

# 基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统设计

杨俊岭

(军事科学院 军事科学信息研究中心, 北京 100142)

**摘要:** 空中目标探测对于空中交通管理与调度具有重要的参考意义, 为了克服距离给空中目标探测工作带来的困难, 利用干涉量子雷达技术, 从硬件和软件两个方面优化设计远距离空中目标探测系统; 加设干涉量子雷达探测器, 改装雷达信号处理与成像装置, 完成硬件系统的优化; 利用干涉量子雷达技术生成空中目标雷达图像, 通过杂波抑制、图像增强等步骤完成初始雷达图像的预处理; 提取雷达图像的轮廓特征, 测量空中目标距离, 计算空中目标尺寸、位置等几何参数以及移动速度参数, 最终通过特征匹配确定区域是否存在空中目标, 输出空中目标探测结果; 通过系统测试实验得出结论: 与传统探测系统相比, 优化设计系统的距离、尺寸和移动速度探测误差分别降低了 5.15 m、4.85 m<sup>2</sup> 和 4.15 m/s, 同时扩大了空中目标的探测范围。

**关键词:** 干涉量子雷达; 远距离目标; 空中目标探测

## Design of Long Range Air Target Detection System Based on Interferometric Quantum Radar

YANG Junling

(Information Research Center of Military Science, Bingjing 100142, China)

**Abstract:** Air target detection has an important reference for air traffic management and scheduling, in order to overcome the difficulties caused by the distance in air target detection, an interference quantum radar technology is used to optimize the remote air target detection system from both hardware and software aspects. The system adds the interference quantum radar detector, modifies the radar signal processing and imaging device, and optimizes the hardware system. The interferometric quantum radar technology is used to generate the air target radar image, and the initial radar image is preprocessed through the clutter suppression, image enhancement. Extract the contour features of the radar image, measure the distance of the air target, calculate the geometric parameters such as the size and position of the air target and the moving speed parameters, and finally determine whether there is an air target in the area through the feature matching, and output the air target detection results. Through the system test results show that compared with the traditional detection system, the distance, size and moving speed detection errors of the optimized system are reduced by 5.15 m, 4.85 m<sup>2</sup> and 4.15 m/s respectively, which expands the detection range of aerial targets.

**Keyword:** interferometric quantum radar; long range target; air target detection

## 0 引言

空域监视是空中交通管制的基础, 对机场安全管理发挥着重要的作用, 空域监视的主要目标是高度高于 500 米的物体, 空中目标不仅会影响空中交通设施的通行安全, 还可能会影响错失重要战机, 因此需要定期对空中目标进行探测, 从而及时对空中目标进行管控, 最大程度地降低空中目标给机场交通、空间作战带来的负面影响<sup>[1]</sup>。空中目标可以大体分为 3 种类型, 分别为: 静置空中目标、无固定运动路线的运动目标和按照固定运动轨迹移动的运动目标, 其中静置空中目标指的是重力相对较小的空中目标, 不会在短时间内产生明显纵向位移。

目前空中目标的探测工作主要利用探测系统完成, 现阶段已有相关学者研究出了较为成熟的空中目标探测系统。

文献 [2] 提出基于电场探测与无线组网的空中目标探测系统, 该系统利用无线网络中的检测节点对空中目标进行监控, 利用电场探测及网络定位技术对其进行定位, 从而为指挥中心的行动决策提供支持, 并能向作战系统发出攻击和拦截命令。文献 [3] 提出基于地基综合孔径微波辐射计的空中目标探测系统, 介绍了地基综合孔径空中目标被动探测的基本原理, 在此基础上, 对地基综合孔径空中目标进行了研究, 并对其可行性进行了分析。然而受到探测距离的限制, 上述空中目标探测系统存在探测误差大、探测范围小等问题。

为了解决上述传统系统在探测功能方面存在的问题, 引入干涉量子雷达技术。本文提出了基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统。干涉式量子雷达采用干涉测量

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-03-07。

作者简介: 杨俊岭(1975-), 男, 博士, 副研究员。

引用格式: 杨俊岭. 基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 242-247.

技术的合成孔径雷达，是量子雷达和干涉雷达相结合的产物。为了提升系统的空中目标探测精度，在干涉量子雷达探测器中加设雷达信号倍增管，通过多级倍增，使其具有一定的增益，最后得到了被放大的雷达信号。在雷达探测器中嵌入倍增管，实现了对干涉式量子雷达检测器的改造。以此提升目标探测精度、扩大目标探测范围，更加适用于远距离探测。利用干涉量子雷达技术对远距离空中目标探测系统进行优化设计，采用干涉式量子雷达技术对远距离空中目标进行图像处理，提升了图像采集精度；利用特征匹配来判断空中目标的位置、大小、位置等几何参数和运动速率，最后利用特征匹配来输出空中目标探测结果，据此提升系统的目标探测精度，并扩大空中目标的探测范围。

### 1 远距离空中目标探测硬件系统设计

利用干涉量子雷达进行目标探测的基本原理是通过对单一目标或目标群体的探测，分析获得的目标信息，判断出目标的类型、尺寸等属性。在干涉式量子雷达技术的支持下，把被测的空中目标看成是由大量的散射中心构成的，它会随桨叶的转动而不断地作周期性的运动，而散射场的相位和振幅也会随着散射中心的移动而周期性地改变，从而最终引起整个转动元件对雷达回波的周期调制。分别从硬件和软件两个方面，优化设计远距离空中目标探测系统。

#### 1.1 干涉量子雷达探测器

远距离空中目标探测系统使用雷达探测器作为主要运行元件，雷达探测器的组成结构如图 1 所示。

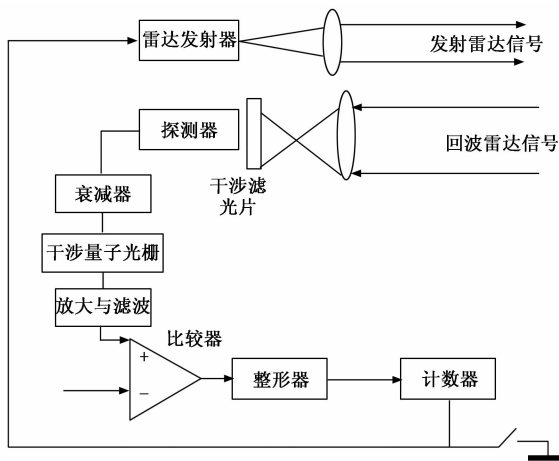


图 1 干涉量子雷达探测器组成结构图

从图 1 中可以看出，干涉量子雷达探测器包括雷达发射机、衰减器、量子光栅、单光子检测器、信号发射镜、目标判定等部分组成。在系统工作时，由雷达发射器发出的光信号会被衰减为单一的光子信号，单个光子信号通过光子光栅得到一定的干扰信号，使得光子的存在概率得到严格的区域分布。在此基础上，将概率波干涉条纹与单个光子检测器的光栅相对应地分布，使得光子透过率达到概率透过，每一根光纤都会将大部分的干涉条纹传送到目镜，并将其反射到空间物体上，并将其反射到光学放大器上。

当发射的干涉量子雷达信号碰到目标物体时，光子的状态就会坍塌，此时的反馈环内没有任何光子，然后产生的光子流就会产生一条量子干涉条纹，这些条纹会打在栅格上，会产生一种超导的效果，使信号被输出；在不接触到目标的情况下，光子会崩溃在反馈环上，通过光纤放大器产生的光子流，保持了原来的光束的稳定<sup>[4]</sup>。在此，一个光子从光束开始，再从光束中返回，这个过程被称为一个检测循环。只有在检测到目标后，恢复的光子流才会消失，雷达信号发射器会再次发出一束光子，构成下一次的探测循环。为了提升系统的空中目标探测精度，在干涉量子雷达探测器中加设一个雷达信号倍增管，倍增管的工作原理如图 2 所示。

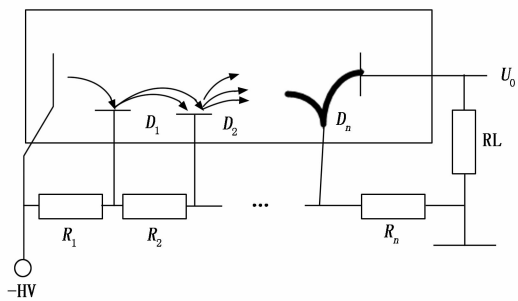


图 2 干涉量子雷达探测器倍增管工作原理图

干涉量子雷达信号聚焦在倍增极上，发射出多个二次电子，雷达信号经多级倍增后，实现增益放大，最终输出放大的雷达信号<sup>[5]</sup>。将倍增管嵌入到雷达探测器中，分别与雷达发射器和输出器相连，完成干涉量子雷达探测器的改装。

#### 1.2 雷达信号处理与成像装置

雷达信号处理与成像装置的工作内容是：根据干涉量子雷达信号的反馈结果生成空中图像。利用 AD9361 芯片将雷达信号直接转换为基带信号，信号经前端的混频器转换为基带，再由 ADC 取样和反混叠滤波器实现。在此基础上，利用半带滤波器和 FIR 滤波器对数字信号进行滤波、提取等预处理工作<sup>[6]</sup>。在传统雷达信号处理器，加设一个限幅整形模块，选用高速比较器 AD8611 将不规则的雷达信号转换为方波信号，限幅整形处理电路如图 3 所示。

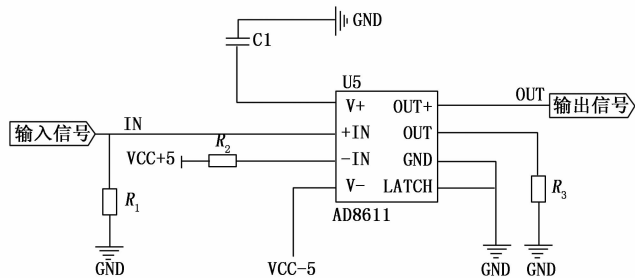


图 3 雷达信号限幅整形电路图

限幅整形电路由 ±5 V 的双电源提供电力支持，该基准电压为 2.5 V，供电电源通过 R6、R7 串联供电，构成了一

个比较电路<sup>[7]</sup>。根据雷达信号的处理结果,利用 CMOS 芯片生成雷达图像,成像波段为  $[0.4 \mu\text{m}, 1.0 \mu\text{m}]$ 。

除上述硬件设备外,软件程序运行控制器、供电电源均沿用传统目标探测系统,并将改装的雷达探测器和成像装置与供电电源相连。

## 2 远距离空中目标探测系统软件功能设计

在硬件设备的支持下,利用干涉量子雷达技术获取雷达信号并生成雷达图像,通过图像预处理、特征提取、特征匹配等步骤确定当前空中是否存在目标,通过对雷达信号的分析确定空中目标与探测器之间的距离,最终通过空中目标大小与移动速度的计算,得出远距离空中目标探测系统的输出结果。

### 2.1 利用干涉量子雷达技术生成空中目标雷达图像

干涉量子雷达技术融合了量子纠缠和干涉测量两种原理,利用探测器设备向空中目标区域发射雷达信号,通过对回波接收信号的分析,生成空中目标对应的雷达图像<sup>[8]</sup>。图 4 表示的是干涉量子雷达技术的作用原理。

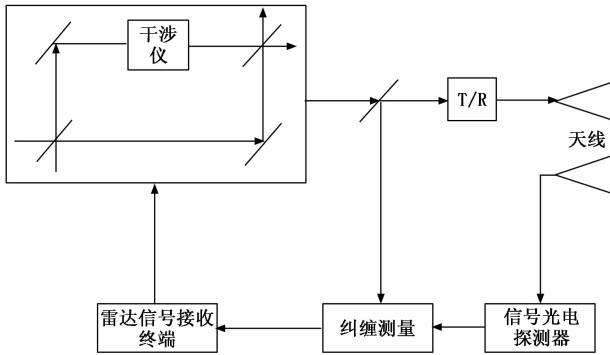


图 4 干涉量子雷达技术原理图

在远距离空中目标雷达成像过程中,将发射的干涉量子雷达信号看成一种相干叠加态,在量子力学中,由 A、B 两个子模块组成的复合体系可以表示为:

$$|h\rangle_{AB} = \sum \sqrt{\delta_i} |h_i\rangle_A \otimes |h_i\rangle_B \quad (1)$$

公式 (1) 中  $\delta_i$  为子模块的共同本征值,  $|h_i\rangle_A$  和  $|h_i\rangle_B$  对应的是两个子模块的本征函数<sup>[9-10]</sup>。发射的量子雷达信号经过干涉测量,可以转换为:

$$|h_{\text{interference}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|N_{\text{radar}}\rangle_i |0\rangle_j + |0\rangle_i |N_{\text{radar}}\rangle_j) \quad (2)$$

其中:  $|N_{\text{radar}}\rangle_i |0\rangle_j$  和  $|0\rangle_i |N_{\text{radar}}\rangle_j$  分别表示的是雷达信号  $N_{\text{radar}}$  通过参考光路和探测光路的转换结果,当干涉量子雷达信号处于高度纠缠态时,干涉测量可以达到海森堡极限<sup>[11]</sup>。在远距离空中目标测量与成像过程中,利用量子电子学理论,量子雷达信号与空中目标的相互作用看作是一种吸收和辐射的过程,并建立了干涉量子雷达散射截面的数学模型,其中干涉量子雷达散射截面可以量化表示为:

$$R \equiv \lim_{d \rightarrow \infty} 4\pi d^2 \frac{[E(x_{\text{target}}, x_{\text{detector}}, \sigma)]}{[E(x_{\text{target}}, \sigma)]} \quad (3)$$

式中,  $x_{\text{target}}$ 、 $x_{\text{detector}}$  和  $\sigma$  分别为空中目标位置、探测器位置以及雷达信号强度,  $E(x_{\text{target}}, x_{\text{detector}}, \sigma)$  和  $E(x_{\text{target}}, \sigma)$  对应的是入射场和散射场的强度值,由此得出探测空中目标的强度值为:

$$E(x_{\text{target}}, x_{\text{detector}}, \sigma) = \frac{1}{n_{\text{radar}}} \left| \sum_{j=1}^{n_{\text{radar}}} |h_{\text{interference}}\rangle \right|^2 \quad (4)$$

其中:  $n_{\text{radar}}$  为发射雷达信号的数量。按照上述方式得出远距离空中目标的干涉量子雷达回波信号,可以量化表示为:

$$s(t) = A \cdot \chi(t) + E(x_{\text{target}}, x_{\text{detector}}, \sigma) \sum c_i f \tau_{c_i}(t) \quad (5)$$

其中:  $A$  为接收到雷达信号的复幅值,  $\chi(t)$  为雷达信号的复包络,  $c_i$ 、 $f$  和  $\tau_{c_i}$  分别为杂波信号、多普勒频率以及多径信号,将公式 (4) 的求解结果代入到公式 (5) 中,得出空中目标探测雷达信号的接收结果<sup>[12]</sup>。最终从距离向和方位向两个方面进行脉冲压缩,得到空中目标雷达图像,将成像结果标记为  $I(t)$ 。

### 2.2 远距离空中目标雷达图像处理

为了提高远距离空中目标探测系统的探测精度,通过杂波抑制、图像增强等步骤,对初始生成的雷达图像进行预处理<sup>[13]</sup>。采用非局部均值滤波的方式进行雷达图形杂波抑制,具体的处理过程可以表示为:

$$\begin{cases} I_{\text{wave filtering}}(t) = \frac{\sum \exp\left(-\frac{d(i,j)}{\kappa_{\text{wave filtering}}}\right) I(t)}{\sum \exp\left(-\frac{d(i,j)}{\kappa_{\text{wave filtering}}}\right)} \\ d(i,j) = \|\beta \otimes (Q(i) - Q(j))\|^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\kappa_{\text{wave filtering}}$  为控制平滑程度地滤波参数,  $\beta$  为高斯核,  $Q(i)$  和  $Q(j)$  分别为雷达图像中第  $i$  和  $j$  个图像分块,  $d(i,j)$  为图像块之间的欧式距离,  $I(t)$  和  $I_{\text{wave filtering}}(t)$  对应的是初始生成雷达图像及其滤波处理结果。采用直方图均衡化的方式对图像进行增强处理,该方法是基于概率理论,通过使用灰度计算,使其得到增强。其转换函数依赖于图像的灰度直方图的累计分布<sup>[14]</sup>。雷达图像在低灰度范围内频繁出现,从而导致在较深的地方无法清晰地看到细节<sup>[15]</sup>。这样就可以分割出图像的灰度区,使其具有更低的灰度级。在直方图上,图像具有最大的信息熵,而在直方图上,图像具有最大的信息量,从而提升图像的清晰度。空中目标图像增强处理过程如下:

$$I_{\text{enhance}} = \int_0^{n_{\text{pixel}}} p[I(t)] dt \quad (7)$$

其中:  $n_{\text{pixel}}$  为像素点数量,  $p[I(t)]$  表示的是雷达图像的概率密度函数<sup>[16]</sup>。除此之外,还需要根据探测空间背景,对雷达图像的前后景进行分割,按照上述流程完成远距离空中目标雷达图像的预处理工作。

### 2.3 提取空中目标雷达图像轮廓特征

使用一阶倒数对空中目标雷达图像轮廓特征进行检测,找出相应的最大梯度点,确定其为初始轮廓边界点。消除一阶微分中的非局部极大值,与二阶导数的零相交点相对应,并在此基础上找到二阶导数的零交叉点,从而得到准

确的边界轮廓点<sup>[17]</sup>。空中目标雷达图像轮廓边缘特征点的提取结果为：

$$\tau(x, y) = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

其中： $\sigma$ 为高斯函数标准偏差。按照上述方式可以得出图像中多个轮廓边缘特征点的提取结果，按照各特征点之间的位置关系，对提取的所有轮廓边缘特征点进行连接，最终的输出结果即为空中目标雷达图像的轮廓特征提取结果。

## 2.4 测量空中目标距离

采用干涉量子雷达脉冲测距原理，通过测量雷达信号在待测距离上往返传播的时间来换算出距离，最终测量得出探测器与空中目标之间的距离可以表示为：

$$d_{\text{Detector-Target}} = \frac{1}{2} \cdot v_c \cdot \Delta t_{\text{probe}} \quad (9)$$

公式(9)中变量 $v_c$ 表示的是干涉量子雷达信号在空气中的传输速度， $\Delta t_{\text{probe}}$ 为雷达信号往返传输的时间。当探测器与空中目标相对应时，探测器会发出雷达脉冲，通过发射端使其发散角度减小。在发射端，雷达信号的后发散角被压缩到了零点儿毫微弧。当脉冲被发射后，很少的一部分会被两个镜子反射到接收端，这是一个用于校准雷达发射的基准信号<sup>[18]</sup>。基准信号通过滤波器传输至光电转换器，即将其转换为电信号，也就是将其转换为电脉冲。这种电脉冲被放大、成形，然后送到计时系统中，让它开始计时。而当激光束射到目标时，由于目标的扩散，会有一小部分被反射到接收端，然后再通过滤波器、光电变换、放大电路，再通过时间测量系统，由此便可以得到雷达往返时间 $\Delta t_{\text{probe}}$ 的具体取值。将相关数据代入到公式(9)中，即可得出空中目标距离的测量结果。

## 2.5 计算远距离空中目标几何与运动参数

探测远距离空中目标的几何参数包括目标位置和目标大小，其中目标位置的计算公式如下：

$$\begin{cases} x_{\text{target}} = \kappa_{\text{zoom}} \cdot x \cos\varphi \\ y_{\text{target}} = \kappa_{\text{zoom}} \cdot y \sin\varphi \end{cases} \quad (10)$$

其中： $(x, y)$ 为图像中空中目标对应像素的位置， $\varphi$ 为图像的拍摄角度， $\kappa_{\text{zoom}}$ 为空中目标实体与其图像的缩放系数，该系数的具体取值为：

$$\kappa_{\text{zoom}} = \frac{d_{\text{Detector-Target}}}{d_{\text{image}}} \quad (11)$$

另外空中目标大小参数的计算结果为：

$$b = \kappa_{\text{zoom}} \cdot b_{\text{image}} \quad (12)$$

式中， $b_{\text{image}}$ 和 $b$ 分别为空中目标的实体大小和图像像素点大小<sup>[19]</sup>。另外空中目标运动参数中，目标移动速度的计算公式如下：

$$v_{\text{target}} = \kappa_{\text{zoom}} [(x(t) - x(t-1)) + (y(t) - y(t-1))] \quad (13)$$

其中： $(x(t-1), y(t-1))$ 和 $(x(t), y(t))$ 分别表示前后两个时刻的空中目标像素点位置。对上述公式进行联立，即可得出远距离空中目标几何与运动参数的最终计算结果。

## 2.6 实现远距离空中目标探测系统功能

根据提取的空中目标雷达图像轮廓特征与空中目标标准特征之间的相似程度，确定当前环境中是否存在空中目标，具体的相似程度度量过程可以量化表示为：

$$\delta = \sqrt{[\tau(x, y)]^2 - [\tau_{\text{set}}(x, y)]^2} \quad (14)$$

将提取图像特征与设置标准特征代入到公式(14)中，即可得出相似程度度量结果<sup>[20]</sup>。在确定区域内存在空中目标的情况下，计算目标距离、几何参数以及运动参数，并根据远距离空中目标的运动参数的计算结果，若 $v_{\text{target}}$ 取值为0，则证明当前空中探测目标为静态目标，否则为动态目标。最终将包含空中目标参数的探测结果通过硬件设备输出，完成系统的目标探测功能。

## 3 系统测试

综合考虑系统硬件和软件两个部分，以测试系统探测功能为目的，设计系统测试实验。系统测试实验采用白盒测试原理，即在实验环境中设置固定数量的空中目标，并记录各个空中目标的设置参数，将系统的探测输出结果与设置数据进行比对，由此证明系统的探测功能。实验设置传统的基于电场探测与无线组网的空中目标探测系统和基于地基综合孔径微波辐射计的空中目标探测系统作为实验的对比系统，经过探测功能测试结果的对比，体现出优化设计基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统在探测功能方面的优势。

### 3.1 准备并控制远距离空中目标

准备飞机、风筝、无人机作为待探测的远距离空中目标，根据空中目标设置的数量生成多个探测实验场景，部分实验场景的具体设置情况如表1所示。

表1 远距离空中目标探测场景设置表

实验场景编号	空中目标对象	空中目标距离/m	空中目标数量/个	空中目标尺寸/m <sup>2</sup>	空中目标移动速度/(m/s)
C1	飞机	660	11	140	80
C2	风筝	770	21	90	30
C3	飞机	840	9	120	100
C4	飞机	880	18	130	120
C5	飞机	670	25	150	90
C6	风筝	780	17	80	25
C7	风筝	520	19	75	15
C8	无人机	650	23	60	40
C9	无人机	720	15	60	45

为保证系统测试实验结果的可信度，实验共生成50个实验场景，并根据空中目标的设置情况对其进行移动参数、几何参数进行控制，保证空中目标能够按照既定参数运行。

### 3.2 布设干涉量子雷达装置

由于优化设计的远距离空中目标探测系统应用了干涉量子雷达技术，因此需要在实验环境中安装相关的雷达装置。布设的干涉量子雷达装置为正侧视相控阵天线，扫描范围为 $\pm 75^\circ$ 。根据待探测空中目标的设置情况，确定雷达

装置的布设位置，将雷达装置与计数装置相连，用来测试雷达脉冲码的发送与接收次数。

### 3.3 描述系统测试过程

将优化设计基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统的硬件装置安装到实验环境中，并对硬件系统进行校准，首先准备目标，并调整目标和原型之间的相对位置，即在控制目标中，目标表面的水平方向与  $x$  轴平行，在系统坐标系中，竖线与  $y$  轴平行。在试验平台上，靶标背板面是系统的成像面，先将靶标背板与系统轴线垂直，然后用电子水准计保证样机平台与目标平台彼此平行，将靶标背板直立于靶标平台上，调整靶标背板底线中点与雷达信号对应，再以米尺测量背板左右两侧与样品前底边缘中点的距离，若两者相等，则被视为目标后背与系统轴垂直。接下来，将目标调整为其目标表面的横线与目标平台平行，这一步是用直尺来测量横线的左、右两边到目标平台的距离。在上述步骤中，可以确保目标中的竖线和横线与  $x$  轴和  $y$  轴在系统坐标系中是一致的。其次是成像设备的安装，它的主要要求是，在安装过程中，要保证成像设备平行于左关节轴承中心和球杆球部分球心的连线。利用供电电路连接各个硬件装置，随机生成一个调试任务，观察设备运行结果是否与预期结果一致，从而确定硬件设备是否调试成功。将调试完成的硬件装置与主测计算机相连，将软件系统转换成程序代码，导入到主测计算机中。利用开发系统对生成的实验场景进行探测，输出对应的空中目标探测结果。图 5 表示的是实验场景 C1 的探测输出结果。

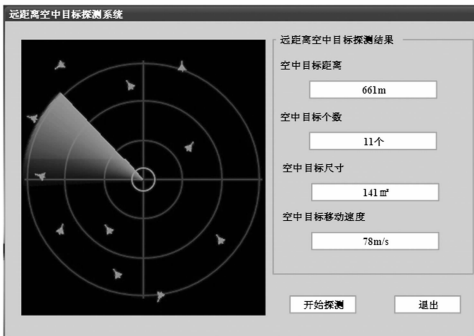


图 5 远距离空中目标探测系统输出结果

同理可以得出其他实验场景下的空中目标探测结果。通过系统的切换，可以得出对比系统输出的空中目标探测结果。

### 3.4 设置系统测试指标

此次系统测试实验分别从探测精度和探测范围两个方面进行测试，设置空中目标距离、目标尺寸以及移动速度探测误差作为系统探测精度的量化测试指标，其数值结果如下：

$$\begin{cases} \epsilon_d = |d_{\text{Detector-Target}} - d_0| \\ \epsilon_S = |S_{\text{system}} - S_0| \\ \epsilon_v = |v_{\text{target}} - v_0| \end{cases} \quad (15)$$

式中， $d_{\text{Detector-Target}}$ 、 $S_{\text{system}}$  和  $v_{\text{target}}$  分别表示的是系统输出的距

离、尺寸和移动速度探测结果， $d_0$ 、 $S_0$  和  $v_0$  为空中目标距离、尺寸以及移动速度的控制参数。计算得出误差指标越高，证明对应系统的探测精度越低。另外探测范围的测试指标为有效探测区域面积，该指标的测试结果为：

$$\begin{cases} S_{\text{probe}} = \pi r^2 \\ r = \sqrt{(x_{\text{detector}} - x_{\text{max-target}})^2 + (y_{\text{detector}} - y_{\text{max-target}})^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中， $(x_{\text{detector}}, y_{\text{detector}})$  为探测器的安装位置， $(x_{\text{max-target}}, y_{\text{max-target}})$  为系统能够探测到的最远空中目标点的位置，为了方便计算参数  $\pi$  取值为 3。计算得出  $S_{\text{probe}}$  的值越大，说明系统的探测范围越大。

### 3.5 系统测试结果分析

利用 SPSS12.0 数据分析工具，收集并统计远距离空中目标探测系统的运行数据与测试结果数据，得出最终的系统测试结果。

#### 3.5.1 系统探测精度测试结果

通过相关数据的统计，得出 3 个系统远距离空中目标探测精度的测试结果，如表 2 所示。

表 2 远距离空中目标探测系统探测精度测试数据表

实验场景编号	基于电场探测与无线组网的空中目标探测系统			基于地基综合孔径微波辐射计的空中目标探测系统			基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统		
	距离 /m	尺寸 /m <sup>2</sup>	移动速度 /(m/s)	距离 /m	尺寸 /m <sup>2</sup>	移动速度 /(m/s)	距离 /m	尺寸 /m <sup>2</sup>	移动速度 /(m/s)
C1	667	146	72	663	143	75	661	141	78
C2	778	83	24	774	85	26	772	88	30
C3	832	111	92	836	114	96	838	119	99
C4	889	121	127	885	123	114	881	128	119
C5	661	156	98	666	154	94	669	151	91
C6	772	88	29	773	84	28	779	81	25
C7	512	70	11	514	72	13	518	74	14
C8	659	68	47	656	65	43	652	61	41
C9	710	51	49	713	53	47	718	58	45

将表 2 中的数据代入到公式 (15) 中，即可得出对比系统空中目标距离探测误差的平均值分别为 8.4 m 和 5.1 m，平均目标尺寸探测误差分别为 7.4 m<sup>2</sup> 和 4.9 m<sup>2</sup>，而移动速度探测误差的绝对值为 6.2 m/s 和 3.7 m/s，而优化设计基于干涉量子雷达的远距离空中目标探测系统的平均距离、尺寸和移动速度探测误差分别为 1.6 m、1.3 m<sup>2</sup> 和 0.8 m/s。

#### 3.5.2 系统探测范围测试结果

统计系统输出各个探测点的位置数据，得出系统探测范围的测试结果，如图 6 所示。

从图 6 中可以直观地看出，优化设计的远距离空中目标探测系统的探测范围明显大于两个对比系统，经过公式 (16) 的计算得出两个对比系统的探测范围分别为 238 万 m<sup>2</sup> 和 248 万 m<sup>2</sup>，而优化设计系统的探测范围为 300 万 m<sup>2</sup>。

## 4 结束语

空中目标类型众多，不同类型目标的尺寸、结构特征均



(a) 基于电场探测与无线组网的空中目标探测系统



(b) 基于地基综合孔径微波辐射计的目标探测系统



(c) 优化设计探测系统

图 6 远距离空中目标探测系统探测范围测试结果

不相同，这会给空中目标的识别与探测带来较大难度和挑战。为了减小空间环境给目标探测带来的影响，利用干涉量子雷达技术对远距离空中目标探测系统进行优化设计，利用气动外形、电磁吸收材料等技术，将电磁波的后向散射最小化，从而使其能量比传统的雷达接收器要小得多，从而达到更高的采集时间或更大的传输功率。因此，利用干涉式量子雷达进行探测，增大功率孔径积，延长驻留时间，提高了空中目标的回波能量，从实验结果中可以看出，优化设计系统能够有效地改善系统的探测效果，减小探测误差的同时也提升了探测范围。

然而在系统测试过程中未考虑雾霾、冰雹等极端天气，无法判定优化设计系统在极端环境中的应用效果，针对这一问题还需要在今后的研究工作中进行补充。

## 参考文献：

- [1] 冯 胜, 胡光桃, 卢亚鹏. 基于被动量子雷达的隐身目标探测研究 [J]. 重庆大学学报, 2021, 44 (3): 100 - 106.
- [2] 陈思源, 郑 鑫, 刘宸宁. 基于电场探测与无线组网的带电飞行目标探测系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (11): 4506 - 4512.
- [3] 李一楠, 张林让, 卢海梁, 等. 基于地基综合孔径微波辐射计的空中目标无源探测技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (5): 1243 - 1250.
- [4] 田志富, 吴 迪, 胡 涛. 圆柱曲面单光子量子雷达散射截面的理论研究 [J]. 物理学报, 2022, 71 (3): 148 - 153.
- [5] 李勇强, 任昌亮. 基于提高精度的量子雷达方案及其进展 [J]. 物理学进展, 2022, 42 (2): 61 - 65.
- [6] 吴洪波, 张新, 王灵杰, 等. 单光子激光与中波红外共口径探测光学系统 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (6): 1260 - 1269.
- [7] 田 鹤, 陈汪翔, 任红梅, 等. 基于艇载稀疏阵列雷达的空中运动目标成像探测 [J]. 现代雷达, 2022, 44 (5): 27 - 32.
- [8] 聂 敏, 王 瑾, 杨 光, 等. 对流层水云对量子干涉雷达探测性能的影响及仿真 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (5): 74 - 82.
- [9] 鲍庆龙, 王森, 潘嘉蒙, 等. 非合作雷达辐射源目标探测系统关键技术分析 [J]. 电波科学学报, 2020, 35 (4): 496 - 503.
- [10] 董 爱, 夏 芒, 李 陟, 等. 空中分布式协同时差测量系统目标定位技术研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (4): 799 - 805.
- [11] 任维贺, 张 月, 苏 云, 等. 环境扰动下空中动目标探测技术综述 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (9): 391 - 408.
- [12] 陈致远, 沈 堤, 余付平, 等. 基于空域协同的空中目标综合识别方法 [J]. 现代防御技术, 2022, 50 (3): 61 - 77.
- [13] 张 良, 田晓倩, 李少毅, 等. 基于时空推理网络的空中红外目标抗干扰识别算法 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (7): 473 - 482.
- [14] 张 凯, 王凯迪, 杨 曦, 等. 基于 DNET 的空中红外目标抗干扰识别算法 [J]. 航空学报, 2021, 42 (2): 236 - 251.
- [15] 高瑞明, 李明星. 基于调制谱图卷积神经网络的空中目标识别技术 [J]. 光电与控制, 2021, 28 (2): 59 - 64.
- [16] 杨 曦, 李少毅, 王晓田, 等. 复杂干扰环境下基于频域 Gabor 滤波和相关滤波的空中目标跟踪算法 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38 (6): 1146 - 1153.
- [17] 梁复台, 李宏权, 刘安波, 等. 基于 CNN 的窄带雷达空中目标识别方法 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (6): 85 - 90.
- [18] 赵佳欢, 杨海明, 邱存存. 基于循环神经网络的空中目标类型识别 [J]. 航天控制, 2020, 38 (3): 47 - 53.
- [19] 胡阳光, 肖明清, 刘兆政, 等. 基于序列复杂度的空中红外目标跟踪算法评估 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (4): 740 - 748.
- [20] 张 寅, 蔡旭阳, 闫钧华, 等. 联合时空信息和轨迹关联的空中多目标检测 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45 (10): 1533 - 1540.