



国外信息技术精品丛书



ARTECH HOUSE

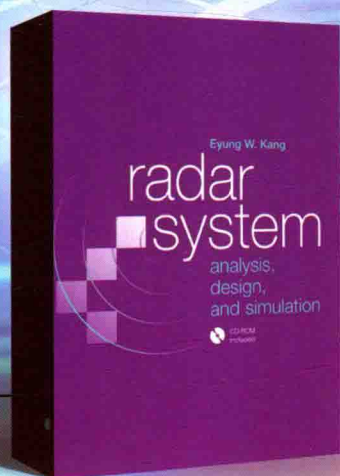
BOSTON | LONDON

PRACTICAL BOOKS FOR ENGINEERING PROFESSIONALS

雷达系统

—— 分析、设计与仿真

*Radar System Analysis,
Design and Simulation*



[] Eyung W. Kang 著

李庶中 罗军 周红峰 李洁 译



中国工信出版集团



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外信息技术精品丛书

雷达系统

——分析、设计与仿真

Radar System Analysis, Design and Simulation

[] Eyung W. Kang 著

李庶中 罗 军 周红峰 李 洁 译



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书论述了雷达系统分析所需的数学基础知识和专业知识,同时给出了与这些基础知识相关的 CPP 计算程序,包含矩阵计算、概率论、数字滤波器、傅里叶变换、雷达模糊函数、阵列天线、目标检测、卡尔曼滤波、恒虚警处理、动目标显示等方面与雷达系统设计相关的知识。对每一部分都进行了详细的理论论述和数学推导,深入浅出。针对每一部分基础知识,书中给出了所涉及的方法的 CPP 程序。

本书可以作为高等院校电子工程专业雷达研究方向高年级本科生或研究生的参考教材,也可以作为雷达专业工程技术人员进行雷达系统分析与仿真的参考书。

Eyung W. Kang

Radar System Analysis, Design and Simulation

ISBN-13: 978-1-59693-347-7

Copyright©2008 by ARTECH HOUSE

本书中文简体字版专有版权由 ARTECH HOUSE 授予电子工业出版社出版。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-0749

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统:分析、设计与仿真/()易勇·W·康(Eyung W. Kang)著;李庶中等译. —北京:电子工业出版社, 2019.6

(国外信息技术精品丛书)

书名原文: Radar System Analysis, Design and Simulation

ISBN 978-7-121-35593-6

I. ①雷… II. ①易… ②李… III. ①雷达系统 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 265060 号

责任编辑:刘海艳

特约编辑:周宏敏

印 刷:山东华立印务有限公司

装 订:山东华立印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18 字数:460.8 千字

版 次:2019 年 6 月第 1 版

印 次:2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价:78.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: lhy@phei.com.cn。

译者序

本书论述了雷达系统分析所需的数学基础知识和专业知识，同时给出了与这些基础知识相关的 CPP 计算程序。

本书共 12 章，大致分为三部分：第一部分为前 4 章，主要介绍矩阵论、概率论和数字信号处理的基础知识；第二部分为第 5~11 章，讲解雷达系统分析与仿真涉及的不同领域的主要知识和理论；第三部分为第 12 章，讲解常用程序流程。第 1 章为“矩阵、向量和线性方程式”；第 2 章为“伪随机数、噪声和杂波的生成”；第 3 章为“FIR 和 IIR 滤波器”；第 4 章为“快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)”；第 5 章为“模糊函数”；第 6 章为“阵列天线”；第 7 章为“目标检测”；第 8 章为“卡尔曼滤波”；第 9 章为“蒙特卡罗法和函数积分”；第 10 章为“恒虚警率(CFAR)处理”；第 11 章为“动目标显示”；第 12 章为“常用程序流程”。

本书内容连贯性较强，在介绍专业的雷达系统分析和仿真前，先介绍了需要的基础矩阵、概率和信号处理等基础知识，使读者在阅读时可以尽量减少对其他基础数学书籍的参考，方便读者阅读，提高阅读效率。各章的相互关系如下：

第 1 章介绍矩阵分析的基础知识，提供了第 8 章的基础预备知识。

第 2 章介绍雷达系统分析所需要的基本概率论知识，提供了第 7 章、第 9 章、第 10 章的基础预备知识。

第 3 章和第 4 章讲解数字信号处理的基础知识，提供了第 5 章、第 6 章、第 8 章、第 11 章的基础知识。

第 5 章介绍的“模糊函数”是雷达系统中特有的问题，主要与雷达信号的时频分析有关。

第 9 章介绍的蒙特卡罗法是重要的仿真方法，在系统仿真中有大量的应用。

本书的每一章都配有相关 CPP 仿真计算程序，这些程序能够帮助读者进一步地理解各章的知识要点，同时为读者进行雷达系统分析仿真提供相关的算法参考程序，为读者的研究提供便捷可靠的技术帮助。本书有许多仿真程序及其运行的仿真结果，仿真程序中出现的公式符号均为正体。为方便读者阅读理解，本书英文原著中的公式符号全部采用正体，本中译本中的公式符号与英文原著一致。本书配套文件可在华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)下载。

希望阅读本书的读者能够在雷达系统分析与仿真方面建立坚实的技术基础，并且随着系统分析、仿真模型研究及实际仿真程序开发等方面经验的积累不断提升综合水平。

前 言

本书的目标读者为致力于优化系统工作的雷达工程师和想学习雷达系统设计的研究生。本书重点论述了掌握雷达系统分析所需的知识基础、设计技巧、分析正确性的验证，并且通过计算机仿真对设计进行优化。阅读理解本书的大部分章节需要很少的前期知识基础，如概率论初步、代数矩阵运算和对计算机的基本熟悉。

要使每一章的内容在深度和广度上达到平衡是一个困难的任务。本书的一个有吸引力的特点是让读者建立一个坚实的基础。读者通过经验积累能够不断提升综合水平。

本书适合那些迫不及待想学习雷达系统分析、设计，并用 C++ 语言进行实际应用的读者。所有的例子在书中都有详细的解释，数值结果可以在屏幕上显示或存储在 .DAT 文件中，并在书中图示。本书不是为慵懒之人讲解 C++ 语言的，而是为聪明的学生和勤奋但被其他工作所困扰的工程师准备的。

让我们开始吧！顶峰并不遥远，沿着通往山顶的道路攀登并不太困难。

致 谢

这本引导性图书将帮助读者为进一步研究打下坚实的基础。

许多朋友和同事鼓励与帮助我完成了本书的写作，我欠他们一个巨大的感激。我希望能对他们每个人表示感谢，但是他们人数太多了。

我最感激 Mary K. Darcy。她耐心地教我如何整齐简洁地输入数学公式，在她不厌其烦的指导下输入图表，使得这本书与其他类似内容的图书相比鹤立鸡群。

引 言

第 1 章：矩阵、向量和线性方程式

本章介绍了矩阵向量的运算。我们先介绍了在低年级时学过的通过反向回代或正向回代的高斯消元法解线性方程组的方法。当方程组的维数是 2 或者 3 时，我们可以用铅笔和纸解出未知量。当维数更高，也就是在 4 或以上时，我们更愿意通过计算机程序进行求解。

我们很快遇到了矩阵求逆问题。矩阵求逆通常可行，但有时却不可行。这取决于矩阵的结构，通过矩阵分解可以知道什么时候是可行的。分解后的矩阵应当能够清楚地表明求逆是否可行。几个流行的分解方法及其对应的分解后矩阵的逆被编写成了程序。

向量运算被看作矩阵运算的子集。VECTOR.H 和 MATRIX.H 两个头文件用来确定被主程序调用的矩阵-向量运算。

第 2 章：伪随机数、噪声和杂波的生成

本章的目的是为了产生在信号处理中碰到的各种噪声和杂波。噪声和杂波可以用概率密度函数及其均值与偏差来表征(对那些愿意用电学术语的人来说，均值是直流电压，偏差是交流功率)，噪声和杂波的基本建立要素是单位均匀随机变量。单位均匀随机变量是由伪随机数产生的。目前已经有了一些封装好的随机数产生器。不注意使用这些产生器会在信号处理结果中产生难处理的混淆。

我们先介绍了采用混合同余法产生伪随机数。通过检验后，该方法产生了在指定数目 N 条件下的没有遗漏和重复的随机数字向量，并在指定的范围内连续。一些现成的程序包很少满足连续性要求。

我们将产生在信号处理中最常碰到的典型噪声和杂波，如高斯、瑞利、莱斯、指数、卡方、对数正态及韦布尔杂波。噪声功率或杂波功率的计算将被重点描述。这些噪声或杂波将被用到诸如滤波器设计、脉冲压缩、卡尔曼滤波和蒙特卡罗法等方面的应用程序中。

第 3 章：FIR 和 IIR 滤波器

在本章，我们编写滤波器设计程序。被广泛接受的滤波器分为两种：有限持续冲激响应滤波器和无限持续冲激响应滤波器。持续这个词被省略掉了。我们简称它们为有限冲激响应滤波器(FIR)和无限冲激响应滤波器(IIR)。

有限冲激响应滤波器的设计基于低通、高通、带通和带阻滤波器冲激响应的傅里叶变换。有限冲激响应滤波器的结构是非递归的，相位频率响应函数是线性的。无限冲激响应滤波器的设计是以模拟滤波器的设计为基础的，有丰富的设计手册和表格。模拟的频率响应通过双线性变换和预畸变方法变换到 z 域。滤波器结构是递归的，相位与频率之间为非线性关系。

我们结合设计详细讨论了控制副瓣电平的窗函数(包络函数),包括 FIR 和 IIR 的优点和缺点。

第 4 章:快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)

在 20 世纪 60 年代早期,快速傅里叶变换算法的发现使实时进行傅里叶变换处理成为可能。在此之前,实时在线地进行频域计算是不现实的。

通过合适的位反转操作,快速傅里叶变换可以采用时域采样(DIT)或频域采样(DIF)方法实现。本章在 DIT 和 DIF 位反转次序框图中展现了正确的位反转操作顺序。

不恰当的信号采样会导致频谱泄漏和时间函数恢复不真实。我们详细讨论了这些问题的弥补措施并举例进行了说明。

快速傅里叶变换和逆变换在信号处理中的应用很多,包括怎样在噪声中提取被淹没的信号,怎样通过压缩频率调制脉冲信号来提高分辨率,以及怎样校正相参接收机的不平衡和失配的 I/Q 通道。我们论述了一些有趣的应用。

清晰的解释加上系统框图将帮助读者理解所涉及的概念,将程序结果存储在.DAT 文件中,同时提供了相应的图表。

第 5 章:模糊函数

这一章面向那些想深入研究脉冲压缩的读者。我们首先介绍了固定载频的矩形脉冲和简单脉冲信号的特点。

更流行的脉冲压缩信号是线性调频脉冲(CLFM)。大部分高性能雷达系统都采用 CLFM 脉冲回波信号通过 FFT 和 IFFT 算法进行实时压缩。

对模糊函数的分析表明有许多调制方法可以增加压缩增益、降低副瓣电平、提高分辨率和保持低的截获概率。

一个理想的脉冲调制是 Costas 跳频编码。我们编制了 Costas 编码信号程序,并总结出 Costas 编码信号是一个非常接近理想的脉冲信号。这里分析了正确的跳频顺序。其结果用三维方法显示在模糊图上。

第 6 章:阵列天线

本章描述了阵列天线的设计,分析了一个简单的线性行阵列天线,并编制了程序。圆形或椭圆形阵列天线是线性行阵列天线的拓展。阵列单元的幅度分布受控于窗函数,如海明、切比雪夫、泰勒和拉姆达函数。本章对这些窗函数的最大增益、3dB 波束宽度和副瓣电平与矩形窗函数进行了比较,对其与滤波器设计中窗函数的相似性进行了说明,并论述了单脉冲阵列天线,即跟踪雷达的重要组成部分。

这里没有讨论消除(或对消)阵列单元间的互耦。互耦完全在于辐射单元的物理结构和单元在阵列孔径中的几何分布。

本章没有涉及在阵列天线设计和加工中的复杂性和难点,而是论述了在理想条件下,即给定天线孔径尺寸和窗函数的条件下,我们期望的最大增益、波束宽度、副瓣电平。对于没有论述的问题可参见引述的参考文献。

第 7 章：目标检测

本章论述了检测概率和虚警概率理论。在本章开始启示性地介绍了检测概率和虚警概率。

启示性模型中所包含的检测过程在一个循环累加器中展示。我们讨论了检测概率 P_d 、虚警概率 P_{fa} 和门限电平 V_{th} 之间的关系并编写了相应的程序。门限电平 V_{th} (或偏置电压 y_b) 是循环累加器中脉冲累加数 N 的函数。对于给定的 P_{fa} ，脉冲累加数越大，门限电平 V_{th} (或 y_b) 越低。

P_{fa} 的表达式正规地由偏差电平 y_b 的函数推导出来。相应地， P_d 的表达式由脉冲数 N 和单脉冲信噪比的函数推导出来。

P_d 、 P_{fa} 、 N 和 S/N 4 个因子相互关联。也就是说，如果确定其中的 3 个因子，则第 4 个因子可以被唯一地确定。唯一遗留的问题是如何概括目标信号的特征。回波信号被分为 5 种 Marcum 和 Swerling 目标，这样命名是为了纪念这些研究的先驱者。

Marcum 目标是非起伏的、固定截面积的目标，如直径为几个波长的金属球。大的球形目标的反射回波功率恒定，不随天线的观察角度而改变。我们为 Marcum 目标编写了两个程序：

$P_d(0)_1$.CPP 检测概率，Marcum 目标， $N=1$

$P_d(0)_N$.CPP 检测概率，Marcum 目标， $N \geq 2$

Swerling 把起伏目标分成了 4 种不同的类型：目标模型 1、2、3、4。

对于目标模型 1、2，目标反射面积概率密度函数被认为是符合瑞利分布的，可以是快起伏或慢起伏。瑞利慢起伏为 Swerling1 型目标；瑞利快起伏为 Swerling2 型目标。

目标模型 3、4 被认为是符合 4 自由度的卡方分布，同样可以是快起伏或慢起伏。

慢起伏或快起伏是相对的，与目标的动态特性、雷达的工作参数(如发射频率、重频周期和天线转速)有关。

对应于 Swerling 目标模型共有 8 个程序。虚警概率设置为 $1.0E-6$ ，可以调整到 $1.0E-5$ 。检测概率是以单脉冲信噪比和可积累脉冲数为可变参数的函数。8 个程序如下：

$P_d(1)_1$.CPP: Swerling 目标模型 1， $N=1$ ；

$P_d(1)_N$.CPP: Swerling 目标模型 1， $N=2,4,8,16,\dots$ ；

$P_d(2)_1$.CPP: Swerling 目标模型 2， $N=1$ ；

$P_d(2)_N$.CPP: Swerling 目标模型 2， $N=2,4,8,16,\dots$ ；

$P_d(3)_1$.CPP: Swerling 目标模型 3， $N=1$ ；

$P_d(3)_N$.CPP: Swerling 目标模型 3， $N=2,4,8,16,\dots$ ；

$P_d(4)_1$.CPP: Swerling 目标模型 4， $N=1$ ；

$P_d(4)_N$.CPP: Swerling 目标模型 4， $N=2,4,8,16,\dots$ 。

所有程序的零均值单位方差高斯噪声可通过平方律检波器后变为指数分布，如第 2 章所述。

在本章结束时给出了一个初步的系统设计例子。例如，如果确定了发射频率与功率、天线增益、硬件处理通道损失、射频截面积、噪声系数、预检测接收机带宽和脉冲积累数 N ，那么在什么样的距离能够检测到检测概率为 90%(或 50%)、截面积为 $10m^2$ 的目标呢？如果是非起伏 Marcum 目标会怎样呢？我们对这个问题的回答是明确的。对 Swerling 起伏目标的检测距离可以从上述程序中导出。

高斯噪声被杂波回波取代，目标检测概率将在第 10 章进行单独分析并编程。这是因为在杂波干扰条件下的检测概率需要更进一步的理论推导和处理。

第 8 章：卡尔曼滤波

在本章的开始，我们先定义了本章用到的符号和标识。这是为了消除其他一些书籍和文章给读者带来的混淆和挫折感。

粗体字母表示向量或矩阵。部分向量或矩阵符号的上部有标记，如 $\hat{\cdot}$ 或 $\tilde{\cdot}$ 。 $\hat{\cdot}$ 表示这个向量或矩阵是估计值，而 $\tilde{\cdot}$ 表示真实值与估计值之间的偏差。另外，向量和矩阵带有下标 $k-1$ 、 k 或 $k+1$ 。 $k-1$ 意味着这个向量和矩阵是邻近的过去； k 表示现在； $k+1$ 为预测状态，即未来的下一个采样时刻。没有下标的向量或矩阵是时间变量，而没有上部标记的符号为真实状态，不为观测者所知。

例 1

我们通过一个例子推导出卡尔曼滤波的 7 个方程式。一个卡尔曼滤波的简单例子为雷达跟踪一架没有突然机动的具有等高直线航线的民航客机。我们假设由于大气的扰动和发动机推力的不均匀性，班机的航线会小幅随机偏离理想的直线。我们定义了航班的状态方程和雷达探测的测量(观测)方程。假设大气扰动和不均匀的推力幅度很小，并符合高斯分布。两个测量误差源为有限发射脉冲宽度(距离误差)和有限雷达天线波束宽度(方位误差)。测量误差为单位均匀概率密度函数。也就是说，最大可能的误差分布是均匀和一致的。我们给出了一个数值例子，适合任何时候的新向量和新矩阵。

我们编写了 3 个程序：在 x - y 坐标系下的直线航迹方程；模拟真实飞行情况的增加了零均值 $0.5g$ 偏差的高斯分布干扰的直线飞行航迹；雷达测量方程。估计和预测误差的方差矩阵为 \mathbf{P}_k^+ 和 \mathbf{P}_{k+1}^- ，与卡尔曼增益矩阵 \mathbf{k}_k 一样被推导出来。将卡尔曼增益矩阵 \mathbf{k}_k 作为输入，可以求出在估计状态和预测状态下的 \mathbf{X}_k^+ 和 \mathbf{X}_{k+1}^- (班机位置)。

这里用一个流程图表示滤波过程。滤波有两个递推环：一个用来计算估计和预测误差的方差矩阵；另一个用来计算估计和预测的状态。两个环通过卡尔曼增益矩阵相连。

一个飞行后的数据处理程序被用来评估卡尔曼滤波器的性能。这里提供并讨论了真实航迹与班机估计和预测位置之间的误差，同时讨论了误差方差矩阵和状态向量的初始化改进。

例 2

第二个例子是空中交通管制(ATC)雷达。这里有两种空中交通管制雷达：机场监视雷达(ASR)和空中航路监视雷达(ARSR)。前者距离近，后者距离远。使用卡尔曼跟踪滤波的 ASR 系统的程序在处理进场航班数据时采用的是视在(LOS)坐标系。

把发射机脉冲宽度($0.83\mu\text{s}$)和天线波束宽度(1.5°)作为距离误差与方位误差来源代入数字模型，以演示卡尔曼滤波器的实际工作情况。

在视在坐标系中估计和预测误差方差矩阵中的元素，与估计和预测的航班状态一样。我们编写了飞行后数据分析程序，同时将结果显示在图表中。我们讨论了在 LOS 坐标系下滤波公式的优点和缺点。

例 3 和例 4

例 3 和例 4 是地基近距离防空雷达。一个采用 LOS 坐标系；另一个采用直角 (CCS) 坐标系。目标是一个执行对地攻击任务的轰炸机，采用“调转-俯冲-攻击和调转-爬升-逃跑”机动模式，最大加速度为 $\pm 3g$ 。这里推导出随机加速度噪声矩阵 \mathbf{Q}_x 和测量误差矩阵 \mathbf{R}_k ，同时给出 LOS 坐标系到 CCS 坐标系之间的坐标变换。我们仔细讨论了用 $\mathbf{P}_k(k=2)$ 代替 $\mathbf{P}_k(k=0)$ 来初始化估计误差方差矩阵。

我们对在 LOS 和 CCS 坐标系中的跟踪性能进行了对比。递归处理过程显示在一个框图中。

例 5

第 5 个例子重点分析了与矩阵求逆有关的问题，并且给出了没有矩阵求逆的卡尔曼滤波算法。我们注意到了误差方差矩阵 \mathbf{P}_k 的特点。它始终是对称和正定的。方差矩阵可以被分解，并且分解以后的矩阵求逆与一个标量的分解相等。

我们编写了不需要矩阵求逆的卡尔曼滤波程序。目标与例 3 和例 4 相同。结果表明采用求逆和不采用求逆实际上没有差别。没有求逆的计算量减少了许多。

这里给出了没有矩阵求逆的原理框图。基本的计算过程没有改变，即有两个递推计算环：一个用来计算误差方差；另一个用来计算状态向量。两者通过卡尔曼增益矩阵相连。

第 9 章：蒙特卡罗法和函数积分

本章通过例子介绍蒙特卡罗法的基本原理。我们从最简单的“命中-脱靶”方法开始。通过这个方法我们知道为了获得可接受的精度，采样数据样本数必须要达到万或万以上的量级。

接下来介绍“序列采样法”和“平均采样法”，它们可以减少样本数量。我们提出了发散系数 (CD) 指标来确定到达所需精度水平时需要的样本数量。我们研究的最后一种方法是“重要采样法”。这是在该领域研究中最流行的方法。这里详细推导了重要采样法的数学原理并给出了两个例子。

蒙特卡罗法是实现数学积分的数字实验方法和在大量实验中确定极少发生事件概率的方法。因此，本章也包含了在初级计算书籍中介绍的一些方程的积分流程。

第 10 章：恒虚警率 (CFAR) 处理

我们通过方程式的推导展示了检测概率、虚警概率、门限电平及存储在参考窗口中采样点数之间的相互联系。

我们考虑了一部雷达在搜索状态时，其天线从一个扇区到另一个扇区扫描的场景。天线将接收不同的本地噪声和杂波。门限电平 (或者偏差电平) 必须可以自动调节以保持固定的虚警率。本章推导了所遇到的在统计上固定并且是均匀分布的噪声和杂波的门限方程。其关键点是对噪声和杂波估计的准确性。

例 1: CA-CFAR

我们详细论述了噪声估计中的“单元平均”技术。这里的噪声被认为是符合零均值未知方差的高斯分布。CA-CFAR 处理过程概念简单且易于应用。对于快速变化的噪声电平，该方

法反应迟缓。CA-CFAR 处理损失与噪声功率估计的参考单元数目成反比。损失的 dB 数是参考单元数目的函数。我们对其进行了推导。成功应用这个方法的最大弱点是缺乏处理在参考单元中出现多个目标的方法。因为乱真目标将使门限电平达到超过错误值的高度。

例 2: OS-CFAR

我们研究了一种为了解决多目标问题的具有检挑机能的 CFAR 技术,即“顺序统计”(OS)处理,简称为 OS-CFAR。参考窗口接收的噪声信号按照幅度升序排列,在进行估计时检挑去除 1 个、2 个或 3 个最大的数据。这个最基本的原理来源于顺序统计理论。我们已经知道被检挑后的噪声分布,并将这个理论应用到本问题中。

我们推导了虚警概率、门限、乘积因子 T 和单脉冲信噪比(S/N)(功率)的公式。结果显示,OS-CFAR 以比较少的处理损失解决了参考窗口中的多目标问题。我们同时发现与 CA-CFAR 相比,OS-CFAR 对突变噪声电平的响应更快。只要噪声或杂波是符合高斯分布的,不论方差如何,OS-CFAR 提供的都是最鲁棒的处理。

CFAR 处理杂波 据报道,陆地或海洋反射的回波功率更可能呈对数正态分布或韦布尔分布,而不是高斯分布。对数正态分布的点是高的海浪尖峰,其概率密度函数具有最长的尾部。

韦布尔为双参数分布:形状参数 c 和尺度参数 b 。形状参数决定了韦布尔概率密度函数是像指数、瑞利或偏右倾斜的高斯形状。韦布尔是一个万能变化的函数,可以表征非常特殊或者暂时性很强的杂波。

我们给出了韦布尔分布的一些统计特征(如均值、方差、各阶矩、中位数、众数、分位数)。韦布尔杂波在通过平方律检波器后仍服从韦布尔分布。其形状参数减半并且尺度参数被开方。我们在 CFAR 处理过程中利用了韦布尔分布的特殊传输性。

例 3: Weber-Haykin CFAR(WH-CFAR)

Weber 和 Haykin 提出了对韦布尔杂波的 CFAR 处理。我们在介绍他们的分析的同时给出了一些例子。这是因为他们没有给出任何例子。我们的工作是从存储在参考窗口中的杂波回波中同时估计出这两个参数。我们编制了虚警率和门限程序,并且提供了没有经过检挑和经过检挑算法的两个结果。处理损失与 CA-CFAR 和 OS-CFAR 相比,我们发现,用 WH-CFAR 处理韦布尔杂波时损失的确很大。

例 4: 最大似然恒虚警(ML-CFAR)

这里将最大似然估计原理应用到了 CFAR 处理中。我们给出了对形状参数和尺度参数的最大似然估计的数学表达式。由于表达式是超越方程形式的,所以只能采用迭代过程获得对形状参数的估计。对尺度参数的估计利用了形状参数的迭代估计值。

形状参数的最大似然估计的缺点是当样本数据(存储在参考窗口中的杂波采样)相对较少时,结果偏差大。

计算尺度参数之前,必须修正有偏差的估计。

当样本数大于 100 时(我们很少采用长度超过 100 的窗口),这个偏差可以被忽略。我们编写了无检挑 ML-CFAR 程序,并且发现损失比 WH-CFAR 的少。然而由于迭代处理带来的巨大计算量,不得不怀疑其能否实时在线地应用。

例 5: 最小均方根误差恒虚警(MMSE-CFAR)

为了避免 ML-CFAR 中繁重的迭代,我们用最小均方根误差分析方法来估计韦布尔杂波分布的形状参数和尺度参数。存储在参考窗口中的接收的杂波数据按照幅度升序排列。自然对数杂波的排列是这些参数的线性函数,偏离直线很少。最小均方根误差线性回归处理获得了两个参数。直线的斜率是形状参数的估计,截点是尺度参数的估计。这里所涉及的计算完全能够在实时处理中应用。

第 11 章: 动目标显示

动目标显示是大约 1/6 成功运行的搜索或跟踪雷达不可缺少的信号处理方法。MTI 采用了多普勒频率检测原理(相位随时间变化)。所有的运动目标都产生与目标和观测者之间相对速度成比例的多普勒频率。

我们论述了不同阶递归或非递归延迟线对消器的应用和性能,提到了盲速的根源和采用脉冲重频参差方法减少盲速的设计改进,并以 ATC 雷达作为参差模式的例子。

对数表示的杂波衰减因子(CA)和改善因子(I)被用来评估 MTI 滤波器的性能。当杂波为非零均值且方差更大时,杂波衰减因子和改善因子将恶化,系统不稳定也将导致恶化。我们给出了两个例子。

第 12 章: 常用程序流程

本章收集了两种 C++程序,即一些不适合每章题目的程序和主程序常用的基础准备程序。希望读者能从本章收集的程序中获益。

目 录

第 1 章 矩阵、向量和线性方程式	1
1.1 引言	1
1.2 联立线性方程式	1
1.2.1 逆向回代高斯消元法	2
1.2.2 正向回代高斯消元法	3
1.3 矩阵因式分解	4
1.3.1 LU 因式分解	4
1.3.2 LL^T 因式分解 (乔里斯基)	5
1.3.3 LDL^T 因式分解 (修正乔里斯基)	7
1.3.4 UDU^T 因式分解	8
1.3.5 QR 因式分解	9
1.4 逆矩阵	12
1.4.1 L_1^{-1}	13
1.4.2 L_X^{-1}	14
1.4.3 U_1^{-1}	15
1.4.4 U_X^{-1}	15
1.4.5 D^{-1}	16
1.4.6 Q^{-1}	16
1.5 向量运算	17
1.6 矩阵运算	17
1.7 结论	18
参考文献	19
第 2 章 伪随机数、噪声和杂波的生成	20
2.1 引言	20
2.2 伪随机数和单位均匀变量	20
2.2.1 任意总数的 PRN 生成	22
2.3 高斯白噪声	22
2.4 瑞利噪声	24
2.5 莱斯随机变量、信噪比	25
2.6 χ^2 噪声	27
2.7 平方律检波器	28
2.8 指数噪声	29
2.9 对数正态杂波	31
2.10 韦布尔杂波	32
2.11 从采样数据推定概率密度函数	34
2.12 高斯 (正态) 概率纸的绘制	39

2.13 结论	40
参考文献	41
第3章 FIR 和 IIR 滤波器	42
3.1 引言	42
3.2 有限冲激响应滤波器(FIR)	44
3.2.1 低通、高通、带通、带阻 FIR 滤波器	44
3.2.2 窗函数: 矩形窗函数、汉宁窗函数、海明窗函数和布莱克曼窗函数	47
3.2.3 低通、高通、带通和带阻 Kaiser 滤波器	50
3.3 无限冲激响应滤波器(IIR)	53
3.3.1 双线性变换	54
3.3.2 模拟滤波器回顾	56
3.3.3 巴特沃斯低通 IIR 滤波器	64
3.3.4 切比雪夫低通 IIR 滤波器	66
3.3.5 椭圆低通 IIR 滤波器	67
3.3.6 椭圆带通 IIR 滤波器	68
3.3.7 非线性问题	69
3.3.8 FIR 和 IIR 滤波器的对比	70
3.3.9 A/D 转换器的量化噪声和动态范围	70
参考文献	74
第4章 快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)	75
4.1 引言	75
4.2 快速傅里叶变换的时域采样和频域采样	76
4.3 快速傅里叶变换时域采样和频域采样的示例	79
4.4 频谱泄漏和窗口函数	81
4.5 快速傅里叶逆变换的时域采样和频域采样	82
4.6 快速傅里叶变换和快速傅里叶逆变换的应用	83
4.6.1 频域滤波	84
4.6.2 检测淹没在噪声中的信号	85
4.6.3 数据的内插	86
4.6.4 脉冲压缩	87
4.6.5 幅度失衡和相位失配	91
附录 4A	95
参考文献	96
第5章 模糊函数	97
5.1 引言	97
5.2 单一恒定频率的矩形脉冲	97
5.3 线性调频(LFM)	99
5.4 Costas 编码跳频调制	102
附录 5A	108

参考文献	109
选择的参考书目	109
第6章 阵列天线	110
6.1 引言	110
6.2 线性阵列	111
6.3 圆形孔径阵列	114
6.4 椭圆孔径阵列	117
6.5 单脉冲阵列天线	119
6.6 结论	122
附录 6A	124
后记	125
参考文献	125
第7章 目标检测	126
7.1 引言	126
7.2 Marcum 目标模型的检测概率和虚警概率	129
7.3 检测概率(Swerling 目标模型)	137
7.3.1 Swerling 目标模型 1	140
7.3.2 Swerling 目标模型 2	142
7.3.3 Swerling 目标模型 3	143
7.3.4 Swerling 目标模型 4	145
7.4 结论	146
参考文献	150
选择的参考书目	151
第8章 卡尔曼滤波	152
8.1 引言	152
8.2 卡尔曼滤波方程的推导	154
8.3 客机	161
8.4 空管雷达	164
8.5 防空雷达(在 CCS 坐标系下)	171
8.6 防空雷达(在 LOS 坐标系下)	178
8.7 没有矩阵求逆的卡尔曼滤波	182
参考文献	188
选择的参考书目	188
第9章 蒙特卡罗法和函数积分	189
9.1 引言	189
9.2 命中或脱靶法	189
9.3 序列采样法	192
9.4 平均采样法	193

9.5	重要采样法	193
9.6	观察和评论	195
9.7	虚警概率(指数概率密度函数)	196
9.8	虚警概率(高斯概率密度函数)	200
9.9	函数的积分	202
9.9.1	梯形定律	203
9.9.2	辛普森定律及辛普森扩展定律	203
9.9.3	高斯积分	204
9.10	二维积分	211
9.11	三维积分	213
9.12	结论	213
	附录 9A	214
	参考文献	214
第 10 章	恒虚警率(CFAR)处理	215
10.1	引言	215
10.2	单元平均恒虚警率(CA-CFAR)	215
10.3	有序统计恒虚警率(OS-CFAR)	221
10.4	韦布尔杂波	226
10.4.1	韦布尔概率密度函数	226
10.4.2	平方律检波后的韦布尔杂波	229
10.5	Weber-Haykin 恒虚警率(WH-CFAR)	229
10.6	最大似然恒虚警率(ML-CFAR)	234
10.7	最小均方误差恒虚警率(MMSE-CFAR)	241
10.8	结论	245
	参考文献	246
	选择的参考书目	247
第 11 章	动目标显示	248
11.1	引言	248
11.2	非递归延迟线对消器	249
11.3	递归延迟线对消器	251
11.4	盲速和重频参差	254
11.5	杂波衰减和改善因子	256
11.6	系统不稳定性带来的限制	266
11.7	A/D 转换器量化噪声	267
11.8	杂波图	267
11.9	结论	268
	参考文献	268
第 12 章	常用程序流程	270

第1章 矩阵、向量和线性方程式

1.1 引言

矩阵和向量运算虽已广泛应用于日常的工程问题中，但是在大学的教科书中，这个概念就变得更抽象了。尽管很多学生都在钻研这个抽象概念，但是很少有机会利用它来解决工程问题。

我们知道如何用克莱姆(Cramer)法则来求解一组联立线性方程式，但是当方程式的维数很大时，用笔和纸则远远不足以解决问题，必须借助计算机才能解决。

初级、中级和高级商用软件包继续在精益求精地发展，虽然学生们和工程师们学会了如何使用这些方便的工具，但是并不知道如何来建立一个求解的算法。

我们采用逆向回代和正向回代高斯消元法，可得到求解一组联立线性方程的一种快速算法，并快速完成了一个矩阵头文件的创建。头文件中包含工程和普通科学问题所需的绝大多数矩阵运算。

我们不可能要求矩阵头文件包罗万象，但是它比较适用于本书所包含的矩阵运算。

1.2 联立线性方程式

下面给出一组联立线性方程式的例子：

$$\begin{cases} a_{00}x_0 + a_{01}x_1 + a_{02}x_2 = b_0 \\ a_{10}x_0 + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1 \\ a_{20}x_0 + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2 \end{cases} \quad (1.1)$$

式中， a_{ij} 和 b_i 已知； x_i 未知，需求解。

式(1.1)可以写成向量形式：

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

其简化形式为

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (1.2)$$

我们想要从给定的矩阵 \mathbf{A} 和列向量 \mathbf{B} 中求解出列向量 \mathbf{X} 。求解 \mathbf{X} 有两种方法：一种方法是利用克莱姆法则；另一种方法是采用消元法。当 \mathbf{A} 的维数相当大时，克莱姆法则所要求的行列式和余因子就变得复杂而冗长，而消元法则极其简单而直观。

我们在研究消元法之前，必须先深入研究式(1.2)的所谓相容性。下面用一个例证来说明我们使用相容性的用意。