


JINCHANGYUAN CANSHU  
GUJI LILUN YU FANGFA

# 近场源参数 估计理论与方法

王立国◎著

 吉林大学出版社

# 近场源参数估计理论与方法

王立国 著



吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

近场源参数估计理论与方法 / 王立国著. — 长春 :  
吉林大学出版社, 2017. 3

ISBN 978 - 7 - 5677 - 9213 - 5

I. ①近… II. ①王… III. ①参数估计 - 研究 IV.  
①O211.67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 069067 号

书 名 近场源参数估计理论与方法  
JINCHANGYUAN CANSHU GUJI LILUN YU FANGFA

作 者 王立国 著  
策划编辑 朱 进  
责任编辑 朱 进  
责任校对 朱 进  
装帧设计 美印图文  
出版发行 吉林大学出版社  
社 址 长春市朝阳区明德路 501 号  
邮政编码 130021  
发行电话 0431 - 89580028/29/21  
网 址 <http://www.jlup.com.cn>  
电子邮箱 [jdcbs@jlu.edu.cn](mailto:jdcbs@jlu.edu.cn)  
印 刷 北京市金星印务有限公司  
开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 13.25  
字 数 216 千字  
版 次 2017 年 5 月第 1 版  
印 次 2017 年 5 月第 1 次  
书 号 ISBN 978 - 7 - 5677 - 9213 - 5  
定 价 40.00 元

---

版权所有 翻印必究

## 作者简介

王立国,男,生于1977年5月,吉林省梨树县人。2000年于长春工业大学获学士学位,2007年于吉林大学获硕士学位,2011年于吉林大学获博士学位,现为北华大学信息技术与传媒学院副教授,硕士研究生导师,近年来,主持省级项目4项,参加省级以上项目10余项,在国内外发表EI检索论文10余篇。

## 前 言

信源定位问题是阵列信号处理中的一个重要的研究方向,它的任务是根据天线阵列接收到的数据估计出感兴趣信源的空间位置信息。根据信源与接收阵列之间的距离,信源定位可分为近场定位和远场定位,本书主要对近场源定位问题进行研究。

20世纪80年代至今,对信源定位技术的研究主要集中在远场源上,对于近场源参数估计理论方面的研究相对较少。近年来,对近场源参数估计理论方面的研究逐渐引起国内外学者的关注,成为阵列信号处理领域中的一个新的热点。经过十余年的发展,国内外很多学者对近场源参数估计问题进行了研究,取得了许多优秀的成果,但是在某些方面仍然存在很多问题亟待解决,如计算量、参数配对、估计精度、宽带非平稳信源等。

本书以二阶统计量、分数低阶统计量、分数阶傅里叶变换和四阶累积量为主要数学分析工具,分别从参数配对、阵列孔径、二维极化敏感阵列、非高斯噪声、计算量和宽带非平稳信号等几个方面对近场源的参数估计问题进行了深入的研究。本书主要内容及安排如下:

1. 介绍阵列信号处理技术的发展历史,综述近场源参数估计理论及国内外研究现状,提出近场源参数估计中有待于研究和解决的问题,确定本书的研究内容。

2. 介绍本书所用到的矩阵论方面的基础知识、极化敏感阵列的基础知识以及分数低阶统计量、二阶统计量和高阶累积量的定义和性质。

3. 研究标量传感器下基于四阶统计量的近场源定位算法,针对目前近场源定位算法中估计精度和计算复杂度等问题,提出了四种无需参数配对的近场源参数二维参数和三维参数估计算法:(1)基于四阶累积量和子空间分解的近场源方向角和距离二维参数联合估计算法,采用非中心对称均匀线阵,其特点是有效降低了阵列孔径的损失,无需参数配对,直接推导出待

估计参数的闭式解,降低了算法的复杂性;(2)将上述算法扩展到二维接收阵列,提出基于非中心对称十字阵列的近场源方位角、仰角和距离三位参数联合估计算法;(3)基于矩阵束的近场源方位角、仰角和距离三维参数联合估计算法,算法采用非中心对称十字阵列,其特点是不需要构造高维累积量矩阵,且矩阵束的广义特征值中包含参数配对信息,降低了算法的计算量和复杂度,减少了阵列孔径的损失;(4)基于白化降维技术的近场源方位角、仰角和距离三维参数联合估计算法,算法采用非中心对称十字阵列,其特点是无需构造高维累积量矩阵、参数自动配对,降低了算法的计算量和复杂度,提高了阵列孔径的利用率。

4. 研究二维极化敏感阵列下基于二阶统计量和四阶累积量的近场源五维参数联合估计算法:(1)基于二阶统计量和 TLS - ESPRIT 的近场源方向角、仰角、距离和极化信息等五维参数联合估计算法,采用中心对称的十字阵列,其特点是计算量小,估计精度高,且仅需要一次简单的参数配对;(2)基于四阶累积量和矩阵束的近场源方向角、仰角、距离和极化信息等五维参数联合估计算法,采用中心对称的十字阵列,其特点是不需要构造高维累积量矩阵,参数配对方法简单,具有较低的计算复杂度;(3)基于四阶累积量和子空间分解的近场源方向角、仰角、距离和极化信息等五维参数联合估计算法,采用非中心对称十字阵列,其特点是降低了阵列孔径损失,无需参数配对,直接推导出待估计参数的闭式解,降低了算法的复杂度;(4)基于四阶累积量和联合对角化的近场源方向角、仰角、距离和极化信息等五维参数联合估计算法,采用非中心对称十字阵列,其特点是不需要构造高维累积量矩阵,利用白化降维技术和联合对角化直接估计出信源参数,不需参数配对,有效地提高了阵列孔径的利用率,降低了算法的复杂度。

5. 研究了服从 稳定分布的冲击噪声下近场源方向角和距离二维参数联合估计问题,提出了一种基于分数低阶统计量的 FLOS - ESPRIT 算法,算法采用中心对称的均匀线阵,其特点是可以抑制冲击噪声对信号的影响,并且对加性高斯白噪声同样有效。

6. 对传播算子方法进行研究,提出两种基于传播算子的近场源方向角和距离二维参数联合估计算法:PM - MUSIC 和 PM - ROOT - MUSIC,其特点是利用传播算子估计出噪声子空间的最小二乘解代替由奇异值分解得到的正交解,达到降低计算量的目的。

7. 对近场宽带非平稳信源下的参数估计问题进行研究,提出了一种基

于 FRFT - MUSIC 的近场源方向角和距离二维参数联合估计算法,其特点是在较低的信噪比下仍具有较高的估计精度。

在本书编写过程中,虽然作者做出了不懈的努力,但是由于近场源参数估计仍在迅速发展,加之作者水平和经验有限,书中难免存在一定的不足之处,恳请各位专家批评指正。

本书受吉林省自然科学基金(20140101177JC)资助。

王立国

2016年12月

# 目 录

前言 .....	(1)
第1章 绪论 .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 研究历史与现状 .....	(4)
1.2.1 一维空间接收阵列模型 .....	(4)
1.2.2 标量传感器阵列近场源参数估计方法研究现状 .....	(7)
1.2.3 极化敏感阵列近场源参数估计方法研究现状 .....	(11)
1.2.4 循环平稳近场源参数估计方法研究现状 .....	(12)
1.2.5 宽带近场源参数估计方法研究现状 .....	(13)
1.2.6 近场源参数估计存在的问题 .....	(13)
1.3 本书研究主要内容 .....	(14)
第2章 基础知识 .....	(17)
2.1 矩阵代数相关知识 .....	(17)
2.1.1 特征值分解 .....	(17)
2.1.2 广义特征值分解 .....	(17)
2.1.3 奇异值分解 .....	(17)
2.1.4 M - P 广义逆 .....	(18)
2.1.5 Toeplitz 矩阵 .....	(18)
2.1.6 Hermitian 矩阵 .....	(19)
2.1.7 Kronecker 乘积 .....	(19)
2.2 高阶累积量 .....	(19)
2.2.1 高阶矩和高阶累积量 .....	(20)
2.2.2 高阶累积量的性质 .....	(21)
2.3 极化敏感阵列理论 .....	(22)
2.3.1 电磁波极化的物理意义 .....	(22)



2.3.2	电磁矢量传感器 .....	(24)
2.3.3	极化敏感阵列 .....	(24)
2.3.4	阵列工作模式 .....	(25)
2.3.5	阵列接收模型 .....	(25)
2.4	分数低阶统计量 .....	(26)
2.4.1	$\alpha$ 稳定分布概念 .....	(26)
2.4.2	分数低阶矩 .....	(27)
2.4.3	共变 .....	(28)
2.4.4	零阶矩 .....	(28)
2.4.5	$S_{\alpha S}$ 稳定分布随机过程基本性质 .....	(29)
2.5	分数阶傅里叶变换 .....	(29)
2.5.1	分数阶傅里叶变换定义 .....	(30)
2.5.2	分数阶傅里叶变换性质 .....	(30)
2.5.3	分数阶傅里叶变换特点 .....	(31)
2.6	循环统计量与高阶循环统计量理论 .....	(31)
2.6.1	循环相关函数 .....	(31)
2.6.2	高阶循环矩和高阶循环累积量 .....	(32)
2.6.3	循环累积量的特性 .....	(33)
2.7	多级维纳滤波器理论 .....	(34)
2.7.1	基本维纳滤波器 .....	(35)
2.7.2	多级维纳滤波器 .....	(35)
2.7.3	多级维纳滤波器特点 .....	(36)
2.8	本章小结 .....	(36)
第3章	基于四阶累积量的近场源参数估计 .....	(37)
3.1	引言 .....	(37)
3.2	基于子空间分解的近场源二维参数估计算法 .....	(37)
3.2.1	接收阵列与信号模型 .....	(38)
3.2.2	算法描述 .....	(38)
3.2.3	仿真实验 .....	(41)
3.2.4	结论 .....	(43)
3.3	基于子空间分解的近场源空间三维参数联合估计算法 .....	(44)
3.3.1	接收阵列与信号模型 .....	(44)
3.3.2	算法描述 .....	(45)

3.3.3	仿真实验	(48)
3.3.4	结论	(50)
3.4	基于矩阵束的近场源空间三维参数联合估计算法	(51)
3.4.1	接收阵列与信号模型	(51)
3.4.2	算法描述	(52)
3.4.3	仿真实验	(54)
3.4.4	结论	(57)
3.5	基于白化降维的近场源空间三维参数联合估计算法	(57)
3.5.1	接收阵列与信号模型	(57)
3.5.2	算法描述	(58)
3.5.3	仿真实验	(61)
3.5.4	结论	(63)
3.6	本章小结	(64)
第4章	基于二维极化敏感阵列的近场源参数估计	(65)
4.1	引言	(65)
4.2	基于二阶统计量的近场源五维参数联合估计算法	(65)
4.2.1	接收阵列与信号模型	(66)
4.2.2	算法描述	(67)
4.2.3	仿真实验	(71)
4.2.4	结论	(76)
4.3	基于矩阵束的近场源五维参数联合估计算法	(77)
4.3.1	接收阵列模型	(77)
4.3.2	算法描述	(78)
4.3.3	仿真实验	(81)
4.3.4	结论	(87)
4.4	基于子空间分解的近场源五维参数联合估计算法	(87)
4.4.1	接收阵列模型	(87)
4.4.2	算法描述	(89)
4.4.3	仿真实验	(92)
4.4.4	结论	(98)
4.5	基于联合对角化的近场源五维参数联合估计算法	(98)
4.5.1	接收阵列与信号模型	(98)
4.5.2	算法描述	(99)

4.5.3	仿真实验 .....	(102)
4.5.4	结论 .....	(108)
4.6	本章小结 .....	(108)
第5章	冲击噪声下近场源二维参数估计 .....	(109)
5.1	引言 .....	(109)
5.2	基于 FLOS - ESPRIT 的近场源二维参数估计算法 .....	(109)
5.2.1	接收阵列与信号模型 .....	(110)
5.2.2	算法描述 .....	(111)
5.2.3	仿真实验 .....	(114)
5.2.4	结论 .....	(119)
5.3	本章小结 .....	(119)
第6章	基于传播算子的近场源二维参数估计 .....	(120)
6.1	引言 .....	(120)
6.2	基于 PM - MUSIC 的近场源二维参数联合估计算法 .....	(120)
6.2.1	接收阵列与信号模型 .....	(121)
6.2.2	算法描述 .....	(121)
6.2.3	仿真实验 .....	(123)
6.2.4	结论 .....	(130)
6.3	基于 PM - ROOT - MUSIC 的近场源二维参数估计算法 .....	(130)
6.3.1	接收阵列与信号模型 .....	(130)
6.3.2	算法描述 .....	(131)
6.3.3	仿真实验 .....	(134)
6.3.4	结论 .....	(136)
6.4	本章小结 .....	(136)
第7章	宽带近场源二维参数快速估计算法 .....	(138)
7.1	引言 .....	(138)
7.2	基于 ISM - PM 的宽带近场源二维参数快速估计算法 .....	(139)
7.2.1	接收阵列与信号模型 .....	(139)
7.2.2	算法描述 .....	(140)
7.2.3	仿真实验 .....	(142)
7.2.4	结论 .....	(146)
7.3	基于 CSM - PM 的宽带近场源二维参数快速估计算法 .....	(146)
7.3.1	接收阵列与信号模型 .....	(146)

7.3.2	算法描述	(146)
7.3.3	仿真实验	(148)
7.3.4	结论	(154)
7.4	基于 ISM - MSWF 的宽带近场源二维参数快速估计算法	(154)
7.4.1	接收阵列与信号模型	(156)
7.4.2	算法描述	(156)
7.4.3	仿真实验	(157)
7.4.4	结论	(160)
7.5	基于 CSM - MSWF 的宽带近场源二维参数快速估计算法	(160)
7.5.1	接收阵列与信号模型	(160)
7.5.2	算法描述	(160)
7.5.3	仿真实验	(161)
7.5.4	结论	(164)
7.6	本章小结	(165)
第 8 章	宽带循环平稳近场源二维参数快速估计算法	(166)
8.1	引言	(166)
8.2	基于传播算子的宽带循环平稳源二维参数快速估计算法	(166)
8.2.1	接收阵列与信号模型	(166)
8.2.2	算法描述	(168)
8.2.3	仿真实验	(170)
8.2.4	结论	(173)
8.3	本章小结	(173)
第 9 章	宽带非平稳近场源二维参数估计	(174)
9.1	引言	(174)
9.2	基于 FRFT 的宽带非平稳近场源二维参数估计算法	(174)
9.2.1	接收阵列与信号模型	(175)
9.2.2	算法描述	(176)
9.2.3	仿真实验	(179)
9.2.4	结论	(184)
9.3	本章小结	(184)
参考文献		(185)

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

随着微电子技术、数字信号处理技术、并行处理技术的高速发展,阵列信号处理已经成为信号处理领域的一个重要分支,并在雷达、声呐、通信、电子对抗、语音信号处理、勘探、医疗电子、天文学、海洋学、地球物理学和地震学等众多军事及国民经济领域中都有着广泛的应用。如雷达技术中的相控阵技术、通信中的智能天线阵列技术、电子对抗中的超分辨率测向技术、语音信号处理中的麦克风阵列技术、地震信号处理中的地震勘探和地下核试验的检测技术等,甚至在医疗诊断和治疗中也采用了阵列信号处理技术<sup>[1]</sup>。

阵列信号处理是将多个传感器(如天线、水听器、超声探头、X射线检测器等)设置在空间的不同位置组成传感器阵列,用来接收、并处理空间信号,提取传感器阵列所接收的信号及其特征信息(参数),同时抑制干扰和噪声等不感兴趣的信息,故阵列信号处理又称为空域信号处理。与单个传感器相比,传感器阵列具有灵活的波束控制、很高的信号增益、极强的干扰抑制能力以及较高的空间分辨能力等优点<sup>[2]</sup>。

利用传感器阵列接收某种物体发出的信号,进而提取出信号的特征参数,在自然界及生物界中早已有了广泛的应用。如人的两只耳朵就是一个二元阵,根据两只耳朵对声源感觉上的差异(如时间、频率等),人的大脑(相当于处理器)就可以准确地判断出声源的位置。再如蝙蝠的“回声定位”,蝙蝠在飞行的过程中,它的喉内会发出一种超声波,不断地通过鼻孔或者嘴发射传播出去,当遇到物体的时候,超声波就会被反射回来,蝙蝠通过由耳朵接收到的反射回来的超声波信号,判断阻碍物的性质及其位置,若是食物则进行捕食,若是障碍物,则避开。在实际工程应用中,仅仅利用二元阵进行

检测和估计是远远不够的,还需要某种空间几何结构组合形成的多传感器阵列,再配以适合的信号处理算法,组成完整的阵列信号处理系统,从而实现感兴趣信号的多维参数联合估计<sup>[3,4]</sup>。

阵列信号处理的主要应用包括<sup>[5]</sup>:

信源定位——估计空间信源到参考阵元的空间位置参数;

信源分离——估计空间信源的波形;

信道估计——估计空间信源与接收阵列之间传输信道的参数。

信源定位技术是指对阵列接收的数据进行处理,估计出感兴趣的信源的波达方向(Direction of Arrival, DOA),有的文献也将 DOA 估计称为方向估计(Bearing Estimation)、角度估计(Angle Estimation)或者测向(Direction Finding)。鉴于空间信源定位技术在军事及国民经济各个领域中的重要意义,在过去的三十年中,国内外学者对空间信源定位问题进行了深入的研究,提出了许多优秀的算法,使其应用范围不断扩大,目前仍处于迅猛发展之中,已成为阵列信号处理学科发展的主要方面<sup>[2]</sup>。

极化敏感阵列信号处理是阵列信号处理领域的一个新的研究热点。空间电磁信号为六维矢量信号,具有完备的电场信息和磁场信息,若接收传感器能够接收到空间电磁信号的超过一维的信息,则称其为电磁矢量传感器,由其构成的接收阵列即为矢量传感器阵列。矢量传感器阵列的特点是能够对具有不同极化的电磁信号产生不同的响应,可以敏感到空间电磁信号的极化信息,故矢量传感器阵列亦可称为极化敏感阵列。将极化敏感阵元在空间摆放成不同形状,并进行空域采样,即可得到空间电磁信号的空域信息。因此极化敏感阵列下的信号处理,既有空域信号处理,又有极化域信号处理。从 20 世纪 90 年代至今,国际学术界对极化敏感阵列的研究非常重视,目前极化敏感阵列下的信号处理已成为阵列信号处理领域中的一个重要的研究方向。与标量传感器阵列相比,极化敏感阵列有着非常优越的系统性能:抗干扰能力强、检测能力稳健、分辨能力高等。极化敏感阵列的这些优点使其在军事和民事中具有重要的应用价值<sup>[6,7]</sup>。

目前,大多数的信源定位算法中都是假设噪声为加性高斯噪声,然而在实际应用中并非如此,比如环境噪声、大气噪声、无线信道噪声、雷达杂波、水下声波等很多信号,它们都不具备高斯分布。与高斯信号相比,这类噪声更可能具有尖峰或远离观测值的突发点,其概率密度函数的拖尾现象比高斯信号概率密度函数的拖尾衰减更慢,此类信号称为冲击噪声。美国南加

州大学 Nikias 教授及其合作者进行了一系列的关于  $\alpha$  稳定分布信号的研究, 结果表明  $S\alpha S$  分布作为冲击噪声的数学模型比高斯分布更合理, 它是对冲击噪声的一种更准确的、更理想的定量描述。实际上,  $S\alpha S$  分布是高斯分布的推广, 并且它还满足稳定性和广义中心极限定理, 即它是独立同分布随机变量和的极限过程。对于服从  $\alpha$  稳定分布的随机信号, 由于其二阶统计量和高阶累积量是不存在的, 因此在冲击噪声条件下, 基于二阶统计量和高阶累积量的信号分析处理方法都将不再有效, 甚至会出现错误的结果。很多文献已经表明, 分数低阶统计量已成为非高斯  $\alpha$  稳定分布噪声条件下信号分析处理的重要手段。因此, 研究冲击噪声下的近场源参数估计问题具有很重要的意义<sup>[8]</sup>。

根据信源距离接收阵列的远近, 信源定位分为远场源定位和近场源定位, 信源传播示意图如图 1-1 所示<sup>[9]</sup>。在远场情况下, 信源距离接收阵列很远,  $r \gg 2D^2/\lambda$ , 信源处于 Fraunhofer 区域, 从波的传播理论可知信源的波前曲率可忽略不计, 即波前可以近似为均匀平面波, 此时只需要用方位角和仰角就可以表达出信源的位置; 然而, 在近场情况下, 信源距离阵列较近,  $r < 2D^2/\lambda$ , 信源处于 Fresnel 区域, 或者信源处于 Fraunhofer 区域, 但由于距离  $r$  不太大, 因此信源波前的固有曲率不能够被忽略不计, 即波前需要由球面波来描述, 并且采用菲涅耳 (Fresnel) 近似描述阵元之间的相位差, 此时信源的位置信息则需要由方位角、仰角和距离三个参数来决定。因此准确地说, 只有近场源条件下的定位问题才是真正的信源定位问题, 远场情况下的定位问题只能看作是近场情况下的一个特例。因此一些成熟的远场源定位算法在近场源定位中不再适用<sup>[3]</sup>。本书主要对近场源空间定位算法进行深入研究。

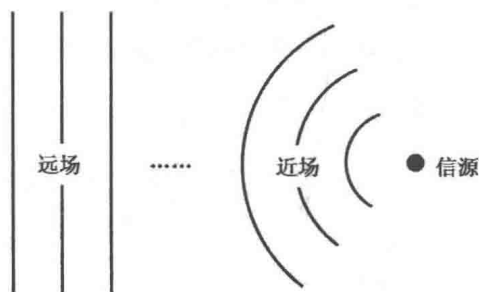


图 1-1 信号传播示意图

近场源定位算法中常用的数学工具: 二阶统计量、高阶累积量、高阶循环累积量和分数低阶统计量等。传统的信源定位算法主要采用二阶统计

量<sup>[8]</sup>作为数学分析工具,即通过对阵列接收信号作相关运算,构造协方差矩阵进行空间谱估计,其优点是计算量低,可抑制加性高斯白噪声对信号的影响,然而在实际情况中存在着大量的高斯色噪声和非高斯噪声,此时二阶统计量已不再适用。随着高阶统计量理论的发展,高阶累积量<sup>[10]</sup>在阵列信号处理中的应用引起了国内外学者的重视,目前已成为研究非高斯信号的重要数学分析工具,其优点是:(1)高斯过程大于二阶的高阶累积量为零,因此用高阶统计量矩阵代替协方差矩阵可自动抑制任意加性高斯噪声(白噪声和色噪声),有时亦可抑制部分加性非高斯色噪声的影响;(2)由于高阶累积量的维数大于空间协方差的维数,因而可以通过灵活定义累积量的形式达到扩展阵列孔径的目的。高阶循环累积量是在高阶累积量的基础上发展起来的,其特点是在理论上可完全抑制任何加性平稳(高斯或非高斯)噪声、非平稳高斯噪声以及循环频率不同的干扰信号。服从SaS稳定分布的冲击噪声是一种比高斯噪声更合理的噪声数学模型,但是遗憾的是其二阶统计量和高阶累积量却不存在,因此分数低阶统计量<sup>[8]</sup>成为分析非高斯SaS稳定分布噪声的重要数学分析工具,其特点是不但可以抑制加性冲击噪声,而且对加性高斯白噪声也有很好的抑制效果。

## 1.2 研究历史与现状

### 1.2.1 一维空间接收阵列模型<sup>[3]</sup>

为进一步说明远场源定位和近场源定位之间的关系,本节对远场源一维空间接收阵列模型和近场源一维空间接收阵列模型做以下比较。

在远场源参数估计中,由于信号的波前为平面波,因此只需要方向角一维参数即可描述来波位置,远场一维空间接收阵列模型如图1-2所示。假设

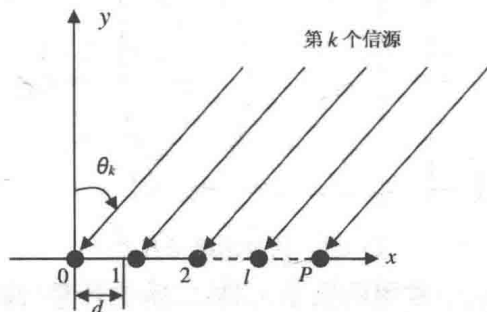


图1-2 远场源一维空间接收阵列几何模型



有  $K$  个中心频率为  $\omega_0$ 、相互独立的窄带信号入射到由  $P+1$  个阵元组成的均匀线阵(ULA)上,阵元间距为  $d$ ,  $\theta_k$  是空间第  $k$  个信源的波达方向。

以坐标原点所在的阵元(0,0)作为相位参考阵元,设  $s_k(t)$  为空间第  $k$  个信源,  $n_l(t)$  为第  $l$  个阵元上的加性噪声,则第  $l$  个阵元的接收信号  $y_l(t)$  可以表示为

$$y_l(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) e^{-j\omega_0 \tau_l(\theta_k)} + n_l(t) \quad (1-1)$$

其中,  $\tau_l(\theta_k)$  为第  $k$  个信源入射到参考阵元与第  $l$  个阵元之间的相位差, 设  $c$  为信源的传播速度, 则  $\tau_l(\theta_k)$  可表示为

$$\tau_l(\theta_k) = l \frac{d}{c} \sin(\theta_k), \quad l = 1, 2, \dots, P \quad (1-2)$$

在远场源定位中,阵元间距  $d \leq \lambda/2$ ,  $\lambda$  为接收信号的波长,此时上式可表示为:

$$\tau_l(\theta_k) = l \frac{\pi}{\omega_0} \sin(\theta_k) \quad l = 1, 2, \dots, P \quad (1-3)$$

则  $y_l(t)$  可以表示为

$$y_l(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) e^{-j l \pi \sin(\theta_k)} + n_l(t) \quad l = 1, 2, \dots, P \quad (1-4)$$

其矩阵形式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (1-5)$$

式中

$$\mathbf{Y} = [y_0(t), y_1(t), \dots, y_P(t)]^T \quad (1-6)$$

$$\mathbf{S} = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (1-7)$$

$$\mathbf{N} = [n_0(t), n_1(t), \dots, n_P(t)]^T \quad (1-8)$$

$$\mathbf{A}(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)] \quad (1-9)$$

$$\mathbf{a}(\theta_k) = [1, e^{-j\pi \sin(\theta_k)}, \dots, e^{-j(P)\pi \sin(\theta_k)}]^T \quad (1-10)$$

$T$  表示矩阵转置。

在近场源参数估计中,由于信源波前为曲面波,因此需要用方向角和距离二维参数来描述,近场一维空间接收阵列模型如图 1-3 所示。假设有  $K$  个近场窄带相互独立的信号入射到由  $2P+1$  个阵元组成的均匀线阵上,阵元间距为  $d$ ,  $d \leq \lambda/4$ ,  $\theta_k$  是第  $k$  个信源的方向角,  $r_k$  为第  $k$  个信源的距离参数。