



国防科技图书出版基金

通信混合信号盲分离 理论与技术

Theory and Technology on Blind Source
Separation of Communication Signals

■ 万 坚 涂世龙 廖灿辉 陈绍贺 朱中梁 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press





国防科技图书出版基金

通信混合信号盲分离 理论与技术

**Theory and Technology on Blind Source
Separation of Communication Signals**

万 坚 涂世龙 廖灿辉 陈绍贺 朱中梁 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

通信混合信号盲分离理论与技术 / 万坚等编著.

—北京:国防工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-118-08217-3

I. ①通... II. ①万... III. ①通信系统 - 混合信号 - 信号盲分离 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 178997 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 369 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治

(按姓氏笔画排序)

甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

盲分离是信号处理领域中的热点和难点问题,在生物医学、语音、图像、通信等领域里有广泛的应用。随着通信技术的发展和电磁环境的日益复杂,通信领域中的混合信号越来越多,如相邻卫星靠得过近会形成邻星信号干扰,信号日益密集会造成同频信号混合等。这类信号一方面极大地影响了系统的接收性能;另一方面是两个或两个以上信号的混合,传统的单信号处理方法不再适应,因此迫切需要研究有效的处理方法。本书主要针对通信混合信号的特点,力图较全面系统地研究阐述通信混合信号盲分离的相关理论与算法,并尽量贴近实际应用,以期给从事通信、电子等信号处理专业的研究生或工程师一些帮助。

依据接收天线的个数,混合信号盲分离方法可分为两类,一类是采用阵列天线进行接收,用多通道方法对混合信号进行分离。多通道分离是传统盲分离研究的内容,目前已有较为成熟的理论与方法,本书不作详细介绍,仅为了保持全书内容的完整性,列举了最为经典的几种算法,将重点放在欠定盲分离以及数字调制混合信号的盲分离上。欠定盲分离是指接收天线个数少于待分离源信号个数的一类非适定问题,需增加约束条件求解,本书给出了一些求解方法;数字调制混合信号盲分离可充分利用调制信号特点来提升盲分离性能,且对分离过程中引起的噪声放大进行抑制也是实际应用中必须解决的问题。

另一类混合信号盲分离方法是采用单天线进行接收,用单通道方法对混合信号进行分离。多通道分离在实际应用中存在很多局限,如部署的天线多、成本高,某些情况下地理位置的限制使得部署多部天线极为困难,一些场景只能采用单通道分离方法进行处理等,这使得混合信号单通道分离日益重要。由于研究难度大,国内外在这方面起步很晚,已有书籍中也很少涉及。作者在这方面进行了多年攻研,积累了丰富的理论和经验。本书将结合作者多年研究,系统地混合信号单通道识别、参数估计、分离性能界以及各种条件下的分离算法等进行详细介绍。此部分内容是全书内容的核心,我们将用尽可能多的篇幅介绍相关研究成果。

全书分为4篇13章。

第1篇,通信混合信号盲分离概述,包括第1章,介绍了混合信号盲分离的模型和应用背景,从多通道和单通道两方面分析了混合信号处理技术的难点及发展现状。

第2篇,多通道处理理论与技术,包括第2~4章。第2章介绍了正定(超定)混合信号分离模型,给出了几种典型的源信号个数估计方法及盲分离的分离准则和优化方法。第3章介绍了欠定条件下的源信号个数估计方法,以及基于聚类、检索平均和ICA的欠定混合信号分离方法。第4章针对数字调制混合信号研究了对应的分离算法,分析了噪声对混合信号分离的影响,并结合数字调制信号特点给出了能有效抑制噪声的分离算法。

第3篇,单通道处理理论与技术,包括第5~11章。第5章先介绍了混合信号的单通道识别方法,用于将混合信号与单信号区分开。混合信号识别是混合信号处理首先需要解决的问题,只有先将混合信号与单信号区分开,后端才可能采用针对性的算法进行处理。第6章利用两个源信号在单个参数上的差异进行分离,如时延差异、符号速率差异、幅度差异等。单通道分离是一个高度欠定问题,需要根据源信号特点,充分挖掘分量信号间的差异来实现分离。相关研究是一个循序渐进的过程,本章介绍的是早期研究中采用的一些方法,主要是利用单个调制参数上的差异,通过提取、放大这些差异,来实现满足特定条件信号的分离。第7章从理论上分析了通信信号单通道盲分离的条件以及影响盲分离性能的相关因素,定量推导了这些因素与盲分离性能间的关系式。人们在盲分离研究过程中发现,单通道盲分离在某些情况下分离性能较好,在另一些情况下分离性能较差,甚至不能分离,因此研究单通道盲分离的性能界十分重要,本章的一些结论可以作为研究盲分离算法的参考。第8章介绍混合信号参数估计算法,用于提供盲分离算法启动所需的初始参数设置。由于需要从一路混合信号出发估计出两路源信号参数,而信号间存在相互干扰,因此传统适用于单信号的参数估计算法性能变差,甚至有可能不再适应。第9章介绍了基于粒子滤波的单通道盲分离算法,采用联合参数估计与序列检测的思想来实现分离。该方法利用了多参数间存在的差异,相比早期方法分离效果大大改善,且能对参数的变化进行跟踪,在时变场合下仍然有效,大大拓展了应用范围。第10章是针对粒子滤波算法复杂度大难以实现进行的改进,引入了逐留存路径的思想来解决盲分离问题,在保证性能的同时有效降低了复杂度,更便于工程实现。第11章是在提高单通道盲分离性能方面所做的努力。单通道盲分离需要从一路混合信号中恢

复出两路源信号信息,分离性能往往较差,而分析表明,利用编码约束是提高盲分离性能的有效途径。本章研究了编码辅助下的分离算法,就盲分离中如何利用以及通过什么样的方式利用编码信息进行探索。本篇建立了从前端识别、参数估计到后端分离的完整单通道处理流程,特别是便于理论分析而推导的性能界,便于工程应用而提出的低复杂度算法、编码辅助算法等,使得盲分离理论更完整,更符合实际工程场景。

第4篇,盲分离应用,包括第12~13章。第12章介绍了卫星信号在受到邻星干扰时的干扰分离方案。第13章针对星载AIS信号接收时面临的同频干扰问题,给出干扰检测及分离方法。本篇选取2类典型场景,结合混合信号产生机理和特点,介绍相关理论与算法在实际中的应用,意在给读者一些思路上的启示。

作者所在的研究团队长期从事混合信号盲分离方面的研究,具有多年科研实践的经验和解决实际问题的能力。本书是在团队多年研究成果积累的基础上整理而成,充分反映了通信混合信号盲分离,尤其是单通道盲分离方面的新理论、新方法和新应用。本书第1、12章由万坚编写,第7、8、9章由涂世龙编写,第2、5、6、10、11章由廖灿辉编写,第3、4、13章由陈绍贺编写。全书由中国科学院朱中梁院士统稿。

本书的编写得到了多位专家、领导、同仁的支持、关心和帮助。中国工程院叶尚福院士和陈鲸院士在百忙之中认真审阅了书稿,给予了详细的指导并撰写了出版推荐意见;郑辉研究员对盲分离方向的研究和发展做出了突出贡献,作者取得的成绩离不开他的指导;重点实验室的孙正波常务副主任、赵艳副主任、刘国才副主任等对本书的编写给予了大力支持;实验室研究生辛吉荣等参与了部分文字的编排和校对工作,在此,一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请各位专家、同仁和广大读者批评指正。

作 者

2012年3月于四川成都

目 录

第 1 篇 盲分离概述

第 1 章 通信混合信号盲分离概述	1
1.1 混合信号盲分离的提出与发展	1
1.2 混合信号盲分离的模型与定义	3
1.2.1 多通道盲分离的模型与定义	3
1.2.2 单通道盲分离的模型与定义	8
1.3 混合信号多通道盲分离	13
1.3.1 空域分离方法	13
1.3.2 盲分离方法	15
1.4 混合信号单通道盲分离	16
1.4.1 混合信号单通道识别	17
1.4.2 非对称混合信号分离算法	18
1.4.3 对称混合信号分离性能界	20
1.4.4 对称混合信号分离算法	21
1.5 混合信号盲分离技术的应用	24
参考文献	29

第 2 篇 多通道处理理论与技术

第 2 章 正定(超定)混合信号盲分离	36
2.1 引言	36
2.2 信号源个数估计	37
2.2.1 矩阵分解法	37
2.2.2 基于信息论准则的算法	38
2.2.3 基于盖尔圆准则的算法	41
2.3 独立性准则	46
2.3.1 互信息最小化准则(MMI)	47

2.3.2	信息最大化准则 (Infomax)	48
2.3.3	非高斯最大化准则	50
2.4	主要分离算法	51
2.4.1	联合对角化算法 (JADE)	51
2.4.2	信息最大化算法 (Infomax)	54
2.4.3	等变自适应分解算法 (EASI)	56
2.4.4	固定点算法 (FastICA)	58
2.5	小结	60
	参考文献	61
第3章	欠定混合信号盲分离	63
3.1	引言	63
3.2	信号源个数估计	63
3.2.1	基于稀疏性的方法	63
3.2.2	基于空间虚拟延迟抽头的方法	67
3.2.3	基于高阶累积量的方法	71
3.3	典型盲分离算法	73
3.3.1	基于比率矩阵聚类的欠定盲分离算法	74
3.3.2	基于检索平均的欠定盲分离算法	80
3.4	小结	83
	参考文献	83
第4章	数字调制混合信号盲分离	86
4.1	引言	86
4.2	复数信号盲分离	87
4.2.1	基于盲分离的载波相位估计	87
4.2.2	复数信号分离的相位不确定性	88
4.2.3	去除相位模糊的约束算法	90
4.2.4	性能仿真与分析	91
4.3	已有 ICA 方法的不足: 噪声放大	93
4.3.1	含噪声混合信号模型	93
4.3.2	基于负熵的 FastICA 算法	94
4.3.3	矩阵条件数对源信号估计的影响	95
4.3.4	性能仿真与分析	96
4.4	基于有限符号集特征的噪声抑制分离	100

4.4.1 算法原理	100
4.4.2 性能仿真与分析	102
4.5 小结	103
参考文献	103

第3篇 单通道处理理论与技术

第5章 混合信号单通道识别	105
5.1 引言	105
5.2 对称混合信号识别:瞬时包络、谱线和星座特征	107
5.2.1 瞬时包络特征	107
5.2.2 谱线特征	109
5.2.3 星座零点聚类特征	110
5.3 对称混合信号识别:累积量和似然特征结合	112
5.3.1 数据预处理	112
5.3.2 累积量和似然特征提取	113
5.3.3 识别算法及性能	118
5.4 对称混合信号识别:累积量和谱线特征结合	122
5.4.1 累积量代价函数	122
5.4.2 四次方谱线特征	124
5.5 非对称混合信号识别:观测信噪比和有效信噪比	125
5.5.1 两类信噪比定义	126
5.5.2 用奇异值分解法估计观测信噪比	127
5.5.3 用最大似然法估计有效信噪比	128
5.6 非对称混合信号识别:时域特征和频域特征结合	130
5.6.1 数据预处理	130
5.6.2 带宽比 B 小于 0.5 时	132
5.6.3 带宽比 B 大于 0.5 时	134
5.6.4 检测算法流程	136
5.7 小结	138
参考文献	139
第6章 利用单参数差异的混合信号盲分离	141
6.1 引言	141
6.2 利用时延差异的时延多址分离算法	142

6.2.1	过采样构造矩阵方程	142
6.2.2	矩阵方程求解及推广	144
6.3	利用成形脉冲差异的多通道构造算法	145
6.3.1	成形脉冲已知时的简化方法	146
6.3.2	基于频域解卷积的盲分离方法	147
6.3.3	转化成瞬时时域混合的盲分离方法	150
6.4	利用符号速率差异的小波变换分离算法	151
6.4.1	算法原理及预备知识	152
6.4.2	小波变换分离算法	153
6.5	利用幅度差异的波形重构分离算法	157
6.5.1	波形重构抵消的理论分析	158
6.5.2	符号无误恢复下的波形重构分离	163
6.5.3	符号有误恢复下的波形重构分离	171
6.6	小结	174
	参考文献	174
第7章	混合信号单通道盲分离理论	177
7.1	引言	177
7.2	单通道盲分离的理论解释	177
7.2.1	从传统盲分离角度看单通道盲分离——向量分解解释	178
7.2.2	从通信角度看单通道盲分离——信息论解释	178
7.2.3	从通信角度看单通道盲分离——调制传输理论解释	180
7.3	符号估计的性能界——联合界	185
7.3.1	性能联合界	185
7.3.2	性能联合界的计算	188
7.4	参数估计的性能界——克拉美劳界	191
7.4.1	确定参数的 CRB 界	191
7.4.2	随机参数的 PCRB 界	193
7.5	参数对分离性能的影响	194
7.5.1	幅度比对分离性能的影响	194
7.5.2	相差对分离性能的影响	194
7.5.3	频差对分离性能的影响	196
7.5.4	时延对分离性能的影响	196
7.6	小结	199

附录 A $\delta^2(\varepsilon)$ 的性质的证明	199
参考文献	202
第 8 章 混合信号的参数初估计	203
8.1 引言	203
8.2 符号速率与载波频率估计	203
8.3 定时	206
8.4 幅度、初始相位与时延的盲估计	210
8.4.1 幅度估计	211
8.4.2 初始相位估计	214
8.4.3 时延估计	215
8.5 幅度、初始相位与时延的半盲估计	221
8.6 小结	224
参考文献	225
第 9 章 基于粒子滤波的混合信号盲分离	226
9.1 引言	226
9.2 粒子滤波算法的基本原理	227
9.2.1 序列蒙特卡罗方法	228
9.2.2 序列重要性采样	230
9.2.3 粒子多样性匮乏:重采样	231
9.3 相同符号速率下的盲分离	234
9.3.1 状态空间模型	235
9.3.2 序列蒙特卡罗采样	236
9.3.3 权重更新公式的计算	237
9.3.4 性能仿真与分析	240
9.4 不同符号速率下的盲分离	242
9.4.1 状态空间模型	242
9.4.2 粒子滤波盲分离	244
9.4.3 性能仿真与分析	246
9.5 用过采样提高盲分离性能	248
9.6 小结	250
参考文献	250
第 10 章 基于 PSP 的混合信号盲分离	253
10.1 引言	253

10.2	PSP 算法的基本原理	254
10.2.1	从传统 MLSE 到 PSP	254
10.2.2	PSP 的几种典型应用	256
10.3	PSP 用于混合信号盲分离	259
10.3.1	用 PSP 进行盲分离	259
10.3.2	性能仿真与分析	261
10.3.3	与粒子滤波算法的比较	262
10.4	PSP 盲分离的软输出计算	263
10.4.1	非二元码的软输出	263
10.4.2	PSP 盲分离的软输出	266
10.5	自适应减少留存路径数的 PSP 盲分离	268
10.5.1	降低复杂度的可能途径	268
10.5.2	自适应减少留存路径数的盲分离	270
10.5.3	性能仿真与分析	273
10.6	能提供软输出的减路径盲分离	274
10.6.1	减路径下的软输出计算	274
10.6.2	性能仿真与分析	277
10.7	小结	278
	参考文献	279
第 11 章	编码辅助下的混合信号盲分离	281
11.1	引言	281
11.2	短码辅助下的粒子滤波联合分离译码	282
11.2.1	联合分离译码实现	283
11.2.2	性能仿真与分析	284
11.3	短码辅助下的 PSP 联合分离译码	286
11.3.1	联合分离译码实现	286
11.3.2	性能仿真与分析	288
11.4	长码辅助下的迭代分离译码	289
11.4.1	迭代分离译码原理	290
11.4.2	迭代分离译码算法	293
11.4.3	性能仿真与分析	294
11.5	TPC 码辅助下的迭代分离译码	296
11.5.1	TPC 码编译码原理	296

11.5.2 迭代分离译码算法	298
11.5.3 性能仿真与分析	300
11.6 基于波形重构的迭代分离译码	302
11.6.1 迭代原理	302
11.6.2 关键模块说明	302
11.6.3 性能仿真与分析	306
11.7 小结	307
参考文献	308

第4篇 盲分离应用

第12章 邻星干扰抑制与抵消	309
12.1 引言	309
12.2 传输模型描述	312
12.3 盲分离模型分析	312
12.4 仿真计算	315
参考文献	317
第13章 星载 AIS 突发混合信号盲分离	319
13.1 引言	319
13.2 星载 AIS 混合信号接收特性分析	321
13.3 盲分离提升星载 AIS 检测性能的分析	325
13.4 AIS 混合信号的单通道盲分离	329
13.4.1 单通道盲分离实现	329
13.4.2 盲分离性能仿真与分析	330
13.4.3 盲分离下的 AIS 检测性能分析	332
13.5 AIS 混合信号的多通道盲分离	335
13.6 小结	337
参考文献	338

Contents

Part I Introduction

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The History of Blind Separation	1
1.2 Models and Definitions of Mixed Signals	3
1.2.1 Multi-Channel Case	3
1.2.2 Single-Channel Case	8
1.3 Multi-Channel Blind Separation	13
1.3.1 Methods in Space Domain	13
1.3.2 Methods Based on Blind Separation	15
1.4 Single-Channel Blind Separation	16
1.4.1 Identification of Mixed Signals	17
1.4.2 Separation Algorithms for Nonsymmetric Signals	18
1.4.3 Separation Performance Limit of Symmetric Signals	20
1.4.4 Separation Algorithms for Symmetric Signals	21
1.5 Applications	24
References	29

Part II Theory and Technology of Multi-Channel Processing

Chapter 2 Determined (Overdetermined) Blind Separation	36
2.1 Introduction	36
2.2 Source Number Estimation	37
2.2.1 Algorithms using Matrix Decomposition	37
2.2.2 Algorithms Based on Information Theoretic Criteria	38
2.2.3 Algorithms using Gerschgorin Radii	41
2.3 Independent Criteria	46
2.3.1 Minimization of Mutual Information	47
2.3.2 Information Maximization Criteria	48