



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105182327 A

(43) 申请公布日 2015. 12. 23

(21) 申请号 201510112466. 5

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2015. 03. 13

G01S 13/88(2006. 01)

(30) 优先权数据

14/213, 841 2014. 03. 14 US

(71) 申请人 科达海洋传感器有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 威廉·C·雷克托

唐纳德·E·巴里克

贝琳达·J·利帕

小赫克托·阿圭勒

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限

责任公司 11240

代理人 梁丽超 陈鹏

权利要求书3页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

具有多基地 FMCW 雷达的负伪距处理

(57) 摘要

本发明涉及具有多基地 FMCW 雷达的负伪距处理。本发明提供了一种用于监控水面目标的多基地雷达系统。该多基地雷达系统可以包括第一和第二雷达、状态机以及信号处理器。雷达可以位于分开的位置并且使用定时信号来同步。所述状态机可以被配置为使用定时信号确定每个雷达的射频信号调制的开始时间和结束时间。提供了负伪距的概念, 据此, 调制开始时间被配置为允许多达一半的雷达接收机具有伪负时间延迟, 从而使所述多基地回波检测翻倍。所述信号处理器可以被配置为同时接收和处理在雷达处接收的雷达信号的回波, 以确定所监控的水面目标的位置和速度矢量。



1. 一种用于监控水面目标的多基地雷达系统,包括:

(a) 第一雷达,包括第一发射机和第一接收机;

(b) 第二雷达,包括第二发射机和第二接收机,所述第一雷达和所述第二雷达位于分开的位置并且使用定时信号来同步,每个雷达被配置为发射雷达信号并且从另一个雷达接收雷达信号的回波;

(c) 状态机,被配置为使用所述定时信号确定每个雷达的射频信号调制的开始时间和结束时间,所述第二雷达的射频信号调制的开始时间偏离所述第一雷达的射频信号调制的开始时间;以及

(d) 信号处理器,被配置为同时接收和处理在所述第一雷达和所述第二雷达接收的雷达信号的回波,以确定所监控的水面目标的位置和速度矢量,其中,第一组位置和速度矢量根据在所述第一雷达处接收的由所述第二雷达发射的雷达信号的回波确定,其中,第二组位置和速度矢量根据在所述第二雷达接收的由所述第一雷达发射的雷达信号的回波确定。

2. 根据权利要求 1 所述的多基地雷达系统,包括被配置为多基地操作的 N 个雷达,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  是雷达 n 的射频信号调制的开始时间的延迟,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

其中,  $TP_{(n-1)}^{(n)}$  为雷达回波信号在雷达 n-1 与雷达 n 之间直接传播的时间,  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。

3. 根据权利要求 2 所述的多基地雷达系统,其中,雷达 n 从雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  被限定为:

$$t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

其中,在所述雷达回波的总时间延迟  $t_d$  为负时,在雷达 n 处接收的雷达回波的距离快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离内的雷达回波。

4. 根据权利要求 1 所述的多基地雷达系统,其中,所述第一雷达和所述第二雷达是以下中的一个:MF 雷达、HF 雷达、VHF 雷达以及 UHF 雷达。

5. 一种使用包括至少两个雷达的多基地雷达系统监控水面目标的方法,所述至少两个雷达中的每个都包括发射机和接收机,位于分开的位置并且使用定时信号来同步,所述方法包括:

使用所述定时信号确定用于所述至少两个雷达中的每个的射频信号调制的开始时间和结束时间;

根据所确定的开始时间和结束时间,从所述至少两个雷达的发射机发射雷达信号,第一雷达的射频信号调制的开始时间偏离第二雷达的射频信号调制的开始时间;以及

通过同时接收和处理在所述第一雷达和所述第二雷达处接收的雷达信号的回波,确定所监控的水面目标的位置和速度矢量,其中,第一组位置和速度矢量根据在所述第一雷达接收的由所述第二雷达发射的雷达信号的回波确定,其中,第二组位置和速度矢量根据在所述第二雷达接收的由所述第一雷达发射的雷达信号的回波确定。

6. 根据权利要求 5 所述的方法, 其中, 所述多基地雷达系统包括被配置为多基地操作的 N 个雷达, 其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  为雷达 n 的射频信号调制的开始时间的延迟, 其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$T_{(n)}^{(n-1)} > T_{p(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

其中,  $T_{p(n-1)}^{(n)}$  为雷达回波信号在雷达 n-1 与雷达 n 之间直接传播的时间, 并且  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其中, 雷达 n 从雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  被限定为:

$$t_d = T_{p(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

其中, 在所述雷达回波的所述总时间延迟  $t_d$  为负时, 在雷达 n 接收的雷达回波的距离快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离内的雷达回波。

8. 根据权利要求 5 所述的方法, 其中, 所述至少两个雷达是以下中的一个: MF 雷达、HF 雷达、VHF 雷达以及 UHF 雷达。

9. 一种用于监控水面目标的多基地雷达系统, 包括:

N 个双基地雷达, 每个双基地雷达包括发射机和接收机, 位于分开的位置并且使用定时信号来同步, 每个双基地雷达被配置为发射雷达信号并且从其它双基地雷达接收雷达信号的回波;

状态机, 被配置为使用所述定时信号确定每个双基地雷达的射频信号调制的开始时间和结束时间, 双基地雷达 n 的射频信号调制的开始时间偏离双基地雷达 n-1 的射频信号调制的开始时间; 以及

信号处理器, 被配置为同时接收和处理在所述 N 个双基地雷达接收的雷达信号的回波, 以确定所监控的水面目标的速度矢量, 其中, 第一组速度矢量根据在双基地雷达 n 处接收的由双基地雷达 n-1 发射的雷达信号的回波确定, 其中, 第二组速度矢量根据在双基地雷达 n-1 处接收的由双基地雷达 n 发射的雷达信号的回波确定;

其中, 所述 N 个双基地雷达被配置为多基地操作, 其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  为雷达 n 的射频信号调制的开始时间的延迟, 其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$T_{(n)}^{(n-1)} > T_{p(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

其中,  $T_{p(n-1)}^{(n)}$  为雷达回波信号在双基地雷达 n-1 与双基地雷达 n 之间直接传播的时间, 并且  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。

10. 根据权利要求 9 所述的多基地雷达系统, 其中, 双基地雷达 n 从双基地雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  被限定为:

$$t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

其中,在雷达回波的总时间延迟  $t_d$  为负时,在双基地雷达  $n$  接收的雷达回波的距离快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离内的雷达回波。

## 具有多基地 FMCW 雷达的负伪距处理

[0001] 版权声明

[0002] 本专利文档的公开内容的一部分包含受到版权保护的材料。由于专利文档或专利公开出现在专利与商标局的专利文件或记录中,版权所有人不反对任何人对本专利文档或专利公开进行传真复制,但除此之外保留所有版权。

### 背景技术

[0003] 在 MF、HF、VHF 以及 UHF 频带内操作的低频后向散射雷达系统广泛地用于测绘 (map) 和监控水面目标,例如,海洋上的海流、船舶以及波浪或者沿着河流的水流。作为国家海洋与大气管理局 (NOAA) 的美国综合海洋观测系统 (IOOS) 项目的一部分,大约 150 个这种 HF/VHF 雷达目前沿着美国海岸进行操作,并且这种系统将数据输出给公共网站 (hfradar.ndbc.noaa.gov)。现在,几个其他国家在其海岸上具有这种雷达网络。在这些海洋雷达中总共至少有 400 个雷达部署在全世界并且进行操作。

[0004] 通常需要至少两个后向散射雷达来测绘海流,这是因为每个雷达仅仅测量标量径向向量分量,并且需要来自两个方向的视图来为地图构造整个 2D 矢量。这些标量速度基于将已知的 Bragg 波浪速度和未知的海流速度分开的多普勒原理。在船舶目标的情况下,由单个雷达测量其位置和径向速度,但是来自两个雷达的视图提供了增大检测稳健性的优点。

[0005] 从发射与接收回波间的时间延迟获得与目标或散射单元相距的范围或距离,与在所有雷达中的情况一样。在运行中的海洋雷达如今使用 FMCW 信号 (频率调制的连续波),并且通过引用结合于此的 1992 年 2 月 28 日提交的题为“Gated FMCW DF radar and signal processing for range/doppler/angle determination”的共同受让的美国专利号 5,361,072 显示了从这些信号获得目标距离的方式。在距离处理之后,对每个距离单元的复合 (真实的和虚构的) 回波时间序列进行傅里叶变换,以在几个接收天线或部件间获得多普勒频谱和 / 或交叉频谱。此时,从信号中提取回波目标 (海流或船舶) 的速度及其方位。一个合适的并且广泛使用的方位确定算法是多重信号分类 (MUSIC),在通过引用结合于此的 1997 年 8 月 29 日提交的名称为“Radar angle determination with MUSIC direction finding”的共同受让的美国专利号 5,990,834 中描述的测向 (DF) 技术。这个后向散射雷达在极坐标系统中进行其测量,其中,极式图上在覆盖范围内的每个点处的径向海流速度由各雷达测量。

[0006] 由于在极坐标中单个雷达测量单个径向向量分量,所以通常,成对地使用相距几万公里并且独立地操作的两个后向散射雷达系统。基于相互观察的散射单元的已知的几何形状和位置,两个产生的径向速度分量组合,以在重叠的覆盖区域上产生总速度矢量图。因此,传统系统的一个缺点是需要多个昂贵的反向散射雷达系统,用于海流测绘以及稳健的船舶监视。

[0007] 在海岸雷达的网络中,通过这些系统合成为稳定时基并且多基地操作这些系统,可以获得给定数量的后向散射雷达的更大数据覆盖和稳健性。在 2003 年 10 月 27 日提

交的名称为“Ocean surface current mapping with bistatic HF radar”的共同受让的美国专利号 6,774,837 中讨论了用于该系统的方法,该专利通过引用结合于此。一个反向散射雷达的发射机照亮(例如)由波浪或船舶目标散射的海洋表面,并且作为回波返回到一个不同的反向散射接收机中。虽然因此双基地进行操作,但是每个雷达继续以其正常的反向散射模式同时接收回波。通常使用的方便便宜的多基地同步方法使用 GPS 卫星信号的稳定时基;该技术通过控制的方式时间多路传输每个雷达的 FMCW 调制扫描的开始时间,以便在解调制之后,它们的目标回波明显地并且有效地分开,从而不彼此干扰。在 2002 年 8 月 28 日提交的题为“Multi-station HF FMCW radar frequency sharing with GPS time modulation multiplexing”的共同受让的美国专利号 6,856,276 中对此进行了讨论,该专利通过引用结合于此。

[0008] 在这个多基地配置中具有双基地雷达对的独特性和不对称性。例如,在发射机-接收机信号之后具有恒定时间延迟的回波不落在圆圈上,与在反向散射雷达内一样。这些回波落在具有发射机和接收机的椭圆形内作为焦点。这个对的标量数据发生在椭圆形坐标系内而非后向散射雷达的极坐标系内。而且,使用这个多基地配置,在被配置为估计与回波构成的角度的接收天线处,依然测量海洋雷达的方位。发射机具有全方向辐射,泛光照明覆盖区域。这是在数据数量、质量以及稳健性方面有利于椭圆的接收机端部的不对称。

[0009] 在具有彼此重叠的目标覆盖的包括 N 个后向散射雷达的海岸网络中,基于在上述美国专利号 6,774,837 中描述的常规做法,在多基地进行操作并且根据传统时间延迟测量

回波距离时,可以看到  $\frac{(N+1) \cdot N}{2}$  次目标。如果雷达以传统的单基地(后向散射)模式操作,那么与之相比仅为 N。在大 N 的限制下,先前的传统多基地操作提供  $N^2/2$  次目标测量。

[0010] 因此,需要在以下方面进行改进:从上面讨论的传统多基地操作扩大测量数量,并且去除有利于双基地对几何的接收机端的不对称性。

## 发明内容

[0011] 一方面,本发明的特征在于一种用于监控水面目标的多基地雷达系统。雷达系统包括:第一雷达、第二雷达、状态机以及信号处理器。第一和第二雷达均包括发射机和接收机,位于分开的位置并且使用定时信号来同步。每个雷达被配置为发射雷达信号并且从另一个雷达接收雷达信号的回波。状态机被配置为使用定时信号确定每个雷达的射频信号调制的开始时间和结束时间,第二雷达的射频信号调制的开始时间偏离所述第一雷达的射频信号调制的开始时间。信号处理器被配置为同时接收和处理在第一雷达和第二雷达处接收的雷达信号的回波,以确定所监控的水面目标的位置和速度矢量,其中,第一组位置和速度矢量根据在第一雷达处接收的由第二雷达发射的雷达信号的回波确定,其中,第二组位置和速度矢量根据在第二雷达处接收的由第一雷达发射的雷达信号的回波确定。

[0012] 本发明的各种实现方式可以包括一个或多个以下特征。多基地雷达系统可以包括被配置为多基地操作的 N 个雷达,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  是雷达 n 的射频信号调制的开始时间的

延迟,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$[0013] \quad T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

[0014] 其中,  $TP_{(n-1)}^{(n)}$  为雷达回波信号在雷达 n-1 与雷达 n 之间直接传播的时间,  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。在这些实现方式中, 雷达 n 从雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  可以限定为:

$$[0015] \quad t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

[0016] 其中, 在雷达回波的总时间延迟  $t_d$  为负时, 在雷达 n 处接收的雷达回波的距离 (range, 范围) 快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离 (negative range) 内的雷达回波。

[0017] 多基地雷达系统的第一和第二雷达可以是以下中的一个: MF 雷达、HF 雷达、VHF 雷达以及 UHF 雷达。可以由全球定位系统 (GPS) 或者由以下中的一个提供定时信号: 铷驯服振荡器 (rubidium-disciplined oscillator)、恒温晶体振荡器 (oven-controlled crystal oscillator) 以及提供相同功能的相似的稳定时基。

[0018] 另一方面, 本发明的特征在于一种使用包括至少两个雷达的多基地雷达系统监控水面目标的方法。所述至少两个雷达中的每个包括发射机和接收机, 并且该至少两个雷达位于分开的位置并且使用定时信号来同步。该方法包括: 使用定时信号确定用于所述至少两个雷达中的每个的射频信号调制的开始时间和结束时间。该方法进一步包括根据所确定的开始和结束时间, 从该至少两个雷达的发射机发射的雷达信号, 第一雷达的射频信号调制的开始时间偏离第二雷达的射频信号调制的开始时间。该方法进一步包括通过同时接收和处理在第一和第二雷达处接收的雷达信号的回波, 确定所监控的水面目标的位置和速度矢量, 其中, 第一组位置和速度矢量根据在第一雷达处接收的由第二雷达发射的雷达信号的回波确定, 其中, 第二组位置和速度矢量根据在第二雷达接收的由第一雷达发射的雷达信号的回波确定。

[0019] 本发明的各种实现方式可以包括一个或多个以下特征。对于上述方法, 多基地雷达系统可以包括被配置为多基地操作 N 个雷达, 其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  为雷达 n 的射频信号调制的开始时间的时间延迟, 其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$[0020] \quad T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

$$[0020] \quad T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

[0021] 其中,  $TP_{(n-1)}^{(n)}$  为在雷达 n-1 与雷达 n 之间直接传播的雷达回波信号的时间, 并且  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。雷达 n 从雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  可以限定为:

$$[0022] \quad t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

[0023] 其中, 在雷达回波的总时间延迟  $t_d$  为负时, 在雷达 n 接收的雷达回波的距离快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离内的雷达回波。

[0024] 在上述方法的实现方式中,所述至少两个雷达可以是以下中的一个:MF 雷达、HF 雷达、VHF 雷达以及 UHF 雷达。可以由全球定位系统 (GPS) 或者由以下中的一个提供定时信号:铷驯服振荡器、恒温晶体振荡器以及提供相同功能的相似的稳定时基。

[0025] 另一方面,本发明的特征在于一种计算机程序产品,其包括永久性计算机可读储存介质,在所述介质上提供用于使用包括至少两个雷达的多基地雷达系统监控水面目标的程序指令,所述至少两个雷达中的每个包括发射机和接收机,位于分开的位置并且使用定时信号来同步。所述指令包括用于使用定时信号确定用于所述至少两个雷达中的每个的射频信号调制的开始时间和结束时间的代码。所述指令进一步包括用于根据所确定的开始时间和结束时间,从所述至少两个雷达的发射机发射雷达信号的代码,第一雷达的射频信号调制的开始时间偏离第二雷达的射频信号调制的开始时间。所述指令进一步包括用于通过同时接收和处理在第一和第二雷达处接收的雷达信号的回波,确定所监控的水面目标的位置和速度矢量的代码,其中,第一组位置和速度矢量根据在第一雷达处接收的由第二雷达发射的雷达信号的回波确定,其中,第二组位置和速度矢量根据在第二雷达处接收的由第一雷达发射的雷达信号的回波确定。

[0026] 计算机程序产品的各种实现方式可以包括一个或多个以下特征。多基地雷达系统可以包括被配置为多基地操作的 N 个雷达,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  为雷达 n 的射频信号调制的开始时间的时间延迟,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$[0027] \quad T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

[0028] 其中,  $TP_{(n-1)}^{(n)}$  为在雷达 n-1 与雷达 n 之间直接传播的雷达回波信号的时间,并且  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。雷达 n 从雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  可以限定为:

$$[0029] \quad t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

[0030] 其中,在雷达回波的总时间延迟  $t_d$  为负时,在雷达 n 接收的雷达回波的距离快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离内的雷达回波。

[0031] 在计算机程序产品的实现方式中,该至少两个雷达可以是以下中的一个:MF 雷达、HF 雷达、VHF 雷达以及 UHF 雷达。可以由全球定位系统 (GPS) 或者由以下中的一个提供定时信号:铷驯服振荡器、恒温晶体振荡器以及提供相同功能的相似的稳定时基。

[0032] 另一方面,本发明的特征在于一种用于监控水面目标的多基地雷达系统。该雷达系统包括 N 个双基地雷达、状态机以及信号处理器。N 个双基地雷达中的每个包括发射机和接收机,位于分开的位置并且使用定时信号来同步。每个双基地雷达被配置为发射雷达信号并且从另一个双基地雷达中接收雷达信号的回波。状态机被配置为使用定时信号确定每个双基地雷达的射频信号调制的开始时间和结束时间,双基地雷达 n 的射频信号调制的开始时间偏离双基地雷达 n-1 的射频信号调制的开始时间。信号处理器被配置为同时接收和处理在所述 N 个双基地雷达接收的雷达信号的回波,以确定所监控的水面目标的速度矢



量,其中,第一组速度矢量根据在双基地雷达 n 接收的由双基地雷达 n-1 发射的雷达信号的回波确定,其中,第二组速度矢量根据在双基地雷达 n-1 接收的由双基地雷达 n 发射的雷达信号的回波确定。所述 N 个双基地雷达被配置为多基地操作,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  为雷达 n 的射频信号调制的开始时间的延迟,其中,  $T_{(n)}^{(n-1)}$  被限定为:

$$[0033] \quad T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$$

[0034] 其中,  $TP_{(n-1)}^{(n)}$  为雷达回波信号在双基地雷达 n-1 与双基地雷达 n 之间直接传播的时间,并且  $t_{(n-1),e}$  为雷达 n-1 的雷达回波超过直接传播的雷达回波信号的接收的时间延迟。

[0035] 本发明的各种实现方式可以包括一个或多个以下特征。双基地雷达 n 从双基地雷达 n-1 接收的雷达回波的总时间延迟  $t_d$  可以限定为:

$$[0036] \quad t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e}$$

[0037] 其中,在雷达回波的总时间延迟  $t_d$  为负时,在双基地雷达 n 接收的雷达回波的距离快速傅里叶变换 (FFT) 的展开产生落在距离 FFT 的负距离内的雷达回波。

[0038] 本发明可以包括一个或多个以下优点。对于一个优点,根据本发明的一对双基地雷达可以使这对的两个雷达用作接收机,而非仅仅一个。这消除了在前面讨论的先前多基地操作中固有的不对称性,并且使通过使用这两个雷达的双基地回波输出的双基地信息的量翻倍。而且,在很多情况下,本发明可以扩大一对双基地雷达的覆盖面积,允许更有效地使用雷达。本发明的另一个优点在于,由于信息量翻倍,所以提高了回波参数的精度,包括位置和速度。而且,冗余补偿了在一个雷达地址的几种硬件故障。

[0039] 在本发明的以下说明书以及通过实例说明本发明的原理的附图中,更详细地提出了本发明的这些和其他特征和优点。

## 附图说明

[0040] 参照结合说明本发明的具体实施方式的附图进行的以下描述,可以最佳地理解本发明。

[0041] 图 1 为根据本发明的一个实施方式的示出由在彼此之间以多基地操作使用的多个雷达接收的 GPS 卫星定时信号的方框图;

[0042] 图 2 为包括用于发射雷达信号的发射机模块和接收雷达信号的接收机模块的双基地雷达的示例性方框图;

[0043] 图 3 为包括正距离和负距离的在多基地雷达内占据的距离空间的图示;

[0044] 图 4A 为根据先有技术由以正距离模式操作的一对雷达产生的输出双基地海洋表面海流地图的一个实例;

[0045] 图 4B 为由本发明的一个实施方式得到的以负距离模式操作的一对雷达产生的输出双基地海洋表面海流地图的一个实例。

## 具体实施方式

[0046] 现在,详细参照本发明的一些具体实施方式,包括用于执行本发明的发明人预期的最佳模式。在附图中说明了这些具体实施方式的实例。虽然结合这些具体实施方式描述了本发明,但是要理解的是,本发明并非旨限于所描述的实施方式。相反,其目的在于,覆盖在由所附权利要求限定的本发明的精神和范围内可以包含的替换物、修改以及等同物。

[0047] 本发明是在水体上或附近操作以测绘表层流或者检测舰船目标的双基地或多基地 FMCW 雷达的新型扩展。多基地雷达操作表示“n”个雷达的双基地配对的组合。这些共同同步,以便其信号是相干信号。

[0048] 本发明提供了一种传统的双基地海流测绘和舰船检测的增强改进。本发明通过允许在椭圆形的焦点处的两个系统用于发射和接收(而不是仅一个),使得用于双基地雷达对的信息量翻倍。这通过介绍“负距离”(或到目标的负时间延迟)的概念来完成,HF 雷达使用的 FMCW(调频连续波)信号能够这样做。这通过在雷达接收机中进行数字化之后进行的信号处理来实现。

[0049] 本发明提供了一种算法以及所产生的计算机程序产品,其允许捕获迄今未知的一对雷达的第二单元的双基地回波。这产生了独立于第一组的第二组海流矢量或舰船检测,使从双基地对中可获得的信息量翻倍。

[0050] 提供了一种具有多个用于发射雷达信号并且接收其回波的发射机和接收机的多基地雷达系统。在最普通的配置中,在每个物理雷达位置中,包括发射机和接收机。在一个位置的发射机和接收机在每个站点生成其信号,但是其本地振荡器在不同站点之间(例如)由共同的全球定位系统(GPS)时基共同锁定或同步。然而,本发明包含完成上面由 GPS 例证的同步的时间的任何方法。这在所有发射机与接收机之间提供了相干性,在美国专利号 6,856,276 中进行了描述。

[0051] 背离现有技术,本发明揭示了如何才能配置 FMCW 调制开始时间才能使得除了雷达 1 从雷达 2 的发射机捕获回波以外,雷达 2 的接收机还从雷达 1 的发射机捕获回波。这涉及作为多基地信息源的到目前为止忽视的“负距离”或“负时间延迟”的概念。

[0052] 图 1 为示出根据本发明的一个实施方式的由在彼此之间以多基地操作使用的“n”个雷达 130、132、134 接收 GPS 卫星定时信号 110、112、114 的方框图。这个实施方式使用 GPS(全球定位系统)卫星 100 网络的精确定时信号 110、112、114 来训练各个(individual)雷达 130、132、134 的振荡器,以便其信号在彼此之间保持稳定地同步,实现大约  $10^{12}$  的稳定性。这允许分开由多个雷达的发射机的发射同时生成的在一个雷达接收机内可见的多个回波信号。在图 1 中,来自 GPS 卫星 100 的定时信号 110、112、114 被示为由雷达天线(A) 120、122、124 接收。

[0053] 雷达 130、132、134 可以沿着海岸、在岛上或者在海上平台上定位。雷达以表面波模式操作,表示垂直偏振信号由于附在海洋或水面上而传播,并且可以实现到和从目标散射体超过可见视野的距离。定位这些雷达,以便能够进行多基地操作的多于一个雷达(在本例中,“n”个雷达)可以看见相同的目标点。雷达 130、132、134 通常包括发射机和接收机。雷达使用直接信号合成器(DDS)或其他稳定数字波形生成方法,来产生波形,传输该波形,并且该波形还用于解调由其自身的发射机以及多基地操作模式的其他发射机产生的回波信号。由于所有雷达一直进行操作,所以同时接收和处理这多个回波。

[0054] 图 2 为包括用于发射雷达信号的发射机模块 250 和接收雷达信号的接收机模块 200 的双基地雷达 20 的示例性方框图。如图所示,矩形方框 210、220、230 是硬件功能,而尖角方框 242、246 表示数字计算机处理功能。

[0055] 接收机 200 接收并解码雷达信号或回波,将经解调、过滤、数字化的信号 232 提供给信号处理器 240,该处理器从所接收的回波中提取信息,以由所接收的回波生成速度矢量。在图 2 中,信号处理器 240 位于雷达 20 内。然而,在其他实现方式中,信号处理器 240 可以位于远离雷达 20 的不同位置,并且数字化信号 232 可以发送给其远程位置的信号处理器。接收机可以包括接收天线 204、混合器和斜坡解调器 210、一个或多个低通滤波器 220 以及模数 (A/D) 转换器 230。信号处理器 240 可以包括通用数字计算机,该计算机根据本发明被编程为处理源自雷达回波波的信息,以确定并显示关于海洋状况的信息。通常,信号处理器 240 包含处理信息的几个部件或级,该处理包括距离快速傅里叶变换 242 和多普勒快速傅里叶变换 246。

[0056] 更具体而言,将射频信号 208 ( $v_{RF}$ ) 从接收天线 204 输入左边的混合器 210 中,射频信号 208 ( $v_{RF}$ ) 包含由 FMCW 信号的线性频率扫描特征调制的回波 (后向散射和多基地)。这可以写为以下方程:

$$[0057] \quad v_{RF} = A(t) \cos \left[ 2\pi \left( f_o(t-t_d) - \frac{\Delta(t-t_d)^2}{2} + \varphi(t) \right) \right] \quad (\text{方程 1}),$$

[0058] 其中,  $t_d$  是回波的时间延迟 (包括任何有目的的扫描开始时间偏移);  $f_o$  是中心载波频率;  $A(t)$ ,  $\varphi(t)$  是表示由其运动进行多普勒频移的缓慢移动的海洋回波或舰船信号的幅度和相位量;  $\Delta$  是以 Hz/秒为单元的线性 FMCW 扫描速率。在  $\Delta$  前面的减号表示向下扫描,即,频率在开始时高,并且在结束时低。这与在开始时低并且在结束时高的向上扫描形成对比。这个方程在单个扫描周期  $T_s$  内有效,即,使得时间  $t$  落在  $-\frac{T_s}{2} \leq t \leq +\frac{T_s}{2}$  之间。

[0059] 在具有 I/Q (同相和正交) 通道的标准混合器 210 中,本地振荡器 (LO) 信号 214 ( $v_{ILO}$ )、216 ( $v_{QLO}$ ) 通过下面的输入描述。这些信号是:

$$[0060] \quad v_{ILO} = \cos \left[ 2\pi \left( f_o t - \frac{\Delta t^2}{2} \right) \right] \quad (\text{方程 2})$$

[0061] 以及

$$[0062] \quad v_{QLO} = \sin \left[ 2\pi \left( f_o t - \frac{\Delta t^2}{2} \right) \right] \quad (\text{方程 3})$$

[0063] 由数字合成器 266 的本地振荡器 (未显示) 提供本地振荡器信号 214、216,在这个实现方式中,该数字合成器 266 由通过 GPS 天线 260 在 GPS 接收机 262 接收的 GPS 信号训练和同步。在一个实现方式中,GPS 卫星的可见星群的信号撞击 GPS 天线 260 并且进入 GPS 接收机 262 内。GPS 接收机 262 具体被设计为从 GPS 信号中提取时间信息,与传统的 GPS 接收机的更普通的位置信息形成对比。为了提供精确的位置信息,各个 (individual, 单独的)

卫星携带在彼此之间以几纳秒的精密度与准确度同步的定时信号。在一个实现方式中,可以按一秒间隔将这些定时信号发送给地球。定时信号通过锁相振荡器(未显示)和时钟发生器(也未显示)馈送给雷达 20 的状态机 264,并且在一些实现方式中,馈送给数字合成器 266,如通常在美国专利号 6,856,276 中所述。

[0064] 状态机 264 可以生成打开和关闭发射机输出信号及接收机输入信号的信号,以便它们不同时打开。在不需要时,还打开和关闭在系统中的各个点处进一步抑制、发射或接收信号的开关或门。还可以确定雷达 20 的线性频率扫描调制的开始时间和结束时间。在通过公共 GPS 定时同步的不同雷达中的扫描开始时间可以偏移,以便将来自每个雷达的本地海洋回波信息分开,使得它们不彼此干扰。

[0065] 数字合成器 266 可以包括:本地振荡器(未显示),用于生成载波频率或波浪;以及信号,用于调制载波以产生由雷达 20 的发射机 250 发射的雷达信号。然后,经调制的雷达信号可以从数字合成器 266 穿过发送放大器或功率放大器(P/A) 254,并且从发射天线 252 辐射。发射天线可以被配置为提供方位角通常在 120 度与 360 度之间的宽光束,照亮大面积的海洋或水,需要涉及海洋或水的关于海洋状况的信息。

[0066] 返回混合器和斜坡解调器 210,混合处理通过在 LO 信号上包括扫描来解调回波信号,如上面所示。然后,低通滤波这些信号,如通过图 2 的第二方框功能 220 所表示的。这去除了第二(以及更高的)谐波和带外距,以便到 A/D 转换器 230 的输入 222( $v_{Ib}$ )、224( $v_{Qb}$ )为:

$$[0067] \quad v_{Ib} = \frac{A(t)}{2} \cos[2\pi(\Delta t_d t + \varphi(t) - \varphi_c)] \quad (\text{方程 4})$$

[0068] 以及

$$[0069] \quad v_{Qb} = \frac{A(t)}{2} \sin[2\pi(\Delta t_d t + \varphi(t) - \varphi_c)] \quad (\text{方程 5})$$

[0070] 其中, $\varphi_c$ 是这两个信号共有的不相关相位常量。

[0071] 在离散时间  $t_i$  取样的 A/D 转换器 230 的信号输出 232( $v_c$ ) 可以以复数形式组合  $v_c = v_{Ib} + i v_{Qb}$ , 以获得:

$$[0072] \quad v_c = \frac{A(t_i)}{2} \exp[2\pi i(\Delta t_d t_i + \varphi(t_i) - \varphi_c)] \quad (\text{方程 6})$$

[0073] 量  $f_r \equiv$  以上方程中的  $\Delta t_d$  表示频率  $f_r$  偏移与线性扫描速率  $\Delta$  和回波的时间延迟  $t_d$  的乘积成正比。这是在 HF、VHF、UHF 雷达中的 FMCW 信号处理的特征,上面引用了该特征的参考。作为在此处考虑的雷达的典型特征的实例可能具有为 20MHz 的载波中心频率  $f_c$ ; 为 100kHz/秒的扫描速率  $\Delta$ ; 以及位于 0 与 400Hz 之间的基带频率偏移  $f_r$ 。

[0074] 在 FMCW 波形的数字处理中的第一步骤是通过快速傅里叶变换(FFT)步骤在扫描重复周期  $T_s$  内对以上数字化信号时间序列进行傅里叶变换,示出为第一(距离)FFT 242。这些输出可以在时刻  $0, T_s, 2T_s, 3T_s, \dots, nT_s, \dots$  累积。然后,在距离 FFT 的输出内的一个或两个光谱单元内出现具有总时间延迟偏移  $t_d$  的目标。通过假设缓慢变化的复合回波信号在进行每个 FFT 的扫描周期内保持恒定,通过检查以上方程,在该第  $n$  个输出光谱(距离)

量化单元 (bin) ( $v_{rn}$ ) 244 内的信号为：

$$[0075] \quad v_{rn} = \frac{A(nT_s)}{2} \exp[2\pi i(\varphi(nT_s) - \varphi_c)] \quad (\text{方程 7})$$

[0076] 作为解释本发明的进一步背景,可以说明这个距离 FFT 的输出。在正常展开 FFT 以便最低频率位于中心之后,每个光谱输出为距离量化单元。在输出阵列中心的零量化单元与回波延迟  $t_d = 0$  对应。

[0077] 图 3 为包括正距离 310 和负距离 320 (本发明) 的在多基地雷达内占据的距离空间的图示 300。位于该中心位置右边的正输出距离量化单元 312、314、316 对应于正延迟,这是在后向散射雷达中的标准情况。在那种情况下,位于中心位置左边的距离量化单元 322、324 将被填充为零,这是因为仅仅正距离有意义。在常规的先前做法中,具有 FMCW 雷达的双基地几何仅仅包含并且保持正距离单元;负距离单元被视为不可用,并且丢弃。

[0078] 在图 2 的第一 (距离) FFT 处理步骤 242 之后,最终处理是第二 (多普勒) FFT 246。这用于目标速度提取并且最大化回波信噪比。

[0079] 如果同时接收和处理其回波组的一个或多个双基地发射机,那么在第二发射机的扫描开始的初始中加入偏移 (美国专利号 6,856,276 的主题)。对于第二发射机的信号的回波的总时间延迟 ( $t_d$ ) 可以记为：

$$[0080] \quad t_d \equiv Tp_{(2)}^{(1)} + T_{(2)}^{(1)} + t_{2e} \quad (\text{方程 8})$$

[0081] 其中,  $Tp_{(2)}^{(1)}$  是从雷达 2 发射的传播给雷达 1 的信号的 (正) 时间延迟;  $T_{(2)}^{(1)}$  是为开始雷达 2 的扫描设置的有目的的 (正) 时间延迟; 并且  $t_{2e}$  是基于雷达 2 的发射信号的任意回波和在雷达 1 的接收机处接收的回波的额外延迟。选择扫描开始时间  $T_{(2)}^{(1)}$ , 以防止由雷达 2 的发射机造成的双基地回波落在雷达 1 的自身后向反射回波的距离量化单元偏移空间内 (即,使它们彼此不干扰)。

[0082] 通过从双基地到多基地配置的扩展,用于上面的时间延迟  $t_d$  的相同逻辑允许雷达 3 的扫描偏移和回波在时间延迟 (或者从距离 FFT 输出的量化单元) 中进一步连续地隔开。

[0083] 返回参照图 3,在距离 FFT 之后,回波时间延迟空间通过  $f_r = \Delta t_d$  与其 FFT 输出频谱相关。垂直线 330 区分雷达 n 的后向散射的零距离位置,其回波落在右边的单元 312,在回波不再可见的距离之外。此时,雷达 n+1 的回波在右边的下一个区域 314 开始,因为表示为  $T_{(n+1)}^{(n)}$  的其 FMCW 扫描调制的开始的编程时间延迟,将雷达 1 的时间延迟  $T_{(2)}^{(1)}$  一般化到关注的雷达 n。现在,要理解的是,雷达 n 是接收机,以便：

$$[0084] \quad t_d = Tp_{(n+1)}^{(n)} + T_{(n+1)}^{(n)} + t_{(n+1),e} \quad (\text{方程 9})$$

[0085] 迄今,所有时间延迟  $t_d$  都为正延迟,因此每个连续的双基地雷达的回波贡献被进一步向右边隔开,如图 3 中所示。

[0086] 多基地操作的雷达的编号按照从雷达 1 通过雷达 n 直到雷达 N 的连续顺序进行。

为扫描开始编程的时间延迟偏移  $T_{(n+1)}^{(n)}$  也遵循这个连续顺序，被设计为保持每个雷达的回波与该序列中的其他回波分开。先前的做法是忽略在图 3 中的垂直线 330 的左边的负光谱空间 320，并且产生输出多基地数据的计算机程序决不保留这些。假设它们没有物理意义。

因此，多基地操作的 N 个雷达可以最多产生  $\frac{(N+1) \cdot N}{2}$  个回波组，表示在 N 个雷达之间的 N 个后向散射组加上双基地成对组合的  $\frac{(N-1) \cdot N}{2}$  个组。

[0087] 本发明使用先前丢弃的距离 FFT 300 的“负距离”光谱空间 320。此外，揭示了如何为所有雷达的扫描开始配置时间偏移，以便不使任何回波光谱空间与其他空间重叠，从而避免相互干扰。

[0088]  $t_d$  的方程 9 的检查与确定正 FMCW 频率开始移位相关。在垂直零距离线 330 的图 3 中的右边示出了这些。用于延迟的这个等式的全部三个项是正的：扫描移位开始的延迟偏移  $T_{(n+1)}^{(n)}$ ；在位移站点之间传播的信号的时间延迟  $TP_{(n+1)}^{(n)}$ ；以及雷达 n+1 的回波的超过直接传播的信号的接收的延迟  $t_{(n+1),e}$ 。在这三个项之中，两个项的物理性质始终是正的： $TP_{(n+1)}^{(n)}$

和  $t_{(n+1),e}$ 。然而，在扫描开始的位移  $T_{(n+1)}^{(n)}$  可以是正的或负的。

[0089] 而且，从 1 通过 n 到 N 的雷达具有连续增大的正频率开始位移。然后，虽然雷达 n+1 信号将相对于在其在雷达 n 处的观察在距离光谱空间内移动到右边，但是相反的情况也如此，雷达 n+1 观察的雷达 n 的信号；“延迟”变成“增长 (advance)”或负延迟。对于在雷达 n 处观察雷达 n-1 信号和回波，同样如此。由于我们专注于作为用于例证讨论的参考的雷达 n 的接收机，所以在这种情况下延迟  $t_d$  的方程变成：

$$[0090] \quad t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} + T_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e} \quad (\text{方程 10})$$

[0091] 本发明的创造性发现在于认识到  $T_{(n-1)}^{(n)} \equiv -T_{(n)}^{(n-1)}$ 。这仅仅表示如果正开始位移的序列被设置为使得位于左边的（上标）相对于位于右边的（下标）为正，那么，通过其他方式来看，位于左边的相对于位于右边的位移变成其负数：通过改变方程中的符号，延迟变成增长，反之亦然。因此，相关的时间延迟方程重写为：

$$[0092] \quad t_d = TP_{(n-1)}^{(n)} - T_{(n)}^{(n-1)} + t_{(n-1),e} \quad (\text{方程 11})$$

[0093] 在这种情况下，如果  $T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e}$ ，那么  $t_d$  变成负数，并且在图 2 的距离 FFT 242 之后，其回波位于图 3 的零垂直线 330 的左边。由于“负距离”的概念表面上没有物理意义，所以在用于雷达 n 的现有技术中，到目前为止，忽略没有意义的雷达 n-1322 的双基地信号。现在，这些实际上可以变成有用的数据，使多基地操作的可输出翻倍。具有雷达回波数据的这些新发现的距离单元及其开方 (extraction) 可以称为“负伪距处理”。

[0094] 在实现这个“负伪距处理”时,揭示了一个重要的特征。这是具有负时间延迟  $t_d$  的特征,这要求:

$$[0095] \quad T_{(n)}^{(n-1)} > TP_{(n-1)}^{(n)} + t_{(n-1),e} \quad (\text{方程 } 12)$$

[0096] 这表示扫描开始延迟将被选择并设置到波形发生器和处理器内,以便方程 12 有效。换言之,如果  $T_{(n)}^{(n-1)}$  太小,导致不满足方程 12,那么雷达 n-1 的双基地回波将与雷达 n 的后向散射回波重叠,从而模糊的相互干扰污染这些回波。使回波区域不重叠的最有效简明的扫描开始时间的排序将造成紧邻图 3 的零距离垂直线 330 的左边的双基地组的距离光谱空间 322 小于所有其他多基地回波空间。在图 3 中的绘图中示出了这个事实。

[0097] 本发明因此能够在多基地操作 N 个雷达时获得  $N^2$  测量。为了提供一个实例,如果四个雷达具有重叠的后向散射和多基地覆盖范围,那么  $N = 4$ 。在本发明之前,总共看到 10 个观察结果,没有额外的硬件。采用本发明的方法,现在能够具有 16 个观察结果。这是超过现有技术的一个重要特征以及改进。

[0098] 图 4A 为根据现有技术的以正距离模式操作的一对雷达产生的输出双基地海洋表面海流地图的一个实例。图 4B 为由本发明的一个实施方式得到的以负距离模式操作的一对雷达产生的输出双基地海洋表面海流地图的一个实例。

[0099] 图 4A 和 4B 示出了在加利福尼亚西海岸(仅仅从金门海峡入口的南面到旧金山海湾)由 13.4MHz HF 雷达的网络测绘的双基地海流的两个实例。在该实例中,双基地雷达对具有位于斯顿堡垒和蒙塔拉的雷达(分别为指定的 FORT 410 和 MONT 420)。这些雷达同时进行操作,并且查看相同的海洋状况。在图 4A 中,FORT 410 是产生测绘海流的在 MONT 420 接收的回波的发射源。这是双基地表面海流的典型结果。根据在本发明之前的技术,这仅仅是基于先前的仅正时间延迟和所产生的椭圆形距离单元可能具有的地图。

[0100] 基于本发明的技术,图 4B 的地图是利用由在 MONT 420 的发射机产生的回波并且接收在 FORT 410 的回波的结果。如上所述,具有以下优点:(i) 包含两个不对称的回波测绘(在确定方位角的接收机端附近,结果更精确);(ii) 如所看到的,使冗余数据填充间隙;以及 (iii) 对两者平均化,减少数据的固有噪声。

[0101] 这是在图 4A 和 4B 中所示的一个实施方式和应用。包括但是未显示硬目标检测(例如,舰船)的使用。通过单个双基地发射/接收对,现在能够对相同舰船目标进行两个双基地检测。这提高了船舶检测的概率,降低了错误警报率,并且提高了舰船的位置和速度测量的精度。

[0102] 为了说明和描述的目的,提出了本发明的优选实施方式的以上描述。这并非旨在具有详尽性或者将本发明限于所公开的精确形式,并且鉴于以上教导内容,显然能够具有很多修改和变化。选择并且描述实施方式,以便最佳地解释本发明的原理及其实际应用,从而能够允许本领域的技术人员在各种实施方式中并且通过适合于预期的特定用途的各种修改最佳地利用本发明。例如,GPS 定时显示为用于多基地用途的振荡器训练和同步的来源,但是可以使用很多其他稳定的定时源,例如,铷驯服振荡器、恒温晶体振荡器等。这些是本发明的几个替换的实施方式中的一些实施方式。因此,其目的在于,本发明的范围由其所附权利要求限定,并不限于在本文中描述的精确实施方式。

[0103] 虽然为了方便起见,上面用单数形式描述了某些元件和处理,但是本领域的技术人员要理解的是,多个元件和重复的处理还可以用于实践本发明的技术。

[0104] 虽然参照其具体实施方式,特别示出和描述了本发明,但是本领域的技术人员要理解的是,在不背离本发明的精神或范围的情况下,可以在所公开的实施方式的形式和细节上进行改变。例如,可以使用各种材料,来实现上面描述的实施方式。因此,应参照所附权利要求,确定本发明的范围。



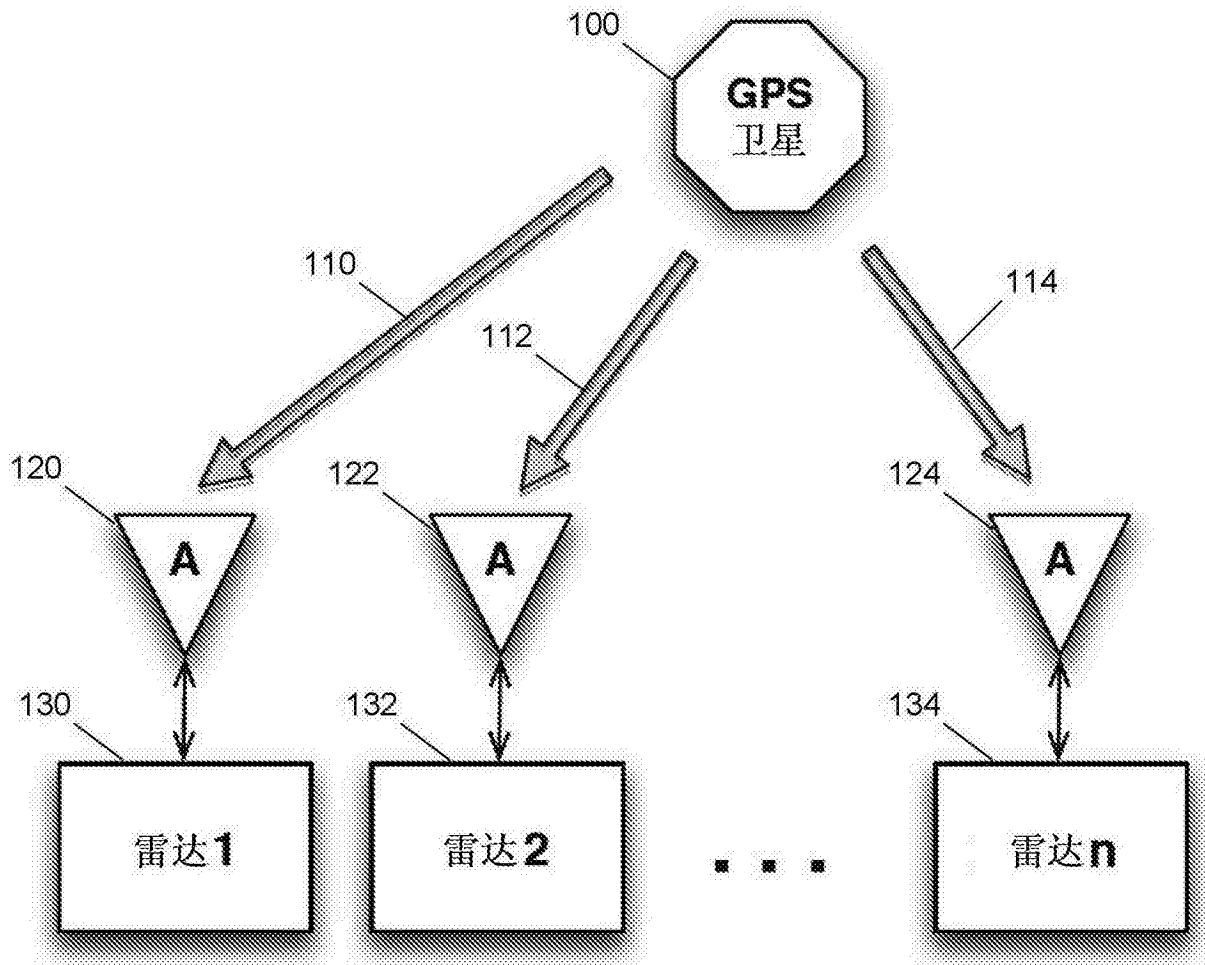


图 1

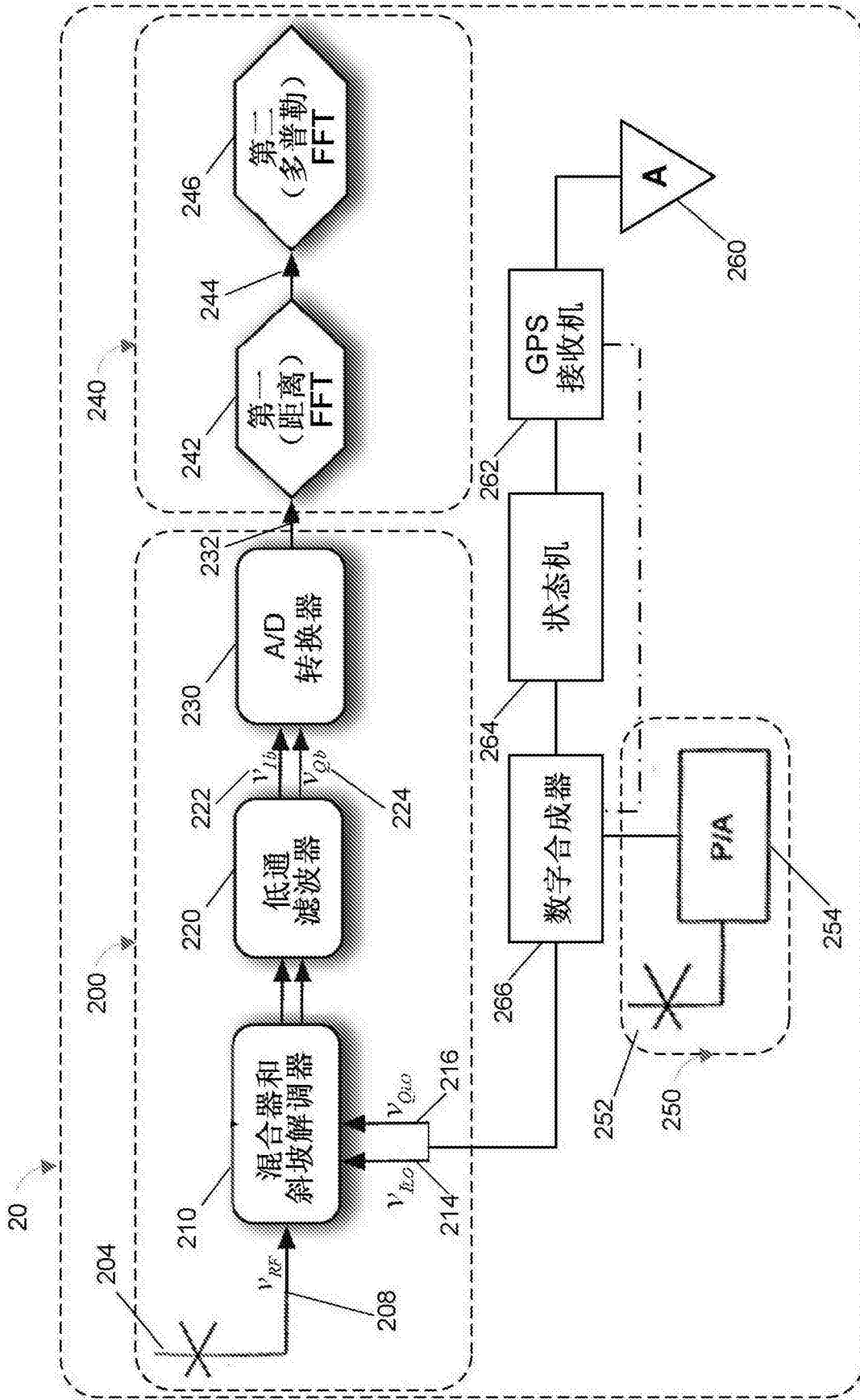


图 2

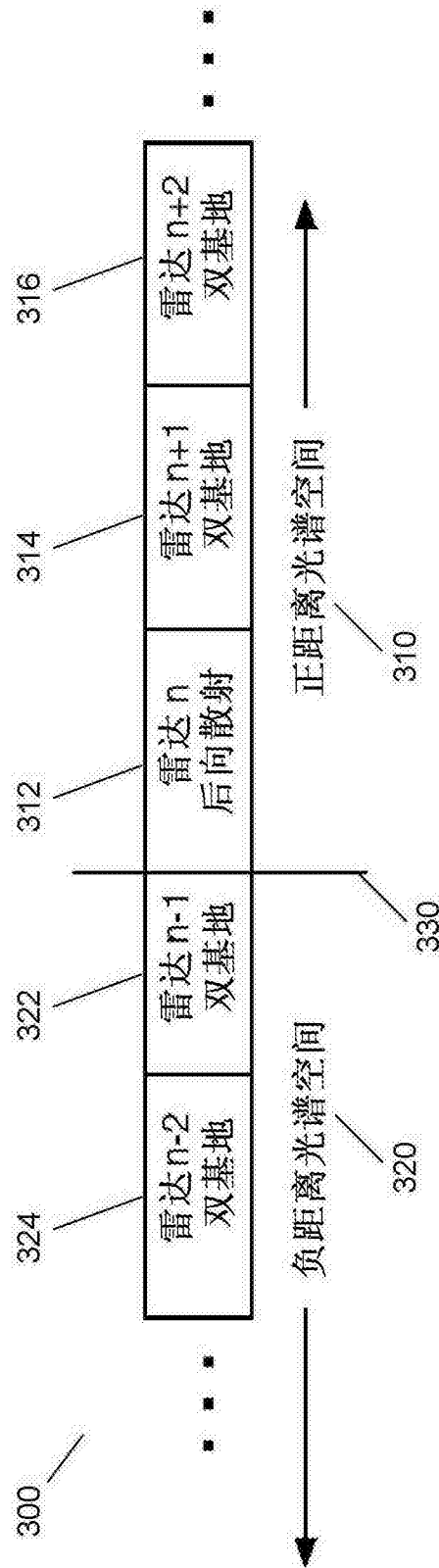


图 3

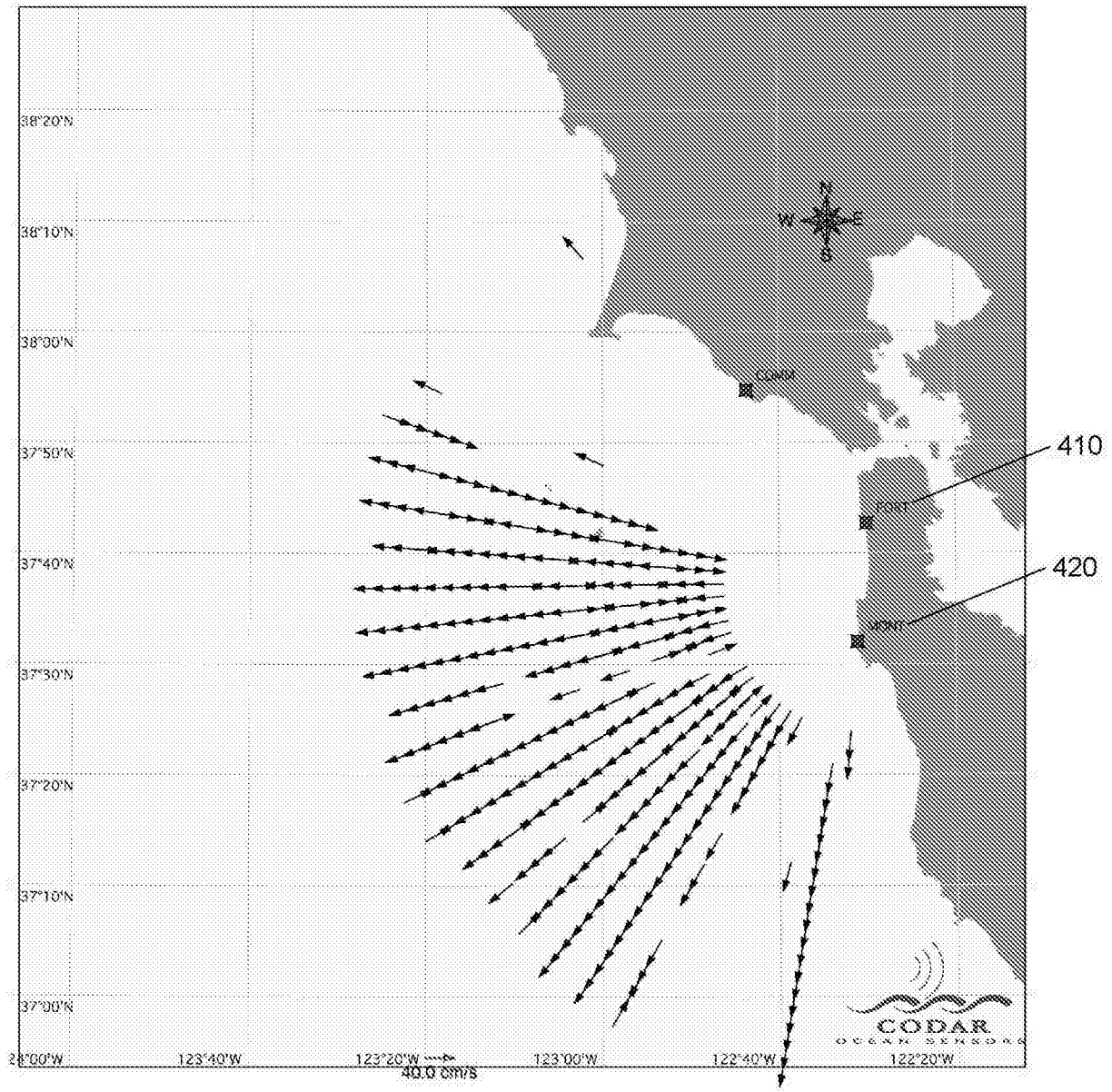


图 4A

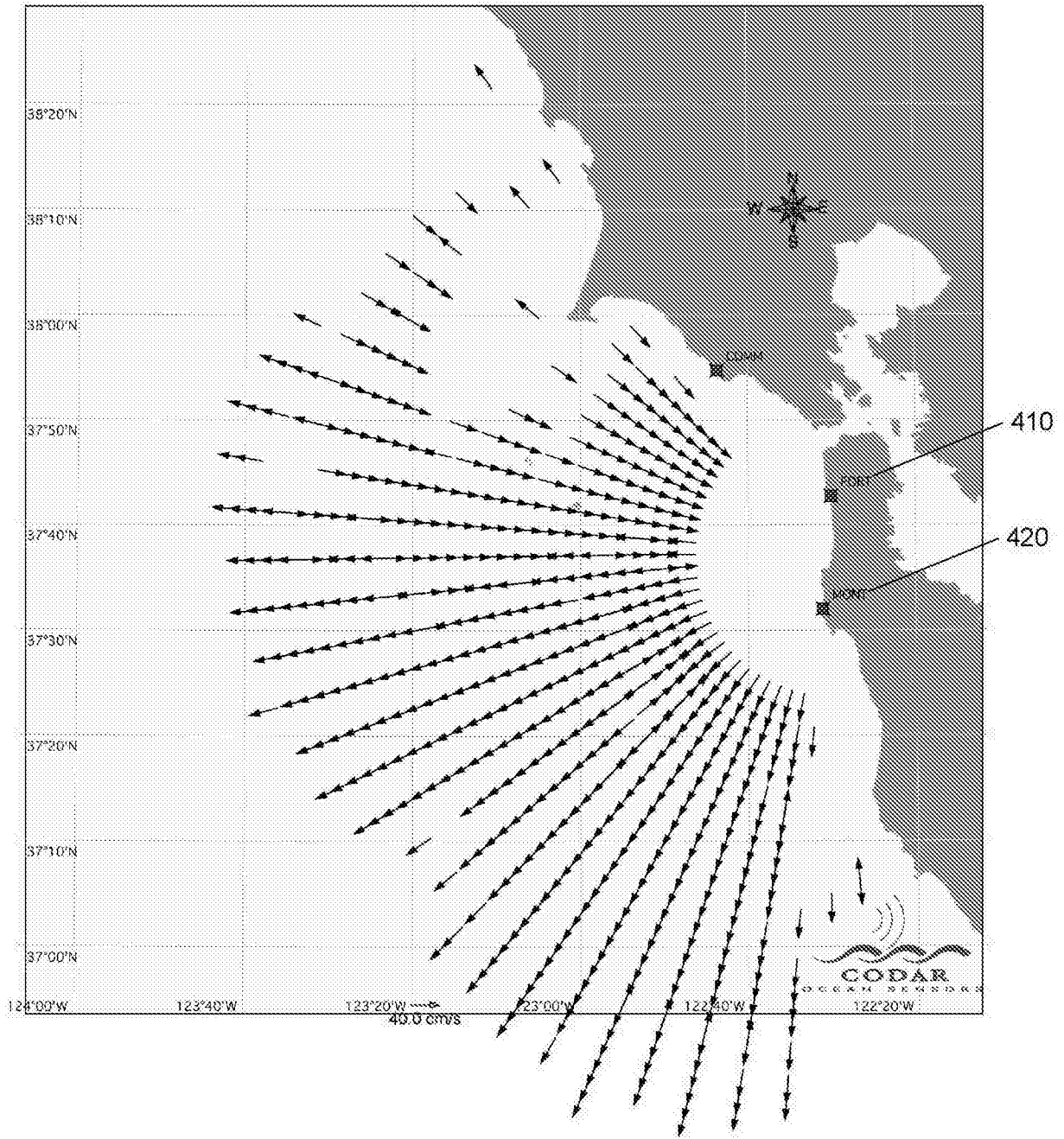


图 4B