



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105301592 B

(45)授权公告日 2017.09.29

(21)申请号 201510654175.9

(56)对比文件

(22)申请日 2015.10.12

FR 2844361 A1, 2004.03.12,

(65)同一申请的已公布的文献号

US 2007/0152871 A1, 2007.07.05,

申请公布号 CN 105301592 A

EP 2369363 A1, 2011.09.28,

(43)申请公布日 2016.02.03

US 2014/0152490 A1, 2014.06.05,

(73)专利权人 合肥工业大学

EP 2605038 A2, 2013.06.19,

地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路  
193号

CN 103675809 A, 2014.03.26,

(72)发明人 张鉴 童睿 戚昊琛

Y Fan等.“A new method of multi-target  
detection for FMCW automotive radar”.

(74)专利代理机构 合肥金安专利事务所 34114

《International radar conference》.2013, 第  
1-4页。

代理人 胡治中

审查员 梁策

(51)Int.Cl.

G01S 13/93(2006.01)

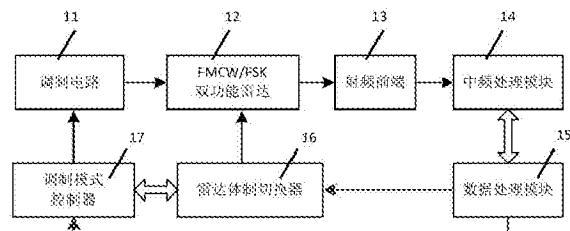
权利要求书3页 说明书10页 附图5页

(54)发明名称

采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法

(57)摘要

本发明公开了一种汽车防撞雷达系统及其多目标识别算法，所述汽车防撞雷达系统包括调制电路、调制模式控制器、FMCW/FSK双功能雷达、雷达体制切换器、射频前端、中频处理模块、数据处理模块；所述多目标识别算法包括6个步骤。有益的技术效果：本发明在不增加计算量和硬件成本的情况下，与单使用调频连续波雷达调制的系统相比，可使多目标检测匹配明确，与单使用频移键控雷达调制的系统相比，可同时测量静止与运动状态的目标参数，使雷达系统可同时有效识别和检测静止与运动状态的单个或多个目标。



1. 采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法,所述汽车防撞雷达系统包括调制电路(11)、调制模式控制器(17)、FMCW/FSK双功能雷达(12)、雷达体制切换器(16)、射频前端(13)、中频处理模块(14)、数据处理模块(15);其中,

调制电路(11)负责产生适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段;其中,适用于FMCW雷达的调制波形为锯齿波、三角波、或锯齿波与三角波的组合波,适用于FSK雷达的调制波形为阶跃波形;产生的调制波形为在一个周期内,FMCW雷达适用波形与FSK雷达适用调制波形各占一定波段的组合波形;

调制模式控制器(17)负责控制调制电路(11);调制模式控制器(17)按接收到的时间指令使调制电路(11)的输出信号在一周期内,既包括一段适用于FMCW雷达的调制波形波段,又包括一段适用于FSK雷达的调制波形波段,换言之,适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段组合为一个周期的重复调制波形;

雷达体制切换器(16)负责与调制模式控制器(17)同步,雷达体制切换器(16)按接收到的时间指令切换FMCW/FSK双功能雷达(12)的工作体制;

FMCW/FSK双功能雷达(12)负责具有FMCW雷达和FSK雷达双功能,产生调制信号;

射频前端(13)负责将FMCW/FSK双功能雷达(12)输出的调制信号通过压控振荡器输出发射信号,与发现目标后获得的回波信号在混频器中混频,输出含干扰的中频信号;

中频处理模块(14)负责将射频前端输出的含干扰的中频信号进行放大滤波处理,输出有效中频信号;

数据处理模块(15)负责按调制模式输出时间指令给调制模式控制器(17)和雷达体制切换器(16);将有效中频信号进行时域频域计算分析,获得所需的目标距离速度信息;将计算信息反馈给中频处理模块(14),控制含干扰的中频信号的放大增益;

调制电路(11)的输入端与调制模式控制器(17)的输出端相连接;

调制电路(11)输出端、雷达体制切换器(16)的输出端分别与FMCW/FSK双功能雷达(12)的输入端相连接;

FMCW/FSK双功能雷达(12)的输出端经射频前端(13)与中频处理模块(14)的输入端相连接;

中频处理模块(14)与数据处理模块(15)连接,并双向通信;

数据处理模块(15)的输出端分别与雷达体制切换器(16)和调制模式控制器(17)的输入端相连接;

调制模式控制器(17)与雷达体制切换器(16)连接,并双向通信;

射频前端(13)包括压控振荡器和混频器;

中频处理模块(14)包括滤波电路、可调增益放大器、峰值检波电路、ADC电路;

数据处理模块(15)包括DAC电路、FIFO电路、由DSP或FPGA为核心的数据处理器电路;

其特征在于:按如下步骤进行:

步骤1:按人工设定的调制模式,通过数据处理模块(15)向调制模式控制器(17)输入设定时间指令;由调制模式控制器(17)控制调制电路(11),按调制模式控制器(17)接收到的时间指令使调制电路(11)的输出信号在一周期内,且该输出信号包括一段适用于FMCW雷达的调制波形波段,和一段适用于FSK雷达的调制波形波段,换言之,适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段组合为一个周期的重复调制波形;

步骤2:按人工设定的调制模式,通过数据处理模块(15)向雷达体制切换器(16)输入设定时间指令,使雷达体制切换器(16)与调制模式控制器(17)同步,按接收到的时间指令切换FMCW/FSK双功能雷达(12)的工作体制;

步骤3:在步骤1中,调制电路(11)产生的调制波形输入步骤2控制后的FMCW/FSK双功能雷达(12)的传感器,得到调制信号;

步骤4:通过射频前端(13)将步骤3所得的调制信号转换成含干扰的中频信号;所述含干扰的中频信号为含所需目标距离速度的信息,但同时含有高频杂波项和受到噪声干扰及幅值微小的中频信号;

步骤5:通过中频处理模块(14)对步骤4所得的中频信号处理,得到有效中频信号;所述有效中频信号为经过滤除高频杂波项、噪声干扰并经过放大后,可以用于计算的中频信号;

步骤6:通过数据处理模块(15)对由步骤5所得有效中频信号分析处理,得到所需的相对静止和/或相对运动状态的目标的距离速度信息;通过数据处理模块(15)对步骤4所得含干扰的中频信号进行放大参数的计算,并将此参数反馈到中频处理模块(14)。

2.根据权利要求1所述采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法,其特征在于:

在步骤1中,人工设定的调制模式为同时具有FMCW雷达和FSK雷达的调制特点;其中,适用于FMCW雷达的调制波形为锯齿波、三角波、或锯齿波与三角波的组合波,适用于FSK雷达的调制波形为阶跃波形;

在步骤3中,含有一段适用于FMCW雷达调制波形的波段和一段适用于FSK雷达调制波形的波段的调制信号的公式为:

$$f(t) = \begin{cases} f_0 - \frac{\Delta f}{2} + at, & nT \leq t \leq \frac{T}{2} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 + \frac{\Delta f}{2}, & \frac{T}{2} + nT \leq t \leq \frac{3T}{4} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 - \frac{\Delta f}{2}, & \frac{3T}{4} + nT \leq t \leq (n+1)T, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (\text{式 } 1)$$

其中,  $f_0$  为信号的中心频率,  $\Delta f$  为雷达的带宽,  $T$  为调制信号周期,  $a = 2\Delta f/T$  为适用于 FMCW 雷达调制波形的波段频率变化的斜率;

步骤4中,经射频前端(13)中压控振荡器输出的发射信号为:

$$S_1(t) = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^t f(t) dt \right] + n_r(t) \quad (\text{式 } 2)$$

上述发射信号遇目标后获得的回波信号为:

$$S_2(t) = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^{t-t_d} f(t') dt' \right] + n_r(t) \quad (\text{式 } 3)$$

其中  $A_r$  是信号从振荡器发射经过天线传播后受到影响的幅值,  $n_r(t)$  为噪声信号。

3.根据权利要求1所述采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法,其特征在于:

在步骤6中,分析处理有效中频信号可得到相对静止和相对运动状态的单个或多个目标的距离速度信息,具体过程如下:

(a) 当单个或多个目标与雷达相对静止时,雷达系统通过调制信号中适用于FMCW雷达调制波形波段得到的中频信号,通过中频处理及快速傅里叶变换计算后,得到该波段的中频信号频谱图各峰值  $f_{mi}$ , 其中  $i=1, 2, \dots$  为发现目标的数量;从而得到单个或多个静止目

标的距离  $R_i = \frac{cTf_{mi}}{2\Delta f}$ ,  $i=1,2,\dots$ ; 其中  $\Delta f$  为雷达的带宽,  $T$  为调制信号周期,  $c$  为光速;

(b) 当单个目标与雷达发生相对运动时, 通过调制信号任一波段中获得的多普勒频移, 得到目标相对速度  $v = f_d \lambda / 2$ , 其中  $f_d$  为多普勒频移,  $\lambda$  为雷达波长;

(c) 当多个目标与雷达发生相对运动时候, 雷达系统通过调制信号中适用于FSK雷达调制波形波段出现的多普勒频移, 可识别各个运动目标, 通过滤波、快速傅里叶变换计算及调制解调后可得到各目标的距离  $R_i = \left| \frac{c\Delta\phi_i}{4\pi B} \right|$ , 其中  $i=1,2,\dots$ ;  $\Delta\phi_i$  为各目标信号的相位差,  $B$  为雷达带宽。

4. 根据权利要求1所述采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法, 其特征在于:

在步骤6中, 放大参数反馈过程为: 含干扰的中频信号经中频处理模块(14)中的可调增益放大器进行预放大, 输入峰值检波电路检测信号幅值, 输入ADC电路进行模数转换后得到数字量的信号幅值, 输入数据处理模块(15)中进行放大参数的计算, 通过数据处理模块(15)中的DAC电路进行数模转换成模拟量的控制信号, 反馈给中频处理模块(14)中的可调增益放大器完成含干扰的中频信号的放大处理。

5. 根据权利要求1所述采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法, 其特征在于: 汽车防撞雷达系统检测目标的测距范围为0-150m, 测速范围为0-220km/h, 误差允许范围为±10%; FMCW/FSK双功能雷达(12)的中心频率为10-90GHz, 波长为3-30mm, 载波带宽为5-200MHz, 调谐灵敏度为100-400MHz/V; 调制信号的调制周期为4-400us。

## 采用汽车防撞雷达系统的多目标识别算法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及汽车防撞雷达技术领域，尤其涉及一种汽车防撞雷达系统及采用其的多目标识别算法。

### 背景技术

[0002] 国内外现有的汽车雷达测量系统中，常采用调频连续波(FMCW)雷达作为前端检测传感器。FMCW雷达具有高灵敏度和高距离分辨率的优点，但存在容易产生差频匹配模糊、难以同时检测多个目标的缺点。

[0003] 现常用的软件解决方式是：在接收端通过计算方法对获得的中频信号进行频谱匹配处理。或是在发射端通过设定有规律变周期或随机变周期的调制模式，再通过后期计算消除多目标识别产生的虚目标。但这些针对FMCW雷达进行改进的方法因频谱匹配难、调制信号周期过长或过于复杂等原因，都会使得运算量剧增，使得运算周期过长，影响系统运转速度，还会使检测精度出现下降。需高性能硬件才能实现，从而增加硬件成本。

[0004] 现常用的硬件解决办法是：采用同一探测范围内多部同体制或异体制雷达同时使用的方式，这种方式势必会使硬件成本大幅增加，且会产生干扰问题。

[0005] 频移键控(FSK)雷达虽可同时测量多个运动目标，但当多目标间相对静止时则不能检测，且其检测精度不高，单独使用时需依赖后期信号处理。

[0006] 近年来随着雷达技术的发展，虽不少雷达同时具有FSK和FMCW两种调制模式，但同一时间内只可使用一种调制模式。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的是为了解决现有技术中存在的缺点，而提出的一种汽车防撞雷达系统及采用其的多目标识别算法，此雷达结构和算法不仅可以检测单目标的距离速度，也可识别和检测多目标的距离速度。

[0008] 本发明采用的技术方案是：

[0009] 一种汽车防撞雷达系统，包括调制电路11、调制模式控制器17、调频连续波FMCW/频移键控FSK双功能雷达12、雷达体制切换器16、射频前端13、中频处理模块14、数据处理模块15。其中，

[0010] 调制电路11负责产生适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段。

[0011] 调制模式控制器17负责控制调制电路11。调制模式控制器17按接收到的时间指令使调制电路11的输出信号在一周期内，既包括一段适用于FMCW雷达的调制波形波段，又包括一段适用于FSK雷达的调制波形波段，换言之，适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段组合为一个周期的重复调制波形。

[0012] 雷达体制切换器16负责与调制模式控制器17同步，雷达体制切换器16按接收到的时间指令切换FMCW/FSK双功能雷达12的工作体制。

- [0013] FMCW/FSK双功能雷达12负责具有FMCW雷达和FSK雷达双功能,产生调制信号。
- [0014] 射频前端13负责将FMCW/FSK双功能雷达12输出的调制信号通过压控振荡器输出发射信号,与发现目标后获得的回波信号在混频器中混频,输出含干扰的中频信号。
- [0015] 中频处理模块14负责将射频前端输出的含干扰的中频信号进行放大滤波等处理,输出有效中频信号。
- [0016] 数据处理模块15负责按调制模式输出时间指令给调制模式控制器17和雷达体制切换器16。将有效中频信号进行时域频域等计算分析,获得所需的目标距离速度信息。将计算信息反馈给中频处理模块14,控制含干扰的中频信号的放大增益。
- [0017] 调制电路11的输入端与调制模式控制器17的输出端相连接。
- [0018] 调制电路11输出端、雷达体制切换器16的输出端分别与FMCW/FSK双功能雷达12的输入端相连接。
- [0019] FMCW/FSK双功能雷达12的输出端经射频前端13与中频处理模块14的输入端相连接。
- [0020] 中频处理模块14与数据处理模块15连接,并双向通信。
- [0021] 数据处理模块15的输出端分别与雷达体制切换器16和调制模式控制器17的输入端相连接。调制模式控制器17与雷达体制切换器16连接,并双向通信。
- [0022] 采用本发明所述汽车防撞雷达系统的多目标识别算法,按如下步骤进行:
- [0023] 步骤1:按人工设定的调制模式,通过数据处理模块15向调制模式控制器17输入设定时间指令。由调制模式控制器17控制调制电路11,按调制模式控制器17接收到的时间指令使调制电路11的输出信号在一周期内,且该输出信号包括一段适用于FMCW雷达的调制波形波段,和一段适用于FSK雷达的调制波形波段,换言之,适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段组合为一个周期的重复调制波形。
- [0024] 步骤2:按人工设定的调制模式,通过数据处理模块15向雷达体制切换器16输入设定时间指令,使雷达体制切换器16与调制模式控制器17同步,按接收到的时间指令切换
- [0025] FMCW/FSK双功能雷达12的工作体制。
- [0026] 步骤3:在步骤1中,调制电路11产生的调制波形输入步骤2控制后的FMCW/FSK双功能雷达12的传感器,得到调制信号。
- [0027] 步骤4:通过射频前端13将步骤3所得的调制信号转换成含干扰的中频信号。所述含干扰的中频信号为含所需目标距离速度等信息的,但同时含有高频杂波项和受到噪声干扰及幅值微小的中频信号。
- [0028] 步骤5:通过中频处理模块14对步骤4所得的中频信号处理,得到有效中频信号。所述有效中频信号为经过滤除高频杂波项、噪声干扰并经过放大后,可以用于计算的中频信号。
- [0029] 步骤6:通过数据处理模块15对由步骤5所得有效中频信号分析处理,得到所需的相对静止和/或相对运动状态的单个或多个目标的距离速度信息。通过数据处理模块15对步骤4所得含干扰的中频信号进行放大参数的计算,并将此参数反馈到中频信号处理模块14。
- [0030] 优选的,在本发明所述的一种汽车防撞雷达系统中:
- [0031] 射频前端13包括压控振荡器和混频器。

[0032] 中频处理模块14包括滤波电路、可调增益放大器、峰值检波电路、ADC电路。

[0033] 数据处理模块15包括DAC电路、FIFO电路、由DSP或FPGA为核心的数据处理器电路。优选的，采用本发明所述汽车防撞雷达系统的多目标识别算法中的调制信号，在步骤1中，人工设定的调制模式为同时具有FMCW雷达和FSK雷达的调制特点。其中，适用于FMCW雷达的调制波形为锯齿波、三角波、或锯齿波与三角波的组合波，适用于FSK雷达的调制波形为阶跃波形。

[0034] 在步骤3中，含有一段适用于FMCW雷达调制波形的波段和一段适用于FSK雷达调制波形的波段的调制信号的公式为：

$$[0035] f(t) = \begin{cases} f_0 - \frac{\Delta f}{2} + at, & nT \leq t \leq \frac{T}{2} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 + \frac{\Delta f}{2}, & \frac{T}{2} + nT \leq t \leq \frac{3T}{4} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 - \frac{\Delta f}{2}, & \frac{3T}{4} + nT \leq t \leq (n+1)T, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad \text{式 1}$$

[0036] 其中， $f_0$ 为信号的中心频率， $\Delta f$ 为雷达的带宽， $T$ 为调制信号周期， $a = 2 \Delta f / T$ 为适用于FMCW雷达调制波形的波段频率变化的斜率。

[0037] 步骤4中，经射频前端13中压控振荡器输出的发射信号为：

$$[0038] S_1(t) = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^t f(t) dt \right] + n_r(t) \quad \text{式 2}$$

[0039] 上述发射信号遇目标后获得的回波信号为：

$$[0040] S_2(t) = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^{t-t_d} f(t') dt' \right] + n_r(t) \quad \text{式 3}$$

[0041] 其中 $A_r$ 是信号从振荡器发射经过天线传播后受到影响的幅值， $n_r(t)$ 为噪声信号。

[0042] 优选的，在采用本发明所述汽车防撞雷达系统的多目标识别算法中，在步骤6中，分析处理有效中频信号可得到相对静止和相对运动状态的单个或多个目标的距离速度信息，具体过程如下：

[0043] (a) 当单个或多个目标与雷达相对静止时，雷达系统通过调制信号中适用于FMCW雷达调制波形波段得到的中频信号，通过中频处理及快速傅里叶变换计算后，得到该波段的中频信号频谱图各峰值 $f_{mi}$ ，其中 $i = 1, 2, \dots$ 为发现目标的数量。从而得到单个或多个静止目标的距离

$$[0044] R_i = \frac{cTf_{mi}}{2\Delta f}, i = 1, 2, \dots \quad \text{其中 } \Delta f \text{ 为雷达的带宽, } T \text{ 为调制信号周期, } c \text{ 为光速。}$$

[0045] b当单个目标与雷达发生相对运动时，通过调制信号任一波段中获得的多普勒频移，得到目标相对速度 $v = f_d \lambda / 2$ ，其中 $f_d$ 为多普勒频移， $\lambda$ 为雷达波长。

[0046] c当多个目标与雷达发生相对运动时候，雷达系统通过调制信号中适用于FSK雷达调制波形波段出现的多普勒频移，可识别各个运动目标，通过滤波、快速傅里叶变换计算及

调制解调后可得到各目标的距离 $R_i = \frac{|c\Delta\phi_i|}{4\pi B}$ ，其中 $i = 1, 2, \dots$   $\Delta\phi_i$ 为各目标信号的相位差， $B$ 为雷达带宽。

[0047] 优选的，在本发明所述一种汽车防撞雷达系统及其采用的多目标识别算法中，在步骤6中，放大参数反馈过程为：含干扰的中频信号经中频信号处理模块14中的可调增益放大器进行预放大，输入峰值检波电路检测信号幅值，输入ADC电路进行模数转换后得到数字量的信号幅值，输入数据处理模块15中进行放大参数的计算，通过数据处理模块15中的DAC电路进行数模转换成模拟量的控制信号，反馈给中频信号处理模块14中的可调增益放大器完成含干扰的中频信号的放大处理。

[0048] 优选的，本发明所述汽车防撞雷达系统检测目标的测距范围为0-150m，测速范围为0-220km/h，误差允许范围为±10%；FMCW/FSK双功能雷达12的中心频率为10-90GHz，波长为3-30mm，载波带宽为5-200MHz，调谐灵敏度为100-400MHz/V。调制信号的调制周期为4-400us。

#### [0049] 有益效果

[0050] 本发明针对同时有效识别和检测静止与/或运动状态的单个或多个目标的需求，在不增加硬件成本与计算量的基础上，结合FMCW雷达和FSK雷达各自的优点，提出了一种汽车防撞雷达系统及采用其的多目标识别算法，可满足检测静止与运动状态的单个或多个目标的精度与效率要求。

[0051] 本发明针对目前汽车防撞系统中常用的FMCW雷达在同时有效识别和检测静止与运动状态的多目标方面的不足，基于FSK雷达的联合作用，提出一种雷达系统结构及其算法。该算法采用在一个调制周期内，由一段适用于FMCW雷达调制的波形波段和另一段适用于FSK雷达调制的波形波段组合的调制方式，利用调制信号频率的周期性变化特征分别对静止状态和/或运动状态的单目标或多目标实现有效的距离和速度检测，且不增加硬件成本与计算量。本发明结合FMCW雷达和FSK雷达的调制特点，当目标出现时，雷达系统通过调制信号的前半周期和后半周期可以有效识别相对静止和/或相对运动状态的单个或多个目标，进行相应的滤波处理和数据处理后，可得到所需的距离速度信息。同时，本发明在不增加计算量和硬件成本的情况下，与单使用调频连续波雷达调制的系统相比，可使多目标检测匹配明确，与单使用频移键控雷达调制的系统相比，可同时测量静止与运动状态的目标参数，使雷达系统可同时有效识别和检测静止与运动状态的单个或多个目标。

[0052] 本发明利用Matlab对所提出的算法进行了仿真与验证，表明该算法不仅能准确捕捉所探测目标，并且在测量中有着较高的精度，适用于汽车防撞雷达在行驶中的测量。

#### 附图说明

[0053] 图1为本发明结构的原理框图。

[0054] 图2为本发明的雷达调制信号图。

[0055] 图3为本发明雷达系统发现静止状态下距离30m和90m二目标后得到的仿真频谱图。由图3可见，在9.766KHz和29.88KHz处傅里叶变换出现峰值，可以求得此时的距离为29.298m和89.64m，与实际距离的误差分别为2.3%和4.4%，均在误差允许范围内。

[0056] 图4为本发明雷达系统发现运动状态下，距离10m、速度18.5m/s和距离100m、速度36m/s二目标后得到的未解调仿真频谱图。

[0057] 图5为将图4中运动状态下10m、速度18.5m/s的目标解调后得到的信号波形图。

[0058] 图6为将图4中运动状态下100m、速度36m/s的目标解调后得到的信号波形图。

[0059] 图7为本发明放大参数反馈流程图。

## 具体实施方式

[0060] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0061] 参见图1,一种汽车防撞雷达系统,包括调制电路11、调制模式控制器17、调频连续波FMCW/频移键控FSK双功能雷达12、雷达体制切换器16、射频前端13、中频处理模块14、数据处理模块15。其中,

[0062] 调制电路11负责产生适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段。

[0063] 调制模式控制器17负责控制调制电路11。调制模式控制器17按接收到的时间指令使调制电路11的输出信号在一周期内,既包括一段适用于FMCW雷达的调制波形波段,又包括一段适用于FSK雷达的调制波形波段,换言之,适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段组合为一个周期的重复调制波形。

[0064] 雷达体制切换器16负责与调制模式控制器17同步,雷达体制切换器16按接收到的时间指令切换FMCW/FSK双功能雷达12的工作体制。

[0065] FMCW/FSK双功能雷达12负责具有FMCW雷达和FSK雷达双功能,产生调制信号。

[0066] 射频前端13负责将FMCW/FSK双功能雷达12输出的调制信号通过压控振荡器输出发射信号,与发现目标后获得的回波信号在混频器中混频,输出含干扰的中频信号。

[0067] 中频处理模块14负责将射频前端输出的含干扰的中频信号进行放大滤波等处理,输出有效中频信号。

[0068] 数据处理模块15负责按调制模式输出时间指令给调制模式控制器17和雷达体制切换器16。将有效中频信号进行时域频域等计算分析,获得所需的目标距离速度信息。将计算信息反馈给中频处理模块14,控制含干扰的中频信号的放大增益。

[0069] 调制电路11的输入端与调制模式控制器17的输出端相连接。

[0070] 调制电路11输出端、雷达体制切换器16的输出端分别与FMCW/FSK双功能雷达12的输入端相连接。

[0071] FMCW/FSK双功能雷达12的输出端经射频前端13与中频处理模块14的输入端相连接。

[0072] 中频处理模块14与数据处理模块15连接,并双向通信。

[0073] 数据处理模块15的输出端分别与雷达体制切换器16和调制模式控制器17的输入端相连接。调制模式控制器17与雷达体制切换器16连接,并双向通信。

[0074] 进一步说,射频前端13包括压控振荡器和混频器。

[0075] 中频处理模块14包括滤波电路、可调增益放大器、峰值检波电路、ADC电路。

[0076] 数据处理模块15包括DAC电路、FIFO电路、由DSP或FPGA为核心的数据处理器电路。采用本发明所述汽车防撞雷达系统的多目标识别算法,按如下步骤进行:

[0077] 步骤1:按人工设定的调制模式,通过数据处理模块15向调制模式控制器17输入设

定时间指令。由调制模式控制器17控制调制电路11,按调制模式控制器17接收到的时间指令使调制电路11的输出信号在一周期内,且该输出信号包括一段适用于FMCW雷达的调制波形波段,和一段适用于FSK雷达的调制波形波段,换言之,适用于FMCW雷达的调制波形波段和适用于FSK雷达的调制波形波段组合为一个周期的重复调制波形。

[0078] 步骤2:按人工设定的调制模式,通过数据处理模块15向雷达体制切换器16输入设定时间指令,使雷达体制切换器16与调制模式控制器17同步,按接收到的时间指令切换

[0079] FMCW/FSK双功能雷达12的工作体制。

[0080] 步骤3:在步骤1中,调制电路11产生的调制波形输入步骤2控制后的FMCW/FSK双功能雷达12的传感器,得到调制信号。

[0081] 步骤4:通过射频前端13将步骤3所得的调制信号转换成含干扰的中频信号。所述含干扰的中频信号为含所需目标距离速度等信息的,但同时含有高频杂波项和受到噪声干扰及幅值微小的中频信号。

[0082] 步骤5:通过中频处理模块14对步骤4所得的中频信号处理,得到有效中频信号。所述有效中频信号为经过滤除高频杂波项、噪声干扰并经过放大后,可以用于计算的中频信号。

[0083] 步骤6:通过数据处理模块15对由步骤5所得有效中频信号分析处理,得到所需的相对静止和相对运动状态的单个或多个目标的距离速度信息。通过数据处理模块15对步骤4所得含干扰的中频信号的放大参数进行计算,并将此参数反馈到中频信号处理模块14。

[0084] 进一步说,在步骤1中,人工设定的调制模式为同时具有FMCW雷达和FSK雷达的调制特点。其中,适用于FMCW雷达的调制波形为锯齿波、三角波、或锯齿波与三角波的组合波,适用于FSK雷达的调制波形为阶跃波形。

[0085] 在步骤3中,含有一段适用于FMCW雷达调制波形的波段和一段适用于FSK雷达调制波形的波段的调制信号的公式为:

$$[0086] f(t) = \begin{cases} f_0 - \frac{\Delta f}{2} + at, & nT \leq t \leq \frac{T}{2} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 + \frac{\Delta f}{2}, & \frac{T}{2} + nT \leq t \leq \frac{3T}{4} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 - \frac{\Delta f}{2}, & \frac{3T}{4} + nT \leq t \leq (n+1)T, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad \text{式 1}$$

[0087] 其中,  $f_0$  为信号的中心频率,  $\Delta f$  为雷达的带宽,  $T$  为调制信号周期,  $a = 2 \Delta f / T$  为适用于FMCW雷达调制波形的波段频率变化的斜率。

[0088] 步骤4中,经射频前端13中压控振荡器输出的发射信号为:

$$[0089] S_1(t) = A_t \cos \left[ 2\pi \int_0^t f(t) dt \right] + n_r(t) \quad \text{式 2}$$

[0090] 上述发射信号遇目标后获得的回波信号为:

$$[0091] S_2(t) = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^{t-t_d} f(t') dt' \right] + n_r(t) \quad \text{式 3}$$

[0092] 其中  $A_r$  是信号从振荡器发射经过天线传播后受到影响的幅值,  $n_r(t)$  为噪声信号。

[0093] 进一步说,在步骤6中,分析处理有效中频信号可得到相对静止和相对运动状态的单个或多个目标的距离速度信息,具体过程如下:

[0094] (a) 当单个或多个目标与雷达相对静止时,雷达系统通过调制信号中适用于FMCW雷达调制波形波段得到的中频信号,通过中频处理及快速傅里叶变换计算后,得到该波段的中频信号频谱图各峰值 $f_{mi}$ ,其中*i*=1,2.....为发现目标的数量。从而得到单个或多个静止目标的距离

[0095]  $R_i = \frac{cTf_{mi}}{2\Delta f}$ ,*i*=1,2.....其中 $\Delta f$ 为雷达的带宽,T为调制信号周期,c为光速。

[0096] b当单个目标与雷达发生相对运动时,通过调制信号任一波段中获得的多普勒频移,得到目标相对速度 $v=f_d\lambda/2$ ,其中 $f_d$ 为多普勒频移, $\lambda$ 为雷达波长。

[0097] c当多个目标与雷达发生相对运动时候,雷达系统通过调制信号中适用于FSK雷达调制波形波段出现的多普勒频移,可识别各个运动目标,通过滤波、快速傅里叶变换计算及调制解调后可得到各目标的距离 $R_i = \left| \frac{c\Delta\phi_i}{4\pi B} \right|$ ,其中*i*=1,2..... $\Delta\phi_i$ 为各目标信号的相位差,B为雷达带宽。

[0098] 由图4可见,多普勒频移分别为3.047KHz和5.977KHz,计算可得目标速度分别为18.1m/s、35.7m/s,相对误差分别为4%和3%,均在误差允许范围内。

[0099] 由图5中相位差可计算得距离为9.62m,误差为3.8%,在误差允许范围内。

[0100] 由图6中相位差可计算得距离为91.4m,误差为9.6%,在误差允许范围内。

[0101] 参见图7,进一步说,在步骤6中,放大参数反馈过程为:含干扰的中频信号经中频信号处理模块14中的可调增益放大器进行预放大,输入峰值检波电路检测信号幅值,输入ADC电路进行模数转换后得到数字量的信号幅值,输入数据处理模块15中进行放大参数的计算,通过数据处理模块15中的DAC电路进行数模转换成模拟量的控制信号,反馈给中频信号处理模块14中的可调增益放大器完成含干扰的中频信号的放大处理。

[0102] 进一步说,汽车防撞雷达系统检测目标的测距范围为0-150m,测速范围为0-220km/h,误差允许范围为±10%。FMCW/FSK双功能雷达12的中心频率为10-90GHz,波长为3-30mm,载波带宽为5-200MHz,调谐灵敏度为100-400MHz/V。调制信号的调制周期为4-400us。

[0103] 现结合本发明的硬件、方法特点进一步阐述如下:图1是本发明采用的雷达结构,包括调制电路11、调制模式控制器17、调频连续波/频移键控双功能雷达12、雷达体制切换器16、射频前端13、中频处理模块14和数据处理模块15。

[0104] 调制模块控制器17控制调制电路11,按调制模式设定的时间规律使调制电路11输出调制波形。雷达体制切换器16与调制模块控制器17同步,按调制模式设定的时间规律切换调频连续波/频移键控双功能雷达12的工作体制。调制电路11输出的调制波形输入被控的调频连续波/频移键控双功能雷达传感器12,使其输出调制信号。调制信号经射频前端13输出的发射信号与发现目标后获得的回波信号进行混频,得到含干扰的中频信号。经中频信号处理模块14处理后得到有效中频信号。有效中频信号经数据处理模块15分析处理后,得到所需的相对静止和相对运动状态的单个或多个目标的距离速度信息,同时输出反馈信号给中频信号处理模块14,以保证计算精确度。

[0105] 图2为本发明调制信号频率的变化周期,呈图示线性关系。其在一调制周期内,结合一段适用于FMCW雷达调制波形的波段和另一段适用于FSK雷达调制波形的波段,具有二

者调制特点。调制信号的公式为：

$$[0106] \quad f(t) = \begin{cases} f_0 - \frac{\Delta f}{2} + at, & nT \leq t \leq \frac{T}{2} + nT, n = 0, 1, 2, \dots, \\ f_0 + \frac{\Delta f}{2}, & \frac{T}{2} + nT \leq t \leq \frac{3T}{4} + nT, n = 0, 1, 2, \dots \\ f_0 - \frac{\Delta f}{2}, & \frac{3T}{4} + nT \leq t \leq (n+1)T, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (\text{式 1})$$

[0107] 其中,  $f_0$  为信号的中心频率,  $\Delta f$  为雷达的带宽,  $a = 2\Delta f/T$  为前半周期锯齿波波段频率变化的斜率

[0108] 上述调制信号通过汽车防撞雷达射频前端的压控振荡器输出的发射信号可以表示为：

$$[0109] \quad S_1(t) = A_t \cos \left[ 2\pi \int_0^t f(t) dt \right] + n_r(t) \quad (\text{式 2})$$

[0110] 发现目标后的回波信号可以表示为：

$$[0111] \quad S_2(t) = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^{t-t_d} f(t') dt' \right] + n_r(t) \quad (\text{式 3})$$

[0112] 其中  $A_r$  是信号从振荡器发射经过天线传播后受到影响的幅值,  $n_r(t)$  为噪声信号。

[0113] 对于相对静止的单个或多个目标, 调制波形的后半周期阶跃波波段内未发生多普勒频移, 但雷达系统可利用前半周期锯齿波波段中获得的中频信号来获得目标信息。其发射信号  $S_{11}$  可表示为：

$$[0114] \quad S_{11} = A_t \cos \left[ 2\pi \int_0^t \left( f_0 - \frac{\Delta f}{2} + \frac{2\Delta f}{T} t \right) dt \right] + n_r(t) \quad (\text{式 4})$$

[0115] 回波信号  $S_{21}$  为：

$$[0116] \quad S_{21} = A_r \cos \left[ 2\pi \int_0^{t-t_d} \left( f_0 - \frac{\Delta f}{2} + \frac{2\Delta f}{T} t' \right) dt' \right] + n_r(t) \quad (\text{式 5})$$

[0117] 混频后经过滤波得到的中频信号  $S_1'$  为：

$$[0118] \quad S_1' = A_t A_r \cos \left[ 2\pi \times \frac{2\Delta f t_d}{T} + f_0 t_d - \frac{\Delta f}{2} t_d - \frac{\Delta f}{T} t_d^2 \right] \quad (\text{式 6})$$

[0119] 令  $f_0 t_d - \Delta f t_d / 2 - \Delta f t_d^2 / T = \phi_1$ ,  $A_t A_r = A_m$ , 则中频信号  $S_1'$  可表示为：

$$[0120] \quad S_1' = A_m \cos \left[ 2\pi \times \frac{2\Delta f t_d}{T} t + \phi_1 \right] \quad (\text{式 7})$$

[0121] 由公式6可知, 包含目标距离信息的  $t_d$  就在表达式内。对中频信号进行快速傅里叶变换FFT计算, 就可以得出信号的频率信息, 在某  $f_m = \Delta f t_d / T$  处取得最大值, 各目标获得的峰值为  $f_{mi}$ , 其中  $i = 1, 2, \dots$ , 为发现目标的数量, 此时各目标的距离可表示为：

$$[0122] \quad R_i = \frac{c T f_{mi}}{2 \Delta f} \quad (\text{式 8})$$

[0123]  $\Delta f$  为雷达的带宽,  $T$  为调制信号周期,  $c$  为光速。

[0124] 因此, 目标的距离信息可以从此波段的中频信号频谱图的峰值处得到。

[0125] 当单个目标与雷达发生相对运动时, 通过调制信号任一波段中获得的多普勒频移

相同,可求得目标相对速度 $v=f_d\lambda/2$ ,其中 $f_d$ 为多普勒频移, $\lambda$ 为雷达波长。

[0126] 当目标与雷达有相对运动时,虽然通过前半周期也可捕捉到目标信息,但当多个目标出现时会出现虚假目标,此时通过后半周期阶跃波波段可以捕捉到明显的目标信息。

[0127] 此时雷达的发射信号可以表示为:

$$[0128] S_{12}(t) = \begin{cases} A_0 \cos(2\pi f_2 t) + n_r(t), & T/2 \\ +nT \leq t \leq 3T/4 + nT \\ A_0 \cos(2\pi f_1 t) + n_r(t), & 3T/4 \\ +nT \leq t \leq (n+1)T \end{cases} \quad (\text{式 9})$$

[0129] 其中 $f_2=f_0+B/2$ , $f_1=f_0-B/2$ , $n=0,1,2,\dots$

[0130] 当检测到前方目标时,回波信号为:

$$[0131] S_{22}(t) = \begin{cases} A_r \cos[2\pi(f_2 + f_{d2})(t - t_d)] + n_r(t), & nT \\ +T/2 \leq t \leq nT + 3T/4 \\ A_r \cos[2\pi(f_1 + f_{d1})(t - t_d)] + n_r(t), & nT \\ +3T/4 \leq t \leq (n+1)T \end{cases} \quad (\text{式 10})$$

[0132] 其中 $n=0,1,2,\dots$ , $f_{d1}, f_{d2}$ 为同一目标不同波段下的多普勒频移

[0133] 混频后的信号:

$$[0134] S_{12} \times S_{22} = \begin{cases} [A_0 \cos(2\pi f_2 t) + n_r(t)] \times A_r \times \\ \{\cos[2\pi(f_2 + f_{d2})(t - t_d)] + n_r(t)\} \\ [A_0 \cos(2\pi f_1 t) + n_r(t)] \times A_r \times \\ \{\cos[2\pi(f_1 + f_{d1})(t - t_d)] + n_r(t)\} \end{cases} \quad (\text{式 11})$$

[0135] 混频后的波形经过带通滤波后去除高频和直流项,以及噪声信号得到的中频信号为:

$$[0136] S'_{12} = \begin{cases} A_m \cos(2\pi f_{d2} t + \varphi_{b2}) \\ A_m \cos(2\pi f_{d1} t + \varphi_{b1}) \end{cases} \quad (\text{式 12})$$

[0137] 其中 $n=0,1,2,\dots$ , $\varphi_{b1}, \varphi_{b2}$ 两段中频信号的相位。

[0138] 因为 $f_d = \frac{2v}{\lambda}$ ,可得

$$[0139] f_{d1} = \frac{2v}{\lambda_1} = \frac{2f_1}{c} v = \frac{2(f_0 - \Delta f/2)}{c} v \quad (\text{式 13})$$

$$[0140] f_{d2} = \frac{2v}{\lambda_2} = \frac{2f_2}{c} v = \frac{2(f_0 + \Delta f/2)}{c} v \quad (\text{式 14})$$

[0141] 由上面的公式可知,目标的速度信息 $v$ 可通过多普勒频移 $f_{d1}, f_{d2}$ 来获得。其中 $\lambda_1, \lambda_2$ 为波长,可通过雷达调谐信号的频率 $f_1, f_2$ 计算获得。毫米波汽车防撞雷达常用的调谐信号频率在10GHz~90GHz之间,本发明的雷达调频带宽 $\Delta f$ 为兆赫兹级别,因此,对应于一个目标所获得的中频信号,分解出来的信号具有相同的多普勒频移。

[0142] 当前方有多个不同运动物体时,速度不同的物体则具有不同的多普勒频移,可通过分析不同信号的频谱将不同速度的多个目标识别开来。

[0143] 由(12)式 $S'_{12}$ 可知,中频信号又可以解调成相位不同、频率几乎相同的两个信号,

由此可以通过分析这两个信号的相位差和频率差来得到目标的距离信息,如(15)式所示。

$$\begin{aligned} |\Delta\phi| &= |\phi_2 - \phi_1| = \left| \frac{4\pi R(f_2 - f_1)}{c} \right| \\ [0144] \quad \Rightarrow R &= \left| \frac{c\Delta\phi}{4\pi B} \right| \end{aligned} \quad (\text{式 15})$$

$\Delta\phi \in (0, 2\pi)$

[0145] 多个目标的距离  $R_i = \left| \frac{c\Delta\phi_i}{4\pi B} \right|$ , 其中  $i = 1, 2, \dots$ .  $\Delta\phi_i$  为各目标信号的相位差,B为雷达带宽。

[0146] 至此,可完成运动状态下的多目标的识别和测算。

[0147] 为了证明本发明的算法可行性,进行了matlab仿真实验,实验是对相对静止和相对运动的多目标进行的测量。

[0148] 将选定的各相关参数:调制周期设为400us,载波带宽  $\Delta f$  设为10MB,中心频率设为24GHz,基本波长设为12mm左右。调谐灵敏度设为  $K_v = 200\text{MHz/V}$ ,代入matlab整体仿真的程序中,对发射信号、回波信号及分别对不同运动状态和不同距离下的目标所得的中频信号进行模拟仿真,可获得最终的仿真结果。

[0149] 先对静止状态的多目标进行检测,目标被测距离分别为30m和90m,此时从前半周期得到的中频信号的频谱如图3所示,可见在9.766KHz和29.88KHz处傅里叶变换出现峰值,由公式8,可以求得此时的测得的距离为29.298m和89.64m,误差分别为2.3%和4.4%,均在误差允许范围内。

[0150] 当目标与雷达发生相对运动时,由后半周期进行分析,其中一个目标被测距离10m、被测速度18.5m/s,另一个目标被测距离100m、被测速度36m/s时,未解调的中频信号的频谱如图4所示。可知多普勒频移分别为3.047KHz和5.977KHz,可计算出目标速度分别为18.1m/s,35.7m/s,相对误差分别为4%和3%。解调后的两个信号和其相位差如图5、图6所示,可计算得出两个距离分别为9.62m和91.4m,误差分别为3.8%和9.6%,均在误差允许范围内。

[0151] 仿真结果表明,本文提出的这种多目标识别算法,其性能达到既定的设计目标,可同时准确识别和检测单个或多个目标的速度与距离信息。

[0152] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

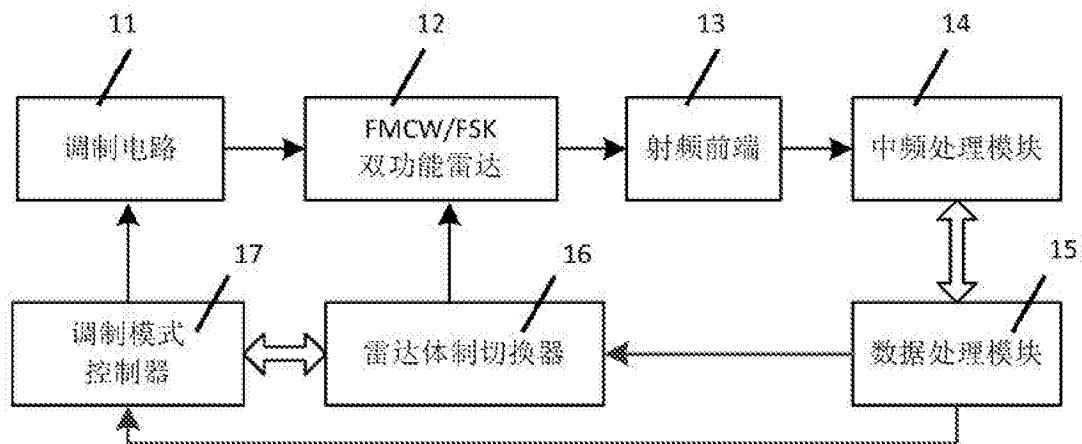


图1

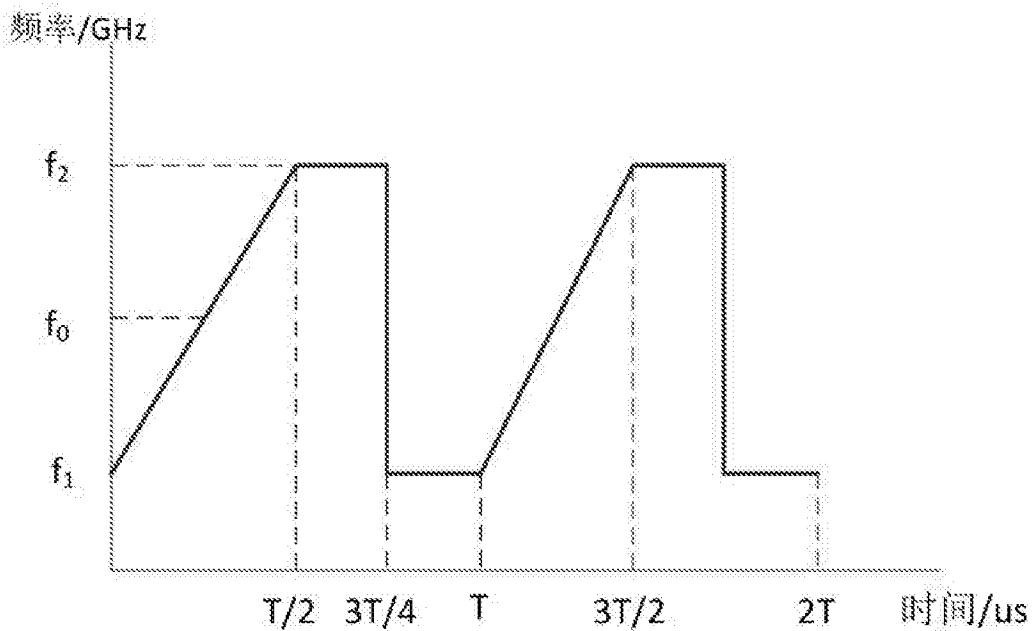


图2

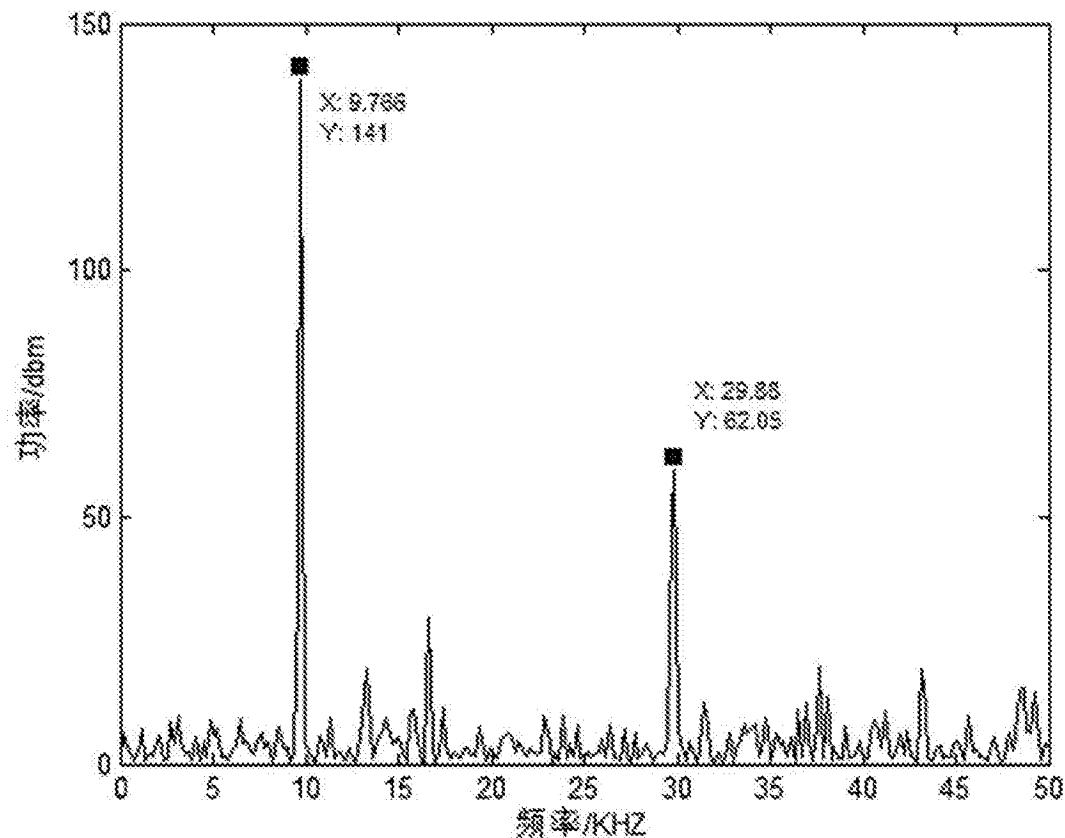


图3

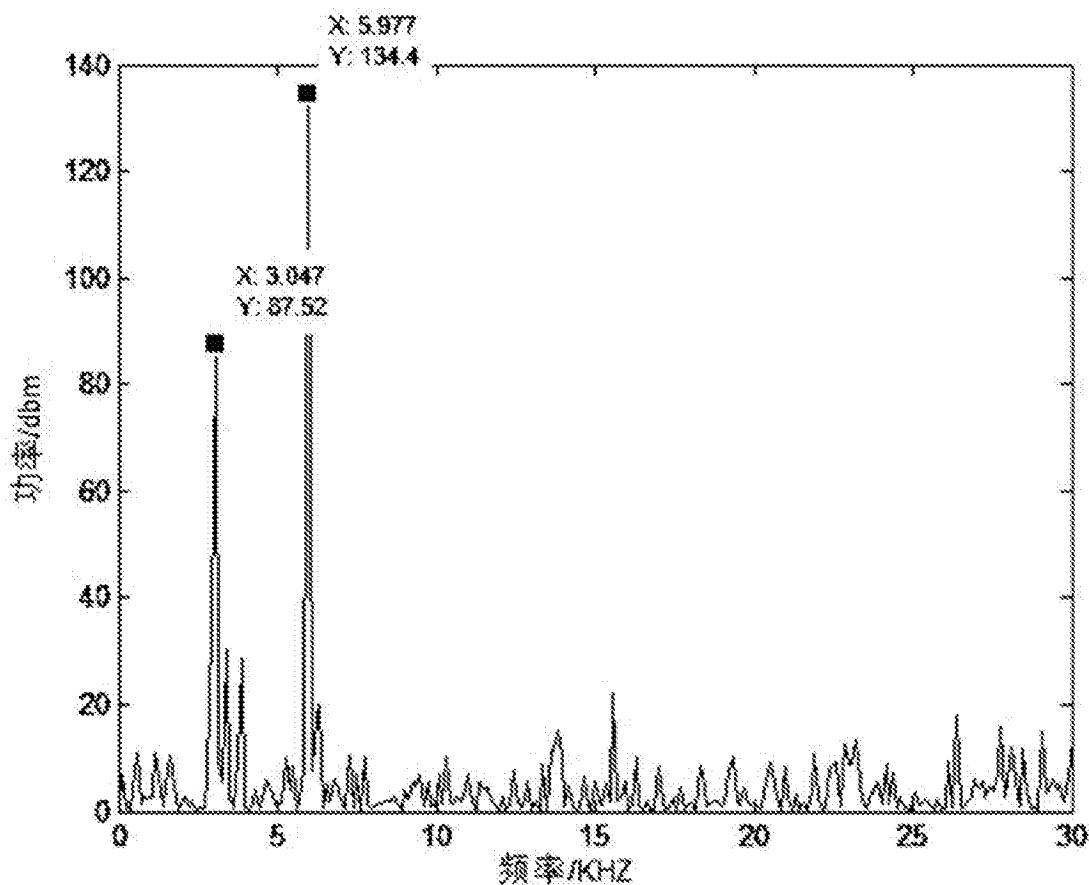


图4

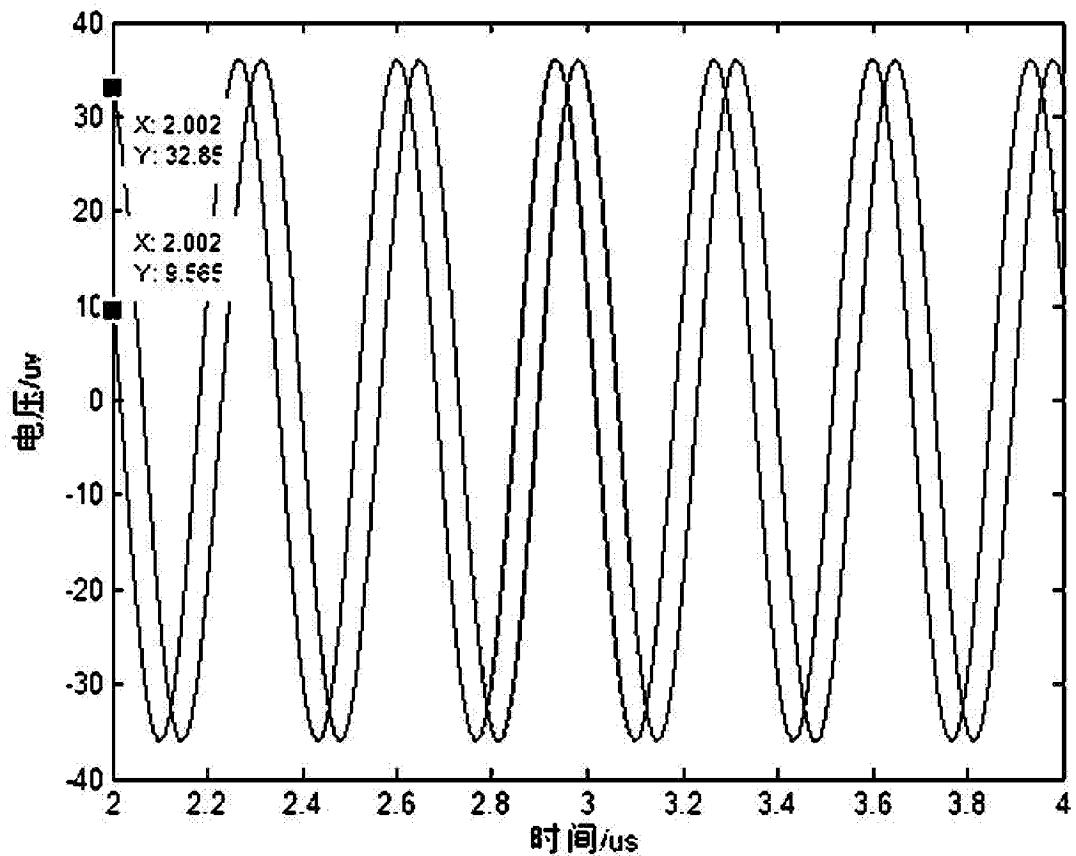


图5

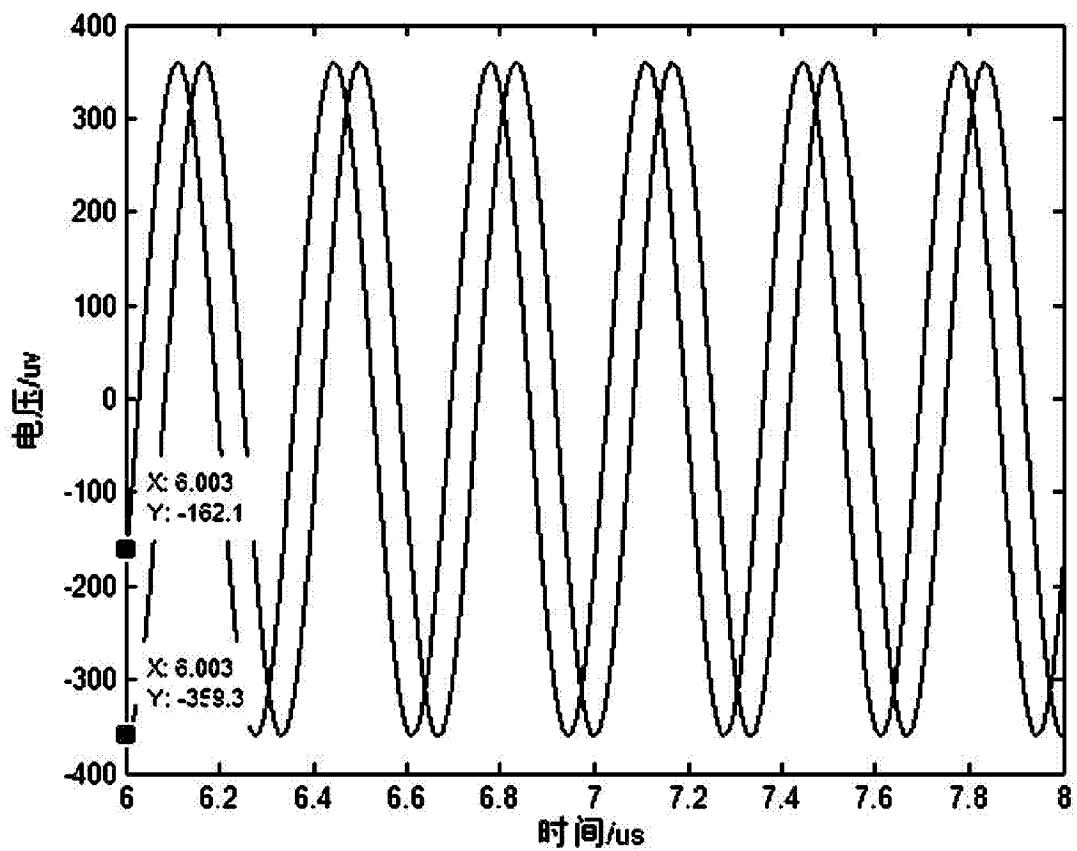


图6

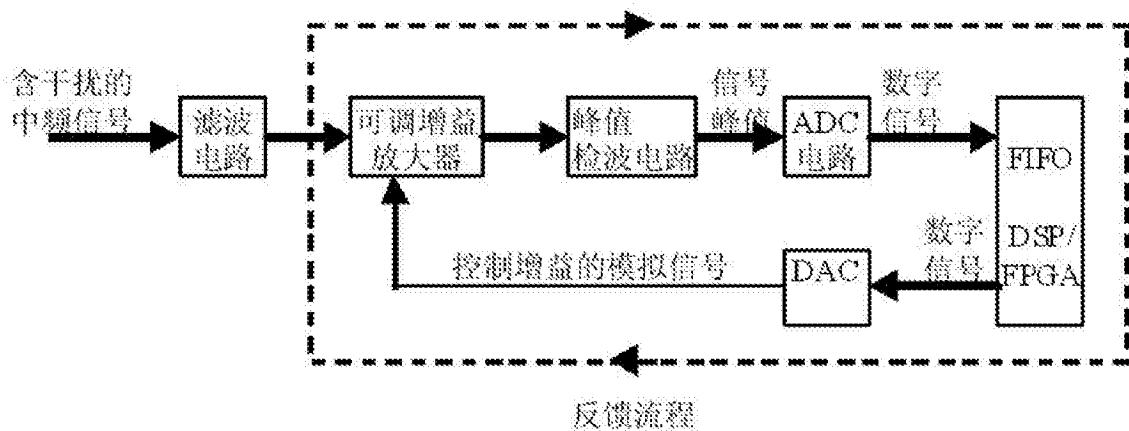


图7