

# 6G信道估计研究

胡玉佩,陈慧敏

(广东邮电职业技术学院,广东广州 510630)

**【摘要】**信道估计技术是移动通信系统的关键技术之一,未来移动通信系统高速率、高质量、低时延的性能依赖于高精度、低复杂度的信道估计算法。文章对信道估计的基本概念进行概述,分析了国内外信道估计技术的研究现状,最后提出适用于6G的信道估计算法的研究方向。

**【关键词】**信道估计;6G;压缩感知;MIMO-OFDM系统

**【doi:10.3969/j.issn.2095-7661.2023.01.004】**

**【中图分类号】**TN929.5

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**2095-7661(2023)01-0014-06

## Research on Channel Estimation for 6G

HU Yu-pei, CHEN Hui-min

(Guangdong Vocational College of Post and Telecom, Guangzhou, Guangdong, China 510630)

**Abstract:** Channel estimation technology is one of the key technologies in mobile communication system. The performance of high-speed, high-quality and low-latency mobile communication system in the future depends on the channel estimation algorithms with high accuracy and low complexity. This paper first summarizes the basic concepts of channel estimation, then analyzes the research status of channel estimation technology at home and abroad, and finally proposes the research direction of channel estimation algorithm suitable for 6G.

**Keywords:** channel estimation; 6G; compressed sensing; MIMO-OFDM system

随着5G网络继续深入,移动通信网络将成为影响社会生产力发展的关键因素之一,而蓄势待发的6G(第六代移动通信技术),将会是一个可以提供超高速率、超高可靠性、超低时延和海量接入点的全域覆盖通信感知一体化网络。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术具有较高的频谱利用率和较低的符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)、带宽灵活配置复杂度低等特点。且OFDM技术易于与多入多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术相结合,实现超高速率传输、提供海量接入点以及保证超高可靠性和超低时延,实现较高的KPI指标。因此OFDM技术和MIMO技术依然是6G网络的关键候选技术。但OFDM技术对频率同步敏感,且OFDM技术与MIMO技术相结合会导

致系统性能下降,MIMO-OFDM系统中信道估计的精度和实现复杂度将直接影响整个系统的性能和建设成本。

本文对信道估计进行了详细阐述,分析了国内外基于压缩感知理论的MIMO-OFDM系统信道估计技术的研究现状,以此为基础对适用于6G网络的信道估计技术发展趋势进行了概括性描述。

### 1 信道估计

#### 1.1 信道估计概念

通信的意义在于使接收端能够准确高效地恢复发送端发送的信息内容,为了在接收端能够以较高的可靠性和速率恢复原始信息,需对信道参数进行估计,掌握信道状态信息(Channel State Information, CSI)。信道估计模型对应的数学公式记为:

**【收稿日期】**2022-11-05

**【作者简介】**胡玉佩(1982—),女,河北唐山人,讲师,硕士,研究方向:移动通信技术。

**【基金项目】**2022年广东邮电职业技术学院校级质量工程科研项目“探索6G愿景和技术发展趋势”(项目编号:202263)。

$$y = hx + n \quad (1)$$

其中  $x$  是发送端发送的信号,  $y$  是接收端收到的信号,  $h$  是信道参数,  $n$  是噪声。信道估计模型表示信号在某一指定信道中传输时所受到的所有影响, 通过一定算法计算得出信道参数后, 可以根据收到的信号将发送端发送的信息恢复出来。信道估计精度越高则接收端恢复出的信号与发送端的原始信号越相似, 误差越小。

### 1.2 信道估计类型

根据是否需要在发送端发送参考信号可将信道估计分为非盲信道估计、盲信道估计和半盲信道估计。

非盲信道估计是指通过在发送端发送参考信号  $x_1$  (如导频信号、训练序列等), 在接收端对接收到的信号  $y_1$  进行检测, 根据公式(2)计算得到信道参数  $h$ 。在假设信道噪声  $n$  不变的情况下, 可根据已知的信道参数  $h$  和接收端收到的信号  $y_2$ , 恢复出发端发送信号  $x_2$ , 如公式(3)所示。

$$y_1 = hx_1 + n \quad (2)$$

$$y_2 = hx_2 + n \quad (3)$$

盲信道估计则不需要发送端发送导频或其他参考信号, 通过在接收端采用一定算法对信道进行估计, 计算出信道参数并恢复出原始信号。

非盲信道估计需要发送端在发送信号的同时发送参考信号, 会造成一定程度的资源浪费, 盲信道估计的资源利用率相对较高, 但准确性较差且收敛速度会对系统性能有较大影响。因此可将二者进行结合, 在盲信道估计的基础上, 使用较少数量的导频并结合预编码和预均衡等技术对信道参数进行估计, 实现半盲信道估计。半盲信道估计的误比特率性能随导频数量的增加而有显著提高, 但频谱利用率会下降, 计算量也会随之增加。

### 1.3 信道估计应用

在移动通信系统的接收端和发送端都可以利用信道估计提高系统的性能。接收端采用信道估计技术计算信道参数, 用以降低传输过程中噪声和干扰的影响, 准确地恢复信息。发送端获取信道信息以便更充分地利用信道资源, 提高系统的传输速率和频谱利用率。

#### 1.3.1 接收端信道估计的应用

为消除或减小移动通信系统中码间串扰的影响, 通常需要在接收端按照特殊的滤波器对信道参数进行补偿, 或在接收端调整接收机的参数使之适应传输环境。前者是用滤波器补偿信号失真, 此类滤波器被称为均衡滤波器。后者则被称为极

大似然序列估计, 是一种使用检测器对已失真的解调信号进行估计的信道均衡方法。两种信道均衡技术都要获得信道参数, 信道估计的精度和速度会对均衡技术的性能和效率产生较大影响。

当传输过程中没有视距传播路径到达接收端时, 信道特性符合瑞利衰落。瑞利信道由于存在较严重的乘性干扰, 会大大影响相干接收机的性能而只能使用非相干检测。与相干检测相比, 不需要进行信道估计的非相干检测方法会有 3 dB 以上的信噪比损失。通过对信道的乘性干扰进行信道估计, 可快速精确地估计相位偏差实现相位同步, 制作高精度的锁相环, 有助于系统进行高效载波同步和相干检测。

#### 1.3.2 发送端信道估计的应用

若发送端能够获取精确的 CSI, 则可以采用链路自适应技术提高系统的传输速率和信号质量。时域实现链路自适应的方式通常指根据信道质量选择信道编码方式、交织方式和调制方式。同样在频域可以根据信道状况设置发射功率和承载实现链路自适应。还可根据每个信道资源对不同用户的差异性为每个用户选择合适的信道, 从而实现系统的多用户分集增益, 提高频谱资源利用率和系统的整体性能。

实现链路自适应的前提是发送端可实时性地获得准确的信道参数, 有两种方案, 一是接收端将信道估计获得的信道参数反馈给发送端, 二是利用上下行信道的相关性获取信道信息。第一种方案需要在发送端和接收端之间建立一条专用的信息反馈信道用以发送信道状态信息, 此种方案准确度高但是增加了系统开销。第二种方案要求上行信道和下行信道之间在某个域内具有强相关性, 如时分双工 (Time Division Duplexing, TDD) 系统中上下行信道的的时间间隔小于相干时间时, 则可以在基站侧将上行信道参数作为处理下行信号的依据, 反之在终端侧也可根据下行信号的状况对上行信号进行处理。但在快速时变系统中, 由于相干时间较短, 上下行信道的相关性被破坏, 则第二种方案不适用。

## 2 基于压缩感知理论的MIMO-OFDM系统信道估计技术

### 2.1 MIMO-OFDM系统的信道估计技术

#### 2.1.1 MIMO-OFDM系统

OFDM 技术把系统带宽划分成若干条相互正交的子载波, 如图 1 所示, 采用 OFDM 技术划分出的相邻子载波信道在频率上有重叠, 比传统的频

分复用(Frequency Division Multiplexing, FDM)技术有更高的频谱利用率。OFDM系统中可通过串并转换将一条高速数据流转换成若干条低速数据流,从而降低信道时延扩展带来的ISI。

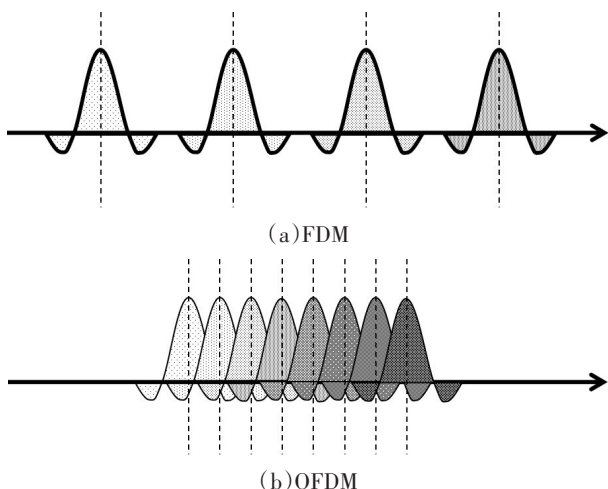


图1 FDM和OFDM系统带宽划分示意图

MIMO 系统的信道容量是单入单出(Simple Input Simple Output, SISO)系统的多倍,用户可获得数倍甚至数十倍于以往的频谱资源。在系统中将MIMO技术与OFDM技术结合使用,可缓解移动通信系统资源短缺的问题。但从图1中可看出,由于OFDM技术划分出的相邻信道存在频率重叠,移动通信系统中高速移动情况下存在的多普勒效应会使信道正交性容易遭到破坏,引起严重的载波间干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)。MIMO技术的引入则使信道更加复杂,加重系统的ICI和ISI。因此在MIMO-OFDM系统中需要获取精准的CSI,对信道估计要求较高。

2.1.2 OFDM系统的信道估计技术

OFDM系统通常采用在时域使用前导周期或者在频域插入导频信号的非盲信道估计。在发送有用信号时插入导频信号,根据导频信号的放置位置可分成三种类型:块状导频、梳状导频和格状导频<sup>[1]</sup>,如图2所示。块状导频以一定的时间周期在所有子载波上发送导频信号,适用于频率选择性衰落信道。根据信道的多普勒频移调整时间周期,则块状导频可以对抗信道时间选择性衰落,在多普勒频移较大时为保障系统的可靠性会增加系统开销。梳状导频则是以一定的频率周期在每个符号上发送导频信号,适用于时间选择性衰落信道。根据信道的时延扩展调整频率周期,则梳状导频可以对抗信道频率选择性衰落,在时延扩展较大时则会增加系统负荷。格状导频则是同时在时间和频率上分别以一定的周期发射导频信号,可根

据信道的时延色散特性和频率色散特性调整频率上和时间上的导频信号周期,以满足信道的频率选择性和时变性。

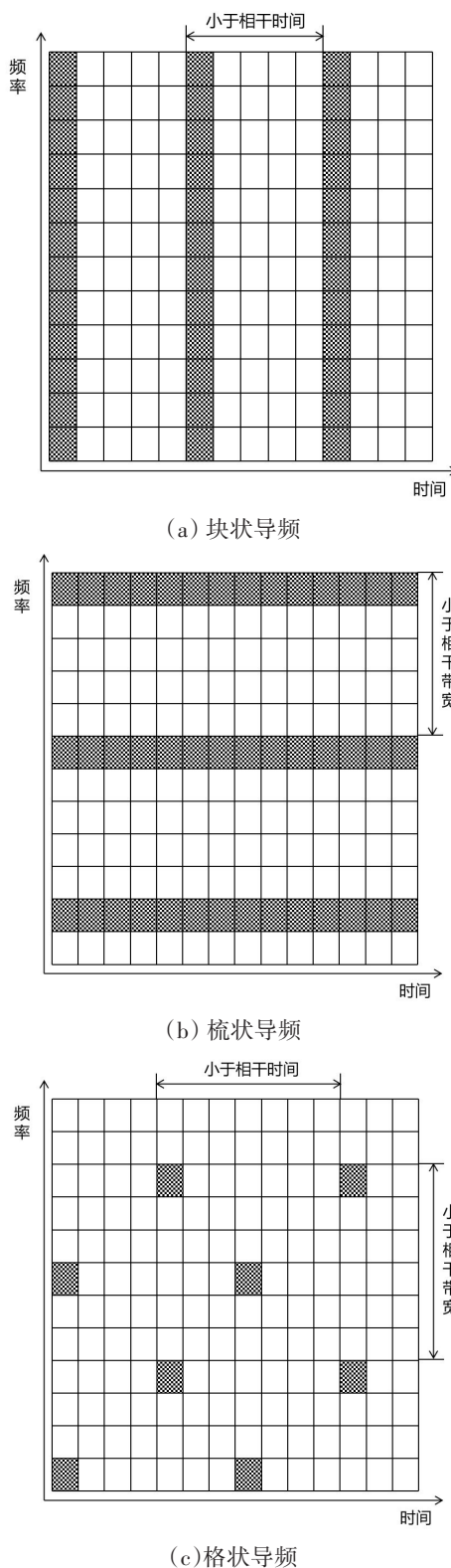


图2 导频放置位置示意图

OFDM与FDMA相结合的正交频分多址技术(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)是目前移动通信系统普遍采用的多址技

术,该技术可允许多个用户选择信道条件更好的子载波集,从而提高系统传输速率,提高频率利用率,获得多用户分集增益。采用OFDMA技术可以在发送端根据信道的SNR采用频域注水算法,实现每个子载波上发射功率和比特数的最优化分配,采用注水算法的前提是发射机能够完全知道每个信道的状态信息。

2.1.3 MIMO-OFDM系统的信道估计技术

在MIMO系统中采用传统的非盲信道估计算法要求导频信号的数量与发射天线数量成正比,随着天线数量的增加计算时间将大幅提高,在快衰落信道中,会因为信道估计计算时间超过相干时间而导致信道估计结果精确度下降。

在发射端发送导频信号的同时发送训练符号用于信道估计。接收端运用最小二乘法准则(Least Squares Method, LS)获得信道参数是目前普遍采用

的信道估计算法准则,其复杂度低且实现简单,但在信道深度衰落时噪声影响会加重。在LS准则上运用最小均方误差准则(Minimum Mean Square Error, MMSE)的信道估计算法比LS算法复杂,但是可获得性能上的提高。在LS和MMSE信道估计的基础上进行离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)信道估计可以消除最大信道时延以外的噪声,提高系统性能。上述方案均需要较精确的信道信息,在可用的信道参数不完整时,可采用最大期望算法(expectation Maximization, EM)。但EM算法的计算复杂度会随着发射天线数量和星座点数量呈指数增加,且不适用于快速时变信道,因此MIMO-OFDM系统中不能直接用EM算法。比较四种MIMO-OFDM系统信道估计技术优缺点,如表1所示。

表1 MIMO-OFDM系统的信道估计技术优缺点对比表

算法	方法	优点	缺点
LS	找到能使 $(y - hx)^2$ 获得最小值的信号参数	计算简单	增强了噪声
MMSE	引入加权矩阵,使LS的信道估计结果获得最小均方误差	性能比LS高	算法比LS复杂
DFT	消除最大的信道时延以外的噪声	可改善LS和MMSE信道估计的性能	需要较多信道特性信息,计算量大
EM	采用迭代算法,找到信道的极大似然估计	半盲估计	计算复杂度高

2.2 基于压缩感知理论的MIMO-OFDM系统信道估计算法

LS, MMSE等传统方法做信道估计时要求导频数大于发射天线数,随着天线阵列规模的增大,天线数量的增加会导致导频开销增加。为降低信道估计的复杂度,可从稀疏性入手,在时域、频域、角度域、空间域构建结构化信道估计模型,在MIMO-OFDM系统中运用压缩感知理论进行信道估计。

2.2.1 压缩感知理论

压缩感知理论(Compressed Sensing, CS)适用于在某变换域具有稀疏特性的信号,对此类信号可以在发送端采用不等间距采样,从而以远低于奈奎斯特抽样定理所要求的数据传输量完成信息的传递<sup>[2]</sup>。不满足稀疏性的信号可以投影到稀疏矩阵上再利用压缩感知理论对信号进行处理和重构。对于任意一个信号 $x$ ,其压缩感知信道模型可以写成:

$$x = KT \tag{4}$$

$$y = \Psi x = \Psi KT = PT \tag{5}$$

$$P = \Psi K \tag{6}$$

其中 $T$ 是个大多数数值为零,只有 $M$ 个数值较

大的投影向量,则 $K$ 被称为稀疏基矩阵, $x$ 对于 $K$ 是 $M$ 稀疏的。 $\Psi$ 是观测矩阵, $y$ 是观测值, $P$ 是恢复矩阵,接收端通过 $y$ 重构信号。

2.2.2 基于压缩感知理论的MIMO-OFDM系统信道估计研究

基于压缩感知理论的OFDM系统信道估计研究有两个主要的研究方向,一个是搜索最优导频图案算法的研究,另一个是信号重构算法的研究。

从 $N$ 个子载波中选择若干个子载波发送导频信号,通过搜索最优的导频序列设计导频图案。搜索算法有穷举法、随机序列搜索算法<sup>[3]</sup>、树状随机搜索方法<sup>[4]</sup>、基于双准则的双分支随机搜索算法<sup>[5]</sup>等。基于压缩感知理论构建的OFDM系统模型能够高精度重构信号取决于恢复矩阵,恢复矩阵的性能由导频设计方案决定。恢复矩阵需要满足限制等距特性(Restricted Isometry Property, RIP)准则。RIP准则计算量大、复杂度高,在工程中不适用。互相关最小准则(Mutualin Coherence Property, MIP)和格拉姆矩阵准则的复杂度较低,更适合用于导频图案设计。

利用恢复矩阵采用一定的算法计算信道参

数,对发送信号进行重构。当恢复矩阵的行大于列时,利用LS准则求信道参数;当恢复矩阵的行小于列时,采用最小范数优化问题计算信道参数。最小范数优化问题的信号重构算法有 $l_1$ 最小化方法、贪婪/迭代算法和组合算法等。信号重构算法中比较经典的是正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit,OMP),OMP是一种贪婪算法,贪婪算法是基于 $l_1$ 范数最优化问题的一种替代算法,具有计算量小、复杂度低、灵活性高、易于实现等特点,通常被用于理论研究的基础算法。

MIMO系统中若信道有较强的空间稀疏特性,在多条空间路径中具有较强能量的路径数量占比较低的情况下,则无需恢复出全部的信道参数矩阵,只需要计算出具有较强能量的有效传输路径的参数,由此可以大大降低计算复杂度,缩短信道估计时间。若信道的稀疏特性不明显,则可以先把信道矩阵进行处理,如DFT处理,将其转化成某种

域上的稀疏矩阵以后再利用压缩感知理论进行信道估计。

在MIMO-OFDM系统中,在收发端相对静止或慢速移动的情况下,信道状态趋于平稳,此时最优的导频图案是导频信号均匀分布。但在实际使用的时候导频信号做不到均匀分布,因此导频图案的设计不但包括导频的放置位置,还包括导频信号的能量大小,须找到基于某种准则的最优的导频图案。

### 3 基于压缩感知理论的6G信道估计技术

如图3所示,6G是一个超广覆盖、超高速率、超高移动性、超级智能化的通信感知一体化超级异构网<sup>[6]</sup>。为达到比5G更高的KPI指标,需要开发新的更高频率的频谱资源以获得更大的带宽,需要增加天线数量,以获得更高的空间分集增益和空间复用增益,实现更高维度的波束赋形。

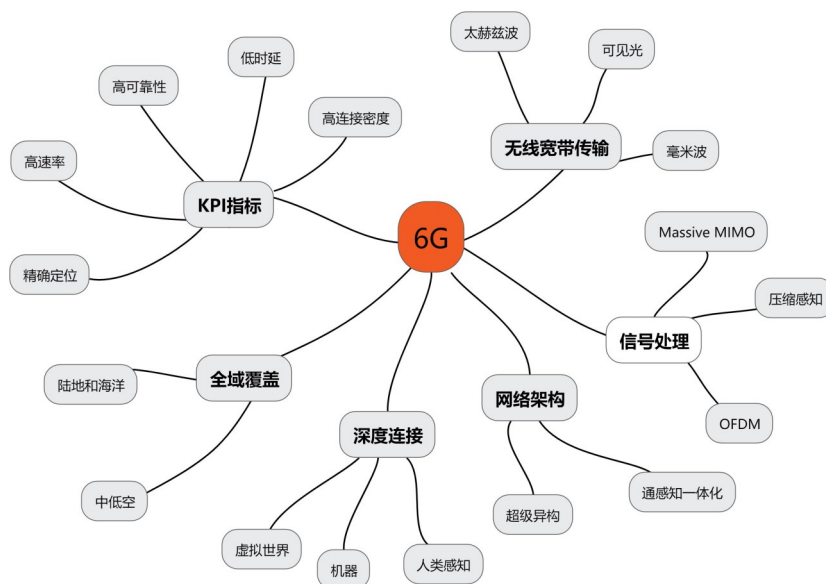


图3 6G愿景图

#### 3.1 太赫兹波通信

太赫兹波在微波与红外线波段之间,是指频率在0.1 THz到10 THz的电磁波。太赫兹波比毫米波频段更宽,频谱资源更加丰富,根据香农公式可知,带宽增加会提高传输速率,因此是6G的候选频谱资源。太赫兹波具有波长短、频率高、路径损耗大、易于被水分子吸收等特性,散射波在传输过程中易被损耗,到达接收天线的入射波数量有限,信道矩阵中较多参数等于或接近零值,具有很强的稀疏特性,方便利用压缩感知理论进行信道参数的估计。

#### 3.2 Massive MIMO技术

太赫兹波波长小,天线尺寸减小,可实现

Massive MIMO。Massive MIMO技术比传统MIMO技术具有更高的空间复用增益和空间分集增益。天线数量的增加强化了波束赋形的效果,提高了信号在立体空间上的覆盖区域,覆盖范围从二维的地面覆盖转变成三维的立体覆盖。Massive MIMO技术使不同用户间的信道向量趋向于正交,能有效消除噪声和快衰落带来的影响,对信号采用预编码处理可以有效提高天线的辐射效率。

#### 3.3 6G信道估计发展趋势

6G系统中所使用的信道估计算法需具有低复杂度、低计算量、计算时间短、结果精确等特点,因此使用压缩感知理论可以解决天线数量增加带来的计算量和复杂度成倍增长的问题。

### 3.3.1 结构化的压缩感知信道估计模型

通过设计用于信道估计的压缩感知测量矩阵可以降低计算复杂度。选择低存储量和计算量的测量矩阵,将测量矩阵进行变换以降低复杂度。测量矩阵选取不当会影响结果的精确度。

基站与移动台之间的空间域信道稀疏性不明显,可以通过变换将空间域信道矩阵变换为稀疏矩阵,再使用压缩感知理论进行计算。

接收天线入射波的角度数量有限,只在若干角度上有信号,其他角度上的信号可视为0。且入射波角度成簇,即在某一个角度测量到信号时,在其相邻角度上也能收到信号。因此可通过离散傅里叶变换将空间域信道矩阵转换成角度域信道矩阵,此角度域信道矩阵是稀疏的,可以使用压缩感知理论以降低导频开销。

太赫兹波信号频率高,且6G系统可支持更高速的移动速度,无线信道的频率色散特性增强,会产生较高的多普勒频移。由于无线信道相干时间缩短,快速时变信道使信号易于经历时间选择性衰落。在信道快速变化的前提下,前一时刻获得的信道估计信息无法作为后一时刻信道估计的先验信息。可考虑建立角度时延域和角度频率域信道模型。

### 3.3.2 基于RIS的压缩感知信道估计模型

可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)是指利用信息超材料对电磁波的灵活调控能力,将其部署在建筑物或中低空设备上实现无线信号中继<sup>[7]</sup>。由于信息超材料可以对电磁波的幅度、频率、相位甚至频率进行直接调控,随机变化的无线信道将转换成人为可控的无线信道,大大提高无线信号的覆盖率、传输速率和可靠性。对于改善高频段通信和大规模MIMO系统的性能将起到积极作用,因此是6G的潜在关键技术之一。实现无线信道参数可控需要获得精确的CSI,进行高质量的信道估计的难点在于RIS由无源器件组成,内部存在噪声和干扰,并且会吸收一部分能量。使用RIS实现无线信号中继的系统进行信道建模时通常将信道分成两个部分,基站到RIS以及RIS到终端。需要根据两部分的特点在一定的假设条件下利用压缩感知理论分别进行信道估计。由于RIS技术是新兴技术,理论推导时的假设条件也与实际传输环境差别较大,目前尚处于研究阶段。

### 3.3.3 Massive MIMO系统压缩感知信道估计模型

随着天线阵列技术的发展,6G系统中有可能实现 $1024 \times 1024$ 规模的Massive MIMO。随着天线数目的增加,超大规模天线阵列的波束赋形作用增强,基站的覆盖区域扩大,会有远场路径分量和近场路径分量同时出现的混合场效应。天线阵列的远场区域和近场区域以瑞利距离作为分界线,远场区域信道建模通常选用平面波模型,当距离趋向于无穷大时,模型中的有效路径导向矢量只与角度相关;近场区域信道建模通常选用球面波模型,需要同时考虑有效路径的距离和角度。由于产生散射波的物体和用户在远场和近场都会有分布,因此超大规模天线阵列系统的信道估计比之前的MIMO系统要复杂,需解决混合场效应和空间非平稳的问题。

## 4 总结

综上所述,6G相较前面五代移动通信技术,在覆盖广度、覆盖深度、传输速率、传输时延、智能化和低耗能等方面将有较大改变。OFDM、Massive MIMO和太赫兹传输等将是6G的关键技术。使用高频电磁波传输信号,使用大规模天线阵列收发信号,对6G的信道估计提出了更高的要求。压缩感知理论可以利用信道某个域的稀疏性,降低计算复杂度和计算量,降低成本和能耗,成为6G信道估计算法的首选方案。

## 【参考文献】

- [1]Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, etc. MIMO-OFDM 无线通信技术及MATLAB实现[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [2]石光明,刘丹华,高大化,等.压缩感知理论及其研究进展[J].电子学报,2009(5):1070-1081.
- [3]Qi Chenhao, Yue Guosen, Wu Lenan, etc. Pilot Design Schemes for Sparse Channel Estimation in OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015(4): 1493-1505.
- [4]何雪云,吴超,梁彦.OFDM稀疏信道估计中基于树状随机搜索导频设计新方法[J].信号处理,2019(8):1343-1349.
- [5]王华华,汤帅,张铁严.OFDM系统基于双准则优化的导频设计新方法[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2022(5):8-14.
- [6]胡玉佩.6G技术及其发展趋势研究[J].湖南邮电职业技术学院学报,2022(3):16-20.
- [7]王亿,杨柳,张痛快.RIS辅助毫米波系统中基于压缩感知的信道估计[J].计算机应用,2022(12):3870-3875.