

参考如下:

[MIMO Radar.pdf](#)

[TI毫米波雷达 MIMO \(2TX4RX\) 设置](#)

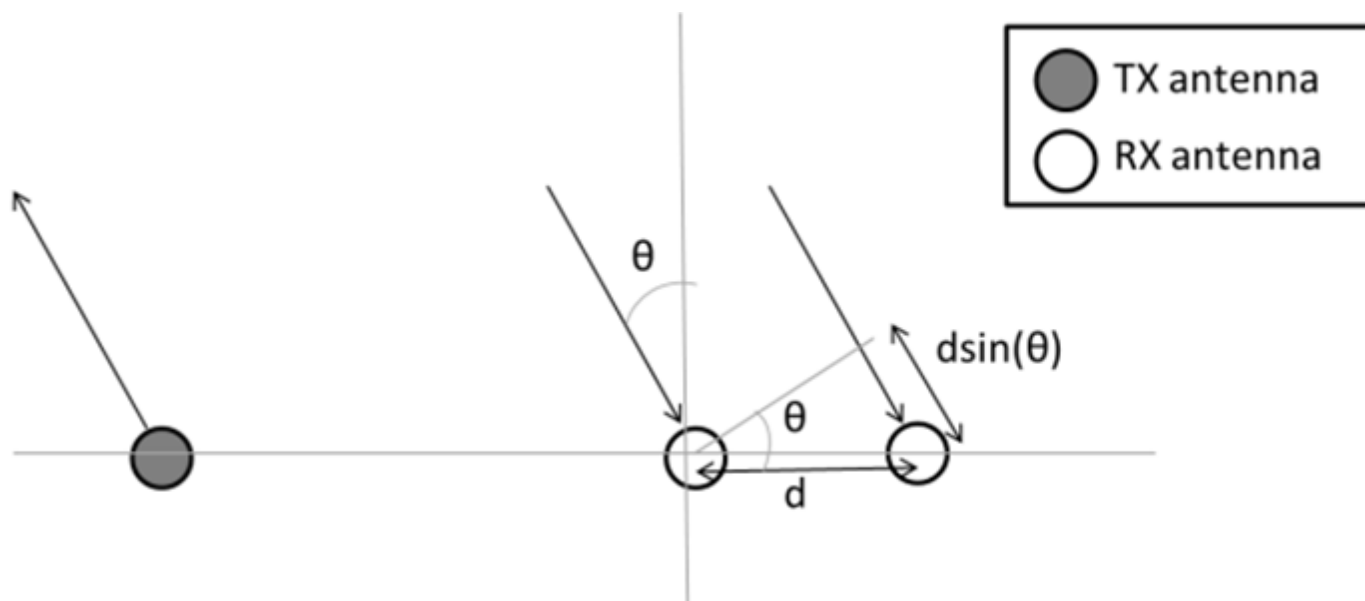
1 Introduction

单输入多输出(SIMO)雷达是指具有单发射(TX)和多个接收(RX)天线的雷达装置。SIMO雷达的角度分辨率取决于RX天线的数量。例如，具有4个RX天线的设备的角度分辨率约为 30° ，而具有8个RX天线的设备具有约为 15° 的角度分辨率。因此，直接提高角度分辨率需要增加RX天线的数量。这种方法有其局限性，因为每一个额外的RX天线都需要设备上有一个单独的RX处理链(每个都有LNA、混频器、中频滤波器和ADC)。

多输入多输出(MIMO)是指具有多个TX和多个RX天线的雷达。如后文所述，具有M个TX天线和N个RX天线的MIMO雷达的角度分辨率可以相当于具有 $M \times N$ 个RX天线的SIMO雷达。因此，MIMO雷达提供了一种成本效益的方法来提高雷达的角度分辨率。

2 Angle Estimation Basics

估计一个物体的到达角度需要至少两个RX天线。图1显示了一个雷达，它有一个TX天线和两个RX天线。



来自TX天线的信号从一个物体反射（相对于雷达的角度为 θ ），并在两个RX天线上被接收。来自物体的信号必须移动一个额外的 $d \sin(\theta)$ 距离才能到达第二个RX天线。这对应于在两个RX天线

上接收到的信号之间的 $\omega = (2\pi/\lambda)d\sin(\theta)$ 的相位差。因此，当估计相位差 ω 时，可以用公式1计算出到达角 θ 。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\omega\lambda}{2\pi d}\right)$$

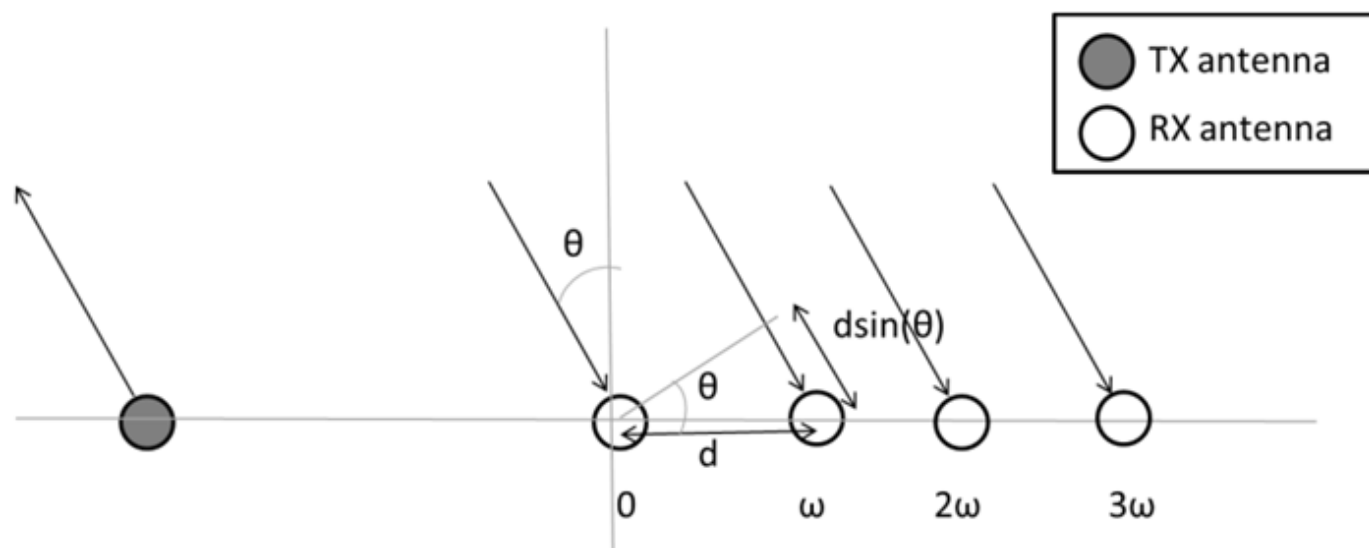
由于相位差 ω 只能在范围 $(-\pi, \pi)$ 内唯一估计，因此在式1中替换 $\omega = \pi$ ，雷达的明确视场(FOV)如式2所示。

$$\theta_{\text{FOV}} = \pm \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right)$$

因此，公式3的最大FOV是通过天线间距离 $d = \lambda/2$ 来实现的

$$\theta_{\text{FOV}} = \pm 90^\circ$$

一般来说，雷达有>两个RX天线，如图2所示。每个后续天线上的信号相对于前一个天线有一个额外的相移 ω 。因此，通过N个天线（例如，图2中的 $[0, \omega, 2\omega, 3\omega]$ ）的信号相位(参照第一个RX天线)发生线性进展。因此，通过通过N个rx天线采样信号，并对该信号序列执行FFT(通常称为角度-FFT)，可以可靠地估计 ω 。

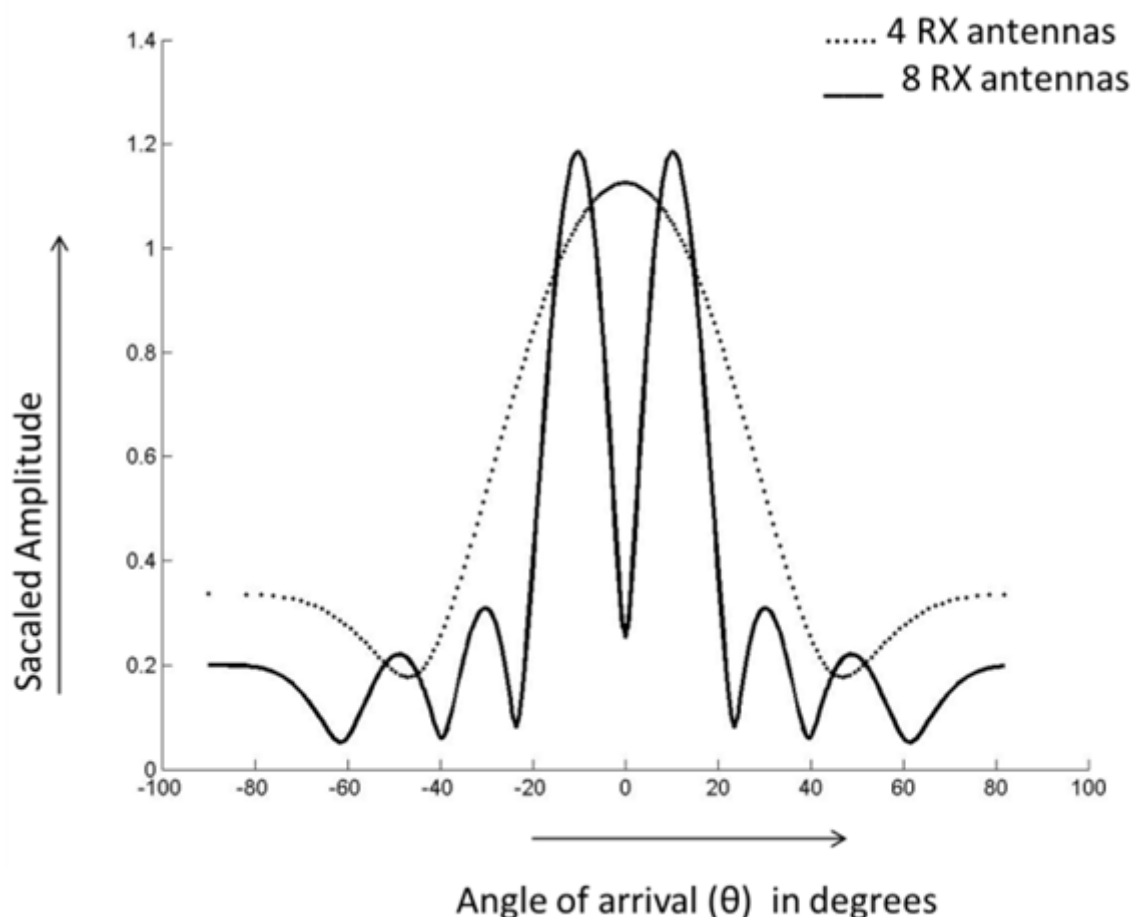


我们知道，雷达角度分辨率与接收天线阵列的孔径大小相关，孔径越大，分辨率越高。

$$\theta_{\text{res}} = \frac{\lambda}{D} \quad (D \text{ 为天线孔径})$$

增加天线的数量会产生FFT的峰值，从而提高了角度估计的精度，提高了角度的分辨率。图3显示了一个具有4个和8个天线（天线间距离为 $\lambda/2$ ）的雷达设备，以及在 $\theta = -10^\circ$ 和 $\theta = +10^\circ$ 的两个点

物体的角度-FFT。四天线的雷达装置不能解决这两个目标；然而，八天线的雷达装置可以。



3 Principle of the MIMO Radar

虚拟孔径技术

MIMO雷达阵列常用的布阵方式主要有两种：一种是紧凑布阵的方式，即发射阵列和接收阵列均以半波长布阵；还有一种称之为稀疏布阵的方式，即接收阵列以半波长均匀布阵，而发射阵列的阵元间距为接收阵列孔径；或者发射阵列以半波长均匀布阵，而接收阵列的阵元间距为发射阵列孔径。得益于波形分集技术，这两种稀疏布阵方式均可以获得最大均匀线形虚拟阵列，有效提高雷达阵列的孔径和空间分辨率，这就是虚拟孔径技术。

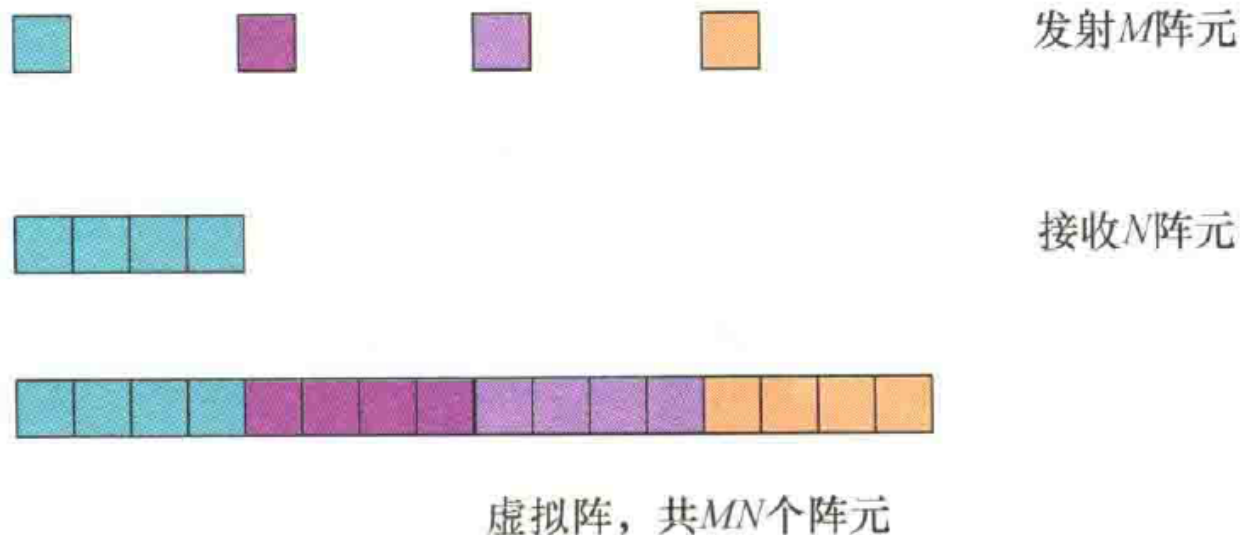
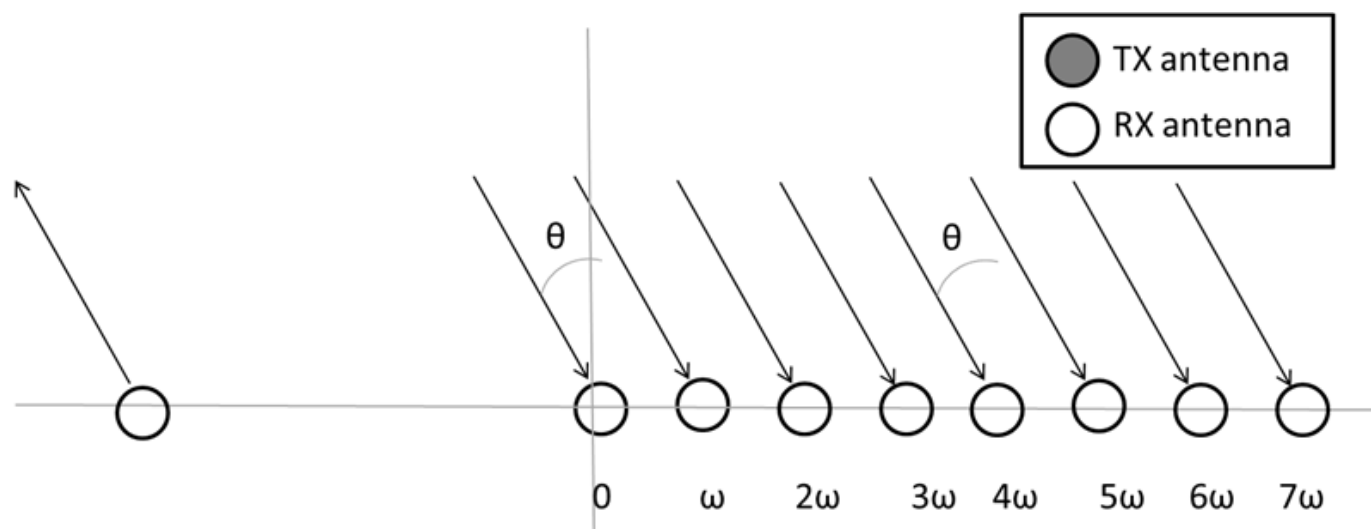


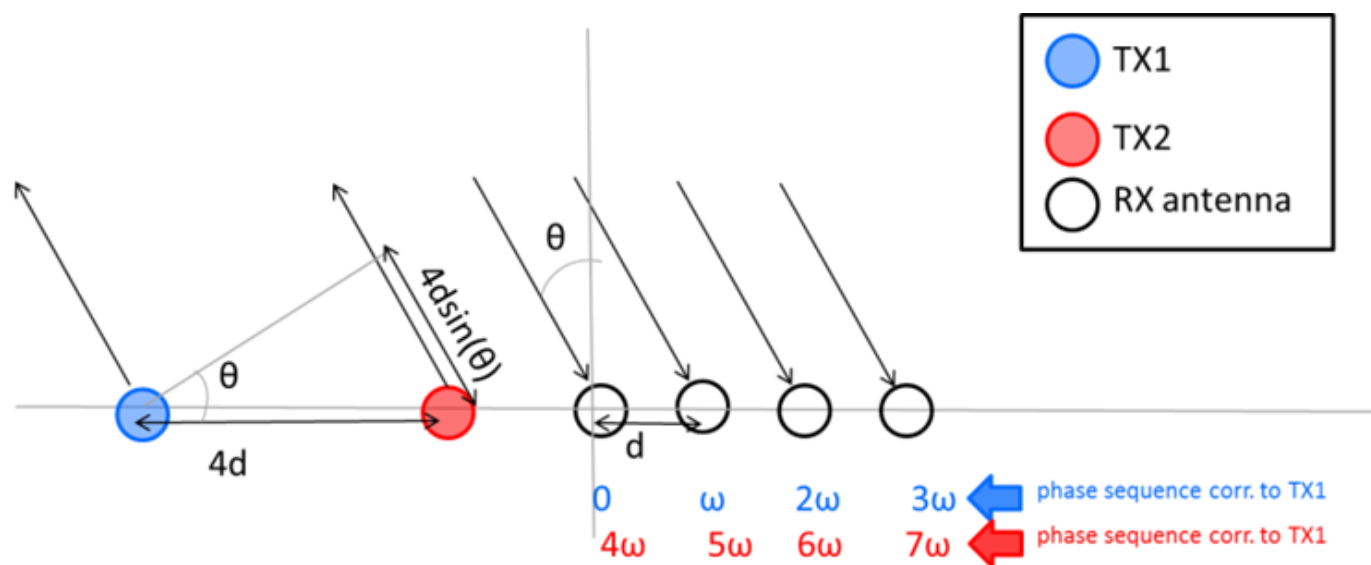
图 2.13 发射稀疏、接收紧凑阵列结构

上图是4发4收的稀疏发射阵MIMO雷达，将形成16个间距为 $\lambda/2$ 的虚拟接收线阵，接收天线孔径变为了原来的4倍。

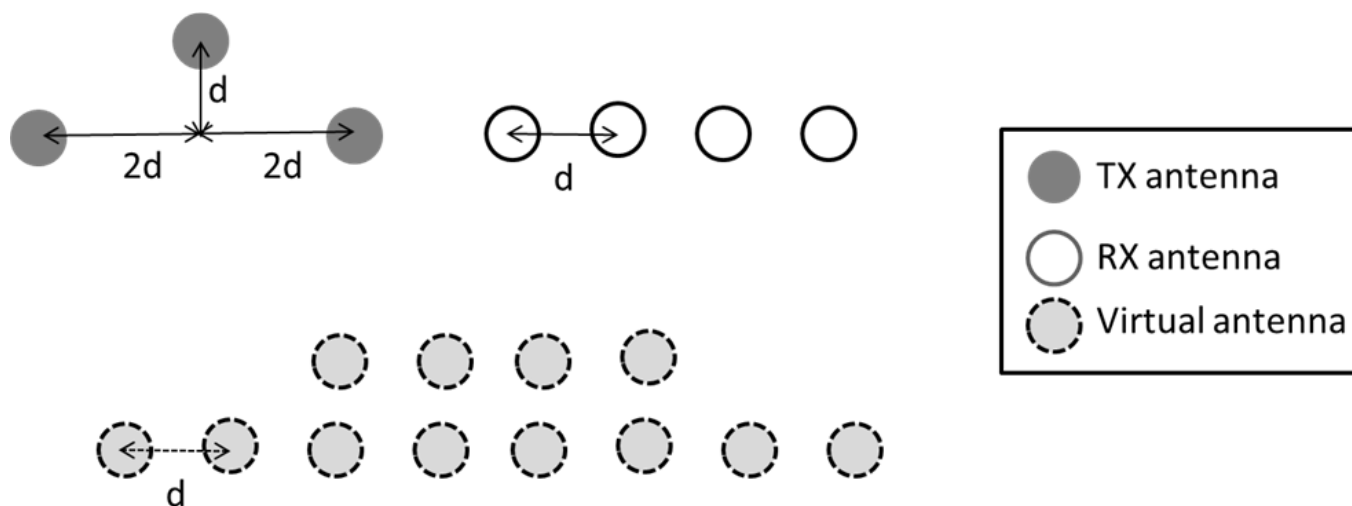
基于第2节的讨论，我们假设我们将图2中雷达的角度分辨率(θ_{res})能力增加一倍。将角度分辨率加倍的一种方法是将RX天线的数量增加一倍（从4个增加到8个），如图4所示。



使用MIMO概念，只需一个额外的TX天线就可以获得相同的结果，参照图讨论如下。



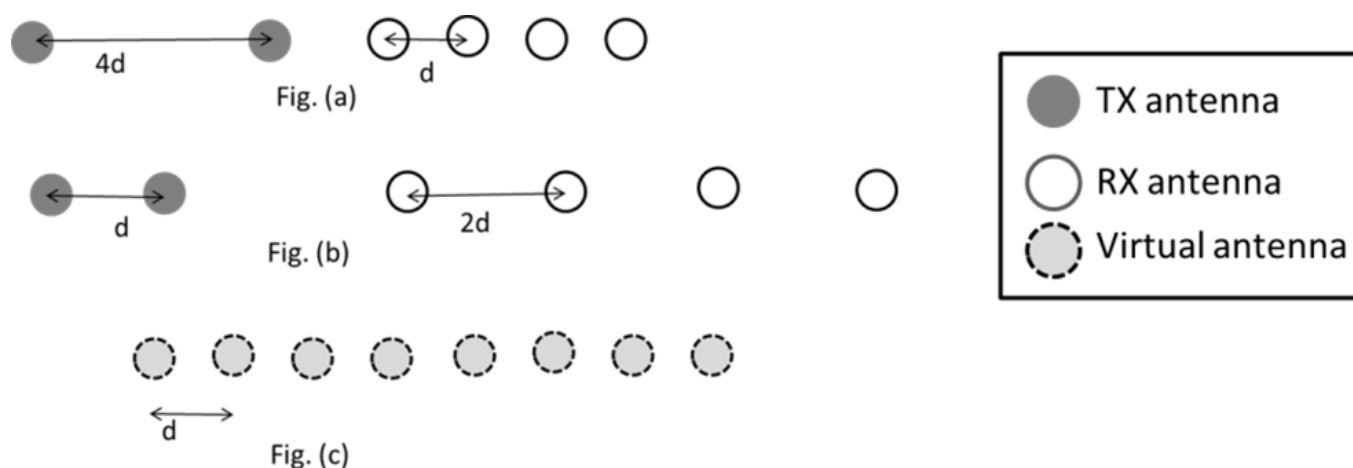
因此，2TX4RX的雷达等效于1TX8RX雷达。



二维MIMO阵列（具有方位角和高程估计能力）

3TX4RX的雷达等效于1TX12RX雷达。

采用不同的物理天线配置，可以实现相同的虚拟天线阵列。图7显示了这些构型，其中图(a)和图(b)中的物理阵列都合成了与图(c)相同的虚拟阵列在这种情况下，易于在机载上放置和路由可能决定了最终的选择。



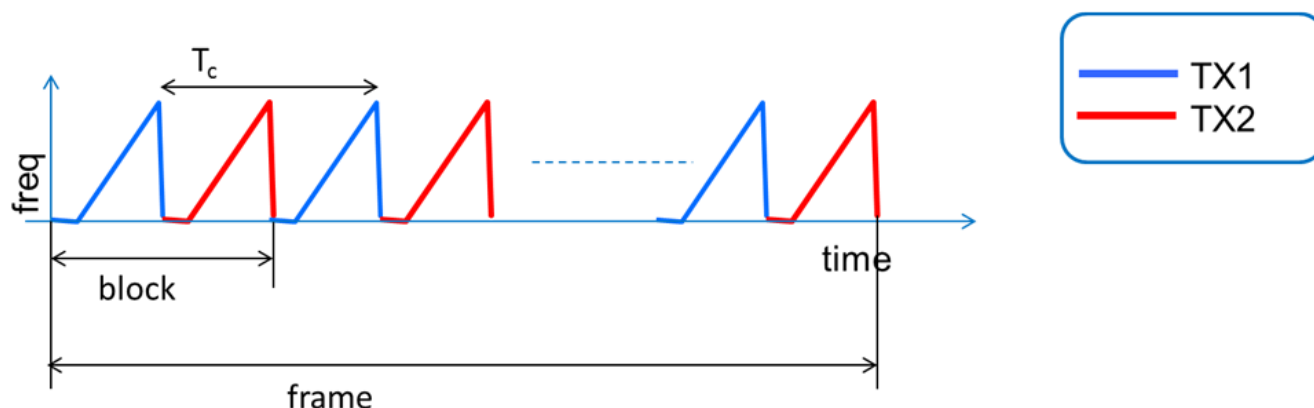
4 MIMO雷达发射天线的复用技术

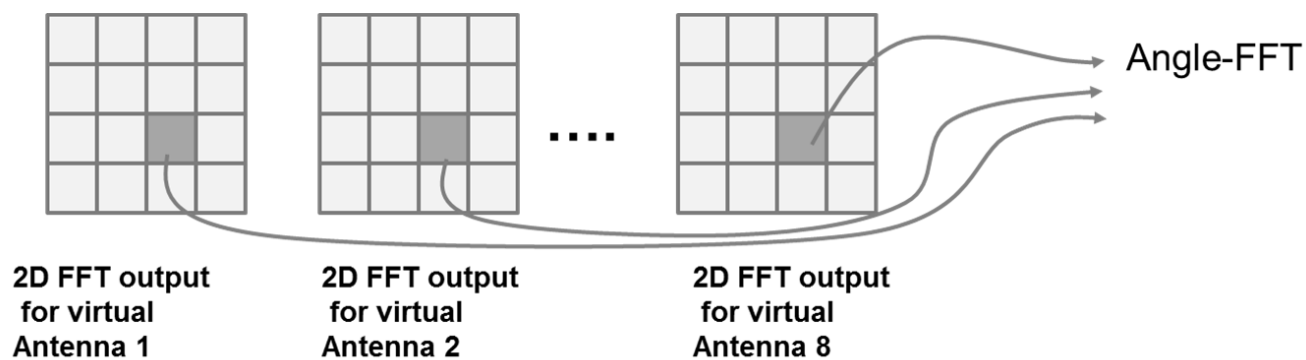
第3节详细介绍了MIMO雷达如何通过使用同一组RX天线处理由多个TX天线传输的信号来工作。需要注意的是，RX天线必须能够分离与不同TX天线对应的信号(例如，通过在正交通道上有不同的TX信道天线发射)。有不同的方法来实现这种分离，这里讨论了这两种技术：时分复用(TDM)和二进制相位调制(BPM)。

4.1 Time Division Multiplexing (TDM-MIMO)

2944

在TDM-MIMO中，正交性是及时的。每一帧由几个block组成，每个块由N个 T_c 组成，每个 T_c 对应于由其中一个TX天线进行的传输。在图8中，对于带有 $N_{TX}=2$ 的FMCW雷达，交替的 T_c 专用于TX1和TX2。TDM-MIMO是从多个TX天线中分离信号的最简单的方法，因此被广泛应用。在TDM-MIMO的一种典型的FMCW雷达处理方案中，对每个TX-RX对执行2D-FFT(多普勒FFT)。每个2D-FFT对应一个虚拟天线。使用 $N_{TX}=2$ 和 $N_{RX}=4$ 的雷达，将计算 $4 \times 2 = 8$ ，这样的距离-多普勒矩阵如图9所示。然后将这2个DFFT矩阵进行非相干求和，生成一个预检测矩阵，然后用一种检测算法识别出该矩阵中对应于有效对象的峰值。对于每个有效的对象，在这些多个2D-FFTs上的相应峰上执行一个angleFFT，以确定该对象的到达角度。在应用angle-FFT之前，必须执行一个多普勒校正步骤，以校正任何速度引起的相变。(多普勒相位补偿)





4.2 BPM-MIMO

未用到

5 Implementing MIMO Radar on mmWave Sensors

参考《6) profile、chirp、advframe、frame的设置及关系.pdf》