

基于 Matlab 的雷达信号处理系统仿真

窦林涛, 程健庆, 李素民

(中国船舶重工集团公司江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222006)

摘要: 针对现代雷达信号处理的主要方式, 运用数字信号处理理论和 Matlab 软件研究雷达信号处理的仿真问题。提出了一个仿真模型, 该模型可以仿真雷达信号、热噪声与杂波的产生和雷达系统中信号的动态处理过程。用 Matlab 对某脉冲压缩雷达信号处理系统进行了仿真, 得到了雷达系统中各个处理点上的具体信号形式, 既包含幅度信息, 又包含相位信息, 该模型能较好地满足对雷达信号处理的仿真要求, 显示了用 Matlab 仿真雷达信号处理系统的方便、快捷的优点。

关键词: 雷达信号处理; 正交解调; 脉冲压缩; 回波积累; 恒虚警处理

中图分类号: TJ957.51 文献标识码: A

Simulation of Radar Signal Processing Based on Matlab

DOU Lin-tao, CHENG Jian-qing, LI Su-min

(Jiangsu Automation Research Institute of CSIC, Lianyungang 222006, China)

Abstract: The simulation of radar signal processing is an important part of the simulation of radar system. This paper introduces a method of the simulation of radar signal processing based on Matlab, including the simulation of radar echo and clutter, and researches the simulation method of important technologies in the radar signal processing, including quadrature sampling, pulse compression, echo accumulation and CFAR detector. The work in this paper can overcome the disadvantages such as difficulty and lengthiness and show the convenience and simplicity of the simulation of radar signal processing based on MATLAB.

Key words: signal processing; quadrature sampling; pulsed compression; echo accumulation

现代雷达系统日益变得复杂, 难以用简单直观的分析方法进行处理, 往往需要借助计算机来完成对系统的各项功能和性能的仿真。利用计算机来进行雷达系统的仿真具有方便、灵活以及经济的特点。而 Matlab 提供了强大的仿真平台, 可以为大多数雷达系统的仿真提供方便快捷的运算。以典型的雷达为例, 它主要由天线、发射机、接收机、信号处理机、伺服系统和终端设备等部分构成。本文主要讨论的是雷达信号处理部分, 并结合某脉冲压缩雷达信号处理系统的实例来说明 Matlab 在雷达信号处理系统仿真中的应用。

1 仿真信号的产生

1.1 雷达信号的产生

现代雷达的体制多种多样, 根据雷达体制的不同, 可以选用各种各样的信号形式。下面简要介绍 Matlab 中产生线性调频信号的方法。

收稿日期: 2005-10-12

修回日期: 2005-11-22

作者简介: 窦林涛 (1980-), 男, 河北唐县人, 硕士研究生, 研究方向为雷达系统仿真。

程健庆 (1965-), 男, 研究员, 硕士生导师。

李素民 (1965-), 女, 研究员。

Matlab 提供了 modulate 函数, 可以方便地产生线性调频信号。modulate 函数调用格式如下:

$y = \text{modulate}(x, f_c, f_s, 'method', opt)$

参数 x 为调制信号序列, f_c 为载波频率, f_s 为采样频率, 'method' 参数用来决定进行何种调制, opt 为调制灵敏度, 也就是线性调频信号的步进系数。

利用 modulate 函数产生一个起始频率为 10MHz, 调频带宽为 2MHz, 采样频率为 100MHz, 脉冲宽度为 $10\mu s$ 的线性调频信号, 输出结果如图 1 所示。

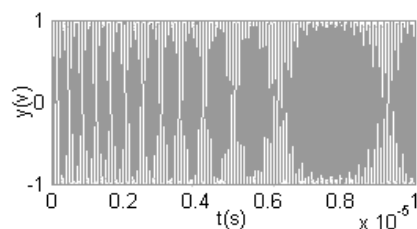


图1 载波 10MHz、带宽 2MHz 的线性调频信号

1.2 噪声和杂波的产生

在实际的雷达回波信号中, 不仅仅有目标的反射信号, 同时还有接收机的热噪声、地物杂波、气象杂波等各种噪声和杂波的叠加。由于噪声和杂波

都不是确知信号,只能通过统计特性来分析。下面介绍常见的噪声和杂波的产生方法。

1) **服从高斯分布的热噪声(随机序列)** Matlab 提供了 random 函数,用来产生标准高斯分布的随机数。random(m,n)可以产生 $m \times n$ 的随机序列矩阵。因此,利用随机函数可以非常简单快捷地产生出服从高斯分布的随机序列,如图2所示。

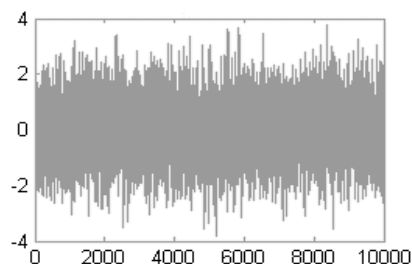


图2 服从高斯分布的随机序列

2) **瑞利分布杂波的产生** 瑞利分布是雷达杂波中最常用也是用的最早的一种统计模型。在雷达可分辨范围内,当散射体的数目很多时,根据散射体反射信号振幅和相位的随机特性,它们合成回波的包络振幅是服从瑞利分布的。如果采用 x 表示瑞利分布杂波回波的包络振幅,其下的概率密度函数可表示为

$$p(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2}), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ 是杂波的标准差。

Matlab 提供了 raylrnd 函数,用来产生瑞利分布的随机数。raylrnd(B,m)中的参数 B 为瑞利分布参数, m 是一个包含两个元素的一维向量,两个元素分别代表瑞利分布随机数矩阵的行数和列数,通常行数取为 1,列数对应杂波的持续时间。当瑞利分布参数 $\sigma = 2$ 时,用 raylrnd 函数产生的杂波如图3所示。

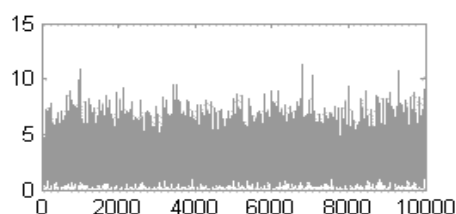


图3 瑞利分布杂波

2 信号处理系统的仿真

雷达信号处理的目的是消除不需要的信号(如杂波)及干扰,提取或加强由目标所产生的回波信号。雷达信号处理的功能有很多,不同的雷达采用的功能也有所不同,本文是对某脉冲压缩雷达的信号处理部分进行仿真。一个典型的脉冲压缩雷达的信号处理部分主要由 A/D 采样、正交解调、脉冲压缩、视频积累、恒虚警处理等功能组成。因此,脉冲压缩雷达信号处理的仿真模型如图4所示。

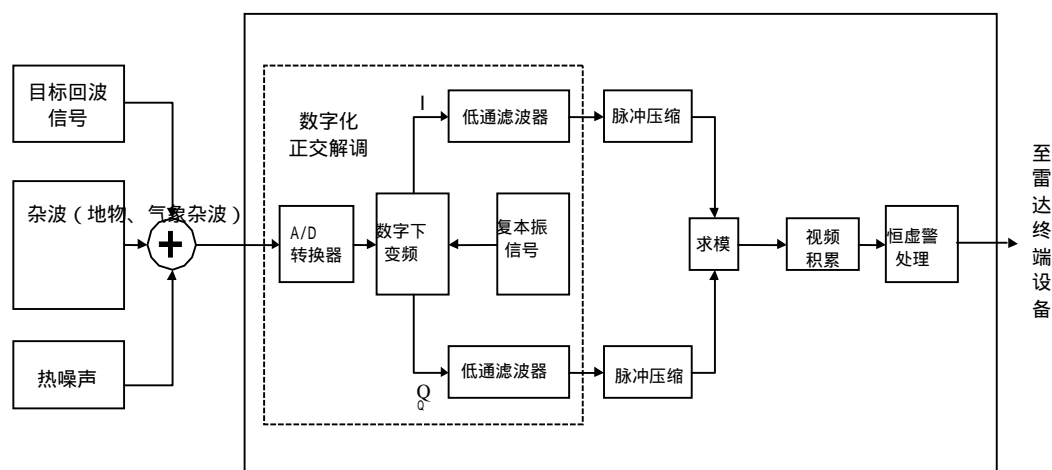


图4 脉冲压缩雷达信号处理的仿真模型

2.1 正交解调模块

雷达中频信号在进行脉冲压缩之前,需要先转换成零中频的 I 、 Q 两路正交信号。中频信号可表示为

$$f_{IF}(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad (2)$$

式中, f_0 为载波频率。

令

$$\begin{cases} I(T) = A(t) \cos \phi(t) \\ Q(T) = A(t) \sin \phi(t) \end{cases} \quad (3)$$

则

$$f_{IF}(t) = I(t) \cos 2\pi f_0 t - Q(t) \sin 2\pi f_0 t \quad (4)$$

在仿真中,所有信号都是用离散时间序列表示的,设采样周期为 T ,则中频信号为 $f_{IF}(rT)$,同样,复本振信号采样后的信号为

$$f_{local} = \exp(-j\omega_0 rT) \quad (5)$$

则数字化后的中频信号和复本振信号相乘解调后,通过低通滤波器后得到的基带信号 $f_{BB}(r)$ 为

$$f_{BB}(r) = \sum_{n=0}^{N-1} \{f_{IF}(r-n) \cos(r-n)\omega_0 T\} h(n) - j \sum_{n=0}^{N-1} \{f_{IF}(r-n) \sin(r-n)\omega_0 T\} h(n) \quad (6)$$

式中, $h(n)$ 是积累长度为 N 的低通滤波器的脉冲响应。

根据实际的应用,仅仅采用以奈奎斯特采样率进行采样的话,得不到较好混频信号和滤波结果,采样频率 f_s 一般需要中心频率的 4 倍以上才能获得较好的信号的实部和虚部。当采样频率为 $f_s = 4f_0$

时, $\omega_0 T = \frac{\pi}{2}$, 则基带信号可以简化为

$$f_{BB}(r) = \sum_{n=0}^{N-1} \{f_{IF}(r-n) \cos(r-n) \frac{\pi}{2}\} h(n) - j \sum_{n=0}^{N-1} \{f_{IF}(r-n) \sin(r-n) \frac{\pi}{2}\} h(n) \quad (7)$$

使用 Matlab 仿真正交解调的步骤:

1) 产生理想线性调频信号 y 。

2) 产生 I 、 Q 两路本振信号。设 f_0 为本振信号的中心频率, f_s 为采样频率, n 为线性调频信号时间序列的长度,则 I 路本振信号为 $\cos(n \frac{f_0}{f_s} 2\pi)$, 同样, Q 路本振信号为 $\sin(n \frac{f_0}{f_s} 2\pi)$ 。当 $f_s = 4f_0$ 时, I 、 Q 两路本信号分别为 $\cos(\frac{n}{2}\pi)$ 和 $\sin(\frac{n}{2}\pi)$ 。

3) 线性调频信号 y 和复本振信号相乘,得到 I 、 Q 两路信号。

4) I 、 Q 两路信号通过低通滤波器,滤除高频分量,以获得最终的检波结果。Matlab 提供了方便的滤波函数 $\text{filter}(b,a,x)$ 。其中 x 为输入信号, b,a 为滤波器传递函数的分子和分母的系数向量。

图 5 为 Matlab 仿真的线性调频信号,图 6、图 7 为解调后的 I 、 Q 两路信号。

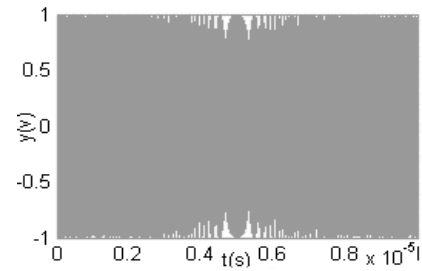


图 5 载波 10MHz、带宽 2MHz 的线性调频信号

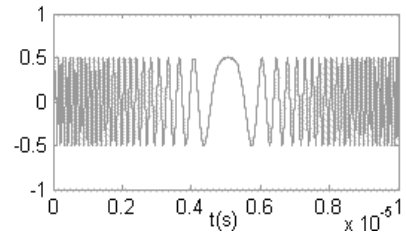


图 6 线性调频信号解调后 I 路信号

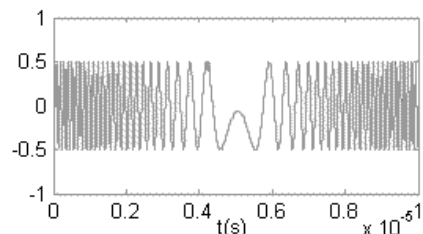


图 7 线性调频信号解调后 Q 路信号

2.2 脉冲压缩模块

在进行脉冲压缩处理之前,首先要获得相应的雷达发射信号的匹配滤波器。在实际工程中,对脉冲压缩的处理往往是在频域实现的,因为这样可以利用 FFT 算法提高计算速度,然后将雷达回波与匹配滤波器的频域响应(脉冲压缩系数)相乘,再经过 IFFT 变换,从而得到脉冲压缩处理的结果,而不用进行卷积处理,大大降低了运算量。因此,在进行脉冲压缩处理仿真的时候,首先应当获取脉冲压缩处理的匹配滤波器或脉冲压缩系数。求线性调频信号的脉冲压缩系数比较简单,只需要将理想线性调频信号取共轭和翻转即可。

使用 Matlab 仿真线性调频信号脉冲压缩的步骤:

1) 产生理想线性调频信号 y ;

2) 对信号正交解调,得到解调后的信号 $fbb = fbb_i + j * fbb_q$;

3) 产生理想线性调频脉冲压缩系数。这一步要首先求出正交解调后的信号 fbb 的匹配滤波器,然后利用离散傅里叶变换求出脉冲压缩系数;

4) 产生理想回波信号 (signal), 对信号进行正交解调。理想回波信号是一个脉冲重复周期内雷达收到的回波信号, 并假设目标为静止点目标;

5) 脉冲压缩处理。首先对回波信号做离散傅里叶变换, 得到signal_fft, 然后将signal_fft与匹配滤波器的频域响应 (脉冲压缩系数) 相乘, 再经过离散傅里叶反变换, 从而得到脉冲压缩结果。设雷达发射信号为线性调频信号, 具体参数如下: 脉宽 $10\mu\text{s}$ 、中心频率 10MHz 、调频带宽 2MHz 。对雷达回波信号的采样频率为 40MHz , 中频进行正交下变频。假设在 13.5km 处有一个点目标, 图8、图9给出用Matlab仿真该雷达的脉冲压缩处理得到的波形图。

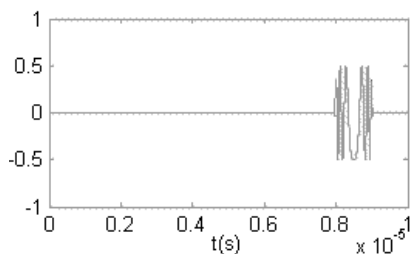


图8 回波信号正交解调后结果

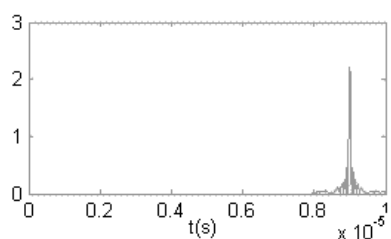


图9 回波信号脉冲压缩后结果

2.3 回波积累模块

现在的雷达都是在多脉冲观测的基础上进行检测的, 多个脉冲积累后可以有效地提高信噪比, 从而改善雷达的检测能力。积累处理可以在包络检波前完成, 称为检波前积累或者中频积累。信号在中频积累时要求信号间有严格的相位关系, 也就是说信号是相参的, 所以也称为相参积累。此外, 积累过程可以在包络检波后完成, 称为检波后积累或者视频积累。由于信号在包络检波后失去了相位信息而只保留了幅度信息, 所以检波后积累处理就不需要信号间有严格的相位关系, 因此这种积累又称为非相参积累。实现非相参积累的方法有很多, 例如抽头延迟线积累 (FIR 积累) 器和反馈积累器。

下面介绍抽头延迟线积累 (FIR 积累) 模型。

1) 积累脉冲数 积累脉冲数 N 应该等于天线波束扫过一个点目标时的目标回波个数, 即:

$$N = \frac{BW_a}{\Delta\theta} = \frac{BW_a}{(360 \div T_c) \times PRI} \quad (8)$$

式中: BW_a 为天线方位波束宽度; $\Delta\theta$ 为天线在一个脉冲重复周期扫过的角度; T_c 为天线扫描一周所需的时间; PRI 为脉冲重复周期。

2) 回波幅度调制 雷达接收机内部的噪声一般都认为是高斯白噪声, 且是平稳随机过程, 而回波脉冲的幅度调制还受天线双程场强波瓣图调制。如果天线场强波瓣图 (单程) 是 $\sin x / x$ 的形式, 则天线主瓣内的脉冲将以如下的权函数进行加权。

$$h(n) = \frac{\sin^4(na\Delta\theta)}{na\Delta\theta} \quad -N \leq n \leq N \quad (9)$$

$\Delta\theta$ 为天线在一个脉冲重复周期扫过的角度。实现这种积累的FIR积累器的结构如图10所示。

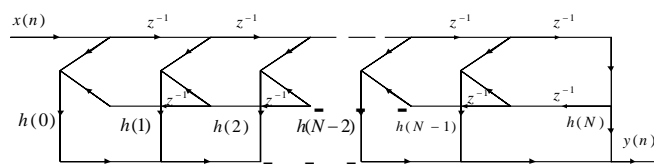


图10 FIR 积累器结构图

2.4 恒虚警处理 (CFAR) 模块

恒虚警处理有多种方法, 从大的分类来看, 有所谓的均值类CFAR、有序统计量类CFAR和杂波图CFAR等等。均值类CFAR包括多种实现方式, 如单元平均方式、两侧单元平均选大方式、两侧单元平均选小方式等等, 其基本理论是相同的。使用Matlab仿真恒虚警处理的步骤:

1) 产生叠加了瑞利杂波、热噪声的点目标回波。这一步首先按照上述的方法分别产生高斯热噪声和瑞利杂波, 然后与点目标回波进行叠加, 叠加时需要对瑞利杂波和热噪声的幅度加权。

2) 对叠加了瑞利杂波、热噪声的点目标回波进行恒虚警处理。这一步首先要确定参考单元数。如果参考单元数为16, 那么第1点恒虚警处理时噪声均值由其后面的16点噪声决定, 第2点到第16点的恒虚警的噪声均值由其前面和后面的16点噪声共同决定, 而正常数据点的恒虚警处理的噪声均值由其前后各16点的噪声决定, 最后16点的恒虚警处理与前16点相同。最后输出的信号为每个检测单元与杂波均值估计值的比值。

下面用Matlab对两侧平均选大方式恒虚警处理进行仿真, 参考单元数为16, 雷达的脉冲重复周期为 1ms , 在 $7.5 \sim 30\text{km}$ 处有服从瑞利分布的杂波回波, 且在 15km 处有一个点目标, 仿真结果如图11和图12

所示。

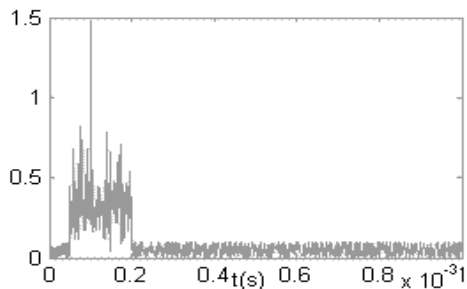


图 11 叠加了瑞利分布杂波、热噪声的目标回波

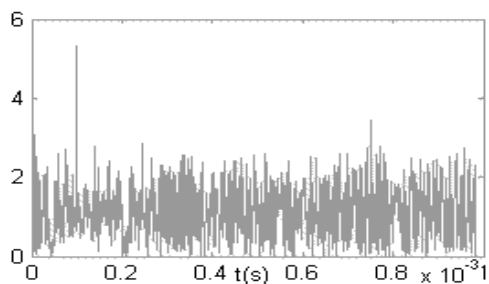


图 12 采用两侧单元平均选大方式恒虚警处理结果

3 结论

使用 Matlab 进行雷达信号处理系统仿真,能迅速建立起系统模型,设计理念可以在任何细节上得

到体现,建模时间短,模型简单、清晰,计算精度高,同时在系统设计的任何阶段都能够很方便地修改模型、评估结果和验证系统行为。本文以某脉冲压缩雷达为实例,基于 Matlab 的雷达信号处理的仿真方法取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 丁鹭飞,张平. 雷达系统[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1984.
- [2] 何友,关键,等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [3] 范影乐. MATLAB 仿真应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001.
- [4] 周宇,张林让,田惠. 基于 Matlab/Simulink 的雷达系统仿真[J]. 计算机仿真, 2004(11):235-237.
- [5] 胡海蓉,杨万海. 基于 Simulink 的脉冲压缩雷达系统建模与仿真[J]. 雷达与对抗, 2004(4): 9-11.
- [6] 王泽伟,贾宏进. 搜索雷达建模与仿真研究[J]. 雷达与对抗, 2005(2):7-11.
- [7] 王晓红,沈永福. 作战系统仿真中的雷达建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005(7):1535-1537.

(上接第 77 页)

目前,研究确定舰空导弹武器系统对群目标的射击次数主要采用仿真法和解析法。仿真法,即以计算机为工具的 Monte-Carlo 法,使用的基本前提是必须能够构造出符合舰空导弹武器系统对群目标射击的物理和事理特征且具有高分辨率的数学模型,具体确定出影响导弹射击的各种随机因素及其特性。解析法目前主要套用排队论中的相似模型,求解确定舰空导弹武器系统对群目标的平均射击次数。

4 结束语

射击效能分析与评估是武器系统分析的一项重要内容,本文在综合考虑了整个舰空导弹武器系统及其作战过程的基础上,进行了舰空导弹武器系统射击效能评估计算模型的初步研究,并分析了射击

效能指标的主要影响因素及其确定方法,从而使计算结果更加科学、全面、客观。既可为武器装备的设计、使用和作战指挥决策部门提供超前而可靠的决策预报,同时有助于选型设计和战术使用方案的确定,对于其他武器系统射击效能的研究也有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 纽波柯耶夫. 地空导弹射击[M]. 迟国良译. 北京:空军第五研究所, 1983.
- [2] 关成启,杨涤. 导弹武器系统效能评估方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2000(7).
- [3] 李延杰. 防空导弹武器系统射击效率[M]. 北京:航空学院出版社, 1987.
- [4] 李延杰. 导弹武器系统的效能及其分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.