

· 雷达系统与技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.06.002

# 基于调频中断连续波雷达的动目标检测方法

姜 阳<sup>\*1,2</sup>, 李 鹏<sup>2</sup>

(1. 空军预警学院, 武汉 430019; 2. 陆军炮兵防空兵学院 郑州校区, 郑州 450052)

**摘要:**调频中断连续波雷达(FMICW)既能解决传统连续波雷达发射信号泄漏问题,又具有分辨率高和被截获概率低的优势,但其在对动目标的检测上存在难度。针对这一问题,文中对 FMICW 回波特性展开研究。建立中频回波信号模型,对差拍信号进行分析与推导,再利用二维快速傅里叶变换(FFT)技术提取动目标的速度与距离信息。最后通过 MATLAB 进行仿真,同时对二维 FFT 算法的复杂度作了分析。结果表明所提方法的有效性。

**关键词:**调频中断连续波雷达;速度;距离;二维快速傅里叶变换

中图分类号:TN958.3 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2021)06-0006-04

**引用格式:**姜 阳,李 鹏. 基于调频中断连续波雷达的动目标检测方法[J]. 现代雷达, 2021, 43(6): 6-9.

JIANG Yang, LI Peng. A method of moving target detection based on FMICW radar[J]. Modern Radar, 2021, 43(6): 6-9.

## A Method of Moving Target Detection Based on FMICW Radar

JIANG Yang<sup>\*1,2</sup>, LI Peng<sup>2</sup>

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

(2. Zhengzhou Campus, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:**Frequency modulated continuous wave (FMICW), which can solve the problem of transmitting signal leakage of FMCW, has the advantages of high resolution and low intercept rate. But it is difficult to detect moving target. In order to solve this problem, the echo characteristics of interrupted continuous wave radar are studied in this paper. Firstly, the model of echo signal is established, the beat signal is analyzed and deduced, and then the velocity and distance information of moving target is extracted by two-dimensional FFT technology. Simulation is made by MATLAB, at the same time, the two-dimensional FFT algorithm complexity is analyzed. The results show that the method is effective.

**Key words:**frequency modulated continuous wave radar(FMICW); velocity; distance; two-dimensional fast Fourier transform (FFT)

## 0 引言

线性调频连续波雷达具有距离分辨率高、无距离盲区、低峰值功率、低截获率等诸多优点,并且结构简单,被广泛应用于战场侦察、精确制导等领域<sup>[1]</sup>。但连续波雷达也存在连续波泄露这一缺点,因此对收发天线的隔离度要求较高。为解决这一问题,目前存在的方法包括:采用两个独立天线用于发射和接收;采用对消技术减少泄露对信号的影响;提高收发天线间的隔离度。但是这些方法实现较为复杂<sup>[2]</sup>。为此本文提出一种方法,即采用线性调频中断连续波(FMICW)技术,增加一个开关对收发信号进行控制<sup>[3]</sup>。中断连续波雷达结合了脉冲多普勒(PD)雷达<sup>[4]</sup>和调频连续波(FMCW)雷达<sup>[5]</sup>的优势,采用收发分时的工

作方式,既可以获得与脉冲信号波形相当的收发隔离度,克服了连续波雷达发射泄漏的问题,同时又实现高分辨和低截获率,有效提升了雷达的检测性能<sup>[6]</sup>。为此,本文利用调频中断连续波体制雷达对动目标进行检测<sup>[7-8]</sup>。首先对二维 FFT 方法进行详细的分析与推导,再对 FMICW 雷达信号进行分析,建立了中断连续波雷达中频回波模型,并利用二维 FFT 算法对中频回波信号处理,得到目标的速度与距离信息,最后在 MATLAB 中进行仿真验证,并分析了该方法的复杂度。

## 1 二维 FFT 算法分析

首先以连续波信号为例,其雷达接收系统框图如图 1 所示。

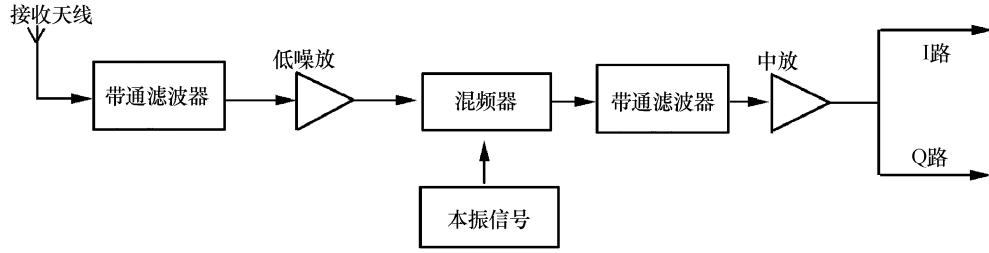


图1 雷达接收系统框图

该结构由接收天线、带通滤波器、混频器、低噪声放大器和中频放大器组成。从接收天线进来的回波信号经过带通滤波和低噪声放大后与本振信号混频,这样下变频得到的中频信号频率为0。这样可使得整个系统结构变得简单,设计难度降低,成本下降,整体功耗降低,易于集成。

为方便推导,令初始相位为0。 $f_0$ 为中心频率, $B$ 为带宽, $T_s$ 为扫频时宽。则发射信号可表示为

$$s_t(t) = A_0 e^{j2\pi f t} = A_0 e^{j2\pi(f_0 + \frac{B}{2T_s}t)t} = A_0 e^{j2\pi(f_0 t + \frac{B}{4T_s}t^2)} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} f = f_0 + \frac{B}{2T_s}t, \\ \mu = \frac{B}{2T_s} \end{cases}$$

假设在距离为 $R$ 处,存在一个速度为 $v$ 的动目标,目标对应的双程延时为 $\tau$ ,则得到的接收信号为

$$s_r(t) = A' e^{j2\pi[f_0(t-\tau) + \mu(t-\tau)^2]} = A' e^{j2\pi(f_0 t - f_0 \tau + \mu t^2 + \mu \tau^2 - 2\mu t \tau)} \quad (2)$$

差频信号

$$s_b(t) = s_t(t) s_r^*(t) = A_0 A' e^{j2\pi(f_0 t + \mu t^2)} e^{-j2\pi(f_0 t - f_0 \tau + \mu t^2 + \mu \tau^2 - 2\mu t \tau)} = A_0 A' e^{j2\pi(f_0 \tau - \mu \tau^2 + 2\mu t \tau)} \quad (3)$$

在一个周期内回波延时 $\tau = \frac{2(R+vt)}{c}$ ,而在多个周

期内,第 $n$ 个周期的回波延时

$$\tau = \frac{2\{R + v[t + (n-1)T_s]\}}{c} = \tau_0 + \frac{2v}{c}t + \frac{2v}{c}(n-1)T_s \quad (4)$$

式中: $\tau_0 = \frac{2R}{c}$ ;  $n$ 为周期数。

进而推导得

$$s_b(t) = A_0 A' e^{j2\pi[f_0 \tau_0 + f_0 \frac{2v}{c}t + f_0 \frac{2v}{c}(n-1)T_s - \mu(\tau_0 + \frac{2v}{c}t + \frac{2v}{c}(n-1)T_s)^2 + 2\mu(\tau_0 + \frac{2v}{c}t + \frac{2v}{c}(n-1)T_s)t]} \approx A_0 A' e^{j2\pi[f_0 \tau_0 + f_0 \frac{2v}{c}t + f_0 \frac{2v}{c}(n-1)T_s - \mu \frac{4v^2}{c^2}t^2 - \mu \frac{4v^2}{c^2}(n-1)T_s^2 + 2\mu \tau_0 t + 2\mu \frac{4v}{c}t^2 + 2\mu \frac{4v}{c}(n-1)T_s t]} \approx A_0 A' e^{j2\pi[f_0 \tau_0 + f_0 \frac{2v}{c}t + f_0 \frac{2v}{c}(n-1)T_s - \mu \tau_0^2 - \tau_0 \frac{4v}{c}t + (n-1)T_s \frac{4v}{c} + 2\mu \tau_0 t]} \quad (5)$$

其中, $f_d = f_0 \frac{2v}{c}$ ,包含 $\frac{v^2}{c^2}$ 等多项式可忽略。

令 $T_n = t + (n-1)T_s$ ,即关于快时间 $t$ 和慢时间 $T_n$ 的差频信号

$$s_b(t, T_n) = A_0 A' e^{j2\pi[f_0 \tau_0 - \mu \tau_0^2 + f_d T_n - \tau_0 \frac{4v}{c}T_n + 2\mu \tau_0 t]} \quad (6)$$

对快时间求导相当于一个周期内做FFT

$$\frac{ds_b(t, T_n)}{dt} = 2\mu \tau_0 = \frac{2B}{2T_s} \cdot \frac{2R}{c} = \frac{2BR}{T_s c} = f_r \quad (7)$$

对慢时间求导相当于多周期内做二次FFT,即

$$\frac{ds_b(t, T_n)}{dT_n} = f_d - \tau_0 \frac{4v}{c} = f_d - \frac{2R}{c} \cdot \frac{4v}{c} = f_d - \frac{8Rv}{c^2} \approx f_d \quad (8)$$

其中, $v \ll c^2$ ,多项式 $\frac{8Rv}{c^2}$ 可忽略。

## 2 FMICW 信号分析及建模

FMICW 信号波形如图2所示。

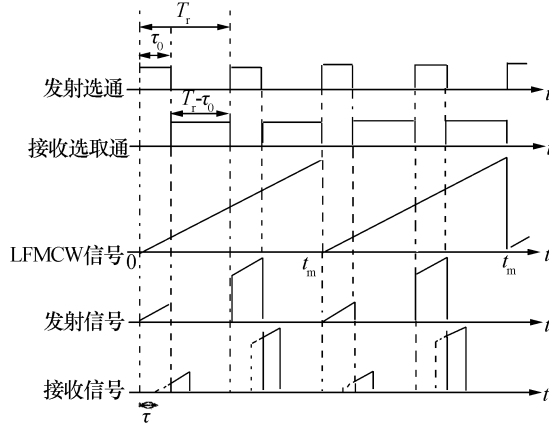


图2 调频中断连续波示意

$T_r$  为选通序列调频周期,  $\tau$  为选通宽度, 一个扫频周期内有  $p$  个选通序列。设图中连续波信号为

$$S_t'(t) = e^{-j2\pi(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)}, \quad 0 < t < t_m \quad (9)$$

式中:  $t_m$  为中断连续波的调制周期。经矩形发射窗后, 调频中断连续波发射波形为

$$S_t'(t) = \sum_{m=0}^p e^{-j2\pi((f_0 + \mu m T_r)t + \frac{\mu}{2}(t - m T_r)^2)} \text{rect}\left(\frac{t - m T_r}{\tau_0'}\right), \quad 0 < t < \tau_0' \quad (10)$$

式中:  $\tau_0'$  为矩形窗时宽;  $T_r$  是发射矩形窗重复周期。

仍假设在距离为  $R$  处, 存在一个速度为  $v$  的动目标, 目标对应的双程延时为  $\tau$ , 则中断连续波雷达回波信号为

$$S_r'(t) = \sum_{m=0}^p e^{-j2\pi((f_0 + \mu m T_r)(t - \tau) + \frac{\mu}{2}(t - \tau)^2)} \text{rect}\left(\frac{t - m T_r - \tau}{\tau_0'}\right) \quad (11)$$

式中:  $0 < t < \tau_0'$ 。则差频信号如式(12)所示。

同理对差频信号做二次 FFT, 即对式(12)两次求导得到距离频率和多普勒频率, 再通过式(13)、(14)最终得到目标的距离、速度信息。

$$S_b'(t) = S_t'(t) S_r'^*(t) = \begin{cases} \sum_{m=0}^p A e^{j2\pi((f_0 + \mu m T_r)\tau - \frac{\mu}{2}(\tau^2 - 2\tau))} \text{rect}\left(\frac{t - m T_r - \tau}{\tau_0'}\right), & \tau_0' < \tau < T_r - \tau_0' \\ \sum_{m=0}^p A e^{j2\pi((f_0 + \mu m T_r)\tau - \frac{\mu}{2}(\tau^2 - 2\tau))} \text{rect}\left(\frac{t - m T_r - \tau_0'}{\tau}\right), & 0 < \tau < \tau_0' \\ \sum_{m=0}^p A e^{j2\pi((f_0 + \mu m T_r)\tau - \frac{\mu}{2}(\tau^2 - 2\tau))} \text{rect}\left(\frac{t - m T_r - \tau}{T_r - \tau_0'}\right), & T_r - \tau_0' < \tau < T_r \end{cases} \quad (12)$$

$$R = \frac{cf_r}{2\mu} \quad (13)$$

$$v = \frac{cf_d}{2f_0} \quad (14)$$

### 3 MATLAB 仿真实验

本文仿真实验是基于 Windows 10 系统, MATLAB 7.0 版本软件。雷达采用调频中断连续波信号, 载频频率  $f_0 = 77$  GHz, 信号重复周期  $T_r = 20$  ms, 调频带宽  $B = 100$  MHz。经接收机得到零中频信号, 假设采样频率  $f_s = 50$  kHz, 那么在一个周期的采样点数为 1 000, 连续采 64 周期。假设此时存在两个动目标, 距离和速度分别为  $r_1 = 250$  m,  $r_2 = 200$  m;  $v_1 = 25$  m/s,  $v_2 = 35$  m/s。利用二维 FFT 方法, 先对每个周期内的回波信号做 1 000 点的 FFT, 再对 64 个周期的 FFT 结果按每个距离单元分别做 64 点 FFT, 得到如图 3 所示的结果。

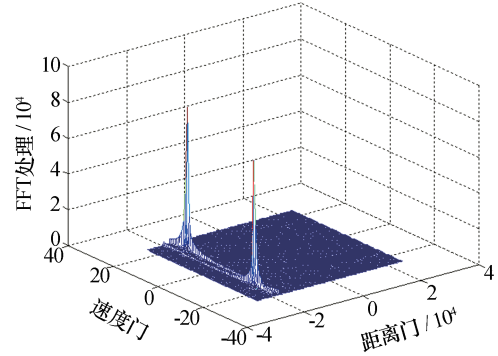


图3 二维 FFT 仿真结果

由图 3 中谱峰位置可准确得到目标的距离和速度信息, 与式(13)、(14)一致。仿真结果验证了上述方法的有效性。

下面对二维 FFT 方法复杂性进行分析。设一维 FFT 点数为  $N$ , 二维 FFT 点数为  $M$ , 均为 32 位浮点运算, 在算法运行过程中包含  $M$  组  $N$  点 FFT 运算和  $N$  组  $M$  点 FFT 运算, 需要保存的结果占的存储空间为

$$C = 2 \times 2 \times 32 \times M \times N = 128 \times M \times N \quad (15)$$

时间复杂度为

$$C_T = M \times N \lg N + N \times M \lg M = MN \lg MN \quad (16)$$

当  $M$  和  $N$  值较大时, 可采用多片 DSP 芯片并行

处理,或者采用改进的计算方案。

#### 4 结束语

本文采用了调频中断连续波雷达体制,结合二维FFT技术,将其应用于雷达对动目标的检测。通过模型的建立、理论推导和仿真结果分析,证明了检测方法的有效性。这一系统能够提高系统隔离度,又能保持分辨率和低截获率。

#### 参考文献

- [1] 刘艳苹. 基于线性调频连续波雷达的低速小目标检测方法[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(6): 86-88.  
LIU Yanping. Low speed small target detection method based on linear frequency modulated continuous wave radar [J]. Ship Electronic Countermeasures, 2017, 40(6): 86-88.
- [2] 袁伟明. 一种新的准连续波雷达波形设计方法研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(9): 16-19.  
YUAN Weiming. Study on a new design method of quasi-continuous wave radar waveform[J]. Modern Radar, 2007, 29(9): 16-19.
- [3] 曹军亮, 牟连云, 杨网成. 一种新型中断连续波雷达波形设计研究[J]. 航天电子对抗, 2010, 6(6): 48-51.  
CAO Junliang, MOU Lianyun, YANG Wangcheng. Study on waveform design of a new type of interrupt continuous wave radar[J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2010, 6(6): 48-51.
- [4] 康 猛. 毫米波雷达的多普勒扩展目标检测[J]. 现代雷达, 2016, 38(7): 21-24.  
KANG Meng. Doppler extended target detection for millimeter-wave radar[J]. Modern Radar, 2016, 38(7): 21-24.
- [5] 钱云襄, 刘 渝, 黄慧慧. 线性调频连续波信号参数估计算法[J]. 现代雷达, 2006, 28(3): 40-43.  
QIAN Yunxiang, LIU Yu, HUANG Huihui. Parameter estimation algorithm of linear frequency modulated continuous wave signals[J]. Modern Radar, 2006, 28(3): 40-43.
- [6] 万红进. 调频间断连续波雷达信号处理分析与仿真[J]. 火控雷达技术, 2011, 40(2): 30-34.  
WAN Hongjin. Signal processing analysis and simulation of frequency-modulated discontinuous continuous wave radar [J]. Fire Control Radar Technology, 2011, 40(2): 30-34.
- [7] PITAS K, REJFEK L, NGUYEN T N, et al. FMICW radar target classification by neural network[C]// 2020 30th International Conference Radioelectronika [S. l.]: [s. n.], 2020.
- [8] 郭晨曦, 郝新红, 栗 苹, 等. 毫米波调频引信的优化二维FFT信号处理算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(1): 220-228.  
GUO Chenxi, HAO Xinhong, LI Ping et al. Optimization of two-dimensional FFT signal processing algorithm for millimeter-wave frequency modulation fuze [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(1): 220-228.

#### 作者简介:

姜 阳 男,1985年生,硕士研究生,研究方向为信息对抗作战指挥;

李 鹏 男,1988年生,硕士研究生,助教,研究方向为侦察雷达。