

混合波束成形在60GHz频段上行的链路中的应用

2018年10月12日 16:29

60GHz毫米波易于集成的特点使得波束成形技术广泛应用，以改善传输质量并提升系统容量。本文主要研究60GHz通信系统上行链路中混合波束成形技术。智能天线波束成形分为固定码本波束切换与自适应波束切换两类。考虑到算法的复杂度，60GHz毫米波通信系统采用固定码本波束切换，但是由于固定码本切换精度受限，且较大的旁瓣增益，因此针对60GHz通信系统上行链路提出混合波束成形技术，在发送端采用固定码本波束切换，在接收端采用自适应波束成形，实现了复杂度与接收性能之间的平衡。论文提出了适用于不同场景的两种混合波束成形算法：**基于波达角估计的混合波束成形算法与基于逐步细化波束搜索的快速混合波束成形算法；搭建Matalb仿真系统平台对所提方案进行性能仿真，验证了混合波束成形算法对传输性能的有效性。**

论文创新研究工作如下：

- (1) 基于波达角估计的混合波束成形算法：接收端首先利用二级波束训练搜索得到最优波束，从而估计期望信号与干扰信号的波达角，然后用零陷波束成形算法获得权值矢量的初值，进一步改进型最小均方算法（LMS）算法，通过自适应迭代获得最优波束。
- (2) 基于细化

为了应对显著的路径损耗并有效地提升链路预算，60GHz通信系统通常使用波束成形技术。通常波束成形技术可以分为自适应成形和固定码本切换码本波束切换两种实现方案。前者利用选定的最优准则，动态调整其发送端与接收端波束权值向量（码本），继而获得最佳传输性能，然而需发送导频序列执行信道估计，并需反馈信道传送信道状态信息，因而实现复杂度比较高，不适合低复杂度用户设备；而后者固定码本波束切换时利用固定的波束权值向量（码本），即预先设计好一组波束码本，随机选择其中一组权值向量发送，而接收端需要通过波束训练（搜索），选定可最大化接收信噪比的码本进行通信，这种方案无法获得理论最优接收信干噪比，但是具有极低的实现复杂度，因而适合于低成本小型设备。

智能天线系统是天线阵列与自适应信号处理技术相结合的一种新型天线，通过调整全向智能天线，提供一个可以自由控制的定向窄波束，能够获得最优化接收性能，可以降低信号发射功率，抑制全向天线信号发射所造成的强电磁干扰。其核心思想是利用阵列天线，充分利用各个用户发送信号的不同空间特征；基于某种优化准则，通过调整各个天线单元的加权向量（影响信号的幅度与相位），进一步调整其辐射方向图，目标是主瓣指向期望方向，而零点或旁瓣指向干扰方向，实现干扰抑制与信号跟踪。因此可以降低信道码干扰（CCI），从而达到对不同用户信号的最佳发射与接收。

智能天线在发送端采集几种能量的窄波束，节省发射功率；在接收端，提高接收信号的信干噪比（SINR）。优点主要表现在：通过权值矢量的调节提高强方向性通信；通过空间分集增加系统的通信容量；通过多天线技术提高通信数据传输能力与通信质量；能够有效地降低电磁干扰，减少多径效应；对移动

天线方向图是用来综合表示天线的辐射能力，是归一化场强在方向上的曲线变化图。而天线阵

就是通过调整每个阵元之间的幅度与相位差，得到所需要的方向图。方向图用直角坐标系与极坐标系两种表达方式

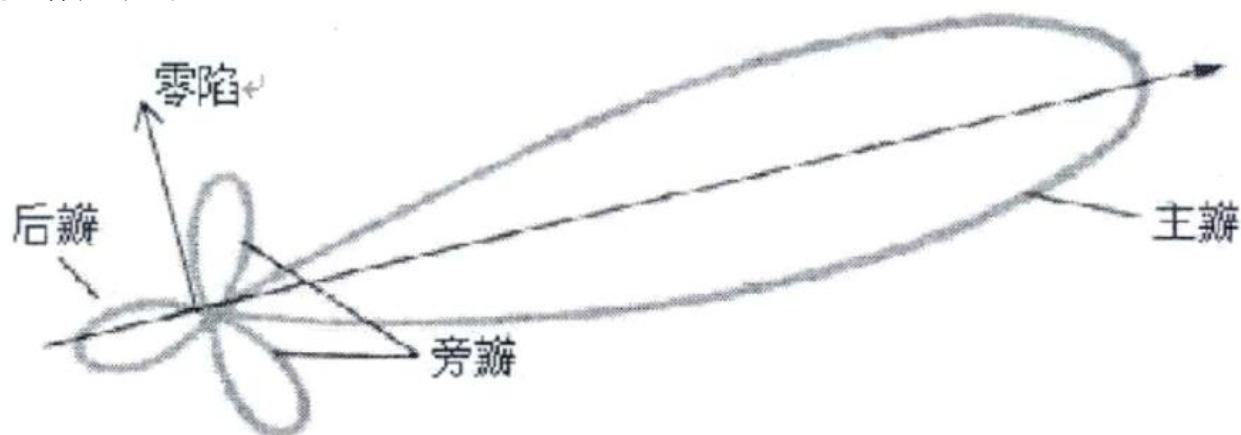


图 2-3 极坐标天线方向图

主瓣、旁瓣、零陷

主瓣是天线方向图中辐射强度最大方向的波瓣。天线方向性的强弱由主瓣的宽度决定，主瓣宽度分为零功率波瓣宽度与半功率波瓣宽度。零功率波瓣宽度是指离主瓣最近的两个零点之间的角度；而半功率波瓣宽度是指两个离主瓣最近的两个半功率点之间的宽度。旁瓣是指在天线方向图中主瓣旁边的一些小波束，而旁瓣电平是指离主瓣最近、电平最高的波瓣的最高分贝电平。旁瓣电平的高低，在某种意义上反映了天线方向性的好坏，旁瓣电平越低，方向图辐射能力越强。在天线方向图中还存在者零陷，是指在辐射强度为零的点，代表该方向没有电磁信号的辐射或干扰。在天线设计或者权值适量调整的时候，目标是尽量期望主瓣方向对准期望信号方向，零陷或旁瓣方向对准干扰信号方向。

天线阵的作用是用来增强天线的方向性，提高天线的增益系数。而天线阵的辐射场是各天线阵元所产生的矢量叠加，因此由各个阵元的类型、电流分布、以及其排列组合方式共同决定。**天线阵的辐射方向由阵元的方向性与各阵元之间的排列位置两个因素共同影响。**

60GHz高路径损耗的特性决定了60GHz无线通信系统必须使用智能天线，通过几种能量的强方向性能够提高点对点传输能力、改善链路质量。智能天线是通过调整每个阵元上权值矢量的幅度与相位变化改善方向图，根据权值矢量是否可以自适应变换，将智能天线分为了固定码本波束切换与自适应天线两种。

（1）固定码本波束切换天线

原理：首先需要预先设定发送与接收码本，一般情况下码本中代表的所有天线图能够覆盖整个辐射区域，而不同波束其对应的主瓣方向不同；其次波束搜索阶段，即发送机从定义好的码本随机选择波束进行发送，接收机端通过波束搜索、扫描，进而寻找到输出信噪比（SNR）最大的最优收发波束对；最后采用最优波束对进行数据通信。

（2）自适应天线阵列

自适应天线阵列，根据系统内部规定好的自适应准则，不断调整每个阵元上的权值矢量，直到该自适应迭代算法收敛，输出最优权值，得到最优接收波束。自适应天线阵原理结构包括：天线阵、波达角估计、信道估计、信号滤波器。其中天线阵是用来接收信号；波达角估计能够估算来波的期望方向与干扰方向；信道估计是辅助估计信道信息，用于抑制多径干扰；信号滤波器是对输出信号进行信号处理。

无线通信是，由于自由空间的传播损耗、阴影衰落、多径衰落等因素，信号通常会在传播过程中中有一定损耗，因此一般采用路径损耗来表示信号在无线通信信道中传播时的衰减情况，该参量能够在很大程度上影响信号传播范围的大小，相同的发射功率下，较大的路径损耗会极大的限制传播范围。60GHz通信系统，由于在自由空间中氧气吸收严重，一般应用在室内短距离无线通信

表 3-1 改进型 LMS 算法描述	
输入:	期望信号 s_0 与干扰信号 s_i ($i=1,2,...,k$) 经过衰落信道后得到的混合信号 X , 信号搜索计数器 i , LMS 算法的迭代次数计数器 n , 学习速率 η , 搜索时间常数 c
步骤:	<p>[1]. 置 $i=0$, 估计期望信号 s_0 的来波方向, 通过波束搜索获得最优波束, 计算该波束主瓣方向, 即 s_0 的估计到达角。</p> <p>[2]. 置 $i=i+1$, 估计干扰信号 s_i 的来波方向, 通过波束搜索获得最优波束, 计算该波束主瓣方向, 即 s_i 的估计到达角。</p> <p>[3]. 判定 $i < k+1$? 如若否, 跳出循环, 继续步骤[4]; 若是, 重复步骤[2]。</p> <p>[4]. 基于零陷波束理论, 结合所有信号估计的到达角, 利用公式(7), 求出零陷波束成形的权值矢量 w_{zs}。</p> <p>[5]. 置 $n=0$, $w(0)=w_{zs}$, 为 LMS 算法设初值。</p> <p>[6]. 置 $n=n+1$, 计算误差 $e(n)=d(n)-w(n)^H u(n)$, 更新权值 $w(n)=w(n-1)+\mu(n)u(n)e^*(n)$, 其中自适应步长 $\mu(n)=\eta/(1+n/c)$。</p> <p>[7]. 继续循环执行步骤[6], 直到均方误差趋于稳定, 返回最终自适应权值矢量 w_{opt}。</p>

逐步细化的波束搜索:

60GHz有着传统低频段无法比拟的优势，但是由于其独特的传输特性，想要真正再实际中发挥60GHz通信的优势，就必须克服它的劣势，主要体现在以下几个方面：

(1) 路径损耗较高，链路预算低。60GHz信号极易被氧气吸收，在大气中传播时的衰减很大，并且波长较短，信号绕射能力较差，60GHz频段的自由空间路径损耗十分巨大。相比于2.4GHz，60GHz的路径损耗要增加20dB至30dB。极高的传输带宽带来高传输速率的同时，也使得系统中的链路噪声成倍的增加，60GHz的链路预算低，适合短距离通信。

(2) 视距遮挡对通信质量影响巨大，由于60GHz适用于室内短距离通信，当通信双方的视距（LOS）被家具等障碍物或者人类移动所阻挡时，会产生高达20dB左右的阴影衰落，这将对通信质量造成严重影响，60GHz通信系统需要在非视距场景下建立可靠的通信链路。

(3) 多径传输。高频信号具有非常丰富的反射和散射，这使得其信道具有多径和频谱选择性。这就意味着，60GHz通信将会产生严重的码间干扰，必须使用一定的抗码间干扰技术（如信道均衡或者正交频分复用）来改善通信质量。

IEEE 802.15.3c标准由IEEE TG3c工作组于2009年发布并得到摩托罗拉、IBM等公司的支持，这是第一个最高传输速率达到Gbps级别的短距离无线通信标准，对无线网的MAC层与PHY层做出了详细规定。IEEE 802.15.3c的物理层将60GHz频段划分为三种不同的模式：单载波模式、高速接口模式、音频视频模式。IEEE 802.15.3c具有一定的实用价值，但是由于它采用共用信道传输信标和数据，在进行数据传输时的时延较大，在实时数据传输方面存在缺陷。

60GHz系统中波束成形技术研究现状：IEEE 802.11.3c和IEEE 802.11.ad都建议使用固定码本切换方案来完成波束成形，并提出了分级式搜索机制，用以减少搜索的次数。其中IEEE 802.11.3c给出了明确的码本设计方案，即码本的幅值不做变化，只做四种相位上的改变，而IEEE 802.11ad没有规定码本的形式。60GHz系统中，针对波束搜索的研究，大多是以3c码本为基础，集中在对码本设计的改进和波束搜索算法的改进

波束搜索依赖于码本设计，即波束形成健全向量矩阵设计。波束搜索使用的码本为固定码本，每个码本对应于一个波束权值，由多个指向不同的波束覆盖整个用户区域，在进行波束成形时，从预设的一组波束中选出最优的一个最为其工作模式。由于波束指向式先设定好的，在方向选择方面不可避免地会受到限制，有的用户可能处于波束地边缘位置，无法将波束主瓣指向期望用户方向，使其难以获得足够地链路补偿，从而影响天线地接收效果，因此好地码本对整个系统性能地影响至关重要。在设计码本时不光要注意波束对用户区域地覆盖性，由于波束主瓣方向是关于载波频率地函数，不同地载波频率会造成波束主瓣方向的偏移，因此，抑制载波频率也是码本设计时需要考虑的问题。其次，波束应该有良好的方向性，并能够提供足够的主瓣增益。同时，应尽可能降低旁瓣增益以减少对可能的干扰信号的接收。另外，还需要对设备复杂度和功耗等指标进行考虑