



平行因子分析理论

及其在通信和信号处理中的应用

平行因子分析属于多线性代数范畴，是高维数据阵的一种低秩分解方法。作为信号处理中一种新方法，因其良好的性能而倍受关注。

张 小 飞 刘 旭 王 成 华 等 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

平行因子分析理论及其 在通信和信号处理中的应用

张小飞 刘 旭 王成华 李建峰 许凌云 徐大专 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了平行因子分析理论及其在通信和信号处理中的应用。平行因子 (Parallel Factor, PARAFAC) 分解属于多线性代数范畴。平行因子分析也称三线性和多线性分解。一般而言, 矩阵分解 (双线性分解) 不是唯一的, 除非施加约束性条件 (正交性、Vandermonde、Toeplitz 和恒模特性等)。PARAFAC 可以看成三维或高维数据阵的低秩分解, PARAFAC 模型的本质特征就是其唯一性。在合适的条件下, PARAFAC 模型本质上是唯一的。平行因子是一种多维数据处理方法, 它充分利用信号的代数性质和分集特性对接收信号进行处理, 并通过多维数据的拟合得到信号处理中需要的各种信息。近年来, 基于 PARAFAC 的信号处理方法因其良好的性能而备受关注, 并已成为通信信号处理中一种新的研究手段。本书详细介绍 PARAFAC 理论数学基础、 k -秩、可辨识性、PARAFAC 分解算法、PARAFAC 分解的 CRB 分析、自适应 PARAFAC 分解、大规模 PARAFAC 分解、扩展 PARAFAC 模型、平行因子压缩感知框架和 PARAFAC 在通信和信号处理中的应用。

本书适合通信与信息系统、信号和信息处理、微波和电磁场、水声等专业的本科高年级学生和研究生阅读。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

平行因子分析理论及其在通信和信号处理中的应用 / 张小飞等著. —北京: 电子工业出版社, 2014.8
ISBN 978-7-121-23735-5

I. ①平… II. ①张… III. ①多线性代数—应用—通信 ②多线性代数—应用—信号处理 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 146703 号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 14.75 字数: 366 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版

印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 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。

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

服务热线: (010) 88258888。

前言

本书介绍了平行因子分析理论及其在通信和信号处理中的应用。平行因子 (Parallel Factor, PARAFAC) 分解属于多线性代数范畴。一般而言, 矩阵分解 (双线性分解) 不是唯一的, 除非施加约束性条件 (正交性、Vandermonde、Toeplitz 和恒模特性等)。PARAFAC 可以看成三维或高维数据阵的低秩分解, PARAFAC 模型的本质特征就是其唯一性。在合适的条件下, PARAFAC 模型本质上是唯一的。平行因子是一种多维数据处理方法, 它充分利用信号的代数性质和分集特性对接收信号进行处理, 并通过多维数据的拟合得到信号处理中需要的各种信息。近年来, 基于 PARAFAC 的信号处理方法因其良好的性能而备受关注, 并已成为通信信号处理中一种新的研究手段。本书详细介绍 PARAFAC 理论数学基础、 k -秩、可辨识性、PARAFAC 分解算法、PARAFAC 分解的 CRB 分析、自适应 PARAFAC 分解、PARAFAC 模型的扩展和 PARAFAC 在通信和信号处理中的应用。

从 2003 年本书编写小组开展平行因子分析理论及其在通信和信号处理中应用的研究, 历经了 10 多年。本课题组在国内较早研究平行因子分解理论及其在通信和信号处理中的应用。此方面研究得到国家自然科学基金、教育部博士点基金、江苏省博士后基金、中国博士后基金和重点实验室开放课题资助, 培养了 3 名博士生和 11 名硕士生。在平行因子分析理论及其在通信和信号处理中应用方面发表论文 50 多篇, 其中 SCI 检索 30 多篇。平行因子理论有一定突破, 将平行因子方法成功应用于 CDMA 系统的盲信号检测、OFDM 系统中信号检测和参数估计、二维扩频系统的盲信号检测、MC-CDMA 系统的多用户检测、阵列参数估计、极化敏感阵列信号处理、声矢量传感器阵列和 MIMO 雷达参数估计等。

本书从 2011 年开始动笔, 2014 年完成, 写作历经了 3 年。该书在编写过程中, 参考了大量的著作和论文, 在此表示感谢。本书得到了厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室开放课题项目资助, 在此表示感谢。

本书由张小飞教授、刘旭副教授、王成华教授、李建峰博士、徐大专教授和许凌云博士执笔。刘旭副教授编写了 3.1~3.5、4.3~4.5 节, 徐大专教授和许凌云博士编写了第 5 章

部分内容，其他内容由张小飞教授、王成华教授和李建峰博士完成。在该书写作过程中我们参考了大量学术论文，在此对论文作者表示感谢。在本书编写过程中，还得到了冯宝、王大元、余俊、是莺、冯高鹏、孙中伟、陈未央、吴海浪、陈晨、黄殷杰、王方秋、陈翰、杨刚、曹仁政、余骅欣、蒋驰、周明、张立岑、李书等历届硕士研究生和博士研究生的帮助。

本书作者感谢国家自然科学基金项目（项目号：61371169，61301108）支持。

由于时间仓促，水平有限，加上这一领域仍然处于迅速发展之中，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月

符号说明

CMA	恒模算法
CDMA	码分多址
CRB	克拉美-罗界
CS	压缩感知
DOA	波达方向
ESPRIT	借助旋转不变性的信号参数估计
EVD	特征值分解
JADE	联合对角化
LS	最小二乘
LMS	最小均方
MMSE	最小均方误差
MUSIC	多重信号分类
ML	最大似然
MIMO	多输入多输出
OFDM	正交频分复用
PCA	主分量分析
PM	传播算子
PARAFAC	平行因子
PARALIND	基于线性相关平行因子模型
RLS	递归最小二乘
RMSE	求根均方误差
SDMA	空分多址
SNR	信噪比

续表

SVD	奇异值分解
TALS	三线性交替最小二乘
ULA	均匀线阵
UCA	均匀圆阵
Real()	取实部
Imag()	取虚部
diag(.)	表示对角化
$(\cdot)^T$	表示转置
$(\cdot)^H$	表示共轭转置
$(\cdot)^*$	表示复共轭
$(\cdot)^+$	表示广义逆
$(\cdot)^{-1}$	表示逆
$\ \cdot\ _F$	Frobenius 范数
angle($\cdot$)	取相位
$A \otimes B$	为 Kronecker 积
$A \odot B$	为 Khatri–Rao 积
$A \oplus B$	为 Hadamard 积
$a \circ b$	外积
vec($\cdot$)	向量化算子
$E[\cdot]$	求数学期望
tr($\cdot$)	矩阵的迹
det($\cdot$)	矩阵的行列式
$D_m(\cdot)$	由矩阵的 m 行构造的一个对角矩阵
$\mathbf{1}_{N \times M}$	表示 $N \times M$ 全 1 的矩阵
I_K	表示 $K \times K$ 的单位阵

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 多维矩阵低秩分解	1
1.2 平行因子模型研究现状	2
1.2.1 平行因子模型在通信和信号处理中的应用	2
1.2.2 PARAFAC 分解算法改进	3
1.2.3 PARAFAC 模型的扩展	3
1.2.4 本课题组的工作	4
1.3 本书的安排	4
参考文献	5
第 2 章 数学基础	13
2.1 矩阵代数的相关知识	13
2.1.1 特征值与特征向量	13
2.1.2 广义特征值与广义特征向量	13
2.1.3 矩阵的奇异值分解	14
2.1.4 Toeplitz 矩阵	14
2.1.5 Hankel 矩阵	15
2.1.6 Vandermonde 矩阵	15
2.1.7 Hermitian 矩阵	15
2.1.8 Kronecker 积	16
2.1.9 Khatri-Rao 积	17
2.1.10 Hadamard 积	17
2.1.11 向量化	18
2.1.12 外积	18
2.2 张量代数基础	19
2.2.1 张量代数定义和表示	19
2.2.2 张量的特殊形式	22
2.3 PARAFAC 模型	23
2.3.1 PARAFAC 模型表示	23
2.3.2 PARAFAC 模型的其他表示形式	24
2.4 PARAFAC 分解唯一性	27

2.4.1 矩阵本质相等.....	27
2.4.2 二维矩阵低秩分解不唯一性	29
2.4.3 PARAFAC 分解唯一性.....	29
2.5 本章小结	30
参考文献	30

第3章 PARAFAC 基本理论.....31

3.1 PARAFAC 模型.....	31
3.1.1 三线性模型	31
3.1.2 四线性模型或多线性模型	32
3.2 k -秩	33
3.3 可辨识性	34
3.4 PARAFAC 分解.....	35
3.4.1 三线性交替最小二乘.....	35
3.4.2 平行因子的快速算法.....	36
3.4.3 四线性分解和四线性交替最小二乘.....	39
3.4.4 基于正交约束 PARAFAC 分解.....	41
3.4.5 结构约束 PARAFAC 分解.....	43
3.5 PARAFAC 分解的 CRB 分析.....	50
3.5.1 三线性分解的 CRB 求解	51
3.5.2 约束 CRB 的求解算法.....	55
3.5.3 “首行已知”约束下三线性分解的 CRB 求解	55
3.5.4 恒模约束下三线性分解的 CRB 求解.....	57
3.5.5 有限字符约束下三线性分解的 CRB 求解.....	58
3.5.6 四线性分解的 CRB 求解	59
3.6 自适应 PARAFAC 分解.....	62
3.6.1 多线性代数基础.....	62
3.6.2 问题阐述	63
3.6.3 基本思想简介.....	64
3.6.4 窗的选取	66
3.6.5 PARAFAC-SDT 算法.....	67
3.6.6 PARAFAC-RLST 算法	71
3.6.7 初始化	74
3.7 大规模 PARAFAC 分解.....	75
3.7.1 张量符号与基本模型.....	75
3.7.2 动态张量分解.....	77
3.7.3 网格 PARAFAC	80
3.8 本章小结	83
参考文献	83

第4章 扩展 PARAFAC 模型	86
4.1 PARALIND 模型	86
4.1.1 PARALIND 模型和分解	86
4.1.2 PARALIND 模型的唯一性	87
4.2 块状 PARAFAC	88
4.2.1 块状 PARAFAC 模型	88
4.2.2 块状 PARAFAC 分解	90
4.3 PARAFAC2	91
4.3.1 PARAFAC2 模型	91
4.3.2 PARAFAC2 分解	92
4.4 PARATUCK2	92
4.4.1 PARATUCK2 模型	92
4.4.2 PARATUCK2 分解	93
4.5 TUCKER	93
4.5.1 TUCKER 模型	93
4.5.2 TUCKER 分解	95
4.6 本章小结	95
参考文献	95
第5章 PARAFAC 压缩感知模型	98
5.1 压缩感知基本原理	98
5.1.1 压缩感知的理论框架	99
5.1.2 矩阵秩最小化理论	101
5.2 PARAFAC 压缩感知理论	102
5.2.1 张量分解的基础	102
5.2.2 PARAFAC 压缩感知框架	103
5.2.3 平行因子模型填充	108
5.3 本章小结	109
参考文献	109
第6章 三线性分解在通信和信号处理中的应用	112
6.1 多天线 OFDM 系中一种基于三线性分解盲载波频偏估计算法	112
6.1.1 数据模型	112
6.1.2 算法原理	113
6.1.3 仿真结果	116
6.2 基于三线性分解的任意矢量传感器阵的二维波达方向估计	120
6.2.1 数据模型	121
6.2.2 三线性分解	122
6.2.3 可辨识性和唯一性	124

6.2.4	算法原理	124
6.2.5	仿真结果	126
6.2.6	小结	130
6.3	阵列天线 MC-CDMA 系统中基于平行因子技术的盲多用户检测算法	131
6.3.1	数据模型	131
6.3.2	阵列天线 MC-CDMA 系统中的盲多用户检测算法	132
6.3.3	仿真结果	134
6.4	单基地 MIMO 雷达中基于自适应 PARAFAC-RLST 的 DOA 跟踪算法	137
6.4.1	数据模型	137
6.4.2	利用自适应 PARAFAC-RLST 进行 DOA 跟踪	137
6.4.3	复杂度分析	140
6.4.4	仿真结果	140
6.5	基于非圆 PARAFAC 任意声矢量阵列下 2D-DOA 估计	143
6.5.1	数据模型	143
6.5.2	基于 NC-PARAFAC 的 2D-DOA 估计算法	144
6.5.3	CRB	148
6.5.4	仿真结果	152
	参考文献	155

第 7 章 四线性分解在通信和信号处理中的应用

7.1	基于四线性分解的均匀面阵的角度和频率联合估计	157
7.1.1	数据模型	157
7.1.2	平行因子四线性模型形成	159
7.1.3	算法描述	160
7.1.4	仿真结果	163
7.2	基于四线性分解的双基地 MIMO 雷达的角度和多普勒频率联合估计	165
7.2.1	双基地 MIMO 雷达时空数据模型	165
7.2.2	基于 PARAFAC 四线性分解的联合估计算法	167
7.2.3	仿真结果	170
	参考文献	173

第 8 章 PARALIND 分解在通信和信号处理中的应用

8.1	非同步 CDMA 系统的 PARALIND 多用户检测	174
8.1.1	数据模型	175
8.1.2	异步 CDMA 系统中基于 PARALIND 的盲空时多用户检测	177
8.1.3	仿真结果	179
8.2	多径下 CDMA 系统的 PARALIND 多用户检测	182
8.2.1	数据模型	182
8.2.2	盲 PARALIND 多用户检测	184
8.2.3	仿真结果	185

8.3	MIMO-OFDM 系统中基于 PARALIND 模型的盲信号检测	188
8.3.1	数据模型	188
8.3.2	基于 PARALIND 的盲符号检测算法	189
8.3.3	仿真结果	191
8.4	声矢量传感器阵列的基于 PARALIND 分解相干二维 DOA 估计算法	194
8.4.1	数据模型	195
8.4.2	相干二维角度估计	195
8.4.3	仿真结果	199
	参考文献	202
第 9 章	PARAFAC 压缩感知理论在通信和信号处理中的应用	204
9.1	基于 PARAFAC 压缩感知模型阵列信号检测	204
9.1.1	数据模型	204
9.1.2	利用三线性模型压缩感知的信号检测算法	205
9.1.3	仿真结果	207
9.2	MIMO 雷达中基于压缩感知平行因子分析的联合角度与多普勒频率估计	208
9.2.1	数据模型	208
9.2.2	联合角度与多普勒频率估计	209
9.2.3	性能分析	214
9.2.4	仿真结果	215
9.3	基于 PARAFAC 填充的面阵 DOA 估计	219
9.3.1	数据模型	219
9.3.2	利用 PARAFAC 填充的 DOA 估计	220
9.3.3	仿真结果	222
	参考文献	224

第1章

绪论

1.1 多维矩阵低秩分解

在线性代数中，“矩阵”是一个常见的概念，它一般具有两个维度，即“行”和“列”，矩阵中的元素可以由行值和列值唯一索引。通常情况下，称传统的矩阵为“二维矩阵”。将矩阵的概念扩展到多维，以三维矩阵 $\mathbf{X}$ 为例，它可以用一个立方体表示，三维矩阵中的元素 x_{ijk} 可以由其“行”、“列”和“高”唯一索引，如图 1.1.1 所示。

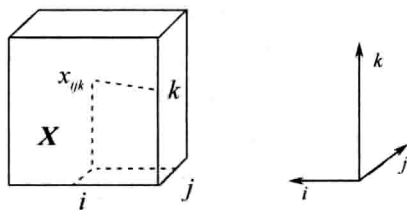


图 1.1.1 三维矩阵示意图

早在 19 世纪 40 年代，Cattell 就对三维矩阵低秩分解进行了研究，并将其列入“因子分析”的范畴。20 世纪 70 年代，Harshman 对多维矩阵低秩分解模型进行了深入研究，他将其命名为著名的平行因子（Parallel Factor, PARAFAC）模型^[1]，Carroll 和 Chang 在同一时间对其进行了研究，并独立地将之称为“规范分解模型”（Canonical Decomposition）^[2]。关于平行因子模型的具体内容将在第 2、3 章进行详细说明。

根据矩阵论的知识可知，在没有任何额外的约束条件时，二维矩阵低秩分解在矩阵的秩大于 1 的情况下是不唯一的。然而，与二维矩阵低秩分解不同，PARAFAC 分解具有分解

唯一特性, J. B. Kruskal 对此做出了重要贡献, 给出了 PARAFAC 模型的分解唯一性定理^[3]。自此, PARAFAC 模型受到了广泛的关注, 众多学者对 PARAFAC 模型的分解唯一性问题进行了研究^[4,5]。PARAFAC 模型的分解唯一性具有重要的应用价值, 通过 PARAFAC 模型的唯一分解可以无模糊地辨识模型参数。到目前为止, PARAFAC 模型作为一种数据分析工具已经广泛地应用于分析化学、心理学、食品学等领域^[6-8]。21 世纪初, PARAFAC 模型被成功地应用于信号处理领域^[9]。从此, 基于 PARAFAC 理论的信号处理技术以其良好的性能而备受关注。本书的后续章节将对 PARAFAC 信号处理技术进行研究, 下面, 简要介绍 PARAFAC 模型在通信和信号处理中的应用。在本书中平行因子分析也称三线性/多线性模型, 或三线性/多线性分解。

1.2 平行因子模型研究现状

1.2.1 平行因子模型在通信和信号处理中的应用

N.D.Sidiropoulos 最早将 PARAFAC 模型引入信号处理领域, 在文献[9]中将直接序列码分多址 (Direct Sequence-Code Division Multiple Access, DS-CDMA) 系统接收信号建模为 PARAFAC 模型, 并设计了新的盲多用户检测算法。该算法可以在信道衰落系数、用户扩频序列均未知的情况下实现多个用户信号的联合检测, 误码率性能仅比非盲的最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 多用户检测算法低约 3dB。近年来, 基于 PARAFAC 模型的信号处理思想引起了信号处理领域学者的关注, 研究成果主要集中在以下几方面。

(1) CDMA 系统的盲信号检测。PARAFAC 模型在 CDMA 系统中得到了广泛的应用。文献[10-17]将 PARAFAC 分析方法应用于不同的 CDMA 系统, 解决了多用户检测和参数估计等信号处理问题。基于 PARAFAC 模型的算法在处理 CDMA 信号时, 不需要知道任何用户的扩频码, 它可以实现所有接入用户信号的联合检测。基于上述思想, 文献[18]使用 PARAFAC 分析思想实现了 CDMA 系统小区外的接入用户的盲辨识。文献[19]对基于 PARAFAC 模型的 DS-CDMA 接收机性能进行了详细的仿真和分析。A.L.F. Almeida 运用多维矩阵低秩分解的思想对多天线 CDMA 系统进行了建模和分析^[20]。

(2) 阵列信号处理。PARAFAC 分析为阵列天线的波束成形提供了新的思路。N.D.Sidiropoulos 最早将矩形阵列接收信号建模为 PARAFAC 模型, 分别在数据域和子空间域对信号的角度参数进行了估计, 获得了良好的参数估计性能^[21]。近几年, PARAFAC 方法被应用于多种类型的天线阵列中, 如均匀线阵^[22-24]、均匀圆阵^[25,26]、L 形阵列^[27]、极化敏感阵列^[28-30]等。同时, 文献[31]从 PARAFAC 模型分解唯一性的角度分析了均匀线阵波束成形的参数可辨识条件。文献[32-34]给出了一类基于 PARAFAC 模型的近场源定位方法。阵列校准问题同样可以使用 PARAFAC 方法解决^[35]。

(3) 多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统。Yuaning Yu 将

PARAFAC 分析方法与高阶累积量相结合, 将 MIMO 信号的三阶/四阶累积量表示成 PARAFAC 模型, 实现了 MIMO 系统的盲信号检测和参数辨识^[36-40]。文献[41-43]使用 PARAFAC 分解对 MIMO 系统的信道进行了均衡和辨识, 得到了良好的效果。PARAFAC 模型的思想同样可以用于设计各种空时编码和空时频编码^[44-46], 接收端可以在信道衰落系数未知的情况下使用 PARAFAC 分解对编码信号进行解码, 同时实现满编码增益, 这是传统的空时编码所无法实现的。

(4) 其他。正交频分复用技术 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术是第四代移动通信的关键技术之一, 有学者研究表明, 运用 PARAFAC 分析的思想同样可以实现 OFDM 信号的频偏估计和盲信号检测^[47-49]。此外, PARAFAC 模型还可以解决语音分离^[50]、盲信号分离等问题^[51,52]。

1.2.2 PARAFAC 分解算法改进

在拓展 PARAFAC 分析方法在信号处理领域的的应用的同时, 提高算法的性能也是研究的重点之一。PARAFAC 模型的拟合通常使用三线性交替最小二乘算法 (Trilinear Alternative Least Square, TALS) 完成, TALS 是一种交替算法, 其收敛速度和拟合精度直接影响信号处理算法的性能。为了降低算法的运算复杂度, 文献[53]提出了因子压缩方法, 在模型拟合前先将数据在子空间域进行压缩, 然后对压缩后的数据进行拟合, 最后对拟合结果进行处理, 恢复到压缩前的数据空间, 压缩过程降低了算法复杂度。文献[54]根据 TALS 的线性变化性质提出了线性搜索方法 (Linear Search) 以加速 TALS 算法的收敛, 文献[55-56]对其进行可扩展, 提出了增强的线性搜索方法 (Enhanced Linear Search), 并将其成功地用于 DS-CDMA 系统的多用户检测中。有学者指出, 可以通过增加结构约束的方式提高算法的性能, 文献[57,58]将数据的独立性和非负性与 PARAFAC 分析方法相结合, 获得了性能上的提升。针对 PARAFAC 在 CDMA 系统中的应用, 文献[16,59]分别提出了 ITLAS 算法和 OCTALS 算法用于拟合具有 PARAFAC 模型形式的 CDMA 信号, 它们均可以有效地提高模型拟合的收敛速度和拟合精度。传统的基于 PARAFAC 模型的信号处理算法均为“块”算法, 它需要信道在一定时间内状态保持不变, 且复杂度较高。D.Nion 在 2009 年提出了基于 PARAFAC 模型的自适应信号处理算法^[60], 该算法可以跟踪信道状态的变化, 有效地降低了算法的运算复杂度, 为基于 PARAFAC 模型的信号处理技术开辟了新的研究方向。

1.2.3 PARAFAC 模型的扩展

在一些复杂的通信系统中, 虽然系统的接收信号符合三线性模型, 但是它们可能并不严格满足 PARAFAC 模型分解的唯一性条件, 甚至不满足 PARAFAC 模型的形式, 若使用 PARAFAC 模型对这些信号进行分析和处理, 无法得到正确的结果。此时, 需要对 PARAFAC 模型进行扩展。Harshman 在 1974 年提出了 PARAFAC 模型的扩展模型: PARAFAC2 模型^[61],

文献[62,63]对 PARAFAC2 模型进行了深入研究,并将其应用于故障检测和半导体诊断。R Bro 和 N.D.Sidiropoulos 提出了平行线性相关剖面 (Parallel Profile With Linear Dependences, PARALIND) 模型用以处理带有相关剖面的 PARAFAC 模型^[64,65],该模型可以对含有相关剖面的三维数据进行处理。文献[66,67]使用该模型解决了多径信道中的异步 CDMA 信号的多用户检测问题。De Lathauwer 从块状因子分析的角度考虑多维低秩分解问题,提出了基于块的高阶张量分解模型^[68-70],该模型可以应用于多种通信系统^[71-73]。A L.F. Almeida 博士对基于多维矩阵低秩分解的信号处理算法进行了深入的研究,相继提出了基于块的约束 PARAFAC 模型、约束张量模型和约束 Tucker3 模型对各种复杂的通信系统接收信号进行建模,设计了多种信号处理算法^[20,74-76]。文献[77]将通信信号的结构特征融入 PARAFAC 模型,设计了结构约束 PARAFAC 模型对通信信号进行表征,获得了良好的效果。

1.2.4 本课题组的工作

本课题组在国内较早研究平行因子分解理论及其在通信和信号处理中的应用。此方面研究得到了国家自然科学基金、教育部博士点基金、江苏省博士后科研资助计划项目、中国博士后基金、重点实验室开放课题资助。在此方面培养了两名博士生^[78,79]、11 名硕士生^[80-88]。本课题组在平行因子理论方面有一定突破^[78,79,89,90],并将 PARAFAC 应用到 CDMA 系统的盲信号检测^[12-16,66-67]、OFDM 系统中信号检测和参数估计^[47,84,88,92,95]、二维扩频系统的盲信号检测^[12,96]、多载波码分多址系统^[97]、阵列参数估计^[85,86,26,89,90,98-102]、极化敏感阵列信号处理^[25,29,30,80,83,103]、声矢量传感器阵列^[104-107]和 MIMO 雷达参数估计^[108-112]之中。

1.3 本书的安排

第 2 章介绍矩阵代数、张量代数和 PARAFAC 理论的基础知识,是后续章节的基础。

第 3 章研究 PARAFAC 模型、 k -秩、可辨识性、PARAFAC 分解算法、PARAFAC 分解克拉美-罗界分析 (Cramer-Rao Bound, CRB) 分析、自适应 PARAFAC 分解和大规模 PARAFAC 分解。

第 4 章研究扩展 PARAFAC 模型,如 PARALIND 模型、块状 PARAFAC、PARAFAC2、PARATUCK2 和 TUCKER。

第 5 章研究压缩感知基本原理,以及平行因子压缩感知理论。

第 6 章研究三线形分解理论在通信和信号处理中的应用;将自适应 PARAFAC 应用于 MIMO 雷达系统中,实现单基地 MIMO 雷达角度跟踪。研究一种非圆 (Non-Circular, NC) PARAFAC 算法,该算法可以用于任意声矢量阵列下非圆信号源的 2D-DOA 估计。

第7章就四线性分解理论在通信和信号处理中的应用,给出几个例子。

第8章研究 PARALIND 理论在通信和信号处理中的应用。

第9章研究 PARAFAC 压缩感知理论在通信和信号处理中的应用。

参考文献

- [1] Harshman R A. Foundations of the PARAFAC procedure: models and conditions for an “explanatory” multimodal factor analysis[J]. UCLA Working Papers in Phonetics, 1970, 16: 1-84.
- [2] Carroll J D, Chang J. Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an N-way generalization of “Eckart-Young” decomposition[J]. Psychometrika, 1970, 35 (3) : 283-319.
- [3] Kruskal J B. Three-way arrays: rank and uniqueness of trilinear decompositions, with application to arithmetic complexity and statistics[J]. Linear Algebra and its Applications, 1977, 18 (2) : 95-138.
- [4] Jiang T, Sidiropoulos N D. Kruskal’s permutation lemma and the identification of CANDECOMP/PARAFAC and bilinear models with constant modulus constraints[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52 (9) : 2625-2636.
- [5] Ten Berge J M, Sidiropoulos N D. On uniqueness in CANDECOMP/PARAFAC[J]. Psychometrika, 2002, 67 (3) : 399-409.
- [6] Do T, McIntyre N S. Application of parallel factor analysis and X-ray photoelectron spectroscopy to the initial stages in oxidation of aluminium[J]. Surface Science, 1999, 433: 136-141.
- [7] Bro R. PARAFAC. Tutorial and applications[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, 38 (2) : 149-171.
- [8] Rinnan Å. Application of PARAFAC on spectral data[D]. Copenhagen: Department of Food Science, Food Technology, Royal Veterinary and Agricultural University, PH.D. thesis, 2004.
- [9] Sidiropoulos N D, Giannakis G B, Bro R. Blind PARAFAC receivers for DS-CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48 (3) : 810-823.
- [10] Sidiropoulos N D, Dimic G Z. Blind multiuser detection in W-CDMA systems with large delay spread[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001, 8 (3) : 87-89.