

3mm 波段 FMCW 近程雷达的研究*

娄国伟 李兴国 吴文

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

摘要 介绍了三毫米波段 FMCW 近程雷达作用距离的计算、雷达参数选择和测距精度的分析方法。并给出了所研制的 3mm 波段 FMCW 近程雷达的测试结果。

关键词 毫米波, 雷达系统, 测量, 近程雷达。

FMCW SHORT-RANGE RADAR OF 3MM WAVE BAND*

LOU Guo-Wei LI Xing-Guo WU Wen

(Research Institute of Millimeter Wave and Optical Near-sensing Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A 3mm wave band FMCW short-range radar was studied, including the calculation of its detecting range, the design of its parameters and the analysis of its ranging precision. In addition, the measured results of the 3mm FMCW short-range radar developed by the authors were presented.

Key words millimeter wave, radar system, measurement, short-range radar.

引言

毫米波近程雷达是一种研究作用距离从几 m 到几百 m 的小型雷达。这种雷达发射功率小, 要求最小作用距离(即测距盲区)近, 因此选择 FMCW 体制较合适。本文介绍了毫米波 FMCW 雷达的作用原理, 分析了雷达的最大作用距离、测距精度和系统参数选择, 并给出了研制的 3mm 波段 FMCW 雷达的测试结果。

1 作用原理

FMCW 雷达作用原理框图如图 1 所示。其工作原理为: VCO 信号源产生连续波调频信号, 经定向耦合器, 分出一部分功率给混频器作本振, 大部分 VCO 功率经环流器, 天线向外发射, 发射信号碰到目标后, 目标反射信号进入天线, 经环流器进入混频器。在混频器中, 回波信号与发射信号混频, 差频输出经中频放大, 放大信号由测距电路测出对应雷达与目标之间的距离。

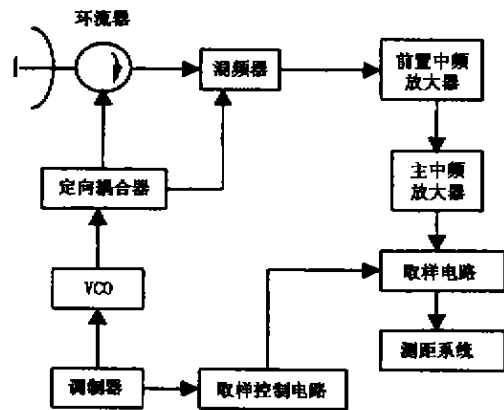


图 1 调频连续波毫米波雷达原理框图

Fig. 1 Block diagram of FMCW millimeter wave radar

2 作用距离估算

根据雷达距离方程可得接收机信噪比 S/N 与作用距离的关系为^[1]

* 国防预研基金(编号 98J10. 6. 4. BQ02)资助项目
稿件收到日期 2000-05-18, 修改稿收到日期 2000-11-02

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense(No. 98J10. 6. 4. BQ02).
Received 2000-05-18, revised 2000-11-02

$$S/N = \frac{P_a G^2 \lambda^2 \sigma_T \times 10^{-3} 2\alpha R}{(4\pi)^3 R^4 K T_0 F_m L_s \tau}, \quad (1)$$

式(1)中 P_a 为雷达发射机平均功率(W); G 为雷达天线增益(dB); λ 为工作波长(mm); σ_T 为目标雷达截面积; α 为大气衰减系数(dB/km); R 为雷达作用距离(m); K 为波耳兹曼常数(J/K); T_0 为环境绝对温度(K); F_m 为接收机噪声系数(dB); L_s 为接收机系统损耗(dB); τ 为接收机积分时间(s).

当雷达作为空对地的高度表时,式(1)中雷达截面积可表示为^[2]

$$\sigma_T = \sigma_0 \frac{\pi(R\theta)^2}{4\sec\varphi}, \quad (2)$$

式(2)中 σ_0 为单位地面面积对应的雷达截面积; θ 为雷达天线半功率点对应的波束宽度($^\circ$); φ 为雷达俯视角($^\circ$).

将式(2)代入式(1)整理后可得

$$S/N = \frac{P_a G^2 \lambda^2 \sigma_0 \theta^2 \times 10^{-3} 2\alpha R}{256\pi^2 R^2 K T_0 F_m L_s \sec\varphi \tau}. \quad (3)$$

设雷达工作波长 $\lambda = 3.2\text{mm}$; 大气衰减系数 $\alpha = 0.4\text{dB/km}$ (晴天); $\alpha = 3\text{dB/km}$ (雨天 4mm/h); 接收机噪声系数 $F_m = 8\text{dB}$; 雷达发射功率 $P_a = 6\text{mW}$; 天线增益 $G = 35\text{dB}$; 系统损耗 $L_s = 4\text{dB}$; 波耳兹曼常数 $K = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$; 标准参考温度 $T = 290^\circ$; 累积时间 $\tau = 10\text{ms}$; 地面单位雷达截面积 $\sigma_0 = -15\text{dBm}^2/\text{m}^2$; 雷达天线波束宽度 $\theta = 2^\circ$; 俯视角 $\varphi = 60^\circ$, 将上述数值代入式(3)并以分贝表示,即

$$10 \log S/N = 109.3\text{dB} - 40 \log R - 0.2\alpha R, \quad (4)$$

对最大作用距离在几百 m 范围内的近程雷达,无论在晴天或阴雨天(如雨量为 4mm/h),大气衰减均可忽略,式(4)中等号右边第 3 项可略去,则式(4)可写成

$$10 \log S/N = 109.3\text{dB} - 40 \log R. \quad (5)$$

一般雷达中,提供终端信号处理所需信噪比只要大于 12dB 即可满足要求,根据式(5)可得,当终端信噪比为 12dB 时,根据式(5)可得雷达最大作用距离为 $R_{\max} = 270\text{m}$.

3 测距精度分析^[3]

毫米波测频测距雷达的测距精度主要影响因素有:

3.1 固定误差

根据差频信号的分析可知,调频雷达的差频信号频谱是离散的,数值是调制频率 F_M 的整数倍,它

随弹目距离的变化而阶跃变化,从而产生阶跃测量误差,常称为固定误差.本文采用锯齿波调制,距离与调制频偏的关系为

$$R = \frac{CT_M}{2\Delta F_m} f_i, \quad (6)$$

式(6)中 F_M 、 T_M 分别为调制频率和调制周期; f_i 为差频; ΔF_m 为频偏; C 为光速(电磁波大气传播速度).

固定误差大于等于差频频率为 nF_M 和 $(n+1)F_M$ 时所对应的距离差.将上述差频代入式(6)中,并将距离相减即可得到固定误差为

$$\Delta R_1 = \frac{C}{2\Delta F_m}. \quad (7)$$

当 $\Delta F_m = 200\text{MHz}$ 时, $\Delta R_1 = 0.75\text{m}$.

3.2 调频线性度引起的测距误差

设调频线性度引入差频信号频率误差为 Δf_{i2} , 其值为^[4]

$$\Delta f_{i2} = (2e_f \Delta F_m R) / T_M C, \quad (8)$$

式(8)中 e_f 为调频线性度;将式(8)代入式(6)可得线性度引起的测距误差为

$$\Delta R_2 = e_f \cdot R. \quad (9)$$

例如,当 $R = 150\text{m}$; $e_f = 2\%$ 时,根据式(9)可得 $\Delta R_2 = 3\text{m}$.

3.3 多普勒效应引起的测距误差

当地面与雷达之间存在相对运动时,多普勒效应产生的差频信号频率误差用 Δf_{i3} 表示,其值为

$$\Delta f_{i3} = fd = \frac{2V_r \cos\theta_r}{\lambda_n}, \quad (10)$$

式(10)中 V_r 为雷达下降速度; θ_r 为天线主波束轴线与地面法线之间的夹角.

例如, $V_r = 10\text{m/s}$, $\theta_r = 30^\circ$. 根据式(10)可得 $\Delta f_{i3} = 5.7\text{kHz}$. 将式(10)代入式(6)得

$$\Delta R_3 = \frac{CT_M}{2\Delta F_m} \Delta f_{i3}. \quad (11)$$

例如,设 $T_M = 33\mu\text{s}$, $\Delta F_m = 200\text{MHz}$ 代入式(11)可得 $\Delta R_3 = 0.14\text{m}$.

3.4 数字测频误差影响带来的测距误差

采用数字测频电路时,计数脉冲只能取整数,在雷达与地面无相对运动时,差频信号是调制频率 F_M 的整数倍.这时,数字电路几乎不会出现测频误差.实际上,雷达与目标间存在相对运动,另外还有寄生调幅影响.因此,差频信号频率出现了非调制频率 F_M 的整数倍情况,从而带来测试误差为 Δf_{i4} . 测频

精度带来的测距误差为 ΔR_1 , 其值一般小于固定误差 ΔR_1 , 取 $R_1=0.74\text{m}$.

3.5 综合测距精度

根据上述分析可得总的测距误差为

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{C}{2\Delta F_m}\right)^2 + (e_f \cdot R)^2 + \left(\frac{CT_M}{2\Delta F_m}\Delta f_{13}\right)^2 + (\Delta R_1)^2}, \quad (12)$$

将上述实列计算数代入式(12), 可得 $\Delta R = \pm 3.2\text{m}$.

4 系统主要参数选择

4.1 调制器调制频率的确定

为了消除测距的非单值性, 应使调制器的重复周期 T_M 要大于最大作用距离时雷达回波延迟时间, 即

$$T_M \gg \frac{2R_{\max}}{C}, \quad (13)$$

当 $T_M \gg \frac{2R_{\max}}{C}$ 时, 差频信号与距离成比例, 而且只有尽量减小由于延迟时间带来的不规则区间, 才能减小或消除差频信号的许多谐波分量和离散频谱, 使其在任一距离均为单一差频频率, 因此 $T_M \gg \tau_{\max}$, 一般取 $T_M = 10\tau_{\max}$.

4.2 调制频偏 ΔF_M 的确定

差频信号的频谱是离散的, 只有调制频率 F_M 整倍数的频率分量, 用数字式测频电路时, 随着距离的改变, 测得的频率呈跳跃式改变, 因而引入了固定测距误差 ΔR , 将 $f_i = nF_M$ 和 $f_i = (n+1)F_M$ 代入式(6)得

$$\Delta R = \frac{C}{2\Delta F_M}, \quad (14)$$

$$\text{即 } \Delta F_M = \frac{C}{2\Delta R}.$$

4.3 多普勒效应和寄生调幅对测距精度的影响

要消除多普勒效应对测距精度的影响, 多普勒效率 f_d 要远小于最小作用距离对应的差频 f_{\min} , 即 $f_{\min} \gg f_d$. 一般选择 $f_{\min} = 10f_d$. 当雷达下降速度为 V_r , 天线波束与地面法线的夹角为 θ_k 时, 为克服多普勒频漂的影响, f_{\min} 为

$$f_{\min} = 10 \frac{2V_r \cos \theta_k}{\lambda}. \quad (15)$$

由于调频发射机寄生调幅的存在, 导致在回波信号时混频器输出端也存在调制信号 F_M , 为克服寄生调幅对调频测距毫米波引信的测距精度影响, 则最小差频 $f_{\min} \gg F_M$, 取最小差频 $f_{\min} = 10F_M$.

4.4 通频带特性

根据调频测距原理可知, 调频雷达混频器输出的差频信号与距离 R 成正比, 因此, 差频信号放大器通频带与雷达的最大和最小作用距离有关, 即

$$\Delta f_r = f_{\max} - f_{\min} = \frac{2\Delta F_m}{T_M C} (R_{\max} - R_{\min}). \quad (16)$$

5 3mm 波段 FMCW 雷达系统测试

根据上述设计原则, 设计研制了 3mm 波段 FMCW 雷达, 利用该雷达分别在作用距离为 120m, 135m, 150m, 165m 处对地进行测试, 其结果见表 1.

表 1 3mm 雷达系统测距精度
Table 1 The results of range-finding precision on 3mm radar system

设定距离(m)	120	135	150	165
实测距离(m)	116.5	132	146	161.6
测距精度(m)	± 2.9	± 3	± 3.1	± 3.2

6 结论

(1) 对于作用距离为几 m 至几百 m 的近程雷达, 由于发射功率较小, 易于收发隔离, 另外, 要求雷达盲区较小, 为满足上述要求, 选择毫米波连续波调频雷达较合适.

(2) 从测距精度分析可知, 当作用距离较远, 雷达与地面接收速度较高时, 调频线性度及多普勒效应对测距精度影响较大. 当作用距离为几 m, 雷达与地面接近速度较低时, 调频带宽(频偏)及数字测频误差对测距精度影响较大.

(3) 研制出的 3m 波段 FMCW 雷达测试表明, 测距精度能满足设计要求. 因场地条件限制, 没有做最大作用距离试验.

REFERENCES

- [1] LI Xin-Guo. *Millimeter Wave Near-Sensing Technique and Application*. Beijing: National Defense Industry Publishing House (李兴国. 毫米波近感技术及其应用. 北京: 国防工业出版社), 1991, 61—62
- [2] Kenneth J. Button, James C. Wilter. *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 4. *Millimeter Systems*. U. S. Army Microm; Academic Press, 1981 (K. J. Button, J. C. Wilter 著, 方再根译. 毫米波系统. 北京: 国防工业出版社, 1989, 25—32)
- [3] ZANG Li-Jun, LI Xing-Guo. *Design Principle of Radio Fuse Circuit*. Beijing: Weaponry Industry Publishing House (臧立君, 李兴国. 无线电引信电路设计原理. 北京: 兵器工业出版社), 1986, 138—150