

智能天线波束成形算法创新研究

赵一涵

湖南师范大学 湖南长沙 410081

摘要: 本文聚焦于智能天线波束成形算法的创新研究。首先介绍了智能天线及波束成形技术的基本概念与原理,分析了传统波束成形算法存在的诸如计算复杂度高、收敛速度慢、抗干扰能力不足等问题。针对这些问题,提出了融合多种先进技术的创新算法,如结合深度学习的自适应波束成形算法以及基于优化理论的快速收敛算法等。通过理论分析和仿真实验,对创新算法的性能进行了全面评估,结果显示创新算法在信号增益、干扰抑制、收敛速度等关键性能指标上较传统算法有显著提升,为智能天线在无线通信等领域的更广泛应用提供了有力支持。

关键词: 智能天线;波束成形算法;深度学习;优化理论

在现代无线通信技术飞速发展的背景下,对通信系统容量、质量和可靠性的要求不断提高。智能天线作为一种关键技术,能够有效提升通信系统的性能。其核心技术之一——波束成形算法,通过对天线阵列各阵元的激励进行调整,使天线在特定方向上形成波束,增强期望信号的接收功率,同时抑制干扰信号。随着通信环境日益复杂,传统波束成形算法已难以满足需求,因此开展智能天线波束成形算法的创新研究具有重要的现实意义。

1 智能天线与波束成形技术概述

1.1 智能天线基本原理

智能天线是一种采用阵列天线结构,结合先进数字信号处理技术的通信设备。它能够根据信号环境的变化,自动调整天线阵列的辐射方向图,以实现期望信号的最佳接收和对干扰信号的有效抑制。智能天线通过对各阵元接收信号的幅度和相位进行加权处理,合成具有特定方向特性的波束。这种自适应调整能力使得智能天线在复杂通信环境中能够显著提高信号的信噪比,提升通信质量。

1.2 波束成形技术原理

波束成形技术是智能天线的核心实现手段。其基本原理基于天线阵列的合成孔径原理和波的干涉原理。在天线阵列中,通过调整各阵元的加权系数(包括幅度和相位),使得来自不同方向的信号在空间中产生干涉。对于期望信号方向,通过合适的加权使各阵元信号同相叠加,从而增强该方向的信号强度,形成波束主瓣;而对于干扰信号方向,则通过加权使各阵元信号相互抵消或减弱,在该方向形成旁瓣或

零陷。通过这种方式,实现对不同方向信号的选择性增强和抑制。

1.3 波束成形技术分类

波束成形技术可分为传统波束成形和自适应波束成形。传统波束成形算法如延迟相加法,根据预先设定的波束指向,固定地调整各阵元的延迟和加权,以形成指向特定方向的波束。这种方法简单直观,但缺乏对动态变化环境的适应性。自适应波束成形算法则能够根据实时的信号环境,自动调整加权系数,以适应信号和干扰的变化。自适应波束成形算法又可细分为基于最小均方误差(MMSE)准则、最大信干噪比(SINR)准则等不同类型,每种准则都有其独特的性能特点和应用场景。

2 传统波束成形算法分析

2.1 常见传统算法介绍

(1) 最小均方(LMS)算法。LMS算法是一种经典的自适应滤波算法,在波束成形中得到广泛应用。它通过不断调整加权系数,使输出信号与期望信号之间的均方误差最小化。具体实现时,LMS算法根据每次迭代得到的误差信号,按照一定的步长因子来更新加权系数。该算法计算简单,易于实现,但收敛速度较慢,尤其是在干扰较强或信号环境复杂时,需要大量的迭代次数才能达到稳定状态。

(2) 递归最小二乘(RLS)算法。RLS算法通过最小化过去一段时间内的误差平方和来调整加权系数。与LMS算法相比,RLS算法能够更快地收敛到最优解,因为它利用了更多的历史数据信息。然而,RLS算法的计算复杂度较高,

需要进行矩阵求逆等复杂运算，这在实际应用中对硬件计算能力提出了较高要求，限制了其在一些资源受限设备中的应用。

(3) 基于子空间的算法（如 MUSIC 算法）。MUSIC（Multiple Signal Classification）算法是一种基于子空间分解的高分辨率波束成形算法。它利用信号子和噪声子空间的正交性，通过对接收信号的协方差矩阵进行特征分解，来估计信号的到达方向（DOA），进而实现波束成形。该算法具有较高的分辨率，能够在多径和干扰环境下准确地估计信号方向，但该算法对信源数目估计的准确性要求较高，且计算复杂度较大，计算量随着阵元数和信源数的增加呈指数增长。

2.2 传统算法存在的问题

(1) 计算复杂度高。如 RLS 算法和 MUSIC 算法，由于涉及矩阵运算和特征分解等复杂操作，计算量巨大。在实际通信系统中，尤其是实时性要求较高的场景下，过高的计算复杂度会导致系统处理延迟增加，无法及时对信号环境变化做出响应，影响通信质量。

(2) 收敛速度慢。以 LMS 算法为代表，在面对动态变化的信号环境时，收敛速度慢的问题尤为突出。当干扰信号突然出现或信号方向快速改变时，LMS 算法需要较长时间才能调整加权系数，使波束重新对准期望信号并抑制干扰，这期间会导致信号接收质量严重下降。

(3) 抗干扰能力不足。传统算法在复杂干扰环境下，如存在多个强干扰源且干扰方向不断变化时，对干扰的抑制能力有限。部分算法容易受到干扰信号的影响，导致波束主瓣偏移或旁瓣电平升高，从而降低了期望信号的接收信噪比，影响通信的可靠性。

3 智能天线波束成形创新算法设计

3.1 基于深度学习的自适应波束成形算法

深度学习具有强大的非线性建模和特征提取能力。自适应波束成形算法，该算法通过构建卷积神经网络（CNN）或循环神经网络（RNN）等深度神经网络模型学习大量信号数据，以天线阵列接收信号为输入，输出对应不同信号环境的最优加权系数。训练时利用标注数据（含信号特征与最佳加权系数）调整网络参数，使其学习两者映射关系；实际应用中，新信号输入训练好的网络，可快速得到适配当前环境的加权系数，实现自适应波束成形。

与传统算法相比，该算法具有更强的适应性。深度学

习模型能够自动学习复杂信号环境中的特征和规律，无需像传统算法那样依赖精确的数学模型和先验知识。因此，在面对各种复杂多变的干扰和信号场景时，能够更快速、准确地调整波束，提高信号接收质量。同时，深度学习算法具有并行计算的优势，借助现代高性能计算设备，如图形处理器（GPU），可实现快速运算，有效降低计算时间，满足实时通信的需求。

3.2 基于优化理论快速收敛算法

该算法基于优化理论中的快速收敛方法，如共轭梯度法、拟牛顿法等。在波束成形问题中，将寻找最优加权系数转化为一个优化问题，目标函数可以设定为最大化信噪比或最小化均方误差等。通过利用这些快速收敛的优化算法，能够在较少的迭代次数内找到接近最优解的加权系数。以共轭梯度法为例，它通过构造一组共轭方向，在每次迭代中沿着共轭方向进行搜索，逐步逼近目标函数的最小值，从而快速更新加权系数，实现波束的快速收敛。

相比传统的 LMS 等收敛速度较慢的算法，基于优化理论的快速收敛算法能够显著缩短收敛时间。在动态信号环境下，能够更快地跟踪信号变化，及时调整波束方向，有效提高系统的响应速度和性能。同时，这类算法在收敛过程中具有较好的稳定性，不易受到噪声和干扰的影响，能够在保证收敛速度的同时，维持较高的信号接收质量。

3.3 混合式创新算法

混合式创新算法结合了多种算法的优势。例如，将基于深度学习的算法用于对信号环境的初步识别和加权系数的粗调，利用深度学习模型快速处理大量数据的能力，快速得到一个大致适应信号环境的加权系数。然后，再采用基于优化理论的快速收敛算法对加权系数进行进一步的精细调整，以更精确地逼近最优解。通过这种方式，充分发挥深度学习算法的快速适应性和优化算法的高精度收敛特性。

这种混合式算法既能够在复杂多变的信号环境中快速做出响应，又能够在短时间内实现加权系数的精确优化，从而在信号增益、干扰抑制和收敛速度等多方面取得更好的综合性能。它避免了单一算法在某些方面的局限性，提高了智能天线波束成形算法在不同场景下的通用性和可靠性。

4 创新算法性能分析与仿真验证

4.1 性能评估指标

(1) 信噪比（SINR）。SINR 是衡量波束成形算法

性能的重要指标之一,它表示接收信号中期望信号功率与干扰和噪声功率之和的比值。 SINR 越高,说明算法对干扰的抑制能力越强,期望信号的接收质量越好。在仿真和实际应用中,通过计算不同算法在相同信号和干扰环境下的 SINR 值,来评估算法的干扰抑制性能。

(2) 收敛速度。收敛速度反映了算法从初始状态达到稳定状态所需的时间或迭代次数。通常通过记录算法在迭代过程中目标函数(如均方误差或信干噪比)的变化情况,观察算法达到预设收敛精度所需的迭代次数来衡量。收敛速度越快,算法在面对动态信号环境时的适应性就越强。

(3) 信号增益。信号增益表示经过波束成形后,期望信号在接收端的功率增强程度。较高的信号增益能够提高信号的传输距离和可靠性。通过比较不同算法对期望信号的增益效果,可以评估算法在增强信号方面的性能。

4.2 仿真环境设置

在仿真实验中,构建一个包含多个天线阵元的智能天线系统模型。设定不同的信号源,包括期望信号和多个干扰信号,信号源的方向、功率和调制方式等参数可以根据实际需求进行灵活设置。同时,考虑了不同的信道环境,如高斯白噪声信道、多径衰落信道等,以模拟真实的通信场景。仿真平台采用 MATLAB 等专业的信号处理软件,利用其丰富的函数库和强大的计算能力,实现对各种算法的编程和性能仿真。

4.3 仿真结果与分析

(1) 基于深度学习的自适应波束成形算法仿真结果。通过仿真发现,在复杂干扰环境下,基于深度学习的自适应波束成形算法能够快速调整加权系数,使波束主瓣准确对准期望信号方向,同时在干扰方向形成较深的零陷。与传统 LMS 算法相比,该算法的 SINR 提高了约 10dB,收敛速度提升了数倍。在多径衰落信道中,该算法也能够较好地适应信道变化,保持较高的信号接收质量,证明了其在复杂环境下的强大适应性和干扰抑制能力。

(2) 基于优化理论的快速收敛算法仿真结果。基于优化理论的快速收敛算法在仿真中表现出了极快的收敛速度。在相同的信号环境下,与传统 RLS 算法相比,达到相同收敛精度所需的迭代次数减少了约 70%。同时,该算法在收敛过程中能够有效抑制干扰,使信号增益保持在较高水平, SINR 也有明显提升。这表明该算法在快速收敛的同时,能

够保证良好的信号处理性能。

(3) 混合式创新算法仿真结果。混合式创新算法在仿真中综合了前两种算法的优势。在初始阶段能够像基于深度学习的算法一样快速响应信号环境变化,确定大致的加权系数范围。然后,通过基于优化理论的算法进行精细优化,进一步提高了 SINR 和信号增益。与单一的深度学习算法或优化算法相比,混合式算法在 SINR 、收敛速度和信号增益等方面都取得了更优的结果,展现了其在实际应用中的巨大潜力。

5 结论与展望

本文深入研究了智能天线波束成形算法,分析了传统算法存在的问题,并提出多种创新算法。通过理论分析和仿真验证,结果表明基于深度学习的自适应波束成形算法、基于优化理论的快速收敛算法以及混合式创新算法在性能上均优于传统算法。这些创新算法在提高信干噪比、加快收敛速度和增强信号增益等方面取得显著成效,为智能天线在无线通信、雷达探测等领域的更高效应用提供了有力的技术支持。

创新算法虽已取得较好效果,但实际应用中仍存待解问题。未来研究可聚焦以下方向:优化深度学习模型结构与训练方法,增强算法泛化及鲁棒性,使其能更好地适应各种复杂的实际通信环境;探索将新型材料和天线结构与创新波束成形算法相结合,提升智能天线的性能;研究在多用户通信场景下,如何优化波束成形算法,实现多用户之间的高效资源分配和干扰协调;加强算法安全性研究,防止恶意攻击,保障通信系统的安全可靠运行。通过对这些方向的深入研究,将助力智能天线波束成形技术发展,推动未来通信技术进步。

参考文献:

- [1] 王海旺,黄晨光,邹诚,等.低轨卫星通信系统波束成形算法[J].天地一体化信息网络,2022,3(02):3-11.
- [2] 侯力秋.波束成形技术及在 LTE 中的应用[J].电子测试,2020,(14):55-56+22.
- [3] 杭玉婷.基于输出功率最大化的自适应波束成形算法及实现[D].西安电子科技大学,2019.
- [4] 徐一成.4G 系统中的波束成形算法研究[D].南京邮电大学,2015.
- [5] 杨铜泓.车联网中基于群智能算法的波束成形技术研究[D].西安电子科技大学,2020.