

综合电子系统技术教育部重点实验室2009学术年会暨 电子科技大学电子科学技术研究院 第五届学术会议论文集

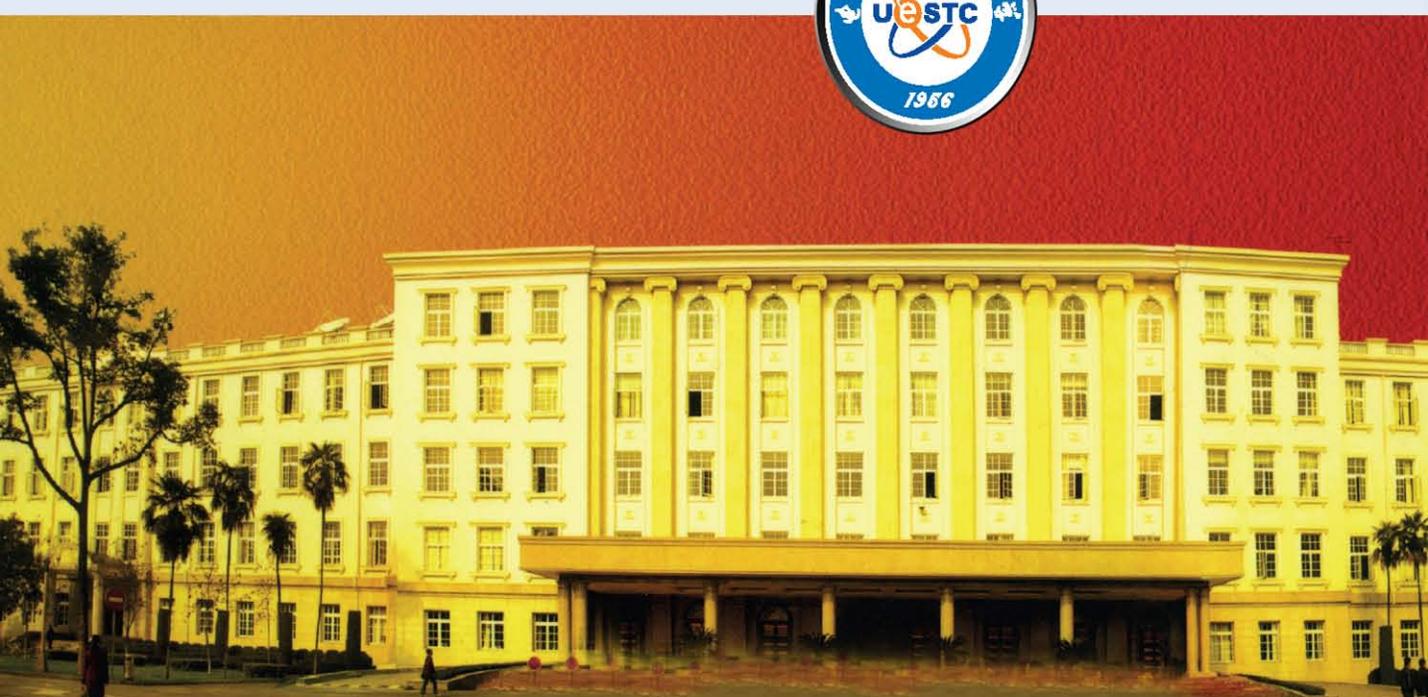
ZONGHE DIANZI XITONG JISHU JIAOYUBU ZHONGDIAN SHIYANSHI 2009 XUESHU NIANHUI JI
DIANZI KEJI DAXUE DIANZI KEXUE JISHU YANJIUYUAN
DI WU JIE XUESHU HUOYI LUNWENJI

主 审：田 忠

主 编：贾宇明 周 鹏

副主编：张 伟 杨海光 何 春

张昌兵 何琪蕾



电子科技大学出版社



**综合电子系统技术教育部重点实验室 2009 学术年会暨
电子科技大学电子科学技术研究院第五届学术会议论文集**

主 审：田 忠

主 编：贾宇明 周 鹏

副主编：张 伟 杨海光 何 春

张昌兵 何琪蕾

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

综合电子系统技术教育部重点实验室 2009 学术年会暨
电子科技大学电子科学技术研究院第五届学术会议论文
集 / 贾宇明, 周鹏主编.—成都: 电子科技大学出版社,
2009.12

ISBN 978-7-5647-0247-2

I. 综... II. ①贾...②周... III. 电子技术—学术会议—
文集 IV. TN-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 212388 号

综合电子系统技术教育部重点实验室 2009 年度会议暨
电子科技大学电子科学技术研究院第五届学术会议论文集

主 审: 田 忠

主 编: 贾宇明 周 鹏

副主编: 张 伟 杨海光 何 春 张昌兵 何琪蕾

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 辜守义
责任编辑: 辜守义
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 电子科技大学出版社印刷厂
成品尺寸: 210mm×285mm 印张 23.75 字数 670 千字
版 次: 2009 年 12 月第一版
印 次: 2009 年 12 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-0247-2
定 价: 100.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

目 录

雷达、通信与电子战技术

分布式信源建模及方位估计的研究现状·····	郑植 李广军 滕云龙
降秩广义旁瓣相消算法分析·····	杨丽丽 饶妮妮 郝志梅 杨小军 王刚
一种通用的空间目标雷达信号模拟器设计·····	陶君 张伟
基于优先级的多功能雷达自适应调度算法研究·····	陈大伟 张伟 陈明燕
基于迭代最小二乘投影 CMA 的多用户盲分离算法·····	唐玲 宋弘
采用平方根 UKF 的高动态 GPS 信号参数估计·····	杨少委 张旭东
GPS 载波相位周跳探测与修复方法综述·····	滕云龙 张旭东 郑植 郭承军
神经网络在卫星钟差预测中的应用·····	郭承军 滕云龙
基于 MATLAB 的 DVB-T 系统信道编码的仿真实现·····	宋水正 周详 李浩 田丹 何春
浅析临近空间 SAR 成像技术·····	张顺生 戴春杨 周宝亮
离散余弦变换原理以及在 FPGA 上的实现·····	袁著 张伟
基于图像和 GPS 数据采集的低功耗无人机传输系统设计·····	马腾 袁著 田忠
基于蚁群算法的网络化子弹药协同攻击策略研究·····	李炜 张伟
模式 S 应答解码器的算法设计·····	刘晓斌 张超 郑植
基于 ARM 和小波包分析的电力谐波测量系统·····	杨霞 谢维成 王成超
光纤通道 N 端口 MAC 层的设计与实现·····	朱治宇 何春 宗竹林
基于高速链路的负载均衡策略·····	张小倩 张超 田忠 许都
基于 S 变换域相干分析的 SAR 图像目标检测·····	杨朝南 彭真明 张杰
基于 SPECAN 技术的子孔径弹载 SAR 成像算法·····	周宝亮 张顺生 戴春杨 孔令坤
改进的大斜视二次距离压缩成像算法·····	李飞 张涛 徐玮 李涛 孔祥辉
一种基于 JDL-NHD 的非均匀 STAP 算法·····	杨芸 曹建蜀 张伟 郑辉 马建春
浅析 InSAR 成像技术·····	王维莉
机载相控阵天线和差波束的仿真研究·····	马建春 曹建蜀
MIMO SAR 发展和展望·····	胡俊豪 何春 宗竹林
海天背景下凝视红外成像系统作用距离计算方法研究·····	焦赞 李丹 陈明燕 郝秋龙
基于固定 EVM 的 OFDM 系统峰平比抑制方法·····	何兴建 唐友喜
雷达杂波相关随机序列的仿真和分析·····	郑辉 曹建蜀 张伟
数据融合综述·····	贾海涛 张伟
多传感器管理与控制算法设计及其应用研究·····	李奇 刘铭湖 郝志梅 邱朝阳 饶妮妮
一种基于 FPGA 的 FC-AE-1553 的系统设计·····	武鹏 何春 宗竹林
激光制导模拟系统前端信号分析与硬件实现·····	陈重 周东

计算机、网络与软件技术

一种高效的复合式指纹细化算法.....韩玉 周世岗 王建国

PCNN 与区域生长算法在图像处理中的比较研究.....何长涛 王卫星

新清单计价下业主方在招投标阶段的风险分析与对策.....邵朝红 孙亮

基于 Selenium 的 Web 自动化测试.....朱姝 毕亮 田忠

LXI 仪器网络远程交互控制的设计与实现.....何庆佳 黄建国 马敏

基于 NS-2 的 WSN 分簇路由协议分析与仿真.....朱秀莹 张可 张伟

地质灾害地区多媒体传感器网络智能应用关键技术分析.....张可 张伟

基于堆积能量和协变信息的含伪结 RNA 二级结构预测迭代化算法.....

.....苏光龙 骆志刚 丁凡 石金龙 蒋晓舟

基于 PON 结构的航电通信协议的仲裁机制设计.....赵磊 贾宇明 宗竹林

基于同平台的协同作战效能评估方法探讨.....汪翼 李炜

一种基于 LDP 协议与虚拟 IP 组的 MPLS 组播方案理论研究.....

.....刘涛 何春 吕恕 宗竹林 饶渐升

一个基于约简概念格的关联规则提取算法.....陈湘 吴跃

使用 LBP 尺度变换进行人脸定位.....孙睿 马争 魏云龙

RS 码级联 LDPC 码编码技术研究.....田广和

基于 MATLAB 的航空发动机试车数据的线性回归研究.....隋永志 李书明 倪继良 黄燕晓

一种骨架抽取的岩石裂隙开启度测量方法.....赖均 王卫星 刘敏祥

基于无线传感器网络的信任管理模型设计.....陈祥云 陈珊珊

基于组件技术的仿真系统软件设计.....郑钧耀 张伟 王磊

数据存储和优化研究综述.....穆丰

基于贝叶斯理论的 P2P 信任模型.....徐海湄 韩宏 李林 李梁

便携式航管雷达开场功能测试分析仪系统设计.....李庆 田忠 杨瀚程 张超

TPI、TMMI 基于成熟度模型的测试过程改进模型比较研究.....周焕来 高翔

An improved fingerprint segmentation algorithm based on statistic characteristics and gradient

.....LIU Yongxia QI Jin

Fault detection and diagnosis of screw chiller with ANN

.....CHUAN He ZHANG Yu ZHENG Jie

天线、射频、材料及集成电路

双频段压控振荡器设计.....徐小良 刘辉华 谭炜锋

2.45GHz WLAN 干线放大器设计·····	李力力 尉旭波 王莎鸥
余数系统基本问题的研究·····	敖思远 李磊
一种窄带低噪声放大器(LNA)的设计·····	罗俊忻 范海涛 钱可伟
基于 ADS 的三级低噪声放大器设计·····	王洪全 钱可伟
用于卫星通信的螺旋天线的仿真设计·····	黄朋 曾刚
基于 ADS 仿真的 LNA 的最优化设计·····	拓伯乾
S 波段低噪声放大器的小型化设计·····	范海涛 罗俊忻 钱可伟 唐伟
LC 振荡器中相位噪声与非线性频谱变换研究·····	李智鹏 鲍景富 唐普英
Doherty 功率放大器的研究与设计·····	白翔 唐友喜
Ka 波段 COBRA 天线辐射特性研究·····	周钱科 罗勇
基于 LTCC 技术的 SIP 的研究与应用·····	王莎鸥 尉旭波 李力力
一种准循环 LDPC 码译码器的 FPGA 实现·····	曹飞 张义德
12 位高速 D/A 转换器设计·····	刘辉华 谭炜烽 徐小良
NoC 功耗建模研究·····	胡明浩 李磊
基于 DICE 结构的抗辐射 SRAM 存储单元设计·····	章凌宇 贾宇明 李磊
网络芯片概述·····	李磊 胡明浩
添加 ZrO ₂ 对 MnZn 功率铁氧体性能的影响·····	智彦军 余忠 姬海宁 兰中文 刘治
一种低成本低相噪的 X 波段 VCO 设计·····	胡季岗 金龙 蒋万兵
基于 ADS 的低温低噪声放大器的设计·····	史跃跃 张天良 罗正祥 孔根升
微带三腔体交叉耦合滤波器的设计·····	孙欣 罗正祥
W 波段基波混频器设计·····	刘勇 唐小宏 张跃辉
带微处理器、ROM 和 RAM 电路板的故障诊断方法研究·····	刘小波 谢华 兰京川
LVDS 技术介绍及其应用实例·····	曾高强
离子推力器 LaB ₆ 空心阴极热特性模拟分析·····	孙明明 顾佐 郭宁
UHF 频段移动支付系统读卡器设计与实现·····	朱忠迁 魏彦玉 宫玉彬 王文祥
Analysis of Electro-optic Modulators with Coplanar Waveguide Electrode ·····	ZHANG Chengyu ZHANG Xiaoxia HOU Shidong ZHANG Jianing
Investigation of Open-Loop Dual-Mode Resonator and Its Application to the Design of Three-Order Microstrip Transversal Filter·····	ZHOU Mingqi TANG Xiaohong ZHANG Yuehui
The design of eight-pole quasi-elliptic response microstrip filter with group delay equalization ·····	KONG Gensheng LUO Zhengxiang

雷达、通信与电子战技术

分布式信源建模及方位估计的研究现状

郑植^{1,2} 李广军² 滕云龙¹

(1. 电子科技大学电子科学技术研究院 成都 610054; 2. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要: 本文首先简要地叙述了分布源的特点和研究意义, 然后详细地介绍了分布源建模和波达方向估计方法的研究现状, 最后给出了一些在分布源研究方面所面临的难题和挑战。

关键词: 分布式信源; 波达方向估计

Present Situation of the Modeling and DOA Estimation of Distributed Sources

ZHENG Zhi^{1,2} LI Guangjun² TENG Yunlong¹

(1. Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054,

2. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054)

Abstract: This paper firstly sketches the characteristic of distributed sources and research significance. And then the present situation of the modeling and direction-of-arrival (DOA) estimation methods of distributed sources is introduced in detail. At last, some problems and challenges of distributed source research are also given.

Keywords: distributed source, DOA estimation

1 引言

在无线通信中, 信号源到达方向 (DOA) 估计是一个十分关键的问题, 尤其是应用于智能天线和移动定位时。在无线通信的复杂电波传播环境中, 多径散射非常普遍, 它会使信号发生角度扩展, 这时就不宜再采用点源而应使用分布源来对信号建模, 如图 1 所示。和传统的点目标信号模型相比, 分布源模型更加符合无线通信的实际情况。基于点源模型的 DOA 估计方法, 由于模型误差, 用于分布源时其 DOA 估计性能将急剧下降。因此, 研究分布源方位估计, 不但有利于智能天线更加精确地指向和跟踪用户, 提高系统的抗干扰能力和增加容量, 而且能够克服多径传输对目标定位的影响, 提高定位的精度。因此, 分布式信源建模及方位

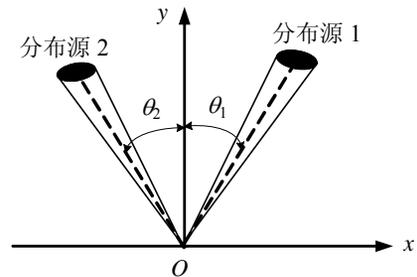


图 1 分布源模型

估计技术已成为无线通信领域的研究热点。

2 分布源建模

分布源研究包括分布源建模和波达方向估计。在分布源建模方面:

Y. Meng 等人建立了具有空间分布的信号源模型, 用满足一定分布的角功率密度函数对分布式信号源进行了描述, 提出了分布式目标信号源参数估计的联合最大似然估计方法, 并

通过求解多维非线性最优化问题估计中心角度、扩展角度和信号功率以及和 MUSIC 相比,最大似然联合估计显示了对分布参数的稳健性,估计误差也比较低^[1]。

Shahrokh Valaee 等人在文献^[2]中提出的关于分布式目标模型的建模方法成为该领域中被广泛引用的经典,并且在文章中提出了几种参数估计方法,这些都成为后来的研究人员从事研究时经常要参考的内容。文章中对分布式目标进行了较为详尽的分析,提出了相干分布式信号(CD)和非相干分布式信号(ID)的概念,在此基础上,将信号子空间和噪声子空间的概念推广到了分布式信号源,从而提出了 MUSIC 类分布源参数估计方法(DSPE)。

与此同时,Y. Meng 等人对分布式信号的协方差矩阵的特征结构做了细致的分析研究,提出了准信号子空间和准噪声子空间的概念,在子空间渐进正交的基础上提出了 DISPARE 算法,该算法只针对 ID 信号,属于 MUSIC 类算法^[3]。

瑞典学者 T. Trump 和 B. Ottersten 发表了分布式信号源参数估计的最大似然方法,所采用的模型是利用三角函数展开近似得到的,取得了很好的近似效果,并且利用第一类贝塞尔函数级数展开式得到了分布式信号源的协方差矩阵的闭合表达式。最大似然的估计方差接近克拉美罗界^[4]。

瑞典的 Mats Bengtsson 在其博士论文 Antenna Array Signal Processing for High Rank Data Models 中详细阐述了分布式目标的定义以及建模的方法,包括局部散射型、物理模型和空间频率模型,并给出了参数估计的算法,比如 root-Music 算法、MODE 算法和伪子空间拟合法等等^[5]。

以色列的科学家 Raviv Raich 和 Jason Goldberg 在他们的文章 Bearing Estimation for a Distributed Source: Modeling, Inherent Accuracy Limitations and Algorithms 中提出了一种分布式目标模型,他们将信道的时间和空间的变化充分考虑在内,将以往的建模方法加以拓展,称为 PCD 模型^[6]。

在 DSPE 分布式信号源模型的基础上,伊朗学者 S. Shabazpanahi 巧妙地利用近似找到了旋转矩阵,提出了分布式目标的 ESPRIT 算法,该算法是一种基于总体最小二乘 ESPRIT (TLS_ESPRIT) 的分布式参数估计算法。在 CD 信号下,利用广义阵列流形(GAM)得到了近似

的旋转特征结构,从而可以利用 TLS_ESPRIT 估计中心角,通过构造每一信源的一维 DSPE 谱得到扩展角;在 ID 信号下,利用 GAM 得到了近似的协方差矩阵。利用一阶泰勒级数展开,在观测空间针对每一 ID 信号引入了一近似的二维子空间^[7]。

韩国的 Seong-Ro 等人在文献^[8]中利用两个正交的线列阵提出了一种对三维空间里的分布源进行建模的方法,并给出了方位角、俯仰角的估计方法。

Q. Wu 等人针对互不重叠的分布源建立了离散模型,每个分布源由一定数量的点目标构成^[9]。

以上的分布源模型都基于一些共同的假设,比如窄带、远场和处于平坦 Rayleigh 衰落信道等。但在一些实际应用中,这些模型假设可能无法很好地满足。因此,以上分布源模型具有一定的局限性。

3 方位估计算法

在过去的十几年中,出现了许多分布源方位估计算法。其中,代表性较强的方法有三类。第一类方法把点源中的信号子空间和噪声子空间理论推广到分布源中,形成了一类典型的分布源参数估计方法,称之为子空间类参数方法;第二类方法是以最大似然(ML)为代表的参数方法;第三类是分布源的波束形成方法。

3.1 子空间类方法

子空间类方法在分布源 DOA 估计领域已经得到了相当广泛的应用。

Valaee 根据源内多径信号的相关性把分布源模型分为 CD 和 ID 模型,并提出一种针对两种模型的参数估计方法:DSPE^[2],它把经典 MUSIC 方法直接推广到分布源参数估计中,这种方法同 MUSIC 算法一样都将受到阵列流形失配和阵列校正误差的影响。Meng 提出了一种 DSPE 算法的改进形式 DISPARE 算法^[3],用于估计非相干分布源的中心 DOA 和角扩展。在 DISPARE 算法中,阵列的协方差阵由低秩模型近似。Wu 利用矢量算子和 Kronecker 积的性质,提出了一种可以同时估计点源和分布源参数的 Vec-MUSIC 算法^[10]。

Raich 通过引入描述时间相关特性的参数,提出了一种 PCD 模型和相应的参数估计方法^[6],CD 和 ID 模型分别是该模型的特例。Asztely 利用分布源阵列流形的一阶泰勒级数展开提出一

种 GAM 模型。该模型的方向向量是点源方向向量及其导数的线性组合模型。在该模型的基础上，他们还给出了一种利用范德蒙德结构估计信号空间波形的参数估计方法。该方法只适用于均匀线阵和均匀分布的相干分布源情况，对其他情况，它不具备推广能力。Bengtsson 提出了另一种分布源近似模型。该模型用两点源近似一个分布源，并在该模型基础上提出了一种 Root-MUSIC 算法用于估计分布源的中心 DOA，而角扩展参数则通过查表求得。另外，Bengtsson 还提出了用一种广义的加权子空间匹配方法来改善 DSPE、DISPARE 等无法给出参数的一致估计问题。Lee 基于信号源的傅立叶级数展开，提出了一种参数化模型和一种非参数化模型及其相应的分布源 DOA 估计方法^[11]，并在信号源的随机角扰动满足均匀、三角和圆分布时，研究了基于噪声子空间的 DOA 估计方法。

万群针对相干分布源模型提出了多种分布源中心 DOA 估计方法，如基于角信号子空间的 DOA 估计方法、基于二次旋转不变性中心 DOA 方向估计方法、极大最大特征值法、极小最小特征值法、子空间的后验稀疏迭代 DOA 估计法等。刘申建等提出了一种有限带宽分布源模型及其参数估计性能评价方法。熊维族给出了极化分布源模型及其参数估计方法^[12]。

3.2 最大似然类方法

最大似然 (ML) 估计算法也常常被用于分布源 DOA 估计。对于每个分布源模型，包含的未知参数为信号能量、噪声能量、分布源中心角和分布源空间角度扩展，似然函数在所有参数正确估计时得到最大化。最大似然方法能够得出非常精准的参数估计值，然而方法的计算量也很庞大。随着分布源数目的增长，算法的计算复杂度将会以指数级增长。为了降低算法的复杂度，近年来，文献^[13]提出了一种渐近最大似然 (AML) 方法来估计非相干分布源的中心 DOA，该方法把四维参数优化问题转化为一维参数优化问题，大大降低了算法的复杂度。

协方差矩阵匹配 (COMET)^[14]是另一类代表性参数估计方法，该方法通过最小化接收信号的协方差阵和理论协方差阵之间的逼近误差来估计分布源参数，此方法利用了扩展不变原理 (EXIP)。COMET 方法的计算量比 ML 方法小，性能则略逊于 ML 方法。当 COMET 方法和 EXIP 结合，DOA 估计和空间角度扩展估计能够得到分解。因此 EXIP-COMET 方法能够用两个一维搜

索代替原来的二维搜索。

3.3 波束形成类方法

传统的波束形成算法都是针对点源设计的。对于非相干分布源，Xu 提出了一种扩展的最小方差无失真响应 (SMVDR) 波束形成器^[15]，对单个高斯非相干分布源而言，SMVDR 比子空间方法具有更好的估计性能。另外，其计算复杂度也比子空间类方法低；Hassanien 提出了一种广义 Capon 波束形成器^[16]用于估计非相干分布源的中心 DOA 和角扩展参数；Bell 利用二次模式约束提出了一种线性约束最小方差 (LCMV-QPC) 波束形成器，它通过在期望波束与获得波束之间的均方误差上强加不等式约束获得分布源的方位估计；Shahbazpanahi 提出了一种非相干分布源稳健自适应波束形成器，它能有效克服传统自适应波束形成器因阵列响应失配、信号失配和小训练样本等导致的性能恶化方面的影响。Zoubir 提出了一种稳健的波束形成方法，该方法通过对不含噪声的协方差矩阵进行自适应处理获得非相干分布源的参数估计。

在相干分布源的波束形成方面，也有一些典型方法被提出。Zoubir 提出了三种针对相干分布源的广义波束形成方法^[17]：传统的波束形成器、最小方差波束形成器和修正的最小方差波束形成器，针对上述三种波束形成器，他们还给出了详尽的性能分析。

以上三类方法中，最大似然类方法估计精度最高，但运算量太大，不适合实时处理。波束形成类方法分辨率太低。子空间类方法估计精度高，分辨率高，且运算量相对较低，因而具有更广阔的应用前景。

4 分布源研究的难点

在分布源研究方面还面临着以下诸多技术难题：

(1) 分布源的相关性问题。在分布源建模过程中，不但需要考虑同一分布源自身的空间或者空时相关特性，在多个分布源情况下，由于辐射源之间的耦合、泄漏，或者信道传播的不确定性，使得不同的分布源之间也有可能具有一定的相关性。在一些场合的分布源建模中，这种相关性是需要考虑的。

(2) 一般的分布源模型都需要假设某种确定的角信号密度或者角功率密度函数，比如高斯分布、均匀分布、三角分布、柯西分布等。然而在实际的分布源建模研究中，会面临很多困难。

首先,分布源的角分布形式多种多样,一般无法预先确定具体的函数形式。在分布函数形式未知的情况下,无法得到由多维参数表示的空间谱或待优化的非线性目标函数,所以无法通过多维搜索获得包括 DOA 参数在内的分布源参数估计。其次,若待估计对象只是分布源 DOA,但在搜索过程中分布参数的估计过程也会同时被引入,难免会增加算法的复杂性。此外,基于精确的分布函数描述的分布源模型,一般的分布源 DOA 估计算法在实际应用中受到模型误差的影响较大,并且难以处理点目标和分布式目标同时存在、不同角分布函数形式的分布源同时存在或者其他较为复杂的信号条件。

(3)目前的分布源模型研究主要基于小角度扩展和空间能量对称分布的假设条件。对于分布源在大角度扩展和空间能量非对称时的情形研究得比较少。因此,需要深入研究非对称和大角度扩展分布源模型及其方位估计方法。

(4)在目前的分布源研究中,一般都假定信号是窄带的,即满足信号带宽的倒数远大于信号掠过阵列孔径所需的时间。但是宽带通信是未来无线通信的发展趋势和热门方向,如何对宽带分布源进行建模和方位估计是一个值得探究的问题。

(5)噪声模型的形式。在分布源方位估计中,为了简化分析,一般都假定背景噪声为高斯白噪声或者分布参数已知的色噪声。然而在实际环境中,阵列接收到的并不总是高斯白噪声或分布参数已知的色噪声,未知分布参数的色噪声也是常见的。如何在复杂噪声环境中进行分布源方位估计将是一个必须考虑的问题。

(6)以往的分布源建模中,往往基于分布源空间能量分布形式已知的假设条件。在实际中,很难确定这个空间能量分别服从的概率分布形式。因此有必要研究一种更为通用的分布源模型以及相应的 DOA 估计方法,新模型应不依赖于空间能量分布的形式,结构简单,并且能对后续的 DOA 估计带来便利。

(7)二维 DOA 估计更加符合实际情况,是 DOA 估计领域的发展方向。对于二维方向角而言,同样存在着信号的角度扩展。但是目前分布源的二维方向角估计研究才刚起步,还有大量的问题亟待解决,需要进一步的深入研究。

5 结束语

本文首先引出了分布源的概念和研究意义,然后重点讨论了现有的分布源建模及方位

估计算法,最后指出了对其进一步研究所面临的各种问题和挑战。

参考文献

- [1] Y.Meng, K.M.Wong, Q.Wu, Estimation of the directions of arrival of spreadsources in sensor array processing, Proc ICSP, 1993 (10):430~434
- [2] S.Valaee, B.Champagne, P.Kabal, Parametric localization of distributed sources, IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43 (9):2144~2153
- [3] Y.Meng, P.Stoica, K.M.Wong, Estimation of the direction of arrival of spatially dispersed signals in array proeessing, IEE. Proc_F, 1996, 43 (1):1~9
- [4] T.Trump, B. Ottersten. Estimation of Nominal Direction of Arrival and Angular Spread Using An Array of Sensors, IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 45 (1):57~69
- [5] Mats Bengtsson. Antenna Array Signal Processing for High Rank Data Models, PhD dissertation, Stockholm University, 1999
- [6] Raviv Raich, Jason Goldberg. Bearing Estimation for a Distributed Source: Modeling, Inherent Accuracy Limitations and Algorithms, IEEE Transactions on Signal Processing, 2000 (48):429~441
- [7] Shahram Shahbazpanahi, Shahrokh Valaee. Distributed source Localization Using ESPRIT Algorithm, IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49 (10):2169~2178
- [8] Seong-Ro LEE, Myeong-Soo CHOI. A Three-Dimensional Distributed Source Modeling and Direction of Arrival Estimation Using Two linear Arrays, IEEE Transactions on Fundamentals, 2003, 86 (1):206~214
- [9] Q.Wu, K.M.Wong, Y.Meng, DOA estimation of point and scattered sources-Vec-MUSIC, IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 89 (27):365~368
- [10] Wu Q, Wong K M, Meng Y, et al. DOA estimation of point and scattered sources: Vec-MUSIC. IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing, 1994:365~368
- [11] Lee Y U, Lee S R, Chang T, et al. An analysis of DOA estimation method under a dispersive signal model. ICCSP, 1995:351~354
- [12] 万群.分布源DOA估计方法研究[博士学位论文].

成都:电子科技大学, 2000, 27~65

- [13] Besson O, Vincent F, Stoica P, et al. Approximate maximum likelihood estimators for array processing in multiplicative noise environments. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2000, 48 (9), 2506~2518
- [14] Shallbazpanahi S, Valaee S, Gershman A B. A covariance fitting approach to parametric localization of multiple incoherently distributed sources. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52 (3): 592~600
- [15] Xu X L. Spatially-spread sources and the SMVDR estimator. *SPAWC*, 2003:639~643
- [16] Hassanien A, Shallbazpanahi S, Gershman A B. A generalized Capon estimator for localization of multiple spread sources. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52 (1) : 280~283
- [17] Zoubir A, Wang Y D, Charge P. New adaptive beamformers for estimation of spatially distributed sources. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004: 2643~2646

降秩广义旁瓣相消算法分析

杨丽丽¹ 饶妮妮¹ 郝志梅² 杨小军¹ 王刚¹

(1. 电子科技大学 成都 610054; 2. 雷华电子技术研究所 无锡 214063)

摘要: 在雷达等电子系统中, 有时阵列非常大, 采用全自适应阵则系统复杂, 造价极高, 这时须采用部分自适应阵技术。本文在广义旁瓣相消器的框架上, 分析了降秩自适应滤波算法: 主成分法和互谱法。我们的分析表明, 两种算法都是基于特征分解的降秩算法, 均能够降低计算复杂度。主成分法根据大的特征值选择特征向量构造降秩变换矩阵, 互谱法根据大的互谱值选择特征向量构成降秩变换矩阵。仿真实验结果证明了两种降秩算法的有效性和在工程应用上的优越性。

关键词: 广义旁瓣相消器; 特征空间; 降秩自适应滤波算法

Analysis on Algorithms for Reduced Rank Generalized Side Canceller

YANG Li Li¹ RAO Ni Ni¹ HAO Zhi Mei² YANG XiaoJun¹ WANG Gang¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, 2. Leihua Electronic Technology Institute, Wuxi, 214603)

Abstract: Aiming at the reduction of system complexity and cost in full rank adaptivity, the partial adaptivity has been applied to the fields of Radar etc. Based on the GSC structure, this paper analyses the reduced rank adaptive filtering algorithms. PC-GSC (principal component technique) and CS-GSC (cross-spectral technique) are both reduced rank methods based on eigen-subspace truncation, and have low computational complexity. PC-GSC chooses the eigenvectors corresponding to the large eigenvalues to get transfer matrix, whereas CS-GSC maximizes the cross-spectral metric to select eigenvectors. The results demonstrate its validity and superiority.

Keywords: generalized side canceller, eigen-subspace, reduced rank adaptive filtering algorithm

1 引言

在雷达面临的干扰中, 较难对付的是有源干扰。因为雷达的主波束宽度较窄, 有源干扰一般从雷达的旁瓣进入。对付这种从旁瓣进入的有源干扰的一个有效方法是广义旁瓣相消技术 (generalized side lobe canceller, GSC)。自适应旁瓣相消技术是当存在旁瓣有源干扰时, 自适应的修改辅助天线的权值, 使干扰信号输入功率最小, 即在方向图上表现为在干扰信号到达的信号方向上形成了空间零点, 从而抑制了旁瓣的干扰。

但在雷达等电子系统中, 有时阵列非常大, 采用全自适应阵则系统复杂, 造价极高, 这时须采用部分自适应阵技术。若要求波束在 L_1 个方向上有最大响应, 在 L_2 个方向上形成零点,

则要求的自适应权数为 (L_1+L_2+1) , 这往往比总的阵元数小得多。在 GSC 框架下可采用降秩变换的方法来实现, 称为降秩广义旁瓣相消。

2 广义旁瓣相消器

广义旁瓣相消器 (GSC) 是 LCMV 的一种等效的实现结构, GSC 结构将自适应波束形成的优化问题转化为无约束的优化问题, 分为自适应和非自适应的两个支路, 分别称为主支路和辅助支路, 要求期望信号从非自适应的主支路通过, 而自适应的辅助支路中仅含有干扰和噪声分量。

由线性约束最小方差 (LCMV) 准则可表示成如下数学表达式:

$$\begin{cases} \arg \min w^H R w \\ s.t. C^H w = f \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为数据相关矩阵; f 为需要响应; C 为约束矩阵。求得最佳权为:

$$w = R^{-1} C (C^H R^{-1} C)^{-1} f \quad (2)$$

如图 1 所示, 将权向量分解为自适应权和非自适应权, w_q 为主波束权向量, w_a 为辅助通道权, 辅助通道权向量应进行自适应调整, 则系统的权向量可表示为:

$$w = w_q - B w_a \quad (3)$$

其中, B 为阻塞矩阵, 使 $B^H C = 0$, B 的作用就是将期望信号阻塞掉而不使其进入辅助支路。主波束输出视为需要信号 d , 其中有真正需要信号和干扰, 辅助波束输出 x_a 仅包含干扰, 并调整 w_a 使其尽可能接近 d 中的干扰, 从而经相减电路后将干扰从 d 中消去。

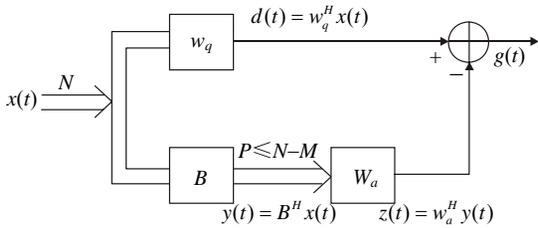


图 1 广义旁瓣相消器

3 基于 GSC 框架的降秩变换算法

如图 2 所示部分自适应阵, 在辅助通道权 w_a 前加入一个降秩变换矩阵 Q , 降低自适应权的个数。基于 GSC 框架的降秩变换矩阵由阵列协方差矩阵 R 的特征向量构成。根据降秩变换矩阵的构成不同, 可分为主分量法和交叉谱法, 分别记为 PC-GSC 和 CS-GSC。

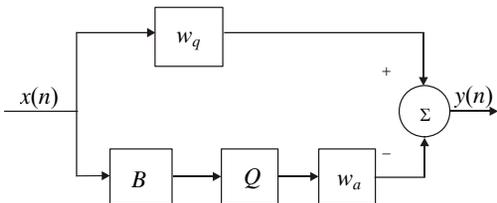


图 2 基于 GSC 框架的降秩处理结构

3.1 GSC 框架主分量法 (PC-GSC, Principle Components in GSC Framework)

(1) 用有限次快拍数据估计得到辅助通道的协方差和主辅通道的相关矢量。

$$\hat{R} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x(t_i) x^T(t_i) \quad (4)$$

$$\hat{r}_{x_0 d_0} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x(t_i) d(t_i) \quad (5)$$

(2) 对估计得到的辅助通道协方差矩阵进行特征分解, 较大的特征值对应于干扰, 另外的特征值为噪声功率, 对应于噪声。求出干扰子空间和噪声子空间的列向量。

$$\hat{R} = \hat{E}_s \hat{\Lambda}_s \hat{E}_s^H + \hat{E}_n \hat{\Lambda}_n \hat{E}_n^H \quad (6)$$

(3) 主分量法通过取 r 个大特征值对应的特征向量来构成变换矩阵, 得到的自适应权值为:

$$W_{PC-GSC} = W_q - B^H V_s \Gamma_s^{-1} V_s^H r_{x_0 d_0} \quad (7)$$

3.2 GSC 框架交叉谱法 (CS-GSC, Cross Spectral in GSC Framework)

显然, 主分量法构造的降秩变换矩阵不是唯一的, 利用交叉谱也可得到降秩变换矩阵 Q 。每个特征向量对应的交叉谱为:

$$CSM_i = \frac{|v_i^H r_{x_0 d_0}|^2}{\eta_i} \quad (8)$$

根据式 (8), 选择较大的交叉谱对应的特征向量 q_1, q_2, \dots, q_r 来构造降秩变换矩阵 Q , 即 $Q = [q_1, q_2, \dots, q_r]$ 。

4 计算机仿真与性能比较

下面通过计算机仿真来比较 GSC 与 PC-GSC 以及 CS-GSC 算法的性能。设阵列为 16 元均匀直线阵, 阵元间隔为半波长, 窄带自适应阵, 期望信号方向为 0° , 干扰角度为 60° , 干燥比和信噪比均为 20dB, 取快拍数为 32。根据自适应权个数的要求, 主成分法和交叉谱法均取 3 个特征向量来构造降秩变换矩阵。

4.1 仿真特征值与交叉谱的分布

由图 3 可知, 特征值与互谱都近似于正向

分布, 即较大的特征值对应较大的互谱。这是因为辅助支路的作用是对消主支路的杂波, 不含杂波或杂波非常弱的噪声子空间对应的特征基不可能被优选出来做旁瓣相消, 优选出来的只能是那些大特征值对应的特征波束。

降秩自适应旁瓣相消滤波在降秩子空间内寻优, 使得自适应处理的维数降低, 所需的快拍数减少, 收敛速度加快, 从而减少了自适应算法的计算量。

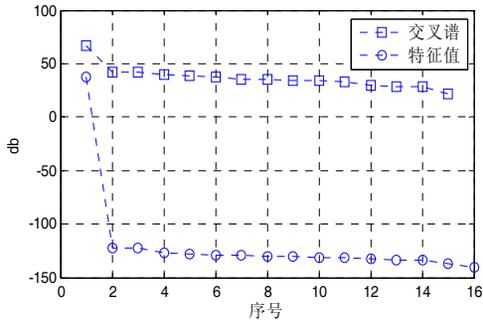


图3 特征值与交叉谱的分布图

4.2 仿真旁瓣相消系统合成后的天线方向图

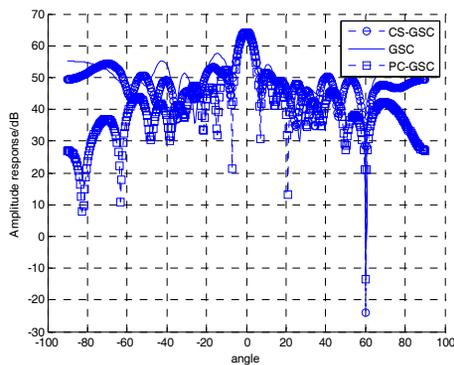


图4 GSC, CS-GSC 和 PC-GSC 方向图

由图4可知, 以上三种方法在方向图上表现为在期望信号到达的信号方向上形成了增益, 在干扰信号到达的信号方向上形成了空间零点, 从而抑制了旁瓣的干扰。其中, 干扰抑

制的零陷效果最好的是 CS-GSC, 为-24.04dB; 其次是 PC-GSC, 为-13.56dB; 最后是 GSC, 为-3.17dB。与广义旁瓣相消算法相比, 基于特征空间的降秩算法避免了由小特征值对应特征矢量组成的噪声子空间对权矢量的影响, 加快了自适应天线旁瓣相消的收敛速度。

5 结束语

本文在 GSC 的框架上, 对两种利用特征矢量构造降秩变换矩阵的降秩广义旁瓣相消算法进行了分析和总结。通过仿真实验可证明, 降秩算法用于大型阵列自适应处理时, 将大大降低计算量并加快算法的收敛速度。

参考文献

- [1] Goldstein J S, Reed I S. Reduced-Rank Adaptive Filtering [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45 (2) :492~496
- [2] Goldstein J S, Reed I S. Subspace Selection for Partially Adaptive Sensor Array Processing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33 (2) :539~544
- [3] L. Chang and C. C. Yeh. Performance of DMI and eigenspace-based beamformers[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1992, 40 (11) :1336~1347
- [4] Yu JL, Yeh CC. Generalized eigenspace-based beamformers. IEEE Trans. on Signal Processing, 1995, 43 (11) :2453~2461
- [5] 龚耀寰. 自适应滤波——时域自适应滤波和智能天线[M]. 第2版, 北京:电子工业出版社, 2003
- [6] 丁向前, 王永良, 张永顺. 降秩自适应滤波算法研究[J]. 雷达科学与技术, 2005, 4

一种通用的空间目标雷达信号模拟器设计

陶 君 张 伟

(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 610054)

摘 要: 本文简要分析了空间目标回波的基本模型, 在此基础上提出了一种通用的空间目标雷达信号模拟器的设计, 探讨了模拟器硬件系统的组成和工作过程, 并对关键模块进行了评估。

关键词: 空间目标; 信号模拟器; 回波模拟

Design of Universal Space Targets Radar Signal Simulator

TAO Jun ZHANG Wei

(Electronic Science and Tech Research Institute of University of Electronic Science and Tech of China, Cheng Du, 610054)

Abstract: Based on the analysis of basic model of spatial target echo introduced in this paper at first, the design of universal space targets radar signal simulator is proposed, then the simulator hard-ware and the work process is discussed, finally some assessments of the key modules are made.

Keyword: space targets, signal simulator, echo simulate

1 前言

在雷达整机的设计过程中, 为了缩短雷达研制周期, 雷达的接收发送、信号处理等子模块的开发设计都是并行进行的。在雷达被投入使用之后, 也需要一套完善的闭环自检测系统来发现雷达系统存在的一些隐患与缺陷。雷达回波模拟在上述要求下应运而生, 它作为系统模拟技术与雷达技术相结合的产物, 大大缩短了各种功能雷达的研制周期, 现已逐渐发展成为雷达技术的一个重要分支, 并被广泛应用于雷达系统的测试评估之中。

国内外关于雷达回波模拟器设计的报道很多, 多家公司和研究院都在从事回波模拟器的研究工作。综合来看, 国外关于模拟器的研究做得比较全面。他们多采用软硬件结合的设计方式, 使系统满足实时性的要求。在硬件设计上运用高速微处理器与 DSP 技术, 同时还采用一些高速的总线技术以及模块化的设计思想, 使得所设计的回波模拟器的通用性、可扩展性更强。

2 空间目标回波模型介绍

从本质上讲, 雷达回波模拟器实现的就是再现不同环境下目标回波信号。这要求模拟器能同时对目标回波的形状、背景杂波干扰信号以及接收机噪声进行模拟。

根据上述讨论, 可知雷达回波信号由三部分组成: 目标回波信号、杂波干扰信号、噪声信号, 进而可以得到理想回波信号, 其表示形式如下^[1]:

$$x(t) = s(t) + n(t) + c(t) \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为目标回波信号; $n(t)$ 为杂波干扰信号; $c(t)$ 为噪声信号。

由分析可得, 目标回波所携带信息与模拟目标种类、数量、运动方程紧密相关。而杂波干扰信号与模拟的环境有关, 对于不同杂波背景要运用不同的杂波模型。比如, 海洋杂波多采用 k 分布模型; 复杂地面杂波采用对数-正态分布模型; 气象杂波采用瑞利分布。对于噪声的模拟, 一般都将外部与接收机噪声看成是高斯白噪声^[2]。

本文工作主要是针对目标回波产生模块的设计, 这里只探讨目标模型。设雷达发射的线

性调频信号，其带宽为 B 、脉宽为 T ，可得其信号形式如下^[1]：

$$s_r(t) = r\left(\frac{t}{T}\right) \exp[j2\pi(f_c t + \frac{B}{2T} t^2)] \quad (2)$$

其中， f_c 为载频； $r(\cdot)$ 为信号的包络。设目标距离为 R ，则其回波信号形式为：

$$s_r(t) = r\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp[j2\pi(f_c(t-\tau) + \frac{B}{2T}(t-\tau)^2)] \quad (3)$$

其中， τ 为回波的延时，表示如下：

$$\tau = 2R/c \quad (4)$$

然后对信号进行去斜率处理 (stretch)，将发射时刻储存的调频信号和回波做差频处理，也就是将两者共轭相乘：

$$s(t) = s_r(t) * s_r^*(t) \quad (5)$$

通过上式就可以得到单频的回波信号。

以上是对单个静止点目标的 Stretch 介绍。对于成像回波多个散射点及运动时，雷达发射波形经目标反射后，雷达接收到的回波形式如下^[3]：

$$S(t) = \sum_{k=1}^N s_r^k(t) \quad (6)$$

可以看到目标回波是各个散射点回波信号的线性叠加。其中， N 为散射点的个数， $s_r^k(t)$ 是第 k 个散射点所产生的回波：

$$s_r^k(t) = \sigma(r_k) r\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp[j2\pi(f_c(t-\tau) + \frac{B}{2T}(t-\tau)^2)] \quad (7)$$

其中， $\sigma(r_k)$ 为散射点反射强度。同样运用 (5) 式，对回波数据进行去斜率处理，再叠加上目标的速度，距离信息就可以仿真出目标的回波数据。

3 目标回波数据的产生

本设计中对目标回波模拟就是从上述模型出发，根据用户在工控机上设置的目标运动参数、运动姿态、目标个数等信息，以及波束调度接口输入的波束调度参数实时运算的结果，通过轨迹运算模块得到目标在雷达直角坐标系下的位置矢量和速度矢量。进而将直角坐标系下的位置矢量和速度矢量转换为雷达球坐标系下的距离、方位角、俯仰角和径向速度^[4]。

然后通过图 1 所示的回波生成框图，将一个相干处理周期中目标回波的延迟信息、多普勒频移反映到回波的包络上，再将回波信号用一帧距离多普勒平面数据表示^[4]。最后根据天线方向图，模拟和通道，方位差通道，俯仰差

通道的三路回波数据，然后通过数模转换、滤波器组就可得到视频回波模拟信号。

距离多普勒平面数据生成举例如下：设采样频率 f_s 为 10MHz，发射信号脉宽 T 为 20 μ s，相干处理周期内脉冲个数 N 为 100 个，PRF 为 1kHz，通道数 L 为 3，则距离单元个数：

$$M = f_s \times T = 1 \times 10^7 \times 2 \times 10^{-5} = 200 \quad (8)$$

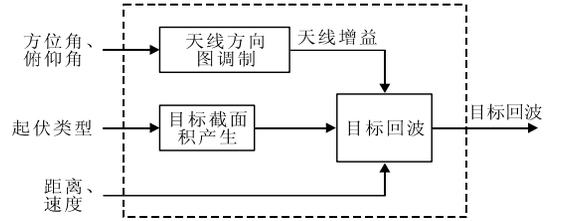


图 1 回波生成框图

因为共有 3 个通道，一个相干处理周期会生成 3 个 $M \times N$ 的回波矩阵数据，其中一个通道的数据量为：

$$num = M \times N = 1 \times 10^5 \quad (9)$$

目标的距离信息、速度信息就存储在矩阵的不同位置中。

4 一种可行的硬件实现方案

4.1 任务要求以及参数设定

4.1.1 任务及要求

本设计中雷达目标模拟器有两种工作模式：一种实现空间搜索模拟，一种实现目标的成像模拟。空间搜索模式下发送窄带 LFM 信号，能大致通过回波相对于相参本振信号的延时 τ 来确定目标的径向距离。目标跟成像模式下发送宽带 LFM 信号，用于对目标精细结构的识别与成像。系统要求实时地对两种工作模式下的目标回波进行模拟。在搜索模式下要对整个脉冲重复时间段内目标反射的窄带回波模拟；而在成像模式下只需要对跟踪时间门内的宽带回波进行模拟。

4.1.2 参数设定

模拟回波参数的设定影响系统硬件架构设计、总线设计、核心处理芯片的选择、外围存储芯片的选择等。这里根据项目的实际需求，提出两种工作模式下的回波的带宽、脉冲重复频率 (PRF)、数字采样率、脉宽等典型参数，如表 1 所示。

表1 典型工作模式参数

参数 模式	带宽	PRF	采样 率 f_s	跟踪 波门	脉宽 T
搜索	10 MHz	100 Hz	15 MHz	—	10 μ s
成像	1GHz	2.5 kHz	150 MHz	6 μ s	50 μ s

4.2 关键模块性能分析与数据生成

4.2.1 目标轨迹点插值运算实现

对高速运动目标回波的准确模拟，需要建立庞大的目标特征参数数据库。比如，某导弹飞行速度为 7km/s，对该目标的回波模拟时间为 30 分钟。每隔 0.01s 计算一次目标运动轨迹、姿态参数，总共就需要存储 1.8×10^5 组目标特征数据。在相邻两组数据时间间隔内，导弹目标飞行的距离为 70m。在实际搜索或者成像过程中，天线主波束指向目标时，系统不一定能在存储数据库中找到该时刻目标对应的运动特征数据，即出现了运动轨迹盲点。盲点的出现，导致漏掉该时刻的回波，模拟回波的逼真度会受到严重影响。

为了解决此问题，可以缩小运动数据之间的时间间隔，增加冗余数据。但这样会增加系统的计算量，同时对存储器空间提出更高的要求。考虑到短时间内目标运动特征参数变化满足线性关系，可采用线性插值法对盲点带来的回波缺失进行处理。

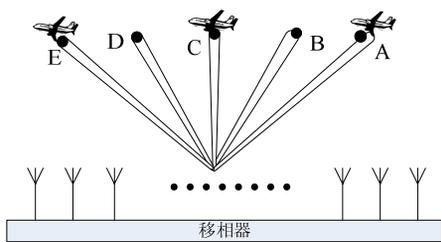


图2 相控阵回波模拟示意图

如图 2 所示，假设 t_A 、 t_E 之间间隔 0.01s， t_A 、 t_E 在运动数据库中对应着两组连续数据，分别表示为 a 、 e 。而在 t_C 时刻，在数据库中无对应数据，应在 t_A 、 t_E 中的 t_C 时刻插入一个新的近似数据。采用线性插值的方式，由两点式^[5]可直接得：

$$c = \frac{t_E - t_C}{t_E - t_A} a + \frac{t_C - t_A}{t_E - t_A} e \quad (10)$$

采用插值方法不仅可以有效地解决盲点造成的回波缺失，还降低了对工控机运算量以及模拟器内硬件存储空间的要求，同时只增加了少量的运算，且对 DSP 资源的占用较少，有利

于工程实现。

4.2.2 回波产生及数据估算

回波产生可以由直接数字频率合成 (DDS) 产生，也可以由 DSP 综合回波数据再进行数模转换来实现。考虑到 DDS 自带的 D/A 转换器转换精度、动态杂散范围以及输出信号的要求，回波产生采用后一种方式产生数字回波。以下分两种工作模式，分别对回波数据的产生所需硬件资源进行分析。

(1) 搜索模式

将表 1 的参数带入式 (8) 计算可得一个 PRF，它的数据个数为：

$$num_1 = f_s \times T = 1500 \quad (11)$$

根据系统要求选择合适的动态范围的 DAC，其量化位数为 14 位。则每个脉冲重复周期 (10ms) 内数据量为：

$$(num_1 \times L \times 14) \div 8 \div 2^{20} \approx 7.691 \text{ kb} \quad (12)$$

其中， L 为通道数，共有三个通道。

(2) 成像模式

假定一个相干处理周期 (0.04s) 内雷达发射脉冲个数 $N=100$ ，将表 1 的参数带入式 (9)，同理可计算得到一个雷达相干处理周期内数据个数为^[4]：

$$num_2 = f_s \times T_m \times N = 9 \times 10^4 \quad (13)$$

式中， T_m 为跟踪波门。同上选择 DAC 量化位数为 14 位。则每个相干处理周期内数据量为：

$$(num_2 \times L \times 14) \div 8 \div 2^{20} \approx 0.45062 \text{ Mb} \quad (14)$$

通过上述估算，结合前面所述的目标回波产生模型，DSP 对每一个散射点要分别进行 1.5×10^5 次 $\sin(\cdot)$ 运算，对三通道和信号 Σ 、方位差信号 $\Delta\alpha$ 和俯仰差信号 $\Delta\beta$ 值的计算^[6]，以及三通道幅度值与生成回波数据乘法运算。

为了使回波数据产生的运算速度和精度满足整个系统的要求，可选用 TI 公司的浮点 DSP 芯片 TMS320C6727，其系统最高时钟为 350MHz，性能可以达到 2400MI/s，2100MFLO/s。DSP 进行一次 $\sin(\cdot)$ 运算的耗时为 200 多个系统时钟周期。计算一个散射点回波数据总耗时为：

$$200 \times 1500 = 0.3 \text{ M} \quad (15)$$

所以可得一个 PRF 中单个散射点的波数据计算耗时约为 $0.3 \text{ M} / 350 \text{ M} = 0.8572 \text{ ms}$ 。能够在 一个脉冲重复周期 (10ms) 内生成三个通道回波数据。但考虑到可以模拟器要能够实现多目标的跟踪、成像，一个脉冲重复周期的运算量会