

基于相控阵连续波雷达体制的炮弹落点测量系统设计

王珂

电子科技大学成都学院, 四川 成都
Email: 45863781@qq.com

收稿日期: 2020年11月24日; 录用日期: 2020年12月9日; 发布日期: 2020年12月16日

摘要

舰炮矢量脱靶量测量系统在考核舰炮末端弹着点分布时有着十分重要的作用。本文设计了一种基于相控阵雷达体制的矢量脱靶量测量系统, 结合LFMCW (线性调频连续波)测距体制, 对舰炮末端轨迹的距离和方位进行二坐标矢量测量, 最后求出炮弹落点相对于靶心的偏靶距离和偏靶方向。本系统具有全天候、抗干扰、测量精度高、功率小和可靠性高等特点。

关键词

矢量脱靶量, 相控阵, 调频连续波, 雷达

Naval Gun Vector Miss Distance Measuring System Basing on Phased Array Radar

Ke Wang

University of Electronic Science and Technology Chengdu College, Chengdu Sichuan
Email: 45863781@qq.com

Received: Nov. 24th, 2020; accepted: Dec. 9th, 2020; published: Dec. 16th, 2020

Abstract

Naval Gun Vector Miss Distance Measuring System is very important in the assessment of naval gun terminal spot distribution. This paper describes the design of phased array radar system based on the combination of linear frequency modulation continuous wave ranging system for naval gun trajectory distance and azimuth measurement of two coordinate vector, and finally cal-

culates the partial target shells falling relative to distance and direction. The system has all-weather, anti-jamming, high measurement accuracy, low power and high reliability.

Keywords

Naval Gun Vector, Phased Array, Frequency Modulation Continuous Wave, Radar

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在部队打靶训练和炮弹科研靶试时,需要对舰炮的末端效能进行综合评估,内容包括偏靶距离、偏靶方向、杀伤概率、着弹点分布情况等。目前,舰炮对海上/陆岸目标的打击精度的评定的主要手段是光测[1],通过光学比例尺法测量爆炸点与靶心之间的距离,该方法需人工干预,测量误差大,且容易受爆炸产生的沙尘和不良天气的影响。因此,设计一种实时客观、不受天气影响、抗干扰能力强、测量精度高的二维矢量脱靶量测量雷达系统,具有良好的应用背景和实际需求。

本文针对舰炮强海杂波环境下,目标 RCS(雷达反射截面积)小、速度快、射速高、多目标的特点,设计了一种结合 LFMCW 和一维相控阵雷达体制的脱靶量测量系统。系统装载于拖船船尾,利用相控阵雷达的波束无惯性捷变优势,对以靶船为中心,±45°度范围内的海平面进行连续高速扫描,当炮弹进入检测区域,雷达对其距离和方位进行多次连续测量,并建立航迹,与此同时,雷达对靶安装在船上的信标进行准确定位,测量靶船的距离和方向。最后通过坐标变换,解算每一发炮弹相对于靶船的偏靶距离和偏靶方向,并实时给出其速度、射击方向、射击时间等信息。

2. 雷达系统设计

2.1. 脱靶量测量原理

在舰炮对海打靶训练时,打击目标一般为拖曳式靶船,由一船拖船牵引前进,炮弹的落点散布在以靶船为中心的一定区域,为了保证拖船在安全范围外,靶船与拖船之间留有足够的安全距离。因此雷达安装在拖船上而不是靶船上,保证了设备的安全,且降低了使用成本[2] [3] [4]。如图 1 所示,雷达安装在拖船尾部,利用一维相扫方式,对以拖船轴线为中心±45°区域海平面进行高速连续扫描[5]。由于是软质缆绳,行进过程中,靶船基本在拖船轴线上,因此雷达能对靶船周围区域进行连续监视。

当炮弹进入雷达监视区域,雷达自动对其相对于雷达的距离和方位进行测量,同时测量安装在靶船上信标的距离和方位,然后通过式 2-1 坐标变化,将炮弹相对于雷达的距离和方位转换为相对于靶船的距离和方位,并结算炮弹落点的偏靶距离和偏靶方向。

$$R = \sqrt{(R_1 \cos \theta_1 - R_2 \cos \theta_2)^2 + (R_1 \sin \theta_1 - R_2 \sin \theta_2)^2}$$

$$\theta = a \tan \frac{R_1 \sin \theta_1 - R_2 \sin \theta_2}{R_1 \cos \theta_1 - R_2 \cos \theta_2} \quad (2-1)$$

其中 (R, θ) 为炮弹相对于靶心的距离和方位, (R_1, θ_1) 为炮弹相对于雷达的距离和方位, (R_2, θ_2) 为拖船相对于雷达的距离和方位。

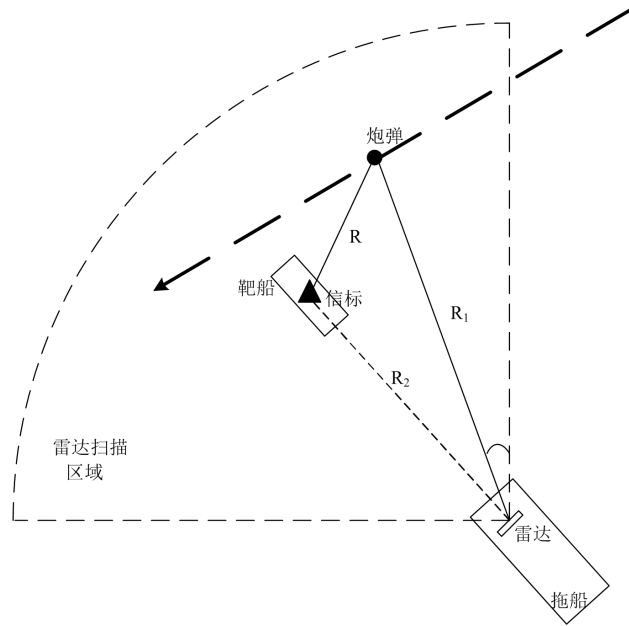


Figure 1. One dimensional phase sweep scanning mode
图 1. 一维相扫扫描方式

2.2. 总体电路设计及工作原理

舰炮矢量脱靶量测量系统由频综、发射机、收/发天馈线阵列、发射/接收(T/R)组件阵列，波控、接收机、信号处理、数据处理、通信控制、综合显控终端、电源等 12 大部分组成，由于采用连续波体制，为了保证收发之间的隔离度，发射天线和接收天线之间距离要大于 0.5 m [6]。雷达系统组成及工作原理示意图如图 2 所示。

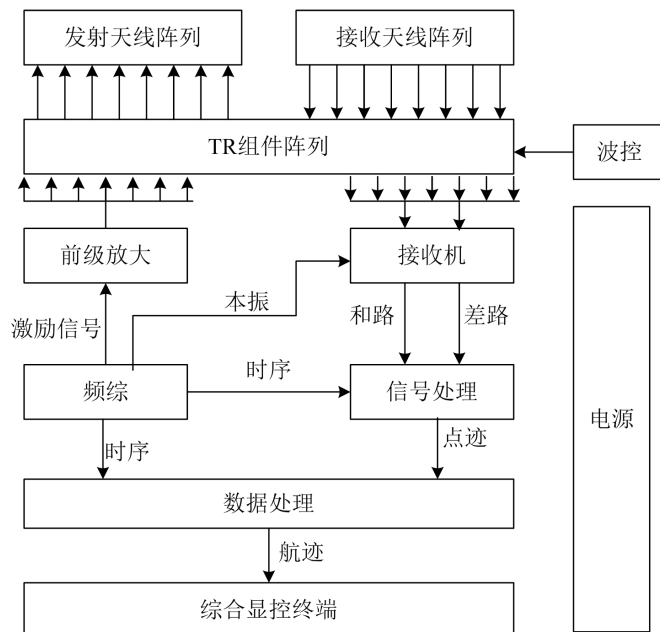


Figure 2. System composition and working principle block diagram
图 2. 系统组成及工作原理框图

频综为整个系统提供激励信号、本振信号、时钟和时序等。激励信号经前级放大和功分网络送入多路发射(T)组件, T 组件的功能为将激励信号进行放大和移相, 然后送入发射天线阵列, 发射天线阵列将激励信号转换为电磁波信号向空间辐射, 电磁波信号遇到目标将一部分能量反射到雷达接收天线阵列, 接收天线将电磁波信号转化为电信号送入接收(R)组件阵列, R 组件将接收到的目标回波信号进行放大和移相, 然后送入功分网络和和差器, 在功分网络和和差器生成和、差两路信号。然后在接收机中混频、放大、滤波后送入信号处理机, 信号处理完成目标检测及距离和方位测量, 生成目标点迹送入数据处理机生成连续可靠航迹。波控全称为波束控制器, 其主要功能为通过控制 T/R 组件的移相值, 以达到控制天线波束指向的目标, 通过快速改变移相值, 使雷达波束对 $\pm 45^\circ$ 的空域内进行高速连续扫描。由于采用相控阵体制, 雷达对整个空域扫描的周期 ≤ 20 ms。综合显控终端提取目标航迹进行显示和计算脱靶量, 并对雷达进行控制和参数设置[4] [7]。

2.3. 总体结构设计

舰炮矢量脱靶量测量系统机构主要由接收天线、发射天线、电子组合三部分组成。考虑到保障性和维修性, 三部分分别设计为独立的模块, 为了提高收发天线隔离度, 发射天线和接收天线分布在电子组合两侧, 拉开收发天线之间的距离, 电气部分通过电缆连接。结构组成如图 3 所示。

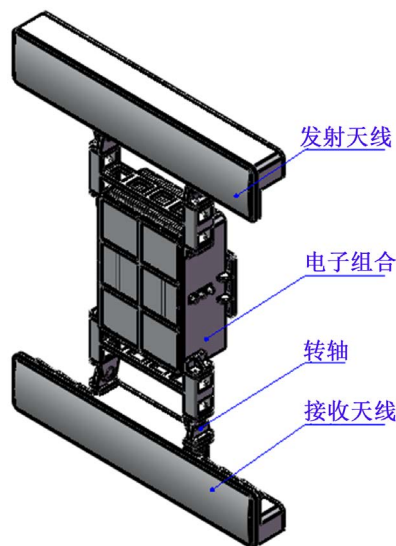


Figure 3. Overall structural design
图 3. 总体结构设计

2.4. 雷达主要技术指标及参数设计

根据拖船离靶船的距离以及炮弹落点的分布范围, 为了保证一定的威力余量和信噪比, 雷达最大作用距离设计为 1500 m。方位扫描范围设计为 $\pm 45^\circ$, 单个收发天线即可覆盖, 既能保证足够的覆盖范围, 又降低了相控阵雷达的设计难度。

雷达测距精度主要由系统带宽决定[8], 由雷达原理可知, LFMCW 雷达测量固有误差与系统调制带宽关系如式 2-2 所示。

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2-2)$$

其中 c 为光速, B 为系统调制带宽。系统测距精度要求 < 3 m, 则调制带宽 B 必须 ≥ 50 MHz。同时考虑还

有其他测距误差的存在，取 $B = 100 \text{ MHz}$ 。

落点的定位精度是由距离测量精度和方位测量精度综合决定的，落点定位的误差单元如图 4 所示。

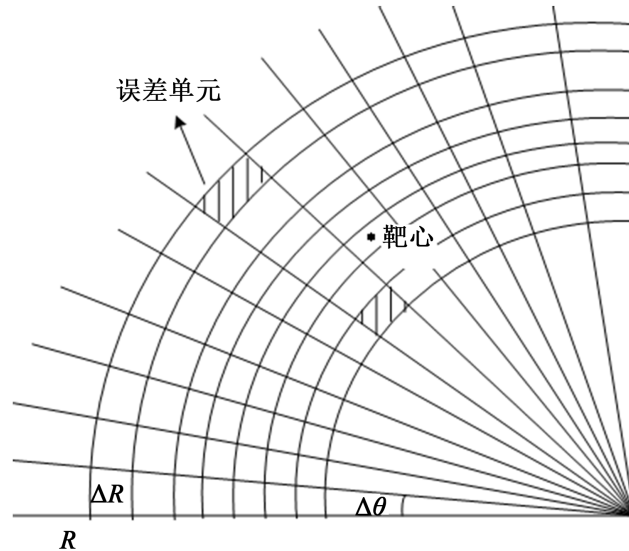


Figure 4. The error element diagram of the location of the landing point
图 4. 落点定位的误差单元图

误差单元的径向误差即距离误差为 ΔR ，测角误差 $\Delta\theta$ 引起横向误差可表示为 $R\Delta\theta$ ，其中 R 即为误差单元离雷达的距离，系统测距误差为 $\leq 3 \text{ m}$ ，因此测角精度设计为 $\leq 0.2^\circ$ (0.0035 rad)，它在 1000 m 处的横向误差为 3.5 m ，与径向误差基本匹配。而方位测量误差主要由方位波宽和目标回波信号信噪比决定。目前，和差测角体制的角度测量的均方误差一般能做到波宽的 $1/10$ 到 $1/20$ 之间，故本系统方位波宽选择为 2° ，俯仰采用宽波束覆盖。系统主要设计参数见表 1。

Table 1. The main performance indexes and parameters of the system

表 1. 系统的主要性能指标及参数

频段	X 波段
发射波形	线性调频连续波(LFMCW)
最大作用距离	$\geq 1500 \text{ m}$
扫描范围	$\pm 45^\circ$
测距精度	$\leq 3 \text{ m}$
测角精度	$\leq 0.2^\circ$
调制带宽	100 MHz
方位波宽	2°

3. 试验验证

某一轮射击的检测界面如图 5、图 6 所示。试验结果表明，舰炮矢量脱靶量测量系统能对炮弹末端航迹进行可靠检测和建航，并对其落点进行定位并计算相对于靶船的偏靶距离和偏靶方向。实验结果表

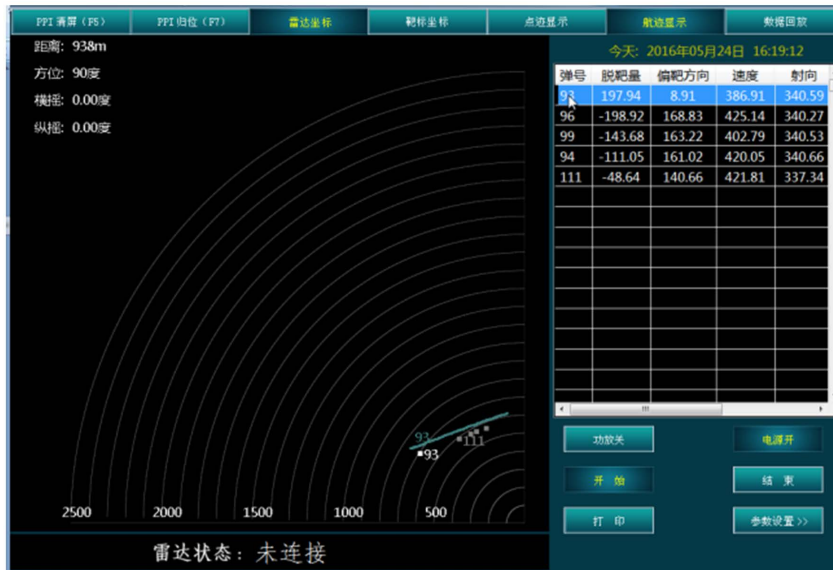


Figure 5. Detection interface 1

图 5. 检测界面 1

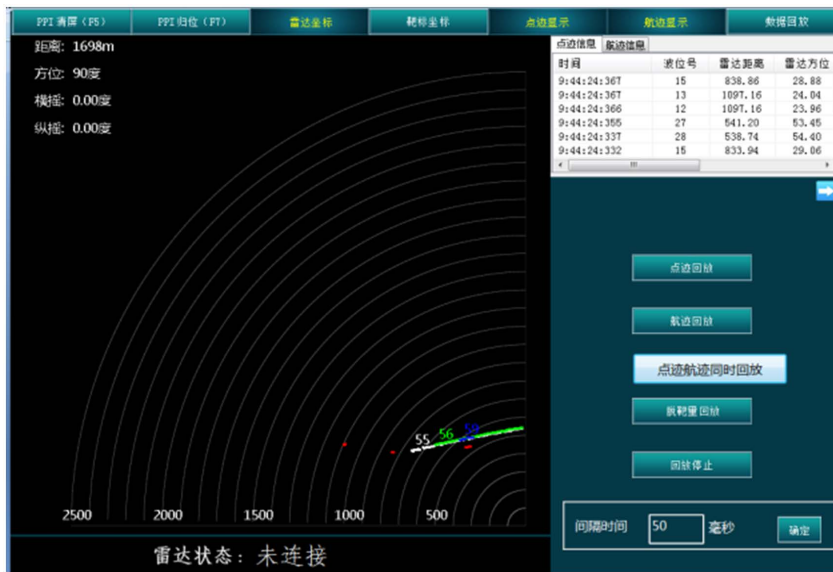


Figure 6. Detection interface 2

图 6. 检测界面 2

明, 该系统对炮弹落点的定位精度 ≤ 3 m (圆误差), 不但从根本上解决光学落点定位系统受天气和烟尘影响, 且需要人工干预的缺点, 而且定位精度提高了 3~5 倍。该系统实时客观、稳定可靠、高可信度, 满足舰炮矢量脱靶量测量需求, 使用效果良好。

参考文献

- [1] 杨榜林, 等. 军事装备试验学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 孟庆慈, 陈峰. 海上脱靶量测量技术探讨[J]. 遥测遥控, 2009, 30(6): 64.
- [3] 李成, 王小伟, 刘德耀, 等. 空靶脱靶量测量方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010(3): 108-110.

-
- [4] 魏国华, 吴嗣亮, 王菊, 等. 脱靶量测量技术综述[J]. 工程与电子技术, 2004, 26(6): 768-772.
 - [5] 吕晓林, 罗纯哲. 基于多普勒效应的脱靶量测量技术应用[J]. 无线电工程, 2010, 40(3): 55-57.
 - [6] 郭宁. 基于引信多普勒频率信号的脱靶量估算方法[J]. 现代防御技术, 2007, 35(2): 32-35.
 - [7] 周翔宇, 魏国华, 吴嗣量. 基于窄脉冲的标量脱靶量测量算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(2): 194-195.
 - [8] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 142-143.