

基于接收信号强度的多天线阵列自适应波束成形

张永波, 张佳懿, 张日宣, 周雨馨, 赵佳鑫, 杜文静

延安大学物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/ERA.2025120047

摘 要 : 本文研究了基于接收信号强度的多天线阵列自适应波束成形, 根据接收信号强度估算出移动终端与各部天线的实时距离, 并以此为基础形成相应的阵列修正因子向量, 对天线阵列波束进行实时调整。为了进行对比, 分别选取了四种传播衰减因子进行 MATLAB 仿真。仿真结果表明: 传播衰减因子越小, 波束指向性能越好; 此外, 与无加权相比, 加权后的波束功率集中度更高。

关 键 词 : 多天线阵列; 波束成形; 传播衰减因子

Adaptive Beamforming for Multi-Antenna Arrays Based on Received Signal Strength

Zhang Yongbo, Zhang Jiayi, Zhang Rixuan, Zhou Yuxin, Zhao Jiaxin, Du Wenjing

College of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000

Abstract : This paper investigates adaptive beamforming for multi-antenna arrays based on received signal strength. It estimates the real-time distances between the mobile terminal and each antenna based on the received signal strength and forms corresponding array correction factor vectors to adjust the antenna array beams in real time. For comparison, four propagation attenuation factors are selected for MATLAB simulation. The simulation results indicate that a smaller propagation attenuation factor leads to better beam pointing performance; furthermore, compared to unweighted beamforming, the weighted beamforming exhibits higher power concentration.

Keywords : multi-antenna array; beamforming; propagation attenuation factor

引言

当前, 随着社会由信息化向智能化深入发展, 人们在日常生活中产生的数据交互场景及流量越来越多, 由此也对通信技术, 特别是承担移动终端流量接入的无线通信技术提出了更高的要求。为了实现更快的接入速度、更大的用户容量, 移动通信和无线互联网通信中均采用了多天线阵列, 例如 4G 移动通信中的 4 天线阵、8 天线阵, 5G 移动通信中的 64 天线阵、128 天线阵, 无线路由器的 3 天线阵、4 天线阵等等。

多天线阵列除了能够提供更高的接入速率, 还可以对电磁波束进行赋形, 使其尽可能对准目标用户, 改善辐射效果。根据波束赋形处理的位置与方式的不同, 一般可以分为模拟波束赋形、数字波束赋形和混合波束赋形三种。数字波束赋形是指对天线端口映射形成的基带信号进行幅度与相位加权, 赋形精度高, 成本也高; 模拟波束赋形是指对送至天线的每路射频信号进行相移, 赋形精度受硬件影响, 成本较低; 混合波束赋形是指同时采用数字波束赋形和模拟波束赋形两种方式, 兼有二者优点。

目前, 针对波束赋形的研究方向有很多。文献 [1] 将传统遗传算法应用于混合波束赋形, 首先对模拟域和数字域分别迭代优化, 然后在功率一定的前提下进行总体优化。文献 [2] 设计了一种 3D MIMO 场景下基于主瓣重叠的快速波束搜索方案, 将辐射空间划分为多个子空间, 使用格雷码来控制波束的投射。文献 [3] 利用毫米波大规模 MIMO 信道在虚拟角度域的结构化稀疏性, 将混合波束赋形设计问题建模为稀疏重构问题, 提出一种基于压缩感知的混合波束赋形设计方案。

本文提出了一种基于接收信号强度的波束赋形方法。首先各天线阵元根据接收信号强度估算出与移动终端之间的等效距离, 然后利用该等效距离形成定向波束。

课题信息: 本文受延安大学校级大学生创新创业训练计划项目 D202309 资助。

作者简介:

张永波 (1980.11—), 男, 汉族, 山西省忻州市人, 研究生学历, 太原理工大学, 延安大学物理与电子信息学院就职, 通信工程专业讲师, 主要从事通信工程专业的教学与科研工作。课题: 主持校级课题结题 3 项, 发表论文 10 余篇;

张佳懿 (2003.03—), 女, 汉族, 陕西省铜川市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

张日宣 (2003.09—), 女, 汉族, 陕西省西安市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

周雨馨 (2002.11—), 女, 汉族, 陕西省渭南市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

赵佳鑫 (2003.11—), 女, 汉族, 陕西省渭南市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生;

杜文静 (2002.08—), 女, 汉族, 陕西省宝鸡市人, 本科学历, 延安大学物理与电子信息学院通信工程专业学生。

一、多天线波束成形原理

采用多天线阵列时,天线的排列形式多种多样,常见的有线阵、面阵、圆阵等。下面以最基本的等距离直线阵为例来说明其原理。

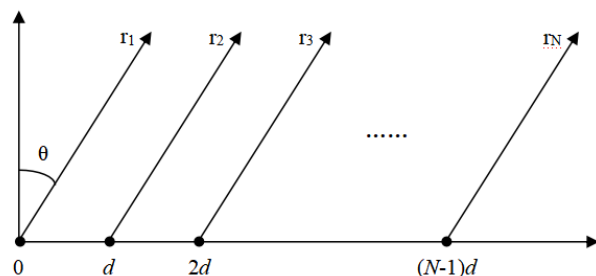


图1 等距离直线阵

如图1所示,假设直线阵共有 N 个阵元,每个阵元的信号初始幅度均相同,根据图中的几何关系,可得阵列因子为^[4]

$$AF = 1 + e^{j(kd \sin \theta + \delta)} + e^{j2(kd \sin \theta + \delta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \sin \theta + \delta)} \quad (1)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为电波波长, d 为阵元间距, δ 为阵元之间的相位差。

定义阵列向量为

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j(kd \sin \theta + \delta)} & \dots & e^{j(N-1)(kd \sin \theta + \delta)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

加权向量为

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_0 e^{j\phi_0} & w_1 e^{j\phi_1} & \dots & w_{N-1} e^{j\phi_{N-1}} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

则加权后的阵列因子为

$$AF = \mathbf{a}(\theta) \mathbf{w} \quad (4)$$

通过实时调整加权系数,就可以改变天线阵的功率辐射方向图。

二、自适应波束成形

当终端处于移动状态时,随着传播距离的变化,天线接收功率也在实时变化,因此可以根据接收功率的大小自适应调整天线阵列的加权系数,使主瓣方向始终对准目标用户。

假设天线数为 N ,第 i 个天线的接收信号归一化强度为 β_i ,可以使发射信号的加权因子与之成正比

$$\mathbf{w} = \rho [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_{N-1}]^T \quad (5)$$

其中, ρ 为比例系数,此处不考虑相位加权。

在实际仿真中,可以近似认为接收信号强度与传播距离的 r 次方成反比,我们将 r 称为传播衰减因子。

本文取天线数 $N=4$,天线阵为等距离直线阵,阵元间距 $d = \lambda/2$, λ 为电波波长,天线电流相位差均为0。我们对图2的两种位置情况进行 MATLAB 仿真 (Δ 代表用户位置),取传播衰减因子 $r=2$,得到其归一化幅度辐射方向图如图3所示。

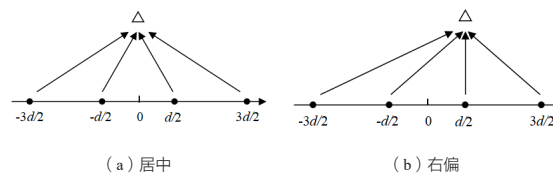


图2 两种用户位置示意图

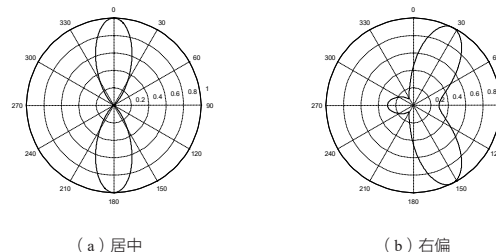


图3 两种位置的阵列归一化幅度辐射方向图

图3中的 (a) 图取归一化幅度加权因子为 $[5/13 \ 1 \ 1 \ 5/13]$, (b) 图取归一化幅度加权因子为 $[1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2]$ 。从图上可以看出,波束的指向性良好,旁瓣很少,能够实时跟踪用户位置变化。

进一步对图2 (b) 所示位置情况进行深入研究。分别取归一化幅度加权因子为 $[1/25 \ 1/4 \ 1 \ 1/4]$ 、 $[1/5 \ 1/2 \ 1 \ 1/2]$ 、 $[1/\sqrt{5} \ 1/\sqrt{2} \ 1 \ 1/\sqrt{2}]$ 、 $[1/\sqrt{5} \ 1/\sqrt{2} \ 1 \ 1/\sqrt{2}]$ 四种,对应于传播衰减因子 r 为 4、2、1、 $1/2$,得到的辐射方向图如下所示。

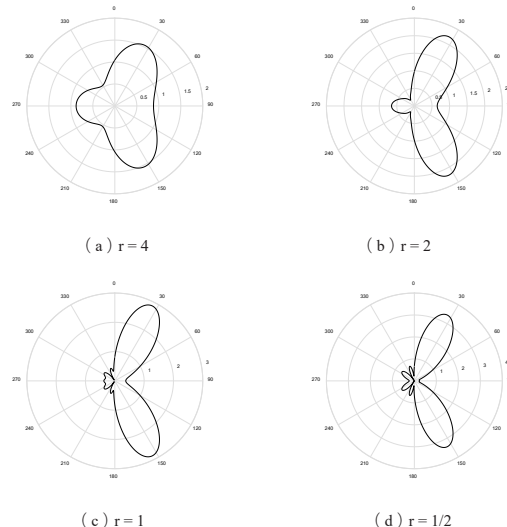


图4 四种传播衰减因子下的阵列辐射方向图

观察上图四种情况,可以发现随着传播衰减因子的减小,波束的定向性能越来越好,这一点可以从主瓣、副瓣的最大幅度和主瓣的半功率波束宽度等三项指标上得到验证,具体数据如下表所示。

表1 四种传播衰减因子下的波束参数

参数	主瓣最大幅度	副瓣最大幅度	主瓣波束宽度
$r=4$	1.5400	0.8797	58.76°
$r=2$	2.2000	0.6491	39.27°
$r=1$	2.8614	0.4472	33.54°
$r=1/2$	3.3505	0.6953	31.24°

分析上表,可以发现:传播衰减因子越小,主瓣幅度越大,波束宽度越窄,说明波束的指向性能越好。与此同时,副瓣幅度

呈现先减小后增大的趋势，结合图4，可以得知，随着波束指向性能越来越好，波束形状从连成一片趋向于离散化和精细化，致使部分副瓣辐射功率较为集中。

接下来进一步比较一下无加权和有加权两种情况下的波束形状，假设有精确的波达方向估计，同样对加权系数作归一化处理，无加权时加权向量可视为 $[1\ 1\ 1\ 1]$ ，有加权时选取指向性最好的加权向量 $[1/\sqrt{5}\ 1/\sqrt{2}\ 1\ 1/\sqrt{2}]$ ，二者的波束辐射方向图如下。

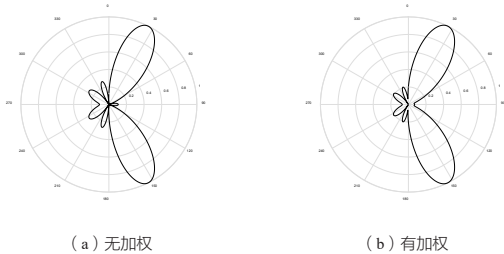


图5 无加权与有加权的天线阵辐射方向图对比

对比以上两种情况，很容易发现无加权时旁瓣更多且更大，共有4个左侧旁瓣和1个右侧旁瓣，且4个左侧旁瓣的归一化幅度峰值均明显超过了0.2；有加权时只有4个左侧旁瓣，其归一化幅度峰值大约为0.2。由此可知，有加权时波束集中度明显更高。

三、总结

本文研究了天线阵列的自适应波束成形，根据接收信号强度来实时调整波束形状。分别采用四种传播衰减因子进行仿真，仿真结果显示：该方法可以使天线主瓣有效对准目标用户，并且传播衰减因子越小，波束的指向性能越好。另外，与无加权波束成形相比，有加权时旁瓣的数目和功率都更小，波束集中度更高。

参考文献

[1] 郑文逸, 吴广富, 李云. 基于 MIMO 阵列的混合波束赋形算法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2022, 34(04): 646–653.
[2] 李佩茵. 毫米波大规模 MIMO 系统中的 3D 波束赋形及跟踪技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
[3] 王力权, 马西锁, 王力男. 基于压缩感知的毫米波大规模 MIMO 混合波束赋形设计 [J]. 信息技术, 2022, (08): 48–52.
[4] Frank Gross. 智能天线 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 74–75.