

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

主动声呐检测信息原理

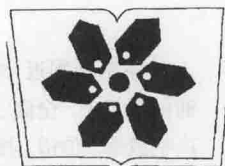
上册：主动声呐信号和系统分析基础

朱 埜 著



科学出版社

内容简介



中国科学院科学出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

主动声呐检测信息原理

上册：主动声呐信号和系统分析基础

朱 堃 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据近 50 年来国内外关于主动声呐的检测理论和技术,从信息和通信观点上,全面、系统地讨论主动声呐检测的信息原理和方法,并着重讨论声呐波形、信道、接收机以及它们之间的适配问题。全书共分十一章,分上下两册,上册讨论声呐波形时变信号和信道以及声呐正匹配滤波器的基本知识,下册具体讨论主动声呐信道(包括水下声传输、目标散射和海洋混响)的基本信道特征以及声呐信号、信道和接收机三者最佳适配的基本原理。

本书内容全面,观点新颖,适合从事水声物理和水声工程设计等研究人员阅读,也可供大专院校有关专业的教师和研究生参考。此外,对从事雷达、通信以及诸如医疗超声、海洋开发和地质勘探等领域的研究设计人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

主动声呐检测信息原理. 上册, 主动声呐信号和系统分析基础/朱堃著.
—北京: 科学出版社, 2014.12

(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-042573-7

I. ①主… II. ①朱… III. ①主动声呐—信号分析 IV. ①U666.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 273750 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 刘小梅
责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 12 月第一次印刷 印张: 22

字数: 418 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“现代声学科学与技术丛书”编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈伟中	邓明晰	侯朝焕	李晓东
林书玉	刘晓峻	马远良	钱梦騄
邱小军	孙 超	王小民	王威琪
谢菠荪	杨德森	杨 军	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

作者简介



朱楚，中国科学院声学研究所研究员，1937年3月1日生于江苏省靖江县，1958年10月毕业于南京大学物理系。50多年来一直从事主动声呐设计与应用研究，先后参加或组织水声岸用综合设备、声线仪、脉冲压缩声呐、水声信号综合分析仪等设备的设计和研制，1971年开始主动声呐信号、声呐信道和匹配滤波检测方面的信号处理理论和实验研究，1984年后着重复杂声呐波形设计、近场水下目标声散射特性以及声呐接收机最佳适配等工作。

序

这是一本在国防领域水声学中,关于主动声呐检测方面的专著。

50年代,从雷达中发展起来的匹配滤波检测理论和脉冲压缩技术,由于时间压缩相关技术的出现,在声呐的理论和实践中很快得到推广和应用。新技术的出现,特别是微电子计算机和信号处理技术的发展,又促使主动声呐检测进入信息科学技术的新时代。

虽然雷达检测理论已日趋完善,其中很多原理和技术都可以移植到主动声呐中,但是,由于使用环境和载波的不同,声呐同雷达的信息检测和处理,在原理和技术上都存在着本质的差别。在主动声呐中,获得目标信息的最佳检测效果,不但与所采用的声呐波形和接收处理方法有关,而且因声呐使用环境或信道的不同而有很大的差异。正如本书重点之一,第十章“最佳接收机”中所指出的,这不仅要求从事声呐技术研究和设计乃至操作人员,必须对声呐使用环境和所要检测的目标特性(书中统称为声呐信道)有基本的了解,以便设计或选择与其相匹配的最佳声呐波形和接收机形式,而且也要求从事为声呐服务的水声物理研究工作者,不能只限于从能量关系上来研究水声现象。

近二十年来,国内外水声和声呐研究设计人员就这些方面的问题,开展了广泛的研究,并取得了很大进展,可以查考的相应文献或内部资料,也有相当的数量,但却十分零散。据我所知,至今国内外还没有一本就这个问题进行系统讨论的专著。霍顿的《水声信号处理》,只着重于检测理论和信号处理的基本原理阐述,没有就声呐的全过程、特别是声呐信道问题作全面深入的讨论。乌立克的《水声工程原理》虽然讨论了声呐的全过程,但也只是着重于以声呐方程为基础研究能量关系,而有关声呐过程中的信息关系,讨论是不多的,当然,这两本书有许多优点,深受我国水声科学界的欢迎。

随着我国国防水声科学技术的发展,以及海防的实践需要,关于主动声呐检测理论和技术的问题,已日见其重要,本书就是受这种情势的促进而问世的。本书作者从事主动声呐的理论和实验研究已近三十年,这本专著就是作者在自己长期研究成果的基础上,根据二十多年来国内外关于主动声呐检测理论和技术的最新成就撰写而成。作者从信息论和通信理论观点出发,全面地、系统地讨论了主动声呐全过程,着重讨论了主动声呐三要素:声呐波形、声呐信道和声呐接收机,以及它们之间的互相匹配。就涉及的内容深度和广度而言,迄今还未见国内外有关类似的专著。

本书观点明确,取材丰富,内容全面,在编排上由浅入深,既重视基本概念的阐

述,避免过多的数学推导,又充分体现了国内外有关主动声呐检测的最新理论和技术,同时也在一定程度上反映了我国主动声呐研究和发展的水平。本书不但适用于从事主动声呐研究、设计乃至操作使用人员阅读,也适用于广大从事水声学科研究和有关大专院校教师和研究生参考;对从事海洋开发、地质勘探、雷达和通信领域的研究设计人员,也有一定的参考价值。

本书主要从时域上讨论主动声呐检测的信息过程,有关噪声中的检测、空间布阵原理、参量估计和信号处理以及水声学专题,在已出版的《水声学》《水声信号被动检测与参数估计理论》和《声呐信号处理——原理与设备》三本专著中已有系统深入的讨论。相信这四本专著的出版,对我国水声事业的发展,将起到很好的促进作用。

汪德昭

1990年5月

前 言

20 世纪 60 年代初,中国科学院声学研究所时任所长、学部委员汪德昭教授授意下,由侯自强同志倡导在新一代主动声呐设计中引入脉冲压缩技术,但随后经课题组多年海上实验发现,其效果远不是设计者所想象的那样,进一步理论和实验分析证明,声呐中引用脉冲压缩技术,要获得最佳检测效果,必须全盘考虑声呐信号、声呐环境和声呐接收机三者之间的互相适配,也就是说,必须根据给定的声呐环境和要求,选择或自适应选择声呐波形和接收机,这也是作者在汪德昭院士鼓励和指导下,撰写本书的宗旨。本书原版由汪院士作序,并于 1990 年 10 月由海洋出版社出版,至今已二十多年了。

在过去的二十多年中,主动声呐一方面随着冷战的结束,面对的是由远海到近海的战略转移以及高速隐身潜艇目标的远程探测使命,另一方面也随着现代化高科技的发展,尤其是几乎无处不有的网络信息和信号处理技术的发展,声呐也开始由数字声呐时代进入智能网络声呐时代,在技术上广泛认定低频、宽带、大功率和长基阵新型声呐的必要性,以此为基础构成的多基地网络声呐系统研究也成为近代主动反潜声呐发展的主要方向。此外,随着信号处理对浅海声学和海洋工程的渗入,水声学三大分支即水声物理、水声工程和水声信号处理的不断融合,声呐工程学也成为一個跨行业的学科。

尽管如此,声呐信号、声呐信道和声呐接收机的相互适配仍然是主动声呐设计者和使用者所面临的关键问题,尤其对浅海环境。实际上,为了提高主动声呐检测和跟踪性能,对环境的监测和评估已经成为近代声呐设计必须考虑的前提。

本书新版除了对原版印刷或某些观念错误作必要修改、某些章节重新调整以及某些插图更新(软件编绘)外,还增加了几部分与主动声呐信息检测有关的新技术原理章节,其中包括:

- (1) 声呐信号和目标回波高分辨时频特性分析和小波变换原理;
- (2) 适用于宽带高分辨检测的浅海海底混响 K 分布特性;
- (3) 新型复合声呐波形对混响中低速目标检测和跟踪的多普勒分辨性能;
- (4) 浅海传输信道相干性和波导不变性;
- (5) 基于物理模型的时空信号处理——匹配场和时间反转镜的基本原理;
- (6) 用于网路声呐的波形分集、MIMO 或多基地声呐系统的基本工作原理。

所增章节只是简单介绍,具体分析可见书后给出的对应参考文献。

由于本书涉及内容较多,因此新版分为两册出版,上册讨论声呐波形、时变信

号和信道以及通用接收机的基础知识,下册具体讨论主动声呐信道(即水声传输,目标散射和海洋混响)的基本信息特征以及声呐信号、信道和接收机最佳适配的基本原理和方法。

这里要补充说明的是,原版在撰写过程中,除参阅大量公开文献外,初稿曾与作者所在课题组成员陈庚、徐俊华等共同讨论,很多资料取自课题组(声学研究所原 708 或 208 组)的研究成果报告,因此包含了课题发起人侯自强和团队所有成员——单荣华、魏学环、孙增、刘莉蕾、李云言、宗杰琨、王质、周桂琴、周庆铭、陈培根、范树江、孙福安、宋文敏和李敏哲等同志对系统研制、海上实验和数据分析等方面的合作和奉献。同样,再版的一些内容亦多取自作者所在研究组的国家或国防研究基金报告,当然包含了研究组成员倪伯林、王荣庆、杨明亮、籍顺心、王磊、李坚、龚素英等在软件编制和实验分析等方面的辛勤工作。

要特别指出,声学研究所关定华(已故)、侯朝焕、黄曾暘、向大威、高天赋等研究员对原版书出版的大力支持,声学研究所现任领导以及第 12 研究室主任孙长瑜研究员等对本书再版的热情鼓励和支持,作者在此深表谢意。

此外海军电子工程学院郑兆宁教授(已故)对原书稿的认真审阅,海洋出版社专著编辑部陈泽卿等同志对原著的认真编辑,中国科学院科学出版基金及其办公室卢秀娟女士和科学出版社刘凤娟编辑等对本书再版的热情支持和认真排校,在此一并感谢。

由于本书内容繁杂,观点难免不一,加之作者水平有限,疏漏与不妥之处,敬请批评指正。

作者仅以本书新版的成功出版作为对导师、我国水声界先驱汪德昭院士逝世 15 周年的纪念,同时也是对中国科学院声学研究所成立 50 周年的祝贺。

朱 堃

2014 年 3 月

《现代声学科学与技术丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- | | | |
|---------------------|--------------------------|---------|
| 1. 创新与和谐——中国声学进展 | 程建春、田静等 编 | 2008.08 |
| 2. 通信声学 | J.布劳尔特等 编 李昌立等 译 | 2009.04 |
| 3. 非线性声学(第二版) | 钱祖文 著 | 2009.08 |
| 4. 生物医学超声学 | 万明习等 编 | 2010.05 |
| 5. 城市声环境论 | 康健 著 戴根华 译 | 2011.01 |
| 6. 汉语语音合成——原理和技术 | 吕士楠、初敏、许洁萍、贺琳 著 | 2012.01 |
| 7. 声表面波材料与器件 | 潘峰等 编著 | 2012.05 |
| 8. 声学原理 | 程建春 著 | 2012.05 |
| 9. 声呐信号处理引论 | 李启虎 著 | 2012.06 |
| 10. 颗粒介质中的声传播及其应用 | 钱祖文 著 | 2013.06 |
| 11. 水声学(第二版) | 汪德昭、尚尔昌 著 | 2013.06 |
| 12. 空间听觉 | J. 布劳尔特 著 | |
| ——人类声定位的心理物理学 | 戴根华、项宁 译 李晓东 校 | 2013.06 |
| 13. 工程噪声控制 | D. A. 比斯、C. H. 汉森 著 | |
| ——理论和实践(第4版) | 邱小军、于淼、刘嘉俊 译校 | 2013.10 |
| 14. 水下矢量声场理论与应用 | 杨德森等 著 | 2013.10 |
| 15. 声学测量与方法 | 吴胜举、张明铎 编著 | 2014.01 |
| 16. 医学超声基础 | 章东、郭霞生、马青玉、屠娟 编著 | 2014.03 |
| 17. 铁路噪声与振动 | David Thompson 著 | |
| ——机理、模型和控制方法 | 中国铁道科学研究院节能
环保劳卫研究所 译 | 2014.05 |
| 18. 环境声的听觉感知与自动识别 | 陈克安 著 | 2014.06 |
| 19. 磁声成像技术 | | |
| 上册: 超声检测式磁声成像 | 刘国强 著 | 2014.06 |
| 20. 声空化物理 | 陈伟中 著 | 2014.08 |
| 21. 主动声呐检测信息原理 | | |
| 上册: 主动声呐信号和系统分析基础 | 朱 桢 著 | 2014.12 |
| 22. 主动声呐检测信息原理 | | |
| 下册: 主动声呐信道特性和系统优化原理 | 朱 桢 著 | 2014.12 |

目 录

上册 主动声呐信号和系统分析基础

第一章 绪论	1
1.1 主动声呐的发展	1
1.2 信息论与声呐	5
1.2.1 主动声呐中的信息问题	5
1.2.2 信息的数学量度	6
1.2.3 信息率和香农信息定理	8
1.2.4 声呐的信息处理	8
1.2.5 检测中的信息处理	10
1.3 主动声呐方程	11
1.3.1 声源级	12
1.3.2 传输损失	13
1.3.3 噪声级	13
1.3.4 目标强度	15
1.3.5 混响级	15
1.3.6 接收指向性指数	16
1.3.7 检测阈	17
1.4 主动声呐系统评价	18
1.5 主动声呐与雷达的异同	20
1.6 主动声呐信息检测方程	22
1.7 主动声呐三要素	27
第二章 声呐波形分析基础	29
2.1 波形和谱表示	29
2.2 实信号的复数表示	33
2.2.1 实信号的复数形式	33
2.2.2 希尔伯特变换和解析信号	34
2.2.3 信号复包络	35
2.2.4 信号瞬时频率和群延迟	37
2.3 信号的离散表示	37

2.3.1	信号的傅里叶级数展开	37
2.3.2	抽样和抽样定理	40
2.3.3	正交函数展开和伏尔什变换	41
2.3.4	波形的信号空间概念	44
2.4	波形参数	45
2.4.1	波形的加伯尔微分变换关系	46
2.4.2	波形参数	47
2.5	相关和模糊度	49
2.5.1	相关和相似	50
2.5.2	相关函数	51
2.5.3	模糊度函数定义	53
2.5.4	模糊度函数的基本性质	54
2.6	波形可分辨性及不确定性关系	57
2.6.1	波形分辨的实质	57
2.6.2	不确定性椭圆或分辨椭圆	59
2.6.3	波形不确定性关系	61
2.6.4	最小单元信号	62
2.7	模糊度原理	63
2.7.1	波形的固有分辨常数	63
2.7.2	模糊度原理	64
2.7.3	波形的信息“模糊”和“分辨”性能	65
2.7.4	信号按模糊度函数分类	65
2.8	波形的测量精度和误差椭圆	66
2.9	运动点目标回波	72
2.10	宽带模糊度函数	77
2.10.1	宽带模糊度函数定义	77
2.10.2	宽带模糊度函数性质	78
2.10.3	宽带不确定性椭圆	80
2.11	多普勒容限和多普勒不变波形	82
2.11.1	窄带和宽带多普勒容限	82
2.11.2	多普勒宽容信号	83
2.12	大时间模糊度函数	85
2.12.1	大时间模糊度函数的定义	86

2.12.2	大时间模糊度函数的性质	87
2.12.3	加速宽容信号	88
第三章	匹配滤波器	90
3.1	线性带通系统	90
3.1.1	线性系统的系统函数和输出表达式	90
3.1.2	带通系统的复数表示	92
3.1.3	带通系统的等效低通形式	93
3.1.4	离散时间系统	94
3.1.5	Z 变换	96
3.2	匹配滤波器的定义和性质	98
3.2.1	匹配滤波器的定义	98
3.2.2	匹配滤波器的性质	99
3.2.3	白噪声背景下匹配滤波器检测特性	100
3.3	匹配滤波器在统计检测中的应用	102
3.3.1	似然比检测	102
3.3.2	最大后验概率检测	104
3.4	带通滤波、脉冲压缩和互相关	106
3.4.1	带通滤波器和匹配滤波器	106
3.4.2	脉冲压缩和复杂信号的匹配滤波	107
3.4.3	互相关器和匹配滤波器	109
3.5	运动点目标回波的匹配滤波	110
3.5.1	运动点目标回波信息及其匹配的一般考虑	110
3.5.2	窄带和宽带参数匹配	111
3.5.3	相位匹配和正交接收机	113
3.5.4	窄带频移匹配和差额相关器	116
3.6	数字匹配滤波器原理	118
3.6.1	数字匹配滤波器	118
3.6.2	频移信号的数字相关运算	120
3.6.3	频域数字匹配滤波	122
3.7	时间压缩相关器	123
3.7.1	数字时间压缩原理	123
3.7.2	时间压缩相关器	126
3.7.3	实用时间压缩相关器	127
3.8	基于 FFT 的匹配滤波器	128
3.8.1	基 2-FFT 运算原理	129

3.8.2	基于 FFT 的匹配滤波器原理	130
3.8.3	浮点和定点 FFT 匹配滤波	132
3.9	SAW 和 CCD 横向匹配滤波器	132
3.9.1	横向匹配滤波器原理	132
3.9.2	SAW 匹配滤波器的结构原理	133
3.9.3	CCD 横向匹配滤波器	134
3.9.4	可编程 SAW 或 CCD 匹配滤波器	135
3.10	基于 Chirp-Z 变换的匹配滤波器	135
3.10.1	Chirp-Z 变换原理	136
3.10.2	Chirp 变换频谱分析仪原理	137
3.10.3	CZT 频域匹配滤波器	138
第四章	常用声呐波形	140
4.1	单频脉冲信号	140
4.1.1	方波包络单频 (CWL) 信号	140
4.1.2	高斯包络单频 (GCW) 信号	142
4.1.3	宽带和大时间模糊度函数	143
4.1.4	多普勒容限和加速容限	145
4.1.5	CWL 匹配滤波	145
4.2	线性调频信号	146
4.2.1	矩形包络线性调频 (LFM) 信号	147
4.2.2	LFM 的模糊度函数	149
4.2.3	目标运动对 LFM 信号的影响	150
4.2.4	高斯包络 LFM 信号	153
4.2.5	LFM 信号的产生和匹配滤波	154
4.3	编码调相信号	154
4.3.1	编码调相 (CMP) 信号的形式	154
4.3.2	CMP 模糊度函数计算	157
4.3.3	M 序列生成及特性	159
4.3.4	M 码的宽带多普勒容限	161
4.3.5	CMP 信号的匹配滤波	163
4.4	伪随机信号	164
4.4.1	伪随机 (PRN) 信号的产生及其表示法	164
4.4.2	PRN 信号的模糊度函数	165
4.4.3	运动目标回波情况	167
4.4.4	PRN 信号的匹配滤波	168

4.5	双曲调频信号	169
4.5.1	双曲调频 (HFM) 信号的波形特征	169
4.5.2	HFM 的模糊度特性	172
4.5.3	HFM 信号的宽带多普勒不变性	173
4.5.4	其他非线性调频和正弦调频信号	174
4.6	重复信号	175
4.6.1	重复信号的复数形式	175
4.6.2	重复信号模糊度特征	177
4.6.3	重复信号 PCW、PLFM 和 PSFM 特例	178
4.6.4	宽带多普勒容限和多普勒不变参差重复信号	179
4.6.5	重复信号的匹配滤波	181
4.7	脉间调制信号	182
4.7.1	脉间调制重复信号的一般特征	182
4.7.2	阶梯跳频 (STF) 信号	184
4.7.3	时频跳变 (HOP) 信号	187
4.7.4	脉间频移信号的匹配滤波	190
4.8	复合信号	191
4.8.1	简单的复合信号	191
4.8.2	串发复合信号和戈莱互补码调相 (GCP) 信号	192
4.8.3	同发复合信号和梳状 (Comb) 信号	196
第五章	水声信号的分析方法	199
5.1	水声信号的概率模型	199
5.1.1	水声信号的现象逻辑模型	200
5.1.2	水声信号的概率描述方法	201
5.1.3	水声随机过程的类别	202
5.2	随机过程的统计描述	203
5.2.1	随机过程的概率分布函数	204
5.2.2	随机过程的数字表征	205
5.2.3	平稳过程常见的几种分布函数	206
5.2.4	时间平均概率特性和遍历过程	209
5.2.5	随机过程的复数形式	210
5.3	随机过程的相关分析	210
5.3.1	随机过程相关函数定义	210
5.3.2	随机过程时间平均相关函数	212
5.3.3	广义平稳 (WSS) 过程	213

5.3.4	可平稳化的非平稳过程	214
5.3.5	随机过程的模糊度函数	216
5.4	随机信号的谱表示	218
5.4.1	随机信号的短时谱和谱图	218
5.4.2	时频能量分布函数	220
5.4.3	时变功率谱和双频功率谱	222
5.4.4	非平稳过程的演化谱	223
5.4.5	带限随机信号	224
5.5	非平稳过程的时频分布 (WVD)	225
5.5.1	时变过程的 WVD	225
5.5.2	WVD 的性质	227
5.5.3	WVD 的矩-信号参数	228
5.5.4	WVD 与其他时频表示的关系	229
5.5.5	广义 WVD	231
5.6	小波变换	233
5.6.1	小波变换定义和特征	233
5.6.2	小波变换的多分辨特性	234
5.6.3	小波变换的性质	236
5.6.4	离散时间小波变换	237
5.6.5	小波变换和宽带模糊度函数	238
5.7	随机信号的离散表示	240
5.7.1	傅里叶级数展开	240
5.7.2	时间抽样形式	241
5.7.3	时频二维展开——加伯尔 (Gabor) 展开表示	242
5.7.4	正交函数展开表示 (卡亨南-洛维展开式)	244
5.7.5	随机过程的矢量表示	246
5.8	随机信号通过线性系统	247
5.8.1	输出输入关系	247
5.8.2	匹配滤波器情况	248
5.8.3	几种特殊信号输入情况	249
5.9	随机信号的状态变量和统计序列模型	253
5.9.1	随机过程的成形滤波器产生法	254
5.9.2	平稳过程的状态变量表示法	255
5.9.3	随机过程状态空间表示的一般形式	256
5.9.4	随机过程协方差状态矢量描述法	258

5.9.5	几种常见过程的状态模型	259
5.9.6	随机信号的数字统计序列模型	260
5.10	水声时空信号	262
5.10.1	声呐时空波形	262
5.10.2	水声时空信号的抽样定理	265
5.10.3	矢量过程的表示法	266
5.10.4	矢量过程的统计描述	267
5.10.5	矢量过程的正交展开形式	268
第六章	线性时变系统分析	270
6.1	信道与线性系统	270
6.2	线性时变系统的系统函数	272
6.2.1	系统函数的引入	272
6.2.2	信道的几种系统函数定义	273
6.2.3	信道复数等效低通系统函数	275
6.2.4	几点说明	276
6.3	线性时变系统的状态变量表示	277
6.3.1	线性系统的状态方程	277
6.3.2	单输入单输出系统情况	279
6.3.3	状态方程的一般解和系统响应系数	280
6.3.4	时不变系统情况	281
6.3.5	以延迟 τ 为参量的系统状态空间描述	282
6.4	平均系统函数和信道的相干性	282
6.4.1	系统函数的系综平均	282
6.4.2	信道的相干性	284
6.4.3	信道的相干因子	285
6.5	随机信道的二阶统计特性	286
6.5.1	系统函数的二维相关函数	286
6.5.2	相关函数维数可降低的几种信道	287
6.5.3	随机信道相关函数的状态矢量表示	289
6.5.4	准 WSSUS 信道	290
6.5.5	信道时频平均相关函数	291
6.6	信道的衰落效应和相干函数	292
6.6.1	信道的衰落效应	292
6.6.2	信道对波形的解相关	294
6.6.3	信道的相干函数	296