



国防科技图书出版基金

超低频非高斯噪声 模型及应用

Non-Gaussian Noise Model of Extremely
Low Frequency Channel and its Application

■ 蒋宇中 应文威 张曙霞 郭贵虎 李成军 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

超低频非高斯噪声模型及应用

Non-Gaussian Noise Model of Extremely
Low Frequency Channel and its Application

蒋宇中 应文威 张曙霞 郭贵虎 李成军 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目 (CIP) 数据

超低频非高斯噪声模型及应用/蒋宇中等著. -- 北京: 国防工业出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-118-09652-1

I. ①超… II. ①蒋… III. ①低频—无线电信道—随机噪声—模型—研究 IV. ①TP84

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 160436 号

超低频非高斯噪声模型及应用

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 10 1/2

字 数 208 千字

版 印 次 2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 86.00 元



(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 (按姓氏笔画排序)

才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	甘茂治
甘晓华	卢秉恒	巩水利	刘泽金	孙秀冬
陆 军	芮筱亭	李言荣	李德仁	李德毅
杨 伟	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	郭云飞
唐志共	陶西平	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

噪声是制约通信、声纳、雷达等系统性能的主要因素。传统上为分析问题方便, 学界都假设存在于上述系统的噪声统计特性服从高斯分布, 并在此基础上确立最佳接收机结构。实际上, 仔细观察这些系统中的噪声统计特性, 它们与经典的高斯分布有很大的差异。例如, 在甚低频和超低频通信方面, 影响性能的主要噪声因素是全球范围雷电 (也称大气噪声), 其统计特性严重非高斯。众所周知, 传统的对高斯噪声最优的接收机, 在严重非高斯噪声的条件下性能将恶化, 甚至不能正常工作。另外, 如果能够辨识信道噪声的统计特性并加以有效利用, 则可以大幅度地提高接收机的性能。有效利用噪声的统计特性, 其核心就是要解决非高斯噪声建模和参数估计问题, 在此基础上设计对非高斯噪声最优的接收机, 即非线性接收机。由于非线性接收机充分地利用了噪声的统计信息, 削弱噪声的影响甚至可以接近理论界, 所以研究非高斯噪声建模和参数估计问题, 对于提高接收机性能、减小发射功率、提高通信速率、增大通信 (探测) 距离都具有十分重要的意义。

作者在从事低频无线通信 25 年的科研和教学中, 深刻感受到非高斯噪声建模和参数估计在提高接收机性能中所起的重要作用, 另外, 也深感国外学术界对非高斯噪声建模的研究一直没有间断, 并逐渐成为热点。而国内学术界在这一领域的研究基本处于空白, 文献著作缺少, 这催发了我们著作本书的意愿。本书以低频无线通信中的非高斯噪声建模和参数估计问题为主线, 系统地介绍非高斯噪声建模的数学物理基础、参数估计的方法和主要技术关键点, 对于重要的算法给出了用 MATLAB 编写的仿真验证实例。全书共分 8 章, 其主要内容可概括如下:

第 1 章主要介绍超低频信道非高斯噪声建模的应用环境, 超低频信道噪声的时域特征。简要地总结与归纳了无线信道噪声建模的历史, 具体分析了经验噪声模型和统计物理噪声模型这两大类模型, 详细地讨论了它们的理论基础、表达形式、模型优点以及特点。

第 2 章介绍统计物理噪声模型 Class A 和 Class B 以及 α 稳定过程, 其中 Class A 和 Class B 噪声模型推导过程非常复杂, 为了方便今后理解与研究, 我们将主要过程整理出来。

第 3 章主要介绍超低频大气噪声幅度概率分布模式的辨识, 对 GSM-06 测得的超低频大气噪声进行幅度统计分析, 证明超低频信道噪声幅度分布服从 Middleton 的 Class A 和 Class B 模型。为保证分析结果的准确, 采用频域法对超低频信道电磁噪声数据进行预处理, 抑制 50 Hz 工频干扰。接着对处理过的超低频信道

大气噪声数据进行 Lilliefors 假设检验, 证明超低频信道大气噪声的非正态属性。最后在估计 Class A 瞬时幅度概率分布参数值的基础上, 根据概率分布图和 Q-Q 图结果综合分析得出结论: 采用 Class A 瞬时幅度概率模型, 可以很好地描述宽带超低频信道大气噪声数据的幅度统计特性, 而窄带超低频噪声数据适用于 Class B 模型描述。

第 4 章主要介绍非高斯噪声中的信号检测一般结构、最优接收机结构、局部最佳接收机结构、次优接收机结构以及非线性处理器的性能估计。详细地介绍 Turbo 码的译码算法在非高斯脉冲型噪声环境下的性能以及改进。

第 5 章主要介绍基于特征函数谱噪声模型的参数估计, 针对 Class A 和 Class B 模型给出了具体算法。

第 6 章主要介绍基于马尔可夫链蒙特卡罗法噪声模型的参数估计, 对 Class A 模型及 α 稳定过程与高斯过程混合模型给出了具体算法和仿真结果。

第 7 章主要讨论了两维的 M-Class A 噪声模型的参数估计问题, 分析了两种算法: 一种基于马尔可夫链蒙特卡罗法, 另一种基于重要性采样。这些算法对于较小的样本仍然具有快速收敛优点, 且运算复杂度低, 有利于实时运算。对未来具有全向接收能力的潜艇通信最佳接收有重要意义。

第 8 章主要分析超低频实验接收机实现的若干重要问题。对于超低频接收机信号结构设计中的编译码单元、调制解调单元和扩频抗干扰单元, 结合设计目标分别给出了设计的理论依据、关键指标优化以及实现因素的考虑。对于信号处理单元, 采用基于 Class A 模型的参数估计算法, 有效地利用信道噪声的统计特性, 解决非高斯脉冲噪声下最佳信号接收问题, 大幅度地提高了接收机性能。

著者

主要符号对照表

ELF	超低频 (Extremely Low Frequency)
VLF	甚低频 (Very Low Frequency)
HF	高频 (High Frequency)
MSK	最小移频键控 (Minimum Shift Keying)
OFDM	正交频分复用 (Orthotropic Frequency Division Multiplexin)
TEM	横电磁波 (Transverse Electromagnetic)
Log-MAP	最大后验概率的对数 (Logarithmic Maximum A Posteriori Probability)
MCMC	马尔可夫链蒙特卡罗法 (Markov Chain Monte Carlo)
M-Class A	多维 Class A 模型
APD	幅度概率分布 (Amplitude Probability Distribution)
EPD	包络概率分布 (Envelope Probability Distribution)
Q-Q Plot	分位数—分位数图 (Quantile-Quantile)
Γ	高斯脉冲功率比 (Gauss-to-Impulsive Power Ratio)
A	脉冲指数 (Impulsive Index)
σ^2	噪声功率 (Power of Noise)
A_α	中等事件脉冲指数 (Intermediate Event Impulse Index)
α	空间密度传播参数 (Spatial Density-Propagation Parameter)
k_0	高斯相关系数 (Gaussian Correlation Coefficient)
k_1	脉冲相关系数 (Impulsive Correlation Coefficient)
ML	极大似然法 (Maximum Likelihood Method)
CFM	特征函数谱法 (Characteristic Function Method)
Γ_i	天线 i 高斯脉冲功率比 (Gauss-to-Impulsive Power Ratio); $i \in (1, 2)$
$\mathbf{M}$	信道隐含状态 (Channel Hidden States)
d_{free}	卷积码自由距离 (Code Free Distance)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 超低频非高斯噪声模型研究的意义	1
1.2 超低频大气噪声	3
1.3 非高斯噪声模型简要历史回顾	6
1.3.1 经验噪声模型	6
1.3.2 统计物理噪声模型	8
1.4 噪声模型的参数估计	10
第 2 章 非高斯噪声理论模型的建立	11
2.1 Class A 和 Class B 噪声模型	11
2.2 Class A 和 Class B 噪声模型的数学表达式	12
2.2.1 广义基本噪声模型	12
2.2.2 Class A 和 Class B 幅度概率分布	13
2.3 α 稳定过程	15
2.3.1 α 稳定分布定义	15
2.3.2 α 稳定分布特例	16
2.3.3 α 稳定分布矩性质	17
第 3 章 超低频大气噪声幅度概率分布模式的辨识	19
3.1 引言	19
3.2 超低频大气噪声建模的理论依据	19
3.3 超低频大气噪声测量设备简介	20
3.4 超低频信道电磁噪声数据的测量分析方法	22
3.5 超低频信道电磁噪声数据的预处理	23
3.6 超低频信道电磁噪声数据的非正态分布检验	25
3.7 宽带超低频信道大气噪声数据的幅度统计特性分析	25
3.8 窄带超低频信道大气噪声数据的幅度统计特性分析	29
3.9 结论	33

第 4 章 非高斯噪声中的信号检测	34
4.1 最优接收机结构	34
4.1.1 局部最佳接收机结构	36
4.1.2 次优接收机结构	37
4.1.3 非线性处理器的性能估计	38
4.2 非高斯噪声环境下 Turbo 码的译码算法性能分析及改进	39
4.2.1 Class A 噪声模型的简化	39
4.2.2 非高斯噪声 LOG-MAP-CA 算法推导	41
4.2.3 仿真结果及讨论	43
4.3 噪声的非参数概率密度估计	45
4.4 概率密度与非线性函数联合估计方法	49
4.5 本章 MATLAB 仿真程序及子程序	52
第 5 章 基于特征函数谱噪声模型的参数估计	57
5.1 引言	57
5.2 基于特征函数的 Class A 参数估计算法	58
5.2.1 Class A 模型的特征函数	58
5.2.2 基于特征函数的 Class A 模型参数估计算法的推导	59
5.2.3 基于特征函数的 Class A 模型参数估计算法仿真	60
5.3 基于特征函数求逆的最大似然参数估计算法	61
5.3.1 概率密度函数的 FFT 形式	62
5.3.2 最大似然估计	64
5.3.3 实验仿真	65
5.4 Class B 噪声模型的参数估计	66
5.4.1 Class B 噪声模型	66
5.4.2 Class B 噪声模型参数估计算法	67
5.4.3 Class B 参数估计算法的仿真及结论	69
5.5 Class B 噪声模型的非线性回归估计	71
5.5.1 非线性回归估计	72
5.5.2 初始值估计和 $\{\lambda_k\}$ 序列的生成	73
5.5.3 仿真及实际结果	74
5.6 本章 MATLAB 仿真程序及子程序	76
第 6 章 马尔可夫链蒙特卡罗法噪声模型的参数估计	82
6.1 混合模型的 MCMC 参数估计	82
6.1.1 α 稳定分布乘法性质	82

6.1.2	混合模型	83
6.1.3	贝叶斯层次模型和先验	83
6.1.4	MCMC 算法	84
6.1.4.1	通过 Gibbs 抽样更新权重系数 w	85
6.1.4.2	通过 Gibbs 抽样更新参数 γ	85
6.1.4.3	通过 Gibbs 抽样更新参数 σ^{-2}	85
6.1.4.4	通过 Metropolis-Hastings 算法更新 α	85
6.1.4.5	通过 Gibbs 抽样更新参数 κ, β	86
6.1.4.6	更新标签变量 z	86
6.1.4.7	通过 Metropolis-Hastings 算法更新变量 λ	86
6.1.5	仿真及实测结果	87
6.2	基于最大后验概率的 Class A 参数估计算法	87
6.2.1	基于最大后验概率参数估计算法推导	88
6.2.2	基于最大后验概率的 Class A 参数估计算法仿真	90
6.3	本章 MATLAB 仿真程序及子程序	92
第 7 章	两维的 M-Class A 噪声模型的参数估计	97
7.1	引言	97
7.2	多维 M-Class A 噪声模型	98
7.3	M-Class A 噪声模型参数的马尔可夫链蒙特卡罗估计算法	101
7.3.1	M-Class A 噪声模型参数的贝叶斯估计算法推导	101
7.3.2	M-Class A 模型参数估计算法的计算机仿真及结论	105
7.4	M-Class A 噪声模型的 PMC 参数估计算法	106
7.4.1	PMC 参数估计算法的推导	107
7.4.2	PMC 算法的 CUDA 并行计算	109
7.5	本章 MATLAB 仿真程序及子程序	115
第 8 章	超低频实验接收机实现的若干重要问题	123
8.1	引言	123
8.2	编译码方案设计	123
8.2.1	编译码体系的选择	124
8.2.2	编码器的结构参数	125
8.2.3	编码器的生成多项式	125
8.2.4	译码算法	127

8.3 调制解调方案设计	127
8.4 抗干扰设计	129
8.5 同步与交织	130
8.6 接收机信号处理设计方案	133
8.7 结语	135
附录 A Class A 和 Class B 模型的幅度概率分布推导	136
A.1 窄带接收机情形	137
A.2 Class A 特征函数	139
A.3 Class B 特征函数	140
A.4 Class A 和 Class B 模型的幅度概率分布	142
参考文献	144

Contents

1	Introduction	1
1.1	The Need of Non-Gaussian noise models	1
1.2	Atmospheric Noise in Extremely Low Frequency	3
1.3	Brief Review of Non-Gaussian noise models	6
1.3.1	Empirical noise models	6
1.3.2	Statistical and physical noise models	8
1.4	Parameters estimation of noise models	10
2	Development of Non-Gaussian Noise Models	11
2.1	Class A and Class B noise models	11
2.2	Mathematical Expression of Class A and Class B noise models	12
2.2.1	Basic Middleton noise model	12
2.2.2	Amplitude Probability Distribution of Class A and Class B models	13
2.3	α stable process	15
2.3.1	The Definition of α stable process	15
2.3.2	Special cases of α stable distributions	16
2.3.3	Moments of α stable distributions	17
3	The Analysis of the Amplitude Probability Distribution of ELF Atmospheric Noises	19
3.1	Introduction	19
3.2	The Theory of the development of ELF atmospheric noises	19
3.3	The Synopsis of ELF atmospheric noise measurement devices	20
3.4	Measurement analysis methods for Electromagnetic Noise data in ELF channels	22
3.5	Pre-processor for Electromagnetic noise data	23
3.6	The Non-normality Test for Electromagnetic noise data	25
3.7	The Analysis of Statistical Characteristics of the Amplitude of the wideband ELF Atmospheric noise data	25

3.8	The Analysis of Statistical Characteristics of the Amplitude of the narrowband ELF Atmospheric noise data · · · · ·	29
3.9	Conclusion · · · · ·	33
4	Signal Detection in Non-Gaussian noise · · · · ·	34
4.1	The Scheme of the optimum receiver · · · · ·	34
4.1.1	The Scheme of the locally-optimum receiver · · · · ·	36
4.1.2	The Scheme of the sub-optimum receiver · · · · ·	37
4.1.3	Performances of the non-linear processors · · · · ·	38
4.2	Performances Improvement of Turbo code in Non-Gaussian noise · · ·	39
4.2.1	The Simplification of the Class A noise model · · · · ·	39
4.2.2	The Derivative of the LOG-MAP-CA algorithm in Non-Gaussian noise models · · · · ·	41
4.2.3	Simulation Results and Analysis · · · · ·	43
4.3	Non-parameters Estimation of the Probability Density Function of noise models · · · · ·	45
4.4	Joint Estimation of the Probability Density Function and the Non-linear Function · · · · ·	49
4.5	Related Matlab code · · · · ·	52
5	Parameters Estimation of noise models based on Characteristic Functions · · · · ·	57
5.1	Introduction · · · · ·	57
5.2	Parameters Estimation of the Class A model based on the Characteristic Function · · · · ·	58
5.2.1	The Characteristic Function of the Class A model · · · · ·	58
5.2.2	Development of the Algorithm · · · · ·	59
5.2.3	Simulation Results and Analysis · · · · ·	60
5.3	Maximum Likelihood Estimation of the Class A model's parameters based on the Characteristic Function · · · · ·	61
5.3.1	FFT Form of the Probability Density Function · · · · ·	62
5.3.2	Maximum Likelihood Estimation · · · · ·	64
5.3.3	Simulation Results and Analysis · · · · ·	65
5.4	Parameters Estimation of the Class B model · · · · ·	66
5.4.1	Class B noise model · · · · ·	66
5.4.2	Development of the algorithm · · · · ·	67

5.4.3	Simulation Results and Analysis · · · · ·	69
5.5	Nonlinear Regression-Type Estimation of the Parameters of the Class B Noise Model · · · · ·	71
5.5.1	Nonlinear Regression-Type Estimation · · · · ·	72
5.5.2	The Estimation of the initial value and the Generation of $\{\lambda_k\}$ · · ·	73
5.5.3	Simulation Results and Analysis · · · · ·	74
5.6	Related Matlab code · · · · ·	76
6	Parameters Estimation of noise models through MCMC algorithms · · · · ·	82
6.1	Parameters Estimation of the Mixture models by MCMC algorithms ·	82
6.1.1	The Product Property of the α stable distribution · · · · ·	82
6.1.2	The Mixture Model · · · · ·	83
6.1.3	Bayesian Hierarchical Model and Prior Distributions · · · · ·	83
6.1.4	MCMC algorithms · · · · ·	84
6.1.4.1	Updating weights w through the Gibbs sampling · ·	85
6.1.4.2	Updating parameters γ through the Gibbs sampling · · · · ·	85
6.1.4.3	Updating parameters σ^{-2} through the Gibbs sampling · · · · ·	85
6.1.4.4	Updating parameters α through the Metropolis- Hastings sampling · · · · ·	85
6.1.4.5	Updating parameters κ, β through the Gibbs sampling · · · · ·	86
6.1.4.6	Updating the label variables z · · · · ·	86
6.1.4.7	Updating the variables λ through the Metropolis- Hastings sampling · · · · ·	86
6.1.5	Simulation Results and Analysis · · · · ·	87
6.2	MAP Estimation of Parameters of the Class A model · · · · ·	87
6.2.1	Development of the algorithm · · · · ·	88
6.2.2	Simulation Results and Analysis · · · · ·	90
6.3	Related Matlab code · · · · ·	92
7	Parameters Estimation of the M-Class A noise model ·	97
7.1	Introduction · · · · ·	97
7.2	M-Class A noise model · · · · ·	98

7.3	Parameters Estimation of the M-Class A noise model by MCMC algorithms · · · · ·	101
7.3.1	Development of the algorithm · · · · ·	101
7.3.2	Simulation Results and Analysis · · · · ·	105
7.4	Parameters Estimation of the M-Class A noise model by PMC algorithms · · · · ·	106
7.4.1	Population-based Monte Carlo algorithm · · · · ·	107
7.4.2	Parallel Computation Design of the algorithm by CUDA schemes · ·	109
7.5	Related Matlab code · · · · ·	115
8	Discussion about some topics on the design of ELF receivers · · · · ·	123
8.1	Introduction · · · · ·	123
8.2	The Design of Encoders and Decoders · · · · ·	123
8.2.1	The Choice of Encoders · · · · ·	124
8.2.2	The Scheme of Encoders · · · · ·	125
8.2.3	The Generator Polynomials of Encoders · · · · ·	125
8.2.4	The Algorithm of Decoders · · · · ·	127
8.3	The Design of Modulators and Demodulators · · · · ·	127
8.4	The Anti-interference Design · · · · ·	129
8.5	Synchronizer and Interleaver · · · · ·	130
8.6	Signal processing in receivers · · · · ·	133
8.7	Conclusion · · · · ·	135
Appendix A	The derivative of the amplitude probability distribution of Class A and Class B model · · · · ·	136
A.1	The narrow receiver conditions · · · · ·	137
A.2	The characteristic function of the Class A model · · · · ·	139
A.3	The characteristic function of the Class B model · · · · ·	140
A.4	The amplitude probability distribution of Class A and Class B model	142
References	· · · · ·	144