

# 跳频编码脉冲信号及其模糊图的绘制

张志刚<sup>1</sup>, 梅文华<sup>2</sup>, 杜兴民<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘要:**跳频编码脉冲信号是一种新的脉冲压缩雷达信号形式,极具研究价值。模糊函数是对雷达信号进行分析研究和波形设计的有效工具,跳频编码脉冲雷达信号模糊函数的计算十分复杂,模糊图绘制非常困难。本文通过运用模糊函数的卷积算法,应用 Matlab 语言简便快捷地计算并绘制了具有良好立体效果的三维模糊图,制作了  $F_d$  切面图、 $T_d$  切面图和模糊度图,并给出了绘制方法。

**关键词:**跳频编码;模糊函数;模糊图;Matlab 语言

**中图分类号:**TN958 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)03-0063-04

在现代雷达中,提高雷达分辨率是雷达发展的一个重要方向。随着新技术、新材料的不断发展,高距离、速度分辨率信号及其处理方法越来越受到人们的关注。跳频编码脉冲信号是一种大时宽带宽雷达信号形式,能够在窄带发射机、接收机条件下工作,解决了常规大带宽信号在工程实现中遇到的问题,是一种重要的高距离速度分辨率信号形式。该信号的模糊函数具有近似理想的“图钉”型模糊函数形式,具有良好的目标距离和多普勒分辨性能<sup>[1-2]</sup>。模糊函数是对雷达信号进行分析研究和波形设计的有效工具。对雷达信号的研究就必须分析它的模糊函数和模糊图。

## 1 跳频编码脉冲信号

跳频编码脉冲信号是含有  $N$  个波形都相同的子脉冲的序列,各子脉冲的载波频率随机地在给定的频率集合内跳变,即  $F = \{f_0, f_1, \dots, f_{q-1}\}$ ,  $f_i = f_0 + iF_s$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, q-1$ 。其中第  $n$  个子脉冲的载波频率  $F_n = f_0 + b_n F_s$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ 。式中,  $b_n \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$  是跳频编码序列的第  $n$  个码元,  $f_0$  为信号固定载频,  $F_s$  表示载波频率跳变单位步长。

雷达中采用跳频编码技术<sup>[3]</sup>,具有以下优点:

- 1) 能得到大的脉冲压缩比;
- 2) 能够将距离旁瓣控制在某个给定的范围内;
- 3) 能同时得到距离高分辨和速度高分辨;
- 4) 允许多用户同时工作,可以人为地控制它们的相互干扰;
- 5) 具有强的抗干扰能力。

早在 1966 年, J. P. Costas 就开始了对雷达跳频编码脉冲信号的研究。他提出了这种能够同时准确地测量目标距离和相对速度的信号形式,当时由于没有找到有效的数学工具,很难构造出满足要求的跳频编码序列。直到 80 年代初期,利用有限域理论和基于同余式,研究人员构造出了大量的跳频编码信号,如各种 Costas 阵列构造法;基于 RS 码构造的 RSC 码;基于线性同余式的 LCC 码;基于二次同余式的 QCC 码;基于三次同余式的 CCC 码;基于扩张二次同余式的 EQCC 码;基于倒数同余式的 HCC 码等。关于现代雷达中跳频编码脉冲信号的设计方法,文献[3]进行了详细阐述。

## 2 模糊函数理论与模糊图

### 2.1 模糊函数

模糊函数是雷达信号理论中一个十分重要的概念。它最初是在研究雷达分辨力问题时提出的,并从衡量两个不同距离和不同径向速度目标的分辨度出发提出了模糊函数的定义。雷达信号的模糊函数与雷达信息的提取紧密相关,它不仅涉及了雷达的精度,还涉及了雷达的抗干扰、自适应以及雷达信号的处理方式。雷达信号的时间频率二维模糊函数定义为

$$x(T_d, F_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) u^*(t + T_d) e^{j2\pi F_d t} dt \quad (1)$$

式中,  $T_d$ 、 $F_d$  分别表示信号的时延和频移,  $u(t)$  为雷达发射信号。式(1)不是模糊函数的唯一形式,为了分析计算方便,模糊函数还可以写成卷积形式,即

$$x(T_d, F_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) u^*(t + T_d) e^{j2\pi F_d t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} [u(t) e^{j2\pi F_d t} dt] u^*[T_d - (-t)] dt = [u(t) e^{j2\pi F_d t} dt] u^*[T_d - (-t)] \otimes [u^*(-t)] \quad (2)$$

在程序中根据式(2)计算雷达信号的模糊函数。

### 2.2 模糊图

模糊函数的模值平方  $|x(T_d, F_d)|^2$  称为模糊图函数(某些资料中,  $x(T_d, F_d)$ 、 $|x(T_d, F_d)|^2$  和  $|x(T_d, F_d)|$  不加严格区分,均称为模糊函数),将模糊图函数筑在  $(T_d, F_d)$  平面上得到的立体图形称为模糊图。模糊图是在三维立体模糊图最大值以下  $-3$  dB 或  $-6$  dB 的地方,做一个与  $(T_d, F_d)$  平面平行的平面,这个平面与模糊图的交迹再投影到  $(T_d, F_d)$  平面上所构成的投影图。模糊度图的用途如下:它是以一个目标作为参考,此目标位于原点,另一个目标的  $(T_d, F_d)$  作为变量而绘制的。因此对于能量归一化的信号,如果另一个目标的相对  $(T_d, F_d)$  值落入阴影区域内,则认为两个目标不能分辨;如果落入阴影区域外,则认为两个目标可以分辨。

## 3 模糊图的计算与绘制

### 3.1 Matlab 语言及特点

Matlab 语言<sup>[4]</sup>由早期专门用于矩阵运算的计算机语言发展而来,具有强大的数值计算能力、高级图形和可视化数据处理能力,特别适用于科学计算、图像处理、数据的拟合与可视化。Matlab 语言采用统一的数据类型:矩阵对象。其运算格式与数学格式几乎一样,因此程序变得非常简洁,具有很高的处理效率。绘制雷达信号的模糊图要求所用软件不仅要有较强的数值计算能力,而且要有功能强大的图形处理能力。因此,本文选择了 Matlab 语言。

### 3.2 模糊图的计算与绘制过程

1) 绘制步骤。计算跳频编码脉冲信号模糊函数并绘制其模糊图的程序为定义信号矩阵、信号采样、计算模糊函数、归一化、绘制模糊图。由于 Matlab 语言所具有的优点,利用卷积公式计算雷达信号模糊函数和绘制其模糊图分别只需一条语句,编程效率高,程序十分简洁。

2) 信号的矩阵表示及采样。Matlab 语言采用统一的数据类型即矩阵。因此,首先要将雷达信号定义成矩阵形式。跳频编码脉冲信号复包络的数学表达式可以写为

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} u_c(t - nT_r) e^{j2\pi b_n F_s t} \quad (3)$$

式中  $u_c(t)$  为矩形脉冲,  $N$  为跳频编码序列长度,  $b_n F_s$  表示第  $n$  个子脉冲的载波频率增量,  $F_s$  表示载波频率跳变单位步长,  $T_r$  表示子脉冲重复周期,  $\{b_n\}$  表示跳频编码序列。对于跳频编码脉冲信号,在程序中用序列  $\{\exp(j2\pi b_n F_s t)\}$  表示。以码长  $N=5$  的跳频编码序列  $[1, 5, 3, 2, 4]$  为例,在程序中定义为  $[e^{j2\pi 1 F_s t}, e^{j2\pi 5 F_s t}, e^{j2\pi 3 F_s t}, e^{j2\pi 2 F_s t}, e^{j2\pi 4 F_s t}]$ ,注意:这里  $F_s$  的值为每一码子所占用时间的倒数,  $F_s = 1/T_r$ 。

信号采样。如果仅仅利用上述信号的矩阵形式进行卷积运算将无法在  $(T_d, F_d)$  平面上较多的点计算出模糊函数的值,这样绘制模糊图时无法描述模糊图的细节,因此必须对上述信号矩阵以  $dt$  为步长进行采样,

增大定义信号矩阵的阶数,以获得细腻并具有良好立体效果的模糊图。

以码长  $N = 5$  的跳频码  $[1, 5, 3, 2, 4]$  为例,其矩阵形式为  $S = [e^{j2\pi 1 F_d t}, e^{j2\pi 5 F_d t}, e^{j2\pi 3 F_d t}, e^{j2\pi 2 F_d t}, e^{j2\pi 4 F_d t}]$ ,当步长  $dt = 0.2$  时,采样得到的矩阵为  $S_1 = [e^{j2\pi 1 F_d t}, e^{j2\pi 1 F_d t}, e^{j2\pi 1 F_d t}, e^{j2\pi 1 F_d t}, e^{j2\pi 1 F_d t}, e^{j2\pi 5 F_d t}, e^{j2\pi 5 F_d t}, e^{j2\pi 5 F_d t}, e^{j2\pi 5 F_d t}, e^{j2\pi 5 F_d t}, e^{j2\pi 3 F_d t}, e^{j2\pi 3 F_d t}, e^{j2\pi 3 F_d t}, e^{j2\pi 3 F_d t}, e^{j2\pi 3 F_d t}, e^{j2\pi 2 F_d t}, e^{j2\pi 2 F_d t}, e^{j2\pi 2 F_d t}, e^{j2\pi 2 F_d t}, e^{j2\pi 2 F_d t}, e^{j2\pi 4 F_d t}, e^{j2\pi 4 F_d t}, e^{j2\pi 4 F_d t}, e^{j2\pi 4 F_d t}, e^{j2\pi 4 F_d t}]$

3) 求模糊函数。利用卷积算法求模糊函数的公式如式(2)。首先求式(2)中的  $u * (-t)$  用矩阵  $W$  表示,再求  $e^{j2\pi F_d t}$  与矩阵  $S_1$  的乘积,最后利用 Matlab 语言提供的卷积函数求出信号的模糊函数值,用矩阵  $H$  表示。为了便于绘图并和模糊函数理论中的表示方法一致,将矩阵  $H$  进行归一化处理。

4) 绘制模糊图。Matlab 提供了强大的绘图功能,利用其 mesh 语句可以绘制模糊函数的三维网格图形,其效果完全可以表示三维曲面的情况。Mesh( $X, Y, Z$ ) 语句中向量  $X$  的长度  $n$  和向量  $Y$  的长度  $m$  必须与  $Z$  的大小相对应,即矩阵  $Z$  必须是  $m \times n$  矩阵。注意这里  $X$  对应列, $Y$  对应行。

### 3.3 模糊度图和切面图的绘制

1) 模糊度图。将程序中的 mesh 语句替换为 contour 语句或 contour3 语句,并适当选择有关参数,就可以得到二维或者三维的等高线图,即模糊度图。

2) 切面图。切面图可以反映模糊函数的某些性质,在波形设计中使设计者更方便地观察雷达信号的某些特征。切面图的制作是根据所需切面的位置决定  $T_d$  或  $F_d$  的值,将该值对应的模糊函数矩阵的行或列保留,把其他所有行或列赋值为 0,用 plot 语句绘制切面图。

### 3.4 程序绘制的模糊图与切面图

程序计算并绘制出的长度为 15 的雷达跳频编码脉冲信号  $[9, 8, 12, 3, 5, 11, 1, 2, 10, 15, 14, 6, 13, 7, 0]$  的三维模糊图、 $F_d$ 、 $T_d$  切面图及  $-6$  dB 模糊度图,如图 1~4 所示。

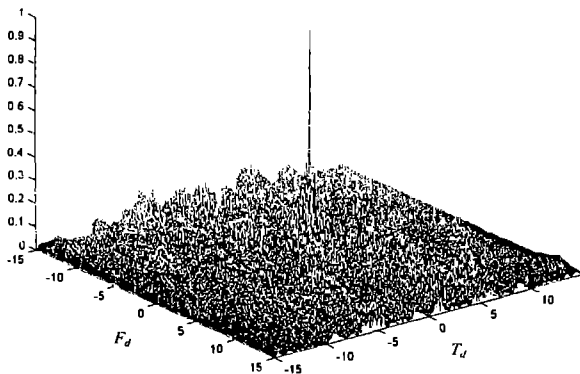


图 1 信号模糊图

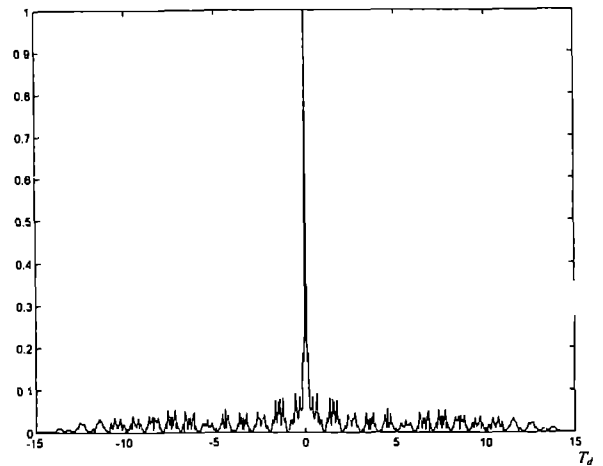


图 2  $F_d = 0$  切面图

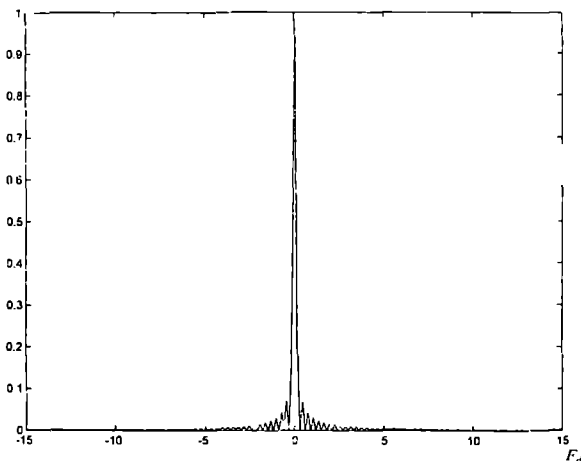


图 3  $T_d = 0$  切面图

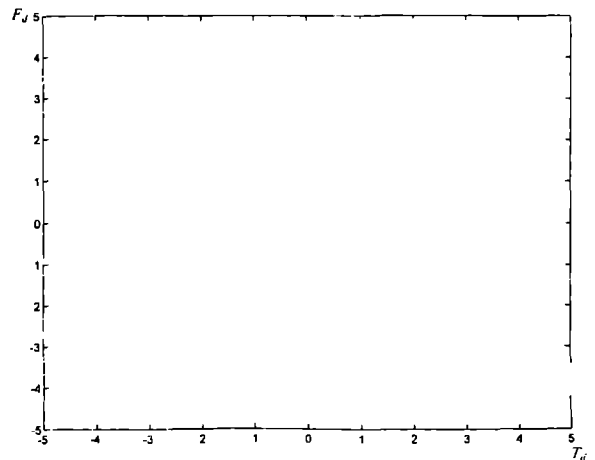


图 4  $-6$  dB 模糊度图

## 4 结束语

跳频编码脉冲信号是一种大时宽带宽雷达信号形式,是一种重要的高距离速度分辨率信号。具有良好的目标距离和多普勒分辨性能。本文基于模糊函数的卷积算法,利用 Matlab 语言编程较好地解决了跳频编码脉冲信号模糊函数计算复杂、模糊图绘制难的问题,绘制了效果很好的三维模糊图,为雷达信号研究人员研究跳频编码脉冲信号模糊特性提供了一个非常方便快捷的工具。

需要说明的是,本文阐述的模糊函数适用一般窄带信号以及目标运动加速度在信号持续期内可以忽略的场合。这是因为我们在推导回波信号的数学模型时,略去了距离对时间的高阶导数,并且假定  $TB \ll c/2v$  和  $B \ll f_0$ , 信号复数表示采用了指数形式。对于目标运动加速度不能忽略的场合,应该使用距离-速度-加速度模糊函数<sup>[1]</sup>。对于不满足  $TB \ll c/2v$  和  $B \ll f_0$  要求的信号,应使用宽带模糊函数的定义<sup>[5-6]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论 [M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [2] 张直中. 雷达信号的选择与处理 [M]. 北京:国防工业出版社,1979.
- [3] 梅文华,杨义先. 现代雷达中的跳频编码技术[J]. 现代雷达,1996, (5):81-86.
- [4] 程卫国,冯 峰,姚 东,等. Matlab5.3 应用指南[M]. 北京:人民邮电出版社,1999.
- [5] VAN TREES H L. Detection, estimation and modulation theory [M]. New York: Wiley, 1971.
- [6] WEISS L G. Wavelets and wideband correlation processing [J]. IEEE Signal processing magazine, 1974,7:13-32.

(编辑:姚树峰)

## Frequency Hop Code Pulse Signal and the Drawing of Its Ambiguity Function Figure

HANG Zhi-gang<sup>1</sup>, MEI Wen-hua<sup>2</sup>, DU Xing-min

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The frequency hop code pulse signal is a new form of pulse compression radar signal, and is of great analysis value. Ambiguity function is a useful tool for designing waveform and analyzing the radar signal. It is complicated to compute ambiguity function of frequency hop code signal and difficult to draw the ambiguity figure. This paper presents a method of computing the ambiguity function via convolution integral and drawing the ambiguity figure by using the Matlab language.

**Key Words:** frequency hop signal; ambiguity function; ambiguity figure; Matlab language