

# 毫米波无线通信系统混合波束成形综述

束 锋<sup>1,2,3</sup> 杨淑萍<sup>1</sup> 许正文<sup>2</sup> 秦耀璐<sup>1</sup> 王 进<sup>1</sup> 周小波<sup>1</sup> 刘婷婷<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京, 210094; 2. 电子科技集团公司第二十二研究所电波环境特性及模块化技术国防科技重点实验室, 青岛, 266107; 3. 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京, 210096)

**摘 要:** 毫米波频段拥有大量未充分使用的频谱资源, 能有效缓解低频段频谱拥塞, 并且由于毫米波波长较短, 能极大地减小大规模天线系统的物理尺寸, 使得毫米波通信成为 5 G 无线通信系统潜在的关键技术之一。考虑到毫米波传播路径损耗严重, 毫米波系统需采用波束成形技术改善传输质量。在毫米波大规模多输入多输出 (Multiple-input multiple-out, MIMO) 系统中, 由于数字波束成形高功耗、高成本问题, 混合数模波束成形成为重要的替代方案。本文首先阐述了毫米波混合波束成形的研究现状, 而后给出了系统模型, 最后介绍了信道估计、码本设计和低复杂度设计等混合波束成形的关键技术。

**关键词:** 毫米波系统; 大规模天线系统; 信道估计; 混合波束成形

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A

## Overview of Hybrid Beamforming for Millimeter Wave Systems

Shu Feng<sup>1,2,3</sup>, Yang Shuping<sup>1</sup>, Xu Zhengwen<sup>2</sup>, Qin Yaolu<sup>1</sup>, Wang Jin<sup>1</sup>, Zhou Xiaobo<sup>1</sup>, Liu Tingting<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, 266107, China; 3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

**Abstract:** The large underutilized spectrum of Millimeter wave (mmWave) can efficiently alleviate the spectrum shortage at lower frequency bands, and the physical size of large-scale antennas systems can be greatly reduced due to the shorter wavelength at mmWave frequencies, which enables mmWave communication to be one of the potentially crucial techniques for 5 G wireless communication systems. Considering the severe path loss of mmWave frequencies, beamforming needs to be utilized in an mmWave system for improving the transmission quality. Due to the high power consumption and high cost of fully digital beamforming methods in mmWave massive MIMO systems, hybrid digital and analog beamforming become an important alternative scheme. Here, we first introduce the current research state of hybrid beamforming schemes for mmWave MIMO systems. Then the system model is built. Finally, the crucial technologies of hybrid beamforming, i. e., channel estimation, codebook design and low-complexity design are described.

**Key words:** millimeter wave system; large-scale antenna systems; channel estimation; hybrid beamforming

## 引 言

下一代移动通信系统(5 G)的目标为实现通信系统吞吐量增加 1 000 倍左右,频谱效率显著提升,以满足 2020 年以后移动通信的需求<sup>[1-2]</sup>。大规模多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)技术<sup>[3-4]</sup>、先进的信道编码技术<sup>[5]</sup>、异构无线通信网络密集化技术,主要包括小小区(Small cell)部署<sup>[6-7]</sup>和 D2D(device-to-device)通信<sup>[8]</sup>,能够提高频谱利用效率,增加系统容量。与云无线接入网相结合的新型大规模 MIMO 系统,能进一步提升通信系统性能<sup>[9]</sup>。然而面对未来移动互联网流量的指数级增长,现有微波无线通信系统频谱稀缺成为制约系统容量进一步提升的主要瓶颈问题。毫米波频段丰富的频谱资源有利于大规模天线的集成,使得毫米波通信成为了 5 G 的关键技术之一。毫米波通常是指频率在 30~300 GHz 的电磁波,被认为是 5 G 通信系统的主要候选频段,且已应用于室外点对点回程链路通信系统<sup>[10]</sup>。毫米波频段严重的路径损耗及降雨衰落致使毫米波通信系统需要波束成形技术来补偿路径损耗,改善传输质量。毫米波频段波长短,可以在小设备上集成大规模天线,从而获得很高的波束成形增益<sup>[11]</sup>。随着天线数增大,若每副发射天线都配备一条射频(Radio frequency, RF)链路,将带来高成本、高功率消耗问题。并且天线阵元间距小,阵元间的 RF 链路分离困难。传统的数字波束成形<sup>[12-16]</sup>要求每副发射天线都配备一条 RF 链路,随着天线数的增加,射频链路亦随之增加,因而全数字波束成形方案在大规模天线阵列中不具实用性。模拟预编码器<sup>[10,17]</sup>通过移相网络控制天线发射信号的相位实现模拟波束成形,克服了 RF 硬件限制,降低了系统成本。但是模拟波束成形只支持单流传输,并且相移器需满足幅度为常数的限制,其性能与无硬件约束的数字预编码器相比往往是次优的<sup>[15]</sup>。混合数模预编码作为毫米波 MIMO 系统的新兴技术<sup>[18-20]</sup>,采用远小于天线数的 RF 链路以降低系统开销,同时采用大量的相移器增加天线阵列的增益,从而实现系统性能与硬件成本的折衷,且能支持多流传输,使得混合波束成形成为一种在毫米波大规模 MIMO 通信系统中最优先考虑的预编码方案,近年来获得了学术界广泛的关注。

混合波束成形首先在文献[21]中以天线“软选择”的名义引入,近年来成为毫米波系统发展的重要技术之一。文献[18]考虑毫米波信道的稀疏特性,利用压缩感知(Compressed sensing, CS),提出了自适应的信道估计算法,能在多径信道有效地估计信道参数。并设计了混合预编码分层多分辨率码本。文献[19]基于毫米波信道的空间稀疏性,设计了单用户大规模 MIMO 系统的混合波束成形。采用同时求解模拟波束成形和数字波束成形的正交匹配追踪算法,对混合预编码器与全数字预编码器之间的 Euclidean 距离最小化问题进行求解,从而最大化毫米波系统频谱效率。文献[22]假定已知信道状态信息(Channel state information, CSI),首先研究了 RF 链路数为数据流数两倍时的混合波束成形,而后研究了 RF 链路数小于数据流数两倍时两种特殊场景的混合波束成形:(1)发射端和接收端均采用大规模天线阵列的点对点 MIMO 通信场景;(2)基站为大规模天线阵列,用户为单天线的多用户多输入单输出(Multiple-input multiple-output, MISO)下行链路通信场景。文献[23]利用连续自干扰消除(Successive interference cancelation, SIC)的思想,提出了低复杂度基于 SIC 的分离型子阵列混合预编码器。文献[24]提出了分离型子阵列结构和共享型结构的混合波束成形算法,将混合预编码分解成模拟预编码和数字预编码子问题,采用交替最小化原则,进行模拟和数字波束成形交替优化。文献[25]以各用户功率最大化为准则基于量化码本设计混合预编码矩阵,由于量化码本的使用,码字训练开销较大。

因移相器幅度不可调的限制,尽管研究者提出了许多的混合波束成形方案,混合预编码器的最优设计至今仍未有定论。在模拟预编码器中,采用更好的方法处理相移器的恒模约束仍然值得更深入的研究。许多的混合波束成形方案都假设发射端已知完整或部分 CSI,在大规模天线阵列中 CSI 往往难以获得,通常需要高性能的信道估计算法。相较于共享型结构,分离型子阵列结构的混合预编码器相关研究较少。

### 1 系统模型

图 1 给出了数字波束成形、模拟波束成形结构框图,图 2 给出了混合波束成形的两种典型结构:共享型(全连接)结构和分离型子阵列(部分连接)结构<sup>[23-24]</sup>。分离型子阵列结构的每一条射频链路只需与一个天线子阵列相连,而共享型结构中每一条射频链路通过相移器与所有的天线相连,与共享型结构相比,分离型子阵列结构能显著减少相移器的数目。如图 1,2 所示,数字波束成形结构每副天线均与一条独立的射频链路相连。考虑到毫米波频段 RF 链路的功耗占总功耗的很大部分<sup>[23]</sup>,在大规模天线系统中,RF 链路的功耗将相当可观。模拟波束成形结构简单,但仅支持单流传输,并且由于相移器的幅度不可调,其性能难以与数字波束成形相比。混合波束成形结构采用的 RF 链路数远小于天线数目,与数字波束成形结构相比,能量效率更高;相较于模拟波束成形结构,能支持多流传输,具体如表 1 所示。在图 2 所示的毫米波 MIMO 通信系统混合波束成形中,基站天线数为  $N_t$ ,RF 链路数为  $N_{RF}'$ ,发送的数据流数为  $N_s$ ,满足  $N_t \geq N_{RF}' \geq N_s$ 。设  $\mathbf{s}$  为发送的符号向量且  $E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H] = N_s^{-1} \mathbf{I}_{N_s}$ ,接收机天线数为  $N_r$ , $\mathbf{H}$  为  $N_r \times N_t$  的信道矩阵,则接收机接收到的信号为

$$y = \sqrt{\rho} \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s} + \mathbf{n} \tag{1}$$

式中: $\rho$  为平均接收功率, $\mathbf{F}_{BB}$  为  $N_{RF}' \times N_s$  的数字预编码矩阵, $\mathbf{F}_{RF}$  为  $N_t \times N_{RF}'$  的模拟预编码矩阵。 $\mathbf{F}_{RF}$  采用模拟相移器实现,其所有元素的幅度均相等,即满足约束  $|[\mathbf{F}_{RF}]_{m,n}|^2 = N_t^{-1}$ , $\mathbf{n}$  为服从复高斯分布  $CN$

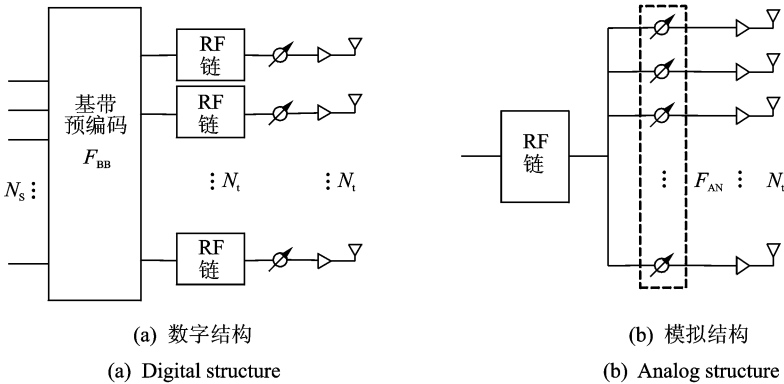


图 1 数字波束成形及模拟波束成形结构示意图

Fig.1 Architectures of digital and analog beamforming

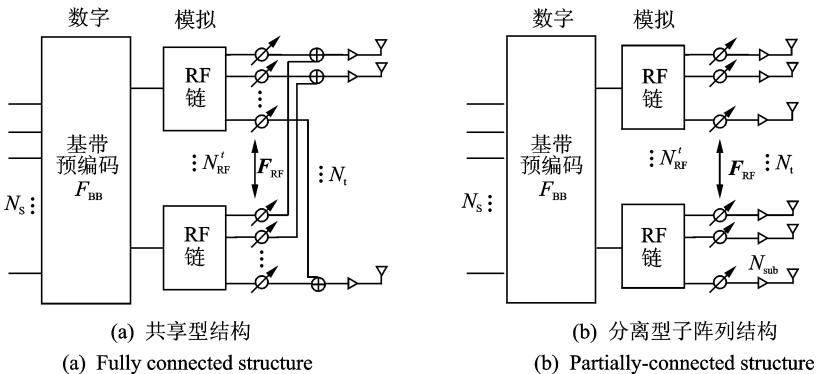


图 2 混合波束成形两种典型结

Fig.2 Two typical architectures of hybrid beamforming

$(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_t})$  的噪声矢量。在分离型子阵列结构, 设每个子阵列的天线数为  $N_{\text{sub}}$ , 则基站的发天线数  $N_t = N_{\text{RF}} N_{\text{sub}}$ 。式(1)中模拟预编码矩阵  $\mathbf{F}_{\text{RF}}$  可表示为

$$\mathbf{F}_{\text{RF}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{p}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{p}_{N_{\text{RF}}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{p}_i (i=1, 2, \dots, N_{\text{RF}})$  为  $N_{\text{sub}} \times 1$  的向量, 元素幅度为常数, 表示第  $i$  个子阵的模拟预编码矢量。

表 1 数字、模拟及混合波束成形的比较

Tab. 1 Comparisons of digital, analog and hybrid beamforming

结构	RF 链路数	支持传输的数据流数	射频功耗(每射频链路数约 $250 \text{ mW}^{[26]}$ )/mW
数字波束成形结构	$N_t$	支持多流传输	$N_t \cdot 250$
模拟波束成形结构	1	只支持单流传输	250
混合波束成形结构	$N_{\text{RF}}$	支持多流传输	$N_{\text{RF}} \cdot 250$

由于毫米波频段波长短, 在自由空间传播的路径损耗严重, 有效散射体数目有限, 簇信道模型通常被用来描述毫米波的传播环境<sup>[18-20, 22-25]</sup>。假设有效散射体数目为  $N_{\text{sc}}$ , 每个散射体所形成的簇内有  $N_{\text{ray}}$  条传播路径, 则信道矩阵表示为

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_t N_r}{N_{\text{sc}} N_{\text{ray}}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{sc}}} \sum_{l=1}^{N_{\text{ray}}} \alpha_{il} \mathbf{a}_r(\varphi_{il}^r, \theta_{il}^r) \mathbf{a}_t(\varphi_{il}^t, \theta_{il}^t)^H \quad (3)$$

式中:  $\alpha_{il}$  为第  $i$  个散射簇中第  $l$  条传播路径的增益;  $\mathbf{a}_t(\varphi_{il}^t, \theta_{il}^t)$  和  $\mathbf{a}_r(\varphi_{il}^r, \theta_{il}^r)$  分别为发射端和接收端的阵列响应矢量, 其中  $(\varphi_{il}^t, \theta_{il}^t)$  和  $(\varphi_{il}^r, \theta_{il}^r)$  分别为离开角和到达角。接收机接收的信号经混合波束成形处理后表示为

$$\tilde{\mathbf{y}} = \sqrt{\rho} \mathbf{W}_{\text{BB}}^H \mathbf{W}_{\text{RF}}^H \mathbf{H} \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{s} + \mathbf{W}_{\text{BB}}^H \mathbf{W}_{\text{RF}}^H \mathbf{n} \quad (4)$$

式中:  $N_{\text{RF}}^r$  为接收机的 RF 链路数;  $\mathbf{W}_{\text{RF}}$  为  $N_r \times N_{\text{RF}}^r$  维的接收模拟波束成形矩阵, 满足元素幅度均相等的约束;  $\mathbf{W}_{\text{BB}}$  为  $N_{\text{RF}}^r \times N_s$  维的接收数字波束成形矩阵, 且  $N_r \geq N_{\text{RF}}^r \geq N_s$ 。单用户毫米波 MIMO 系统实现的传输速率为

$$R = \log_2 \left( \left| \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{W}_{\text{BB}}^H \mathbf{W}_{\text{RF}}^H \mathbf{H} \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{F}_{\text{BB}}^H \mathbf{F}_{\text{RF}}^H \mathbf{H}^H \mathbf{W}_{\text{RF}} \mathbf{W}_{\text{BB}} \right| \right) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{R}_n = \sigma_n^2 \mathbf{W}_{\text{BB}}^H \mathbf{W}_{\text{RF}}^H \mathbf{W}_{\text{RF}} \mathbf{W}_{\text{BB}}$  为接收混合波束成形处理后的噪声协方差矩阵。以最大化系统频谱效率为目标的混合数模波束成形优化问题可表述为

$$\underset{\mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}}, \mathbf{W}_{\text{RF}}, \mathbf{W}_{\text{BB}}}{\text{argmax}} R \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{F}_{\text{RF}} \in \mathbf{F}'_{\text{RF}}, \mathbf{W}_{\text{RF}} \in \mathbf{W}'_{\text{RF}}, \|\mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}\|_{\text{F}}^2 = N_s \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{F}'_{\text{RF}}$  和  $\mathbf{W}'_{\text{RF}}$  分别为发射端和接收端模拟波束成形矩阵的可行集, 即  $\mathbf{F}'_{\text{RF}}$  和  $\mathbf{W}'_{\text{RF}}$  中元素的幅度均为常数。图 3 给出了数字预编码、混合预编码和模拟预编码的性能比较曲线。发射机配置 64 副天线, 混合预编码器采用 6 条 RF 链路。与无硬件约束的数字预编码器相比, 混合预编码器利用远小于天线数的 RF 链路能实现与数字预编码可比的频谱效率, 并且性能始终优于模拟波束成形。混合预编码器能在不造成明显性能损失的情况下, 有效解决数字波束成形中 RF 链路带来的功耗及成本问题。考虑 RF 链路数对混合波束成形性能的影响, 如图 4(a) 所示, 发送的数据数为  $N_s = 2$ , 随着 RF 链路数目的增加, 系统的频率效率获得一定的提升, 当 RF 链路数大于 4, 即满足  $N_{\text{RF}} > 2N_s$  时, 混合波束成形可获得最大的频谱效率。在 RF 链路数等于两倍的数据流数, 甚至 RF 链路数小于两倍数据流数条件下, 如何设计接近最优性能的混合波束成形算法已成为毫米波大规模天线系统混合波束成形研究的重要问题<sup>[22, 24]</sup>。

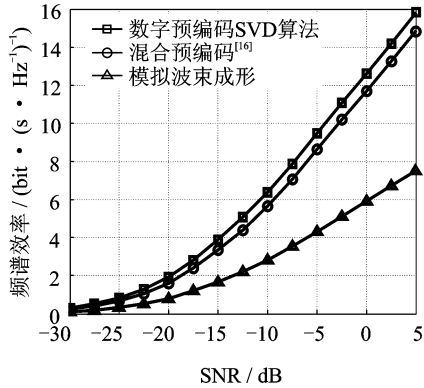


图3 3种不同预编码方案的性能比较

Fig. 3 Performance comparison of three different precoding schemes

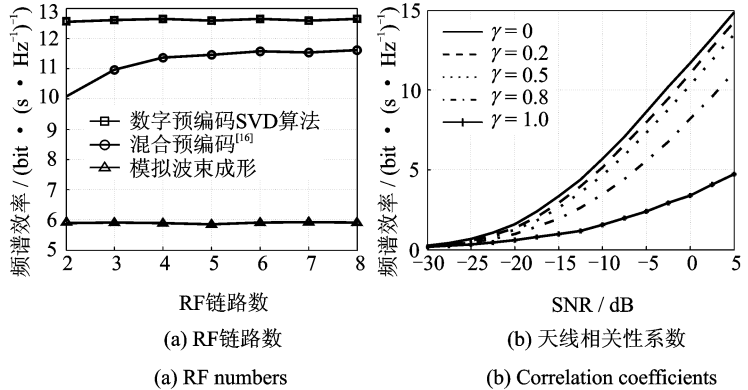


图4 RF链路数、天线相关性对混合波束成形性能的影响

Fig. 4 Effects of RF numbers and correlation coefficients on hybrid precoding performance

毫米波 MIMO 系统通常采用大规模天线来提高波束增益,由于大规模天线排列密集,阵元间隔较小,天线的空间相关性将会影响系统的性能。图 4(b) 给出了天线相关性系数  $\gamma$  对混合波束成形系统频谱效率的影响。从图 4(b) 中可以看出,天线相关性越大,系统频谱效率越低。在低信噪比情况下,天线相关性对系统的影响可以忽略,而在高信噪比情况下,天线相关性系数越大,系统性能恶化越明显。因此应对天线系统进行合理布局,尤其是尺寸受限的终端设备,需设计相应的去相关性网络减少天线之间的相关性,从而降低其对系统性能的影响。

## 2 混合波束成形关键技术

### 2.1 信道估计

毫米波 MIMO 系统混合预编码矩阵通常基于完整的信道状态信息进行设计,然而大规模天线阵列和波束成形前的低信噪比使得信道状态信息往往难以获得<sup>[27]</sup>。在时分双工(Time division duplexing, TDD)系统中,信道状态信息可通过发送上行训练序列利用信道互易性获得。在频分双工(Frequency division duplexing, FDD)系统中,基站向用户发送训练序列,等待用户反馈,从而获得信道状态信息。毫米波 MIMO 系统的发射机和接收机均采用大规模天线阵列来提供足够的波束增益及接收功率,以弥补传输路径损耗。大规模天线的使用导致信道矩阵的维度增大,反馈开销明显增大。考虑到用于训练的独立导频数目受限于信道的相干时间,在大规模 MIMO 系统中,随着天线数增多,可能导致导频数目小于天线数目,从而出现无导频可用的情况。由于毫米波信道在角度域的稀疏性<sup>[18-19]</sup>,信道矩阵可由到达角、离开角、有限的散射路径及其路径增益确定,因此估计毫米波信道等效于估计信道的上述参数。因而研究适用于毫米波信道的信道估计算法对毫米波大规模 MIMO 系统的发展十分重要。利用毫米波信道的稀疏特性可设计基于压缩感知的信道估计算法估计多径信道<sup>[18,28-30]</sup>。文献[18,31]研究了在混合预编码结构下的基于压缩感知技术的信道估计,利用匹配跟踪算法估计信道参数,然而所提出方法需要信道的一些先验信息:多径数目<sup>[18]</sup>和信道的统计信息<sup>[31]</sup>。采用阵元数目可变的的天线阵列<sup>[32]</sup>能进一步提升文献[18]中信道估计的性能。

混合预编码矩阵和合并矩阵,尤其是 RF 波束导向向量,需要事先知道天线阵列的结构信息,因此天线阵列结构信息未知环境下的稳健毫米波信道估计算法以及考虑发射机和/或接收机移动性的低开销信道估计算法更待进一步的研究。

## 2.2 码本设计

受制于硬件限制,即 RF 链路数远小于天线数目,毫米波信道估计可通过角度域的波束搜索获得有限多径分量的离开角和到达角。并且对于混合波束成形,基于码本进行波束训练能得到模拟波束矢量,进而可以在等效信道模型下求解数字波束矢量。由于在所有可能的波束方向采用高分辨率的窄波束进行波束训练会带来大量的训练开销,因此基于分层码本结构的多阶波束搜索近年来被广泛采用<sup>[18,28-30,32-34]</sup>。多阶波束搜索是指先利用低分辨率码本层找到最优的波束分区,而后利用高分辨率码本层在最优波束分区内找到最优的波束。多阶波束搜索的训练开销与所用码本高度相关,码本设计对减少波束训练开销十分重要。IEEE 802.15.3c 码本(称为 3c 码本)设计能降低天线的功耗,且支持多种天线模式设置。但 3c 码本设计存在一定的缺陷:若信号从两个波束之间入射,天线阵列不能以最大的增益进行接收,从而造成一定的增益损失;另外,某些主瓣方向天线阵列无法达到满增益。3c 码本及在此基础上改进的码本均为模拟域的码本设计,混合数字/模拟预编码结构不仅支持多流传输,而且能为码本设计提供更大的灵活性。鉴于此,文献[18,35]提出了不同波束宽度的分层码本,对于均匀线性阵列(Uniform linear array, ULA),多层码本的第  $s$  阶第  $m$  个码字  $\mathbf{f}_m^{(s)}$  满足

$$|\mathbf{a}_{\text{BS}}(\theta)^H \mathbf{f}_m^{(s)}| = \begin{cases} C_s & \theta \in \text{AoD}_{s,m} \\ 0 & \theta \notin \text{AoD}_{s,m} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C_s$  为归一化常数,  $\text{AoD}_{s,m}$  为码字  $\mathbf{f}_m^{(s)}$  覆盖的离开角范围。图 5 给出了文献[18]分层码本波束图的示例,分层码本的码字在其所覆盖的角度范围内波束增益约为常数,并且不同波束方向图之间的混迭较少。利用分层码本进行分阶段波束搜索可以加速搜索过程,减少波束训练时间。

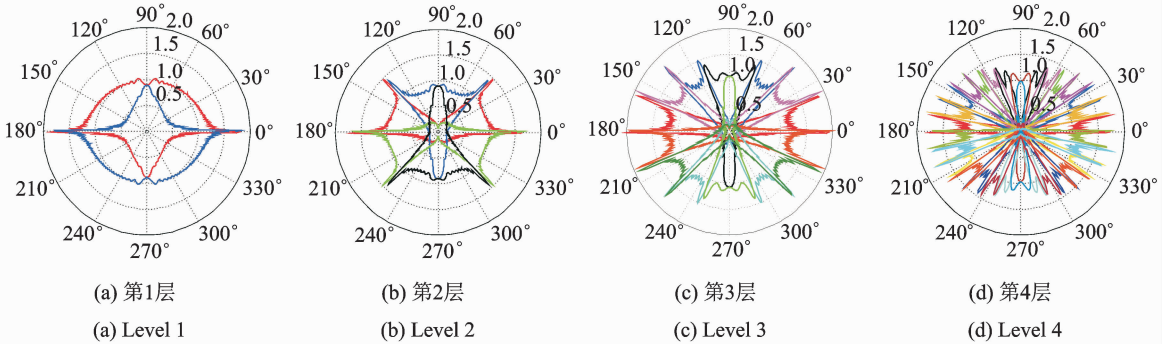


图 5 文献[18]分层码本前 4 层波束方向图

Fig. 5 Beam patterns in first four codebook levels of hierarchical codebook<sup>[18]</sup>

理想的码字在波束覆盖的角度范围内,波束增益应为常量,然而由于模拟相移器受到幅度为常数的约束,理想码字难以设计,文献[18,35]都是次优的码字设计。文献[36]考虑每副天线的功率约束,提出了广义检测概率(Generalized detection probability, GDP)准则从码字波束图的平坦度和最大传输功率两方面来衡量码字性能。利用该准则可以比较不同码本码字的性能,并且可以在一定程度上优化码本设计。

## 2.3 低复杂度设计

毫米波系统频谱效率最大化问题如式(6)所述,若直接对式(6)进行求解,需要共同优化矩阵变量  $(\mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}}, \mathbf{W}_{\text{RF}}, \mathbf{W}_{\text{BB}})$ ,并且受移相器仅相位可调的限制,模拟预编码/合并矩阵元素的幅度均为常数,因而  $\mathbf{F}_{\text{RF}}$  和  $\mathbf{W}_{\text{RF}}$  分别仅能从可行集  $F'_{\text{RF}}$  和  $W'_{\text{RF}}$  中选取,此类非凸约束的共同优化问题往往无法获得最优解<sup>[37-38]</sup>。为简化收发机的设计,可将发射-接收优化问题式(6)解耦为发射端预编码器设计和接收端合并器设计两个子问题<sup>[18-20,24]</sup>。除了预编码器设计有额外的功率约束外,它们有相似的数学表达形式,可采用相同的算法求解波束成形矩阵。因此针对混合波束成形的研究通常集中于预编码器设计,相应的优化问题表述为

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{F}_{\text{opt}}, \mathbf{F}_{\text{RF}}} \|\mathbf{F}_{\text{opt}} - \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}\|_{\text{F}} \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{F}_{\text{RF}} \in \mathbf{F}'_{\text{RF}}, \|\mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}\|_{\text{F}}^2 = N_{\text{S}} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{F}_{\text{opt}}$  为最优的数字预编码矩阵。另外考虑到毫米波频段波长短, 有利于大规模天线的集成, 因此对于结构简单的用户设备, 文献[25,39]提出了在多用户毫米波 MIMO 系统中, 发射端采用混合预编码结构, 接收端仅采用模拟波束成形进行信号处理, 从而可以在降低接收设备信号处理复杂度的同时利用大规模天线阵列带来的高天线增益。鉴于模拟波束成形矩阵的恒模约束, 且在发射端数字预编码器  $\mathbf{F}_{\text{BB}}$  和模拟预编码器  $\mathbf{F}_{\text{RF}}$  相互耦合, 即混合预编码器要求设计  $\mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}$ , 求解复杂度较高。文献[25,39]首先确定模拟预编码矩阵  $\mathbf{F}_{\text{RF}}$  和模拟合并矩阵  $\mathbf{W}_{\text{RF}}$ , 而后求解数字预编码矩阵  $\mathbf{F}_{\text{BB}}$  以消除用户间干扰的两步混合波束成形算法。文中通过仿真表明所提混合波束成形算法可以获得接近 BD 预编码算法的性能。混合波束成形结合了数字波束成形与模拟波束成形, 在毫米波大规模 MIMO 系统中, 尤其是多用户毫米波大规模 MIMO 系统, 如何设计近优性能的低复杂度混合预编码器是毫米波混合波束成形重要的研究方向之一。

### 3 结束语

毫米波系统丰富的频谱资源使其成为 5 G 移动蜂窝网潜在的关键技术之一。由于毫米波传播路径损耗严重, 毫米波系统需应用波束成形技术改善传输链路质量。考虑到毫米波系统的硬件限制、大规模天线和信道稀疏特性, 混合波束成形成为 5 G 毫米波通信系统的主要技术之一。本文介绍了毫米波混合波束成形的两种典型结构, 分析了其相对于数字波束成形及模拟波束成形的优点, 讨论了混合波束成形的关键技术。混合波束成形作为毫米波 MIMO 系统的新兴技术, 仍有许多开放的研究课题: 多用户毫米波 MIMO 系统的混合波束成形、信道估计及接收机设计等。目前毫米波混合波束成形的相关研究均基于窄带信道模型假设, 宽带毫米波信道统计模型不同于窄带, 因此宽带信道模型下的毫米波波束成形技术是未来研究的重点。基于混合波束成形能够克服 RF 硬件限制, 实现系统性能与硬件成本的折衷, 且支持多流传输的优势, 因此运用该结构的通信收发机未来可广泛应用于下一代各类中大规模通信系统如移动通信系统<sup>[40-41]</sup>、卫星定位与通信系统<sup>[42-43]</sup>、中继协作通信系统<sup>[44-45]</sup>、安全的方向调制系统<sup>[46-47]</sup>和无人机通信网<sup>[48-49]</sup>等场景。

### 参考文献:

- [1] Soldani D, Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(1):32-42.
- [2] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(5):551-563.  
You Xiaohu, Pan Zhiwen, Gao Xiqi, et al. The 5G mobile communication: The development trends and its emerging key techniques[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2014, 44(5):551-563.
- [3] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11):3590-3600.
- [4] 戚晨皓, 黄永明, 金石. 大规模 MIMO 系统研究进展[J]. *数据采集与处理*, 2015, 30(3):544-551.  
Qi Chenhao, Huang Yongming, Jin Shi. Overview of massive MIMO system[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(3):544-551.
- [5] Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need? [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2):160-171.
- [6] Li C, Zhang J, Letaief K B. Throughput and energy efficiency analysis of small cell networks with multi-antenna base stations[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 13(5):2505-2517.
- [7] Bartoli G, Fantacci R, Letaief K B, et al. Beamforming for small cell deployment in LTE-advanced and beyond[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(2):50-56.
- [8] Doppler K, Rinne M, Wijting C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 47(12):42-49.
- [9] Liu L, Zhang R. Optimized uplink transmission in multi-antenna c-ran with spatial compression and forward[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(19):5083-5095.
- [10] Hur S, Kim T, Love D J, et al. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(10):4391-4403.
- [11] Wei L, Hu R Q, Qian Y, et al. Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems[J]. *IEEE*

Wireless Communications, 2014, 21(6):136-143.

- [12] Wiesel A, Eldar Y C, Shamai S. Zero-forcing precoding and generalized inverses[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(9):4409-4418.
- [13] Dahrouj H, Yu W. Coordinated beamforming for the multicell multi-antenna wireless system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5):1748-1759.
- [14] Shi Q, Razaviyayn M, Luo Z Q, et al. An iteratively weighted mmse approach to distributed sum-utility maximization for a MIMO interfering broadcast channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(9):3060-3063.
- [15] Liang L, Xu W, Dong X. Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser mimo systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6):653-656.
- [16] 束锋, 崔玉荻, 钱振宇, 等. 全双工 MIMO 中继系统中一种高性能波束成形算法[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(2):276-281.  
Shu Feng, Cui Yudi, Qian Zhenyu, et al. High-performance beamforming algorithm for full-duplex MIMO relay system[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(2):276-281.
- [17] Tsang Y M, Poon A S Y, Addepalli S. Coding the beams: improving beamforming training in mmwave communication system[C]// Proc 2011 IEEE Global Telecommunications Conference. Houston, USA: IEEE, 2011:1-6.
- [18] Alkhateeb A, Ayach O E, Leus G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5):831-846.
- [19] El Ayach O, Rajagopal S, Abu-Surra S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 13(3):1499-1513.
- [20] Lee Y Y, Wang C H, Huang Y H. A hybrid RF/baseband precoding processor based on parallel-index-selection matrix-inversion-bypass simultaneous orthogonal matching pursuit for millimeter wave mimo systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2):305-317.
- [21] Zhang X, Molisch A F, Kung S Y. Variable-phase-shift-based RF-baseband codesign for MIMO antenna selection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11):4091-4103.
- [22] Sohrabi F, Yu W. Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):501-513.
- [23] Gao X, Dai L, Han S, et al. Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4):998-1009.
- [24] Yu X, Shen J C, Zhang J, et al. Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):485-500.
- [25] Alkhateeb A, Leus G, Heath R W. Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11):6481-6494.
- [26] Amadori P V, Masouros C. Low RF-complexity millimeter-wave beamspace-MIMO systems by beam selection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6):2212-2223.
- [27] 付自刚. 毫米波 MIMO 系统中波束成形研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016.  
Fu Zigang. Research on beamforming in millimeter wave MIMO systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [28] Alkhateeb A, Mo J, Gonzalez-Prelcic N, et al. MIMO precoding and combining solutions for millimeter-wave systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(12):122-131.
- [29] Wang P, Li Y, Song L, et al. Multi-gigabit millimeter wave wireless communications for 5G: From fixed access to cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1):168-178.
- [30] Alkhateeb A, Leus G, Heath R W. Compressed sensing based multi-user millimeter wave systems: How many measurements are needed? [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Brisbane, Australia: IEEE Signal Processing Society Press, 2015:2909-2913.
- [31] Liu A, Lau V. Phase only RF precoding for massive MIMO systems with limited RF chains[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(17):4505-4515.
- [32] Peng Y, Li Y, Wang P. An enhanced channel estimation method for millimeter wave systems with massive antenna arrays [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(9):1592-1595.
- [33] Wang J, Lan Z, Pyo C W, et al. Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(8):1390-1399.
- [34] Kokshoorn M, Wang P, Li Y, et al. Fast channel estimation for millimeter wave wireless systems using overlapped beam patterns[C]// Proc 2015 IEEE International Conference on Communications. London, UK:IEEE, 2015:1304-1309.
- [35] Noh S, Zoltowski M D, Love D J. Multi-resolution codebook based beamforming sequence design in millimeter-wave systems



[C]// Proc 2015 IEEE Global Communications Conference. San Diego, USA; IEEE, 2015:1-6.

- [36] Xiao Z, Xia P, Xia X G. Codebook design for millimeter-wave channel estimation with hybrid precoding structure[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(1):141-153.
- [37] Palomar D P, Cioffi J M, Lagunas M A. Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels: A unified framework for convex optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(9):2381-2401.
- [38] Palomar D P, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(8):1439-1451.
- [39] 李元稳, 何世文, 李春国, 等. 多用户毫米波 MIMO 系统中基于信道互易性的混合数模预编码算法[J]. *信号处理*, 2016, 32(8):922-930.  
Li Yuanwen, He Shiwen, Li Chunguo, et al. Hybrid analog and digital precoding algorithm based on channel reciprocity for multi-user millimeter wave MIMO systems[J]. *Journal of Signal Processing*, 2016, 32(8): 922-930.
- [40] Shu F, You X H, Wang M, et al. Hybrid interference alignment and power allocation for multi-user interference MIMO channels[J]. *Science China Information Sciences*, 2013, 56(4):1-9.
- [41] Bogale T E, Le L B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless hetnet: Potential benefits and challenges[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2016, 11(1):64-75.
- [42] Shu F, Yang S P, Qin Y L, et al. Approximate analytic quadratic-optimization solution for TDOA-based passive multi-satellite localization with earth constraint[J]. *IEEE Access*, 2016, 4:9283-9292.
- [43] 朱伟强, 束锋, 陆锦辉, 等. 基于 TDOA/FDOA 不相关估计的选择融合定位方法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(8):1982-1988.  
Zhu Weiqiang, Shu Feng, Lu Jinhui, et al. A TDOA/FDOA uncorrelated estimation-based selection fusion positioning method[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(8):1982-1988.
- [44] Shu F, Lu Y Z, Chen Y, et al. High-sum-rate beamformers for multi-pair two-way relay networks with amplify-and-forward relaying strategy[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(2):1-11.
- [45] Wang J, Shu F, Huang X, et al. Optimal coherent combining scheme for relay networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 88(3):575-585.
- [46] Hu J S, Shu F, Li J. Robust synthesis method for secure directional modulation with imperfect direction angle[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(6): 1084-1087.
- [47] Shu F, Wu X, Li J, et al. Robust synthesis scheme for secure multi-beam directional modulation in broadcasting systems [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 6614-6623.
- [48] Lu J, Zeng Y, Zhang R, et al. Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3):604-607.
- [49] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 4983-4996.

#### 作者简介:



**束锋** (1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 无线通信与移动网络、雷达信号处理和无线定位, E-mail: shufeng@njust.edu.cn.



**杨淑萍** (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 无线网络与通信。



**许正文** (1971-), 男, 研究员, 研究方向: 电离层电流传播。



**秦耀璐** (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 无线网络与通信。



**王进** (1989-), 男, 博士研究生, 研究方向: 无线网络与通信。



**周小波** (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向: 无线网络与通信。



**刘婷婷** (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 博弈论、边缘计算和认知无线电。

