

FMCW 毫米波雷达中频 滤波器的研究*

盛怀茂 李玉芳 夏冠群 孙晓玮 李洪芹 金昶明
(中国科学院上海冶金研究所上海汽车电子工程中心, 上海, 200050)

摘要 针对寄生调幅是影响 FMCW 毫米波雷达作用距离的重要因素, 讨论了中频滤波器在 FMCW 毫米波雷达系统中的作用, 研究了滤波器性能与雷达作用距离的关系。根据分析表明, 对中频滤波器进行了 CAD 优化, 提高了雷达的作用距离。

关键词 寄生调幅, 中频滤波器, FMCW 毫米波雷达。

RESEARCH ON IF FILTER USED IN FMCW MILLIMETER-WAVE RADAR*

SHENG Huai-Mao LI Yu-Fang XIA Guan-Qun
SUN Xiao-Wei LI Hong-Qin JIN Chang-Ming
(Shanghai Engineering Research Center for Automotive Electronics, Shanghai Institute of Metallurgy,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract The function of IF filter in the FMCW millimeter-wave radar system was discussed considering that parasitic AM was the main factor that affects the detecting range of FMCW millimeter-wave radar. The dependence of the detecting range of the radar on the performance of the IF filter was also analyzed. The results show that the detecting range of the radar is increased after the IF filter is optimized with HP CAD.

Key words parasitic AM, IF filter, FMCW millimeter-wave radar.

引言

雷达的作用距离与发射功率、天线增益、目标散射截面积和最小可检测信号等有关^[1]。就雷达系统本身来讲, 当工作频率、发射功率和天线增益确定后, 其最大作用距离便取决于最小可检测信号。在雷达接收机的输出端, 微弱的回波信号总是和噪声及其它干扰混杂在一起, 一般, 噪声是限制微弱信号检测的基本因素。FMCW 毫米波雷达的发射波是一个具有寄生调幅的调频波, 寄生调幅是由 VCO 的非理想性引起的, 它与 VCO 的性能有关, 一般是不可避免的。本文讨论了寄生调幅对雷达作用距离的影响, 针对这个问题, 研究了中频滤波器对寄生调幅的抑制作用, 通过对中频滤波器进行 CAD 优化, 提高了雷达的作用距离。

1 寄生调幅

图 1 为本文所考虑的零差型(混频器本振功率取自发射源)FMCW 毫米波雷达系统结构, 用于汽车防撞系统, 包括收发天线、RF 前端^[2]、中频放大器和数据处理模块。表 1 为该系统的主要性能参数。RF 前端结构如图 2 所示。混频器的输入信号一路是来自天线的接收信号, 另一路来自定向耦合器, 接

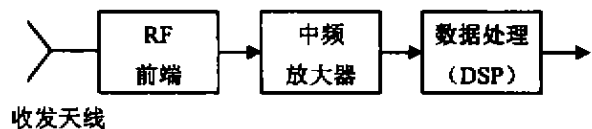


图 1 零差型 FMCW 毫米波雷达系统结构
Fig. 1 The structure of homodyne FMCW millimeter-wave radar system

* 国防预研基金(96. J2. 4. 2)资助项目
稿件收到日期 2001-01-03, 修改稿收到日期 2001-05-17

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense (No. 96. J2. 4. 2)
Received 2001-01-03, revised 2001-05-17

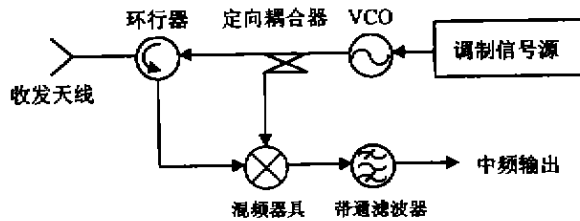


图 2 零差型 FMCW 毫米波射频前端原理图
Fig. 2 The RF front-end of homodyne
FMCW millimeter-wave radar system

收信号一般比来自定向耦合器的信号小得多,在此系统中 VCO 的调制信号采用线性三角波信号,理想 VCO 的输出信号应该是一个等幅调频波,而实际的 VCO 都是非理想的,调频的同时也存在着寄生调幅。

图 2 中的混频器为一 GaAs 肖特基势垒二极管单端混频器,与后面的带通滤波器组成包络检波电路,所以该部分在对输入信号进行混频的同时,也进行着包络检波,所以输出信号为有用中频信号与本振包络信号的叠加。图 3 为前端输出信号波形,可以看出在中频信号上叠加了一个 2kHz 的三角波信号,该信号即为具有寄生调幅的发射波包络信号,在此称之为:调制三角波的泄漏。对图 3 中的信号进行 FFT 变换得到前端输出信号频谱(见图 4),图 4 中 1、2、3、4 所指的四个峰分别为泄漏信号的基频、三次谐波、五次谐波和七次谐波,5 所指的峰为混频输出的中频信号。

经实验,泄漏的三角波信号幅度为 16mV,与目标距离无关,而有用中频信号幅度随目标距离的增加而迅速减小,当接收信号小于 16mV 时,AGC 放大电路将自动跟踪这个三角波信号,从而限制了

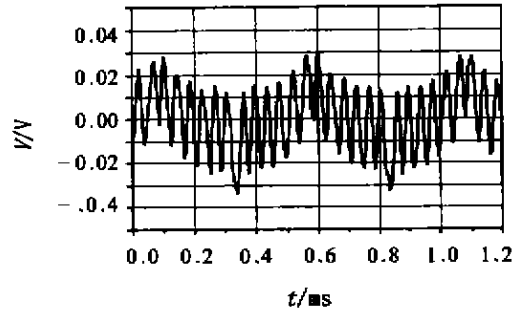


图 3 前端输出信号
Fig. 3 The output signal of front-end

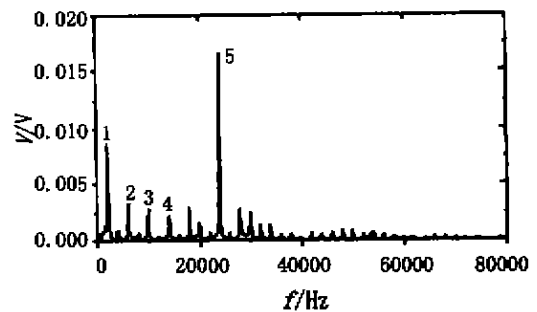


图 4 前端输出信号频谱
Fig. 4 The spectrum of the output signal of front-end

AGC 放大器的增益,严重制约了雷达的作用距离。

2 中频滤波器对雷达作用距离的影响及 CAD 优化

由以上分析,对于 FMCW 毫米波雷达系统,调制信号的泄漏严重影响了雷达的作用距离,与噪声不同的是此信号为一个固定频率的信号,所以可以通过采用适当的滤波器来最大限度地抑制此信号及其谐波,从而提高雷达的作用距离。

中频放大器的输入信号包括两个基本信号,一个是 $40\mu\text{V}\sim 0.4\text{V}$ 的随目标距离而变化的中频信号,另一个是 16mV 恒定不变的 2kHz 泄漏的三角波无用信号。AGC 电路跟踪的是上述两个信号叠加后的信号幅值,当中频信号幅度小于泄漏三角波的幅度时,AGC 放大器的增益受控于泄漏的三角波,而无法把有用信号放大到足够的幅度。图 5 比较了泄漏的三角波谐波分量(图 5 中左图)与不同目标距离下前端输出的理想中频信号(图 5 中右图)的大小,其中目标距离(R)与中频频率(Δf)呈线性对应关系,在此系统中每 7.2kHz 对应距离为 1m。可以看出,当目标距离大于 10m 时,有用信号幅度已经小于泄漏三角波基频信号的幅度,所以必须在前置

表 1 FMCW 汽车毫米波雷达系统参数
Table 1 The parameters of FMCW automotive
millimeter-wave radar system

系统参数	指标
工作体制	FMCW
工作频率	35GHz
调制波形	三角波(2kHz)
发射功率	40mW
作用距离	100m
信号处理方法	DAP
混频输出信号幅度	0.4V~40 μ V
中频带宽	7.2~70kHz
泄漏三角波幅度	16mV
DSP 采样的信号幅度	2V(p-p)

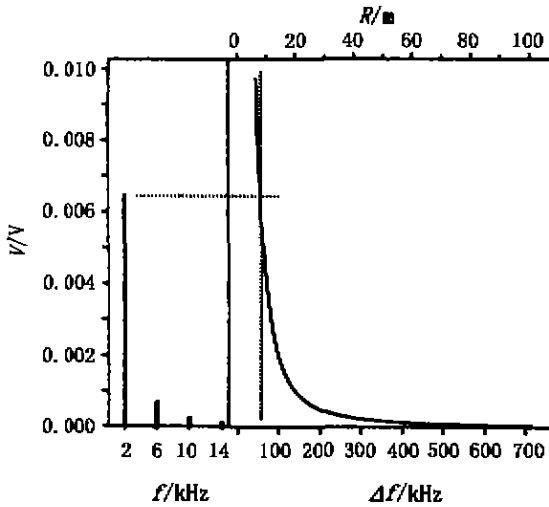


图5 泄漏三角波谐波和不同目标距离下的理想中频信号
Fig. 5 The harmonics of leaking triangle wave signal and ideal IF signal under different target range

放大器电路中对调制信号及其主要谐波分量进行抑制,抑制度(A)可根据要检测的最小有用信号(V_{min})和泄漏的调制信号(V_{ml})得出

$$A = V_{ml}/V_{min} \tag{1}$$

$$V_{min} = a_0/R_{max}^2 \tag{2}$$

式中 a_0 为由系统决定的常系数, R_{max} 为雷达的最大作用距离. 由式(1)和式(2)得

$$R_{max} = \sqrt{a_0 A / V_{ml}} \tag{3}$$

据此,对于本文所考虑的系统,可以得出对泄漏三角波的衰减量与雷达作用距离的关系(见图6). 假设系统噪声和其它干扰足够小,并且发射功率、天线增益和系统噪声系数已确定. 由图6可见,要使雷达的作用距离达到100m,则对泄漏调制信号的衰减应大于52dB.

由于中频带宽范围为7.2~720kHz,所以可以使用高通滤波器来抑制泄漏的三角波信号及其谐波. 一般,滤波器在通带边界处希望其频率特性越陡

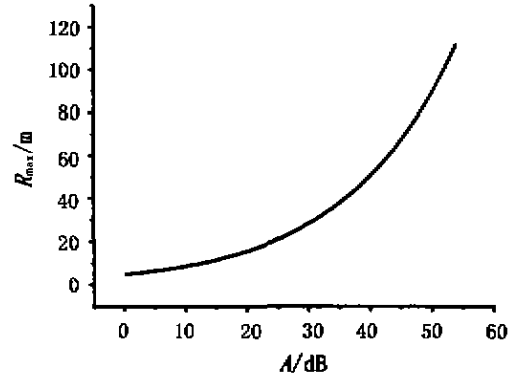


图6 IF滤波器对雷达最大作用距离 R_{max} 的影响
Fig. 6 The dependence of R_{max} on the performance of IF filter

越好,然而本系统中不要求高通滤波器截止频率处的频率特性非常陡,因为,中频信号在低频(目标较近)时有较大的幅值,并且随距离(R)的增加按 $1/R^2$ 衰减,亦即随频率(Δf)的增加按 $1/\Delta f^2$ 衰减,同时后级的AGC有足够大的动态增益,所以可以在满足对2kHz信号及其谐波衰减足够大的条件下,把高通滤波器的频率特性做得较缓. 这样既抑制了2kHz的三角波调制信号及其谐波分量,又减小了后级AGC放大器的增益调变范围.

本文采用简洁的RC滤波电路实现了上述要求(见图7). 滤波器特性不但与元件的取值有关,而且还与滤波器的输入、输出阻抗有关. 滤波器电路作为前置放大器的一部分设计在低噪声放大器与隔离器之间(见图8). 隔离器采用了共集电极三极管电路,实现前置放大器与AGC放大器之间的阻抗匹配. 图7中的输入、输出阻抗(Z_{in}, Z_{out})分别为低噪放大器的等效输出阻抗和隔离器的等效输入阻抗. 用HP ADS软件包对图7所示的电路进行优化. 对于本系统希望滤波器对2kHz信号及其谐波的衰减尽可能大,而对较高频率的信号衰减尽可能小. 为使雷达的作用距离能够达到100m,把优化目标设定为:
(1) 对2kHz信号的衰减量大于52dB; (2) 在频率

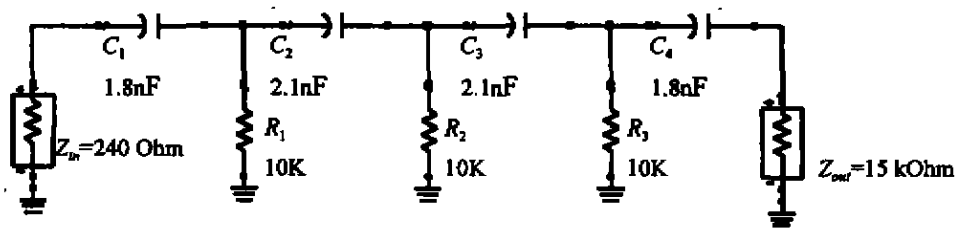


图7 高通滤波器拓扑结构
Fig. 7 The topology of the high-pass filter

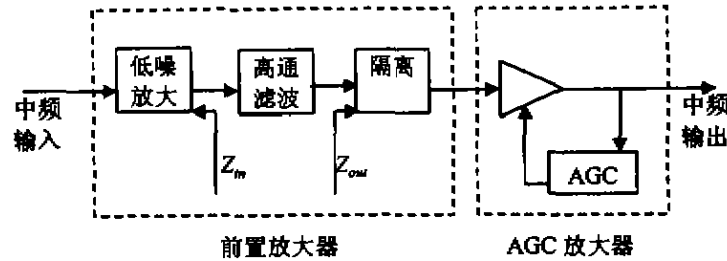


图 8 FMCW 毫米波雷达中频放大器框图

Fig. 8 The block diagram of the IF amplifier of FMCW millimeter-wave radar system

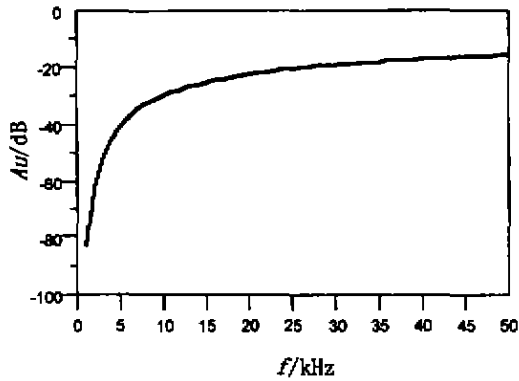


图 9 高通滤波器的优化结果

Fig. 9 The performance of the high-pass filter after optimization

大于 40kHz 时的衰减量小于 15dB. 目标(2)的确定取决于中频放大器的最大增益. 图 7 中元件的取值即为优化结果. 优化后滤波器电路的频率特性如图 9 所示, 基本达到优化所设定的目标. 根据图 9 所示

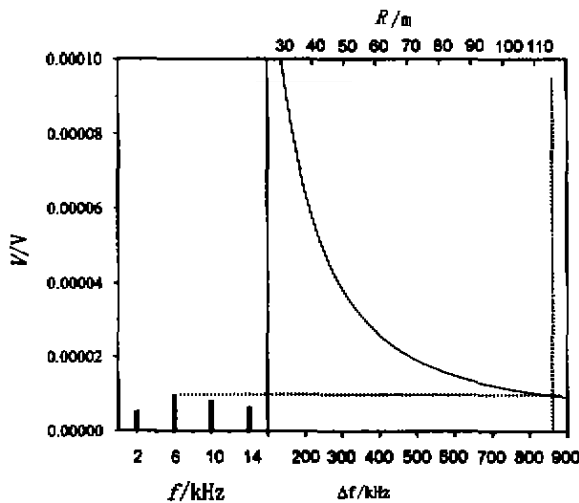


图 10 滤波后的泄漏三角波谐波和不同目标距离下的理想中频信号

Fig. 10 The harmonics of leaking triangle wave signal and ideal IF signal under different target range after filtering

滤波器特性, 可以计算出前端输出信号经过滤波器后的频谱(见图 10), 它与图 5 比较可见, 2kHz 泄露信号已基本被抑制, 使雷达作用距离大于 100m.

3 实验结果

使用图 8 所示的中频放大器对前端输出的信号进行放大, 并用高速数据采集系统对中频放大器的输出信号进行实时采样, 得到图 11 所示的波形图, 它与图 3 比较可见. 经过使用优化后的滤波器, 前端输出的泄露三角波信号得到有效抑制. 信号在被放大的同时, 变的更为平坦, 更加接近于理想的等幅波. 对采样得到的中频信号进行 FFT 变换, 得到中频放大器输出信号的频谱(见图 12), 其中泄露三角波的各次谐波已几乎不可见. 所以即使在回波信号非常微弱的情况下, 也可以通过最大幅度谱法提取出回波信号对应的中频频率.

雷达样机使用 DSP 对中频放大器的输出信号进行 FFT 变换, 并用最大幅度谱法提取出回波信号对应的中频频率. 根据在调制信号上升沿和下降沿提取出的中频频率计算目标的距离和相对运动速度, 并用数码管实时显示. 实验表明, 通过对中频滤波器进行优化, 泄漏的三角波调制信号得到有效抑制, 改善了中频放大器的输出信号, 使毫米波雷达的作用距离大于 100m.

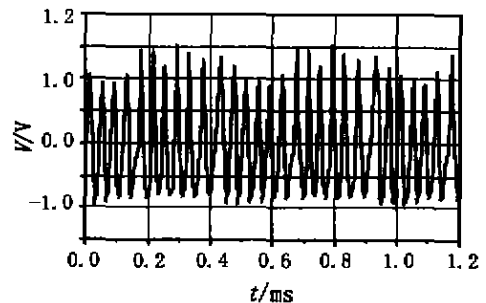


图 11 中频放大器输出的信号

Fig. 11 The output signal of the IF amplifier

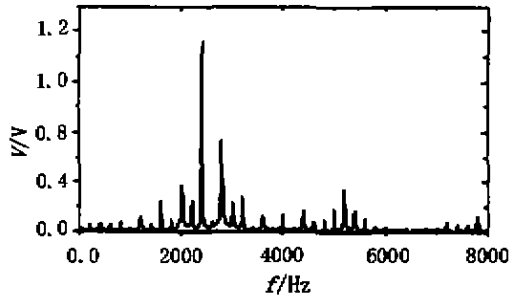


图 12 中频放大器输出信号谱

Fig. 12 The spectrum of the output signal of IF amplifier

4 结语

由于 VCO 的非理想性, 使雷达发射信号为一

个具有寄生调幅的信号, 寄生调幅成为限制 FMCW 毫米波雷达作用距离的主要因素. 本文分析了中频滤波器在雷达系统中的作用, 并对滤波器参数进行了优化. 通过采用该滤波器对泄漏信号进行抑制, 使雷达的作用距离大大增加.

REFERENCES

- [1] DING Lu-Fei, GENG Fu-Lu. *Radar Principle* (revised edition). Xi'an: Xidian Press (丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理(修订版). 西安: 西安电子科技大学出版社), 1997, 123
- [2] HE Min-Min, SUN Wei-Bo, HUANG Zhen-Qi, et al. Development of mm-wave FMCW transceiver modules. *Research & Progress of SSE* (何敏敏, 孙微波, 黄振起, 等. 毫米波 FMCW 收发组技术研究. 固体电子学研究与进展), 1999, 19: 52