \ 2\varphi_a \ 3\varphi_a \ 4\varphi_a \ 5\varphi_a \ 6\varphi_a \ 7\varphi_a] \quad (6)$$

[0050] c. 步骤3

[0051] 角度估计

[0052] 根据等式(6),校正的虚拟阵列信号 S_c 的相位 P_c 具有 Φ_a 上的线性进展。因此,对 P_c 的FFT将生成 Φ_a 的估计。该 Φ_a 的估计被用在等式(4)中以确定到达角 θ 。

[0053] 上文所述的技术假设物体的相对速度(v)在 v_{max} 内(即 $|v| < v_{max}$)。对此约束的任何违反都会导致对 Φ_d 的错误估计,从而导致所估计的速度(v)和 S_c (及其相位 P_c)中的误差。另外,如上文所述,因为 T_c 与发射器的数量成比例增加,可实现的 v_{max} 与发射器的数量成反比(例如,对于两个发射器,则降为原来的1/2)。

[0054] 在一个方面, v_{max} 的限制(如上文所述)在TDM-MIMO雷达中得到改善。使用以下过程。如果 $|v|$ 超过 v_{max} ,则 Φ_d 的估计中的误差也会影响角度估计(上文步骤3)之前进行的多普勒校正(上文步骤2)。因此,校正的虚拟阵列信号 S_c 的相位 P_c 中所引入的误差将在其角度-FFT谱中产生独特的特征。如下文进一步所述,这些特征被检测并被用于校正 $|v|$ 超过 v_{max} 的情况。

[0055] 如果 $|v| > v_{max}$,则 $|\Phi_d|$ 将超过 π ,从而导致对上文所述的方法的步骤2中的 Φ_d 的错误估计。例如,如果 Φ_d 超过 π (即, $\Phi_d = \pi + \Delta$),则在步骤1中所估计的 Φ_d 的值(Φ_{d_est})将为 $-\pi + \Delta$ 。同样地,如果 Φ_d 的值小于 $-\pi$ (即, $\Phi_d = -\pi - \Delta$),则 $\Phi_{d_est} = \pi - \Delta$ 。因此,估计误差 $\Phi_d - \Phi_{d_est} = \pm 2\pi$ 。该估计误差导致 P_c 相位中的误差,错误相位由等式(7)给出:

$$P_c = [0 \ \Phi_a \ 2\Phi_a \ 3\Phi_a \ \pi + 4\Phi_a \ \pi + 5\Phi_a \ \pi + 6\Phi_a \ \pi + 7\Phi_a] \quad (7)$$

[0057] 在等式(7)中,误差项是添加到最后四项中的每一个的 π 。因此,该雷达架构的误差矢量(“相位误差矢量”)是 $\Phi_{error} = [0 \ 0 \ 0 \ \pi \ \pi \ \pi \ \pi]$ 。

[0058] 图7是示出理想 S_c (即,其中 v 小于 v_{max})和具有如上在等式(7)中所述的相位误差的 S_c 的FFT的曲线图700。理想校正的虚拟阵列信号 S_c (即,其中其相位 P_c 由等式(6)表示)导致曲线702在角度-FFT中具有单个峰(对应于 Φ_a 的估计并且因此对应于 θ)。错误的 S_c (即,其中相位 P_c 由等式(7)表示)反而导致曲线704在角度-FFT中具有两个峰。进一步地,FFT谱中的两个峰隔开 $3\pi/8$ 弧度并具有相等的功率。因此,显示以下属性的任何角度-FFT都很有可能指示 $|v|$ 超过 v_{max} 的情况:1)两个峰,和2)峰隔开 $3\pi/8$ 弧度。因此,可以使用以下检查来确定超过 v_{max} 的情况:

[0059] 1) 检查1: S_c 的FFT是否具有彼此隔开 $3\pi/8$ 弧度的相等功率的两个峰?

[0060] 2) 检查2:如果检查1为肯定的(positive),则取消 S_c 的最后四个样本并重新计算角度-FFT。因为取消样本等效于从其相位减去 π ,所以这将错误相位(等式(7))恢复为理想相位(等式(6))。

[0061] 3) 检查3:确认由检查2产生的FFT具有位于错误角度-FFT的两个峰的中间并与两个峰等距的单个峰。

[0062] 4) 检查4:如果通过检查1-3,则执行附加检查以确保两个峰不是由于在相同距离-多普勒通道(在2D-FFT网格)中的两个物体的存在。以下描述这一过程。

[0063] 5) 检查5:如果通过检查1-4,则标记超过 v_{max} 的速度偏移。使用等式(8)计算真实速度:

$$v_{true} = v_{est} + 2v_{max} \text{ (如果 } v_{est} < 0 \text{)} \text{ 或 } v_{true} = v_{est} - 2v_{max} \text{ (如果 } v_{est} > 0 \text{)} \quad (8)$$

[0065] 图8是方面方法800的流程图。方法800从步骤802开始。在步骤804中, 使用如上文所述的多普勒FFT处理确定多普勒相移 Φ_d 的估计。步骤805消除了虚拟阵列信号S的依赖性, 诸如通过将S的最后四个元素乘以 $e^{-j(\frac{\Phi_d}{2})}$ 。步骤806使用如上文所述的角度-FFT处理确定 Φ_a 。步骤808确定 S_c 的FFT是否具有隔开 $3\pi/8$ 弧度的两个峰。(实际上, 可以从 $3\pi/8$ 中减去两个FFT峰之间的间隔, 并将该差值的绝对值与基于SNR的阈值进行比较)。如果 S_c 的FFT不具有隔开 $3\pi/8$ 弧度的两个峰, 则根据 Φ_d 直接确定速度并且无需 v_{est} 调整。如果 S_c 的FFT具有隔开 $3\pi/8$ 弧度的两个峰, 则步骤810取消由 v_{error} 所影响的 S_c 的样本并重新计算角度-FFT。步骤812确认重新计算的角度-FFT具有在错误角度-FFT的峰的中间的单个峰。对于其他架构(即不是两个发射器和四个接收器), $|v| > v_{max}$ 会导致其他误差特征。因此, 对于这些其他架构, 在步骤808和步骤812中检测其他架构的其他误差特征特性。如果未找到误差适当特征, 则不能根据该数据确定准确的速度, 并且该过程以步骤818结束。如果找到适当特征, 则必须在步骤814中使用下文关于图9所述的方法确定是否由一个物体引起两个峰。如果通道仅具有一个物体, 则步骤816中所示的公式(等式(8))确定真实速度 v_{true} 。该方法以步骤818结束。如果检测到多于一个的物体, 则该过程以步骤818结束而没有结果。

[0066] 上文的检查4(步骤814)使用单个物体确认方法, 该方法可以用于确认双峰(曲线704)对应于单个物体(具有错误相位), 并且不是由于相同距离-多普勒通道中的两个物体的存在所致。这可以使用基于特征值的方法并依赖以下事实来确定: 对于单个物体, 对应于校正的虚拟阵列信号 S_c 的 2×2 相关矩阵的特征值将具有单个主特征值。校正的虚拟阵列信号 S_c 是8元素矢量, 其中元素1-4对应于来自TX1的在四个天线处所接收的信号, 元素5-8对应于来自TX2的所接收的信号, 如等式(9)所示:

$$[0067] \quad S_c = [\underbrace{s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4}_{\text{TX1}} \quad \underbrace{s_5 \ s_6 \ s_7 \ s_8}_{\text{TX2}}] \quad (9)$$

[0068] 以下方法确定在相同距离-多普勒通道中存在一个物体还是两个物体:

[0069] 1. 确定由来自 S_c 的对应于相同TX天线的相邻元素组成的 2×1 矢量 $r_k = [s_k, s_{k+1}]$ 的集合Q。因此, $r_1 = [s_1 s_2]$ 是集合Q的一部分, 而 $r_4 = [s_4 s_5]$ 不包括在Q中, 因为 s_4 是从TX1接收的信号, 并且 s_5 是从TX2接收的信号。

[0070] 2. 计算 2×2 相关矩阵 $R = \sum_Q r_k r_k^T$, 其中 r^T 是r的转置。

[0071] 3. 计算R的两个特征值。两个特征值的计算是常规数学过程, 其仅需要求解二次方程, 对于二次方程, 存在计算上简单的闭合形式解。

[0072] 4. 计算两个特征值的比率(较小特征值与较大特征值的比率)。将此比率与信噪比(SNR)阈值进行比较。如果比率小于阈值, 则信号包含“一个物体”, 或者如果比率大于阈值, 则信号包含“多于一个物体”。SNR阈值通过实验确定或者从雷达系统的性能中以数学方式导出。

[0073] 图9是方面方法900的流程图。方法900确定在距离-多普勒通道中是否多于一个物体。步骤902确定一组 2×1 矢量, 该组矢量不跨越(span)上文所述的发射器。然后在步骤904中根据该组矢量确定 2×2 相关矩阵。步骤906计算相关矩阵的特征值, 并且步骤908计算这些特征值的比率。步骤910基于特征值的比率与噪声阈值的比较来确定存在多于一个物体

(912) 还是一个物体 (914)。

[0074] 上文所述的示例技术针对图5的两个发射器 (2TX) 与四个接收器 (4RX) 架构。然而，本申请的各方面具有更广泛的适用性。在示例实施例的方面中，利用校正的虚拟阵列信号中的相位误差可以用在许多架构中。在 $2\text{TX} \times 4\text{RX}$ 的情况下，校正的虚拟阵列信号 S_c 的相位 P_c 中的误差(φ_{error})包括其最后4个元素中的 π 的附加相位。图7图示了FFT谱中的对应的误差特征。其他架构可以具有校正的虚拟阵列信号 S_c 的相位 P_c 中的不同的误差 Φ_{error} 并对应地在FFT谱中具有不同的特征。

[0075] 例如，图10示出具有包括4个TX天线 (1002-1至1002-4) 和8个RX天线 (1001-1至1004-8) 的另一架构的TDM-MIMO系统1000。系统1000在其他数据中检测物体1006的角度和速度。实际上，这种架构通常通过级联多个雷达芯片来实现，以增加TX/RX天线的可用性。

[0076] 使用4个TX天线和8个RX天线，校正的虚拟阵列信号将由 $8 \times 4 = 32$ 个样本组成。用于图10的架构的校正的虚拟阵列信号的理想相位是长度32的线性相位进展，如等式(10)所示：

$$P_c = [0 \ \varphi_a \ 2\varphi_a \ 3\varphi_a \ \dots \ 32\varphi_a] \quad (10)$$

[0077] 正方向上的偏移(即， $v > v_{\max}$)导致由等式(11)给出的以下错误 P_c ：

$$P_c = [0 \ \varphi_a \ 2\varphi_a \ 3\varphi_a \ 4\varphi_a \ 5\varphi_a \ 6\varphi_a \ 7\varphi_a (\pi/2) + 8\varphi_a (\pi/2) + 9\varphi_a (\pi/2) + 10\varphi_a (\pi/2) + 11\varphi_a (\pi/2) + 12\varphi_a (\pi/2) + 13\varphi_a (\pi/2) + 14\varphi_a (\pi/2) + 15\varphi_a \pi + 16\varphi_a \pi + 17\varphi_a \pi + 18\varphi_a \pi + 19\varphi_a \pi + 20\varphi_a \pi + 21\varphi_a \pi + 22\varphi_a \pi + 23\varphi_a (-\pi/2) + 24\varphi_a (-\pi/2) + 25\varphi_a (-\pi/2) + 26\varphi_a (-\pi/2) + 27\varphi_a (-\pi/2) + 28\varphi_a (-\pi/2) + 29\varphi_a (-\pi/2) + 30\varphi_a (-\pi/2) + 31\varphi_a] \quad (11)$$

[0078] 类似地，负方向上的偏移(即， $v < -v_{\max}$)导致由等式(12)给出的以下错误 P_c ：

$$P_c = [0 \ \varphi_a \ 2\varphi_a \ 3\varphi_a \ 4\varphi_a \ 5\varphi_a \ 6\varphi_a \ 7\varphi_a (-\pi/2) + 8\varphi_a (-\pi/2) + 9\varphi_a (-\pi/2) + 10\varphi_a (-\pi/2) + 11\varphi_a (-\pi/2) + 12\varphi_a (-\pi/2) + 13\varphi_a (-\pi/2) + 14\varphi_a (-\pi/2) + 15\varphi_a \pi + 16\varphi_a \pi + 17\varphi_a \pi + 18\varphi_a \pi + 19\varphi_a \pi + 20\varphi_a \pi + 21\varphi_a \pi + 22\varphi_a \pi + 23\varphi_a (\pi/2) + 24\varphi_a (\pi/2) + 25\varphi_a (\pi/2) + 26\varphi_a (\pi/2) + 27\varphi_a (\pi/2) + 28\varphi_a (\pi/2) + 29\varphi_a (\pi/2) + 30\varphi_a (\pi/2) + 31\varphi_a] \quad (12)$$

[0079] 图11的曲线图1100中示出 S_c 的FFT谱中的对应的特征。曲线1102是理想(无偏移)谱。曲线1104是 $v > v_{\max}$ 情况下的谱。曲线1106是 $v < -v_{\max}$ 情况下的谱。

[0080] 因此，方面方法更一般地描述如下：

[0081] 1. 估计横跨啁啾的相对速度诱导相位(φ_d)。

[0082] 2. 使用 Φ_d 校正虚拟阵列信号 S 的相位以生成校正的虚拟阵列信号 S_c 。

[0083] 3. 如果 $|v| > |v_{\max}|$ ，则 S_c 的相位 P_c 将具有误差(φ_{error})，该误差诱导 S_c 的谱中的特定特征。

[0084] 4. 对 S_c 执行FFT并分析谱以检测指示 $|v| > |v_{\max}|$ 的特征。

[0085] a. 附加检查可以涉及：将 S_c 元素与 $e^{-j\varphi_{\text{error}}}$ 的元素相乘，并对结果信号执行FFT以确定校正的 Φ_a 。

[0086] b. 对 S_c 执行附加计算以确定是否多个物体可能导致该特征。

[0087] 上文所述的技术在计算上是简单的。然而，如果距离-多普勒通道仅具有一个主要物体，则这些技术仅可以检测并校正速度混叠。在示例实施例的附加方面中，计算上更复杂

的可替代解决方案减轻了一些这种限制。如果N个物体在相同的距离-多普勒通道中，则校正的虚拟阵列信号 S_c 将理想地由N个复合音调组成，并且 S_c 的频谱理想地展现N个峰。然而，相对速度超过 v_{max} 的物体的存在将导致 Φ_d 的错误估计以及 S_c 的相位 P_c 中的必然误差(Φ_{error})。这通常表明其自身在 S_c 的频谱中的附加峰中。例如，对于图5的雷达架构， $\Phi_{error}=[0\ 0\ 0\ 0\ \pi\ \pi\ \pi]$ ，其对应于 S_c 的相位中的 π 的相位不连续性。图12的曲线图1200针对N=2的情况图示了该问题。如曲线1202中所示，由两个峰组成理想谱。由 $|v|>v_{max}$ 导致的错误谱包括附加峰。在曲线1204中针对N=2示出这种情况，曲线1204包括总共3个峰。在一个方面，当N=2时，错误状况由以下方式确定：

- [0091] 1. 对校正的虚拟阵列信号(S_c)执行谱分析。
- [0092] 2. 通过将 S_c 与 $e^{-j\Phi_{error}}$ 相乘来构造第二校正的虚拟阵列信号(S'_c)，其中 Φ_{error} 指的是相位误差矢量。另外，对 S'_c 执行谱分析。
- [0093] 3. 比较步骤1和步骤2中两个谱分析的结果。用于这种谱分析和比较的两种方法是可能的。
- [0094] 方法1(基于FFT的谱分析)：对 S_c 和 S'_c 执行FFT并估计每个谱中的峰的数量(诸如k和k')。如果k>k'，则表示误差状况(即存在一个或多个物体的 $|v|>v_{max}$)。实际上，由于FFT的限制长度、SNR考虑等，这种技术可能会有问题。一种更稳健的技术是下文所述的方法2。
- [0095] 方法2(基于特征值的分析)：使用基于特征值的技术估计对应于 S_c 和 S'_c 的物体的数量(诸如m和m')。如果m>m'，则表示误差状况(即存在一个或多个物体的 $|v|>v_{max}$)。在许多情况下，被估计的物体的数量(m和m')的比较可以用使用下文所述的 S_c 和 S'_c 计算的相关矩阵特征值的适当比较来代替。

- [0096] 以下是基于方法2的示例方法：
- [0097] 步骤1：通过以下方式查明距离-多普勒通道中存在的物体数量：(a) 使用对应于相同TX天线的 S_c 的所有连续三元组来计算3x3相关矩阵R，以及(b) 估计R的特征值，并且然后使用这些特征值的相对值估计物体的数量。如果确定物体的数量是1，则使用上文关于图1至图7所述的方法。如果确定物体的数量是2，则遵循下面的步骤。如果确定物体的数量大于2，则该方法终止而没有结果。

- [0098] 步骤2：令 $r_k = [s_k \ s_{k+1} \ s_{k+2}]$ 。计算由 $R = \sum_{k=1:6} r_k r_k^T$ 表示的 S_c 的3x3相关矩阵并计算R的特征值。 λ 等于这些特征值中的最小值。在计算 S_c 时可以使用平滑技术，诸如常规“前向-后向”平滑技术。

- [0099] 步骤3：使用上文步骤2的过程确定 S'_c 的相关矩阵R'。 λ' 等于R'的特征值中的最小值。

- [0100] 步骤4：计算比率 λ'/λ 并将其与两个阈值T1和T2进行比较，这两个阈值是针对特定雷达架构通过实验或数学方法确定的。

- [0101] . 如果 $\lambda'/\lambda > T1$ ，则不存在误差状况(即两个物体均具有小于 v_{max} 的速度)。
- [0102] . 如果 $T1 > \lambda'/\lambda > T2$ ，则物体中的一个具有大于 v_{max} 的速度。
- [0103] . 如果 $\lambda'/\lambda < T1$ ，则两个物体均具有大于 v_{max} 的速度。

- [0104] 在示例方面则中，集成电路包括至少两个端口，以及处理器，该至少两个端口被耦合以接收由至少两个发射器发射并从物体反射的多个啁啾。处理器被配置为：估计横跨从

发射器中的一个发射到端口中的一个的啁啾的速度诱导相移(φ_d)；选择由对应于每个发射器发射的啁啾(帧)的序列的每个端口所接收的信号的虚拟阵列矢量S；使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c ；对校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换以生成校正的虚拟阵列谱；以及分析校正的虚拟阵列谱以检测指示物体具有大于最大速度的绝对速度的特征。

[0105] 在另一示例方面中，处理器进一步被配置为使用对应于特征的相位误差矢量校正经校正的虚拟阵列矢量 S_c ，并对结果矩阵执行第二傅里叶变换以确定该特征是否从结果矩阵消除。

[0106] 在另一示例方面中，处理器进一步确定物体的正确速度。

[0107] 在又一示例方面中，使用以下公式确定正确速度： $v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c}$ ，其中 T_c 是啁啾周期

并且 λ 是啁啾的波长；以及 $v_{true} = v_{est} + 2v_{max}$ (如果 $v_{est} < 0$) 或 $v_{true} = v_{est} - 2v_{max}$ (如果 $v_{est} > 0$)，
其中 v_{true} 是正确速度并且 v_{max} 由公式 $v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$ 确定。

[0108] 在另一示例方面中，集成电路包括四个端口。

[0109] 在另一示例方面中，该集成电路进一步包括用于驱动至少两个发射器中的至少一个的电路。

[0110] 在另一示例中，处理器进一步通过分析 S_c 来确定特征是否由多个物体导致的。

[0111] 在又一示例方面中，一种方法通过在多个接收器上接收由至少两个发射器发射并从物体反射的啁啾的至少一个帧来确定雷达检测到的物体的速度是否大于最大速度。估计横跨从发射器中的一个发射到接收器中的一个的啁啾的速度诱导相移(φ_d)。选择由每个接收器接收的对应于由每个发射器发射的一个啁啾的信号的虚拟阵列矢量S。使用 Φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c 。对校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换以生成校正的虚拟阵列谱，并分析该校正的虚拟阵列谱以检测指示物体具有大于最大速度的绝对速度的特征。

[0112] 在另一方面中，使用对应于特征的相位误差矢量来校正经校正的虚拟阵列矢量 S_c ，并对结果矩阵执行第二傅里叶变换以确定特征是否从结果矩阵中消除。

[0113] 在另一方面中，确定物体的正确速度。

[0114] 在另一方面中，使用以下公式确定正确速度： $v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c}$ ，其中 T_c 是啁啾周期并且 λ

是啁啾的波长；以及 $v_{true} = v_{est} + 2v_{max}$ (如果 $v_{est} < 0$) 或 $v_{true} = v_{est} - 2v_{max}$ (如果 $v_{est} > 0$)，其中
 v_{true} 是正确速度并且 v_{max} 由等式 $v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$ 确定。

[0115] 又一示例具有四个接收器。

[0116] 另一方面通过分析 S_c 来确定特征是否由多个物体导致的。

[0117] 在另一方面中，雷达系统包括配置为发射多个啁啾的至少两个发射器。该系统还包括接收从物体反射的啁啾的至少两个接收器，以及处理器。该处理器被配置为：估计横跨

从发射器中的一个发射到接收器中的一个的啁啾的速度诱导相移(φ_d)；选择由每个接收器接收的对应于由每个发射器发射的啁啾(帧)的序列的信号的虚拟阵列矢量S；使用 φ_d 校正虚拟阵列矢量S的每个元素的相位以生成校正的虚拟阵列矢量 S_c ；对校正的虚拟阵列矢量 S_c 执行第一傅里叶变换以生成校正的虚拟阵列谱；以及分析该校正的虚拟阵列谱以检测指示物体具有大于最大速度的绝对速度的特征。

[0118] 在又一方面中，该处理器进一步配置为使用对应于特征的相位误差矢量来校正经校正的虚拟阵列矢量 S_c ，并对结果矩阵执行第二傅里叶变换以确定特征是否从结果矩阵中消除。

[0119] 在又一方面中，该处理器进一步确定物体的正确速度。

[0120] 在进一步方面中，使用以下等式确定正确速度： $v_{est} = \frac{\varphi_d \lambda}{4\pi T_c}$ ，其中 T_c 是啁啾周期并且 λ 是啁啾的波长；以及 $v_{true} = v_{est} + 2v_{max}$ (如果 $v_{est} < 0$) 或 $v_{true} = v_{est} - 2v_{max}$ (如果 $v_{est} > 0$)，其中 v_{true} 是正确速度并且 v_{max} 由等式 $v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$ 确定。

[0121] 在另一方面中，雷达系统包括四个接收器。

[0122] 在另一方面中，雷达系统包括四个发射器。

[0123] 在另一方面中，处理器进一步被配置为通过分析 S_c 来确定特征是否由多个物体导致的。

[0124] 所描述的示例方面的修改是可能的，并且在权利要求范围内，其他可替代配置也是可能的。

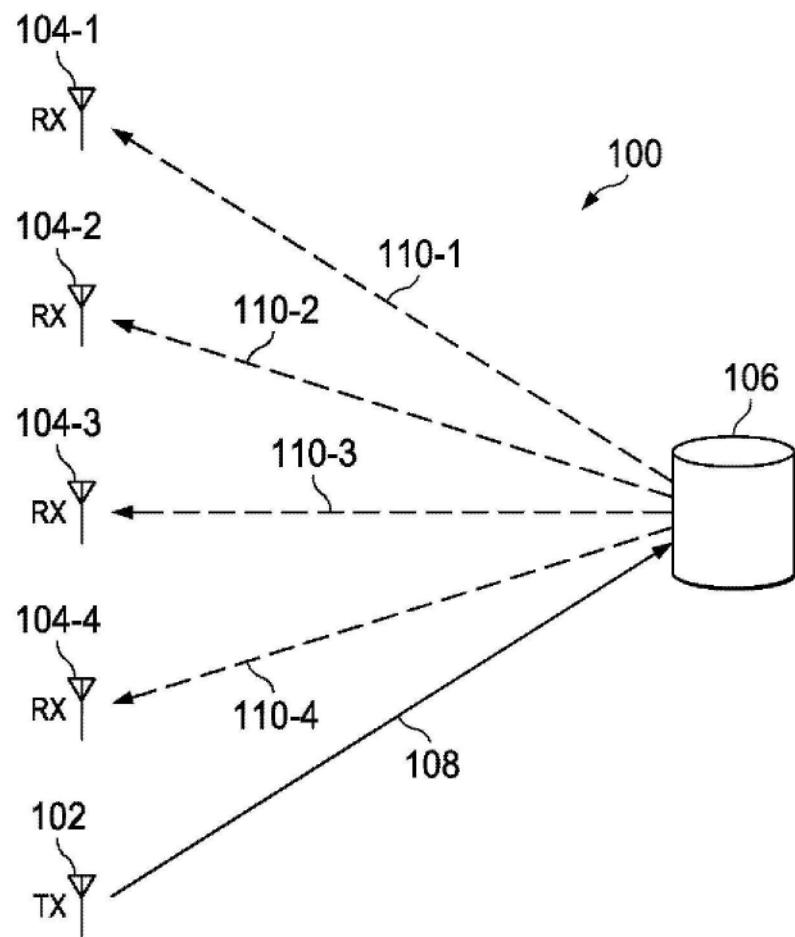


图1

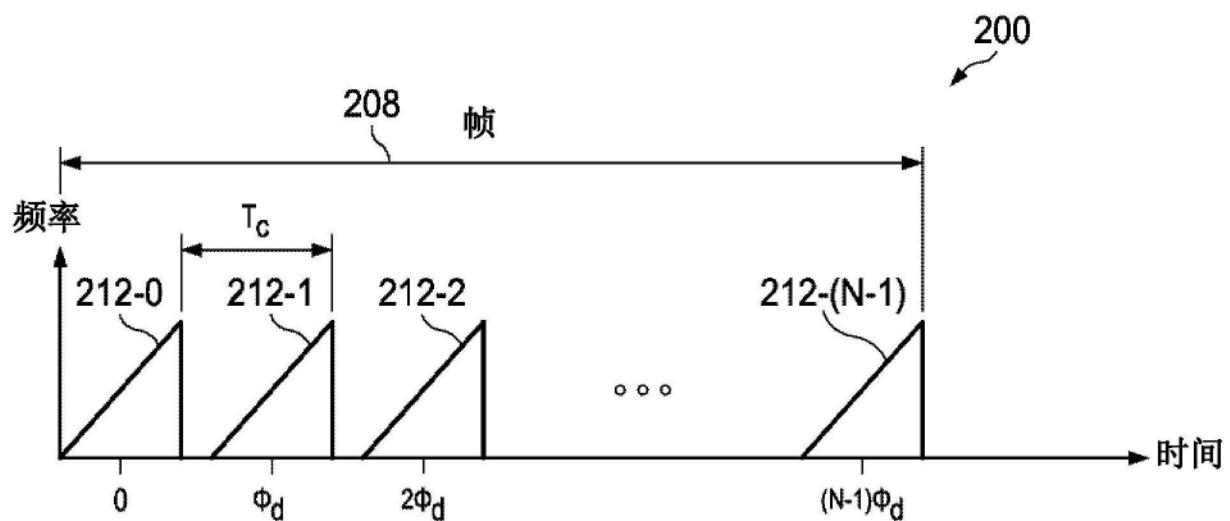


图2

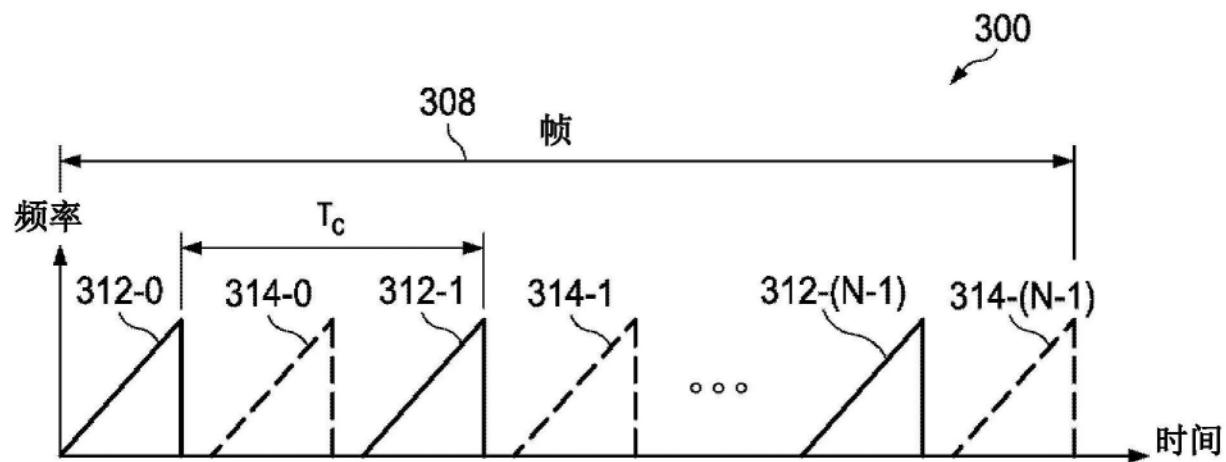


图3

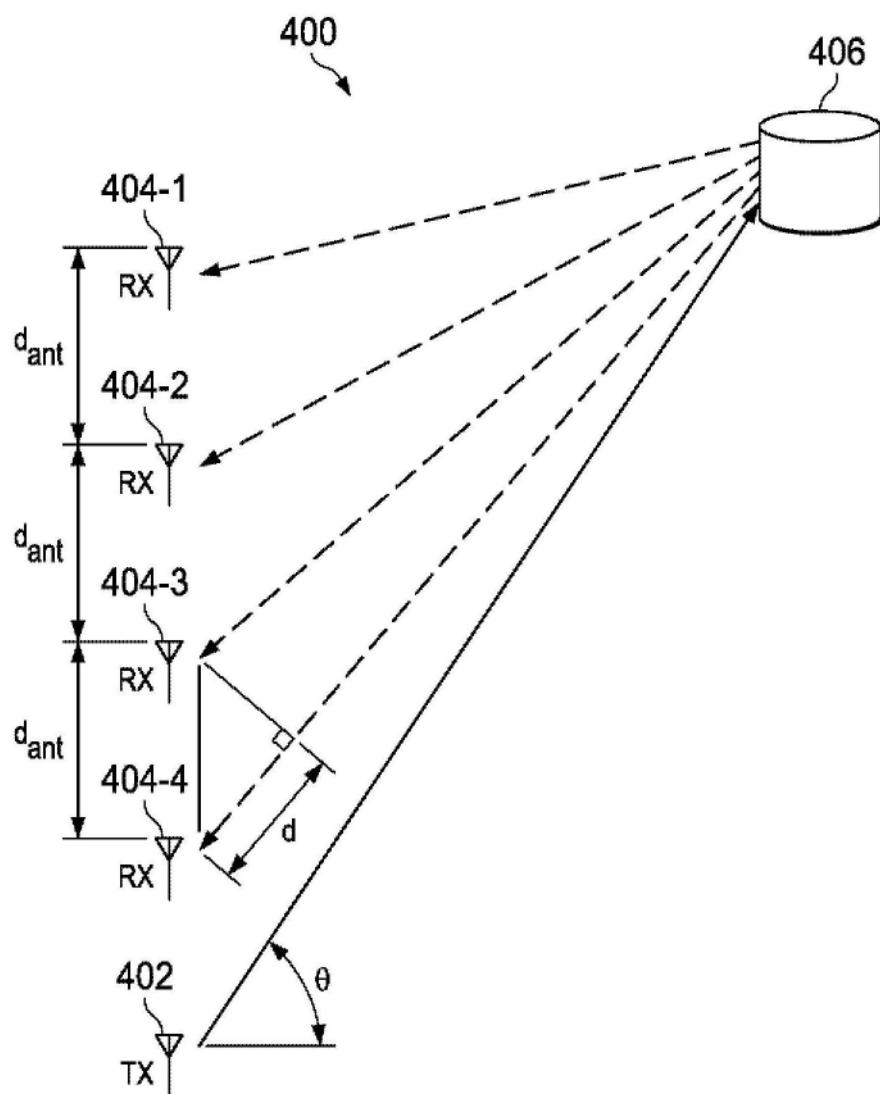


图4

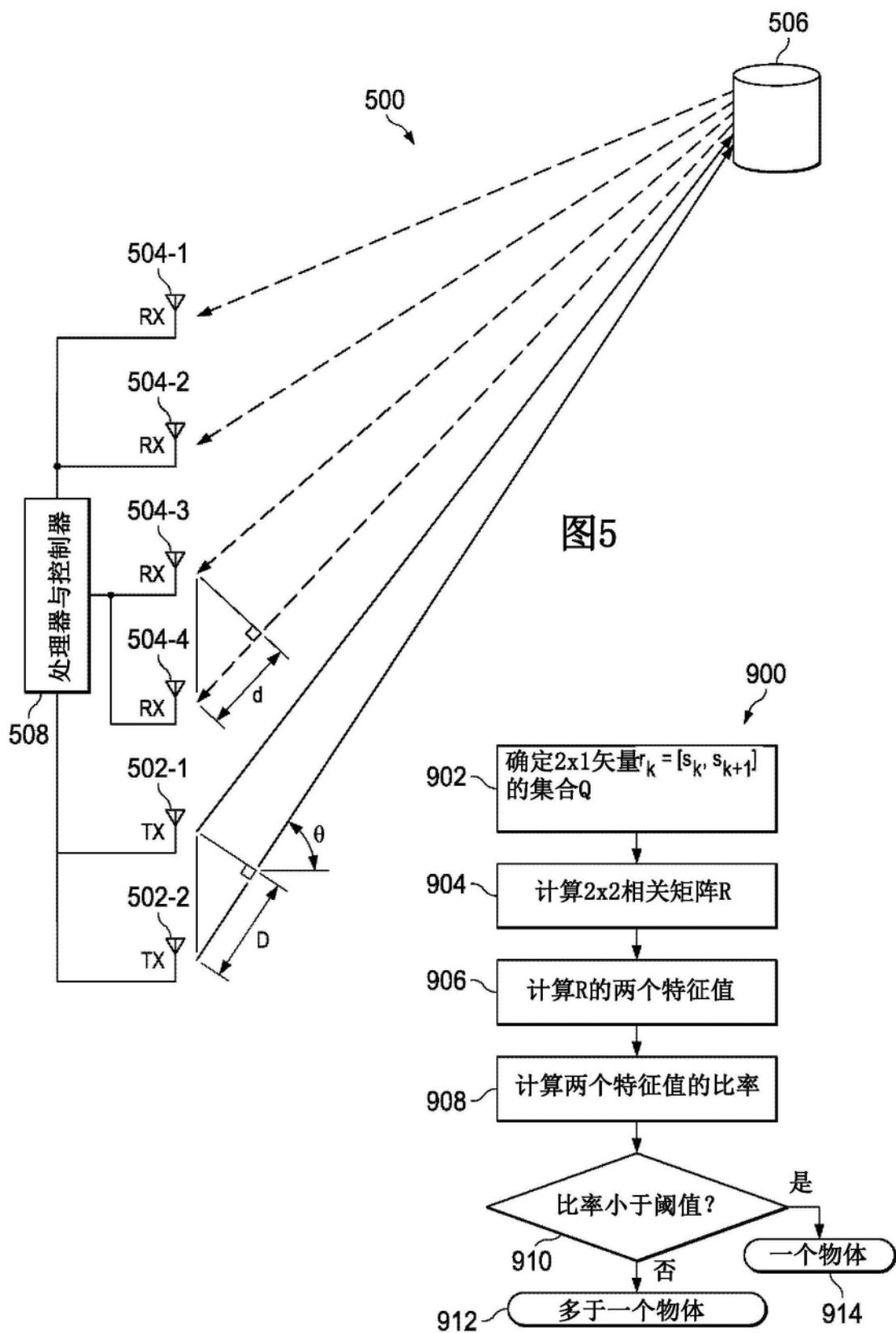


图9

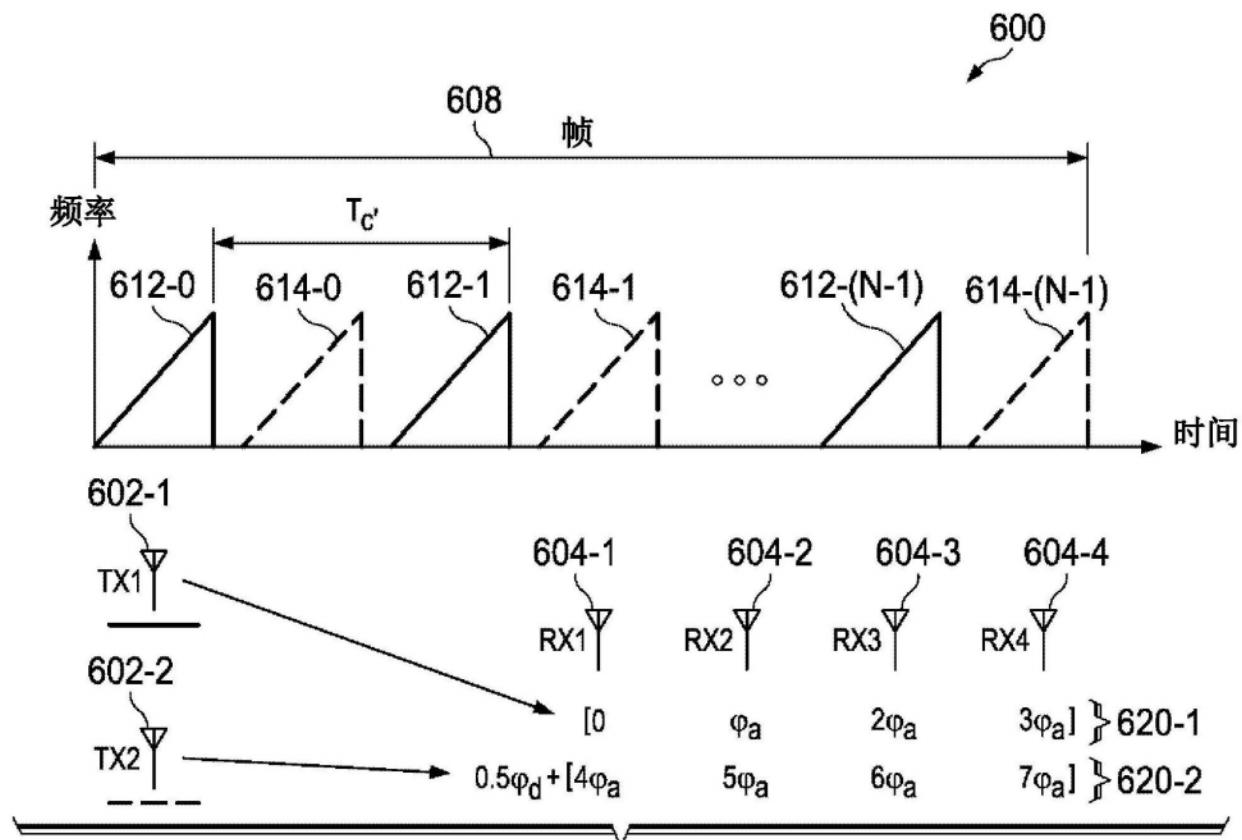


图6

图6

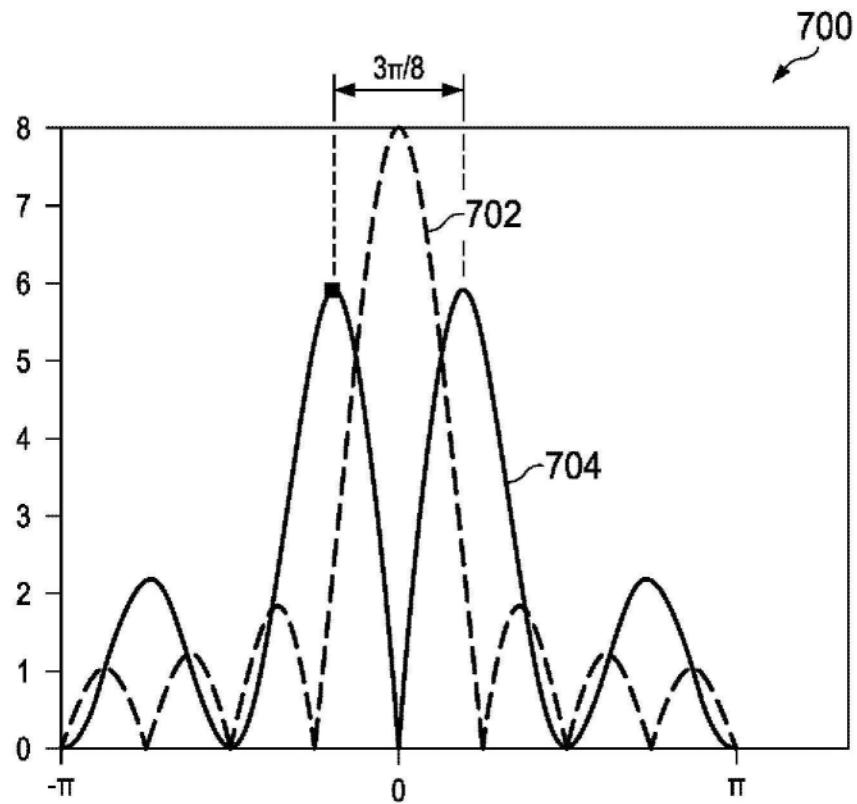


图7

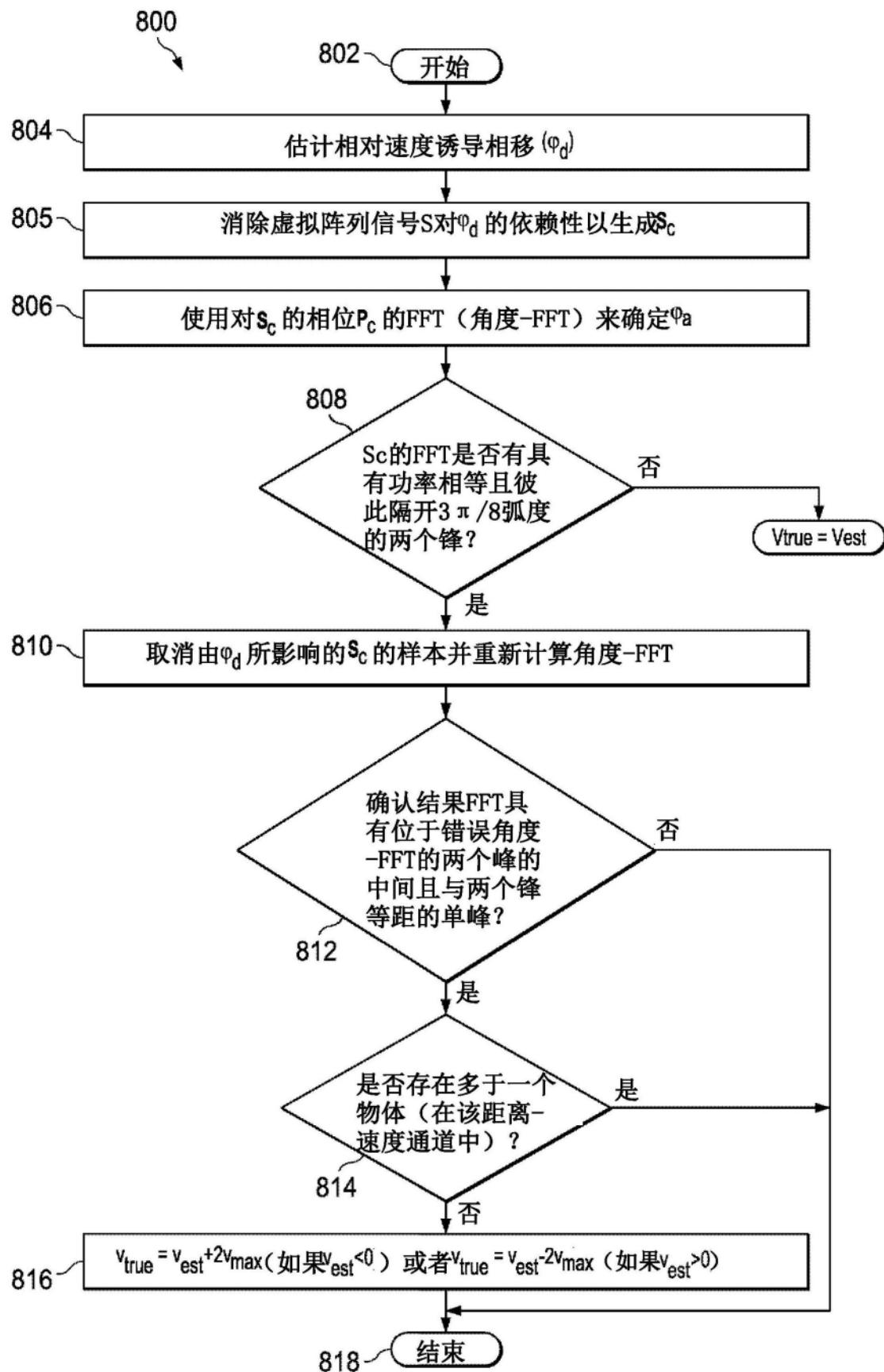


图8

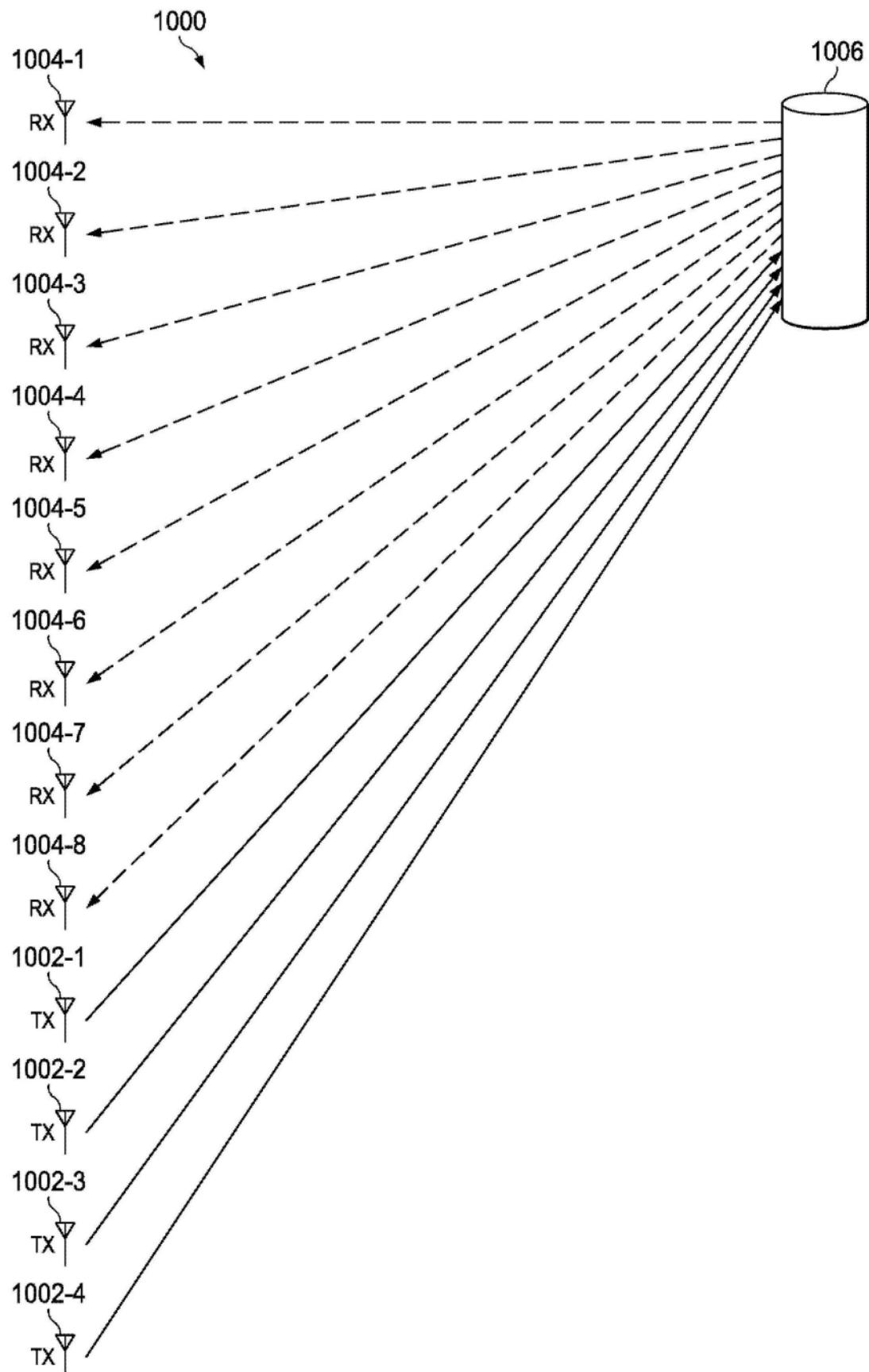


图10

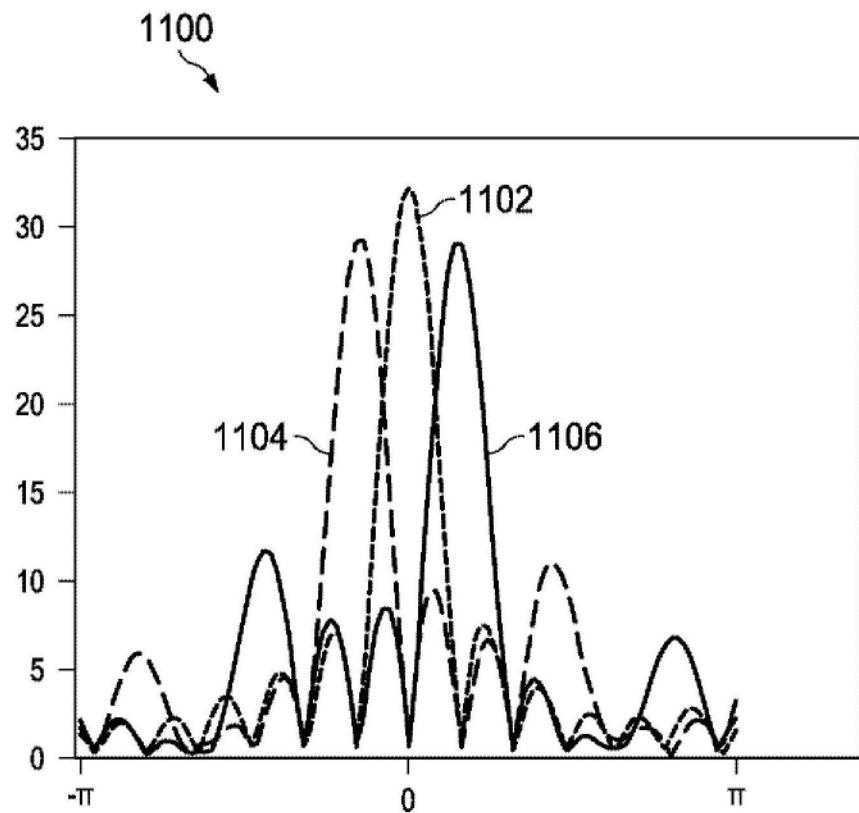


图11

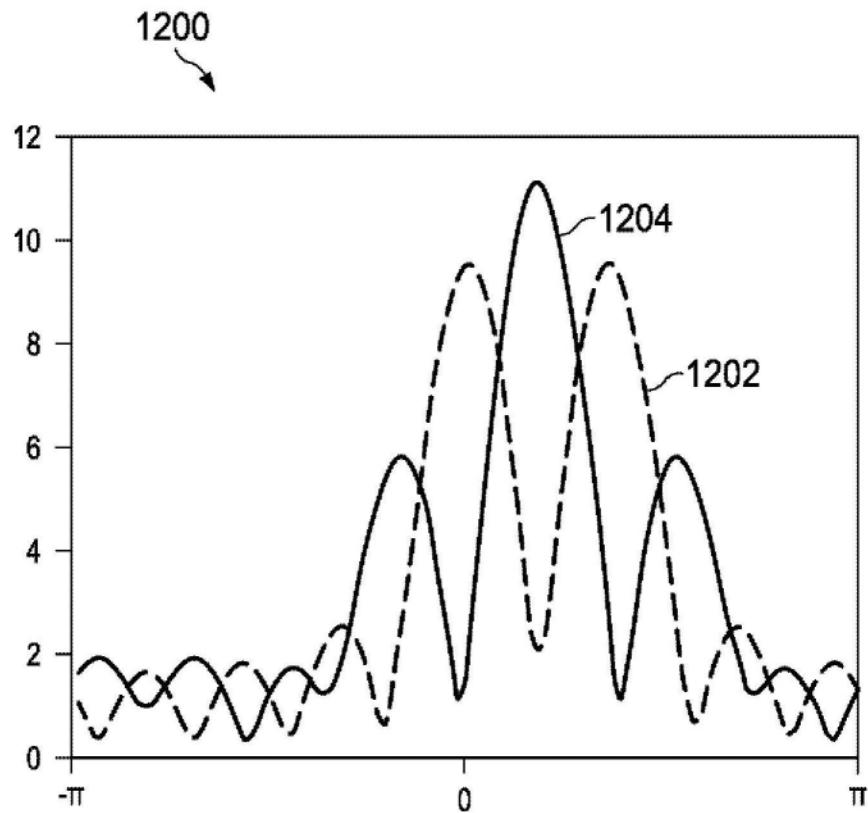


图12