

An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G

Felipe A. P. de Figueiredo

Resumo—Massive MIMO is a disruptive technology that was born more than a decade ago, and that has been adopted as an integral part of the 5G standard. Without its many advantages, the next generation of communications systems would not be able to meet most of the requirements necessary to be called 5G. However, several challenges had to be solved from its inception until its adoption. Nowadays, with most of them overcome, researchers are turning their attention to novel ways to enhance the technology and have it once more being an essential feature of the next generation of communications systems, e.g., 6G. This work provides a brief but comprehensive overview of the technology known as Massive MIMO, its challenges, available solutions, and novel research directions. Additionally, we provide discussions on the use of Massive MIMO in Terahertz bands and the use of Machine Learning algorithms for channel estimation and signal detection tasks in such systems.

Index Terms—Massive MIMO, Terahertz, Channel Estimation, Machine Learning, 5G, 6G.

I. INTRODUÇÃO

Grandes arranjos de antenas tem sido uma das características definidoras das redes Quinta Geração de Rede Móvel Celular (5G). Também conhecida como *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) massivo, esta tecnologia foi introduzida em [1] e é uma das candidatas potenciais para aumentar as eficiências espectral e energética de sistemas de comunicações. E por isso, prevê-se que essa tendência continuará em direção às redes Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G), onde o número de elementos dos arranjos de antenas será adicionalmente aumentado em uma ordem de magnitude [2].

Através do elevado número de antenas, o MIMO massivo consegue criar feixes altamente diretivos e com isso servir vários usuários simultaneamente usando os mesmos recursos de tempo e frequência [3]. Estes feixes altamente diretivos fazem com que as Estação Radiobases (ERBs) consigam concentrar energia para os usuários desejados, reduzindo assim a potência de transmissão, minimizando a interferência entre usuários e aumentando a eficiência espectral [4]. A Figura 1 apresenta uma comparação entre um sistema tradicional e outro utilizando a tecnologia MIMO massivo.

Visando maior velocidade de transmissão de dados, menor latência e maior eficiência energética, este trabalho aborda algumas tendências para a rede 6G. De um lado, o uso de grandes arranjos de antenas tem sido uma das características definidoras dos sistemas 5G [5], [6]. Prevê-se que essa tecnologia continuará em direção aos sistemas 6G, mas com aumento no número de elementos dos arranjos em uma ordem de magnitude, dando origem ao MIMO ultra-massivo [7]. Outra

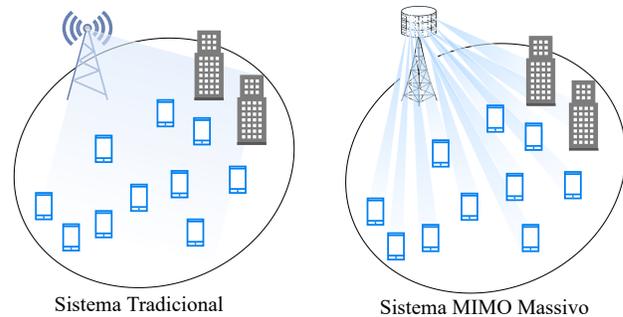


Fig. 1. Comparação do uso de técnicas de *beamforming* em sistemas MIMO massivo e um sistema tradicional. *Beamforming* possibilita que vários usuários sejam servidos no mesmo recurso de tempo/frequência.

tendência que tem se visto recentemente é o uso de MIMO massivo na faixa de Terahertz (THz) para mitigar problemas causados por vários tipos de atenuação [8]. O uso de tal tecnologia possibilitará o suporte a aplicações para redução da pegada de carbono, comunicação espacial, conectividade pervasiva, indústria 5.0 e telepresença imersiva, que são alguns dos casos de uso esperados para o padrão 6G [9].

As tarefas de estimação de canal e detecção de sinais transmitidos são importantíssimas para se atingir a capacidade de canal em sistemas de comunicação sem fio [10]. Convencionalmente, tais tarefas são implementadas e otimizadas de forma individual. Entretanto, abordagens baseadas em *Machine Learning* (ML) permitem a otimização individual, bem como a otimização conjunta dessas tarefas, o que simplifica bastante tais tarefas [11].

No restante deste trabalho, inicialmente são apresentados desafios, soluções e problemas ainda em aberto relacionados à tecnologia MIMO massivo. Na sequência, discute-se o uso de MIMO massivo na faixa de THz, o que pode trazer vários benefícios para o padrão 6G. Depois, apresenta-se os benefícios que algoritmos de ML podem trazer para a tecnologia e finalmente, apresenta-se algumas direções de pesquisa futura e conclui-se o trabalho.

II. DESAFIOS, SOLUÇÕES E PROBLEMAS EM ABERTO

A seguir, fornecemos uma visão abrangente do MIMO massivo, alguns desafios, soluções já disponíveis e novos problemas decorrentes de sua adoção. A Tabela I lista esses desafios e as soluções disponíveis, cada um apresentado juntamente com seus efeitos colaterais, ou seja, novos problemas decorrentes de sua adoção.

Felipe A. P. de Figueiredo is with Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil e-mail: felipe.figueiredo@inatel.br.

A. Deficiências Devido a Hardware de Baixo Custo e Desafios Referentes à Cadeia de RF

A implantação de sistemas MIMO massivo apresenta vários desafios importantes que precisam ser enfrentados. Dois destes grandes desafios são a implementação e implantação de cadeias de Rádio Frequência (RF) massivas e a degradação do desempenho devido a deficiências do hardware, uma vez que cadeias de RF de baixo custo serão adotadas a fim de diminuir o consumo de energia e os custos de implantação de um grande número de cadeias de RF [12].

Provavelmente arranjos de antenas com grande número de elementos serão construídos usando-se componentes de baixo custo para facilitar sua introdução e alavancar a penetração da tecnologia MIMO massivo no mercado. Isso exige soluções capazes de contornar imperfeições de hardware que se manifestam, como por exemplo o desequilíbrio *InPhase/Quadrature* (I/Q) e o ruído de fase. Este último caso é particularmente preocupante porque os amplificadores de potência de baixo custo geralmente têm requisitos de linearidade relaxados, o que por sua vez se traduz na necessidade de *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) reduzido por elemento do arranjo [13].

A economia na energia irradiada resulta do uso de um número elevado de antenas para enviar simultaneamente dados, de forma independente, para diferentes usuários. Além disso, o consumo total de energia também deve ser levado em consideração. Nesse contexto, um caminho de pesquisa interessante são arquiteturas de hardware para processamento de sinal de banda base que apresentam baixo consumo de energia [13], [14].

Em [13], [14], os autores apresentam simulações e discussões que demonstram que o uso de hardware caro e poderoso do ponto de vista computacional, mas ineficiente em termos de energia, pode ser substituído pelo uso massivo de unidades paralelas de baixo custo e baixo consumo de energia que operam em conjunto de forma coerente em sistemas que adotam a tecnologia do MIMO massivo.

A implantação de centenas de cadeias de RF, conversores A/D-D/A, conversores de frequência e outros exigirá uma enorme redução de escala na fabricação de circuitos, comparável ao que vimos até agora para dispositivos móveis e *Internet of Things* (IoT). Em [15], os autores argumentam que é bastante complicado implantar um grande número de cadeias de RF em um transceptor com espaço físico limitado devido ao grande consumo de energia e ao custo muito alto de tais cadeias [16]. Eles argumentam que, particularmente, em bandas de ondas milimétricas (mmWave), é impossível ter uma única cadeia de RF por elemento do arranjo de antenas. Portanto, arquiteturas híbridas analógicas/digitais devem ser consideradas como soluções potenciais para esse problema [17].

Os autores de [18] estudam a seleção da cadeia de RF para os casos com e sem conhecimento de *Channel-State Information* (CSI). Em seu trabalho, eles avaliam como o CSI afeta a maximização da eficiência espectral para uma determinada restrição no consumo total de energia. Eles mostram que, para o caso sem CSI disponível, o número ideal de cadeias de RF é cerca de metade do número máximo das

que seriam necessárias devido a restrição de energia fornecida. Em [19], os autores demonstram que se a potência do circuito pudesse ser ignorada em comparação com a potência total de transmissão, todas as antenas deveriam ser utilizadas para maximizar a eficiência energética. Por outro lado, eles também mostram que se a potência do circuito é comparável à potência total de transmissão, então, apenas um subconjunto de antenas deve ser usado [20]. Em [21], os autores demonstram que o processamento de cadeias de RF híbridas podem atingir o mesmo desempenho de qualquer processamento daquelas totalmente digitais se o número de cadeias de RF implantadas for duas vezes maior que o número de fluxos de dados.

Outro caminho de interesse é a experimentação, já que as plataformas de testes (testbeds) atualmente disponíveis apenas apresentam recursos básicos e não levam em consideração propriedades das ERBs [12], [14], [22]. A experimentação também pode ser recompensadora, pois as descobertas experimentais podem ser realimentadas na teoria, tornando o desenvolvimento de plataformas de testes, protótipos e experimentos de prova de conceito de extrema importância para um melhor entendimento sobre a tecnologia do MIMO massivo [12].

B. Acoplamento Mútuo e Ambiguidade na Relação Frente-Costas

Uma suposição frequentemente feita ao modelar arranjos de antenas é que a separação entre os elementos do arranjo é grande o suficiente para manter o acoplamento mútuo em níveis desprezíveis. Entretanto, isso não é totalmente realista, especialmente no caso de um grande número de elementos implantados como uma matriz de elementos de tamanho e abertura restritos. Sob tais condições práticas, o acoplamento mútuo é conhecido por impactar substancialmente a capacidade que o sistema pode alcançar [23], [58]. Circuitos de RF para casamento de impedância multiporta podem cancelar tais efeitos de acoplamento [24], mas eles diminuem a largura de banda da porta [25] e aumentam as perdas ôhmicas [26].

Foi relatado que matrizes bidimensionais ou tridimensionais são capazes de evitar a ambiguidade frente-costas. Um efeito colateral das implementações densas é que quanto maior o número de elementos adjacentes, maior será o aumento dos efeitos de acoplamento [3]. Outra lacuna fundamental específica para configurações 3-D é a incapacidade de extrair informações adicionais dos elementos dentro da matriz, ou seja, apenas os elementos na superfície da matriz contribuem para a capacidade de informação [28], [58]. As densidades ideais acima das quais o desempenho se deteriora, não importando quão grande seja o número de elementos, são estudadas em [27], [58] para ERBs equipadas com sistemas MIMO massivo para ambientes internos.

C. Propagação e Modelagem de Canal

Avaliações realistas de desempenho exigem caracterização e modelagem de canal apropriadas. O comportamento do canal MIMO massivo, incluindo suas propriedades de correlação e a influência de diferentes tipos de arranjos de antenas, não pode ser capturado de outra forma. O interesse suscitado por este tema tem crescido (e ainda está) em ritmo acelerado, e a

TABELA I
RESUMO DOS DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA SISTEMAS MIMO MASSIVO EM 5G.

Área de Pesquisa	Desafio	Possíveis soluções	Deficiências e “Efeitos colaterais”	Refs.	
Hardware	Ruído de fase	Algoritmos inteligentes para camada PHY	Eficácia ainda a ser demonstrada	[13]	
	Consumo de energia Prova de Conceito	Processamento em banda base dedicado e paralelo Experimentos, <i>testbeds</i> & protótipos	Questões em aberto Apenas capacidades básicas demonstradas	[22]	
Características das antenas	Acoplamento entre antenas	Circuitos para casamento entre múltiplas portas	<ul style="list-style-type: none"> • Diminui a largura de banda • Introduz perdas ôhmicas • Não compreendido totalmente para um grande número de elementos 	[23]–[26] [27]	
	Ambiguidades na relação frente-costas	Implementações multidimensionais densas	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta os efeitos de acoplamento • Limitado a ambientes internos • Matrizes 3D têm utilidade restrita 	[23], [28]	
Propagação	Modelamento de canal	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos empíricos realistas • Modelos analíticos sofisticados 	Atualmente em desenvolvimento	[29]–[32]	
	Resolução de <i>clusters</i>	Nenhuma solução conhecida até o momento ERB envia pilotos para terminais via FDD	Problema de pesquisa em aberto Limitado pelo tempo de coerência do canal	[3] [1], [33]	
	Aquisição de CSI	Terminais enviam pilotos para ERB via TDD	Calibração de reciprocidade de canal Problema da contaminação por piloto	[34]–[37] [38]–[44]	
Projeto do Transceptor	Pré-codificação	Métodos lineares	<ul style="list-style-type: none"> • ZF • MMSE • MF 	<ul style="list-style-type: none"> • Computacionalmente pesado para grande número de antenas • Potência de transmissão média mais alta • Tem um piso de erro à medida que o número de antenas aumenta • Maior número de antenas necessárias para um determinado SINR 	[3], [45] [3]
		Métodos não-lineares	<ul style="list-style-type: none"> • BD • DPC • THP • VP 	Estratégias computacionalmente econômicas são necessárias Extremamente caro para implantações práticas	[46] [47] [48] [49]
	Detecção	Filtragem linear	<ul style="list-style-type: none"> • MRC • ZF • MMSE 	<ul style="list-style-type: none"> • Não trata supressão de interferência • Não trata o aumento de ruído • Mais complexo que o MRC & ZF 	[1], [50] [51] [3], [52]
		Filtragem linear iterativa	<ul style="list-style-type: none"> • MMSE-SIC • BI-GDFE 	Computacionalmente pesado para grande número de antenas	[53]
		Métodos com busca aleatória	<ul style="list-style-type: none"> • TS • LAS • SD 	Solução ótima globalmente não é garantida	[54] [55] [56]
		Algoritmos baseados em árvore	<ul style="list-style-type: none"> • FCSD 	A complexidade cresce exponencialmente com o número de antenas • 1,000x mais complexo que o TS • Mais adequado quando número de antenas e terminais é similar	[57]

comunidade já conseguiu contribuir para um melhor entendimento sobre o assunto. Em [29], [59], [60], medições de canal foram realizadas para identificar e modelar estatisticamente as características de propagação de interesse. Em seguida, as características são realimentadas em um modelo de canal existente, estendendo sua aplicabilidade a arranjos de antenas de grande escala.

Por exemplo, em [29], os autores estudaram o comportamento do canal MIMO massivo e identificaram várias características de propagação ausentes no modelo famoso modelo de canal COST 2100. Através de vários experimentos é demonstrado que o canal MIMO massivo não pode ser visto como estacionário em sentido amplo. Portanto, os autores propõem uma extensão do modelo para suportar grandes matrizes.

As avaliações de desempenho devem ser conduzidas, idealmente, usando um modelo de canal padronizado ou amplamente aceito. Alguns modelos para MIMO massivo são apresentados e discutidos em [30], [60]. Veja, por exemplo, [31], [59], para uma discussão sobre métodos de modelagem, categorias de canal e suas propriedades fundamentais.

É bem conhecido na modelagem convencional de canais MIMO que dispersores tendem a aparecer em grupos com atrasos, ângulos de chegada e de saída semelhantes, formando os chamados *clusters*. Normalmente, o número de *clusters* ativos e dispersores distintos é relatado como sendo limitado. Isso também é reportado quando o número de objetos físicos é grande [61]. As contribuições de componentes de multi-percurso individuais pertencentes ao mesmo *cluster*

são frequentemente correlacionadas, o que reduz o número de dispersores efetivos. Da mesma forma, foi demonstrado que um *cluster* visto por diferentes usuários, os chamados *clusters* conjuntos, introduz correlação entre os usuários também quando eles estão amplamente separados [62]. Ainda é uma questão em aberto se o uso de grandes arranjos de antenas tornará possível resolver (i.e., identificar) os *clusters* completamente, mas a grande resolução espacial trazida por tais arranjos tornará possível separar os *clusters* em muitos casos. Na literatura, existem medições que mostram que um *cluster* pode ser visto de forma diferente de diferentes partes de um grande arranjo de antenas [63], o que é benéfico, uma vez que a correlação entre as contribuições individuais de um *cluster* é então diminuída.

D. Aquisição de Informações sobre o Estado do Canal

Em sistemas convencionais de *Frequency Division Duplexing* (FDD), a ERB não pode aproveitar os ganhos proporcionados pelo *beamforming* até que tenha estabelecido um *link* de comunicação com os terminais. Em primeiro lugar, a ERB transmite pilotos com os quais os terminais estimam suas respostas de canal correspondentes. Essas estimativas feitas pelos terminais são então quantizadas e retornadas à ERB. Tal abordagem FDD encontra aplicação limitada em sistemas MIMO massivos em que a quantidade de recursos de tempo-frequência necessários para a transmissão do piloto no *downlink* escala com o número de antenas, e o mesmo acontece com o número de respostas de canal que devem ser

estimadas pelos terminais. Em sistemas com grandes arranjos de antenas, o tempo de transmissão dos pilotos pode exceder o tempo de coerência do canal [1], [33], [64]–[66].

Uma alternativa para os sistemas MIMO massivo é permitir que os terminais enviem pilotos para a ERB adotando uma abordagem *Time-Division Duplex* (TDD). A abordagem TDD depende da reciprocidade de canal, onde os canais de *uplink* servem como estimativa dos canais *downlink*. Isso leva a requisitos de treinamento independentes do número de antenas, [34], [64], e elimina a necessidade de *feedback* de CSI. As desvantagens do TDD são calibração de reciprocidade e contaminação por piloto: a primeira é uma necessidade levantada por diferentes características de transferência de cadeias de processamento *downlink/uplink* (por exemplo, amplificadores, filtros, osciladores locais, etc. apresentam características diferentes); o último surge em cenários de múltiplas células multiusuário, onde o uso de um número de seqüências piloto ortogonais menor do que o de usuários faz com que a estimativa de canal do usuário pretendido seja contaminada por uma combinação linear de canais de outros usuários que compartilham o mesmo piloto em outras células. Portanto, neste cenário, os pilotos se tornam não-ortogonais, pois são as mesmas seqüências sendo utilizadas por usuários de células diferentes. A calibração de reciprocidade e a descontaminação por piloto são estudadas em [35]–[37], [65] e [38], [39], [41]–[44], [66].

Em [67], os autores demonstram através de experimentos que enquanto a formação de feixes FDD com feixes predefinidos pode se aproximar bastante da vazão de *downlink* alcançada pela formação de feixes TDD, o desempenho depende fortemente da existência de condições de visada direta. Eles concluem que se na banda considerada no estudo (2.6 GHz) uma operação robusta em uma ampla variedade de condições de propagação for necessária, a formação de feixes TDD baseada em reciprocidade é a única alternativa viável.

Em [68], os autores provam que utilizando combinação *Minimum Mean Square Error* (MMSE) multicelular, a eficiência espectral de sistemas MIMO massivo cresce sem limites conforme o número de antenas aumenta, mesmo com a ocorrência de contaminação por piloto, sob uma condição de independência linear entre as matrizes de covariância dos canais. A matriz de covariância do canal de um determinado usuário está diretamente relacionada com a correlação espacial que os canais entre esse usuário e as diferentes antenas da estação ERB apresentam. A combinação MMSE multicelular explora o fato de que as estimativas de canal de usuários que usam o mesmo piloto são linearmente independentes, devido às suas matrizes de covariância serem geralmente linearmente independentes. Eles demonstram através de experimentos que uma pequena quantidade de aleatoriedade nas matrizes de covariância dos canais é suficiente para satisfazer a independência linear, o que torna os casos quando não é satisfeita em casos especiais ao invés de casos gerais. A aleatoriedade nas matrizes de covariância pode ser interpretada como a variação do desvanecimento de larga escala ao longo do arranjo de antenas. A condição de independência linear é geralmente satisfeita, exceto em casos especiais que dificilmente são encontrados na prática. Para mais informações, o leitor interessado deve acessar o artigo [68].

E. Pre-codificação

A interferência de vários usuários pode ser mitigada no lado da transmissão, utilizando técnicas de *beamforming* para suportar múltiplos fluxos de dados. A pré-codificação baseada em *Zero Forcing* (ZF) ou MMSE é simples para um número moderado de antenas. A pré-codificação ZF leva em consideração a interferência entre os usuários, mas negligencia o efeito do ruído. Com o ZF, a interferência multi-usuário é completamente anulada. Portanto, ele funciona bem em cenários limitados por interferência. Porém, por negligenciar o ruído, ele funciona mal em cenários limitados por ruído. Por outro lado, a pré-codificação MMSE maximiza a *Signal-to-Interference-and-Noise Ratio* (SINR), funcionando bem em cenários limitados por ruído e interferência. No entanto, a dependência de inversões de canal, ou seja, de matrizes de canal, pode levar a complexidade e consumo de energia destes dois pré-codificadores a um ponto difícil de acomodar em arranjos muito grandes [3], [45], [69]–[71]. O *Maximum Ratio Transmission* (MRT) é conhecido por ser o método mais simples entre todas as técnicas de pré-codificação. Além disso, este é conhecido por ser ótimo em cenários dominados por ruído. No entanto, é pouco eficaz em eliminar a interferência entre usuários [1], [69].

Técnicas de pré-codificação baseadas na diagonalização de blocos, *Block diagonalization* (BD), são uma generalização da técnica de pré-codificação ZF. Elas são estratégias de pré-codificação lineares que decompõem o canal *Multi-user MIMO* (MU-MIMO) em vários canais *Single-user MIMO* (SU-MIMO) paralelos e independentes, assim eliminando completamente a interferência multi-usuário, porém, essas técnicas não são computacionalmente eficientes. A principal complexidade computacional dos técnicas de pré-codificação do tipo BD vem de duas operações de decomposição em valores singulares *Single Value Decomposition* (SVD), que dependem do número de usuários e das dimensões da matriz de canal de cada usuário. Vários trabalhos abordam este problema tentando encontrar formas de se reduzir a complexidade de tais técnicas [72]–[75].

Métodos de pré-codificação não-lineares, como *Dirty Paper Coding* (DPC) [47], *Tomlinson-Harashima Precoding* (THP) [48], [70], [71] e *Vector Perturbation* (VP) [49], também têm características atraentes. DPC é teoricamente o método ideal de pré-codificação no sentido da maximização da capacidade do canal, porém muito complexo para ser implementado na prática. Já os outros dois métodos são variações sub-ótimas, porém, menos complexas. O conceito por trás da pré-codificação não-linear é que se a interferência é conhecida, então a capacidade de um sistema é igual à capacidade de um sistema quando não há interferência [76]. Estes métodos cancelam previamente, no transmissor, a interferência conhecida sem aplicar nenhuma penalidade ao consumo de energia. Nestas abordagens, apenas o transmissor precisa conhecer os sinais interferentes, mas ele precisa de informação completa e não-causal dos sinais transmitidos para eliminar a interferência e atingir a capacidade máxima do sistema. Embora sejam ótimos no sentido de atingir a capacidade máxima do sistema, estes métodos são muito complexos para implantação prática

ou oferecem ganhos difíceis de justificar em vista de sua maior complexidade computacional. Lembrando que o tamanho do arranjo necessário para alcançar uma dada SINR com *Matched Filter* (MF) é pelo menos duas ordens de magnitude maior do que com ZF [3], trabalhos adicionais em soluções econômicas são necessário, por exemplo, conforme ilustrado em [46], [71] para algoritmos de diagonalização de blocos.

Em [77], os autores apresentam uma discussão que mostra que embora os pré-codificadores lineares sofram de deterioração de desempenho em certos cenários, eles ainda desempenham um papel crucial no projeto do transmissor devido à sua relativa simplicidade. Eles discutem também que os pré-codificadores não-lineares possuem uma alta complexidade computacional, mas prometem obter um desempenho satisfatório. Além disso, eles demonstram que conforme o número de antenas na ERB aumenta, o desempenho de pré-codificadores lineares se aproxima daquele de pré-codificadores não-lineares, portanto justificando seu uso em tais cenários.

F. Detecção

Quando se trata de separação de fluxo de dados em sistemas convencionais, a detecção por Máxima Verossimilhança (MV), é a solução ótima, mas sua complexidade aumenta exponencialmente com o número de fluxos (isso torna difícil a implementação em redes *Machine Type Communication* (MTC) onde centenas a milhares de dispositivos são previstos). Esta é a razão pela qual a estimativa de canal e detecção de sinais são problemas chave em sistemas MIMO massivos.

Detetores de filtragem linear sub-ótimos com complexidade computacional reduzida em relação ao detector MV, como *Maximum Ratio Combining* (MRC), ZF e MMSE [51], oferecem custos mais baixos (que não dependem do número de fluxos/usuários e ordem de modulação), mas não são capazes de atingir a ordem de diversidade de recepção do detector MV e, conseqüentemente, não maximizam a capacidade de canal para casos em que o número de fluxos/usuários é aproximadamente igual ou igual ao número de antenas do arranjo [45], [78]–[81]. Essa compensação entre desempenho e complexidade levou ao desenvolvimento de vários métodos de detecção alternativos, alguns deles discutidos a seguir.

A primeira classe de interesse é a filtragem linear iterativa, que engloba os métodos *Minimum Mean Square Error-Successive Interference Cancellation* (MMSE-SIC) e *Block-iterative Generalized Decision Feedback Equalization* (BI-GDFE) [53], [78]. Estes dois métodos se baseiam no cancelamento sucessivo da interferência para atingir desempenho próximo ao do detector MV. O detector BI-GDFE possui complexidade menor do que o MMSE-SIC, mas necessita de uma estimativa precisa da correlação entre entrada e decisão tomada [53]. Uma deficiência comum a esses detectores iterativos é que sua dependência em repetidas inversões de matrizes pode torná-los computacionalmente pesados para grandes arranjos de antenas. *Tabu Search* (TS) [54], [79], [80] e *Likelihood Ascent Search* (LAS) [55] pertencem a uma classe de detectores livres de inversão de matrizes conhecida como métodos de detecção de pesquisa por passos aleatórios. Eles são métodos de

busca local. Tais métodos se movem de solução em solução no espaço das soluções candidatas (o espaço de busca) aplicando mudanças locais, até que uma solução considerada ótima seja encontrada ou um limite de tempo decorrido. Estes detectores começam com alguma solução inicial e buscam a melhor solução na vizinhança (podendo incluir a solução inicial). Eles essencialmente procuram uma sequência de vetores vizinhos com base na métrica da máxima verossimilhança até que uma solução com custo mínimo seja alcançada. Esta sequência de pesquisa é baseada em uma determinada regra de atualização para cada símbolo. Entretanto, por serem métodos de busca local, não garantem quem uma solução ótima globalmente seja encontrada. Lamentavelmente, a compensação de desempenho/complexidade também entra em jogo aqui, já que TS e LAS são conhecidos por serem superados pelo detector MMSE-SIC [3]. Além disso, o MMSE-SIC é conhecido por atingir a capacidade total do canal de múltiplo acesso MIMO com desvanecimento rápido [82], [83]. A última classe relevante, conhecida como algoritmos de detecção baseados em árvore, tem no *Sphere Decoding* (SD) um de seus métodos mais proeminentes [56], [57], [80]. O SD é na verdade um detector MV, mas que considera apenas pontos dentro de uma esfera com determinado raio. Se o raio da esfera for muito pequeno para encontrar uma boa solução, ele é aumentado. O *Fixed Complexity Sphere Decoding* (FCSD) é uma versão de baixa complexidade e altamente paralelizável, mas sub-ótima do SD. Apesar das melhorias do FCSD em relação ao SD, o método ainda é 1000 vezes mais complexo do que o TS.

Em [84], os autores concluem que embora os detectores lineares tenham um desempenho medíocre, detectores como ZF e MMSE desempenham um papel crucial no projeto do receptor devido à sua relativa simplicidade e também por poderem ser usados na inicialização e pré-processamento de outros detectores mais complexos. Eles também discutem que detectores baseados em busca local ou *Belief Propagation* (BP) podem atingir um equilíbrio promissor entre desempenho e complexidade. Além disso, eles demonstram que detectores não-lineares alcançam desempenho próximo ao do MV, mas com alta complexidade computacional.

III. MIMO EM THZ

Tecnologias que operem na faixa de THz (0.1-10 THz) irão habilitar as redes 6G. A banda THz tem o potencial de oferecer capacidade virtualmente ilimitada para suportar canais de altíssima largura de banda e taxas de dados extremamente altas [85]. Além disso, o trabalho em [86] afirma que as comunicações na faixa de THz podem atingir altas taxas de dados através do *Visible Light Communication* (VLC).

Usando antenas de ganho constante, a perda no espaço livre aumenta proporcionalmente com a frequência. Como tal, para um determinado fator de forma, antenas altamente direcionais podem fornecer baixa perda no espaço livre. Isso criou a necessidade por arranjos MIMO massivos em faixas de ondas milimétricas e arranjos MIMO ultra-massivos em faixas de THz. Desta forma, a comunicação sem fio na faixa de THz permite que pequenas estruturas alcancem ganho de diversidade e ganho de diretividade usando MIMO. Em [7],

os autores introduziram um arranjo MIMO ultra massivo com 1024×1024 elementos como uma abordagem para aumentar a distância de comunicação em sistemas de comunicação sem fio na faixa de THz. Os trabalhos [87]–[89] fornecem uma taxonomia de operação da tecnologia MIMO ultra-massiva em frequências da faixa de THz usando o conceito de matrizes de submatrizes.

Canais na banda de THz são considerados como sendo altamente seletivos em frequência [88]. Esses canais sofrem de alta absorção atmosférica, atenuação atmosférica e perda de caminho no espaço livre. Isso requer o desenvolvimento de novos modelos de canal para emular o comportamento dos canais de comunicação em THz [90]. Em [91], os autores propõem o primeiro modelo estatístico para canais em THz. Este modelo depende da realização de simulações extensas de traçado de raio para obter parâmetros estatísticos do canal. Estudos recentes apresentados em [92]–[94] fornecem modelos de canais mais precisos em relação aos dados reais coletados. Os trabalhos [92], [93] propõem modelos de propagação geométricos bidimensionais para comunicações dispositivo-dispositivo de curto alcance na faixa sub-THz. Eles também propõem um modelo de simulação de banda larga baseado em soma de sinusóides para canais na faixa de sub-THz. Os resultados apresentados por eles mostram que o modelo de simulação é uma boa aproximação do modelo de referência. Já o trabalho [94] apresenta o primeiro modelo de canal estocástico na faixa de THz para aplicações de download em quiosques, que é uma dos cenários descritos no padrão IEEE 802.15. O modelo é comparado com dados de referência para três cenários de aplicação. Os autores demonstram que o modelo proposto se equipara bem ao conjunto de dados de referência. Vários trabalhos de pesquisa também focaram em aplicações de comunicação na faixa de THz. Um sistema híbrido óptico-radiofrequência é apresentado em [95], onde um *link* THz/óptico é considerado com um método adequado para comunicação sem fio futura.

O aumento do número de fluxos de dados precisará de arranjos MIMO ultra-massivos em ambas as extremidades, mas os fluxos só podem ser explorados totalmente se o canal suportar um posto razoável - algo que é ainda pouco explorado na literatura de comunicações na faixa de THz, exceto pelo estudo em [91]. Arranjos de grandes dimensões resultarão em diretividade extrema nos feixes transmitidos, o que reduzirá a interferência. No entanto, o aumento da largura de banda também aumentará o piso de ruído [96].

Os autores de [97] comparam o desempenho de três esquemas de pré-codificação de canal, a saber, direcionamento de feixe analógico, pré-codificação híbrida com ZF em banda base e pré-codificação baseada em decomposição em valores singulares em um cenário 5G na faixa de THz. Os resultados apresentados por eles demonstram que a pré-codificação com direcionamento de feixe analógico apresenta desempenho muito pobre quando comparada com as outras duas abordagens. Por outro lado, a pré-codificação híbrida com ZF para mitigação da interferência multi-usuário apresenta um desempenho muito superior ao apresentado pela primeira técnica e se aproxima do desempenho da técnica de pré-codificação utilizando decomposição em valores singulares, a

qual é utilizada como limitante superior para as comparações.

Espera-se que as comunicações na faixa de THz abram caminho para que taxas de dados da ordem de Terabits por segundo (Tbps) atendam às demandas de aplicações futuras e tenham potencial para fortalecer as redes de *backhaul*. No entanto, comunicações nesta faixa sofrem grandes perdas de propagação e exigem *links* com visada direta para que comunicações sejam estabelecidas. Mais esforços são necessários para entender o comportamento dos sinais na faixa de THz e melhores modelos de canais são necessários.

IV. ESTIMAÇÃO DE CANAL, EQUALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE SINAIS AUXILIADAS POR APRENDIZADO DE MÁQUINA

Estimação de canal, equalização e detecção de sinais são três tarefas cruciais inter-relacionadas para atingir a capacidade de canal em sistemas de comunicação sem fio. Tais tarefas são, convencionalmente, implementadas e otimizadas individualmente [98]. Abordagens baseadas em ML permitem a otimização individual dessas tarefas, bem como sua otimização conjunta, que é uma tarefa substancialmente complicada em sistemas convencionais, mas que pode ser bastante simplificada através do uso de algoritmos de ML, como, por exemplo, redes neurais [99].

Modelos de aprendizado de máquina podem ser usados para estimar ou prever parâmetros de rádio associados a usuários específicos. Por exemplo, em sistemas MIMO massivo, i.e., sistemas com arranjos de antenas com um grande número de elementos, tanto a detecção quanto a estimativa de canal levam a problemas de busca de alta dimensão, que podem ser resolvidos por modelos de aprendizagem [100], [101].

A. Estimação de Canal

Técnicas de ML usadas no processamento de imagens, visão computacional e processamento de linguagem natural são adaptadas em vários trabalhos para a tarefa de estimação de canal, onde as correlações entre tempo, frequência e espaço dos canais são exploradas durante aprendizagem. Em [102], os autores utilizam abordagens como super-resolução e restauração de imagens para interpolação de canal e supressão de ruído, tratando a resposta em frequência temporal de um canal com desvanecimento como uma imagem 2D de baixa resolução.

A tecnologia conhecida como MIMO massivo envolve o uso de arranjos de antenas com um grande número de elementos e transceptores totalmente digitais nas ERBs. Ela é uma das tecnologias adotadas em redes 5G e que tem seus conceitos sendo atualmente ampliados para que se torne parte integrante e fundamental das redes 6G [103]. A estimativa de canal usando sequências piloto transmitidas no sentido de *uplink* de sistemas MIMO convencionais e massivos é um problema bem estudado no caso de hardware ideal tanto na ERB quanto nos equipamentos de usuário [104], [105]. No entanto, na prática, deficiências do transceptor, como não-linearidades em amplificadores, desequilíbrio I/Q e erros de quantização são inevitáveis [106], [107].

Existem vários trabalhos que modelam e analisam o impacto de distorções não-lineares causadas pelo hardware em sistemas

MIMO massivo usando estimadores MMSE Bayesianos [108]. É possível derivar um estimador MMSE Bayesiano ciente de distorção que utiliza as estatísticas de primeira e segunda ordens da distorção para estimar os canais, mas ao fazer isso, a distorção é tratada como ruído colorido independente, embora dependa do canal [109]–[111]. Neste exemplo, a estimação Bayesiana pode ser classificada com um algoritmo de aprendizado de máquina, pois aprende os canais a partir de informações prévias. Além disso, deve-se observar que derivar estimadores MMSE é geralmente muito difícil no caso de distorções não-lineares de hardware e, portanto, muitas vezes, se recorre a soluções sub-ótimas.

Em [111], os autores apresentam uma abordagem baseada em aprendizagem profunda, i.e., *deep learning*, que melhora a qualidade das estimativas de canal, levando em consideração as características de distorções não-lineares presentes na ERB e nos dispositivos de usuário, ao invés de considerar apenas o canais sem fio. O trabalho mostra como uma abordagem de aprendizagem baseada em dados pode ser combinada com o conhecimento especializado do campo das comunicações sem fio para explorar a estrutura do hardware do transceptor e, assim, superar as abordagens baseadas em modelos sub-ótimos.

No entanto, as técnicas existentes de estimação de canal baseadas em aprendizado profundo têm uma deficiência comum. Como o *Deep Neural Network* (DNN) deve ser treinado *offline* devido aos requisitos de longos períodos de treinamento e grandes bases de treinamento, incompatibilidades entre canais reais e canais na fase de treinamento podem causar uma degradação do desempenho. Em pesquisas futuras, o treinamento *online* e a criação ou obtenção de dados de treinamento que correspondam às condições do canal do mundo real podem ser uma abordagem promissora para superar esse problema [112].

B. Detecção em Sistemas MIMO

Na detecção de sinais vindos de sistemas MIMO, os métodos iterativos, que são baseados em detectores Bayesianos ótimos, mostraram desempenho superior com complexidade de computação moderada. No entanto, esses detectores geralmente impõem suposições sobre a distribuição do canal, o que limita o desempenho em muitos ambientes complexos [113]. Ao incorporar abordagens baseadas em aprendizagem de máquina, a adaptabilidade dos detectores pode ser melhorada, uma vez que os parâmetros do modelo podem ser refinados de acordo com os dados específicos [114]. Em [115], os autores propõem um *framework* que combina alguns procedimentos iterativos com um detector *Approximate Message Passing* (AMP) ortogonal para detecção de sinais. Os resultados mostram que o *framework* proposto pode ser facilmente treinado em um período mais curto e com menos dados de treinamento em comparação a uma DNN, melhorando o desempenho do detector AMP ortogonal em canais Rayleigh e MIMO correlacionados. Portanto, essa abordagem pode ser escalonada para sistemas MIMO massivo com grande potencial para serem aplicadas a canais variantes no tempo.

V. DIREÇÕES DE PESQUISA FUTURAS

MIMO massivo é uma das tecnologias que integram o padrão 5G, entretanto, ainda existem vários desafios que precisam ser ultrapassados para encurtar a lacuna entre o desempenho teórico e o alcançado na prática. A maioria dos desafios citados anteriormente já foram resolvidos, entretanto existem outros, como por exemplo simplificações de modelamento feitos na academia, que podem impedir uma transferência direta da teoria para a implementação prática. Portanto, a comunidade de pesquisa certamente deve apoiar os desenvolvedores de produtos em seus esforços para implementar algoritmos existentes sob restrições práticas, relacionadas ao hardware e regulamentação. Ao mesmo tempo, é importante iniciar pesquisas mais prospectivas que considerem novas aplicações de grandes arranjos de antenas que podem se tornar a base para o padrão 6G. Neste sentido, uma das direções de evolução mais inovadoras consideradas para o padrão 6G é a utilização de novas tecnologias e arquiteturas de arranjos de antenas, tais como *Cell-Free* (CF) e *Reconfigurable intelligent surfaces* (RIS) [116]–[119].

Sistemas MIMO massivo que utilizam o conceito de CF são sistemas que compreendem um grande número de antenas distribuídas através de pontos de acesso, de baixo custo e baixa potência, conectadas a um controlador de rede. O número de antenas é significativamente maior do que o número de usuários. O sistema não é particionado em células (ou seja, não existem células) e cada usuário é servido por todas as antenas de simultaneamente [116]. Por outro lado, uma RIS é uma estrutura programável que pode ser usada para controlar a propagação de ondas eletromagnéticas alterando as propriedades elétricas e magnéticas da superfície. Ao colocar essas superfícies em um ambiente, as propriedades dos canais de rádio podem ser controladas, melhorando a confiabilidade e a eficiência energética de sistemas sem fio [119]. Estas duas novas tecnologias abrem novas oportunidades para melhorar o desempenho dos sistemas sem fio.

Além dos serviços de banda larga móvel, os arranjos de antenas podem ser usados para outras aplicações de comunicação, como comunicações de máquina de baixa potência ou ultra confiáveis, bem como aplicações não relacionadas com comunicação, como radar, detecção e posicionamento. Algumas direções para estes novos campos de pesquisa relacionados ao MIMO massivo são: arranjos de antenas com abertura extremamente grande, MIMO massivo holográfico, posicionamento, radares MIMO de grande escala, MIMO massivo inteligente. Outros caminhos mais disruptivos, futuristas e intocados são, por exemplo, pesquisas sobre o que aconteceria se MIMO massivo fosse combinado com comunicações quânticas, sinalização em frequências acima da banda de rádio ou comunicações moleculares [120].

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma visão geral, porém abrangente, dos desafios e respectivas soluções encontradas durante o desenvolvimento da tecnologia conhecida como MIMO massivo, desde de sua criação até sua integralização no padrão 5G. Adicionalmente, foram discutidas formas de como se espera

que a tecnologia possa ser expandida e se tornar mais uma vez, parte importante da nova geração de redes de comunicação, o 6G.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP com recursos do MCTIC, outorga No. No 01245.010604/2020-14, sob o projeto de sistemas de comunicações móveis 6G do Centro de Referência em Radiocomunicações - CRR do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel.

REFERÊNCIAS

- [1] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, 2010.
- [2] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," *Proceedings of the IEEE*, pp. 1–34, 2021.
- [3] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large ArRays," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2013.
- [4] F. A. P. de Figueiredo, F. A. C. M. Cardoso, I. Moerman, and G. Fraidenraich, "On the Application of Massive MIMO Systems to Machine Type Communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 2589–2611, 2019.
- [5] J. Wu, "Research on Massive MIMO Key Technology in 5G," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 466, p. 012083, IOP Publishing, 2018.
- [6] D. U. Campos Delgado, C. A. Gutierrez, and O. Caicedo, "5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, p. 1702–1736, Apr. 2021.
- [7] I. F. Akyildiz and J. M. Jornet, "Realizing Ultra-Massive MIMO (1024× 1024) Communication in the (0.06–10) Terahertz Band," *Nano Communication Networks*, vol. 8, pp. 46–54, 2016.
- [8] S. A. Busari, K. M. S. Huq, S. Mumtaz, J. Rodriguez, Y. Fang, D. C. Sicker, S. Al Rubaye, and A. Tsourdos, "Generalized Hybrid Beamforming for Vehicular Connectivity Using THz Massive mimo," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 8372–8383, 2019.
- [9] N. Shlezinger, G. C. Alexandropoulos, M. F. Imani, Y. C. Eldar, and D. R. Smith, "Dynamic MetaSurface Antennas for 6G Extreme Massive MIMO Communications," *IEEE Wireless Communications*, 2021.
- [10] A. Osinsky, A. Ivanov, and D. Yarotsky, "Efficient Performance Bound for Channel Estimation in Massive MIMO Receiver," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021.
- [11] H. Helmy, S. El Daysti, H. Shatila, and M. Aboul Dahab, "Performance Enhancement of Massive MIMO Using Deep Learning-Based Channel Estimation," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1051, p. 012029, IOP Publishing, 2021.
- [12] Z. Mokhtari, M. Sabbaghian, and R. Dinis, "A survey on Massive MIMO Systems in Presence of Channel and Hardware Impairments," *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 164, 2019.
- [13] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, 2014.
- [14] J. Feng, S. Ma, S. Aissa, and M. Xia, "Two-Way Massive MIMO Relaying Systems With Non-Ideal Transceivers: Joint Power and Hardware Scaling," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 12, pp. 8273–8289, 2019.
- [15] Y. Xie, B. Li, Z. Yan, J. Fan, and M. Yang, "A general Hybrid Precoding Method for mmWave Massive MIMO Systems," *Radio Eng.*, vol. 28, pp. 439–446, 2019.
- [16] J. A. Zhang, X. Huang, V. Dyadyuk, and Y. J. Guo, "Massive Hybrid Antenna Array for Millimeter-Wave Cellular Communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 79–87, 2015.
- [17] M. Soleimani, R. C. Elliott, W. A. Krzymieñ, J. Melzer, and P. Mousavi, "Hybrid Beamforming for mmWave Massive MIMO Systems Employing DFT-Assisted User Clustering," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 11646–11658, 2020.
- [18] Y. Pei, T.-H. Pham, and Y.-C. Liang, "How many RF Chains are Optimal for Large-Scale MIMO Systems when Circuit Power is Considered?," in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 3868–3873, IEEE, 2012.
- [19] H. Li, L. Song, D. Zhu, and M. Lei, "Energy Efficiency of Large Scale MIMO Systems with Transmit Antenna Selection," in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 4641–4645, IEEE, 2013.
- [20] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," *IEEE Journal of selected topics in Signal processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, 2014.
- [21] F. Sohrabi and W. Yu, "Hybrid Digital and Analog Beamforming Design for Large-Scale Antenna Arrays," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 501–513, 2016.
- [22] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, E. Li, T. Marzetta, R. Yang, and L. Zhong, "Argos: Practical Many-Antenna Base Stations," in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, (New York, NY, USA), p. 53–64, Association for Computing Machinery, 2012.
- [23] R. Janaswamy, "Effect of Element Mutual Coupling on the Capacity of Fixed Length Linear Arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 1, pp. 157–160, 2002.
- [24] J. W. Wallace and M. A. Jensen, "Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: a Rigorous Network Theory Analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 4, pp. 1317–1325, 2004.
- [25] B. K. Lau, J. B. Andersen, G. Kristensson, and A. F. Molisch, "Impact of Matching Network on Bandwidth of Compact Antenna ArRays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11, pp. 3225–3238, 2006.
- [26] A. Sibille, C. Oestges, and A. Zanella, *MIMO: from Theory to Implementation*. Academic Press, 2010.
- [27] Xavier Artiga, "On the Selection of Radiating Elements for Compact Indoor Massive-Multiple Input Multiple Output Base Stations," *IET MicroWaves, Antennas & Propagation*, vol. 8, pp. 1–9(8), January 2014.
- [28] A. L. Moustakas, H. U. Baranger, L. Balents, A. M. Sengupta, and S. H. Simon, "Communication Through a Diffusive Medium: Coherence and Capacity," *Science*, vol. 287, no. 5451, pp. 287–290, 2000.
- [29] X. Gao, F. Tufvesson, and O. Edfors, "Massive MIMO Channels - Measurements and Models," in *2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 280–284, 2013.
- [30] S. Wu, C. Wang, Y. Yang, W. Wang, and X. Gao, "Performance Comparison of Massive MIMO Channel Models," in *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp. 1–6, 2016.
- [31] K. Zheng, S. Ou, and X. Yin, "Massive MIMO Channel Models: A Survey," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 2014.
- [32] S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Börner, and L. Thiele, "QuaDRiGa: A 3-D Multi-Cell Channel Model With Time Evolution for Enabling Virtual Field Trials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 6, pp. 3242–3256, 2014.
- [33] Z. Jiang, A. F. Molisch, G. Caire, and Z. Niu, "Achievable Rates of FDD Massive MIMO Systems With Spatial Channel Correlation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 2868–2882, 2015.
- [34] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 2640–2651, 2011.
- [35] F. Kaltenberger, H. Jiang, M. Guillaud, and R. Knopp, "Relative Channel Reciprocity Calibration in MIMO/TDD Systems," in *2010 Future Network Mobile Summit*, pp. 1–10, 2010.
- [36] R. Rogalin, O. Y. Bursalioglu, H. C. Papadopoulos, G. Caire, and A. F. Molisch, "Hardware-Impairment Compensation for Enabling Distributed Large-Scale MIMO," in *2013 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pp. 1–10, 2013.
- [37] R. Rogalin, O. Y. Bursalioglu, H. Papadopoulos, G. Caire, A. F. Molisch, A. Michaloliakos, V. Balan, and K. Psounis, "Scalable Synchronization and Reciprocity Calibration for Distributed Multi-User MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 4, pp. 1815–1831, 2014.
- [38] H. Q. Ngo and E. G. Larsson, "EVD-Based Channel Estimation in Multicell Multi-User MIMO Systems with very Large Antenna Arrays," in *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3249–3252, 2012.

- [39] A. Ashikhmin and T. Marzetta, "Pilot Contamination Precoding in Multi-cell Large Scale Antenna Systems," in *2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, pp. 1137–1141, 2012.
- [40] Chiyang Xiao, Xin Su, Jie Zeng, Liping Rong, and Xibin Xu, "Multi-cell MMSE Precoding in Distributed Antenna System with Pilot Contamination," in *2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China - Workshops (CIC/ICCC)*, pp. 27–31, 2015.
- [41] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, "A Coordinated Approach to Channel Estimation in Large-Scale Multiple-Antenna Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 264–273, 2013.
- [42] R. R. Müller, L. Cottatellucci, and M. Vehkaperä, "Blind Pilot DeContamination," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 773–786, 2014.
- [43] O. Elijah, C. Y. Leow, T. A. Rahman, S. Nunoo, and S. Z. Iliya, "A Comprehensive Survey of Pilot Contamination in Massive MIMO—5G System," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 905–923, 2016.
- [44] F. A. P. de Figueiredo, F. A. Cardoso, I. Moerman, and G. Fraidenraich, "Channel Estimation for Massive MIMO TDD Systems AsSuming Pilot Contamination and Flat Fading," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2018, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [45] R. C. de Lamare, "Massive MIMO Systems: Signal processing Challenges and Future Trends," *URSI Radio Science Bulletin*, vol. 2013, no. 347, pp. 8–20, 2013.
- [46] K. Zu, R. C. de Lamare, and M. Haardt, "Generalized Design of Low-Complexity Block Diagonalization Type Precoding Algorithms for Multi-User MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 10, pp. 4232–4242, 2013.
- [47] G. Caire and S. Shamai, "On the Achievable Throughput of a Multi-Antenna Gaussian Broadcast Channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 7, pp. 1691–1706, 2003.
- [48] C. Windpassinger, L. Lampe, R. F. H. Fischer, and T. Hehn, "A Performance Study of MIMO Detectors," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 8, pp. 2004–2008, 2006.
- [49] C. B. Peel, B. M. Hochwald, and A. L. Swindlehurst, "A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multi-Antenna Multi-User Communication-part I: Channel Inversion and Regularization," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 1, pp. 195–202, 2005.
- [50] H. Q. Ngo, *Massive MIMO: Fundamentals and System Designs*, vol. 1642. Linköping University Electronic Press, 2015.
- [51] J. R. Barry, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, *Digital Communication*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [52] S. Verdu *et al.*, *Multi-User Detection*. Cambridge university press, 1998.
- [53] Y. Liang, E. Y. Cheu, L. Bai, and G. Pan, "On the Relationship Between MMSE-SIC and BI-GDFE Receivers for Large Multiple-Input Multiple-Output Channels," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 8, pp. 3627–3637, 2008.
- [54] H. Zhao, H. Long, and W. Wang, "Tabu Search Detection for MIMO Systems," in *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–5, 2007.
- [55] Y. Sun, "A Family of Likelihood Ascent Search Multi-User Detectors: An Upper Bound of Bit Error Rate and a Lower Bound of Asymptotic Multi-User Efficiency," *Trans. Comm.*, vol. 57, p. 1743–1752, June 2009.
- [56] J. Jalden and B. Ottersten, "On the Complexity of Sphere Decoding in Digital Communications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 4, pp. 1474–1484, 2005.
- [57] L. G. Barbero and J. S. Thompson, "Fixing the Complexity of the Sphere Decoder for MIMO Detection," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 6, pp. 2131–2142, 2008.
- [58] B. B. Adela, "Antennas for Silicon-Based mm-Wave FMCW Radars: Antenna Integration and MIMO System Design," 2019.
- [59] M. Z. Aslam, Y. Corre, E. Björnson, and E. G. Larsson, "Performance of a Dense Urban Massive MIMO Network from a Simulated Ray-Based Channel," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 1, pp. 1–13, 2019.
- [60] F. Sheikh, Y. Gao, and T. Kaiser, "A Study of Diffuse Scattering in Massive MIMO Channels at Terahertz Frequencies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 2, pp. 997–1008, 2019.
- [61] L. M. Correia, *Mobile BroadBand Multimedia Networks: Techniques, Models and Tools for 4G*. Elsevier, 2010.
- [62] J. Poutanen, K. Haneda, J. Salmi, V.-M. Kolmonen, F. Tufvesson, T. Hult, and P. Vainikainen, "Significance of Common Scatterers in Multi-link Indoor Radio Wave Propagation," in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 1–5, IEEE, 2010.
- [63] T. Santos, J. Karedal, P. Almers, F. Tufvesson, and A. F. Molisch, "Modeling the Ultra-WideBand Outdoor Channel: Measurements and Parameter Extraction Method," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 1, pp. 282–290, 2010.
- [64] I. Khan, J. J. Rodrigues, J. Al Muhtadi, M. I. Khattak, Y. Khan, F. Altaf, S. S. Mirjavadi, and B. J. Choi, "A robust Channel Estimation Scheme for 5G Massive MIMO Systems," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, 2019.
- [65] M. Azizpour and K. Mohamed Pour, "Compressed Downlink Channel Acquisition Based on Burst Support Information in Large-Scale MIMO Systems," *Electronics Letters*, vol. 55, no. 8, pp. 489–491, 2019.
- [66] N. Tadayon, M. T. Rahman, S. Han, S. Valaee, and W. Yu, "Decimeter Ranging with Channel State Information," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 7, pp. 3453–3468, 2019.
- [67] J. Flordelis, F. Rusek, F. Tufvesson, E. G. Larsson, and O. Edfors, "Massive MIMO Performance—TDD Versus FDD: What Do Measurements Say?," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2247–2261, 2018.
- [68] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Pilot Contamination is not a Fundamental Asymptotic Limitation in Massive MIMO," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, 2017.
- [69] M. Sarajlić, F. Rusek, J. R. Sánchez, L. Liu, and O. Edfors, "Fully Decentralized Approximate Zero-Forcing Precoding for Massive MIMO Systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 773–776, 2019.
- [70] H. Huang, Y. Song, J. Yang, G. Gui, and F. Adachi, "Deep-Learning-Based Millimeter-Wave Massive MIMO for Hybrid Precoding," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 3, pp. 3027–3032, 2019.
- [71] D. Su, Y. Jiang, X. Wang, and X. Gao, "Omnidirectional Precoding for Massive MIMO with Uniform Rectangular Array—Part I: Complementary Codes-Based Schemes," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 18, pp. 4761–4771, 2019.
- [72] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multi-User MIMO Channels," *IEEE transactions on Signal processing*, vol. 52, no. 2, pp. 461–471, 2004.
- [73] H. Sung, S.-R. Lee, and I. Lee, "Generalized Channel Inversion Methods for Multi-User MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 11, pp. 3489–3499, 2009.
- [74] K. Zu and R. C. De Lamare, "Low-Complexity Lattice Reduction-Aided Regularized Block Diagonalization for MU-MIMO Systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 925–928, 2012.
- [75] K. Zu, R. C. de Lamare, and M. Haardt, "Generalized Design of Low-Complexity Block Diagonalization Type Precoding Algorithms for Multi-User MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 10, pp. 4232–4242, 2013.
- [76] L. Chu, F. Wen, L. Li, and R. Qiu, "Efficient NonLinear Precoding for Massive MIMO Downlink Systems with 1-Bit DACs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 9, pp. 4213–4224, 2019.
- [77] M. A. Albreem, A. H. A. Habbash, A. M. Abu Hudrouss, and S. S. Ikki, "Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 60764–60801, 2021.
- [78] I. A. Khoso, X. Dai, M. N. Irshad, A. Khan, and X. Wang, "A Low-Complexity Data Detection Algorithm for Massive MIMO Systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 39341–39351, 2019.
- [79] M. A. Albreem, M. Juntti, and S. Shahabuddin, "Massive MIMO Detection Techniques: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3109–3132, 2019.
- [80] X. Tan, Y.-L. Ueng, Z. Zhang, X. You, and C. Zhang, "A Low-Complexity Massive MIMO Detection Based on Approximate Expectation Propagation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7260–7272, 2019.
- [81] F. A. P. de Figueiredo, F. A. Cardoso, J. P. Miranda, I. Moerman, C. F. Dias, and G. Fraidenraich, "Large-Scale Antenna Systems and Massive Machine type Communications," *International journal of Wireless Information Networks*, vol. 27, pp. 317–339, 2020.
- [82] A. Paulraj, A. P. Rohit, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge university press, 2003.
- [83] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge university press, 2005.

- [84] M. A. Albreem, M. Juntti, and S. Shahabuddin, "Massive MIMO Detection Techniques: A Survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3109–3132, 2019.
- [85] Y. Xing and T. S. Rappaport, "Propagation Measurement System and Approach at 140 GHz—Moving to 6G and Above 100 GHz," in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [86] H. Sameddeen, N. Saeed, T. Y. Al Naffouri, and M.-S. Alouini, "Next Generation Terahertz Communications: A Rendezvous of Sensing, Imaging, and Localization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 5, pp. 69–75, 2020.
- [87] I. F. Akyildiz, C. Han, and S. Nie, "Combating the Distance Problem in the Millimeter Wave and Terahertz Frequency Bands," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 102–108, 2018.
- [88] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, "Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nano-Networks in the Terahertz Band," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221, 2011.
- [89] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, "Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications," *Physical Communication*, vol. 12, pp. 16–32, 2014.
- [90] H. Elayan, O. Amin, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, "Terahertz Communication: The Opportunities of Wireless Technology Beyond 5G," in *2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*, pp. 1–5, IEEE, 2018.
- [91] S. Priebe and T. Kurner, "Stochastic Modeling of THz Indoor Radio Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 9, pp. 4445–4455, 2013.
- [92] S. Kim and A. Zajić, "Statistical Modeling of THz Scatter Channels," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, IEEE, 2015.
- [93] D. He, K. Guan, A. Fricke, B. Ai, R. He, Z. Zhong, A. Kasamatsu, I. Hosako, and T. Kürner, "Stochastic Channel Modeling for Kiosk Applications in the Terahertz Band," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 502–513, 2017.
- [94] A. R. Ekti, A. Boyaci, A. Alparslan, İ. Ünal, S. Yarkan, A. Görçin, H. Arslan, and M. Uysal, "Statistical Modeling of Propagation Channels for Terahertz Band," in *2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 275–280, IEEE, 2017.
- [95] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space optical communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
- [96] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," *Proceedings of the IEEE*, 2021.
- [97] S. A. Busari, K. M. S. Huq, S. Mumtaz, and J. Rodriguez, "Terahertz Massive MIMO for Beyond-5G Wireless Communication," in *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, 2019.
- [98] M. Benzaghta and K. M. Rabie, "Massive MIMO Systems for 5G: A Systematic Mapping Study on Antenna Design Challenges and Channel Estimation Open Issues," *IET Communications*, 2021.
- [99] A. Ly and Y.-D. Yao, "A Review of Deep Learning in 5G Research: Channel Coding, Massive MIMO, Multiple Access, Resource Allocation, and Network Security," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 396–408, 2021.
- [100] C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, Z. Han, K. C. Chen, and L. Hanzo, "Machine Learning Paradigms for Next-Generation Wireless Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 98–105, 2017.
- [101] D. López Pérez, A. De Domenico, N. Piovesan, H. Baohongqiang, G. Xinli, S. Qitao, and M. Debbah, "A Survey on 5G Energy Efficiency: Massive MIMO, Lean Carrier Design, Sleep Modes, and Machine Learning," *arXiv preprint arXiv:2101.11246*, 2021.
- [102] M. Soltani, V. Pourahmadi, A. Mirzaei, and H. Sheikhzadeh, "Deep Learning-Based Channel Estimation," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 652–655, 2019.
- [103] L. Sanguinetti, E. Björnson, and J. Hoydis, "Toward Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 1, pp. 232–257, 2020.
- [104] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 11, no. 3–4, pp. 154–655, 2017.
- [105] T. L. Marzetta, *Fundamentals of Massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- [106] T. Schenk, *RF Imperfections in High-Rate Wireless Systems: Impact and Digital Compensation*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [107] R. Nie, L. Chen, N. Zhao, Y. Chena, W. Wang, and X. Wangb, "Impact and Calibration of Non-Linear Reciprocity Mismatch in Massive MIMO Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021.
- [108] S. Huang, D. Qiu, and T. D. Tran, "Bayesian Massive MIMO Channel Estimation with Parameter Estimation Using Low-Resolution ADCs," in *ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 4830–4834, IEEE, 2021.
- [109] M. I. Zahoor, D. Zheng, S. Ayub, and M. Waqas, "Bayesian Channel Estimation in Massive MIMO System," in *2018 2nd International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC)*, pp. 91–96, IEEE, 2018.
- [110] C. Zhu, Z. Zheng, B. Jiang, W. Zhong, and X. Gao, "Bayesian Channel Estimation for Massive MIMO Communications," in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, IEEE, 2016.
- [111] Özlem Tugfe Demir and Emil Björnson, "Channel Estimation in Massive MIMO under Hardware Non-Linearities: Bayesian Methods Versus Deep Learning," 2019.
- [112] Samad Ali, Walid Saad, Nandana Rajatheva, Kapseok Chang, Daniel Steinbach, Benjamin Sliwa, Christian Wietfeld, Kai Mei, Hamid Shirri, Hans-Jürgen Zepernick, Thi My Chinh Chu, Ijaz Ahmad, Jyrki Hususko, Jaakko Suutala, Shubhangi Bhaduria, Vimal Bhatia, Rangeet Mitra, Saidhiraj Amuru, Robert Abbas, Baohua Shao, Michele Capobianco, Guanghui Yu, Maelick Claes, Teemu Karvonen, Mingzhe Chen, Maksym Girnyk, and Hassan Malik, "6G White Paper on Machine Learning in Wireless Communication Networks," 2020.
- [113] A. Schenk and R. F. Fischer, "Noncoherent Detection in Massive MIMO Systems," in *WSA 2013: 17th International ITG Workshop on Smart Antennas*, pp. 1–8, VDE, 2013.
- [114] W. Fukuda, T. Abiko, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, Y. Ohwatari, and Y. Kishiyama, "Low-Complexity Detection Based on Belief Propagation in a Massive MIMO System," in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, IEEE, 2013.
- [115] H. He, S. Jin, C.-K. Wen, F. Gao, G. Y. Li, and Z. Xu, "Model-Driven Deep Learning for Physical Layer Communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 5, pp. 77–83, 2019.
- [116] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, 2017.
- [117] G. Interdonato, E. Björnson, H. Q. Ngo, P. Frenger, and E. G. Larsson, "Ubiquitous Cell-Free Massive MIMO Communications," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 1, pp. 1–13, 2019.
- [118] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, "Beyond Massive MIMO: The Potential of Data Transmission with Large Intelligent Surfaces," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 10, pp. 2746–2758, 2018.
- [119] F. A. P. de Figueiredo, M. S. P. Facina, R. C. Ferreira, Y. Ai, R. Ruby, Q.-V. Pham, and G. Fraidenraich, "Large Intelligent Surfaces With Discrete Set of Phase-Shifts Communicating Through Double-Rayleigh Fading Channels," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 20768–20787, 2021.
- [120] Emil Björnson, Luca Sanguinetti, Henk Wymeersch, Jakob Hoydis, and Thomas L. Marzetta, "Massive MIMO is a Reality—What is Next?: Five Promising Research Directions for Antenna Arrays," *Digital Signal Processing*, vol. 94, pp. 3–20, 2019. Special Issue on Source Localization in Massive MIMO.



Felipe A. P. de Figueiredo Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2004), mestrado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2011) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2019). Tem mais de 15 anos de experiência em P&D de sistemas de telecomunicações, como GSM, WCDMA, TV Digital, LTE e 5G. Atualmente é professor e pesquisador no INATEL, onde atua na pesquisa e desenvolvimento de soluções que visam o aumento da eficiência espectral da próxima geração de redes celulares e sem fio. Temas de interesse: MIMO, modulações multiportadora, processamento digital de sinais, aprendizado de máquina, modulações digitais, comunicações móveis, e desenvolvimento de projetos em FPGAs.