

# 汽车防撞雷达 MFSK 信号应用仿真研究

李靖<sup>1</sup>, 李广柱<sup>2</sup>, 石婷<sup>1</sup>, 伍泽全<sup>1</sup>, 费洪晓<sup>1</sup>

(1. 中南大学 软件学院, 湖南 长沙 410000;

2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410000)

**摘要:**在综述汽车防撞雷达各种应用波形的基础上,提出了一种具有多重优点的波形设计—MFSK 波形设计,并对 MFSK 波形设计的约束关系展开深入讨论。基于经过分析波形的信号原理,建立了多种 FSK 波形的信号处理模型,根据处理模型所给出的处理结果,同时结合性能参数的设计要求,提炼出了各种波形参数设计的约束关系,这是进行汽车防撞雷达系统设计的基础步骤。为了验证该理论模型和波形参数设计约束关系的有效性,分别对 2-FSK、MFSK 等信号波形等理论模型场景进行了 Matlab 实验仿真。仿真结果符合理论模型的预期,在不提升汽车防撞雷达信号处理成本的情况下,汽车防撞雷达系统运用 MFSK 信号能够提高数据的正确性,表明所提出的波形设计有效可行,具有较好的测距精度。

**关键词:**汽车防撞;雷达信号;MFSK 波形;信号处理

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2017)07-0016-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.07.004

## Investigation on MFSK Applications of Automotive Radar

LI Jing<sup>1</sup>, LI Guang-zhu<sup>2</sup>, SHI Ting<sup>1</sup>, WU Ze-quan<sup>1</sup>, FEI Hong-xiao<sup>1</sup>

(1. College of Software, Central South University, Changsha 410000, China;

2. College of Opto-electronic Science & Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

**Abstract:**On the basis of summarizing the various waveforms used in automobile anti-collision radar, the design of MFSK waveform with multiple advantages is proposed and the constrained relationship in the design of MFSK waveform is discussed deeply. The various FSK waveforms' models of signal processing have been established by analyzing the waveform's principle. Meanwhile according to the results of model processing, the constraints on waveform parameters have been extracted and purified combined with the requirements of performance parameter. In order to validate the design constraints between theoretical model and waveform parameter, the experimental simulations with Matlab have been conducted under the scenario of 2-FSK and MSK, and the results of which agree with the expectation of theoretical model. Therefore automobile anti-collision radar using MFSK is able to improve the accuracy of data, which proves waveforms is feasible and is of great accuracy without increasing signal process costs.

**Key words:**automobile anti-collision; radar signal; MFSK; signal processing

## 0 引言

随着现代交通的日益发达和汽车工业的不断发展,近年来高速公路建设十分迅速,然而伴随的是交通事故的频繁发生,给人民的生命和财产造成了极大的威胁<sup>[1]</sup>。因此,研究包括防撞雷达在内的汽车安全传感器,具有非常重要的现实意义和应用前景<sup>[2-3]</sup>。针对上述背景,首先综述各种波形在防撞雷达上的应用<sup>[4-5]</sup>,在此基础上对应用在汽车防撞雷达中的 MFSK 波形进行可行性研究设计,建立了 FSK 波形的信号处

理模型,提炼了波形参数设计的约束关系,并且通过仿真验证了理论模型和波形参数设计约束关系的有效性<sup>[6-7]</sup>。

## 1 汽车防撞雷达波形综述

应用在汽车防撞雷达中的波形体制,包括调频连续波(FMCW)、频率键控(FSK)和以 IR-UWB 为代表的脉冲体制<sup>[8]</sup>。但是这三种经典波形都具有一些特有的弱点,在这些基本波形的基础上提出了很多复合波

收稿日期:2016-06-23

修回日期:2016-09-28

网络出版时间:2017-06-05

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(61301136);中南大学 2015 年研究生科研创新项目;中南大学 2016 年大学生创新训练项目

作者简介:李靖(1993-),男,硕士,研究方向为信号处理;费洪晓,副教授,研究方向为网络安全和信息处理。

网络出版地址: <http://jns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170605.1507.032.html>

形,如图 1 所示,图中横坐标为时间,纵坐标为发射信号频率。

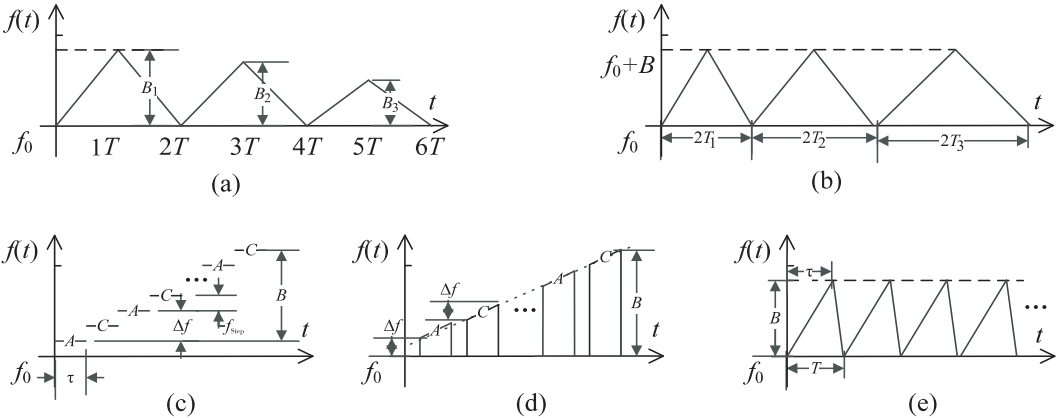


图 1 各种改进的汽车防撞雷达波形示意图

因存在距离-速度耦合效应,通过发射单个调频连续波信号无法同时获得目标的距离和速度信息,为此一般采用上、下调频,即所谓“三角”调制的波形来分解距离-速度耦合。然而汽车防撞雷达面临的实际路况却不可避免地存在多个目标,在此情况下,三角调制调频连续波在上、下调频都会出现多个目标谱线,如果上、下调频目标谱线配对不正确,就会造成虚假目标。

为了避免这些问题,张建辉等<sup>[9]</sup>提出了依次发射持续时间相同,但调频率不同的多个三角调制调频连续波,如图 1(a)所示。通过比对不同调频率下的目标谱线,即可正确判断出真实目标,并估计出相应的距离和速度信息。与此类似,徐涛等<sup>[10]</sup>改变发射信号的持续时间,调频总带宽保持不变设计得到的雷达波形如图 1(b)所示。对经典波形的另一种改进思路,是德国的 Rohling 教授等<sup>[11]</sup>提出的复合波形体制,如图 1(c)所示。通过将 LFM CW 和 FSK 波形进行复合,将原先 LFM CW 波形中频率随时间连续变化改为阶跃变化,相邻两个频点(即图中标识的 A 和 C)构成一组发射信号,它们之间的频率间隔为  $f_{\text{step}}$ ,每组信号之间的频率间隔为  $\Delta f$ ,这样跳频  $N$  次,得到总带宽为  $B = N\Delta f$ 。对信号 A 和 C 分别进行采样、FFT 处理和 CFAR 检测后,利用 A 和 C 得到的信号谱线的相位差来测定目标的距离和速度信息。还有一种改进信号由毕欣等<sup>[12]</sup>提出,如图 1(d)所示,与图 1(c)类似,它也可以看作是 LFM CW 和 FSK 的复合体制。此外,图 1(e)所示的“快速调制”调频连续波信号,通过二维 FFT 处理获取目标的距离-速度二维数据矩阵,从而解决了距离-速度耦合问题,但实现成本较高。

综上,图 1(a)和图 1(b)是多种调频率的对称三角线性调频连续波体制;而图 1(c)和图 1(d)所示的波形基于频移键控。如前所述,调频连续波存在配对困难和虚假目标的现象,因此重点研究 MFSK 波形

体制。

2 FSK 波形的信号处理模型

2.1 2-FSK 波形与信号处理研究

2-FSK 波形如图 2 所示。

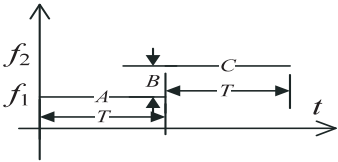


图 2 2-FSK 波形示意图

雷达依次发射两种频率的连续波(CW)信号,每种频率的持续时间都为  $T$ ,这样的波形体制即为 2-FSK。对于 2-FSK 波形体制而言,每一个频点都仅具备测速功能,综合两个频点才能够实现距离的测量。

调制周期  $T$  由速度分辨率的要求  $\Delta V$  决定。发射周期由雷达的性能决定,具体地说,对测速分辨率的要求决定了周期的长短。假定要求测速分辨率为  $\Delta V$ ,则  $T$  应满足:

$$T \geq \frac{c}{2f_1 \cdot \Delta V} \tag{1}$$

频率差  $\Delta f$  由测量的距离范围  $R_{\text{max}}$  决定。对于 FFT 处理结果来说,测量两个谱峰的相位差容易,精度也可做得较高。相位差既与距离有关,也与速度有关,但是由于多普勒谱线的位置与速度有关,因此可以扣除速度的影响。为了不造成测距模糊,频率差应满足:

$$\Delta f \frac{2R_0}{c} < 1 \Rightarrow \Delta f < \frac{c}{2R_0} \tag{2}$$

采样率  $f_s$  则由测量速度范围决定。对于 2-FSK 系统来说,它的采样率只需大于目标速度范围对应的多普勒频移即可。假定雷达系统的测速范围为  $[V_{\text{min}}, V_{\text{max}}]$ ,则在复采样的情况下,采样率应满足:

$$f_s > \frac{2f_2(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})}{c} \tag{3}$$

总的来说,FSK 波形体制适用于速度测量的场合,只是兼具测距的功能,且测距精度较低。为了提高测距精度,文献[13]提出了 MFSK 波形体制,下面建立 MFSK 波形的信号处理模型。

## 2.2 MFSK 波形信号处理研究

MFSK 可以视作 LFM CW 和 FSK 的混合波形,它的频率是逐渐增加的,也是采用了  $M$  个频点,但与多频点 FSK 不同的是,MFSK 采用了两组频率,如图 1(c)中显示的 A 和 C,在 A 组和 C 组内每个频点的间隔都是  $\Delta f$ ;而组间具有频率间隔  $f_{\text{step}}$ 。单看 A 组,它是 LFM CW 和 FSK 的复合波形,单看 C 组也是如此,如图 3 所示。

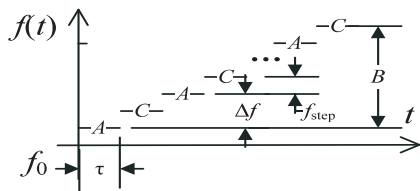


图 3 MFSK 波形示意图

对 A 段发射信号来说,峰值在以下时刻取:

$$\begin{aligned} \frac{k}{M_m} &= (\Delta f \frac{2R_1}{c} + 2f_0 \frac{2V}{c} \tau) \Rightarrow \\ k &= \frac{R_1}{c/2M_m\Delta f} + \frac{V}{c/4M_mf_0\tau} \Rightarrow \\ k &= \frac{R_1}{\Delta R} + \frac{V}{\Delta V} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\Delta R = c/2M_m\Delta f$ 、 $\Delta V = c/4M_mf_0\tau$  分别为距离分辨率和速度分辨率。

对于 C 段发射信号有类似的结果。注意到 A 段和 C 段下目标的距离徙动远远小于距离分辨率(这是因为 A 段和 C 段间的距离徙动为  $R_2 - R_1 = V\tau$ ,因此是很小的);而速度分辨率的差异也是很小的,因此可以认为 A 段和 C 段下回波<sup>[14]</sup>经 FFT 处理后的谱线几乎处于同一位置,这就为进行比相创造了条件。用 C 段的谱峰相位减去 A 段的,可得相位差:

$$\Delta\Phi = -2\pi\{f_{\text{step}} \frac{2R_0}{c} + \frac{2V}{c}[(f_0 + \frac{M-1}{2}\Delta f)\tau + f_{\text{step}}(M\tau + \iota)]\} \quad (5)$$

该相位差是采用 IFFT 处理后得到的,如果采用 FFT 处理得到的结果是完全一样的。如果某个谱线只存在一个目标,那么联立式(4)和式(5),即可通过测量获得的谱线位置  $k$  以及相位差  $\Delta\Phi$ ,获取目标位置和速度的估计值。

需要注意的是,由于  $2Vf_0\tau/c$  较大,因此相位差  $\Delta\Phi$  可能是模糊的,这就使得在联立式(4)和式(5)求解之前需要先解模糊。由于速度不会模糊,只有距离会产生模糊,因此解模糊的办法是,通过式(4)将速度

表示为距离的形式,代入式(5)先求出距离的大小,如果距离不在作用范围内,则求模使距离在  $0 \sim R_{\text{max}}$  之中,从而完成解模糊,再代入式(4)求得速度。此外,为了避免系数矩阵出现病态, $f_{\text{step}}$  最好取负值;另一方面,在设计  $f_{\text{step}}$  时,它的值应为跳频间隔  $\Delta f$  的一半,这样对混频之后的滤波器设计有利。

对比两种 FSK 波形可知,2-FSK 的实现简单,2-FSK 中每一种频率均具备测速功能,通过相位差实现测距功能。MFSK 的实现也比较简单,其同样具备优良的测速能力,精确度比 2-FSK 更高。

## 3 系统仿真数据处理

为了验证 MFSK 波形的处理能力,设计了仿真实验的场景<sup>[15]</sup>,并通过与 FSK 波形对比来进行说明。假设装配了雷达的汽车行驶在公路上,以 0 时刻的雷达位置为坐标原点,该汽车做匀速直线运动,且以其运动方向为  $x$  轴正向,速度为 18 m/s;路上有行人和汽车等其他目标,选取三个目标,分别标记为 A、B、C。目标 A 在 0 时刻的位置为 (25, 1.5, 0),在  $x$  轴正向以速度  $V_1 = 2$  m/s 做匀速直线运动;目标 B 在 0 时刻的位置为 (45.5, 1.5, 0),以 15 m/s 的速度向  $x$  轴正向运动;目标 C 在惯性坐标系的运动方向,为方便起见也可设为向西( $x$  轴反方向),速度为 22 m/s,加速度  $a_3$  为  $0 \text{ m/s}^2$ ,位于三维坐标中的点 (66, 1.5, 0)。

### 3.1 2-FSK 仿真结果分析

取每频点的发射持续时间  $\tau$  为 0.2 s,两个频点的频差  $\Delta f$  为 750 kHz,采样频率  $f_s$  为 25 kHz,仿真得到回波。

从图 4 中可以看出,两个频点回波的频谱处于同一个位置,且幅度非常接近,由于模拟了三个目标,因此得到了三组谱线,计算分析得谱线包含了三个目标的回波信息,通过处理可以获取目标的速度分别为:  $V_a = 15.869 \text{ 8 m/s}$ ,  $V_b = 2.898 \text{ 4 m/s}$ ,  $V_c = 39.989 \text{ 2 m/s}$ 。

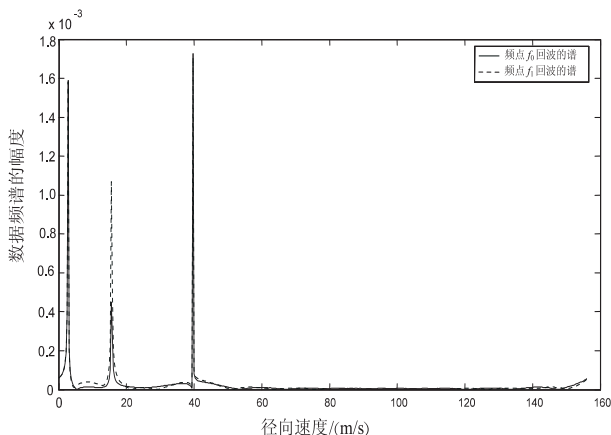


图 4 FSK 波形体制谱处理结果

### 3.2 MFSK 仿真结果分析

取每频点的发射持续时间  $\tau$  为 0.4 s, 两个频点的频点间隔  $\Delta f$  为 500 kHz, 采样频率  $f_s$  为 50 kHz, 仿真得到回波。从图 5 中可以看出, 同样的由于模拟了三个目标, 因此也得到了三组谱线, 通过计算处理可以获取目标的速度为:  $V_a = 16.019\ 1\ \text{m/s}$ ,  $V_b = 3.004\ 9\ \text{m/s}$ ,  $V_c = 40.039\ 6\ \text{m/s}$ 。

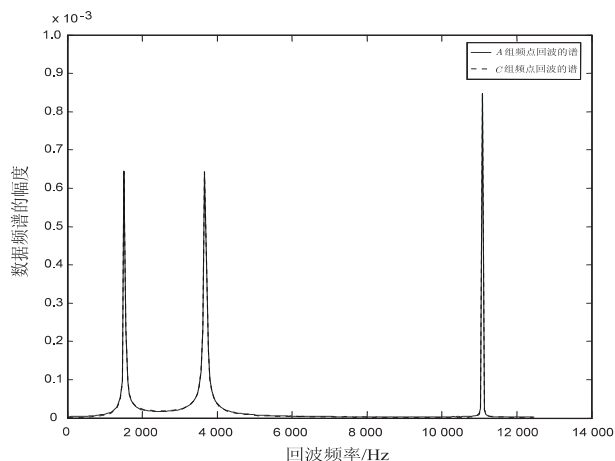


图 5 MFSK 波形体制谱处理结果

通过对比可以发现, 2-FSK 波形的仿真结果达到了预期, 平均误差为 1.41%; MFSK 波形的仿真结果不仅达到预期, 而且更加接近条件预设置, 平均误差为 0.38%。

## 4 结束语

从信号波形设计的角度, 结合各种信号波形的理论, 通过所建立的理论模型提出了 MFSK 波形的设计和约束关系。通过仿真实验发现, 在目前的技术水平下, 汽车防撞雷达采用 FSK, 特别是 MFSK 波形体制得到的数据最为准确, 有效提高了汽车雷达中的测距精确性, 可在系统设计和工程实现中进行应用与发展。

### 参考文献:

[1] 韩 星. 基于毫米波雷达的汽车主动防撞预警目标识别[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[2] 张 忍, 吕光辉, 孙明明. 防撞雷达-汽车防碰撞系统的核心[J]. 轻型汽车技术, 2013(1): 3-6.

[3] 孙 昱, 柳贵东, 付少波. 汽车防撞雷达系统设计[J]. 军事交通学院学报, 2015, 17(5): 90-93.

[4] Castaeda F J. Comparison of complementary sequences in hybrid phase and frequency shift keying CW radar using periodic ambiguity analysis[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2012.

[5] Yin Wanxue, Wang K. A new method to symbol rate estimation of MPSK signals [C]//2008 congress on image and signal processing. Sanya, China: [s. n.], 2008: 394.

[6] 彭智慧, 林 明. 一种新型组合低截获雷达波形研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 46-50.

[7] 邵智超, 王睿东, 张 薇. 基于 matlab 的雷达信号处理仿真系统[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 268-271.

[8] 刘 艳. 2FSK 调制解调的仿真分析[J]. 硅谷, 2014, 7(1): 48-49.

[9] 张建辉, 刘国岁, 顾 红, 等. 编码步进调频连续波信号在汽车防撞雷达中的应用[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 943-946.

[10] 徐 涛, 金昶明, 孙晓玮, 等. 一种采用变周期调频连续波雷达的多目标识别方法[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 861-863.

[11] Rohling H, Meinecke M M, Klotz M, et al. Experiences with an experimental car controlled by a 77GHz radar sensor [C]//Proceedings of 1998 international radar symposium. [s. l.]: [s. n.], 1998: 345-354.

[12] 毕 欣, 杜劲松. 车载 LFM CW 雷达探测系统分析与设计[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(1): 126-131.

[13] 王诏丰, 廖桂生, 杨志伟. 一种步进 MFSK 调制的雷达通信共享信号设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1758-1763.

[14] Li Zhaolong, Chen Rushan, Wu Ke. System design considerations of a generic integrated frequency-modulation continuous-wave radar front-end[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(8): 1907-1912.

[15] 刘 富, 崔熠明, 王博运, 等. 新型基于激光雷达的主动防撞系统[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2016, 34(1): 67-72.