

# W 波段窄脉冲近程雷达研究

娄国伟<sup>1</sup>, 李兴国<sup>1</sup>, 李跃华<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学毫米波、光波近感技术研究所, 江苏南京 210094; 2. 南京大学电子科学与工程系, 江苏南京 210093)

**摘 要:** 本文首先分析了 W 波段窄脉冲调制雷达的基本原理及作用距离、收发隔离、调制周期等参数. 还分析了射频及中频泄漏, 纳秒级脉冲传输失真及其克服方法. 在分析设计的基础上, 研制出一台 W 波段窄脉冲固态雷达. 在雷达中首次采用可编程数字化测距系统, 这种测距方法不但调试方便, 而且测距精度高. 最后给出雷达的测试结果.

**关键词:** 毫米波; 近程雷达; 脉冲; 测试

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1702-03

## Research on The W Band Narrow Pulse-Near Distance Radar

LOU Guo-wei<sup>1</sup>, LI Xing-guo<sup>1</sup>, LI Yue-hua<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Millimeter Wave and Optical Wave Near-sensing Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China; 2. Department of Electronic Science & Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** The fundamental principle of W band narrow pulse-near distance radar is introduced. The function and distance of the radar are presented. The parameters including acceptance, segregation and the modulated cycle are analyzed. The leak in radio frequency, intermediate frequency and the transmission distortion of the nanosecond grade pulse are discussed. The overcoming method of that is given. Based on analysis, a W band narrow pulse solid radar are designed. FPGA measure distance system is adopted in this radar first. This method of distance measurement not only is convenient in debugging, but also can achieve high precision. Finally, the test result of this radar is given.

**Key words:** millimeter; near distance radar; pulse; measurement

### 1 引言

毫米波具有准光特性和近似全天候的工作能力, 已受到国内外学者极大重视, 并成为目前军事电子技术开拓的主要频段之一. 毫米波和微波相比, 系统体积小、重量轻、机动性好. 在同样口径天线, 短波长能实现窄波束, 在目标跟踪和识别上能提供高的精度和良好的分辨率. 能提高低仰角下的跟踪能力. 窄波束还可提高系统的隐蔽性能和抗干扰能力. 天线增益的提高, 有助于降低发射机功率和增大雷达的作用距离<sup>[1]</sup>. 本文在介绍雷达工作原理、雷达参数分析、系统电磁兼容等内容后, 给出了新研制雷达的测试结果及一些重要结论.

### 2 基本工作原理

脉冲雷达的工作原理 (见图 1) 如下: 发射机发射脉冲调制信号, 发射信号经环流器及天线向目标发射, 目标回波信号经天线及环流器进入混频器. 在混频器中, 本振信号与回波信号进行混频, 混频器输出的差频信号经中频放大器放大后输入检波器. 检波器输出信号经视频放大器放大. 视频放大信号输入测距电路. 在测距电路中, 发射源的调制信号与雷达回波的视频信号进行对比, 测出回波的延迟时间, 从而确定雷达与目标之间的距离.

### 3 作用距离分析

当雷达探测地面装甲目标或直接对地测距时, 计算雷达

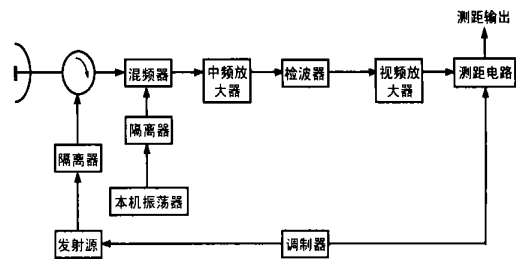


图 1 毫米波雷达的原理框图

的作用距离. 根据雷达方程可得接收机信噪比  $S/N$  与作用距离的关系式如下<sup>[2,3]</sup>

$$S/N = \frac{P_t G^2 \tau \times 10^{-0.2R}}{(4\pi)^3 R^4 K T_0 F_m L_s B_i} \quad (1)$$

式中:

雷达工作波长  $\lambda = 3.2\text{mm}$ ; 大气衰减系数  $\alpha$ : (近似值); 晴天衰减系数  $\alpha_0 = 0.4\text{dB/km}$ ; 雨天衰减系数  $\alpha_r = 3\text{dB/km}$ ; 接收机噪声系数  $F_m = 12\text{dB}$ ; 雷达发射脉冲功率  $P_t = 2\text{W}$ ; 天线增益  $G = 35\text{dB}$ ; 目标雷达截面积  $\tau = 30\text{m}^2$ ; 系统损耗  $L_s = 4\text{dB}$ ; 波耳兹曼常数  $K = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/deg}$ ; 标准参考温度  $T_0 = 290^\circ\text{C}$ ; 接收机带宽  $B_i = 100\text{MHz}$ .

(1) 当探测地面坦克时, 取  $\tau = 30\text{m}^2$ ; 将上述各参数代入式(1)两边取对数以分贝表示, 可得下列关系式:

$$10\log S/N = 121\text{dB} - 40\log R - 0.2 R \quad (2)$$

当  $R = 150\text{m}$ ; 雨天  $\gamma = 3\text{dB/km}$ , 根据式(2)可得探测器敏感坦克时, 视频输出的信噪比为:

$$10\log S/N = 121\text{dB} - 87\text{dB} - 0.09\text{dB} = 34\text{dB} \quad (3)$$

(2) 当雷达测量地面距离时, 天线波束照射地面对应的雷达截面积:

$$\sigma = \sigma_0 (R/c/2\text{sec}) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)得

$$S/N = \frac{P_t G^2 \sigma_0 c \times 10^{-0.2 R}}{2(4\pi)^3 R^3 K T_0 F_n L_s B_i \text{sec}} \quad (5)$$

式中: 雷达俯视角  $\theta = 60^\circ$ ; 雷达天线半功率波束宽  $\theta = 2^\circ$ ; 发射脉冲宽度  $\tau = 100\text{ns}$ ; 地面单位雷达截面积  $\sigma_0 = 15\text{dBm}^2/\text{m}^2$ ; 其它参数同前。

根据式(5)可得,  $R = 150\text{m}$  时,  $S/N = 22.7\text{dB}$ . 因此雷达对地面测距为  $150\text{m}$  时, 雷达视频输出信噪比为  $22.7\text{dB}$ .

当考虑信号处理时, 假定信号处理信噪比增益(包括接收脉冲的相干积累和非相干积累两者)和损耗(例如混频器和检波器的损耗、积累损耗等)的代数和与对相干与非相干雷达来说都是  $14\text{dB}$ <sup>[4]</sup>. 按上述计算可知, 当探测距离为  $150\text{m}$  时, 在雨天(最坏情况下)无论是探测地面装甲目标, 还是对地测距, 雷达输出的信噪比均在  $22\text{dB}$  以上, 能较好地满足终端要求。

#### 4 脉冲调制近程雷达的特点及参数选择

尽管在测距原理上, 脉冲近程雷达与一般脉冲雷达是相同的. 由于近程雷达的工作条件与一般雷达不同, 因此近程脉冲雷达有本身的特点. 这些特点如下:

##### 4.1 目标角闪烁效应

由于近程雷达比一般雷达的作用距离小得多, 目标不能再认为是点目标. 因此目标的反射特性极为复杂, 由于目标的各个部位到雷达的距离不同, 雷达接收机接收到的目标反射信号的相位也有差异. 因此雷达易出现角闪烁效应。

##### 4.2 发射机脉冲宽度选择

假设雷达接收机的灵敏度为  $P_r$ , 由于收、发天线之间去耦不完善, 从发射机耦合到接收机的漏信号为  $P$ , 若

$$P > P_r \quad (6)$$

则要求脉冲近程雷达必须有选通. 所谓选通, 就是在探测脉冲发射期间关闭接收机, 在探测脉冲结束时再打开接收机. 这就造成在探测脉冲的持续时间  $t_M$  内, 接收机处于关闭状态而收不到目标的回波信号, 即存在“盲区”. 此“盲区”是对应脉冲雷达可以工作的最小距离  $R_{\min}$ . 脉冲雷达能够工作的最小距离

$$R_{\min} = C/2 \quad (7)$$

式中  $\tau$  为探测脉冲的宽度。

如果要求近程雷达的最小距离不能小于  $R_{\min}$ , 则探测脉冲的宽度必须满足下式

$$\tau \leq 2R_{\min}/C \quad (8)$$

从式(8)可知, 由于近程雷达的最小作用距离较短, 要求调制脉冲宽度为纳秒量级。

##### 4.3 发射脉冲重复频率的选择

发射脉冲的重复频率  $F_M$ , 常取  $F_M \geq C/2R_{\max}$ . 脉冲雷达

发射重复频率, 主要根据时间空间特性来决定. 应保证在探测器波束扫描某一宽度  $L$  的目标所对应的时间内, 出现脉冲数  $N$  能满足积分计数电路正常工作的需要.  $L$  由具体交会条件和目标尺寸决定. 探测器波束扫描目标  $L$  所对应的时间为

$$t = (L + R)/V_r \quad (9)$$

雷达正常工作必须满足条件  $N T_M \leq t$ , 由此得

$$F_M \geq \frac{NV_r}{L + R} \quad (10)$$

式中:  $N$  为雷达作用所需要的脉冲数;  $V_r$  为雷达天线波束扫描目标的线速度。

当毫米波天线波束与地面法线夹角为  $\theta$ ; 天线半功率波束宽度为  $\theta$ ; 探测器扫描转速为  $n$ ; 探测器与地面目标的距离为  $R$  时, 天线波束扫过目标的线速度  $V_r$  为

$$V_r = 2 n R \sin \theta \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得

$$F_M \geq 2 N n R \sin \theta / (L + R) \quad (12)$$

设转速  $n = 4 r/s$ ;  $R = 30 \sim 150\text{m}$ ;  $\theta = 30^\circ$ ;  $L = 3 \sim 6\text{m}$ ;  $N = 2^\circ$ ;  $N = 2500$ . 根据式(12)计算得  $F_{M \min} = 133\text{kHz}$ , 对应的调制周期  $T_{M \max} = 7.5\mu\text{s}$ ;  $F_{M \max} = 570\text{kHz}$ , 对应的调制周期  $T_{M \min} = 1.8\mu\text{s}$ .

综合考虑系统的响应时间要求, 选择调制周期为  $T_M = 2\mu\text{s}$ , 调制频率  $F_M = 500\text{kHz}$ .

#### 5 可编程测距基本原理<sup>[5]</sup>

3mm 雷达系统测距模块对精确探测起到关键作用. 一般雷达测距就是测定回波信号与发射脉冲之间的延迟时间. 在无噪声的理想情况下, 两个波形对应的两点之间的延迟时间可精确的测出, 即可精确测出目标的距离. 实际上, 任何处理系统均存在噪声<sup>[6]</sup>. 选用可编程延时模块, 这种模块的特点是: 测距精度高、系统制作与调试方便、一致性好. 具体框图见图 2 所示。

图 2 中回波信号为非标准的逻辑信号, 通过将回波信号与基准门限信号经高速比较器比较后输出标准的逻辑信号. 由于回波信号的频率高, 特别是不能影响测量延时的时间, 因此, 比较器应选择高速器件。

利用 FPGA 实现测距控制器、延时时间编码库、延时时间刷新模块、延时修正等功能<sup>[7,8]</sup>. 测距电路首先对可编程延时器设定延时编码, 延时器将对本地脉冲信号设定延时时间. 在控制器内部, 本地延时信号与回波信号作逻辑运算处理后, 触发延时编码库, 刷新延时编码, 或启动距离指示模块, 指示对应的距离. 在每  $6.5\text{ms}$  内循环对要求的距离进行探测, 当雷达探测距离达到预先设定的距离时, 终端显示器显示测距结果。

在硬件电路的实现中, 由于信号之间的连线存在电阻、电容和电感, 因此会造成信号的延迟、反射、串扰和噪声. 这些现象在中低速系统中通常可以忽略, 但是在高速系统中则变得非常严重<sup>[9]</sup>. 由于 FPGA 为大规模集成电路, 测距电路内部的引线很短, 对有效防止高频电磁波的干扰是很有利的. 在测延时的长短上, 除对可编程延时器的编码设定外, 还充分利用了

FPGA 所提供的大量的逻辑门组成延时修正电路,使得测量延时精度可达十几个纳秒,提高了测距的精度。

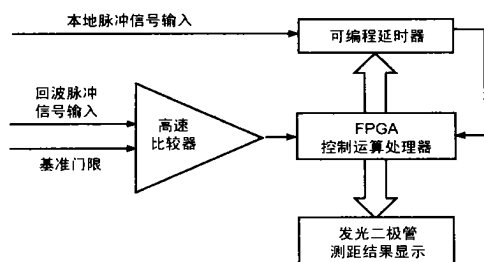


图 2 3mm 雷达系统测距模块方框图

## 6 系统电磁兼容性问题

随着电子系统的小型化,电磁兼容的重要性日益增强。电磁兼容性差的系统,往往难于正常工作。现结合在工程实际中,遇到和需要注意的几个电磁兼容性问题分析如下:

### 6.1 本振泄漏问题<sup>[10]</sup>

本振泄漏是系统和毫米波组件经常遇到的一个问题,因此即便系统组件对本振信号具有一些抑制能力,泄漏出的本振信号也有较高的电平。为了抑制本振泄漏可采取以下措施:由于本振信号可能从腔体缝隙中辐射出来,为了消除和减小这些辐射,可以将腔体焊封,或设计加工时考虑缝隙尽量小。

### 6.2 视频泄漏问题<sup>[10]</sup>

当视频脉冲沿较长传输线传输时,如果传输线与负载匹配不好,视频信号会产生严重失真。这种失真不仅出现在脉冲的前沿,也会引起脉冲拖尾。所以,在视频信号需要远距离传输时,匹配的好坏极其重要。例如,如果用特性阻抗为 50 欧姆的传输线,输出端要用接近 50 欧姆的负载。

### 6.3 中频泄漏问题

当采用高中频时,中频泄漏可能是一个干扰源。故各级电路特别是混频器输出和整个中放之间的导线连接尽可能用高屏蔽线,而且要求导线尽量缩短,减小寄生耦合和信号衰减,较好地解决系统稳定性。

当雪崩管调制脉冲宽度  $\leq 100\text{ns}$ , 瞬间电流  $\geq 15\text{A}$  时,要求调制器与脉冲雪崩管之间的连线尽量短、损耗尽量小,而且传输线与雪崩管之间的阻抗匹配也十分重要。

## 7 W 波段雷达系统测试

### 7.1 测试方法

将 3mm 雷达系统对准被测目标,见图 3 所示,然后移动被测目标,测试距离值,考核雷达的测试精度。



图 3 3mm 雷达系统测试装置

### 7.2 实测结果

对距离为 120m、135m、150m、165m 处分别测距,测距精度  $\leq \pm 5\text{m}$ 。见表 1 所示。

表 1 3mm 雷达系统测距精度

设定(m)	120	135	150	165
实测(m)	116.5	132	146	161.6
精度(m)	3.5	3	4	3.4

## 8 结论

由上述分析及实验可得出以下结论:

(1) 为减小盲区及测距精度要求,本雷达采用窄脉冲调制;

(2) 在调制脉冲宽度  $\leq 100\text{ns}$  时,为保证瞬间大电流窄脉冲不失真,脉冲的传输线应尽量短,而且要用低阻电缆,还应认真解决好传输线与脉冲振荡器的匹配问题。

(3) 测距系统采用可编程延时器及控制运算处理器,测距范围可任意编程调整,而且精度高。实验结果说明,测距指标达到设计要求。

### 参考文献:

- [1] 薛良金. 毫米波工程基础 [M]. 北京:国防工业出版社. 1998:5 - 15.
- [2] 李兴国. 毫米波近感技术及其应用 [M]. 北京:国防工业出版社. 1991:61 - 64.
- [3] Donald R Wehner. High resolution radar [M]. Artech House Boston. London: ISBN 1995:13 - 18.
- [4] [美] K J 巴顿, J C 威尔茨. 方再根, 刁育才译. 毫米波系统 [M]. 北京:国防工业出版社. 1989:80 - 85.
- [5] 赵雅兴. FPGA 原理、设计与应用 [M]. 天津大学出版社. 1999:65 - 120.
- [6] David K Barton, et al. Radar evaluation handbook [M]. Artech House. 1991:204 - 211.
- [7] Douglas L Perry. VHDL [M]. New York:McGraw-Hill. 1991:5 - 15.
- [8] David R Coelho. The VHDL Handbook [J]. Boston: Vantage Analysis Systems, INC. 1993:15 - 34.
- [9] 龙腾, 毛二可, 等. 超高速雷达数字信号处理技术 [J]. 电子学报, 1999, 12:88 - 91.
- [10] 王宁. 工程中的几个电磁兼容问题 [A]. 全国微波毫米波会议论文集. 1999:622 - 624.

### 作者简介:



娄国伟 女. 1952 年生于上海市. 1980 年毕业于南京理工大学, 研究员. 主要研究领域是毫米波系统及毫米波测试等。

李兴国 男. 1940 年生于云南省嵩明县. 1965 年成都电讯工程学院(现电子科技大学)毕业. 现任南京理工大学教授, 博士生导师, 南京理工大学毫米波、光波近感技术研究所所长. 主要研究方向为毫米波主动(雷达)和被动(辐射计)成像及目标识别等。