



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108519623 A

(43)申请公布日 2018.09.11

(21)申请号 201810329843.4

(22)申请日 2018.04.13

(71)申请人 北博(厦门)智能科技有限公司

地址 361000 福建省厦门市湖里区禾山路
415号104室

(72)发明人 谢衍 王焕华

(74)专利代理机构 北京科家知识产权代理事务
所(普通合伙) 11427

代理人 陈娟

(51)Int.Cl.

G01V 3/12(2006.01)

G01S 13/90(2006.01)

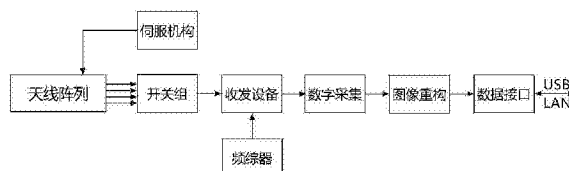
权利要求书2页 说明书12页 附图8页

(54)发明名称

基于毫米波雷达的异物探测系统

(57)摘要

本发明公开一种基于毫米波雷达的异物探测系统,其包括:毫米波收发模块、天线阵列模块、数字采集模块和图像重构模块,数字采集模块接收毫米波收发模块输出的信号并对其进行处理;图像重构模块接收数字采集模块输出的信号,对其进行快速成像处理,以得到被测场景的实时图像。本发明通过上述方案,研制一种快速、高分辨率的毫米波雷达的异物探测系统,该系统可放置于机场、码头等重要场所的入口进行安全检查,能够对隐匿于人身上的金属危险品(如刀具、枪具等)和陶瓷危险品(如炸药)等进行准确检测。本发明通过对毫米波收发模块的收发设备和开关组以及天线阵列模块进行设计,使其达到最佳性能。



1. 一种基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:包括:

一毫米波收发模块,包括开关组、收发设备和频综器;开关组包括多个发射电子开关组成的发射开关组以及由多个接收电子开关组成的接收开关组;频综器,用于产生系统需要的步进频率信号;收发设备,用于生成发送给安检对象的毫米波发射信号、并接收和处理安检对象的散射回波信号;

一天线阵列模块,与毫米波收发模块连接,用于发送毫米波发射信号和接收散射回波信号;天线阵列模块包括发射天线阵列和接收天线阵列,发射天线阵列包括N个发射天线,接收天线阵列包括N个接收天线,发射天线阵列的N个发射天线与接收天线阵列的N个接收天线一一对应;

一数字采集模块,接收毫米波收发模块输出的信号并对其进行处理;

一图像重构模块,接收数字采集模块输出的信号,对其进行快速成像处理,以得到被测场景的实时图像。

2. 根据权利要求1所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述天线阵列模块和毫米波收发模块固定于一个快速机械扫描设备上;天线阵列模块在垂直方向通过切换开关组的发射电子开关或接收电子开关,模拟天线垂直运动实现合成孔径测量,在旋转方向通过伺服机构,对天线阵列进行机械扫描实现合成孔径测量。

3. 根据权利要求1或2所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述天线阵列模块包括由不小于64个发射天线构成的发射天线阵列和由不小于64个接收天线构成的接收天线阵列;

天线阵列模块的长度不小于0.5m,旋转角度不小于 60° ,相邻发射天线或者相邻接收天线之间的纵向间隔不大于8mm;相邻发射天线或者相邻接收天线的天线横向间隔 $<8\text{mm}$;

X方向的天线波束宽度大于 122° ,Z方向的天线波束宽度大于 136° 。

4. 根据权利要求3所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述收发设备包括第一振荡器、第一功分器、第一功率放大器、第一十倍频器、第二功率放大器、第二振荡器、延迟器、第二功分器、第三功率放大器、第一混频器、第四功率放大器、九倍频器、第一带通滤波器、第五功率放大器、第二混频器、第二十倍频器、第三混频器、第二带通滤波器、第六功率放大器、第三带通滤波器、第七功率放大器和第八功率放大器;

第一振荡器、第一功分器、第一功率放大器、第一十倍频器、第二功率放大器顺次连接,第一振荡器输出第一频率范围的震荡信号,并发送至第一功分器;

第一功率放大器接收第一功分器输出的功率信号并对其进行放大以达到第一十倍频器的驱动功率范围,第一十倍频器将第一功率放大器输出的信号十倍频至第二频率范围,并将输出的信号发送至第二功率放大器,第二功率放大器将其放大后经过发射开关组输出至发射天线阵列;

第二振荡器输出第三频率范围的震荡信号,经过延迟器后发送至第二功分器,第三功率放大器接收第二功分器输出的功率信号并对其进行放大后输出至第一混频器,第一混频器将第三功率放大器输出的信号和第一功分器输出的信号进行混频后发送至第四功率放大器,第四功率放大器将第一混频器输出的信号放大以达到九倍频器的驱动功率范围,九倍频器将第四功率放大器输出的信号九倍频至第四频率范围,并将输出的信号发送至第一带通滤波器,第一带通滤波器对接收的信号进行滤波,并将滤波后的信号输出至第五功率放大器;

第二功分器输出的功率信号还发送至第二十倍频器,第二十倍频器对接收到的信号进行十倍频处理后发送至第二混频器,第二混频器将接收到的第二十倍频器的输出信号以及依次经由接收天线阵列、接收开关组和第八功率放大器输出的信号进行混频,混频后的输出信号发送至第二带通滤波器,第二带通滤波器对接收到的信号进行滤波,滤波后的信号发送至第六功率放大器,第六功率放大器输出的信号以及第五功率放大器输出的信号发送至第三混频器进行混频,混频后的输出信号依次经由第三带通滤波器和第七功率放大器发送至数字采集模块。

5. 根据权利要求3所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述频综器的信号持续时间加上调频时间小于 $0.66\mu\text{s}$ 。

6. 根据权利要求3所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述开关组由两级SP8T开关级联构成,每级电子开关数分别为8个和1个;电子开关的开关时间小于 5ns 。

7. 根据权利要求1或2所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述天线阵列模块包括由64个发射天线构成的发射天线阵列和由64个接收天线构成的接收天线阵列;天线阵列模块的长度为 0.25m ,旋转角度为 30° ;

相邻发射天线或者相邻接收天线之间的纵向间隔为 2mm ,相邻发射天线或者相邻接收天线的天线横向间隔 $<4\text{mm}$;X方向的半功率天线波束宽度大于 103° ,Z方向的半功率天线波束宽度大于 132° 。

8. 根据权利要求7所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:

所述收发设备包括第三振荡器、第九功率放大器、第十功率放大器、第四振荡器、第二延迟器、第四混频器、第四带通滤波器、第十一功率放大器、第五带通滤波器和第十二功率放大器;

第三振荡器输出第一预设频率范围的信号,并依次经由第九功率放大器和第十功率放大器放大后输出至发射开关组和发射天线阵列;第四振荡器输出第二预设频率范围的信号经由第二延迟器延迟后发送至第四混频器,接收天线阵列接收到的信号经由接收开关组和第十二功率放大器发送至第四混频器,第四混频器将第二延迟器发送的信号和第十二功率放大器发送的信号进行混频后发送至第四带通滤波器,第四带通滤波器输出的信号依次经由第十一功率放大器和第五带通滤波器发送至数字采集模块。

9. 根据权利要求7所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述频综器的信号持续时间加上调频时间小于 $2\mu\text{s}$ 。

10. 根据权利要求7所述的基于毫米波雷达的异物探测系统,其特征在于:所述开关组由三级SP4T开关级联构成,每级开关数分别为16个、4个和1个;电子开关的开关时间小于 5ns 。

基于毫米波雷达的异物探测系统

技术领域

[0001] 本发明涉及安检系统领域,具体来说,是用于安防用途的毫米波全息监测雷达系统,以辅助对隐匿武器的安检。

背景技术

[0002] 目前,重要场所的常规隐匿武器探测设备有金属磁力探测仪(包括探测棒和检测门),X—射线探测仪。其中,金属磁力探测仪只能对金属进行探测,对不能对陶瓷制品或塑料炸药等潜在危险品进行探测,因此存在很大的安全隐患;其次,其作用距离短,需要被探测者与仪器相隔很近的距离,这会给被检查者带来不舒服的感觉;再次,金属探测仪只是简单的探测金属物品,不能对真正的危险金属品(如手枪、刀具)与常规金属物品(如纽扣、裤头、硬币等)区分出来,因此存在很高的虚警概率。因此,使用金属磁力探测仪的安检效率很低,难以满足越来越繁重的安检任务的需求。X—射线探测仪目前主要用来对乘客随身携带的行李箱进行探测,虽然低功率的对人进行安检的X—射线探测仪已被研制出来并在少量机场得以使用,但由于X射线对人体的危害作用,还是很难以被公众所普遍接受。

[0003] 针对当前常规安检设备的缺陷,人们开始研究一种新的异物探测系统,即毫米波雷达异物探测系统。它利用利用毫米波对干燥衣物的强穿透性和人体与金属或非金属制武器在毫米波段反射特性的强烈反差,及先进的三维雷达成像技术对人体进行三维实时成像,能够快速、准确地对人体进行安全检查。此外,毫米波辐射是非电离的,中等功率的毫米波辐射不会对人体健康造成伤害;毫米波波长相对较短(1~10mm),其系统可以在较小的体积下实现较高的分辨率。总之,毫米波雷达异物探测系统作为一种新型的非接触式快速安检设备,能够解决了当前常规安检设备中存在的问题,将在世界各国的反恐斗争中有巨大的应用前景。

发明内容

[0004] 在下文中给出了关于本发明实施例的简要概述,以便提供关于本发明的某些方面的基本理解。应当理解,以下概述并不是关于本发明的穷举性概述。它并不是意图确定本发明的关键或重要部分,也不是意图限定本发明的范围。其目的仅仅是以简化的形式给出某些概念,以此作为稍后论述的更详细描述的前序。

[0005] 根据本申请的一个方面,提供一种基于毫米波雷达的异物探测系统,包括:

[0006] 毫米波收发模块,包括开关组、收发设备和频综器(或称频率综合器、频率源);开关组包括多个发射电子开关组成的发射开关组以及由多个接收电子开关组成的接收开关组;频综器,用于产生系统需要的步进频率信号;收发设备,用于生成发送给安检对象的毫米波发射信号、并接收和处理安检对象的散射回波信号;

[0007] 天线阵列模块,与毫米波收发模块连接,用于发送毫米波发射信号和接收散射回波信号;天线阵列模块包括发射天线阵列和接收天线阵列,发射天线阵列包括N个发射天线,接收天线阵列包括N个接收天线,发射天线阵列的N个发射天线与接收天线阵列的N个接

收天线一一对应;该天线阵列模块在垂直方向通过切换开关组的发射电子开关或接收电子开关,模拟天线垂直运动实现合成孔径测量,在旋转方向通过伺服机构,对天线阵列进行机械扫描实现合成孔径测量;

[0008] 数字采集模块,接收毫米波收发模块输出的信号并对其进行处理;

[0009] 图像重构模块,接收数字采集模块输出的信号,对其进行快速成像处理,以得到被测场景的实时图像。

[0010] 进一步的,所述天线阵列模块和毫米波收发模块固定于一个快速机械扫描设备上,这使得整个成像数据可以在2秒内采集完。在每次的扫描过程中,各通道采用快速的电子开关进行切换,并得到每个角度的数据,从而采集到完整的二维孔径的数据。

[0011] 根据本申请的一个方面,系统采用Ka波段设计方案:

[0012] 天线阵列模块包括由64个发射天线构成的发射天线阵列和由64个接收天线构成的接收天线阵列;天线阵列模块的长度为0.5m,旋转角度需要 60° ,相邻发射天线或者相邻接收天线之间的纵向间隔为8mm;相邻发射天线或者相邻接收天线的天线横向间隔 $<8\text{mm}$ 。优选的,为保证阵列单元中每根天线的方向图都能够覆盖2米(高) $\times$ 1米(宽)的成像区域,可求得发射天线或者接收天线的X方向半功率波束宽度至少需要 122° ,Z方向的半功率波束宽度至少需要 136° 。

[0013] 毫米波收发模块用于按顺序发射和接收宽带的雷达信号,并将接收信号经过放大,滤波和下变频处理后,传输至数字模块进行采集。其包括开关组、收发设备和频综器。

[0014] 其中,考虑到作用距离(0.5~1m)在雷达方程中的功率变化范围为12dB,而将目标的RCS变化范围考虑为3dB,则接收机前端的功率动态范围需要15dB。那么,收发设备设计如下:其包括第一振荡器、第一功分器、第一功率放大器、第一十倍频器、第二功率放大器、第二振荡器、延迟器、第二功分器、第三功率放大器、第一混频器、第四功率放大器、九倍频器、第一带通滤波器、第五功率放大器、第二混频器、第二十倍频器、第三混频器、第二带通滤波器、第六功率放大器、第三带通滤波器、第七功率放大器和第八功率放大器;第一振荡器、第一功分器、第一功率放大器、第一十倍频器、第二功率放大器顺次连接,第一振荡器输出第一频率范围(2.7~3.3GHz频率范围)的震荡信号,并发送至第一功分器;第一功率放大器接收第一功分器输出的功率信号并对其进行放大以达到第一十倍频器的驱动功率范围,第一十倍频器将第一功率放大器输出的信号十倍频至第二频率范围,并将输出的信号发送至第二功率放大器,第二功率放大器将其放大后经过发射开关组输出至发射天线阵列;第二振荡器输出第三频率范围(2.69~3.29GHz频率范围)的震荡信号,经过延迟器后发送至第二功分器,第三功率放大器接收第二功分器输出的功率信号并对其进行放大后输出至第一混频器,第一混频器将第三功率放大器输出的信号和第一功分器输出的信号进行混频后发送至第四功率放大器,第四功率放大器将第一混频器输出的信号放大以达到九倍频器的驱动功率范围,九倍频器将第四功率放大器输出的信号九倍频至第四频率范围,并将输出的信号发送至第一带通滤波器,第一带通滤波器对接收的信号进行滤波,并将滤波后的信号输出至第五功率放大器;第二功分器输出的功率信号还发送至第二十倍频器,第二十倍频器对接收到的信号进行十倍频处理后发送至第二混频器,第二混频器将接收到的第二十倍频器的输出信号以及依次经由接收天线阵列、接收开关组和第八功率放大器输出的信号进行混频,混频后的输出信号发送至第二带通滤波器,第二带通滤波器对接收到的信号进行滤波,

滤波后的信号发送至第六功率放大器,第六功率放大器输出的信号以及第五功率放大器输出的信号发送至第三混频器进行混频,混频后的输出信号依次经由第三带通滤波器和第七功率放大器发送至数字采集模块。

[0015] 进一步的,频综器由参考源、功分器、倍频器、混频器和放大器构成,除了发射机与接收机所需频率以外,它们之间的差频用于中频的二次变频,用于消除频综器初始相位的影响。系统通过频综器产生所需的步进频率信号,纵向采样间隔为4毫米,采样点数为127个;在旋转方向的采样间隔为0.2度,采样点数为300个。所以为使扫描时间小于2s(机械扫描速度为 $30^{\circ}/s$),则信号持续时间加上调频时间需要小于为 $2s/80/127/300=0.66\mu s$ 。

[0016] 进一步的,所述开关组由两级SP8T开关级联构成,每级电子开关数分别为8个和1个。根据系统需求和实际目前毫米波开关的性能,电子开关的开关时间小于5ns。当开关隔离度达到30dB的时候,相邻7个天线的发射或接收信号接收的噪声功率比接收功率低20dB以上。

[0017] 上述Ka波段方案中,收发天线靠得很近,发射天线将有信号直漏到接收天线,这很可能造成接收机饱和。因此,本申请通过对天线阵列模块进行精心设计,尽量减少从发射天线到接收天线的直漏信号。另外,还通过时间门滤波的方式,滤除直漏信号对成像结果的影响。时间门滤波是指:发射阵列直接泄漏到接收阵列的信号,与正常到达接收阵列的雷达反射信号之间,有一个时间差,通过将正常雷达时间以外的信号进行滤波处理,隔离发射阵列泄漏的直漏信号。

[0018] 此外,开关组的多级SP8T开关级联后,每路信号之间的延迟差需要调节至50纳秒以内;且开关组导致接收机噪声系数较大,为降低噪声系数,每根天线后可加一级低噪放以解决该问题。

[0019] 根据本申请的另一个方面,系统采用V波段设计方案:

[0020] V波段可获得成套、低价的芯片组;V波段波长为4mm,波长相对较短,在一定的分辨率要求下,可以减少系统体积。V波段芯片组的一个缺点是此频段需要根据已有芯片进行制作。可用的工作频带为76~80GHz(由低噪放的噪声系数,倍频器的工作频率限制),带宽为4GHz,距离方向距离分辨率相对较差(为3.75cm)。

[0021] V波段设计方案中,天线阵列模块包括由64个发射天线构成的发射天线阵列和由64个接收天线构成的接收天线阵列;天线阵列模块的长度为0.25m,旋转角度需要 30° ,相邻发射天线或者相邻接收天线之间的纵向间隔为2mm,相邻发射天线或者相邻接收天线的天线横向间隔 $<4mm$ 。优选的,为保证阵列单元中每根天线的方向图都能够覆盖2米(高) $\times$ 1米(宽)的成像区域,可求得发射天线或者接收天线的X方向半功率波束(统称为天线波束)宽度至少需要 103° ,Z方向的半功率波束宽度至少需要 132° 。

[0022] 毫米波收发模块用于按顺序发射和接收宽带的雷达信号,并将接收信号经过放大,滤波和下变频处理后,传输至数字模块进行采集。其包括开关组、收发设备和频综器。

[0023] 其中,考虑到作用距离(0.5~1m)在雷达方程中的动态范围为12dB,而将目标的RCS变化范围考虑为3dB,则接收机前端的功率动态范围需要15dB。收发设备设计如下:其包括第三振荡器、第九功率放大器、第十功率放大器、第四振荡器、第二延迟器、第四混频器、第四带通滤波器、第十一功率放大器、第五带通滤波器、第十二功率放大器,第三振荡器输出第一预设频率范围的信号,并依次经由第九功率放大器和第十功率放大器放大后输出至

发射开关组和发射天线阵列；第四振荡器输出第二预设频率范围的信号经由第二延迟器延迟后发送至第四混频器，接收天线阵列接收到的信号经由接收开关组和第十二功率放大器发送至第四混频器，第四混频器将第二延迟器发送的信号和第十二功率放大器发送的信号进行混频后发送至第四带通滤波器，第四带通滤波器输出的信号依次经由第十一功率放大器和第五带通滤波器发送至数字采集模块。

[0024] 进一步的，频综器用于产生系统所需步进频率信号，信号带宽达到4GHz时，距离方向的分辨率可以达到3.75cm。根据采样准则，频率间隔需要75MHz，在频率范围内共54个采样点；而在纵向采样间隔为2毫米，采样点数为127个；在旋转方向的采样间隔为0.2度，采样点数为128个。所以为使扫描时间小于2s（机械扫描速度为 $15^{\circ}/s$ ），则信号持续时间加上调频时间需要小于为 $2s/54/127/128=2\mu s$ 。

[0025] 发射机通过多级电子开关组分时连接到发射天线阵列。进一步的，所述开关组由三级SP4T开关级联构成，每级开关数分别为16个、4个和1个。则根据系统需求和实际目前毫米波开关的性能，开关时间应小于5ns。当开关隔离度达到25dB的时候，相邻3个天线的发射或接收信号接收的噪声功率比接收功率低20dB以上。

[0026] 本发明通过上述方案，研制一种快速、高分辨率的毫米波雷达异物探测系统，该系统可放置于机场、码头等重要场所的入口进行安全检查，能够对隐匿于人身上的金属危险品（如刀具、枪具等）和陶瓷危险品（如炸药）等进行准确检测。本发明通过对毫米波收发模块的收发设备和开关组以及天线阵列模块进行设计，使其达到最佳性能。

附图说明

- [0027] 图1为平面人体扫描仪外观结构；
- [0028] 图2为毫米波雷达异物检测系统结构；
- [0029] 图3为天线阵列的排列方式；
- [0030] 图4为天线与成像区域的几何关系；
- [0031] 图5为收发模块的结构图；
- [0032] 图6为收发设备的结构框图；
- [0033] 图7为信号持续时间与调频时间示意图；
- [0034] 图8为频综器结构示意图；
- [0035] 图9为收发开关组的结构；
- [0036] 图10为重构模块实现结构；
- [0037] 图11为数据接口结构；
- [0038] 图12为天线阵列的排列方式；
- [0039] 图13为天线与成像区域的几何关系；
- [0040] 图14-a为收发模块的结构；
- [0041] 图14-b为收发设备的结构框图；
- [0042] 图15为信号持续时间与调频时间示意图；
- [0043] 图16为频综器结构示意图；
- [0044] 图17为收发开关组的结构；
- [0045] 图18为重构模块实现结构；

[0046] 图19为数据接口结构。

具体实施方式

[0047] 下面将参照附图来说明本发明的实施例。在本发明的一个附图或一种实施方式中描述的元素和特征可以与一个或更多个其它附图或实施方式中示出的元素和特征相结合。应当注意,为了清楚的目的,附图和说明中省略了与本发明无关的、本领域普通技术人员已知的部件和处理的表示和描述。

[0048] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“中心”、“纵向”、“横向”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。此外,术语“第一”、“第二”、“第三”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0049] 在本发明的描述中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0050] 本发明将研制一种快速、高分辨率毫米波雷达异物探测系统,该系统将放置于机场、码头等重要场所的入口进行安全检查,能够对隐匿于人身上的金属危险品(如刀具、枪具等)和陶瓷危险品(如炸药)等进行准确检测。

[0051] 具体的,本发明的毫米波雷达异物系统的外观图如图1所示,使用天线阵列模块围绕人体分别进行旋转扫描,从而进行快速而且完全的人体三维成像。系统包括一个由宽带毫米波收发模块驱动的天线阵列模块,该天线阵列模块和毫米波收发模块固定于一个快速机械扫描设备上,这使得整个成像数据可以在2秒内采集完。在每次的扫描过程中,各通道采用快速的电子开关进行切换,并得到每个角度的数据,从而采集到完整的二维孔径的数据。

[0052] 根据系统的应用需求,其总体技术指标如下所示:

[0053] ●成像速度:2~3秒/帧;

[0054] ●成像距离:0.5米;

[0055] ●成像范围:1米(宽)×2米(高);

[0056] ●平面分辨率:5~10毫米;

[0057] ●距离方向分辨率:3~4厘米。

[0058] 本发明的毫米波雷达异物检测系统的系统结构如图2所示,其由伺服机构、天线阵列模块、毫米波收发模块(收发设备、频综器和开关组)、数字采集模块、图像重构模块和数据接口构成。

[0059] 其中天线阵列模块用于发射系统产生的毫米波信号和接收被测物体的散射信号,在垂直方向通过切换电子开关,模拟天线垂直运动实现合成孔径测量,在旋转方向通过伺服机构模块对天线阵列进行机械扫描实现合成孔径测量。收发模块通过发射和接收宽带的

步进频率信号以实现对被测物体距离方向的高分辨率成像,图像重构模块对接收数据进行快速成像处理,以得到被测场景的实时图像。其中,合成孔径成像流程为现有技术,此处不再详述。

[0060] 根据目前国内毫米波器件的水平及可能获得的国外40GHz以上毫米波芯片组,分别考虑了Ka波段及V波段两种系统设计方案。

[0061] 1 Ka波段方案

[0062] Ka波段方案是系统的工作频率为27~33GHz,考虑Ka波段设计方案的主要原因是:国内Ka波段的器件非常成熟、价格便宜,而且带宽可以做得很宽,6GHz的带宽能使距离方向分辨率可达到2.5cm。

[0063] 1.1天线阵列模块

[0064] 天线阵列由两排交错的均匀线性阵列构成,由分辨率公式可以求得阵列长度约为0.5m,旋转角度需要60°。根据采样准则公式,纵向的采样间隔为4mm。因此天线阵列所需的天线单元数目为128个,收发天线各64个。天线布局如图3所示。

[0065] 为保证阵列单元中每根天线的方向图都能够覆盖2米(高)×1米(宽)的成像区域,可求得天线X方向半功率波束宽度至少需要122°,Z方向的半功率波束宽度至少需要136°。为便于研制可以将X,Z方向的波束宽度统一为136°,如图4所示。

[0066] 综上所述,天线阵列及天线单元的设计指标如下所示:

[0067] ●天线单元数目:128,收发各64个;

[0068] ●扫描半径:0.5m;

[0069] ●天线纵向间隔:8mm;

[0070] ●天线横向间隔:<8mm;

[0071] ●天线波束宽度:136°。

[0072] 此外,本发明采用上述设计,将天线单元设计为128个,天线波束宽度:132°,依据如下:为了达到平面分辨率:5~10毫米,根据分辨率公式,天线阵列长度约为0.5m,根据采样准则公式,纵向的天线采样间隔为4mm。所以天线数量大约需要125个。而天线后面的开关阵列一般是单刀双掷(SP2T),单刀四掷(SP4T),单刀八掷(SP8T),所以一般是2,4,6的整数倍数,例如如果是126个天线(2*63),则开关电路不容易设计,反而提升成本。

[0073] 按照上述设计天线数量若低于125个,则平面分辨率达不到5毫米。

[0074] 由分辨率公式:

$$\delta_x \approx \frac{\lambda R_0}{2L_x}$$

[0075] $\delta_y \approx \frac{c}{2B}$ (21)。

$$\delta_z \approx \frac{\lambda R_0}{2L_z}$$

[0076] 其中R0是扫描半径,L是阵列长度, λ 是波长(光速/频率)。

[0077] 因此,天线阵列模块包括由不小于(大于等于)64个发射天线构成的发射天线阵列和由不小于64个接收天线构成的接收天线阵列;天线阵列模块的长度不小于0.5m,旋转角度需要不小于60°,相邻发射天线或者相邻接收天线之间的纵向间隔需要不大于(小于等

于) 8mm;相邻发射天线或者相邻接收天线的天线横向间隔不大于(小于等于) 8mm。优选的,为保证阵列单元中每根天线的方向图都能够覆盖2米(高)×1米(宽)以上的成像区域,可求得发射天线或者接收天线的X方向半功率波束宽度至少需要 122° ,Z方向的半功率波束宽度至少需要 136° 。

[0078] 1.2收发模块

[0079] 收发模块的主要功能是按顺序发射和接收宽带的雷达信号,并将接收信号经过放大,滤波和下变频处理后,传输至数字模块进行采集。收发模块由开关组、收发设备和频综器三个部分构成,如图5所示。

[0080] 1.2.1收发设备

[0081] 考虑到目前国内的技术水平,Ka波段接收机前端噪声系数小于10dB(包括开关组)。由已知的信号持续时间估计中频带宽在1MHz以内。根据雷达方程,当接收机输出信噪比达到40dB时,发射信号功率需要4.2dBm,远小于IEEE C95.1-2005中规定的人体安全辐射标准。

[0082] 考虑到作用距离(0.5~1m)在雷达方程中的功率变化范围为12dB,而将目标的RCS变化范围考虑为3dB,则接收机前端的功率动态范围需要15dB。收发设备的结构如图6所示。

[0083] 具体的,收发设备包括第一振荡器1、第一功分器2、第一功率放大器3、第一十倍频器4、第二功率放大器5、第二振荡器6、延迟器7、第二功分器8、第三功率放大器9、第一混频器10、第四功率放大器11、九倍频器12、第一带通滤波器13、第五功率放大器14、第二混频器15、第二十倍频器16、第三混频器17、第二带通滤波器18、第六功率放大器19、第三带通滤波器20、第七功率放大器21和第八功率放大器22;

[0084] 第一振荡器1、第一功分器2、第一功率放大器3、第一十倍频器4、第二功率放大器5顺次连接,第一振荡器1输出第一频率范围的震荡信号,并发送至第一功分器2;第一功率放大器3接收第一功分器2输出的功率信号并对其进行放大以达到第一十倍频器4的驱动功率范围,第一十倍频器4将第一功率放大器3输出的信号十倍频至第二频率范围,并将输出的信号发送至第二功率放大器5,第二功率放大器5将其放大后经过发射开关组输出至发射天线阵列;

[0085] 第二振荡器6输出第三频率范围的震荡信号,经过延迟器7后发送至第二功分器8,第三功率放大器9接收第二功分器8输出的功率信号并对其进行放大后输出至第一混频器10,第一混频器10将第三功率放大器9输出的信号和第一功分器2输出的信号进行混频后发送至第四功率放大器11,第四功率放大器11将第一混频器10输出的信号放大以达到九倍频器12的驱动功率范围,九倍频器12将第四功率放大器11输出的信号九倍频至第四频率范围,并将输出的信号发送至第一带通滤波器13,第一带通滤波器13对接收的信号进行滤波,并将滤波后的信号输出至第五功率放大器14;

[0086] 第二功分器8输出的功率信号还发送至第二十倍频器16,第二十倍频器16对接收到的信号进行十倍频处理后发送至第二混频器15,第二混频器15将接收到的第二十倍频器16的输出信号以及依次经由接收天线阵列、接收开关组和第八功率放大器22输出的信号进行混频,混频后的输出信号发送至第二带通滤波器18,第二带通滤波器18对接收到的信号进行滤波,滤波后的信号发送至第六功率放大器19,第六功率放大器19输出的信号以及第五功率放大器14输出的信号发送至第三混频器17进行混频,混频后的输出信号依次经由第

三带通滤波器20和第七功率放大器21发送至数字采集模块。

[0087] 收发设备的技术指标如下所示：

[0088] ●发射功率：4.2dBm；

[0089] ●接收机带宽：6GHz；

[0090] ●接收机增益：>60dB；

[0091] ●接收机噪声系数：10dB；

[0092] ●接收机动态范围：15dB。

[0093] 1.2.2频综器

[0094] 系统通过频综器产生系统所需步进频率信号，信号带宽达到6GHz时，距离方向的分辨率可以达到2.5cm。根据采样准则，频率间隔需要75MHz，在频率范围内共80个采样点；而在纵向采样间隔为4毫米，采样点数为127个；在旋转方向的采样间隔为0.2度，采样点数为300个。所以为使扫描时间小于2s（机械扫描速度为 $30^\circ/\text{s}$ ），则信号持续时间加上调频时间需要小于为 $2\text{s}/80/127/300=0.66\mu\text{s}$ ，如图7所示。

[0095] 其中60ns的延迟时间包括1.5m内的距离延迟时间以及天线阵列和开关组之间的延迟差。此时所需的扫频时间为 $53\mu\text{s}$ ，电扫描时间为6.8ms。

[0096] 频综器由参考源、功分器、倍频器、混频器和放大器构成，除了发射机与接收机所需频率以外，它们之间的差频用于中频的二次变频，用于消除频综器初始相位的影响，频综器结构如图8所示，其包括参考源，参考源输出两路，分别连接至两个倍频器，第一路中，一倍频器依次连接2.7~3.3GHz的振荡器、功分器、功率放大器和十倍频器输出27~33GHz；第二路中，另一倍频器依次连接2.69~3.29GHz的振荡器、功分器和十倍频器输出26.9~32.9GHz，此外，该功分器的输出还连接另一功率放大器和混频器，第一路的功分器的输出端还接于第二路的混频器，经过混频后输出至九倍频器，再经过带通滤波器以及功率放大器输出90MHz。

[0097] 频综器的主要技术指标如下所示：

[0098] ●发射波形：步进频率波形；

[0099] ●输出频率：27~33GHz，26.9~32.9GHz，90MHz；

[0100] ●频率间隔：75MHz；

[0101] ●信号持续时间：0.3us；

[0102] ●调频时间：0.3us。

[0103] 1.2.3开关组

[0104] 发射机通过多级电子开关组分时连接到发射天线阵列，收发开关组结构如图9所示，开关组由两级SP8T开关级联构成，每级开关数分别为8个和1个。则根据系统需求和实际目前毫米波开关的性能，开关时间应小于5ns。当开关隔离度达到30dB的时候，相邻7个天线的发射或接收信号接收的噪声功率比接收功率低20dB以上。

[0105] 收发开关组的技术指标如下所示：

[0106] ●开关时间：5ns；

[0107] ●开关隔离度：30dB。

[0108] 1.3图像重构模块

[0109] 图像重构模块的主要功能是完成实时成像系统成像的计算过程。首先在采集后加

入32MBytes的RAM存储回波原始数据,保证成像时间内的数据存储。然后每个通道需要计算长度为 128×512 的二维FFT,当选用8位A/D时(有效位为6.5位时,A/D噪声引入的信噪比为40dB),则DSP需要256Kbytes大小的缓存。最后进行长度为 $128 \times 128 \times 512$ 的三维IFFT,所需DSP缓存大小为32MBytes。而此时DSP每秒计算368M实数加法和368M实数乘法,为保证计算时间小于0.2秒,MAC时间需要0.5ns(乘法器计算一次乘法和一次加法的时间)。

[0110] 图像重构模块实现结构如图10所示,其中总线通过FPGA实现。

[0111] 为保证能对每个信号持续时间内进行采样,AD采样率需要3MHz。图像重构模块技术指标如下所示:

[0112] ●AD采样率:3MHz;

[0113] ●AD分辨率: $\geq 8\text{bit}$;

[0114] ●缓存大小:256Kbytes;

[0115] 32Mbytes;

[0116] ●RAM大小: 32Mbytes;

[0117] ●DSP:MAC时间 $\leq 0.5\text{ns}$ 。

[0118] 1.4数据接口

[0119] 系统完成测量后将数据存入存储器中,等待计算机通过USB或LAN接口读取,此外也可以开发ARM图形界面来完成三维图像的显示功能。

[0120] 数据接口部分具体指标如下所示。

[0121] ●存储器:500GBytes硬盘;

[0122] ●USB:符合USB2.0标准;

[0123] ●LAN:传输速率100Mbps。

[0124] 1.5关键技术

[0125] Ka波段方案的关键技术如下:

[0126] (a) 发射信号到接收信号的直漏问题

[0127] 收发天线靠得很近,发射天线将有信号直漏到接收天线,这很可能造成接收机饱和。解决这一问题的途径为:1)通过对天线单元及阵列的精心设计,尽量减少从发射天线到接收天线的直漏信号。2)通过时间门滤波的方式,滤除直漏信号对成像结果的影响。

[0128] (b) 由于系统对成像时间的要求和采样准则的需要,对频综器提出了较高要求(调频时间 $0.3\mu\text{s}$,信号持续时间 $0.3\mu\text{s}$)。可能解决的途径为增加成像时间至4~5秒。

[0129] (c) 多级SP8T开关级联后,每路信号之间的延迟差需要调节至50纳秒以内。而且开关组导致接收机噪声系数较大,为降低噪声系数,每根天线后可加一级低噪放即可。

[0130] 2 V波段方案

[0131] 选则V波段系统设计方案的原因是:1)V波段可获得成套、低价的芯片组;2)V波段波长为4mm,波长相对较短,在一定的分辨率要求下,可以减少系统体积。V波段芯片组的一个缺点是此频段需要根据已有芯片进行制作。可用的工作频带为76~80GHz(由低噪放的噪声系数,倍频器的工作频率限制),带宽为4GHz,距离方向距离分辨率相对较差(为3.75cm)。

[0132] 2.1天线阵列模块

[0133] 天线阵列由两排交错的均匀线性阵列构成,由分辨率公式可以求得阵列长度约为0.25m,旋转角度需要 30° 。根据采样准则公式,纵向的采样间隔为2mm。因此天线阵列所需的

天线单元数目为128个,收发天线各64个。天线布局如图12所示。

[0134] 为保证阵列单元中每根天线的方向图都能够覆盖2米(高)×1米(宽)的成像区域,可求得天线X方向半功率波束宽度至少需要 103° ,Z方向的半功率波束宽度至少需要 132° 。本实施例中,为便于研制可以将X,Z方向的波束宽度统一为 132° ,如图13所示。

[0135] 综上所述,天线阵列及天线单元的设计指标如下所示:

[0136] ●天线单元数目:128,收发各64个;

[0137] ●扫描半径:0.5m;

[0138] ●同一列天线的纵向间隔:4mm;

[0139] ●天线横向间隔: $<4\text{mm}$;

[0140] ●天线波束宽度: 132° 。

[0141] 2.2收发模块

[0142] 收发模块的主要功能是按顺序发射和接收宽带的雷达信号,并将接收信号经过放大,滤波和下变频处理后,传输至数字模块进行采集。收发模块由开关组、收发设备和频综器三个部分构成,如图14-a所示。

[0143] 2.2.1收发设备

[0144] 考虑到目前国内的技术水平,V波段接收机前端噪声系数小于20dB(包括开关组)。由已知的信号持续时间估计中频带宽在1MHz以内。由雷达方程可知当接收机输出信噪比达到40dB时,发射信号功率需要14dBm,远小于IEEE C95.1-2005中规定的人体安全辐射标准。

[0145] 考虑到作用距离(0.5~1m)在雷达方程中的动态范围为12dB,而将目标的RCS变化范围考虑为3dB,则接收机前端的功率动态范围需要15dB。

[0146] 收发设备的结构如图14-b所示,该收发设备包括第三振荡器31、第九功率放大器32、第十功率放大器33、第四振荡器34、第二延迟器35、第四混频器36、第四带通滤波器37、第十一功率放大器38、第五带通滤波器39和第十二功率放大器40;第三振荡器31输出第一预设频率范围的信号,并依次经由第九功率放大器32和第十功率放大器33放大后输出至发射开关组和发射天线阵列;第四振荡器34输出第二预设频率范围的信号经由第二延迟器35延迟后发送至第四混频器36,接收天线阵列接收到的信号经由接收开关组和第十二功率放大器40发送至第四混频器36,第四混频器36将第二延迟器35发送的信号和第十二功率放大器40发送的信号进行混频后发送至第四带通滤波器37,第四带通滤波器37输出的信号依次经由第十一功率放大器38和第五带通滤波器39发送至数字采集模块。

[0147] 收发设备的技术指标如下所示:

[0148] ●发射功率:14dBm;

[0149] ●接收机带宽:4GHz;

[0150] ●接收机增益: $>60\text{dB}$;

[0151] ●接收机噪声系数:20dB;

[0152] ●接收机动态范围:15dB。

[0153] 2.2.2频综器

[0154] 系统通过频综器产生系统所需步进频率信号,信号带宽达到4GHz时,距离方向的分辨率可以达到3.75cm。根据采样准则,频率间隔需要75MHz,在频率范围内共54个采样点;而在纵向采样间隔为2毫米,采样点数为127个;在旋转方向的采样间隔为0.2度,采样点数

为128个。所以为使扫描时间小于2s(机械扫描速度为 $15^{\circ}/s$)，则信号持续时间加上调频时间需要小于为 $2s/54/127/128=2\mu s$ ，如图15所示。

[0155] 其中60ns的延迟时间包括1.5m内的距离延迟时间以及天线阵列和开关组之间的延迟差。此时所需的扫频时间为 $108\mu s$ ，电扫描时间为13.7ms。

[0156] 频综器由参考源、功分器、倍频器、混频器和放大器构成，频综器结构如图16所示，参考源输出两路，一路依次连接发射本振、倍频器、功率放大器，输出78-80GHz频率范围的信号，另一路依次连接延迟器、接收本振、倍频器(与第一路的倍频器不同)、以及功率放大器(与第一路的功率放大器不同)，输出77.99-79.99GHz频率范围的信号。

[0157] 频综器的主要技术指标如下所示：

[0158] ●发射波形：步进频率波形；

[0159] ●输出频率：78~80GHz, 77.99~79.99GHz；

[0160] ●频率间隔：75MHz；

[0161] ●信号持续时间：1 μs ；

[0162] ●调频时间：1 μs 。

[0163] 2.2.3开关组

[0164] 发射机通过多级电子开关组分时连接到发射天线阵列，收、发开关组结构如图17所示，开关组由三级SP4T开关级联构成，每级开关数分别为16个、4个和1个。则根据系统需求和实际目前毫米波开关的性能，开关时间应小于5ns。当开关隔离度达到25dB的时候，相邻3个天线的发射或接收信号接收的噪声功率比接收功率低20dB以上。

[0165] 收发开关组的技术指标如下所示：

[0166] ●开关时间：5ns；

[0167] ●开关隔离度：25dB。

[0168] 2.3图像重构模块

[0169] 图像重构模块的主要功能是完成实时成像系统成像的计算过程。首先在采集后加入4MBytes的RAM存储回波原始数据，保证成像时间内的数据存储。然后每个通道需要计算长度为 128×128 的二维FFT，当选用8位A/D时(有效位为6.5位时，A/D噪声引入的信噪比为40dB)，则DSP需要128Kbytes大小的缓存。最后进行长度为 $64 \times 128 \times 128$ 的三维IFFT，所需DSP缓存大小为4MBytes。而此时DSP每秒计算40M实数加法和40M实数乘法，为保证计算时间小于0.2秒，MAC时间需要5ns(乘法器计算一次乘法和一次加法的时间)。

[0170] 图像重构模块实现结构如图18所示，其中总线通过FPGA实现。

[0171] 为保证能对每个信号持续时间内进行采样，AD采样率需要1MHz。图像重构模块技术指标如下所示：

[0172] ●AD采样率：1MHz；

[0173] ●AD分辨率： $\geq 8\text{bit}$ ；

[0174] ●缓存大小：128Kbytes；

[0175] 4Mbytes；

[0176] ●RAM大小：4Mbytes；

[0177] ●DSP:MAC时间 $\leq 5\text{ns}$ 。

[0178] 2.4数据接口

[0179] 系统完成测量后将数据存入存储器中,等待计算机通过USB或LAN接口读取,此外也可以开发ARM图形界面来完成三维图像的显示功能。

[0180] 数据接口部分具体指标如下所示。

[0181] ●存储器:500GBytes硬盘;

[0182] ●USB:符合USB2.0标准;

[0183] ●LAN:传输速率100Mbps。

[0184] 2.5关键技术

[0185] 系统中存在的关键技术如下:

[0186] (a) 发射信号到接收信号的直漏问题

[0187] 收发天线靠得很近,发射天线将有信号直漏到接收天线,这很可能造成接收机饱和。解决这一问题的途径为:1)通过对天线单元及阵列的精心设计,尽量减少从发射天线到接收天线的直漏信号。2)通过时间门滤波的方式,滤除直漏信号对成像结果的影响。

[0188] (b) 多级SP4T开关级联后,每路信号之间的延迟差需要调节至50纳秒以内。而且开关组导致接收机噪声系数较大,为降低噪声系数,每根天线后可加一级低噪放即可。

[0189] 本发明通过上述方案,研制一套毫米波雷达异物探测系统样机。该样机的总体技术指标为:成像速度2~3秒/帧,分辨率5~10mm。由于焦平面辐射计的接收机只有美、英两国能够获得,而环形干涉SAR在图像质量和计算时间上存在缺陷,所以本发明的设计方案采用国内唯一的三维全息成像技术进行实现。此外,本发明根据目前可获得到的毫米波器的性能及价格,考虑了两种系统方案:一种是Ka波段系统方案,这是考虑到国内在Ka波段的器件水平已经相当成熟;另一种是V波段系统方案,它是考虑到在V波段上可以获得成套的芯片组,而且系统工作在V波段上将会有更加紧凑的系统结构。

[0190] 在上面对本发明具体实施例的描述中,针对一种实施方式描述和/或示出的特征可以用相同或类似的方式在一个或更多个其它实施方式中使用,与其它实施方式中的特征相组合,或替代其它实施方式中的特征。

[0191] 应该强调,术语“包括/包含”在本文使用时指特征、要素、步骤或组件的存在,但并不排除一个或更多个其它特征、要素、步骤或组件的存在或附加。

[0192] 在上述实施例和示例中,采用了数字组成的附图标记来表示各个步骤和/或单元。本领域的普通技术人员应理解,这些附图标记只是为了便于叙述和绘图,而并非表示其顺序或任何其他限定。

[0193] 此外,本发明的方法不限于按照说明书中描述的时间顺序来执行,也可以按照其他的时间顺序地、并行地或独立地执行。因此,本说明书中描述的方法的执行顺序不对本发明的技术范围构成限制。

[0194] 尽管上面已经通过对本发明的具体实施例的描述对本发明进行了披露,但是,应该理解,上述的所有实施例和示例均是示例性的,而非限制性的。本领域的技术人员可在所附权利要求的精神和范围内设计对本发明的各种修改、改进或者等同物。这些修改、改进或者等同物也应当被认为包括在本发明的保护范围内。

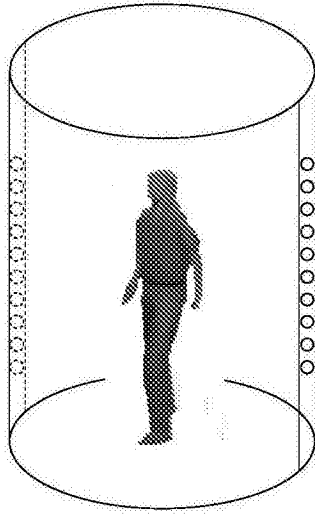


图1

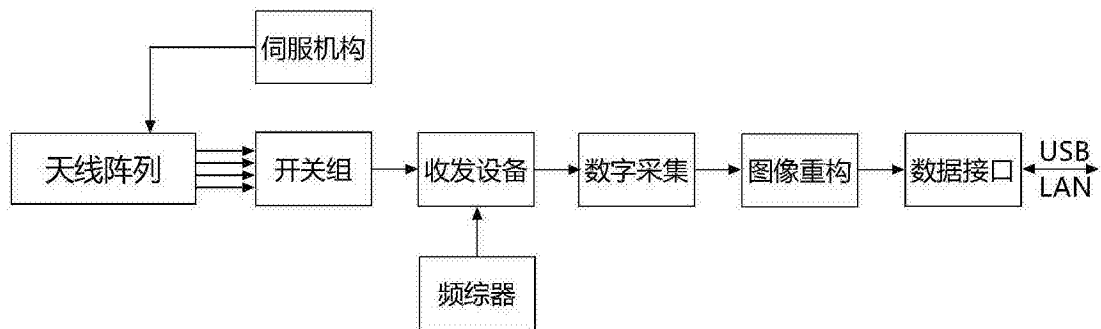


图2

发射阵列 接收阵列

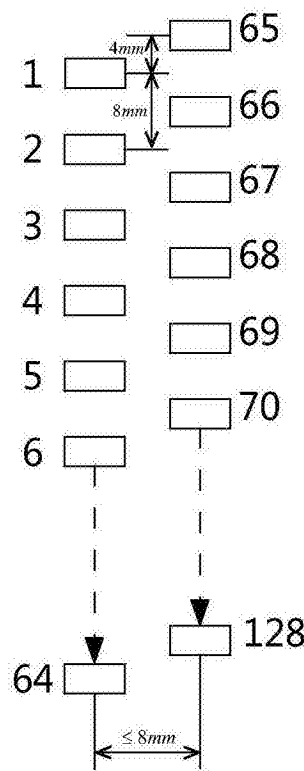


图3

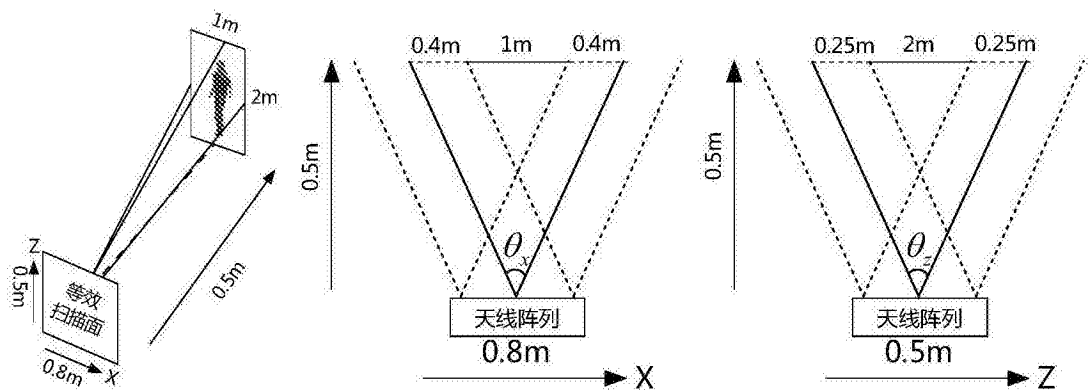


图4

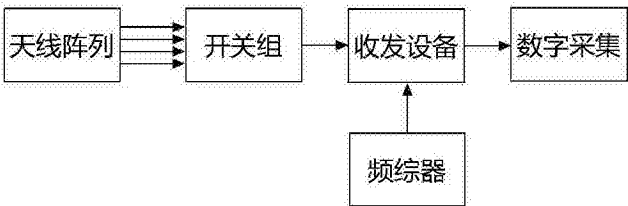


图5

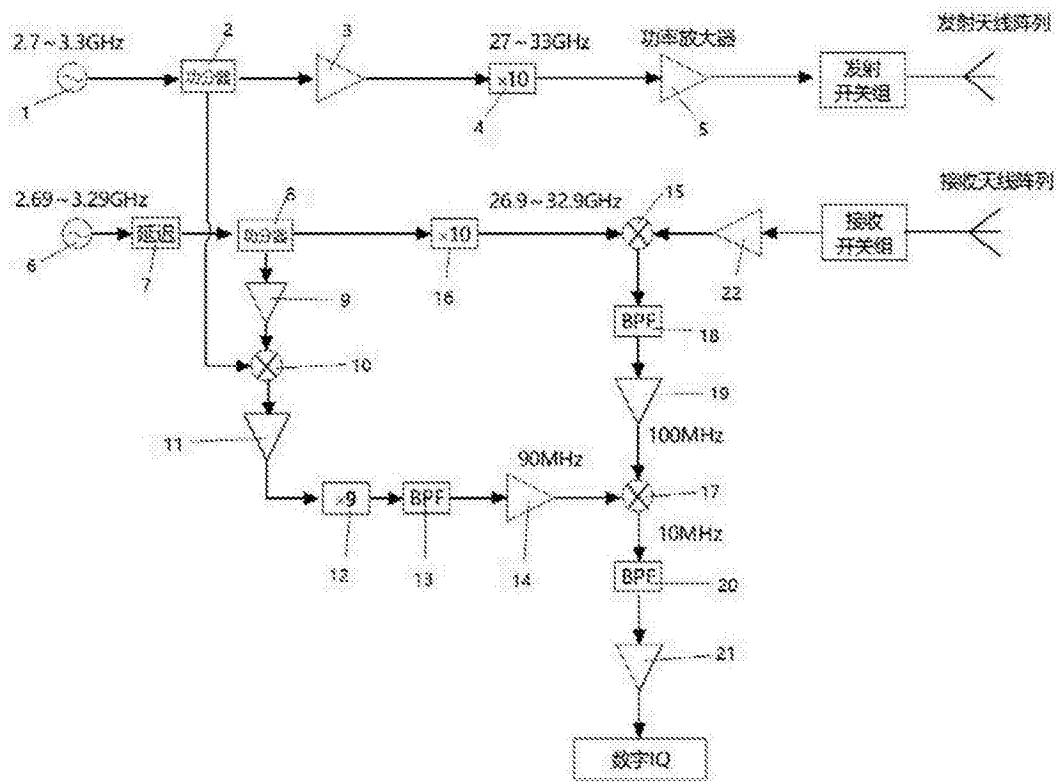


图6

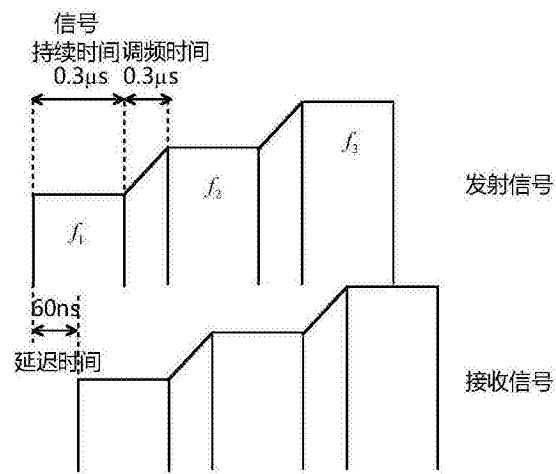


图7

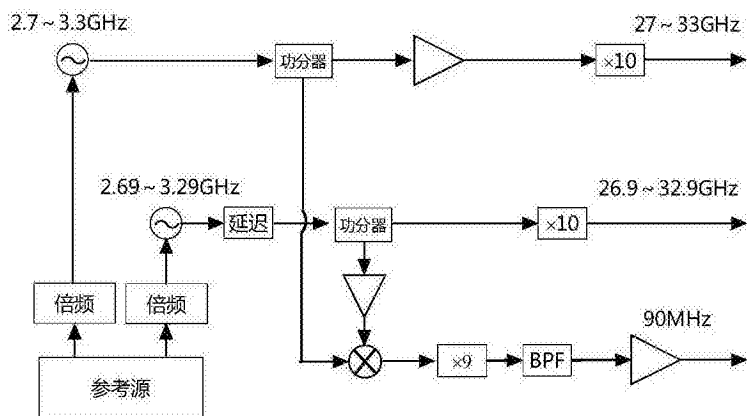


图8

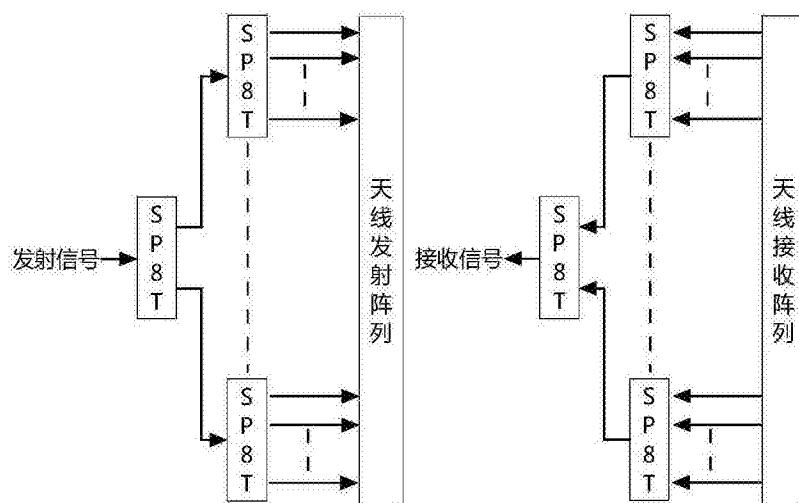


图9

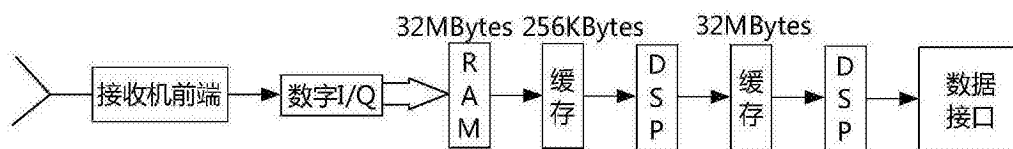


图10

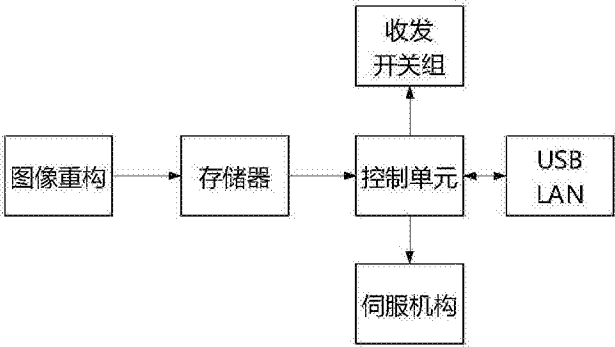


图11

发射阵列 接收阵列

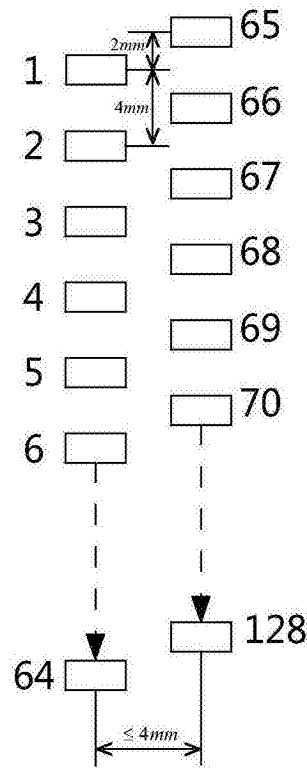


图12

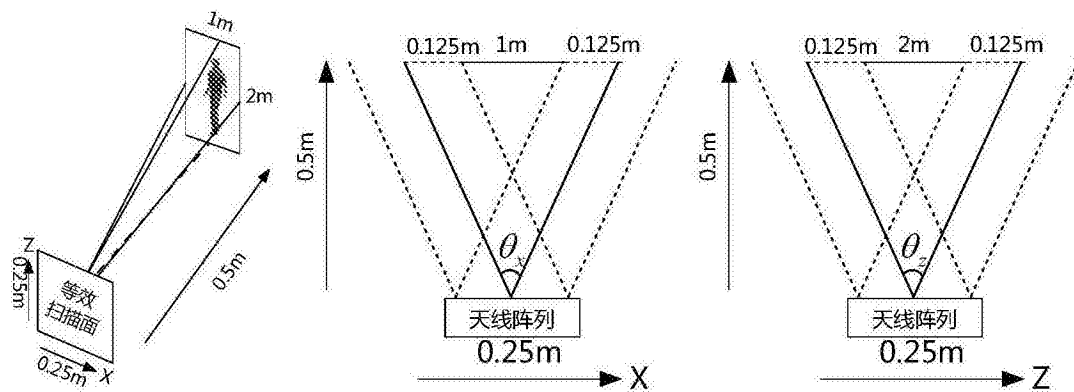


图13

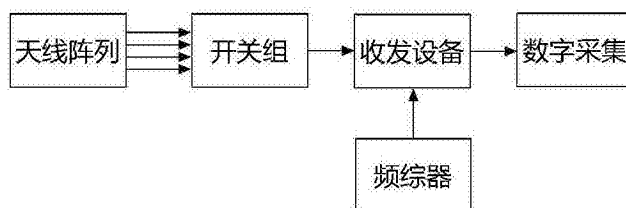


图14-a

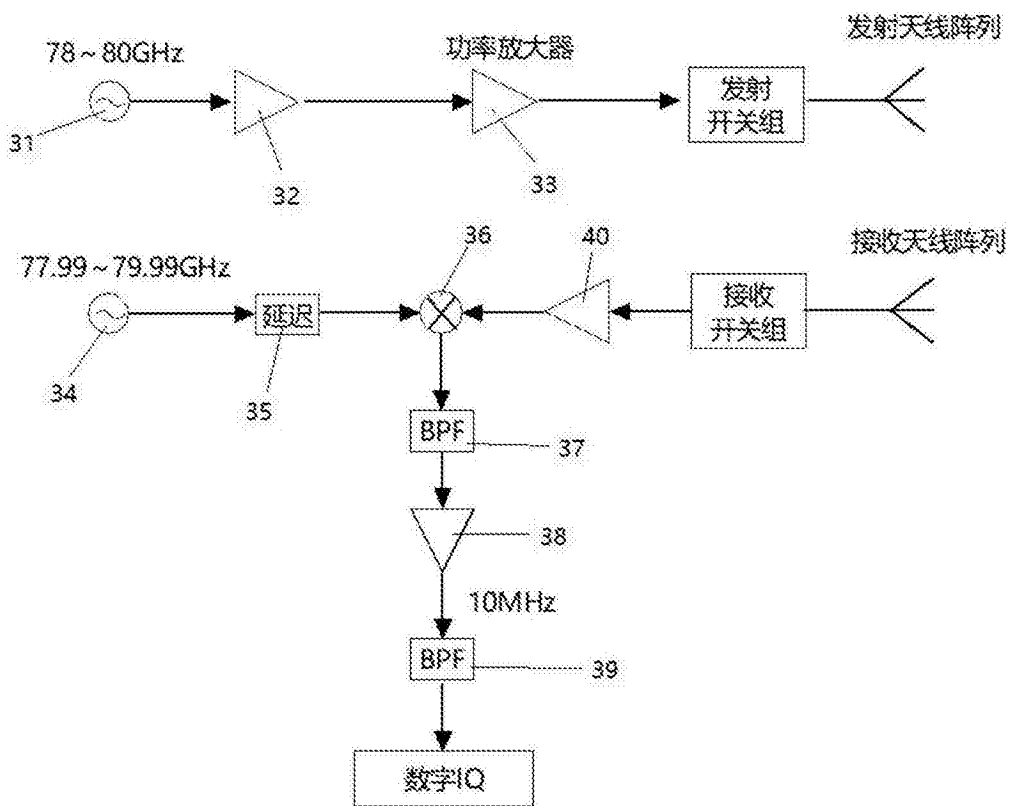


图14-b

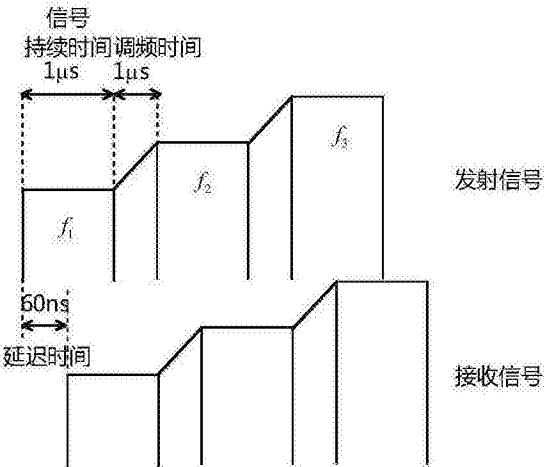


图15

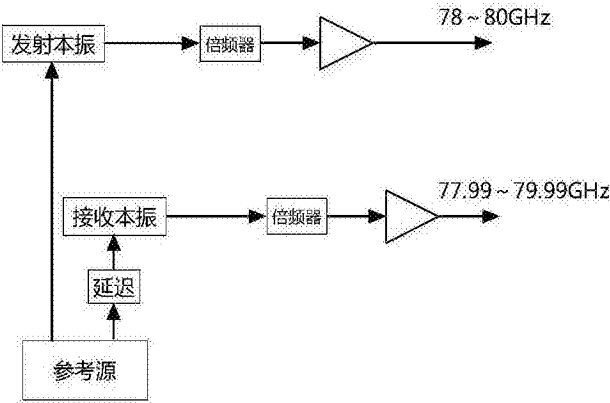


图16

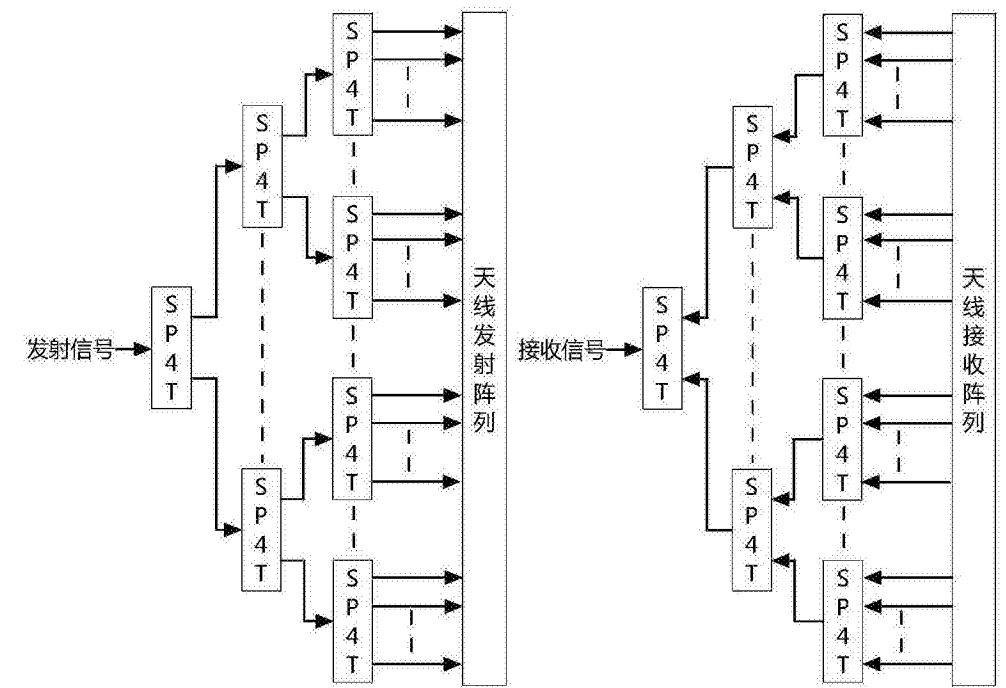


图17

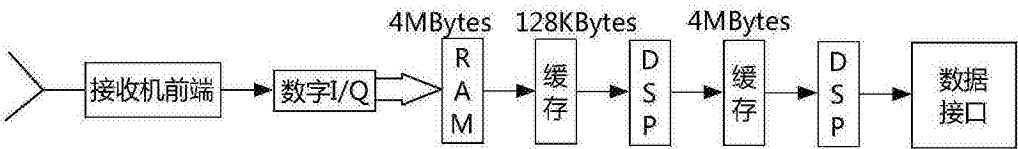


图18

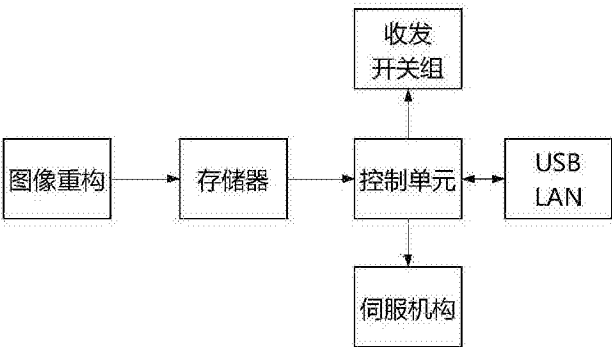


图19