

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.002

# 基于毫米波雷达的非视距目标探测和定位方法研究

蒋留兵<sup>1,2</sup>, 张泽<sup>1</sup>, 车俐<sup>1,2</sup>

(1. 桂林电子科技大学, 广西桂林 541004; 2. 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西桂林 541004)

**摘要:** 隐蔽非直视目标探测和定位技术在城市巷战、安防、防暴等领域具有广泛的应用。本文针对L形非视距区域内单目标的探测与定位问题进行研究。首先,对雷达布设位置及可探测区域进行了分析;其次,针对共同可探测区域,设计了多路径联合检测器;最后,基于设计的多径雷达应用系统,利用所提检测定位方法进行实验验证。与现有研究相比,本文的创新点在于:在L形非视距场景下,对宽波束毫米波雷达布设位置及可探测区域进行分析并给出合理建议;其次利用所提多路径联合检测器将不同反射面的多条路径联合使用,提高了检测性能。本文通过实验验证了系统的可靠性及雷达位置对可探测区域的影响,通过仿真与实验探究了所提检测器的性能改善。

**关键词:** 毫米波雷达; 多路径联合检测器; 可探测区域; 非视距目标

中图分类号: TN958 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2024)01-0005-09

引用格式: 蒋留兵, 张泽, 车俐. 基于毫米波雷达的非视距目标探测和定位方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(1): 5-13.

JIANG Liubing, ZHANG Ze, CHE Li. Research on NLOS Target Detection and Localization Method Based on Millimeter Wave Radar[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(1): 5-13.

## Research on NLOS Target Detection and Localization Method Based on Millimeter Wave Radar

JIANG Liubing<sup>1,2</sup>, ZHANG Ze<sup>1</sup>, CHE Li<sup>1,2</sup>

(1. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The detection and positioning technology of concealed non-line-of-sight (NLOS) targets has wide applications in urban street warfare, security, riot prevention and other fields. This article focuses on the detection and localization of a single target in L-shaped non-line-of-sight area. Firstly, the radar deployment location and the detectable area are analyzed. Secondly, a multipath joint detector is designed for the common detectable area. Finally, based on the designed multipath radar application system, experimental verification is conducted by use of the proposed detection and positioning method. Compared with the existing researches, the innovations of our study lie in: the deployment position and detectable area of wide beam millimeter wave radar in L-shaped non-line-of-sight scenarios are analyzed and the reasonable suggestions are given; the proposed multipath joint detector realizes the joint use of multiple paths of different reflection surfaces, for improving detection performance. This article verifies the reliability of the system and the impact of radar position on the detectable area through experiment, and explores the performance improvement of the proposed detector through simulation and experiment.

**Key words:** millimeter wave radar; multipath joint detector; detectable area; NLOS target

## 0 引言

近年来,随着城市化进程的发展,传统窥视镜

探测受工作机理的制约无法对建筑遮蔽目标进行探测,由于雷达频段的电磁波具有丰富的透射、衍射、反射等传播特性,利用雷达探测城市环境目标

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(No.61561010); 广西创新驱动发展专项资助(No.桂科AA21077008); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室2022年主任基金项目(No.GXKL06220102, GXKL06220108); 八桂学者专项经费资助(No.2019A51); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(No.2022YXW07); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(No.2022YCX080)

在反恐维稳、灾害救援、智能交通等领域占据重要地位。由于目标通常隐匿在城市建筑中,为了保证我方人员的安全,迫切需要得到遮蔽目标的位置信息,而电磁波不能通过直视路径来探测遮蔽目标,对此基于非视距的路径探测方式得到了国内外的关注。对于非视距(NLOS)目标的检测主要集中在多径利用和穿墙检测这两种典型方法。穿墙雷达是利用低频电磁波检测目标,而多径探测则可以工作在所有频带。因此,大量学者开始关注多径探测技术。

对非视距目标进行探测最早由 DARPA 发起<sup>[1]</sup>。之后相关学者陆续验证了多径信号对非视距目标探测的可行性<sup>[2-3]</sup>。文献[4-5]主要针对的是单建筑拐角遮蔽目标定位。文献[6]提出多通道扫描雷达系统并基于多通道相位比较算法对墙后目标的位置进行定位。文献[7-8]提出基于匹配子空间滤波法和射线跟踪法对非视距目标进行探测,但两个算法计算量很大。文献[9]提出利用合成双基地雷达基于到达时间的定位方法。文献[10]与[11]分析了拐角多径传输模型,并基于到达时间与相应路径进行匹配,最后通过椭圆交叉定位对目标进行定位,但会发生多径缺失并相应产生多径鬼影问题。此外,文献[12]利用雷达成像算法消除多径鬼影对目标进行定位。文献[13]提出网格匹配的非视距定位方法,需要计算每个网格的到达时间。上述算法多用于提供衍射和高阶反射路径的低频雷达,然而毫米波雷达对于衍射和高阶反射几乎不存在。由于毫米波雷达的便携性以及高距离分辨率,研究毫米波雷达的非视距目标定位算法具有重要意义。

本文首先对 L 型建筑下雷达位置和非视距可探测区域间的关系进行分析;之后针对由不同反射面构成的共同可探测区域,设计多路径联合检测器将多条路径的信息联合使用;最后通过实验验证本文所提算法的可行性。

## 1 非视距可探测区域

本文所考虑的场景是城市巷战及室内反恐环境中的典型场景——L 形拐角;本节将对该场景建立毫米波雷达多径传播模型,并探究雷达位置对

可探测区域的影响,提供了雷达布设方案。

### 1.1 模型构造

L 形走廊的平面二维几何结构如图 1 所示,梯形  $ABCD$  构成的阴影部分表示 NLOS 待探测区域。基于该场景建立直角坐标系,其中  $x$  轴与 Wall-3 平行,雷达  $R$  所在位置为坐标原点。Wall-2 与 Wall-4 之间的走廊宽度为  $L_1$ , Wall-1 与 Wall-3 之间的走廊宽度为  $L_2$ 。拐角点为  $C$ ,  $VR_1$  与  $VT_1$  分别表示由 Wall-1 产生的镜像虚拟雷达及镜像虚拟目标,  $VT_2$  表示由 Wall-2 产生的镜像虚拟目标。非视距目标  $T$ , 通过 Wall-1 和 Wall-2 反射产生的路径分别记为 Path 1 与 Path 2。

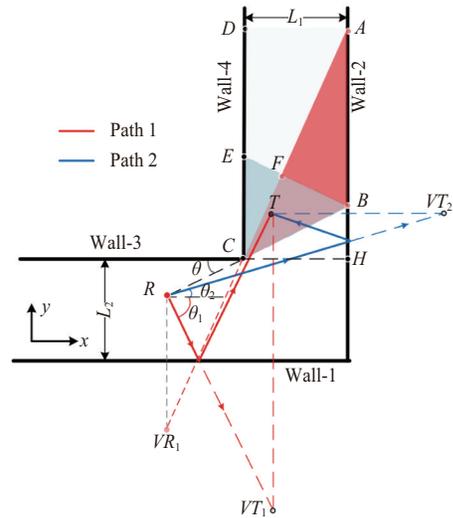


图 1 L 形拐角多径传播模型

考虑的多径信号是由镜面反射产生的信号,即墙面较光滑。对于毫米波雷达而言,通过阅读大量的文献得出二阶及二阶以上的多径信号衰减严重,本文主要考虑的是一阶多径信号,通过将雷达放置不同位置来对 NLOS 可探测区域进行研究。

### 1.2 雷达位置对可探测区域的影响

通常情况下,对非视距区域进行探测时,应该尽可能地保证较大的探测区域,这样能提高对目标的有效探测。然而,非视距可探测区域主要由雷达位置决定。实际应用中,对雷达进行布设,使得待探测目标位于可探测区域内具有重要的研究价值。

如图 1 所示,假设雷达  $R$  与拐角的连线与  $x$  轴

负半轴之间的夹角为 $\theta$ , $R$ 与 $C$ 之间距离为 $d$ ,则拐角 $C$ 的位置为 $(d \cos \theta, d \sin \theta)$ ,反射面 Wall-1 所在位置的 $y$ 坐标为 $(d \sin \theta - L_2)$ ,反射面 Wall-2 所在位置的 $x$ 坐标为 $(d \cos \theta + L_1)$ 。图中 $B$ 表示 Wall-2 上的临界反射点, $A$ 表示通过 Wall-1 产生的临界多径信号与 Wall-2 的交点, $F$ 表示 $BE$ 与 $AC$ 的交点,延长 Wall-3 交 Wall-2 于点 $H$ 。

在走廊宽度足够长的情况下,基于镜面反射原理,当雷达位于 $(\theta, d)$ 处时:

通过 Wall-2 一次反射多径信号产生的可探测区域 $\triangle BCE$ 的面积为

$$S_{\triangle BCE} = L_1^2 \tan \theta \quad (1)$$

通过 Wall-1 一次反射多径信号产生的可探测区域 $\triangle ABC$ 的面积为

$$S_{\triangle ABC} = S_{\triangle ACH} - S_{\triangle BCH} = \frac{L_1^2(L_2 - d \sin \theta)}{d \cos \theta} \quad (2)$$

通过 Wall-1 和 Wall-2 一次反射多径信号产生的共同可探测区域 $\triangle BCF$ 的面积为

$$S_{\triangle BCF} = S_{\triangle BCE} - S_{\triangle CEF} = L_1^2 \tan \theta - \frac{dL_1^2 \sin \theta \tan \theta}{L_2} = \frac{L_1^2 \tan \theta (L_2 - d \sin \theta)}{L_2}, L_2 > d \sin \theta \quad (3)$$

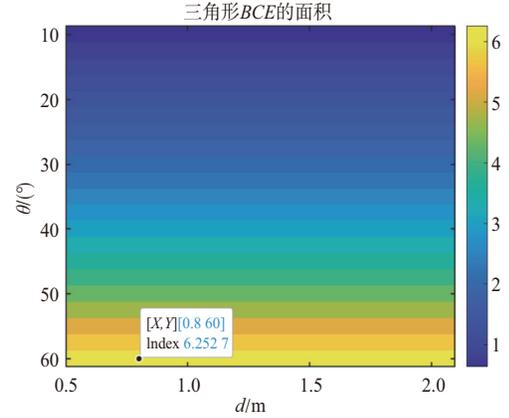
通常,雷达的布设应该使可探测区域的非视距区域最大,即 $S_{\text{多边形}ABCEF}$ 最大,有

$$(\hat{\theta}, \hat{d}) = \max_{(\theta, d)} S_{\text{多边形}ABCEF} \quad (4)$$

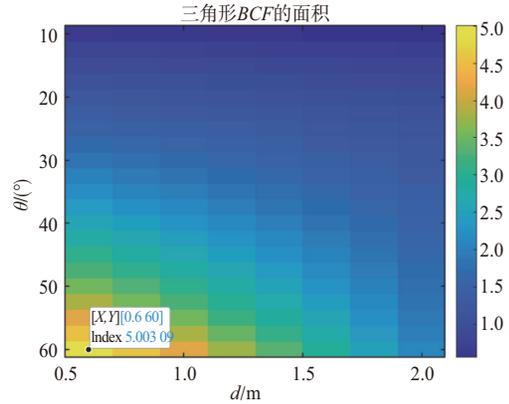
式中,

$$S_{\text{多边形}ABCEF} = S_{\triangle BCE} + S_{\triangle ABC} - S_{\triangle BCF} = \frac{L_1^2 L_2^2 - dL_1^2 \sin \theta (L_2 - d \sin \theta)}{dL_2 \cos \theta} \quad (5)$$

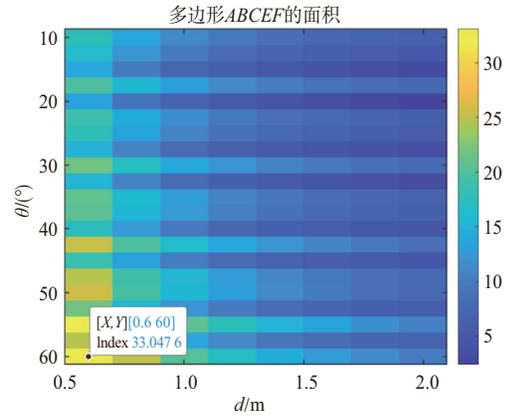
现有对 L 形拐角非视距探测的研究,仅基于图 1 中 Wall-2 产生的多径信号进行目标检测定位的研究,其可探测区域仅为 $\triangle BCE$ 表示的阴影区域,其区域有限,实际探测价值较小。本文采用宽波束毫米波雷达的方法,让雷达发射信号能同时照射到 Wall-1 与 Wall-2,将大大增加可探测区域。为了探究雷达位置及引入 Wall-1 多径信号对可探测区域的影响,选取走廊宽度 $L_1 = 1.94 \text{ m}$ , $L_2 = 2.6 \text{ m}$ , $\theta$ 由 $10^\circ \sim 60^\circ$ 移动,每次移动 $2.5^\circ$ , $d$ 在 $0.5 \sim 2 \text{ m}$ 之间移动,每次移动 $0.1 \text{ m}$ ,通过仿真,得到雷达布设在不同位置时的可探测区域面积如图 2 所示。



(a) Wall-2 反射产生的可探测区域面积



(b) 共同可探测区域面积



(c) 总的可探测区域面积

图 2 雷达位于不同位置时的可探测区域面积图

由图 2(a)可知,对于常规的 L 形走廊,若仅通过 Wall-2 的反射产生的多径信号探测,通过移动雷达位置,其最大可探测区域约为 $6.2 \text{ m}^2$ ;若引入 Wall-1 产生的反射多径信号,其最大可探测面积为 $33 \text{ m}^2$ ,通过 Wall-1 和 Wall-2 的反射多径信号产生的共同可探测区域面积为 $5 \text{ m}^2$ 。移动雷达位置,利

用 Wall-1 产生的反射多径信号进行探测,将大大提高可探测区域面积。此外,由图2可知,在相同角度  $\theta$  下,缩小雷达  $R$  与拐角  $C$  之间的距离  $d$ ,将有利于提高可探测区域的面积;在雷达  $R$  与拐角  $C$  之间的距离  $d$  一定时,总的可探测区域随着角度  $\theta$  的增大而增大。

综上所述,利用雷达进行 L 形场景非视距目标探测时,对雷达的布设应该遵从以下规则:在保证目标在雷达非视距的前提下,将雷达与拐角的距离尽可能缩小,雷达与墙面的夹角尽可能增大。

## 2 多路径联合检测器

由上节可知,利用 Wall-1 与 Wall-2 反射面产生多径信号进行探测,将大大提高可探测区域的面积,同时,将会形成公共可探测区域,如图1中  $\triangle BCF$  所表示的阴影区域。若对位于该区域内的目标进行探测,雷达接收机将收到来自 Path 1 与 Path 2 的两条多径信号,若能将两条多径信号联合使用,将会提高检测概率。本节中,基于已知的场景先验信息,设计一种多路径联合检测器,旨在对共同可探测区域内的微弱多径信号进行检测并提高检测概率。仿真表明,其检测性能优于单路径的传统检测器。

### 2.1 提取有效多径信号方法

利用雷达对遮蔽目标进行探测时,回波信号中通常包含大量墙体等固定杂波,从而淹没目标的有效信号,使遮蔽目标探测变得困难。由于墙体是静止不动的,它的多普勒频率为零,而目标是运动状态导致它产生的多普勒频率分量不为零,利用这一点本文采用 MTI 技术实现固体杂波的滤除,提取出有效的多径信号。一次对消器的结构图如图3所示。

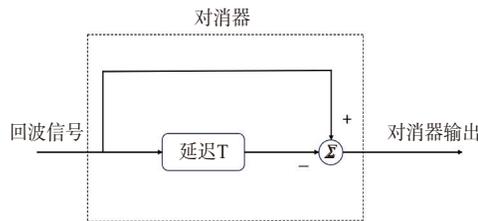


图3 一次对消器的结构框图

### 2.2 检测器的设计

如图1所示,位于共同可探测区域的目标,基于毫米波雷达的高分辨率特性,Path 1 与 Path 2 的多径信号通常不属于同一距离检测单元。因此,针对该区域内的目标检测问题,可以描述为如下的二元假设检验问题:

$$\begin{cases} H_1: r_i = \begin{cases} \alpha_1 p_1 + w_1, & i = 1 \\ \alpha_2 p_2 + w_2, & i = 2 \\ w_i, & i > 2 \end{cases} \\ H_0: r_i = w_i \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $r_i$  表示来自 Path  $i$  的雷达多径回波;  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  分别表示 Path 1 与 Path 2 的多径回波信号的幅度值;  $p_1$  与  $p_2$  分别表示 Path 1 与 Path 2 对应的阵列导向矢量,其中  $\|p_1\|_2 = 1, \|p_2\|_2 = 1$ ;  $w_i$  表示杂波及噪声,假定为独立同分布的复高斯随机向量,均值为 0,协方差矩阵  $M > 0$ 。

假设  $M$  已知,  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  未知,采用广义似然比 (GLRT) 方法设计多径检测器。在  $H_0$  的假设下,  $r$  的概率密度函数 (PDF) 可表示为

$$f_0(r; M) = \frac{1}{(\det(\pi M))^2} \times \exp - \left\{ r_1^H M^{-1} r_1 + r_2^H M^{-1} r_2 \right\} \quad (7)$$

在  $H_1$  的假设下,  $r$  的概率密度函数可表示为

$$f_1(r; M) = \frac{1}{(\det(\pi M))^2} \times \exp - \left\{ (r_1 - \alpha_1 p_1)^H M^{-1} (r_1 - \alpha_1 p_1) + (r_2 - \alpha_2 p_2)^H M^{-1} (r_2 - \alpha_2 p_2) \right\} \quad (8)$$

由式(7)与式(8)可得对数似然比为

$$T = \max_{\alpha_1, \alpha_2} \ln \frac{f_1(r; \alpha_1, \alpha_2, M)}{f_0(r; M)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \xi \quad (9)$$

由于  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  未知,对其进行估计,估计值如下:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_1 &= \frac{p_1^H M^{-1} r_1}{2p_1^H M^{-1} p_1} \\ \hat{\alpha}_2 &= \frac{p_2^H M^{-1} r_2}{2p_2^H M^{-1} p_2} \end{aligned} \quad (10)$$

将  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  代入式(9)中,得到多路径联合检测器的表达式为

$$T = \frac{|\mathbf{p}_1^H \mathbf{M}^{-1} r_1|^2}{2\mathbf{p}_1^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{p}_1} + \frac{|\mathbf{p}_2^H \mathbf{M}^{-1} r_2|^2}{2\mathbf{p}_2^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{p}_2} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{>}} \gamma \quad (11)$$

式(10)中的 $\mathbf{M}$ 可用估计的协方差矩阵 $\mathbf{S}$ 替代, $\mathbf{S}$ 的表达式为

$$\mathbf{S} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H \quad (12)$$

式中, $k$ 表示选取用于估计噪声协方差矩阵的训练单元序号。

多路径联合检测器的操作步骤可简要描述如下:

第1步:根据定位精度要求,将感兴趣的区域划分为 $M \times N$ 的网格,将每个网格点的中心坐标记为 $(x_m, y_n)$ ,其中 $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ;

第2步:计算每个网格点中心 $(x_m, y_n)$ 关于反射面所对应的虚假网格点坐标 $(x'_m, y'_n)$ ,并计算 $(x'_m, y'_n)$ 至雷达 $R$ 的距离 $d_{mn}$ 及波达角 $\theta_{mn}$ ;

第3步:根据 $d_{mn}$ 所在距离单元提取雷达回波数据,得到式(11)中的 $r$ ;

第4步:根据波达角 $\theta_{mn}$ 计算得归一化阵列导向矢量 $\mathbf{p}$ ;

第5步:由式(12)估计噪声协方差矩阵得 $\mathbf{M}$ ;

第6步:根据式(11),对每一个网格点计算得到 $T_{mn}$ ;

第7步:将 $T_{mn}$ 与门限 $\gamma$ 进行比较,若 $T_{mn} > \gamma$ ,则 $T_{mn}$ 所对应的网格点存在目标,且目标位置为 $(x_m, y_n)$ 。

### 2.3 性能对比

为了验证所提检测器的性能优势,采用蒙特卡洛仿真实验,在给定虚警概率 $P_{fa} = 10^{-4}$ 的情况下通过检测概率 $P_d$ 来评估所提检测器的性能,并与文献[14]中的AMF检测器进行对比。为了控制计算量,进行 $100/P_{fa}$ 次独立的蒙特卡洛仿真实验。在信号强度 $\alpha_1$ 与 $\alpha_2$ 选取不同值时,所提检测器及AMF检测器的性能曲线如图4所示。仿真参数于表1中给出。

从图4中可以看出,当 $\alpha_2=0.06\alpha_1$ 时,所提检测器与AMF检测器的性能相似;当 $\alpha_2 \geq 0.06\alpha_1$ 时,相同SINR下,所提出多路径联合检测器的性能明显优于AMF检测器;当 $\alpha_2=0.5\alpha_1$ 与 $\alpha_2=\alpha_1$ 时,同等

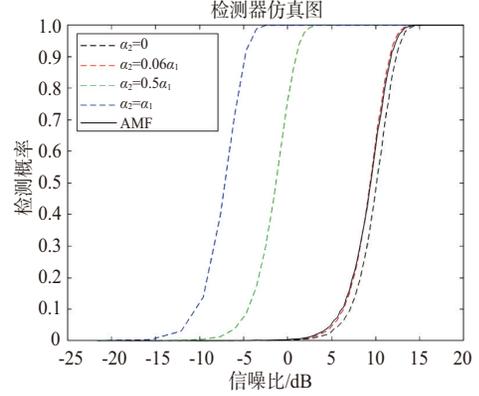


图4 多路径联合检测器与AMF检测器性能对比图

表1 仿真参数表

参数	参数值
阵元数 $N$	16
载频 $f_0$	77 GHz
阵元间距 $d$	$\lambda / 2$
Path 1的波达角 $\theta_1$	$0^\circ$
Path 2的波达角 $\theta_2$	$30^\circ$
虚警概率 $P_{fa}$	$10^{-4}$
Path 1的导向矢量 $\mathbf{p}_{01}$	$\mathbf{p}_{01} = [1, e^{j2\pi d \sin \theta_1 / \lambda}, \dots, e^{j2\pi(N-1)d \sin \theta_1 / \lambda}]$
Path 2的导向矢量 $\mathbf{p}_{02}$	$\mathbf{p}_{02} = [1, e^{j2\pi d \sin \theta_2 / \lambda}, \dots, e^{j2\pi(N-1)d \sin \theta_2 / \lambda}]$
归一化的导向矢量	$\mathbf{p}_1 = \frac{\mathbf{p}_{01}}{\ \mathbf{p}_{01}\ _2}$ $\mathbf{p}_2 = \frac{\mathbf{p}_{02}}{\ \mathbf{p}_{02}\ _2}$

SINR下,多路径联合检测器的检测性能较AMF检测器具有较大的性能提升。然而,当 $\alpha_2=0$ ,即第二条多路径不存在时,所提检测器的检测性能较AMF有所下降。

综上所述,在多条多径信号存在时,所提检测器利用包含目标的多条路径进行目标检测,根据不同路径信号强弱的相对关系,检测性能均有不同程度的提高;然而,如果将干扰或者杂波误认为提供目标信息的多径信号,会降低SINR,进而利用本文所提出检测器进行检测,检测性能必然下降(即 $\alpha_2 = 0$ 的情况)。

## 3 实验结果与分析

针对本文所研究的L型非视距目标检测定位问题,利用所提出的算法展开相应实验。

### 3.1 毫米波雷达及实验场景介绍

实验设备采用TI公司AWR1843车载雷达板

和 DCA1000 数据采集卡作为收发信号,如图 5 所示。实测场景选用桂林电子科技大学南宁研究院 A6 楼,如图 6 所示。

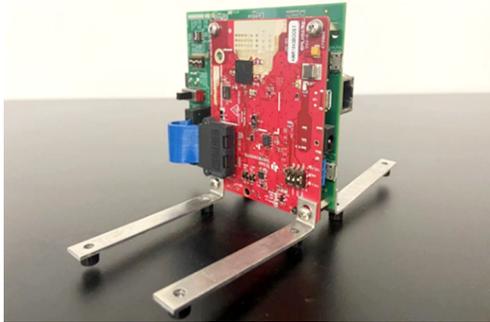


图 5 毫米波雷达实物图

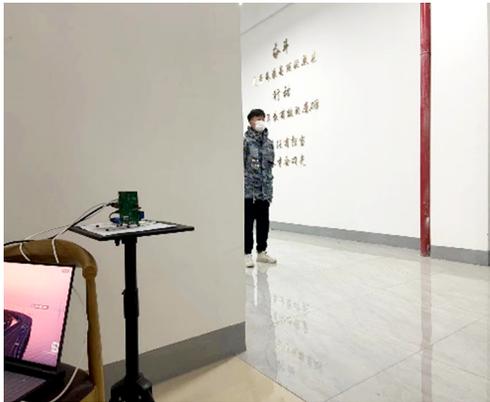


图 6 实验场景图

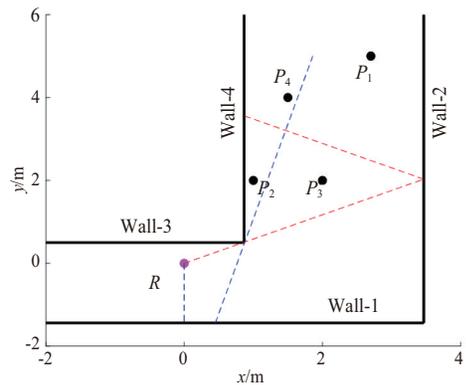
### 3.2 实验

为了验证毫米波雷达的多径传播模型及利用多径信号对非视距目标进行检测定位的可行性,通过所提检测器及现有的多径定位算法,在一个 L 形走廊里采集数据进行实验。选取雷达天线阵列中心所在位置为坐标原点。针对不同的实验目的,进行了如下三组实验,给出实验结果并进行分析。

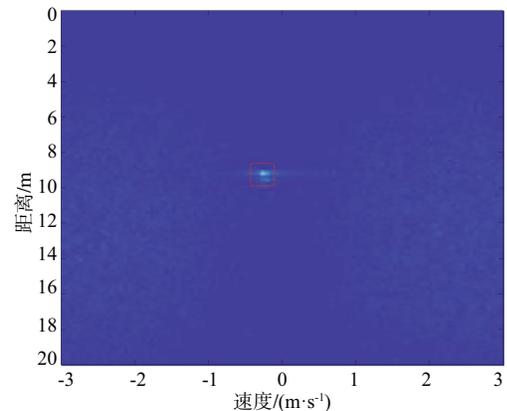
#### 实验 1: 雷达布设位置对可探测区域的影响

为了验证毫米波雷达的多径传播模型及雷达位置对可探测区域的影响,对于非视距区域中的微动目标(目标轻微左右摇摆)进行探测,采用二脉冲对消进行动目标显示,再经过二维 FFT,得到目标某一时刻的距离-多普勒图像如图 7 所示。图 7(a)为待测区域及目标所在位置图,目标的所在

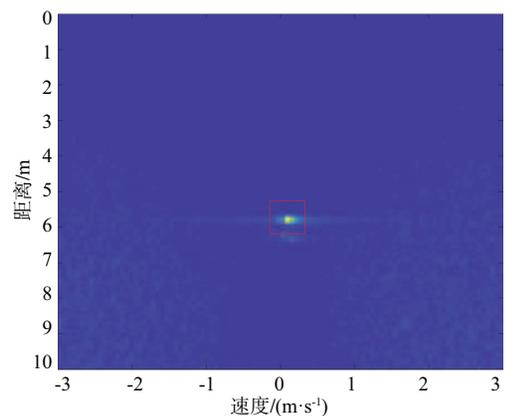
位置为  $P_1(2.7,5)$ ,  $P_2(1,2)$ ,  $P_3(2,2)$ ,  $P_4(1.5,4)$ , 雷达位置  $(\theta, d)$  为  $(30^\circ, 1)$ 。理论上,目标分别位于由 Wall-1 产生的可探测区域、Wall-2 产生的可探测区域、共同可探测区域及不可探测区域;对位于  $P_4$  处的不可探测区域内的目标,通过移动雷达位置到  $(10^\circ, 0.5)$ , 并进行重新探测,结果如图 7(f) 所示。对比图 7(b)、(d) 或 (c)、(d) 可知,对于拐角区域内



(a) 待测区域划分及目标所在位置二维坐标



(b) 目标位于  $P_1$  处



(c) 目标处于  $P_2$  处

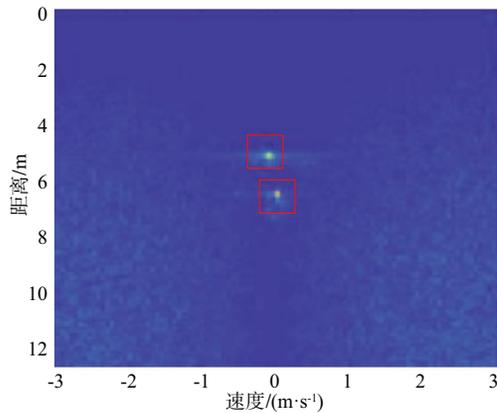
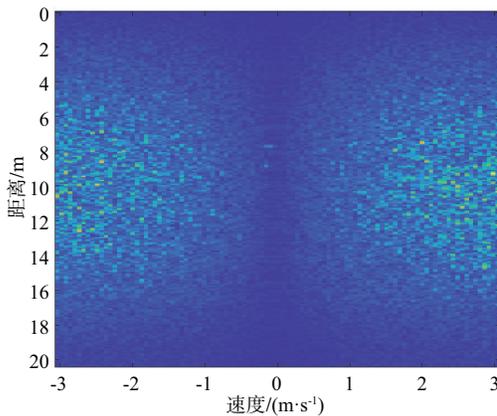
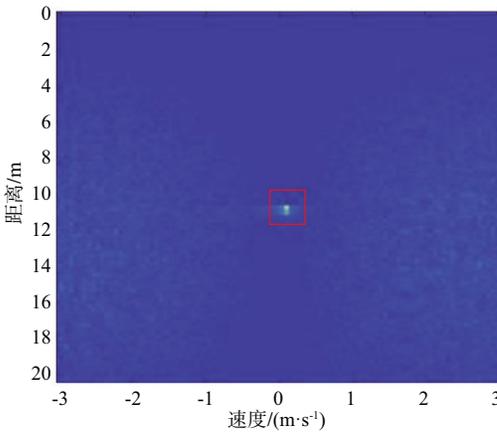
(d) 目标位于 $P_3$ 处(e) 目标处于 $P_4$ 处(f) 移动雷达位置对 $P_4$ 进行重新测量

图7 目标处于不同位置时的距离多普勒图

的单目标,通过 Wall-1 或 Wall-2 产生的一次反射多径信号都能探测到目标,并且当目标处于共同可探测区域时,雷达将接收 Wall-1 与 Wall-2 产生的两条多径回波(图7(d)所示);对比图7(e)、(f)可知,对位于同一位置的目标,通过移动雷达位

置,可以成功探测到原本无法探测到的目标。综上所述,通过合理布设雷达,将有效提高对非视距区域隐藏目标的成功探测。

### 实验2: 微动目标定位

针对位于共同可检测区域内的目标,利用所提多路径检测器进行检测定位,数据处理流程如2.2节所述。实验中,雷达位置为 $(30^\circ, 1)$ ,微动目标的真实位置为 $(2, 2)$ ,设置感兴趣的检测区域为: $X=1 \sim 3 \text{ m}$ , $Y=0.5 \sim 3 \text{ m}$ ,定位精度为 $0.15 \text{ m}$ ,即以 $0.15 \text{ m}$ 的间隔将场景网格化。分别用本文所提检测器及 AMF 检测器对目标进行检测定位,结果如图8和图9所示。由图8与图9可知,无论采用多路径联合检测器或 AMF 检测器对位于 $(2, 2)$ 处的目标进行检测定位,均可以将目标定位于 $(2.05, 1.867)$ 的位置,与目标真实位置相近。但对比两图可知,采用多路径联合检测器对目标进行检测,由于将多路径联合处理,可以提高目标所在网格点的值,更加有利于检测能量较弱的目标。

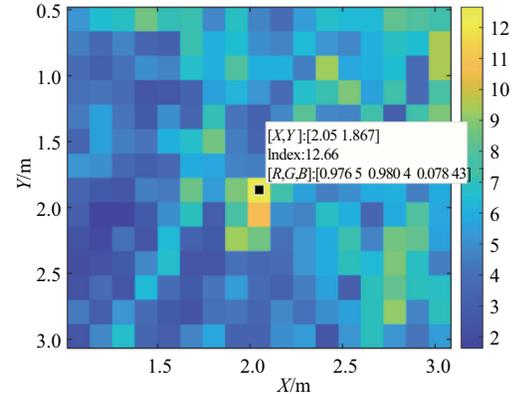


图8 多路径联合检测器定位二维坐标结果

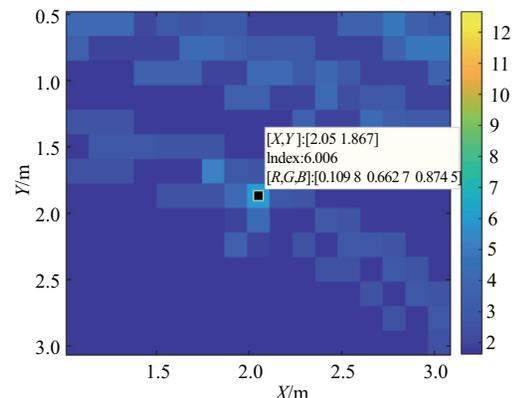


图9 AMF检测器定位二维坐标结果

### 实验3: 运动目标定位

在 L 形走廊模拟室内反恐场景, 雷达位于  $(30^\circ, 1)$ , 目标由  $(1, 2)$  的位置沿直线行走至  $(2, 2)$ , 再沿直线行走至  $(2, 5)$  处, 基于 3.2 节中多路径联合检测器定位方法, 采用 CA-CFAR 检测, 通过 DSP 进行信号处理, 最终的检测定位结果如图 10 所示。当目标由 Wall-2 构成的可探测区域移动到共同可探测区域, 再移动至由 Wall-1 构成的可探测区域时, 雷达将接收到来自两面墙的反射多径信号, 因此, 利用宽波束雷达同时获取多个反射面的多径信号在实际运用中是可行的; 图 10 中红线表示目标真实运动轨迹, 利用上述定位方法对遮蔽运动目标进行不断定位, 考虑到人体反射面积的误差影响, 仍可以清晰地得到目标运动轨迹。

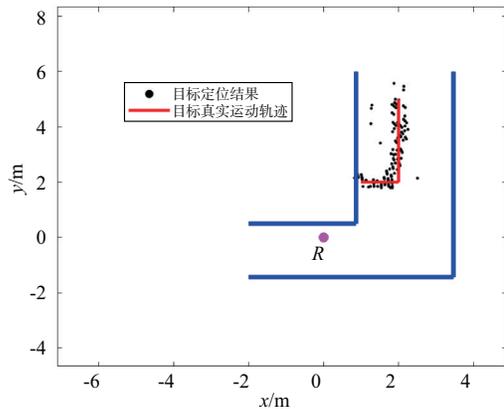


图 10 运动目标运动轨迹二维坐标实验

## 4 结束语

本文基于毫米波雷达对 L 型非视距区域的目标检测定位问题进行了分析与研究。对雷达位置与可探测区域间的关系进行了理论与仿真分析, 给出了雷达布设指南。此外, 针对 L 型拐角非视距研究中存在可探测区域小的问题, 提出利用宽波束毫米波雷达同时获取多个反射面的信号提高可探测区域, 并通过实验验证了该方法的有效性; 其次, 对位于由多个反射面构成的共同可探测区域内的目标, 基于同一目标不同路径的多径信号均包含目标信息的原理, 将多路径联合使用, 设计了多路径联合检测器, 仿真结果表明, 当多路径存在且达到一定强度时, 该检测器可以有效提高检测性能, 实验表明了该检测器的可行性与有效性; 最后, 针对非视距探测的实际应用问题, 根据 2.2 节

中的定位方法进行实验, 结果给出目标位置信息。

## 参考文献:

- [1] KROLIK J, FARRELL J, STEINHARDT A. Exploiting Multipath Propagation for GMTI in Urban Environments [C]// 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, NY, USA: IEEE, 2006:4.
- [2] FERTIG B, BADEN J, KERCE C, et al. Localization and Tracking with Multipath Exploitation Radar [C] // 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA: IEEE, 2012: 1014-1018.
- [3] ZETIK R, ESCHRICH M, THOMA R. Looking Behind a Corner Using Multipath-Exploiting UWB Radar [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(3): 1916-1926.
- [4] LI Songlin, CUI Guolong, GUO Shisheng, et al. On the Electromagnetic Diffraction Propagation Model and Applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13:884-895.
- [5] LI Songlin, WANG Yumiao, CUI Guolong, et al. NLOS Target Localization with a UWB Radar [C] // 2019 IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA: IEEE, 2019:1-5.
- [6] GUO Shisheng, ZHAO Qingsong, CUI Guolong, et al. Behind Corner Targets Location Using Small Aperture Millimeter Wave Radar in NLOS Urban Environment [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13:460-470.
- [7] THAI K, RABASTE O, BOSSE J, et al. Around-the-Corner Radar: Detection and Localization of a Target in Non-Line of Sight [C] // 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, WA, USA: IEEE, 2017:842-847.
- [8] THAI K P H, RABASTE O, BOSSE J, et al. Detection-Localization Algorithms in the Around the Corner Radar Problem [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6):2658-2673.
- [9] DU Huagui, FAN Chongyi, CAO Chun, et al. A Novel NLOS Target Localization Method with a Synthetic Bistatic MMW Radar [C] // 2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Hangzhou, China: IEEE, 2020:1-5.
- [10] WANG Lingyu, TANG Quan, JIA Yong, et al. Multipath Imaging for NLOS Targets Behind a T-shaped Corridor with Single-channel SFCW Radar [C] // 2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Process-

ing, Nanjing, China:IEEE, 2021:396-400.

- [11] TANG Quan, LI Jun, WANG Lingyu, et al. Multipath Imaging for NLOS Targets Behind an L-Shaped Corner with Single-Channel UWB Radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(2):1531-1540.
- [12] LI Songlin, GUO Shisheng, CHEN Jiaohui, et al. Multiple Targets Localization Behind L-Shaped Corner via UWB Radar [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2021, 70(4):3087-3100.
- [13] DU H G, FAN C Y, CAO C, et al. NLOS Target Localization Behind an L-Shaped Corner Based on Grid Matching [C] // IET International Radar Conference, Online Con-

ference:IET, 2020:1066-1071.

- [14] ROBEY F C, FUHRMANN D R, KELLY E J, et al. A CFAR Adaptive Matched Filter Detector [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(1):208-216.

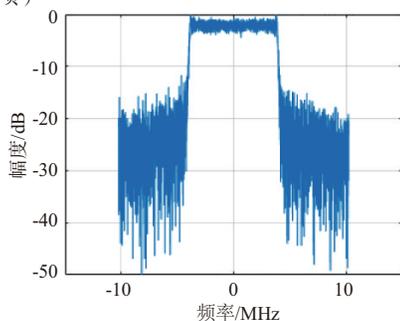
#### 作者简介:

蒋留兵 男,研究员,主要研究方向为宽带信号与信息处理、智能信息处理。

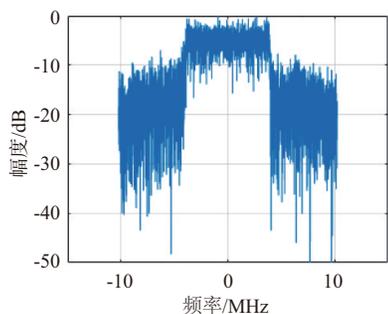
张泽 男,硕士研究生,主要研究方向为信号处理、非视距目标定位算法。

车俐 女,硕士,主要研究方向为信号处理。

(上接第4页)



(c) 信噪比0 dB下重采样后信号频谱



(d) 信噪比-10 dB下重采样后信号频谱

图4 不同信噪比下整数抽取结合小数插值重采样输出信号频谱

实验表明,本方法在0 dB信噪比情况下,仍具备较好的重采样输出信号品质,可应用于低信噪比条件下的信号采样。

## 4 结束语

本文针对射频高速率采样需求,开展了数字重采样技术研究,提出一种整数抽取结合小数插值的数字重采样方法。由理论与仿真结果可知,该方法可以实现射频信号复杂分数倍数字重采样精确调整。且通过整数抽取将小数插值滤波器的

输入采样率降低,使得Farrow内插滤波器的频率响应零点接近于目标采样率,改善了带外噪声滤除能力。在信噪比相同的情况下,整数抽取结合小数插值的数字重采样输出信号质量更好。

与传统整数结合简单分数抽取相比,该方法可实现大范围精确变采样率变换,具有更大的普适性。与直接小数插值方式进行变采样率相比,可极大地降低后续信号处理的并行度,且改善了带外噪声。

#### 参考文献:

- [1] 刘明鑫,尹亮,汪学刚,等.基于射频采样宽带数字阵列雷达波束形成[J].雷达科学与技术,2020,18(4):394-398.
- [2] HARRIS F J. Multirate Signal Processing for Communication Systems[M]. New Jersey: Person, 2004.
- [3] 王成虎.基于FPGA的高速并行插值滤波器设计与实现[D].成都:成都理工大学,2021.
- [4] PUN C K S, WU Y C, CHAN S C, et al. On the Design and Efficient Implementation of the Farrow Structure [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(7):189-192.
- [5] DAM H H. Variable Fractional Delay FIR Filter Design with a Bicriteria and Coefficient Relationship [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2014, 61(1):36-40.
- [6] 钟义波.软件无线电中CIC滤波器研究与FPGA实现[D].吉林:吉林大学,2020.

#### 作者简介:

单长胜 男,博士,正高级工程师,主要研究方向为航天测控与通信。