

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615122

基于延伸介质透镜与 CFAR-PT 算法的毫米波雷达远距离测距方法

曾鑫亮¹, 邵李焕¹, 邓艳军¹, 傅晓强², 魏杨凡¹

(1. 杭州电子科技大学电子信息学院 杭州 310018; 2. 上海铭控传感技术有限公司 上海 201702)

摘要:针对毫米波雷达在远距离测距中回波信号微弱、易受噪声干扰导致检测不稳定的问题,提出一种结合轴向延伸介质透镜与连续峰值跟踪恒虚警检测(CFAR-PT)算法的远距离测距方法。首先,设计了一种具备轴向延伸结构的平凸介质透镜,通过 CST 电磁仿真优化延伸长度,实现波束压缩与天线增益提升;透镜采用聚四氟乙烯材料,直径 40.62 mm,焦距 30 mm,最优延伸长度 9 mm,工作频段 59~64 GHz。其次,针对介质透镜引入的回波能量在距离维分布不均的问题,提出基于连续峰值跟踪的 CFAR-PT 算法,在单帧单元平均恒虚警检测基础上引入上一帧目标索引作为位置约束,通过邻域筛选与幅值比较选取局部最大峰值,实现目标索引的稳定输出。最后,基于毫米波雷达芯片搭建实验平台,系统测距精度小于 2 mm,在 59~64 GHz 频段开展中远距离测距对比实验。仿真结果表明,在全频段内天线增益均高于 20.79 dBi,在中心频率 61.5 GHz 处增益达 21.1 dBi,较传统平凸透镜提升 1.2 dBi,3 dB 波束角由 8°减小至 6.7°。实验结果表明,在中距离区间传统 CFAR 与 CFAR-PT 算法均能准确检测目标,在远距离区间传统 CFAR 因近距离高幅值噪声干扰产生虚假目标导致测距失效,而所提 CFAR-PT 算法通过连续帧位置约束有效抑制虚假目标干扰,实现稳定可靠的目标跟踪。证明通过透镜结构优化与检测算法改进的协同设计,能有效提高了毫米波雷达远距离测距的准确性与稳定性。

关键词:毫米波雷达;介质透镜;恒虚警检测;连续峰值跟踪;雷达测距

中图分类号: TH89 TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Millimeter-wave radar long-distance ranging based on extended dielectric lens and CFAR-PT algorithm

Zeng Xinliang¹, Shao Lihuan¹, Deng Yanjun¹, Fu Xiaoliang², Wei Yangfan¹

(1. School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Meikon Sensing Technology Co., Ltd., Shanghai 201702, China)

Abstract: To address the problem of weak echo signals and noise-induced instability in long-range millimeter-wave radar ranging, a novel ranging method combining an axially extended dielectric lens and a continuous peak tracking constant false alarm rate (CFAR-PT) algorithm is proposed. First, an axial extended planoconvex dielectric lens is designed, and its extension length is optimized using CST electromagnetic simulations to achieve beam compression and antenna gain enhancement. The lens is fabricated from polytetrafluoroethylene, with a diameter of 40.62 mm, a focal length of 30 mm, and an optimal extension length of 9 mm, operating in the 59~64 GHz frequency band. Second, to address the non-uniform distribution of echo energy along the range dimension caused by the dielectric lens, a CFAR-PT algorithm based on continuous peak tracking is proposed. Built upon conventional cell-averaging CFAR detection, the algorithm introduces the target index from the previous frame as a positional constraint. By performing neighborhood selection and amplitude comparison, the local maximum peak is identified, enabling stable target indexing. Finally, an experimental platform is built based on a millimeter-wave radar chip, and the system's ranging accuracy is less than 2 mm. Mid-to-long-range comparison experiments are conducted in the 59~64 GHz frequency band. Simulation results show that the antenna gain exceeds 20.79 dBi across the entire frequency band, reaching 21.1 dBi at 61.5 GHz, which is 1.2 dBi higher than that of a conventional planoconvex lens. The 3 dB beamwidth is reduced from 8° to 6.7°. Experimental results demonstrate that both conventional CFAR and

CFAR-PT achieve accurate detection in the mid-range region. However, in the long-range region, conventional CFAR fails due to false targets caused by strong near-range noise, whereas the proposed CFAR-PT algorithm effectively suppresses such interference through inter-frame positional constraints, enabling stable and reliable target tracking. The results demonstrate that the proposed co-design of lens structure optimization and detection algorithm significantly improves the accuracy and stability of long-range millimeter-wave radar ranging.

Keywords: millimeter-wave radar; dielectric lens; CFAR; continuous peak tracking; radar ranging

0 引言

相比于其他传统的测距技术,毫米波雷达因其非接触测量、抗环境干扰能力强及全天候工作等优点,在工业测距、液位监测及目标检测等领域得到了广泛应用^[1-3]。在毫米波雷达测距场景中,雷达系统需在较大探测范围内保持稳定的检测能力。然而,受限于发射功率与天线孔径,远场目标的回波信号通常较为微弱,易受噪声影响,从而限制了系统的有效探测距离。因此,本文拟通过设计高增益介质透镜天线以及采用目标检测算法去提高毫米波雷达的远距离测距的准确性。

相比于复杂的板载阵列天线设计,介质透镜天线作为一种高效的被动波束聚焦结构,能够通过电磁波在介质中的折射作用压缩波束并提升方向增益性,同时保持雷达系统结构简单、成本低、易于集成。因此,高增益介质透镜的设计在毫米波雷达的测距系统设计中具有重要的意义。Santos 等^[4]首次提出了一种简单高效的半球形介质天线设计模型,并通过数学建模和仿真分析,提出了一种优化半球形介质天线设计的方法,并通过实验验证了其模型理论结果的正确。Saleem 等^[5]探讨了不同介质在 60 GHz 毫米波雷达频段对半球形介质天线增益的影响,通过仿真和实验验证证明了不同透镜材料和尺寸对增益的显著影响。文献[6]提出一种介质隔板圆极化器与半球形介质透镜结合的方式提高增益的方法。文献[7-8]通过运用介质透镜天线设计提高远距离目标回波信号的强度,通过恒虚警检测识别远距离目标的毫米波雷达液位计。上述研究都聚焦于介质透镜电磁特性的优化设计,通过提升天线的增益,进一步提升远距离目标回波信号的强度从而增强系统的远距离探测能力。

对于弱目标信号检测,本文引入恒虚警率检测算法(constant false alarm rate, CFAR)^[9-11],该算法是一种在噪声和杂波背景下实现自适应目标检测的经典方法,在雷达信号处理中被广泛应用^[11-12]。CFAR 检测算法在毫米波雷达准确目标检测中广泛运用。郭超杰^[7]与刘英杰^[8]采用单元平均 CFAR 算法(cell averaging CFAR, CA-CFAR)来实现对目标位置的准确检测。牟一飞^[13]提出使用半边的均值类 CA-CFAR 来处理近距离的噪声干扰问题,以提升近距离的弱目标检测。上面所述 CA-CFAR

算法主要针对均匀或统计特性变化的杂波环境设计,通过自适应调整检测门限以维持恒虚警率。对于雷达测距中回波信号的近距离区域回波幅值较高、信噪比充足,而远距离目标回波较弱、信噪比较低的弱目标检测问题。上述的传统单一门限的 CA-CFAR 检测方法难以消除虚假检测目标对远距离弱目标的干扰问题。

因此,本研究设计并加工了一种具备轴向延伸结构的平凸介质透镜,通过 CST 仿真软件(computer simulation technology studio suite, CST)优化透镜平面延伸结构,实现波束压缩与天线增益提升,从物理增益方面增强远距离回波信号的目标回波强度。对于虚假检测目标对远距离弱目标的干扰问题,本研究提出一种基于连续峰值跟踪的 CFAR 检测算法(CFAR peak tracking, CFAR-PT),该算法在单帧引入 CA-CFAR 自适应门限检测能力上进行改进。引入连续帧目标位置约束,对每一帧的候选目标峰值集合进行邻域筛选,再通过幅值比值选取局部最大峰值,实现目标索引的稳定输出,从而提升对回波信号中目标检测的准确性和鲁棒性。最后,通过实际测量实验验证本文研究设计在毫米波雷达测距系统中的实用性。

1 介质透镜与 CFAR 算法原理

1.1 透镜天线原理

透镜天线实现高增益是通过改变波的传播方向来实现的,从馈源天线辐射出来的电磁球面波经过透镜后的路劲长度是一样的,透镜是可以通过路径差来弥补相位差的,达到了喇叭馈源的辐射电磁波由球面波到平面波的转换。根据透镜的组成材质的不同,波传播速度也分为加速透镜和延迟透镜,本文运用的为介质延迟透镜。在透镜的结构设计上,可以类比光学透镜对于光线传播的折射原理。在电磁波的传播路线中,天线馈源辐射的电磁波到达透镜天线口径面上路线长度是相等的,也被称为费马原理,在几何光学中被称为等光程原理^[14]。所以,如图 1 中沿着边缘路线 OSS' 的电长度与沿着中轴线 $OQQ'Q''$ 的电长度相同。

假设 $OQ = f$, $OS = R$, 根据上述关系可得:

$$\frac{R}{\lambda_0} = \frac{f}{\lambda_0} + \frac{R \cos \theta - f}{\lambda_d} \quad (1)$$

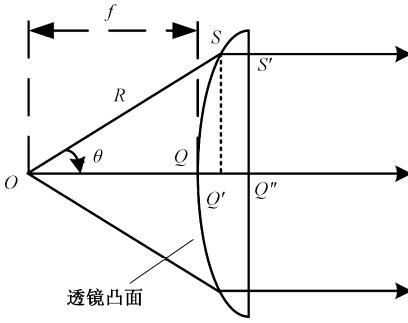


图1 透镜几何关系

Fig. 1 Geometric diagram of the lens

其中, λ_0 为在空间中电磁波传输的波长, λ_d 为在透镜中电磁波传输的波长。将式(1)乘以 λ_0 , 折射率 $n = \lambda_0/\lambda_d$, 式(1)可简化得到:

$$R = \frac{(n-1)f}{n \cos \theta - 1} \quad (2)$$

其中, f 对应到透镜中为透镜的焦距, 折射率 n 还可

以表示为根号下相对磁导率乘相对介电常数。 μ_r 为介质材料中的相对磁导率, 是介质材料中的相对介电常数, 如式(3)所示。

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (3)$$

1.2 一维 CA-CFAR 检测算法原理

CA-CFAR 目标检测算法在毫米波雷达目标测距检测的实际工程中被广泛使用。常见的一维均值类 CFAR 目标检测算法包含单元平均 CFAR、最大选择 CFAR (greatest of CFAR, GO-CFAR) 和最小选择 CFAR (smallest of CFAR, SO-CFAR) [15-16]。一维均值类 CFAR 检测算法中, 背景杂波功率的估计主要依赖于待检测单元附近的参考单元数据, 通过自适应计算得出参考单元的背景噪声功率并动态设定 CFAR 的目标检测门限, 对待检查单元进行判定对比, 实现对目标信号的自适应动态检测。

如图2所示, 为避免待检测单元的能量泄漏对背景杂波功率估计产生负面影响, 需将与待检测单元相邻的单元独立设定为保护单元 G 。

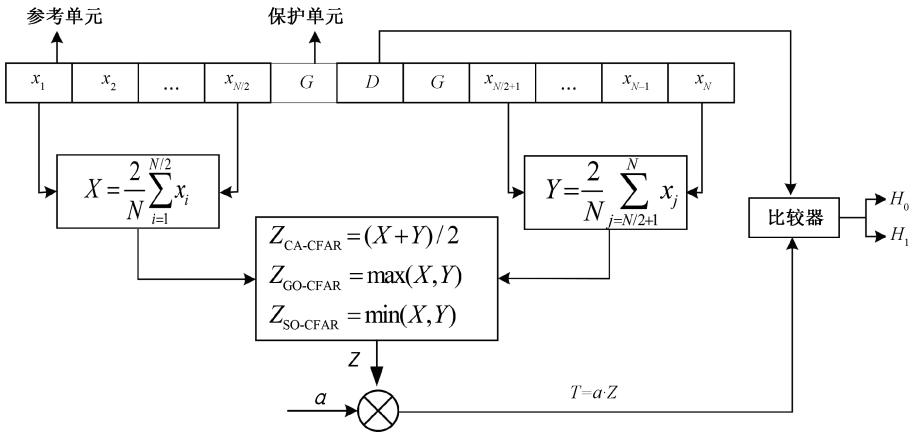


图2 CFAR 算法原理

Fig. 2 Block diagram of the CFAR algorithm

基于待检测单元左右两侧参考单元功率均值为:

$$X = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} x_i \quad (4)$$

$$Y = \frac{2}{N} \sum_{j=N/2+1}^N x_j \quad (5)$$

得出均值恒虚警检测算法 CA-CFAR、GO-CFAR 和 SO-CFAR 的背景杂波功率估计值:

$$Z = \begin{cases} (X+Y)/2 \\ \max(X,Y) \\ \min(X,Y) \end{cases} \quad (6)$$

随后通过门限因子 α 与总估计值 Z 的乘积运算, 得出用于目标检测的门限值:

$$T = \alpha Z \quad (7)$$

其中, 门限因子 α 取决于设定的恒虚警概率 P 计算公式为:

$$\alpha = N(P^{-1/N} - 1) \quad (8)$$

P 设定了系统的允许误判噪声为目标的检测概率, 为指定的值 [8, 16]。

2 轴向延伸透镜和 CFAR-PT 算法

2.1 轴向延伸结构型平凸透镜设计

本文设计了一种延伸型平凸介质透镜天线, 该透镜在传统平凸介质透镜的基础上, 对平面侧结构进行轴向延伸设计, 以提高透镜边缘区域的电磁能量利用率, 从而提升天线有效辐射口径并增强天线增益。根据口径天线

理论, 天线增益 g 与有效口径面积成正比:

$$g = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (9)$$

其中, A_e 为有效口径面积, λ 为工作波长。

轴向延伸结构通过改变边缘区域的传播路径分布来增强主波束强度。在不改变平凸透镜口径和透镜焦距的情况下, 本文的轴向延伸部分设计能等效于去增大透镜的有效辐射口径。

根据几何光学等线程分析, 透镜边缘区域相较中心区域附加传播路径差 Δs 可表示为:

$$\Delta s = \sqrt{f^2 + R^2} - f \quad (10)$$

对式(10)泰勒展开可得到:

$$\Delta s = \sqrt{f^2 + R^2} - f \approx \frac{R^2}{2f} \quad (11)$$

考虑传播中的介质延时效对光程的影响, 轴向延伸结构附加等光程差 Δs_e 可表示为:

$$\Delta s_e = (n - 1)L \quad (12)$$

其中, n 为折射率, L 为延伸长度。

根据式(11)和(12)可得:

$$L \approx \frac{R^2}{2f(n - 1)} \quad (13)$$

结合式(13), 本文将进一步结合介质透镜电磁仿真, 构建延伸长度与天线增益变化特性曲线进行分析, 从而确定最佳轴向延伸结构长度。

将图 1 二维几何平面图中 S 点曲线坐标采用 F 点为原点的直角坐标系 (x, y) 来表示, 则:

$$R^2 = (x + f)^2 + y^2 \quad (14)$$

$$R \cos \theta = f + x \quad (15)$$

通过式(14)和(15)可以得出:

$$y^2 = (n^2 - 1)x^2 + 2(n - 1)fx \quad (16)$$

式(16)为双曲线方程, 由此可绘制透镜凸面的曲线方程。

两种透镜结构的电磁波传播路径如图 3 所示。图 3 中左边所示几何图为传统平凸介质透镜, 通过介质透镜的光线能够被折射, 而对于透镜边缘的波束并未被透镜所利用而发散出去。图 3 右边所示几何图为本文在透镜平面侧引入的轴向延伸结构, 使得原本在透镜区域外的部分光线能够在延伸平面处提前折射向内靠拢, 使得进入透镜介质聚焦的光线增多, 从而增加了进入透镜的光线, 因此提高透镜对馈源发射的信号集中性, 进而提高透镜天线的整体辐射效率和增益。

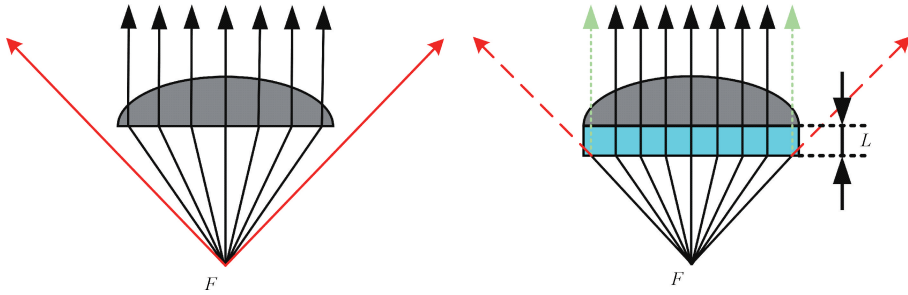


图 3 平凸透镜及延伸平凸介质透镜光程图

Fig. 3 Optical path diagram of planoconvex lens and extended planoconvex dielectric lens

因此本文通过轴向延伸结构来增大天线有效口径并提高天线的增益。同时, 考虑到在介质透镜传播中的能量损耗, 介质透镜仿真材料使用介电损耗低材料聚四氟乙烯 (poly-tetrafluoroethylene, PTFE), 并通过电磁仿真验证本文创新结构的轴向延伸长度 L 的变化对雷达天线的增益的影响, 从而选择最优的轴向延伸长度设计本文轴向延伸介质透镜

2.2 CFAR-PT 算法

针对介质透镜产生的雷达回波信号在距离维度上的能量分布呈现的不均匀性, 传统单帧 CFAR 检测在远距离微弱目标上容易出现漏检, 同时近距离高幅值杂波会干扰远距离目标检测的判定。为解决这一问题, 本文提出一种基于连续峰值跟踪的 CFAR 检测算法, 该算法在

单帧自适应门限检测能力上改进了算法的目标识别准确性。通过引入连续帧目标位置约束, 对每一帧的候选目标峰值集合进行邻域筛选, 并通过幅值比较选取局部最大峰值, 实现目标索引的稳定输出, 从而提升对回波信号中目标检测的准确性和鲁棒性。

在传统的 CA-CFAR 单一目标检测算法中, 检测到的目标距离位置只会是以被检测到的目标集合 $\{C\}$ 里取目标幅值最大值作为目标点的索引位置。这种直接取最大值的做法在被检查目标点回波信号强度高于噪声时是可取的。近距离目标检测信号强度更大, 最终幅值得出的最大幅值 $Z_{\max}$ 就是准确的目标距离位置 R_k 的幅值 Z_k , 而远距离时目标的检测回波信号强度则会相对更弱。

如图 4 所示为 CFAR-PT 算法的处理流程图。对当前目标帧做一维 CA-CFAR 阈值判定后,对检测出的所有目标峰进行连续帧峰值跟踪处理。

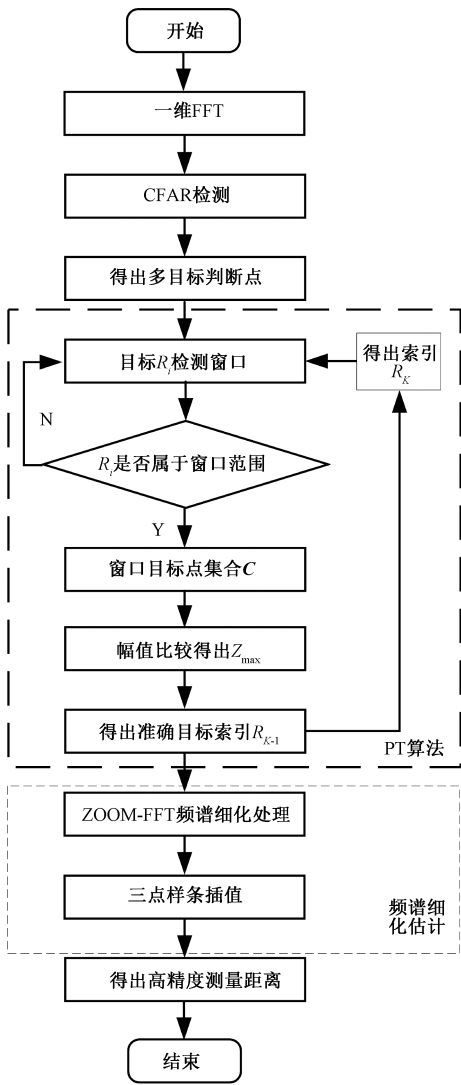


图 4 连续峰值跟踪检测算法

Fig. 4 Block diagram of continuous peak tracking detection algorithm

将上一帧得出的目标准确位置索引设为 R_{k-1} , 则将得到目标索引检测窗口:

$$R_i \in [R_k - \Delta, R_k + \Delta] \tag{17}$$

其中, R_i 表示连续帧索引值的判断范围。 Δ 值为连续帧领域索引约束范围 $4\Delta\text{bin}$ 。连续帧搜索窗口的设置需要同时满足目标连续跟踪能力与虚假峰抑制能力。实验中发现,系统在 8 461 mm 附近存在随机变化的高幅值虚假峰会对 11 000 mm 之后的 CFAR 目标检测干扰影响最大,其次是 6 846 mm 附近产生的高幅值干扰。根据本文延伸介质透镜测距系统 1 024 点粗 FFT 距离分辨率 $4\Delta\text{bin}$ 约为 30 mm,因此理论上只需满足:

$$\Delta < \frac{11\,000 - 8\,461}{30} \approx 84\Delta\text{bin} \tag{18}$$

即可避免虚假目标峰进入连续帧搜索窗口。然而,窗口越大,会引入其他的杂波和虚假目标干扰。窗口越小,杂波和虚假目标干扰越少检测越稳定,但要考虑快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)^[17]本身频谱泄露以及测量时的物理波动干扰会导致目标超出搜索范围。如表 1 所示。

表 1 目标索引窗口分析

Table 1 Target index window analysis

Δ 取值	对测试性能影响
过小	FFT 频谱泄露波动会在 1 bin 内,导致连续跟踪失败。
过大	杂波峰及虚假目标进入候选集合,增加误检概率。
本文 4 Δbin	3 Δbin 索引频谱漂移及考虑 10 cm 工业测量液/物位波动约 3 Δbin (根据使用场景可调)。

通过筛选当前帧所有符合要求的检测目标点得到目标集合 $\{C\}$:

$$C = \{(R_i, Z_i)\} \tag{19}$$

其中, Z_i 为检测目标点的幅值。并通过幅值比较,选择选取集合内的幅值最大值点 $Z_{\max}$,该幅值对应的索引值为 CFAR-PT 检测出的新目标索引 R_k 。由于粗频率索引估计可能存在索引值检测重复问题,其中 R_{k-1} 也会包含上一帧的重复目标索引值,这个重复索引值也会是准确的检测点。

对检测到的准确的粗目标估计 R_{k-1} 做变焦快速傅里叶变换(zoom fast Fourier transform, ZOOM-FFT)算法^[18],可以得到频谱细化后的高精度频谱细化距离值,其中粗频率分辨率为 30 mm,通过 ZOOM-FFT 细化得到的距离分辨率小于 1 mm。再通过三点样条插值^[19]进一步提高系统算法的距离检测精度到毫米级。

后续通过实验验证,被检测出的目标点在远距离且回波信号弱的时候,可以得出 CFAR 算法并不能在多个目标中准确无误的找到目标点的位置索引值,而本文的 CFAR-PT 算法通过对距离连续变化的索引窗口限制,能准确的在索引检测窗口 R_i 里面找到新目标索引位置,保证了每帧仅输出一个稳定且准确的目标索引,实现实时测距数据的连续可靠输出。

3 实验验证

3.1 介质透镜仿真

为验证平面延伸型透镜的性能优势,本节在相同口径 D 和相同焦距 f 的条件下,对比传统平凸透镜与平面

延伸型透镜的辐射特性。在仿真模型中,馈源采用矩形波导口面等效激励,在仿真软件中设置一矩形面并添加波导端口激励 TE10 主模,该辐射激励源置于透镜焦点 F 处。介质透镜材料采用 PTFE(介电常数 $\varepsilon_r = 2.2$),介质透镜主体直径 D 为 40.62 mm,焦距 f 为 30 mm,工作频率为 59~64 GHz。延伸平板长度 L 作为关键变量进行参数扫描,使用电磁仿真软件 CST 进行实验仿真与数据对比。

图 5 给出了不同频率下透镜增益随延伸长度 L 的变化曲线,包含 59、61.5 和 64 GHz 3 个频点的仿真结果。由图可知,在各频点处,增益均随 L 的增加呈现先上升后下降的趋势,存在使增益最大化的最优延伸长度。在中心频率 61.5 GHz 处,当延伸长度 9 mm 时增益达到峰值 21.1 dBi。59 和 64 GHz 频点处的增益变化趋势与中心频率基本一致,通过延伸透镜的轴向长度均能提高天线增益水平。综合考虑工作频段内的增益稳定性及信号回波强度,本文选取延伸长度 9 mm 作为最终设计参数。

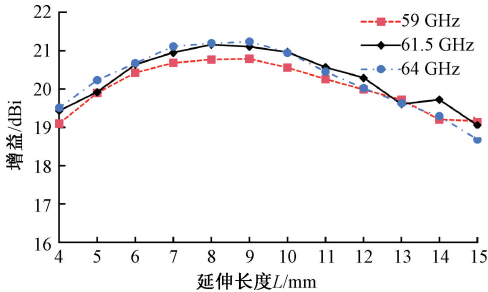


图 5 增益随延伸长度变化曲线

Fig. 5 Curve of gain variation with extension length

相同口径 D 、相同焦距 f 下,传统介质透镜与平面延伸介质透镜在中心频率下的增益效果对比如图 6 所示,通过 CST 仿真得出在中心频率 61.5 GHz 下两种介质透镜的天线方向增益图数据对比。传统介质透镜天线的增益为 19.9 dBi,3 dB 波束角为 8° 。本研究设计的延伸透镜的天线增益达到 21.1 dBi,3 dB 波束角为 6.7° ,相比于传统介质透镜天线增益提高了 1.2 dBi,3 dB 波束角减小 1.3° 。

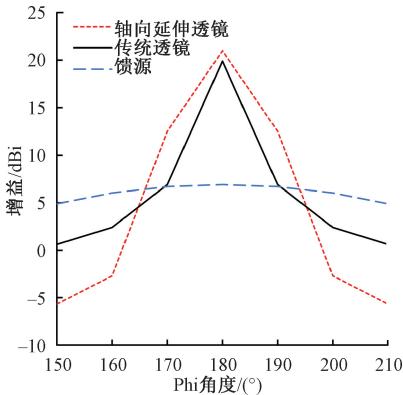


图 6 透镜天线方向

Fig. 6 Lens antenna pattern

本文设计了一个透镜直径为 40.62 mm,延伸长度为 9 mm 的轴向延伸介质透镜,在工作频率的 5 GHz 带宽范围内,整体增益都得到提升且都大于 20.79 dBi,且 3 dB 波束角小于 6.7° 。这表明在相同口径和焦距下,增加轴向延伸部分能提高天线增益和缩小天线波束角。

3.2 目标检测算法测量

1) 实验设备与场地为了验证所提出 CFAR-PT 算法在实际测距场景中的有效性,本文基于实际雷达测量开展目标检测对比实验。实验采用国产的隔空科技的毫米波雷达芯片 AT60MF1T1RP32A,该雷达芯片工作于 59~64 GHz 频段,最大调频带宽为 5 GHz。本文毫米波雷达测距系统的毫米波雷达发射频率波形的前端参数配置如表 2 所示。毫米波雷达调频起始频率为 59 GHz 带宽长度使用最大调频宽度 5 GHz 范围,调频斜率为 45.44 MHz/us,每帧信号包含一条 chirp 信号。计算得出其 1 024 点粗 FFT 距离分辨率 Δbin 约为 30 mm,系统测量精度 ± 2 mm。

表 2 雷达参数配置

Table 2 Radar parameter configuration

变量	值
天线通道	1Tx1Rx
起始频率/GHz	59
chirp 带宽/GHz	5
采样频率/MHz	10
ADC 采样点数	1 024
调频斜率/(MHz $\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	45.44
每帧 chirp	1

实验在室内开放环境条件下进行,如图 7(a)所示,选取墙面作为反射目标,发射源为基于 AT60MF1T1RP32A 自主设计的毫米波雷达测距系统,前端为延伸介质透镜部分,尾部通过 485 协议与上位机进行信号输出如图 7(b)所示为上位机距离实时显示液面。测量过程中,雷达天线与目标保持正对,覆盖不同的测距区间。在各距离区间内,通过对连续位移调节,观察上位机实时显示系统目标检测算法得出的实际输出测距结果。从而直接评估各算法在连续变化场景下的远距离目标识别的准确性。

2) CFAR-PT 算法实测数据对比和分析为了验证 CFAR-PT 方法的有效性,通过将 CA-CFAR 目标检测算法与本文的 CFAR-PT 算法引入到同一硬件平台上进行实时距离目标检测对比,以保证实验结果的公平性与可比性。对于 CA-CFAR 方法采用单帧检测策略,将当前距离维候选峰值中的最大幅值点作为测距目标输出。恒虚警参数设置为:参考单元数量 N 为 8,保护单元数量 G 为 2,恒虚警检测概率 P 设为 10^{-7} 。本文 CFAR-PT 检测算法

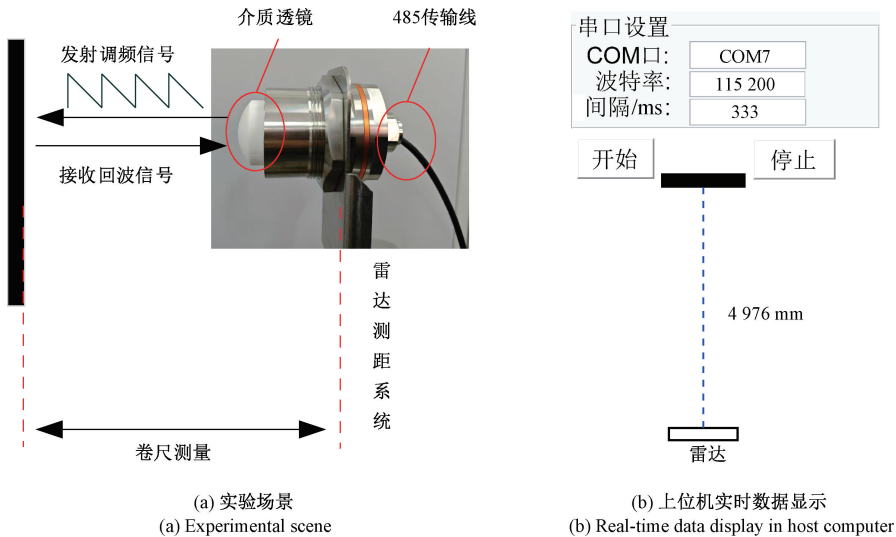


图 7 实验测试平台
Fig. 7 Experimental test platform

是基于 CA-CFAR 的改进检测算法,通过引入上一帧的历史测量时刻的目标索引作为连续测距约束,在邻域 $\pm 4 \Delta \text{bin}$ 范围内对候选峰值进行筛选,并选约束范围呢幅值最大的点作为当前测距输出。分析一维 FFT 和做

CA-CFAR 算法以及 CFAR-PT 算法的远距离测距回波数据

如图 8 所示,为延伸透镜测量的目标在远距离 14 850 mm 时 3 种回波数据算法的处理频域结果对比图。

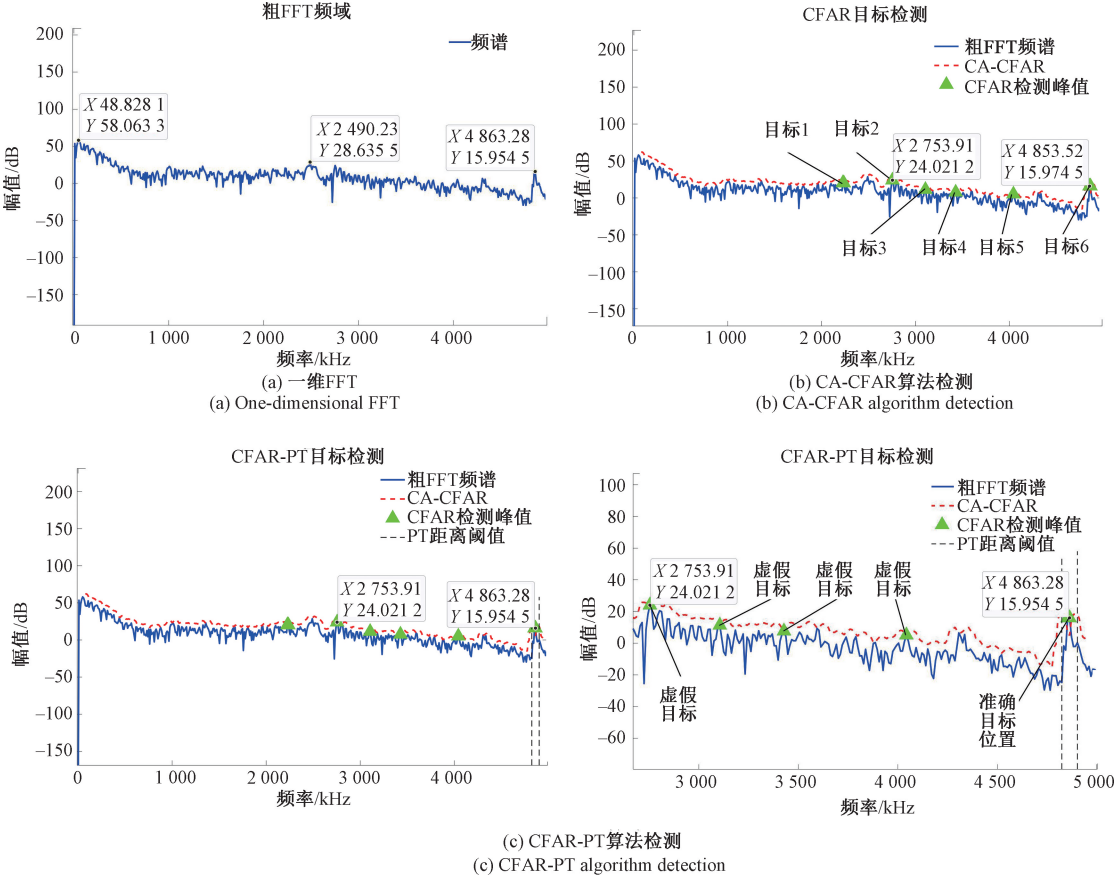


图 8 不同算法目标结果
Fig. 8 Target detection results using different algorithms

图 8(a) 所示为做一维 FFT 的频谱图,可以看出近距离的噪声干扰会明显大于目标点的位置图,当直接考虑 FFT 结果幅值最大值作为目标点是明显错误的,且最远距离只有 8 m 范围不会被噪声干扰。图 8(b) 所示为 CA-CFAR 检测图做的单帧目标检测图,将当前距离维候选峰值中的最大幅值点作为目标输出,从图中可以看出,CA-CFAR 会检测出虚假噪声目标,从而导致单纯的使用 CA-CFAR 只能得出目标点幅值较大的更近区域,从而限制了该雷达测距系统的有效距离,只是可以保证 10 m 范围内准确检测出目标点位置。如图 8(c) 为 CFAR-PT 算法检测改进 CA-CFAR 检测,引入上一时刻历史目标索引 R_{k-1} 作为连续测量约束,在邻域 $\pm 4\Delta\text{bin}$ 范围内对候选峰值进行筛选,并选取局部最大幅值对应的距离索引作为当前测量结果 R_k ,从而消除 CA-CFAR 检测出的噪声带来的虚假噪声目标的影响。从而保证连续位移条件下输出的目标位置稳定可靠。

如表 3 所示为毫米波雷达实际测量距离的动态测量结果。由表中数据可以看出,在中距离区间内,由于目标回波信号较强,各算法均能够较准确地反映目标真实距

离,测距结果与实际距离基本一致。而在远距离区间内,随着回波信号幅值减弱,传统透镜结合 CA-CFAR 方法的测距在 8 550 mm 之后开始,真实的目标数据会被虚假目标噪声干扰所遮蔽,结合 CFAR-PT 在 12 650 mm 之后会被虚假目标干扰。轴向延伸透镜在结合 CA-CFAR 算法在 10 500 mm 之后目标会被虚假目标遮蔽,结合 CFAR-PT 算法在 14 850 mm 之前的目标都能被检测到,而 14 850 mm 之后的数据由于回波信号太弱,易受到高幅值噪声或杂波峰值目标的干扰,从而导致目标检测出现错误。相比之下,CFAR-PT 算法在整个数据测量过程中能够保持对目标位置的有效跟踪,其测距结果随目标实际位置变化呈现良好的跟踪效果,能够消除噪声目标带来的干扰问题,且在远距离 14 450~14 850 mm 区间内未出现明显误判或突变现象,体现出较高的测距一致性与稳定性。上述结果表明,所提出 CFAR-PT 方法通过引入连续帧峰值测距约束,有效利用了目标在相邻测量中的位置连续性信息,在不增加系统复杂度的前提下消除了远距离测距中的虚假目标干扰问题,显著提高了毫米波雷达测距系统在实际应用中的稳定性与有效测距范围。

表 3 数据测量结果对比

Table 3 Comparison of data measurement results

(mm)

CA-CFAR 算法					CFAR-PT 算法				
实测距离	传统透		延伸透		实测距离	传统透		延伸透	
	镜测量	延伸透	镜测量	延伸透		镜测量	延伸透	镜测量	延伸透
8 250	8 250	8 250	8 250	8 250	12 350	虚假目标	虚假目标	12 350	12 350
8 300	8 301	8 300	8 300	8 300	12 400	虚假目标	虚假目标	12 402	12 400
8 350	8 352	8 352	8 349	8 350	12 450	虚假目标	虚假目标	12 451	12 451
8 400	8 399	8 398	8 402	8 401	12 500	虚假目标	虚假目标	12 499	12 502
8 450	8 451	8 451	8 450	8 450	12 550	虚假目标	虚假目标	12 550	12 549
8 500	8 499	8 500	8 501	8 501	12 600	虚假目标	虚假目标	12 603	12 600
8 550	8 551	8 552	8 551	8 550	12 650	虚假目标	虚假目标	12 651	12 652
8 600	虚假目标	8 601	8 602	8 601	12 700	虚假目标	虚假目标	虚假目标	12 702
8 650	虚假目标	8 649	8 650	8 650	12 750	虚假目标	虚假目标	虚假目标	12 749
10 050	虚假目标	10 050	10 050	10 050	14 450	虚假目标	虚假目标	虚假目标	15 450
10 100	虚假目标	10 101	10 101	10 102	14 500	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 498
10 150	虚假目标	10 151	10 151	10 150	14 550	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 548
10 200	虚假目标	10 198	10 203	10 201	14 600	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 601
10 250	虚假目标	10 251	10 249	10 249	14 650	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 653
10 300	虚假目标	10 302	10 300	10 300	14 700	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 701
10 350	虚假目标	10 349	10 351	10 351	14 750	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 747
10 400	虚假目标	10 402	10 400	10 403	14 800	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 801
10 500	虚假目标	虚假目标	10 502	10 501	14 850	虚假目标	虚假目标	虚假目标	14 852
11 000	虚假目标	虚假目标	10 998	10 999	14 900	虚假目标	虚假目标	虚假目标	虚假目标

4 结 论

本研究提出了一种轴向延伸型平凸介质透镜与连续峰值跟踪 CFAR 算法的毫米波雷达测距方法。通过仿真与实验测试验证,延伸介质透镜的设计能实现了天线的增益提升与波束聚焦,并验证 CFAR-PT 算法在远距离测距中表现的稳定性和准确性。通过延伸透镜的结构优化,仿真结果显示,将 59~64 GHz 频率工作范围整体增益提升,增益都大于 20.79 dBi,在中心频率 61.5 GHz 处,增益比传统透镜提升 1.2 dBi,天线 3 dB 波束角减小 1.3°,增强了远距离测量目标回波信号的强度和稳定性;提出的 CFAR-PT 算法利用连续测距约束,能有效抑制近距离高幅值噪声带来的干扰,并且能消除传统 CFAR 远距离目标检测带来的虚假目标检测干扰。

本文通过仿真和实验结果证明通过物理增益优化与 CFAR-PT 检测算法,能提升毫米波雷达远距离测距准确性和稳定性,为毫米波雷达在工业测距与液位监测等应用中提供可行性方案。但是本设计的实验主要针对单目标和室内开放环境,实验条件相对理性,并未覆盖实际应用中复杂环境下的多种干扰因素。因此,未来可进一步研究不同实际应用场景干扰抑制与信号处理算法优化,以提升本文毫米波雷达测距系统的工程适用性和鲁棒性。

参考文献

- [1] Vogt M. Radar sensors (24 and 80 GHz range) for level measurement in industrial processes [C]//2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, 2018: 1-4.
- [2] 华兴云. 复杂工业环境下基于宽波束毫米波雷达的液位测量应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2024: 2.
Hua Xingyun. Research on the application of liquid level measurement based on wide-beam millimeter-wave radar in complex industrial environments [D]. Chongqing: Southwest University, 2024: 2.
- [3] Cheng Y Q, Wu H, Yang Z, et al. Underwater target detection by measuring water-surface vibration with millimeter-wave radar[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(9): 2260-2264.
- [4] Santos R A D, Fré G L, Spadoti D H. Technique for constructing hemispherical dielectric lens antennas[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(5): 1349-1357.
- [5] Saleem M K, Xie M Y, Alkanhal M A S, et al. Effect of dielectric materials on integrated lens antenna for

millimeter wave applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(4): 1079-1083.

- [6] Wang K X, Wong H. Design of a wideband circularly polarized millimeterwave antenna with an extended hemispherical lens[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(8): 4303-4308.
- [7] 郭超杰. 毫米波高精度测距系统的关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022: 13.
Guo Chaojie. Key technology research on millimeter-wave high-precision ranging system [D]. Xi'an: Xidian University, 2022: 13.
- [8] 刘英杰. 基于 FMCW 的 80 GHz 毫米波雷达液位计研制[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2025: 16.
Liu Yingjie. Development of an 80 GHz millimeter-wave radar level meter based on FMCW [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2025: 16.
- [9] Zebiri K, Mezache A. Radar CFAR detection for multiple-targets situations for Weibull and log-normal distributed clutter [J]. Signal, Image and Video Processing, 2021, 15(8): 1671-1678.
- [10] Wu D, Zhu D Y, Shen M W, et al. Statistical analysis of monopulse-synthetic aperture radar for constant false-alarm rate detection of ground moving targets [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(6): 641-652.
- [11] 杨路, 周文豪, 余翔, 等. 一种抑制杂波的高精度车载雷达目标检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 145-151.
Yang Lu, Zhou Wenhao, Yu Xiang, et al. High-precision vehicle radar target detection method with clutter suppression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 145-151.
- [12] 晋良念, 朱皓, 王燃. 一种毫米波雷达快速高分辨三维点云成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 158-167.
Jin Liangnian, Zhu Hao, Wang Ran. Fast high-resolution 3D point cloud imaging method of millimeter wave radar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 158-167.
- [13] 牟一飞. 77~81 GHz 毫米波雷达高精度鲁棒物位测量技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023: 56.
Mu Yifei. Research on high-precision robust level measurement technology of 77~81 GHz millimeter-wave radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2023: 56.
- [14] Thornton J, Huang K C. Modern lens antennas for communications engineering[M]. John Wiley & Sons, 2013.

[15] Sun Y, Zhang B, Wang C, et al. Ship detection based on eigenvalue-eigenvector decomposition and OS-CFAR detector [C]//2012 International Conference on Computer Vision in Remote Sensing, 2012: 350-355.

[16] Sahed M, Kenane E, Khalfa A, et al. Exact closed-form P_{fa} expressions for CA-and GO-CFAR detectors in Gamma-distributed radar clutter [J]. IEEE Transactionson Aerospace and Electronic Systems, 2022, 59(4): 4674-4679.

[17] 张秀丽, 王浩全, 庞存锁. 稀疏傅里叶变换在雷达中的应用研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(11): 148-152.

Zhang Xiuli, Wang Haoquan, Pang Cunsuo. Application research of sparse Fourier transform in radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40 (11): 148-152.

[18] 李浩, 王煌辉, 曹佳伟, 等. 基于 Zoom-FFT 算法的实时频谱分析方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(7): 32-44.

Li Hao, Wang Huanghui, Cao Jiawei, et al. Real-time spectrum analysis method based on Zoom-FFT algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(7): 32-44.

[19] 戴金洲, 杜磊, 沙硕, 等. 环境感知毫米波雷达抗干扰算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 126-132.

Dai Jinzhou, Du Lei, Sha Shuo, et al. Anti-interference algorithm of environment-aware millimeter wave radar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 126-132.

作者简介



曾鑫亮,2024 年于九江学院获得学士学位,现为杭州电子科技大学研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail: 2300180194@qq.com

Zeng Xinliang received his B.Sc. degree from Jiujiang University in 2024. He is currently a master’s student at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include radar signal processing.



邵李焕(通信作者),2008 年于杭州电子科技大学获得硕士学位,现为杭州电子科技大学副教授,主要研究方向为嵌入式技术。

E-mail: slh@hdu.edu.cn

Shao Lihuan (Corresponding author) received his M.Sc. degree from Hangzhou Dianzi University in 2008. He is currently an associate professor at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include embedded technology.



邓艳军,2023 年于杭州电子科技大学获得博士学位,现任杭州电子科技大学网络空间安全学院讲师。其研究方向包括智能信息处理系统、信号处理与人工智能。

E-mail: dengyanjun@hdu.edu.cn

Deng Yanjun received his Ph.D. degree from Hangzhou Dianzi University in 2023. He is currently working as a lecturer in the School of Cyberspace Security, Hangzhou Dianzi University. His main research interests include intelligent information processing systems, signal processing and artificial intelligence.



傅晓强,2005 年于杭州电子科技大学获得学士学位,现为上海铭控传感技术有限公司的技术副总,研究方向为嵌入式系统、通信底层软硬件及 IoT 平台技术。

E-mail: 68088107@qq.com

Fu Xiaoqiang received his B.Sc. degree from Hangzhou Dianzi University in 2005. He is currently the vice president of technology at Shanghai Meokon Sensing Technology Co., Ltd. His main research interests include embedded systems, underlying communication hardware and software, and IoT platform technologies.



魏杨凡,2025 年于浙江树人学院获得学士学位,现为杭州电子科技大学研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail:513569258@qq.com

Wei Yangfan received his B.Sc. degree from Zhejiang Shuren University in 2025. He is currently a master’s student at Hangzhou Dianzi University. His main research interests include radar signal processing.