



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

UNIVERSIDADE AUTÓNOMA DE LISBOA

“LUÍS DE CAMÕES”

Técnicas de Detecção para sistemas LIS

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Informática e de
Telecomunicações

Autor: Rocélio Alípio Bravo Rómulo

Orientador: Professor Doutor Mário Pedro Guerreiro Marques da Silva

Número do candidato: 30007604

Janeiro de 2022

Lisboa

Resumo

O propósito deste trabalho é demonstrar a possibilidade da implementação do LIS como um candidato favorável para as comunicações da sexta geração (6G) e para além. As redes sem fios de quinta geração (5G) estão a ser implementadas ao redor do mundo, a principal tecnologia que suporta as redes 5G é a enorme tecnologia de múltiplas entradas e saídas (*Multiple Input/Multiple output MIMO*) que operam nas bandas de sub-6GHZ. Por consequente, a comunicação por *Millimeter wave* (mmWave), uma das três tecnologias centradas no 5G, não foi amplamente adotada. Os principais obstáculos das mmWave incluem a sua sensibilidade a bloqueios, cobertura limitada, e perda severa de trajeto. No entanto, algumas das aplicações inovadoras, tais como projeções holográficas de alta-fidelidade, realidade virtual imersiva, robótica ligada e sistemas autónomos deverão ser suportadas por 6G e posterior [1]. Estas aplicações implicam requisitos de alta *Quality of Service* (QoS), tais como taxas de dados extremamente elevadas, fiabilidade ultraalta, e latência ultrabaixa, que não podem ser prontamente suportados pelos sistemas existentes. Devido a grande quantidade de largura de banda encontrada em frequências mais elevadas, as comunicações nas bandas mmWave e mesmo em Terahertz serão inevitáveis. O ganho de matriz de técnicas MIMO maciças nas *Base Station* (BS) atenua a perda do caminho em frequências altas, mas não resolve o problema do bloqueio. O aumento de BS implantadas pode ajudar a eliminar os bloqueios e preencher buracos de cobertura, mas esta solução dispendiosa em termos de infraestrutura e requer um enorme consumo de energia. Por conseguinte, são necessárias novas tecnologias rentáveis e eficientes do ponto de vista energético para resolver estes problemas [2].

Palavras-chaves: LIS, MIMO, Terahertz, mmWave.

Abstract

The purpose of this paper is to demonstrate the possibility of LIS implementation as a favorable candidate for 6G communications and beyond. Fifth generation (5G) wireless networks are being deployed around the world, the main technology supporting 5G networks is the massive Multiple Input/Multiple output MIMO technology operating in the sub-6GHZ bands. Consequently, millimeter wave communication (mmWave), one of the three technologies centered on 5G, has not been widely adopted. The main obstacles of mmWave include its sensitivity to jamming, limited coverage, and severe path loss. However, some of the innovative applications such as high-fidelity holographic projections, immersive virtual reality, connected robotics, and autonomous systems are expected to be supported by 6G and beyond [1]. These applications entail high quality of service (QoS) requirements, such as extremely high data rates, ultra-high reliability, and ultra-low latency, which cannot be readily supported by existing systems. Due to the large amount of bandwidth found at higher frequencies, communications in the mmWave bands and even in Terahertz will be inevitable. The array gain of massive MIMO techniques in Base Station (BS) mitigates path loss at high frequencies but does not solve the blocking problem. Increasing deployed BSs can help eliminate blocking and fill coverage holes, but this solution is expensive in terms of infrastructure and requires huge power consumption. Therefore, new cost-effective and energy-efficient technologies are needed to solve these problems [2].

Keywords: LIS, MIMO, Terahertz, mmWave.

Índice

Resumo	1
Abstract	4
Índice	5
Lista de Quadros/Gráficos.....	8
Lista de Fotografias/Ilustrações	9
Lista de Abreviaturas.....	10
Lista de Termos	11
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 FORMULAÇÃO DE PROBLEMAS.....	15
1.2 OBJETIVO	15
1.2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 JUSTIFICAÇÃO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LIS.....	17
2.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS LIS	21
2.2.1 ANÁLISE DA CAPACIDADE DOS SISTEMAS LIS.....	22
2.2.1.1 CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE DADOS	22
2.2.1.2 ANÁLISE DE DEFICIÊNCIAS DE HARDWARE	23
2.2.2 ANÁLISE DA TAXA DE DADOS.....	23
2.2.2.1 TAXA DE UPLINK PARA SISTEMAS SINGLE-LIS.....	23
2.2.2.2 TAXA DE UPLINK PARA SISTEMAS MULTI-LIS	26
2.2.2.3 IMPACTO DA TAXA NO PHASE SHIFTS.....	28
2.3 ANÁLISE DA FIABILIDADE DE LIS.....	29
2.3.1 DISTRIBUIÇÃO DA TAXA E PROBABILIDADE DE FALHA DE	
ENERGIA	29

2.3.2	PROBABILIDADE DE ERRO PARA INTELIGÊNCIA E TRANSMISSÃO CEGA.....	30
2.3.3	EFEITO DO ERRO DE MUDANÇA DE FASE NA TRANSMISSÃO	
	31	
2.3.4	PROBABILIDADE DE REFLEXÃO DOS SISTEMAS LIS.....	32
2.3.5	IMPACTO DO TAMANHO NO DESEMPENHO DOS SISTEMAS LIS	
	33	
2.4	O POTENCIAL DE POSICIONAMENTO E COBERTURA EM SISTEMAS LIS	34
2.4.1	POSICIONAMENTO EM LIS CENTRALIZADO E DISTRIBUÍDO SISTEMAS	34
2.4.2	POSICIONAMENTO DE SISTEMAS DE ONDAS mmWAVE.....	35
2.4.3	POSICIONAMENTO USANDO LIS ESFÉRICA.....	36
2.5	PROBLEMAS DE INVESTIGAÇÃO	36
2.5.1	QUADROS REALISTAS DE OTIMIZAÇÃO.....	37
2.5.2	SISTEMAS HÍBRIDOS: RF-VLC	38
2.5.3	REVESTIMENTO EM MATERIAIS.....	39
2.5.4	QUESTÕES DE SEGURANÇA.....	40
2.5.5	INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS 5G E 6G	41
2.5.6	LOCALIZAÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS LIS	41
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E O SINAL.....	43
3.2	SISTEMA E MODELO DE SINAL PARA OS RECETORES.....	44
4	CRONOGRAMA	46
5	RESULTADOS OBITIDOS.....	47
5.1	BASELINE.....	48
6	CONCLUSÃO	52
7	BIBLIOGRAFIA	53

Lista de Quadros/Gráficos

Tabela 1 Lista de Abreviaturas.....	8
Tabela 2 Termos utilizados no trabalho.....	9
Tabela 3 Lista de baseline utilizados para simulações.....	45

Lista de Fotografias/Ilustrações

Fig. 1 Controlo da reflexão EM utilizando díodos PIN.....	18
Fig. 2 Controlo da reflexão EM utilizando ressonadores sintonizados com varactor.	19
Fig. 3 Modelo convencional de propagação de dois raios.....	19
Fig 4 O princípio de funcionamento do LIS como um reflector.	20
Fig. 5 Sistema único LIS com unidades K que servem inúmeros dispositivos até K.....	24
Fig. 6 O modelo de sistema considerado em [30], ilustrando um sistema multi-LIS que partilha a mesma banda de frequência.	26
Fig. 7 A estrutura da moldura de ligação uplink mostrando o período de intervalo de uma sinalização piloto e transmissão de dados [30].	27
Fig. 8 Implementação do sistema LIS de forma centralizada.....	35
Fig. 9 Implementação distribuída do sistema LIS reduzido a metade.	35
Fig. 10 RF-VLC sistema híbrido para RISs	39
Fig. 11 Diagrama de blocos de um sistema m-MIMO associado a sinais SC-FDE.....	40
Fig.12 LIS Near-filed.....	48
Fig.13 LIS 4 painéis ilustrados.....	44
Fig. 14 Comparação a performance quando o número de antenas em cada painel aumenta 4X25 vs4X64.....	46
Fig. 15 Ilustrar a diferença do sinal entre 4x25 vs 9x100.....	47
Fig. 16 Figure 16 Simulação do LIS com diferente número de utilizadores 4vs6.....	48

Lista de Abreviaturas

Tabela 1 Lista de Abreviaturas [5].

Abreviaturas	Definição
AP	<i>Access-Point</i>
BS	<i>Base Station</i>
CRLB	<i>Cramér-Rao Lower Bounds</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
EE	<i>Energy Efficiency</i>
EM	<i>Electromagnetic</i>
HWI	<i>Hardware Imparement</i>
IDR	<i>Information Decoding Receiver</i>
IRS	<i>Intellegent Reflecting Surfaces</i>
LIS	<i>Large Intellegent Surfaces</i>
LoS	<i>Line-of-Sight</i>
MEMS	<i>Micro-electro-mechanical Systems</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
mMIMO	<i>Massive Multiple Input Multiple Output</i>
mmWave	<i>Millimeter Wave</i>
OLP	<i>Optical Liner Precoder</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RIS	<i>Reflecting Intellegent Surfaces</i>
RSS	<i>Received signal Strength</i>
SINR	<i>Signal to Interference-plus- Noise-Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SSE	<i>Signal Spectral Efficiency</i>
SWIPT	<i>Simultaneous Wireless information and Power Transfer</i>
UE	<i>User Equipment</i>
VLC	<i>Visual Light communication</i>

Lista de Termos

Tabela 2 Termos utilizados no trabalho[5].

Referencia	Termos	Definição
[4], [24], [39]	<i>Large Intelligent Surfaces</i> (LIS)	Considera-se um comprimento de superfície ativa ilimitado ou um número maciço de antenas
[15], [35], [36] [37]	<i>Intelligent Reflecting Surface</i> (IRS)	Realça mais sobre a propriedade refletora da superfície passiva inteligente.
[1], [5]	<i>Reconfigurable Intelligent Surfaces</i> (RIS)	Realça mais a configurabilidade da superfície passiva inteligente para o sinal de incidência

1 INTRODUÇÃO

Enquanto os requisitos 5G são alcançados com base em *Millimeter wave* (mm-Wave) e *massive Multiple-Input and MultipleOutput* (m-MIMO), 6G deve incorporar novos conceitos tais como antenas passivas, nomeadamente *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS). A fim de alcançar ganhos potenciais de cobertura, cancelamento de interferência, sigilo, eficiência espectral. Contudo, há necessidade de estimar as características do canal, e isto é difícil de conseguir com elementos passivos. Recentemente, antenas ativas, tais como *Large Intelligent Systems* (LIS), também referidas como *Ultra Massive MIMO* (UL-MIMO) ou *Extremely Large Antenna Arrays* (ELAA), têm sido implementadas para alcançar tais ganhos desejados, mas a complexidade também aumenta. Os recentes avanços das *Large Intelligent Surfaces* (LIS) permite aos ambientes de rádio inteligentes superar a grande potência na geometria da rede sem fios. Por consequência, os LIS são projetados para ser um dos facilitadores tecnológicos essenciais da Sexta Geração de Comunicações Celulares (6G), bem como das gerações futuras[1]. Por forma a evitar uma propagação incontrollável e estocástica das redes sem fio, o LIS cria um ambiente de rádio controlável e inteligente controlada por um software que impulsiona a capacidade de comunicação [2]. As *Electromagnetic* (EM) meta-superfícies definidas ou reconfiguráveis por software é a tecnologia fundamental por detrás da implementação do LIS, capaz de modular os dados sobre os sinais recebidos, personalizar as alterações das ondas de rádio, e detetar o ambiente [3]. Por outras palavras, as meta-superfícies inteligentes são superfícies programáveis, selecionáveis em frequência, compostas por películas artificiais de meta-materiais finos adequadas para comunicações sem fios de baixa complexidade e eficiência energética [4], [5]. A tecnologia LIS foi inicialmente restrita aos sistemas de comunicação por satélite e radar, e não foi adotada para comunicações terrestres sem fios. A transmissão rádio sem fios convencional baseia-se antes em superfícies refletoras tradicionais, que apenas induzem mudanças de fase fixas, e não se adaptam aos canais de comunicação sem fios terrestres em tempo variável. Afortunadamente, os recentes avanços nos meta-materiais e *Microelectro-Mechanical Systems* (MEMS) levam ao avanço de superfícies refletoras reconfiguráveis. Por exemplo, LIS foi introduzido pela primeira vez utilizando superfícies sintonizáveis para controlar o ambiente de propagação sem fios [6]. Neste sentido, a comunicação assistida por LIS pode ser vista como uma plataforma melhorada de comunicações convencionais das redes wireless. LIS traz mais graus de liberdade através do controlo do canal redes wireless. Assim, a otimização do canal wireless leva a um conjunto

mais descontraído de restrições, produzindo um aumento do desempenho global do sistema. Acrescente-se que as meta-superfícies são imunes ao ruído no rádio recetores e não necessitam de conversores analógicos/digitais, ou amplificadores de potência. As meta-superfícies podem, portanto, manipular e refletir os sinais com amplificação extremamente baixa de ruído. A ativação da tecnologia LIS permitiria também reduções no consumo de energia em comparação com a corrente redes sem fios. Devido à sua relativa alta eficiência energética, a tecnologia LIS é amiga do ambiente, uma vez que reduz a emissão global de carbono [1], [7]. Por uma perspetiva de implementação de espectro, estudos recentes mostram que a transmissão de alta frequência, como a comunicação por mmWave e *terahertz* (THz), podem ser realizadas usando LIS [8]. Atualmente, o sistema LIS contém algumas desvantagens tais como, inadequações para implementações de frequências muito altas, especialmente na gama de 2,4 GHz a 60 GHz [9]. Este atributo atrativo do LIS torna-os adequados para utilização em tecnologias de comunicação e deteção de ponta de 5G e para além dos sistemas, que inclui *Internet of Things* (IoT), comunicações *Device-to-Device* (D2D), comunicações *Machine-to-Machine* (M2M), etc. [10], [11].

As características únicas do LIS referidas acima tornam-nos adequados para uma variedade de aplicações inovadoras em ambientes de rádio inteligentes, tanto em ambientes interiores como ao ar livre [12]. Por exemplo, em [13], os autores introduzem a implementação de um ambiente interior inteligente, utilizando o conceito de paredes inteligentes com poder de aprendizagem por máquinas com algoritmos de controlo para a realização de uma rede wireless interna e cognitiva. Em ambientes interiores, vários objetos, incluindo paredes, mobiliário e janelas, podem influenciar a comunicação e a cobertura de dispositivos sem fios. Como os cenários interiores (por exemplo, hospitais, hotéis, escritórios de segurança) exigem comunicações de alta velocidade ultra-confiáveis, os autores em [11] propõem revestir os objetos interiores com azulejos hiper-superficiais programáveis por software (uma nova classe de meta-superfícies), de modo a melhorar tanto a comunicação como os aspetos de cobertura dos sistemas sem fios interiores. O LIS tem de facto muitas outras aplicações prospetivas, incluindo localização interior [14], monitorização da saúde utilizando t-shirts inteligentes [10], imagiologia, ótica quântica, e fins militares [11].

Graças ao avanço convergente no desenvolvimento de superfícies inteligentes, o funcionamento de ambientes de rádio inteligentes com capacidades inteligentes e reconfiguráveis é mais viável do que nunca. Tais capacidades emergentes permitem de facto aos operadores de rede moldar a propagação das ondas de rádio com funcionalidades personalizadas. Por exemplo, a incorporação de meta-superfícies no exterior e no interior dos

objetos permitem a detecção do sinal de chegada e direcionam a resposta de volta ao sistema controlador de rede [12]. Com base nos dados detetados, as meta-superfícies podem depois configurar e manipular a onda de sinal de entrada através diferentes funções de controlo do comportamento EM, por exemplo, reflexão de ondas, refração, polarização, ou absorção total. Além disso, funções de reflexão e refração podem oferecer serviços adicionais, também conhecidos como direção de ondas, que podem sobrepor-se à lei convencional de Snell [11]. Através da extensão da noção de *softwarization* de rede, um ambiente de rádio inteligente pode facilitar comandos programáticos que podem ser configurados remotamente e otimizados elasticamente. Para além de gerar novos sinais que consomem uma extensão adicional de potência, os LIS conseguem satisfazer os desafiantes requisitos de futuras redes sem fios [9]. É digno de nota que os LIS são meios complementares para apoiar outras tecnologias emergentes, incluindo comunicação de retrodifusão, comunicação de ondas milimétricas, mMIMO, e rede de densificação. Por exemplo, o LIS embora seja distinto de mMIMO é visto como uma extensão do convencional Sistemas MIMO. Em [15], os autores comparam o mMIMO com implementação de *Intelligent Reflecting Surfaces* (IRS) em termos de capacidades de transferência de informação. Embora o mMIMO aumente a eficiência energética e espectral das ligações de comunicação, não é capaz de sintonizar e controlar o ambiente de propagação sem fios. Além disso, ao contrário do caso do IRS, para o qual a capacidade é linearmente proporcional à potência média de transmissão [15], existe uma relação logarítmica entre a capacidade e a potência média de transmissão no mMIMO. No entanto, numa arquitetura de matriz correspondente, as configurações do mMIMO podem alcançar uma maior relação *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) com um consumo de energia mais reduzido do que nas configurações assistidas por IRS que operam num *Far-Field Region* [16]. Além disso, a implementação do sistema de *IRS-Assisted Non-Orthogonal Multiple Access System* (NOMA) atraiu uma atenção significativa para a otimização do desempenho, conectividade e eficiência espectral da próxima geração de redes de comunicação sem fios multi-utilizadores. Trabalhos recentes em [17]-[18] investigam as potenciais aplicações da integração da tecnologia NOMA com comunicações baseadas em IRS. Além disso, a incorporação da comunicação *Full-Duplex* (FD) em IRS pode explorar novos graus de liberdade, facilitando conceções eficientes em termos de espectro e de baixo custo para sistemas de comunicação sem fios da próxima geração. Além disso, o sistema IRS com FD podem ainda ser utilizados para outras aplicações, por exemplo, interferência cooperativa [19].

1.1 FORMULAÇÃO DE PROBLEMAS

O sistema LIS apresenta uma grande capacidade de satisfazer as necessidades das tecnologias 6G. LIS permite aos sistemas de rádios inteligentes superar o elevado consumo de energia e combater a natureza probabilística de transmissão de ondas eletromagnéticas (EM), proporcionando uma melhor qualidade de serviço [20]. No entanto, surgem algumas dúvidas sobre a sua implementação tais como, como podemos mitigar a perda de sinal com aumento de antenas na superfície? será necessário adotar um sistema de blocos para melhorar mitigação?

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral é verificar o tipo de equalização necessária para utilizar em sistemas LIS em comunicações 6G. O propósito final é verificarmos se podemos diminuir a equalização da transmissão *Single Carrier with Frequency Domain Equalization* (SC-FDE) à medida que aumentamos o número de antenas.

1.2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a equalização necessária para os sistemas LIS;
- Realizar uma investigação sobre as técnicas de transmissão de bloco;
- Realizar inúmeras simulações para avaliação os desempenhos obtidos;
- Avaliar os desempenhos com e sem equalização, associados às técnicas de transmissão de bloco.

1.3 JUSTIFICAÇÃO

Verificar a possibilidade de um novo sistema aqui proposto para suportar comunicações de redes sem fios para tecnologias 6G. Com o desenvolvimento das redes sem fios e autonomia das máquinas é necessário um melhor e mais seguro método de transmissão e receção de sinais [21]-[22]. O rápido desenvolvimento do mundo com novas aplicações inovadoras, tais como realidade virtual, projeções holográficas de alta-fidelidade, robótica e sistemas autónomos, Internet das coisas industrial, sistema de transporte inteligente e interfaces cérebro-computador, deverão ser suportados por comunicações 6G e seguintes [23]. Estas aplicações implicam elevados requisitos de *Quality of Service* (QoS) tais como requisitos extremamente elevados de taxas de dados, fiabilidade ultra-alta, e latência ultra-baixa, que não podem ser prontamente

suportados pelos sistemas existentes [24]. LIS demonstra ser o candidato mais apropriado para lidar com comunicações sem fios 6G.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LIS

Este paragrafo foca no princípio básico de funcionamento do LIS de uma perspectiva de camada física. O sistema LIS consiste numa matriz bidimensional composta de numerosos elementos EM baixo custo, quase passivos, refletores excetos para poucos elementos ativos ligados aos controladores do LIS [25]-[27]. No entanto, alguns estudos mostram o potencial dos desenhos LIS baseados em elementos ativos [28]-[30]. De facto, as últimas redes híbridas sem fios assistidas por LIS, compostas por elementos ativos e passivos, são projetadas como promissoras para alcançar um desenvolvimento de desempenho sustentado e rentável [31]. No nosso documento, concentrámo-nos no princípio de funcionamento dos elementos passivos, também conhecidos como meta materiais. Tais metas materiais consistem em díodos varactor ou outros MEMS que podem ajustar inteligentemente os seus deslocamentos de fase induzidos para atingir os objetivos de comunicação desejados [32]. Consistem em meta-átomos repetidos sobre um substrato com um comportamento EM específico. O comportamento da meta material EM depende da estrutura das meta-átomos. Assim, alguns padrões de meta-átomo absorvem a totalidade das ondas EM que chegam, enquanto outros modelos podem refletir inteiramente as ondas EM que chegam.

As metas-superfícies são dinâmicas, consistindo de elementos sintonizáveis que podem mudar o seu estado e comportamento EM através da aplicação de um *bias* externo. Estes elementos sintonizáveis incluem interruptores CMOS ou interruptores MEMS. Nas meta-superfícies, os elementos de comutação controlam os meta-atómicos que atuam como antenas de entrada e saída. Além disso, os elementos de comando também ligam os meta-atomos em topologias personalizadas. Por outras palavras, quando as ondas EM de entrada entram a partir de uma antena de entrada, elas são encaminhadas com base no estado do interruptor, e saem através a antena de saída, ajudando o LIS a conseguir uma reflexão [11]. Existem várias tecnologias de comutação para controlar a Reflexão EM a partir da superfície inteligente, incluindo *positiveintrinsic-negative (PIN) diodes*, *varactor-tuned resonators*, cristal líquido, e tecnologias MEMS. Uma forma de controlar o efeito de reflexão numa meta-superfície é colocando o PIN diodos como elementos de comutação. Uma polarização externa alterna o PIN diodos ligados e desligados, gerando dois estados diferentes para as superfícies inteligentes, como mostrado na Fig.1. Quando o díodo PIN é desligado, a energia que entra penetra na

superfície sendo absorvido na sua maioria. No entanto, quando o díodo PIN está ligado, a maioria da energia que entra é refletida [1].

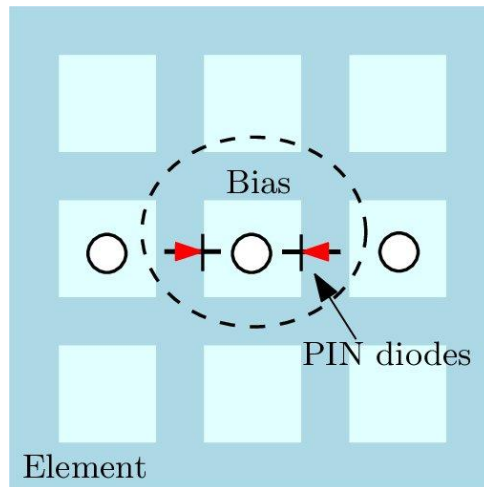


Fig. 1 Controle da reflexão EM utilizando díodos PIN [1].

Adicionalmente, os *varactor-tuned resonators* são também utilizados para controlar a propagação do sinal, como ilustrado na figura 2. Quando a tensão de polarização é aplicada ao *varactor*, é possível alcançar um deslocamento de fase. Os cristais líquidos podem afinar ainda mais a mudança de fase do sinal refletido [33]. Diferenciando do *Direct Current* (DC) as tensões nas manchas de líquidas células unitárias carregadas com cristais, a constante dielétrica eficaz de qualquer unidade individual pode ser assim ajustada. Como resultado, as fases do deslocamento do sinal recebido podem ser controladas em vários locais da superfície. As metasuperfícies dinâmicas criam um azulejo que consiste como um portal, para o qual o controlador de rede adquire uma relação de escravo/mestre. O controlador a rede registra o seu estado de funcionamento e recebe instruções para alterar o estado atual dos elementos de comutação através da porta de entrada [11].

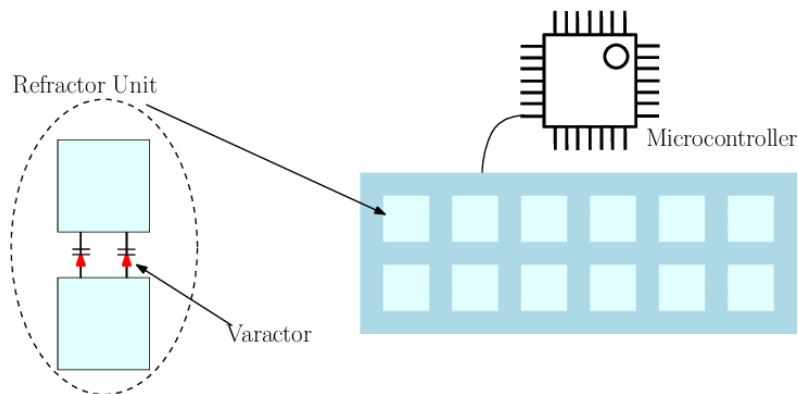


Fig. 2 Controlo da reflexão EM utilizando ressonadores sintonizados com varactor[5].

Para compreender melhor este princípio de funcionamento, demonstramos a seguir um exemplo básico de uma propagação sem fios controlada por meio da indução de uma superfície inteligente. O exemplo considera o modelo convencional de dois canais de raios para um ambiente de espaço livre e uma superfície refletora implantada no plano do solo [1]. A propagação de ondas de rádio é descrita como raios utilizando um modelo de ótica de raios que assume que o tamanho geométrico do plano terrestre é consideravelmente maior do que o comprimento de onda da onda de rádio e que os reflexos do plano terrestre são especulares [34]. Além disso, o modelo propõe que as ondas de rádio viajem em linhas retas em caso de meios homogêneos, ou seja, a energia é transportada ao longo de certas curvas. Mais precisamente, o modelo adere ao modelo de *Principle of Fermat* que afirma que o raio percorre o caminho entre dois pontos com tempo mínimo de viagem. O sinal recebido é composto pelo raio da *Line of Sight* (LoS) e pelo reflexo raio do chão, como ilustrado na figura 3.

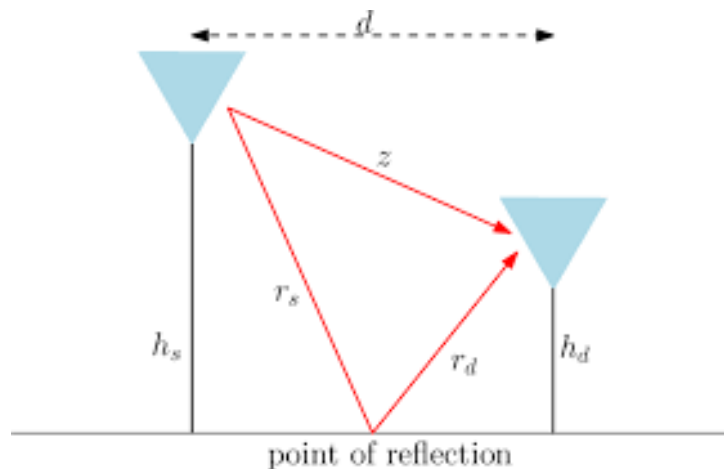


Fig. 3 Modelo convencional de propagação de dois raios [2].

De acordo com *Snell's law of reflection*, o ponto de reflexão é onde se encontra a linha vertical imaginária. O ângulo entre o raio incidente e linha vertical é igual ao ângulo entre o raio refletido e a linha imaginária. Com base neste modelo, poderá potência recebida no destino é representado como

$$P_d = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{z} + \frac{R \times e^{-j\Delta\phi}}{r_s + r_d} \right|^2 \quad (1)$$

Onde P_s é a potência da origem, λ é o comprimento de onda, z é a distancia entre a fonte e a antena de destino, r_s é a distância entre a antena inicial e o ponto de reflexão sobre o LIS, r_d é a distância entre o ponto de reflexão e a antena destinada, R é o coeficiente de reflexão do solo e $\Delta\phi = \frac{2\pi(r_s+r_d-z)}{\lambda}$ representa a diferença de fase entre os dois caminhos. Se partirmos do princípio de que não há reflexão sobre o terreno, e a distância entre a origem e o destino é grande, se $d \gg r_s+r_d$, então $d \approx z \approx r_s+r_d$ e portanto (1) pode ser simplificado como

$$P_d = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2).$$

Ambas as fórmulas (1) e (2) demonstram que a reflexão incontrollável da superfície do solo degrada a potência recebida do sinal. Considerar um sistema LIS com N meta-superfícies reconfiguráveis colocadas no solo, e funcionando como uma superfície refletora para apoiar a comunicação entre a fonte e o destino, como ilustrado na figura 4.

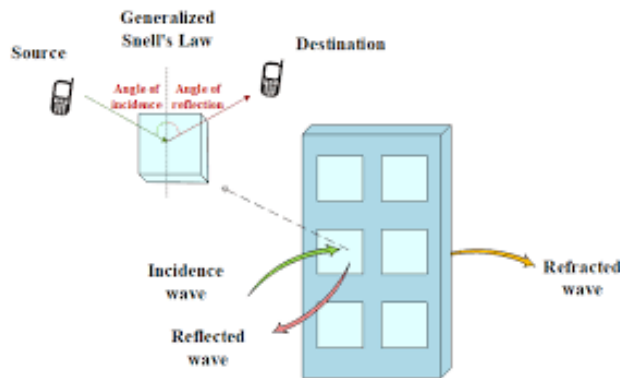


Fig. 4 O princípio de funcionamento do LIS como um reflector[5].

Conforme a lei generalizada de Snell, cada meta-superfície pode sintonizar independentemente o ângulo de reflexão e a fase dos raios refletidos. Ao contrário de uma superfície passiva típica, os ângulos de incidência e de reflexão não são necessariamente os

mesmos. Assim, a potência recebida no destino em relação ao i -th reconfigurável meta-superfície pode ser representada como

$$P_d = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| \frac{1}{z} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i \times e^{-j\Delta\phi_i}}{r_{s,i} + r_{d,i}} \right|^2 \quad (3).$$

Para evitar a flutuação da potência recebida no destino, os coeficientes de reflexão das meta-superfícies reconfigurável são otimizados com base em vários pressupostos, tais como a ausência de perdas de reflexão e a fase perfeita do LIS. Por conseguinte, cada R_i é otimizado para alinhar a fase do sinal recebido com o caminho LoS. Depois, as potências recebidas no destino podem simplesmente ser escritas da seguinte forma:

$$P_d \approx (N + 1)^2 P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (4).$$

Em suma, a potência recebida no destino é diretamente proporcional ao quadrado do número de independentemente fases controladas do LIS N e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o destino. Demonstrando o potencial do LIS nas redes sem fios onde se obtém um ganho de poder em função do número de refletir meta-superfícies [1]. Para melhor realizar todo o potencial dos sistemas LIS, o próximo foco é sobre formas de otimizar o desempenho do LIS através do levantamento da maior otimização relevante estruturas. O artigo aborda ainda o desempenho análise dos sistemas LIS, e ilustra várias questões em aberto no contexto das redes sem fios assistidas por LIS.

2.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS LIS

Prevê-se que a tecnologia LIS forneça uma comunicação de rede sem fios fiáveis quando é estabelecida uma ligação LoS, como se discute nas secções anteriores. O significado desta tecnologia torna vital o estudo da análise do desempenho dos sistemas baseados no LIS. Para tal, esta secção analisa o desempenho dos sistemas LIS a partir de diferentes aspetos, tais como a análise assintótica da taxa de dados das ligações ascendentes e descendentes, a probabilidade de falha de energia, e a eficiência espectral. Devido às suas dimensões relativamente grandes, é difícil obter soluções de forma precisa para descrever matematicamente os sistemas LIS. Portanto, este paragrafo abrange métodos de estimar e aproximar o desempenho dos sistemas LIS.

2.2.1 ANÁLISE DA CAPACIDADE DOS SISTEMAS LIS

Devido às capacidades do LIS em potencializar redes de comunicação 6G robustas e de alta velocidade, é evidentemente essencial estudar a capacidade dos sistemas, incluindo o efeito de degradação do hardware, a taxa de transmissão *uplink/downlink*, e o impacto das mudanças de fase.

2.2.1.1 CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE DADOS

Os autores em [4] estudam a capacidade normalizada de volume unitário alcançado, onde um sistema LIS de tamanho infinito tem uma potência de transmissão fixa por unidade de volume P_u . Como o comprimento de onda λ vai a zero, a capacidade normalizada por unidade-volume \check{C} aproxima-se de $\frac{P_u}{2N_0}$, onde, N_0 é a *Power Spectral Density* (PSD) de AWGN e $P_u = \frac{P}{\lambda}$ onde P se refere à potência de transmissão do terminal. Em [4], o sinal recebido é otimizado e passa por um processo de filtragem. Quanto à análise do *Degree of Freedom* (DoF) espacial do sistema LIS é também estudado em [4] para ser recolhido, ou seja, o número de dimensões de sinal independente ρ [35], alinham com a capacidade de *Shannon*. O DoF espacial é medido em função do \check{C} para a inclinação elevada do SNR, dado como

$$\rho = \lim_{\frac{P_u}{2N_0} \rightarrow \infty} \frac{\check{C}}{\log\left(\frac{P_u}{2N_0}\right)} . \quad (5)$$

Para uma implementação unidimensional de *User-Equipment* (UE), a capacidade normalizada é dada por

$$\check{C} = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{C}{\Delta_x} \right), \quad (6)$$

onde C, K, e Δ_x é a capacidade, número de UEs, e o espaçamento entre as UEs vizinhas na x-dimensão. Similar a capacidade normalizada para a implantação bidimensional da UE é dada por $\Delta_s = \Delta_x \Delta_y$ é o espaçamento entre as UEs vizinhas. Δ_x e Δ_y representam o espaçamento entre as UEs vizinhas nas dimensões x e y. Resolvendo as fórmulas (5) e (6), obtém-se $\Delta_x = \frac{\Delta}{2}$ e $\Delta_y = \frac{\Delta}{\pi}$, o que significa que para LIS de dimensão infinita de uma única dimensão, \hat{C} é maximizado quando UEs devem ser multiplexadas por metro, enquanto que a multiplexação $\frac{2}{\lambda}$ UEs espacialmente por m^2 maximiza \hat{C} para implantação bidimensional da UE. Finalmente, [4] utiliza a teoria da amostragem para mostrar que uma malha hexagonal é uma malha de amostragem ideal, que minimiza a área de superfície do LIS quando cada antena implantada

pode ganhar apenas uma única dimensão espacial. Além disso, o aumento de K não afeta a capacidade do sistema, provando que é um sistema robusto com bons potenciais de dados supressão de interferências de transmissão.

2.2.1.2 ANÁLISE DE DEFICIÊNCIAS DE HARDWARE

Considera-se que os sistemas LIS têm um desempenho superior ao dos sistemas convencionais de comunicação; por conseguinte, é digno de nota considerar a análise dos sistemas LIS na presença de *Hardware Impairments* (HWI). Quase todos os sistemas de comunicação encontram HWI, e os sistemas LIS não são exceções. Por outras palavras, os sistemas LIS têm grandes áreas de superfície que teriam impacto no Degradação HWI sobre o sistema. O trabalho em [36] estuda a degradação da capacidade de um sistema LIS na presença de HWI, ao servir uma UE. O HWI é modelado como um Processo gaussiano, e a sua variação depende de r e da distância da potência do sinal recebido do centro do LIS, sendo modelado como

$$f(r) = \alpha r^{2\beta}, \quad (7)$$

onde α e β são duas constantes positivas, e onde $\alpha = 0$ representa o caso de nenhum HWI. A capacidade de um sistema LIS normalmente aumenta com uma grande área de superfície; contudo, um sistema LIS com HWI tem o desempenho oposto. Ou seja, o aumento da área de superfície degrada severamente a capacidade do sistema, como demonstrado nos resultados numéricos de [37]. Para superar o impacto significativo do HWI no sistema LIS, [38] propõe a divisão da superfície do sistema LIS em K unidades mais pequenas. Esta ideia ainda não foi discutida na secção VI.

2.2.2 ANÁLISE DA TAXA DE DADOS

Um dos fatores críticos da análise dos sistemas de comunicação é a taxa de dados alcançável. Esta secção apresenta literatura sobre as expressões de taxa de dados derivadas para os sistemas LIS.

2.2.2.1 TAXA DE UPLINK PARA SISTEMAS SINGLE-LIS

O trabalho em [29] estuda não só a taxa de dados *uplink* de sistemas LIS, mas também mostra a superioridade do desempenho dos sistemas LIS sobre os sistemas mMIMO. Acrescente-se ainda que [29] leva em consideração o erro de estimativa do canal e os efeitos de endurecimento do canal. O endurecimento do canal significa que um canal em desvanecimento se comporta como se não fosse um canal em desvanecimento. A aleatoriedade ainda existe, mas

o seu impacto na comunicação é negligenciável [34]. Em termos simples, [29] mostra que a capacidade está correlacionada com a informação mútua no âmbito de análise assintótica sobre o número de antenas e ligadas UEs.

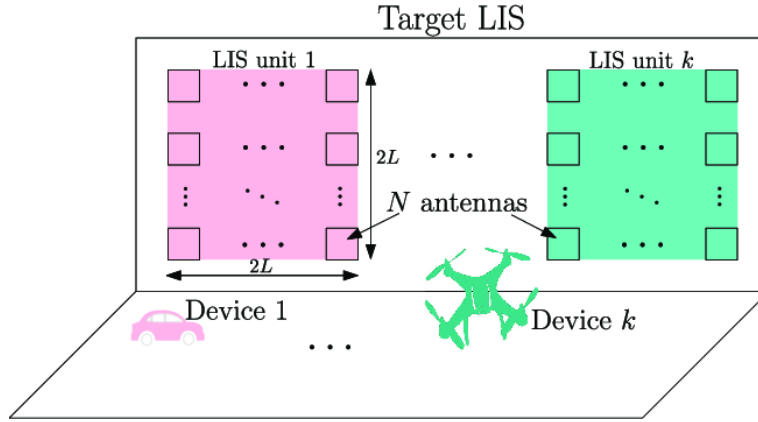


Fig. 5 Sistema único LIS com unidades K que servem inúmeros dispositivos até $K[1]$.

Os autores em [29] consideram um sistema LIS mostrado na figura 5. O sistema consiste de uma única grande superfície dividida em subárea de $2L \times 2L$ designada como unidades, cada uma com N antenas distanciadas por $\Delta L \Delta L$ numa malha retangular. O sistema LIS serve um número de K dispositivos, onde cada unidade serve o seu respetivo dispositivo. Para evitar a degradação do desempenho que pode ocorrer devido à sobreposição entre a unidade LIS e a localização do dispositivo, [29] assume a implantação da gestão de recursos ortogonais entre os dispositivos. Por conseguinte, todos os dispositivos comunicam a uma unidade não sobreposta. Utilizando o sistema em epígrafe, [29] analisa o desempenho assintótico da taxa de dados de ligação ascendente para um aumento sem limites do N e K , onde [29] se aproxima do desempenho do sistema, definindo primeiro a taxa de dados de uplink para uma unidade, ou seja, unidade k como

$$R_k = \log(1 + \gamma_k), \quad (8)$$

onde γ_k é o SINR recebido da unidade k , e é dado por

$$\gamma_k = \frac{\rho_k S_k (1 - \tau_k^2)}{I_k} \quad (9)$$

Formula (9), ρ_k é a ligação ascendente de transmissão SNR do dispositivo k e $\tau_k \in [0, 1]$ representa a imperfeição da estimativa de erro do canal. Neste caso, S_k denota a potência de sinal desejada, onde $S_k = |h_{kk}|^4$, h_{kk} é o canal entre o dispositivo k e a unidade k do LIS, e I_k é o termo interferência-mais-ruído para a unidade k . Os autores em [29] abordam o desempenho assintótico analisando primeiro os momentos da variável aleatória I_k , obtendo depois o seu

momento assimp t tico, e finalmente derivando o momento assimp t tico de R_k de I_k . O estudo [29] mostra que S_k converge para uma constante que depende da altura do dispositivo k e do comprimento da unidade LIS quando N se aproxima do infinito. A média e a variância de R_k podem ser derivadas aproximadamente com base na m dia e variância de γ_k , denotadas por μ_{γ_k} e $\sigma_{\gamma_k}^2$. Portanto, utilizando a expansão de Taylor, a média $\bar{\mu}_{R_k}$ e a variância $\bar{\sigma}_{R_k}^2$ de R_k pode ser definida exclusivamente pela variável aleatória I_k . A média assimp tica e a variância de I_k dependem da localiza o dos dispositivos e da matriz de correla o de interferências de *Non-Line-of-Sight (NLoS)*:

$$\bar{\mu}_{R_k} = \log \left(1 + \bar{\mu}_{\gamma_k} \right) - \frac{\bar{\sigma}_{\gamma_k}^2}{2(\bar{\mu}_{\gamma_k} + 1)^2}, \quad (10)$$

e

$$\bar{\sigma}_{R_k}^2 = \frac{-\bar{\sigma}_{\gamma_k}^4}{4(\bar{\mu}_{\gamma_k} + 1)^4} + \frac{\bar{\sigma}_{\gamma_k}^2}{(1 + \bar{\mu}_{\gamma_k})^2}, \quad (11)$$

respetivamente, $\bar{\mu}_{\gamma_k}$ e $\bar{\sigma}_{\gamma_k}^2$ são a média assimp tica e a variância de γ_k . Assim, a avalia o do desempenho do sistema LIS pode ser obtida sem a necessidade de executar simula es extensas. Nos sistemas baseados em grandes antenas, a validade do sistema, a latência, e a programa o da diversidade são controladas pelas flutua es da informa o mútua. Por esta razão, o estudo do efeito de endurecimento do canal   crucial para os sistemas baseados em LIS. Assim, o autor [29] estuda o desempenho da variância da informa o mútua   medida que o N aumenta. Dado o valor assimp tico de γ_k e $N = \left(\frac{2L}{\Delta L}\right)^2$, a média e variância de γ_k pode ser expressa como a média assimp tica $\bar{\mu}_{I_k}/N^2$ e a varia o assimp tica $\bar{\sigma}_{I_k}^2/N^2$

da variável aleatória \bar{I}_k . Usando a lei da escala, [29] mostra que a interferência assimp tica mais o ruído converge para uma constante   \bar{I}_k medida que N aumenta. Por conseguinte, a taxa de dados assimp ticos \bar{R}_k e a sua média e variância convergem para um valor constante, provando que um sistema LIS   de facto influenciado pelo efeito de endurecimento do canal. Com base nisso, o LIS carece de diversidade de programa o com melhor fiabilidade e latência devido   taxa de dados deterministica. Finalmente, o autor [29] compara o desempenho assimp tico do sistema LIS com o mMIMO em valor ergódico e variância da taxa de dados onde o sistema LIS tem uma taxa ergódica mais elevada. Contudo,   medida que N aumenta, a diferença entre os dois começa a diminuir, especialmente   medida que o número de dispositivos K cresce. Embora os dois sistemas tenham um desempenho semelhante para

grandes valores de N , esta solução não é prática para sistemas mMIMO, uma vez que requer uma grande área física, ao contrário os sistemas LIS. Em termos de variação da taxa de dados, um mMIMO sistema mostra um efeito de endurecimento reduzido dos canais quando a variação aumenta com N e depois converge para uma constante. Quanto ao sistema LIS, a variância vai a zero com um aumento de N , ilustrando o efeito de endurecimento do canal e eventualmente mostra superioridade no desempenho dos sistemas LIS em termos de fiabilidade e latência.

2.2.2.2 TAXA DE UPLINK PARA SISTEMAS MULTI-LIS

Ao contrário de trabalhos anteriores que apenas estudam o desempenho de um único sistema LIS, o autor [30] ilustrado na figura 6, derivando um limite superior sobre a eficiência *System Spectral Efficiency* (SSE) e investiga o impacto da contaminação piloto. Com base na derivação do limite superior, [30] tenta otimizar a duração da formação de pilotos e o número de dispositivos servidos por um sistema LIS.

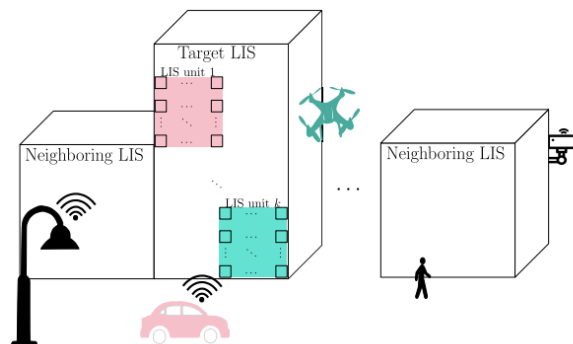


Fig. 6 O modelo de sistema considerado em [30], ilustrando um sistema multi-LIS que partilha a mesma banda de frequência[4].

O significado do estudo de [30] reside no facto de que a aquisição do CSI requer o envio de sinais piloto. No entanto, em sistemas multi-LIS a contaminação do piloto pode ocorrer devido à interferência inter-LIS. O estudo em [30] considera um sistema multi-LIS que consiste do número Z de LIS, cada um com as mesmas características que em [29], onde cada superfície do LIS tem o seu processamento de sinal para receber sinais, estimar CSI e detetar sinal de ligação *uplink* a partir do seu dispositivo correspondente. A modelação do sistema assegura a não sobreposição de uma unidade LIS, ou seja, sem interferência intra-LIS. Tendo um esquema

ortogonal de gestão de recursos de acesso múltiplo para dispositivos com localizações semelhantes. Considerando um sistema LIS com *Matched Filter* (MF), o MF requer um CSI preciso para suprimir a interferência de um sinal. O CSI é recolhido por uma sinalização piloto de um dispositivo para o seu correspondente LIS. A sinalização piloto de um dispositivo ocorre durante o tempo coerente do canal τ dentro da estrutura de ligação ascendente. Na estrutura de ligação ascendente, a sinalização piloto ocorre num período de t , enquanto a transmissão de

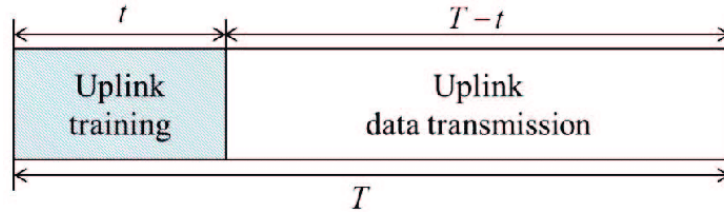


Fig. 7 A estrutura da moldura de ligação uplink mostrando o período de intervalo de uma sinalização piloto e transmissão de dados [4].

dados leva um período de $\tau - t$, como mostrado na figura 7.

Dado o esquema ortogonal de acesso múltiplo implantado, é atribuída uma sequência piloto ortogonal de $t \geq K$ para cada dispositivo para a obtenção do CSI necessário no lado do LIS. No caso de um sistema multi-LIS, os símbolos piloto utilizados por dois LIS adjacentes perdem a sua ortogonalidade, causando a contaminação piloto. Para uma estrutura de ligação ascendente, o SSE instantâneo do z -th LIS é dado por

$$R_z^{SSE} = \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \sum_{k=1}^K R_{zk} = \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \sum_{k=1}^K \log(1 + \gamma_{zk}), \quad (12)$$

onde R_{zk} e γ_{zk} são a taxa de dados e SINR da unidade k . Em seguida, [30] otimiza t , maximizando a SSE assintótica para o N . Como [4] e [29] mostram, o poder do sinal da unidade k de LIS z (para $z \geq 1$) converge para um valor determinístico, com o aumento de N . Após a investigação de [29], [30] mostra que, ao contrário de mMIMO à medida que o N aumenta, um sistema multi-LIS tem uma interferência inter/intra-LIS insignificante através do NLOS. Além disso, o CSI imperfeito de um sistema multi-LIS não afeta o seu SSE. O SSE de um sistema multi-LIS, independentemente do seu CSI, alcança o mesmo desempenho de um único LIS com CSI perfeito. Além disso, [30] mostra que a contaminação piloto limita o desempenho de um SSE multi-LIS devido à inter/intra-interferência causada pelos caminhos de LoS. Por outro lado, os autores em [38] analisam o desempenho do LIS usando *Orthogonal Multiple Access* (OMA) e *Non-Orthogonal Multiple* (NOMA). Ao contrário dos sistemas mMIMO em que t é um fator que afeta o recebido SINR, o autor do estudo [30] mostra que ao otimizar t para LIS não aumenta o SINR. Por conseguinte, o ótimo t^* que maximiza o SINR é

o mínimo $t = K$. Finalmente, [30] assintoticamente deriva o número ótimo de dispositivos que maximiza o SSE. Do mesmo modo, [30] verifica as derivações analíticas com extensas simulações, onde o estudo mostra que o efeito de endurecimento do canal de multi-LIS está mais próximo do de um sistema Single-LIS, para um alto valor de K . A taxa de ligação ascendente do sistema Single e multi-LIS é mostrada, onde o sistema Single-LIS tem o desempenho superior, e o intervalo entre os dois segue a derivação analítica que é resultado da contaminação piloto gerada e da interferência inter-LIS. Para a SSE, o aumento da interferência inter-LIS faz com que o K aumente, explicando o aumento o intervalo entre as duas atuações

2.2.2.3 IMPACTO DA TAXA NO PHASE SHIFTS

Como foi afirmado iterativamente ao longo deste trabalho, controlando as mudanças de fase nos sistemas LIS é um fator crucial para o ajuste fino a qualidade de comunicação de serviço. De acordo com [39], a implementação prática do LIS assenta nas limitações das mudanças de fase, degradando o desempenho global do sistema. Por conseguinte, [39] estuda o desempenho do sistema de comunicação assistido por *uplink* e fornece uma expressão para a taxa de dados atingível. Do mesmo modo, [39] deriva o número ótimo de turnos de fase necessários para um determinado limiar da taxa de dados. Num modelo de comunicação assistida pelo LIS que consiste numa matriz plana de N elementos controlados eletricamente, o número de padrões de mudança de fase que podem ser gerados pelo modelo LIS é $2u$, onde u é o número de bits de codificação. Os turnos de fase têm um intervalo uniforme expresso por $\Delta\theta = \frac{2\pi}{2^u}$. Aonde é possível obter o valor do deslocamento de fase multiplicando o intervalo de deslocamento de fase por um inteiro $s_{i,j}$ que satisfaz $0 \leq s_{i,j} \leq 2^u - 1$. O valor do deslocamento de fase é $s_{i,j}\Delta\theta$, onde os subscritos i, j se referem ao elemento na i -th linha e j -th coluna. O número de turnos de fase é limitado na prática, é importante estudar o efeito das limitações dos turnos de fase sobre a fiabilidade do sistema. O erro do turno de fase pode ser expresso em função do turno de fase ideal $\theta_{i,j}^*$ e do turno de fase mais próximo $\bar{\theta}_{i,j}$, expresso como

$$\delta_{i,j} = \theta_{i,j}^* - \bar{\theta}_{i,j}, \quad (13)$$

Onde

$$-\frac{2\pi}{2^{u+1}} \leq \delta_{i,j} \leq \frac{2\pi}{2^{u+1}}. \quad (14)$$

Para avaliarmos a degradação da taxa de dados devemos defini-la como a razão do erro causado pela fase limitada de deslocamentos para deslocamentos de fase contínuos. Por esse facto, para o sistema desempenhado ultrapassar um determinado limite, precisa ter um valor maior que 0,

$$\epsilon = \frac{\log_2(1+\mathbb{E}[\bar{\gamma}])}{\log_2(1+\mathbb{E}[\gamma])} \geq \epsilon_0, \quad (15)$$

onde $0 < 1$, $\hat{\gamma}$ é a expectativa do SNR, e γ é o SNR recebido. A expressão da taxa de dados atingível é estudada em [39], onde a expressão final é delimitada por ambos os lados. O limite superior é encontrado quando o fator *Rician* $\kappa \rightarrow \infty$, enquanto o limite inferior é calculado quando $\kappa \rightarrow 0$. Os resultados em [39] mostram que a taxa de dados aumenta com o aumento do LIS tamanho. Quando o tamanho do LIS é suficientemente grande, o SNR torna-se proporcional ao quadrado do número de elementos do LIS. Mais importante, [39] descobre que o número requerido de bits para gerar vários turnos de fase depende do tamanho do LIS nas condições do canal *Rician*. Os resultados numerados indicam ser necessários três bits para LIS de pequeno tamanho, dois bits para tamanho moderado, e um bit para LIS de tamanho infinito, o que implica que dois turnos de fase em média são suficientes para implantando um LIS extremamente grande.

2.3 ANÁLISE DA FIABILIDADE DE LIS

Embora os estudos acima referidos se concentrem na análise assintótica dos sistemas LIS, é igualmente importante refletir sobre a fiabilidade do sistema LIS a partir de uma perspectiva de análise de erros. Esta secção, apresenta alguns dos trabalhos que estudam o desempenho dos sistemas LIS em termos de erros.

2.3.1 DISTRIBUIÇÃO DA TAXA E PROBABILIDADE DE FALHA DE ENERGIA

Uma vez que a cobertura e os níveis de interferência das redes internas dependem da localização e propriedades dos objetos e obstáculos, as superfícies inteligentes são suficientemente competentes para regular o ambiente de propagação inteligente. A seguir, o LIS providencia uma melhor qualidade de cobertura, nível de serviço, e melhoria no desempenho do sistema. A melhoria da cobertura pode ser com base na utilização de superfícies seletivas de frequência, e aplicação algoritmos bem escolhidos de controlo de aprendizagem por máquina [40]. Em [31], os autores tentam caracterizar a cobertura em termos de probabilidade de interrupção, sendo uma medida de desempenho significativa para estimar a fiabilidade dos sistemas LIS. Em [32], a análise assintótica da taxa de soma é utilizada para obter a expressão analítica da probabilidade de falha de energia. O estudo em [41] afirma que

a aproximação fornece uma estimativa precisa da probabilidade de interrupção e reduz a necessidade de simulações extensivas e de tempo computacional externo. Por outro lado, os resultados da simulação provam que apesar da SNR flutuante, a probabilidade de corte de energia não é afetada quando o número de antenas e dispositivos é significativamente grande. Usando o mesmo modelo de sistema que em [29] e [30], os autores em [43] formular a taxa de soma como se segue:

$$R = \sum_{k=1}^K R_k. \quad (16)$$

Adicionalmente, [43] argumenta que porque as taxas individuais $R_1, R_2 \dots R_K$ não são idênticos na distribuição, a distribuição da taxa de soma não pode ser definida. A derivação da probabilidade de interrupção é não trivial. Em vez de se analisar a taxa individual, cada taxa pode ser escrita em função de uma variável aleatória I_k , ou seja

$$R_k = a_k + b_k I_k, \quad (17)$$

onde a_k e b_k são valores determinísticos que dependem do comprimento das unidades LIS. A distribuição de R pode ser encontrada utilizando o teorema do limite central, de tal forma que para grandes valores de N e K , a distribuição assintótica de R pode ser estimada em seguir uma distribuição gaussiana com média e variância como:

$$\bar{\mu}_R = \sum_k \log \left(1 + \frac{\rho_k \bar{p}_k (1 - \tau_k^2)}{\bar{\mu}_{I_k}} \right) \quad (18)$$

e

$$\bar{\sigma}_R = \sum_k \frac{\bar{\sigma}_{I_k}^2 \rho_k^2 \bar{p}_k^2 (1 - \tau_k^2)^2}{\bar{\mu}_{I_k}^2 \left(\bar{\mu}_{I_k} + \rho_k \bar{p}_k (1 - \tau_k^2) \right)^2} \quad (19)$$

Em (18) e (19), p_k depende do dispositivo localização e ρ_k denota a SNR de transmissão. Finalmente, a expressão de forma fechada da probabilidade de interrupção é dada um

$$P_0 = P r[R < R_D] = 1 - Q \left(\frac{R_D - \bar{\mu}_R}{\bar{\sigma}_R} \right), \quad (20)$$

onde R_D é o limite da taxa de soma, e $Q=(\cdot)$ representa o Q-função.

2.3.2 PROBABILIDADE DE ERRO PARA INTELIGÊNCIA E TRANSMISSÃO CEGA

Em [44], o autor fornece um quadro matemático que estuda a relação entre os elementos refletores, fases cegas, e erros de modulação nos sistemas LIS. O trabalho [44] pressupõe ter um sistema LIS com N elementos refletores reconfiguráveis e estuda o desempenho do erro para dois cenários. O primeiro cenário considera uma transmissão inteligente no LIS onde as

fases do canal são conhecidas, e o segundo cenário considera uma transmissão cega. Ao derivar primeiro o SNR, pode-se obter o *Symbol-Error-Rate* (SER) para comunicação M-ary utilizando a *Phase-Shift-Keying* (PSK). O autor em [45] primeiro compara o PSK binário com um sinal AWGN puro e estuda o efeito do aumento do N. Usando avaliação numérica, [45] mostra que um sinal baseado no LIS, que ajusta inteligentemente as fases do refletor (cenário I), tem baixa probabilidade de erro, mesmo com baixos valores de SNR. Além disso, mostra que a duplicação do N melhora o desempenho do erro com um ganho de 6 dB. Para o segundo cenário (cenário-II), onde as fases do canal não são conhecidas para o LIS, [45] mostra que um ganho de $N \times$ SNR pode ser obtido utilizando o sistema LIS em vez de uma transmissão ponto-a-ponto. Finalmente, [45] sugere a utilização do LIS como um AP e compara o desempenho do sistema. Adicionalmente, mostra que o sistema LIS-AP pode proporcionar uma comunicação ultrafiável com uma melhoria de 1 dB no caso de transmissão inteligente. No entanto, a transmissão cega nos sistemas LIS-AP, produz o mesmo desempenho dos sistemas LIS convencionais.

2.3.3 EFEITO DO ERRO DE MUDANÇA DE FASE NA TRANSMISSÃO

Ajustar as fases de reflexão, de modo que os sinais no destino combinam de forma coerente, melhorando o desempenho da comunicação. O cálculo de deslocamentos de fase precisos não é viável na prática. Por conseguinte, autor [46] estuda o desempenho do LIS em termos de transmissão de sinal com erro de fase tendo uma distribuição genérica. Os autores analisam o desempenho do LIS para um número limitado de refletores com dois tipos de erros, estimativas de fase erro e erro de quantificação. O sinal ao lado do recetor é expresso da seguinte forma [46],

$$Y = N\sqrt{\gamma_0}HX + W, \quad (21)$$

onde γ_0 é o SNR médio, X é o símbolo transmitido, N é o número de refletores, e $W \sim \text{CN}(0, 1)$ é o ruído normalizado do recetor. O ganho do canal H é representado como

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{i_1} H_{i_2} e^{j\Omega_i} \in \mathbb{C}, \quad (22)$$

onde H_{i_1} e H_{i_2} são os coeficientes complexos de desvanecimento entre a fonte para refletir e o refletor para o destino. Para maximizar o SNR, a fase prática Φ_i é definida para cancelar a soma das fases H_{i_1} e H_{i_2} que denota as fases globais. Também, em (52), refere-se ao ruído de fase com uma distribuição normal entre $[-\pi, \pi]$. O trabalho em [46] assume ainda que θ_i , $i = 1, \dots, N$ são independentes e distribuídos de forma idêntica, tendo uma função característica comum, rotulada como momentos trigonométricos/circulares. Quando N é grande, H tem uma distribuição normal complexa com simetria não circular. Contudo, examina o desempenho quando N é finito. Quando não há erro de fase, o caso ideal, o coeficiente H é real e $H \sim \mathcal{N}(a^2, (1 - a^4)/N)$, com um como parâmetro de potência. Quando existem erros de

fase, $H \sim \mathcal{CN}\left(0, \frac{1}{N}\right)$, o que indica haver falta de informação sobre as fases H_{i_1} e H_{i_2} . O estudo em [38] mostra que o canal de comunicação via LIS com erro de fase é o mesmo que um canal a ponto-ponto com desvanecimento Nakagami, onde os parâmetros de ambos são influenciados pela incerteza de fase através dos dois primeiros momentos circulares. O SNR médio aumenta com N^2 e a ordem da diversidade aumenta com N . O mais importante, quando o número de refletores é limitado, a análise numérica de a taxa de erro verifica que o desempenho do LIS é vigoroso apesar os erros de fase.

2.3.4 PROBABILIDADE DE REFLEXÃO DOS SISTEMAS LIS

O trabalho em [47] investiga a probabilidade de reflexão de objetos distribuídos aleatoriamente nas redes sem fios assistidas pelo LIS, onde a probabilidade de reflexão é uma função do comprimento do LIS e das localizações do transmissor, do recetor e do objeto visado. Para que um objeto seja um refletor, dois eventos devem realizar-se. Primeiro, o transmissor e o recetor têm de estar num único lado do refletor, deitados sobre uma linha infinita que intersecta a linha infinita do segmento do objeto, que nos referimos como Evento 1. Em segundo lugar, uma linha bissectorial perpendicular que liga o transmissor e o recetor deve intersectar o próprio segmento de objeto, a que nos referimos como Evento 2. Por conseguinte, para que o LIS reflita, a seguinte probabilidade deve ser mantida,

$$\Pr(\text{LIS para reflectir}) = \Pr\{\text{Evento 1} \cap \text{Evento 2}\}.$$

Este estudo indica que a probabilidade de reflexão de objetos revestidos de metástases é independente do seu comprimento devido à sua capacidade de ajustar os ângulos de reflexão, cobrindo mais do que o esperado pela lei de Snell [48]. É evidente que, para diferentes valores de comprimento, a probabilidade de reflexão é quase constante, o que indica que objetos de pequeno tamanho podem atingir uma elevada probabilidade de serem refletores quando são colocados de forma apropriada. Por conseguinte, pode reduzir o custo de fabrico e implantação em superfícies refletoras de grande dimensão. Além disso, a implantação em grande escala do LIS melhora a área de cobertura, reduzindo os pontos cegos para BSs celulares [49]. No entanto, a implementação cuidadosa e a seleção adequada dos turnos de fase são necessárias para obter todo o potencial dos sistemas LIS.

2.3.5 IMPACTO DO TAMANHO NO DESEMPENHO DOS SISTEMAS LIS

Trabalhos teóricos recentes analisam o desempenho de sistemas LIS de diferentes dimensões, comparando-os com os sistemas de relé estações em termos da média de SNR em função do número de elementos e a distância de transmissão de ponta a ponta [50]. Adicionalmente, para que o LIS seja grande e atue como espelhos anómalos, o tamanho geométrico de cada componente do LIS tem de ser 10 vezes maior do que o comprimento de onda de rádio o sinal de impacto. Assim, sempre menos do que este limite, as superfícies inteligentes são consideradas pequenas e atuam como difusoras. O estudo em [50] destaca como a média SNR é dimensionada de forma diferente conforme o tipo de conectividade com qualquer uma das estações de retransmissão, grandes superfícies inteligentes, ou pequenas superfícies inteligentes. Por exemplo, uma estação de retransmissão SNR médio é escalonado por um fator de

$$N \min(d_{SR}^{-2}, d_{RD}^{-2}), \quad (23)$$

um sistema de grandes superfícies inteligentes SNR médio é escalonado por um fator de

$$N^2 (d_{SR}, d_{RD})^{-2}, \quad (24)$$

e um sistema de pequenas superfícies inteligentes SNR médio é escalonado por um fator de

$$N^2 (d_{SR}^2, d_{RD}^2)^{-1}, \quad (25)$$

onde d_{SR} refere à distância entre a fonte e o relay/LIS, d_{RD} refere-se à distância entre o relay/LIS e o destino, e N é o número de elementos da antena na estação de relay ou no LIS. Em [51], os autores mostram que nas estações de retransmissão, o SNR médio de ponta a ponta cresce linearmente com N porque a potência total permanece constante uma vez que a potência é distribuída entre todas as antenas, como em (23). A SNR média, contudo, aumenta quadrilateralmente com N em sistemas de grandes e pequenas superfícies inteligentes, como em (23) e (24). O estudo em [51] afirma que este é especialmente o caso porque cada elemento se comporta como um espelho refletor separado que dimensiona a potência pela transumância antes de a refletir. Além disso, nas estações de retransmissão, as escalas SNR com a menor distância entre os dois caminhos, como em (24). No LIS, as escalas SNR com a distância total de transmissão, como em (25). Em pequenas superfícies inteligentes, contudo, o sinal de cada meta-elemento pode combinar-se, resultando na SNR em escala, como em (25). Assim, é inegável que o LIS supera as estações de retransmissão e as pequenas superfícies inteligentes, uma vez que o SNR, no caso do LIS, tem a lei de escalas mais significativa resultante em ter uma melhor taxa de transmissão. Além disso, para valores específicos de N a 2,6 GHz e 28 GHz como exemplos, o LIS duplica significativamente a taxa de transmissão [51].

2.4 O POTENCIAL DE POSICIONAMENTO E COBERTURA EM SISTEMAS LIS

A próxima geração de redes de comunicação sem fios antecipa a possibilidade de permitir serviços precisos baseados na localização onde as tecnologias mmWaves e THz atingirão um nível centimétrico de precisão [52]. A este propósito, o LIS pode ser implantado tanto para ambientes interiores como exteriores, tornando-o uma das opções para um posicionamento e localização precisos. Por conseguinte, pesquisa e os trabalhos recentes que estudam o potencial de posicionamento utilizando sistemas LIS. *Received signal strength* (RSS) baseasse em métodos de posicionamento. Em geral, requerem valores elevados de RSS e probabilidade de cobertura [53]. Em particular, [54] deriva o *Cramér-Rao Bound* para a localização da UE e posicionamento, enquanto [4] estuda o desempenho do LIS para posicionamento e localização e comparação da precisão de sistemas LIS distribuídos e centralizados. Por outro lado, [14] examina o potencial do posicionamento do sistema mmWave MIMO com e sem a ajuda de um sistema LIS. Finalmente, [55] expande o modelo LIS de superfícies planas para superfícies esféricas e avalia a sua RSS e cobertura.

2.4.1 POSICIONAMENTO EM LIS CENTRALIZADO E DISTRIBUÍDO SISTEMAS

Em [4] e [56], os autores derivam o *Cramér-Rao Lower Bounds* (CRLB) para a navegação UE utilizando o sinal de ligação ascendente do sistema LIS. Notavelmente, a análise de [4] utiliza o sistema LIS para fornecer solidez, subdividindo uma determinada área de superfície em unidades mais pequenas de superfícies inteligentes, ou seja, sistema LIS distribuído. Contudo, o sistema LIS distribuído pode aumentar a complexidade e as despesas gerais de feedback. O CRLB para uma UE posicionada na linha perpendicular bisetada do LIS diminui linearmente em função da área de superfície. Quando uma UE não está posicionada como tal, não existe uma solução de forma fechada para o CRLB. No entanto, aproxima-se analiticamente e mostra que o CRLB decresce de forma quadrática [4]. Em [57], uma comparação entre os centralizados figura 8 e distribuída figura 9 a implantação do LIS, em termos de probabilidade de cobertura, também é fornecida. O sistema LIS centralizado refere-se a ter cada superfície no sistema como uma unidade completa, enquanto o sistema LIS distribuído refere-se a ter cada superfície dividida em várias unidades menores, independentes e inteligentes. O estudo mostra ainda que a implementação distribuída tem CRLB inferior para as dimensões x e y do que a implementação centralizada para a mesma área de superfície total. A probabilidade de cobertura para um sistema LIS distribuído é também significativamente

melhor do que a centralizada, o que acaba por melhorar o desempenho de posicionamento. A implementação distribuída facilita uma implantação flexível, mas requer hardware especializado para calibração de fase e cooperação entre as subunidades do LIS [57]. Além disso, a implementação distribuída permite que as unidades sejam substituídas quando necessário sem afetar o conjunto sistema. No entanto, as deficiências de hardware são minimizadas em LIS distribuído [42].

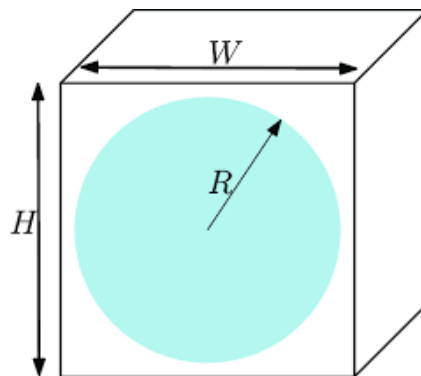


Fig. 8 Implementação do sistema LIS de forma centralizada[4].

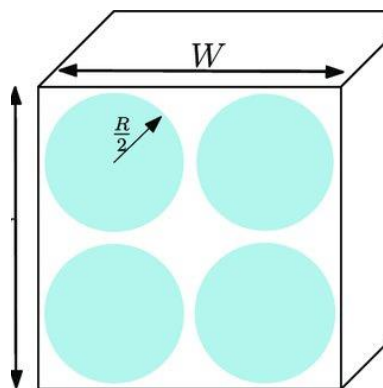


Fig. 9 Implementação distribuída do sistema LIS reduzido a metade[4].

2.4.2 POSICIONAMENTO DE SISTEMAS DE ONDAS mmWAVE

A qualidade dos valores RSS é um fator crítico na determinação da posição das UEs. O aproveitamento da fase e do número de elementos do sistema LIS para ajudar os sistemas mmWave a obter uma elevada precisão de posicionamento. A diferença no desempenho de posicionamento de um sistema mmWave convencional e de um sistema mmWave assistido por LIS [14]. Adicionalmente, controla a fase e amplitude das ondas propagadas usando LIS, onde o objetivo final do estudo é usar o sistema assistido por LIS para minimizar o erro na estimativa

da posição. Um sistema mmWave MIMO apoiado pelo LIS tem um melhor desempenho de posicionamento e um menor erro de orientação ligado, quando aumenta o número de elementos, mesmo para pouco mais de 40 elementos[14].

2.4.3 POSICIONAMENTO USANDO LIS ESFÉRICA

Os autores em [58] expandem o sistema de [4] para um LIS esférico em vez de um LIS plano. A utilização de superfícies esféricas em vez de planas tem muitas vantagens; por exemplo, pode funcionar como uma superfície refletora, bem como uma superfície de afinação. Uma parte do LIS esférico pode funcionar como uma superfície refletora, enquanto a outra parte pode atuar como retransmissão dos sinais às UEs. O último é particularmente útil quando uma UE é impedida de servir BS. Ao contrário do LIS planar tradicional, um utilizador rotativo sobre um LIS esférico não imporá alterações nas propriedades teóricas da informação, o que produz um ganho RSS para uma UE móvel. Assim, [58] deriva o CRLB para sistemas LIS esféricos baseados em RSS em termos da distância normalizada dada por $v = r/\cos\theta$, onde r é o raio da esfera e θ é o ângulo de elevação da UE. O estudo compara então o RSS e CRLB de um sistema LIS esférico com um sistema LIS plano da mesma superfície, ou seja, o raio do LIS plano em forma de disco é $r_p = \sqrt{2}r$. O CRLB do esférico LIS é derivado da avaliação da matriz de informação de Fisher e utiliza RSS para calcular o CRLB em termos do raio da esfera. A CRLB do LIS esférico é dada por

$$CRLB_{sph} = 4v^4 (v^2 - 1), \quad (26)$$

enquanto o CRLB do LIS em forma de disco planar é

$$CRLB_{pl} = 4 (v^2 + 1)^3. \quad (27)$$

Pode-se ver pelos (26) e (27) que o CRLB do LIS esférico é menor que o LIS planar, o que o torna mais preciso para o posicionamento das UEs. Os resultados verificam as constatações acima, e mostram que especialmente quando r aumenta, o LIS esférico supera o LIS tradicional em plano [58].

2.5 PROBLEMAS DE INVESTIGAÇÃO

Desde o início da recente era de investigação ativa do LIS, há uma plethora de estudos que se concentraram nos problemas de otimização da formação do feixe conjunto, SNR teórico e derivações SEP, estimativa de canal, e maximização do SINR. Além disso, muitos pesquisadores investigaram a aplicação de ferramentas de aprendizagem de máquinas e a avaliação do potencial LIS para a mmWave/THz, ótica de espaço livre, e aplicações de luz visível [1]. Por exemplo, em [12], os autores exploraram o problema da conceção conjunta ativa

e passiva da formação do feixe que minimiza a potência total de transmissão no BS. Utilizaram técnicas de otimização, tais como relaxamento semi-definido e otimização alternada, para resolver o problema da otimização não convexa. Para derivações SEP, o autor em [47] propôs uma estrutura matemática SEP para sistemas LIS, estudando a capacidade de utilização de um LIS como transmissor AP. Contudo, apesar dos estudos oportunos acima mencionados, existem questões de investigação em aberto que devem ser abordadas para garantir um elevado nível de fiabilidade em redes sem fios inteligentes. A seguir, exploramos alguns dos futuros e promissores desafios de investigação.

2.5.1 QUADROS REALISTAS DE OTIMIZAÇÃO

Os problemas clássicos de otimização precisam de ser tratados e reformulados devido aos desafios fundamentais que a implementação do IRS enfrenta. Tais questões devem-se ao facto de a maioria dos trabalhos atuais se basearem em pressupostos não pragmáticos, por exemplo, estimativa perfeita do canal, ou seja, pressupostos perfeitos de CSI, ignorando perdas internas e radiações de campo distante, formação exata do feixe e da viga, UE de antena única, pré-codificação ótima, etc. Assim, os trabalhos futuros precisam de visitar tais pressupostos e examinar a fiabilidade dos IRS através de abordagens realistas. Embora a maioria dos problemas de otimização estudados em cenários LIS se concentrem na maximização da EE, rendimento e SINR, vários objetivos ainda não foram abordados na literatura. Em primeiro lugar, a literatura carece de LIS quando se trata de comunicação ultraconfiável de baixa latência. Para tal, propomos minimizar o consumo global de energia dos utilizadores do SINR sujeitos a restrições de orçamento de energia e fiabilidade em termos de atrasos probabilísticos na fila de espera. Em particular, a medida de fiabilidade deve ser responsável por eventos em que o comprimento da fila dos utilizadores excede um determinado limite. Por exemplo, após contabilizar eventos desconhecidos CSI e dinâmica de redes, o problema pode ser resolvido utilizando aprendizagem federada por abordagens distribuídas. O aproveitamento de tais abordagens permitiria a múltiplos discentes para definir um conjunto de parâmetros locais a partir da formação existente, dados onde podem partilhar os seus modelos locais em vez de partilharem os dados de formação. Em segundo lugar, é possível analisar o aspeto de *Energy Harvesting* (EH) nos sistemas LIS, onde uma possível fonte de energia pode vir dos omnipresentes transmissores de rádio. EH fornece soluções ecológicas e sustentáveis para a perda de energia. Por conseguinte, o sistema LIS alimentado por EH pode funcionar como um coletor de energia, onde converte o sinal de incidente em energia elétrica [59], [60]. No entanto,

as fontes de RF sofrem de baixos níveis de potência incidente, principalmente em função da frequência da onda transmitida, do ganho da antena e do alcance da comunicação. Por conseguinte, propomos maximizar a potência incidente do recetor sujeita à potência do transmissor e ao intervalo entre o transmissor e o LIS. O ajuste dos ângulos de posição das antenas pode maximizar a potência incidente do sinal recebido, onde os ângulos de posição ótimos podem ser iterativamente calculados utilizando o método de subida por gradiente adaptativo. Finalmente, vários sistemas de comunicação assistidos por IRS funcionam como algoritmos baseados na otimização alternada para lidar com a otimização problema [56]. A aplicação de tal técnica pode comprometer o processo de alcançar uma solução conjunta ótima. Assim, a resolução alternada dos subproblemas é dispendiosa devido ao elevado complexidade computacional. Por conseguinte, o desenvolvimento de algoritmos que podem eliminar a utilização de otimização alternada podem ser um tema de investigação promissor neste sentido. Uma abordagem possível que os futuros estudos devem explorar é a otimização orientada pelos dados. Os sistemas de IRS são complexos para analisar e conceber em comparação com as redes sem fios convencionais. Portanto, para reduzir a complexidade do sistema, técnicas eficazes de otimização orientadas para os dados que dependem de aprendizagem, transferência de aprendizagem, e reforço da aprendizagem deve ser considerado. Em suma, a aprendizagem de máquinas pode revelar-se uma abordagem poderosa para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação baseados no IRS. Outra direção de investigação promissora é a de prever um sistema otimizado que visa a otimização da fração sobreposição entre a ligação ascendente e descendente, ou seja, introduzindo um sistema de comunicação assistido por IRS full-duplex [61]. A incorporação das características de full-duplex do IRS pode ainda otimizar os sistemas de comunicação como atribuição de potência e formação de feixe. Para além das comunicações full-duplex, a integração das cooperativas NOMA e IRS é uma futura direção da investigação, através da contabilidade das restrições e objetivos na conceção de tais sistemas.

2.5.2 SISTEMAS HÍBRIDOS: RF-VLC

Os RIS podem dar poder à implementação prática do sistema 5G (B5G) e para além através do controlo da aleatoriedade do ambiente de propagação. Os RIS oferecem outras vantagens, incluindo a EE e a resposta de banda inteira. No entanto, as redes B5G requerem melhorias significativas na banda larga móvel, permitindo comunicações ultrafiáveis de baixa latência [1]. Para tal, a implantação de sistemas híbridos pode ajudar a fornecer redes de comunicação rápidas, eficientes e fiáveis. Especificamente, a comunicação de luz visível (VLC)

é uma área de investigação proeminente em sistemas de comunicação avançados [62]. A VLC tem o potencial de fornecer largura de banda ultra-alta, robustez às interferências eletromagnéticas, e segurança física inerente. Tanto RIS-RF como VLC podem ser utilizados num ambiente exterior, como mostra a figura 10, onde os espelhos refletirem sinais de luz visível (VL) para um fotodetector nos dispositivos dos utilizadores, enquanto os RIS são utilizados para refletir sinais de RF da BS. A LV fornece esquemas de comunicação seguros e amigos da saúde que podem ser explorados em centros com limitações de saúde, tais como hospitais. Além disso, os RIS podem ser utilizados para complementar a VLC sempre que as condições de LoS falhem, apoiando assim futuras redes sem fios. A implementação deste modelo de sistema híbrido proporcionaria um esquema de comunicação fiável que compensaria a potencial falha de uma das ligações de ligação. Neste momento, a maioria da análise em LIS existe apenas para comunicações RF e mmWave. Assim, a investigação futura pode investigar mais o desempenho das tecnologias híbridas no domínio do LIS.

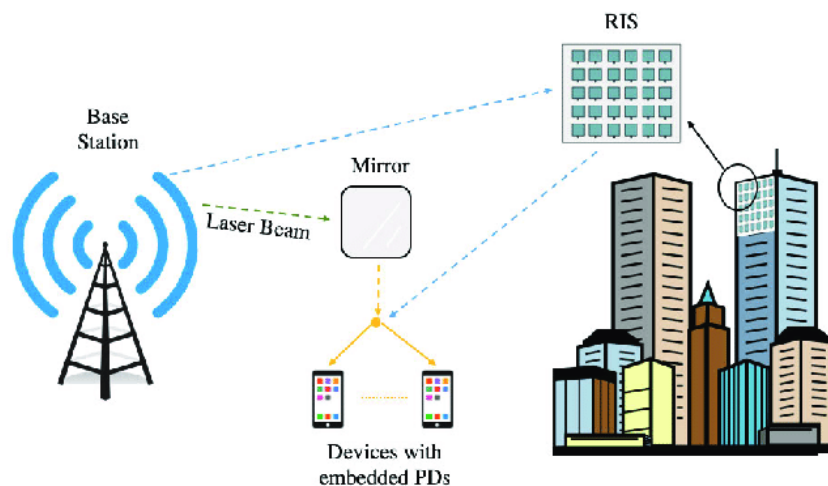


Fig. 10 RF-VLC sistema híbrido para RISs [4].

2.5.3 REVESTIMENTO EM MATERIAIS

Recorde-se do Sec. I que os RIS consistem em materiais EM controláveis, onde as antenas são revestidas com camadas finas reconfiguráveis de materiais EM para controlar a propagação de sinais. Por conseguinte, os materiais sintonizáveis devem ser utilizados para ajustar as mudanças de fase dos sinais, adaptando assim os sinais transmitidos conforme as mudanças no ambiente sem fios [1]. As meta-superfícies são os principais facilitadores de tais tecnologias [62]. Além disso, sugere-se um material de largura de amplamente sintonizáveis para apoiar uma resposta de banda completa, onde teoricamente pode funcionar em qualquer banda de frequência. Para este fim, para melhor realizar os sistemas RIS, a utilização do grafeno

é proposta como uma futura direção de investigação. A banda do grafeno varia de 0 eV a 4,66 eV. Consequentemente, funciona a partir da banda de ondas de rádio até à banda de infravermelhos. As meta-superfícies reconfiguráveis com grafeno podem ainda alcançar a direção do feixe, focalização do feixe e controlo do vórtice das ondas por meio de sintonização local. Por exemplo, o controlo de fase em superfícies de metástases grafenas é alcançado alterando a sua condutividade através de enviesamento eletrostático. Devido a tais características únicas, as futuras direções de investigação devem explorar como ajustar o desempenho de grafismo Sistemas RIS através da otimização da condutividade do sistema através enviesamento electrostático [62].

2.5.4 QUESTÕES DE SEGURANÇA

As tecnologias RF estão a proliferar com o aparecimento do 6G. De acordo com [63] e [64], uma vasta gama de preocupações de saúde humana estão correlacionadas com a exposição às radiações RF. As questões de saúde associadas à exposição às radiações EM têm sido um tema de investigação aberto há décadas. No entanto, o recente advento do LIS em cenários de comunicação interna abriu a porta para mais preocupações relativamente aos possíveis riscos para a saúde. Na sua maioria, os ambientes interiores mmWave são estudados para aplicações futuras, uma vez que oferecem uma grande largura de banda para permitir altas taxas de dados. No entanto, ao contrário das frequências dos telefones celulares, as radiações mmWave são sinais de alta frequência que têm uma penetração relativamente profunda no corpo humano. Assim, a principal preocupação é o aquecimento da pele e dos olhos resultante da absorção pelo corpo da mmWave. Na realidade, estudos recentes mostram que os métodos atuais de estimação da densidade de potência não são fiáveis para determinar a conformidade da exposição à interação próxima da mmWave [65]. Por conseguinte, para manter um sistema LIS eficiente de alta taxa, propomos considerar um problema de otimização que maximiza a taxa de dados, sujeito às restrições de saúde, através do ajuste da distância entre vários LIS, particularmente em ambientes interiores. De acordo com os estudos do *National Toxicology Program* (NTP), pequenas salas com elementos passivos colocados em estreita proximidade para refletir e gerar radiação EM causaram problemas de saúde aos ratos expostos a longo prazo [66], [67]. Embora o aumento da distância diminuísse a exposição dos utilizadores à RF, afetaria o desempenho global do sistema. Os futuros estudos de investigação devem, portanto, considerar tais compensações no desempenho versus questões de saúde, ajustando adequadamente os diferentes parâmetros da rede.

2.5.5 INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS 5G E 6G

O LIS é uma das camadas físicas revolucionárias e potenciais tecnologias que geram um novo paradigma de comunicação que cumpre os requisitos das futuras redes 6G [57], [68]. Do mesmo modo, os ambientes de rádio inteligentes podem ter um impacto potencial nos próximos mercados de tecnologia 6G, facilitando melhorias substanciais na eficiência espectral com soluções rentáveis. Uma das direções de investigação por descobrir é a integração de superfícies inteligentes com tecnologias emergentes 5G, tais como IoT, comunicações assistidas por drones, formação de feixe, e segurança da camada física [69], [70], [71]. Para a tecnologia 6G, um sistema LIS tem o potencial de fornecer um serviço de comunicações sem fios generalizado e fiável, enquanto supressão de componentes de interferência adicionais como o ruído e interface entre utilizadores através dos caminhos NLOS e LOS. Uma vez que os LISs diminuem o nível de interferência na rede, espera-se melhorar a capacidade da rede e o desempenho dos utilizadores em redes 6G, especialmente para ambientes de utilizadores de alta densidade, tais como aeroportos e estádios. Ainda que os únicos benefícios do LIS ajudam a criar um canal de comunicação sem fios favoráveis, as suas caixas de utilização e cenários de aplicação satisfazem as novas exigências dos utilizadores e as tendências de rede 6G. Por outro lado, a tecnologia ainda está na sua fase exploratória, o impacto económico e a sua sustentabilidade do LIS-assistente ambiente de rádio inteligente nos mercados de B5G são investigações-chave que precisam de ser mais estudadas [67].

2.5.6 LOCALIZAÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS LIS

O posicionamento utilizando sistemas mmWave assistidos por LIS pode ser analisado e estudado considerando conjuntamente a conceção de mmWave beamformere deslocadores de fase LIS. Também se pode investigar o desempenho da localização de LISs esféricos distribuídos e sistemas de LIS esféricos centralizados. Além disso, os estudos do CRLB dos sistemas LIS na presença do NLoS podem ser prosseguidos em futuros trabalhos. Igualmente, o desempenho relativo à precisão de posicionamento dos sistemas LIS-aided dependem muito da colocação dos refletores e metasuperfícies. Por conseguinte, é importante encontrar o local ótimo para colocar estes refletores e metasuperfícies. A colocação destes materiais é uma tarefa desafiante, sendo um problema inverso da modelação de canais. Na modelação de canais, estando conscientes da implantação, podemos obter o estado do canal informação usando várias técnicas de modelação de canais tais como traçado de raio, etc.

3 METODOLOGIA

Este trabalho baseou-se em uma estratégia quantitativa de pesquisa, de carácter explicativa. Neste capítulo, pretendemos demonstrar os métodos utilizados para alcançar o resultado final. Vamos abordar e explicar detalhadamente os componentes não essenciais tais como programas e ferramentas utilizadas para auxiliar o trabalho.

A metodologia irá consistir de uma simulação do sistema LIS feita no Matlab usando o método Monte Carlo. MATLAB (MATrix LABoratory) trata-se de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar, onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional [21].

O método Monte Carlo consiste em enumeradas simulações massivas aleatórias com propósito de obter resultados numéricos médios. Em suma, será simulado um transmissor e recetor dos sistemas LIS, simulando a transmissão de um elevado número de blocos de bits sobre um sistema de comunicações, determinando a taxa de erro de bits média [22].

Será necessário um conhecimento amplo do MATLAB e os sistemas de comunicação incluindo do transmissor, o canal de propagação (será utilizado um sistema de multipercurso, caracterizado por um desvanecimento de Rayleigh) e o recetor. Utilizando esses conceitos para simulação monte Carlo, irão ser transmitido blocos de bits, e no final, será contabilizado o número de bits errados sobre o número de bits transmitidos, para determinar a probabilidade de ocorrência de erro. A simulação é efetuada com inúmeros bits aleatórios enviados por antenas de transmissão e o recetor irá decodificar e quantificar o número de bits de erro. Esta contabilização da probabilidade de erro de bit é efetuada com e sem estimação de canal, visando a determinar qual é degradação de canal com o aumento de antenas comparando com a situação sem estimação de canal.

A finalidade desta dissertação é verificar qual o tipo de equalização que será necessário utilizar para sistemas LIS. O esperado é termos equalização para a transmissão similar a equalização por bloco SC-FDE (*Single-Carrier Frequency Domain*) e ver se as necessidades de equalização vão diminuindo com o aumento do número de antenas. Quanto à deteção, essa será a convencional, como a utilizada nos sistemas 5G, como deteção para modulações M_QAM. De referir que os sistemas de transmissão SC-FDE são transmissões por blocos que visam mitigar a interferência intersimbólica, o mesmo que as antenas. Espera-se que

aumentando o número de antenas LIS (ex: da ordem dos milhares) os requisitos de mitigação de interferência intersimbólica utilizados na equalização SC-FDE possam diminuir.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E O SINAL

Este texto considera um sistema LIS multicamadas, que requer um número de antenas R de recepção igual ou superior às antenas T de transmissão. Considera-se que cada antena transmissora envia um fluxo diferente de símbolos. Por outro lado, o número de antenas de recepção R é responsável pelo fornecimento de diversidade. Os sinais SC-FDE são assumidos [18], associados à modulação da Quadrature Phase Shift Keying (QPSK).

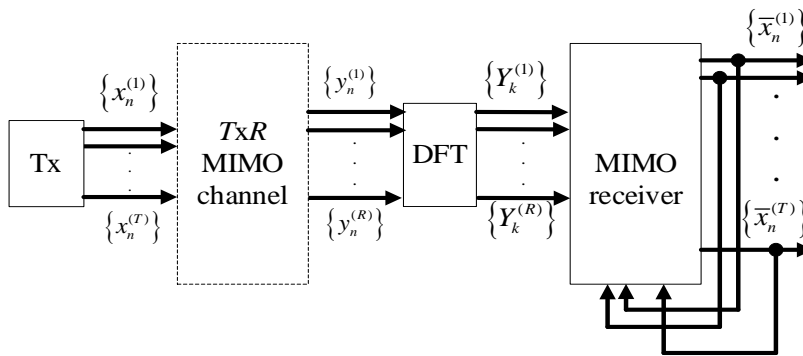


Fig. 11 Diagrama de blocos de um sistema m-MIMO associado a sinais SC-FDE [5].

Como ilustrado na Figura 11, utilizamos um sistema de blocos m-MIMO porque contém uma similaridade ao sistema LIS. O n th bloco transmitido, de N símbolos de dados, enviado pela t th antena, é indicado como $x_n^{(t)}$, enquanto o bloco recebido pela antena r th é indicado como $y_n^{(r)}$. O mapeamento entre o sinal de domínio temporal e o sinal de domínio de frequência para o bloco transmitido é definido como $DFT\{x_n^{(t)}; n = 0, 1, \dots, N - 1\} = \{X_k^{(t)}; k = 0, 1, \dots, N - 1\}$, realizando a *Discrete Fourier Transform (DFT)* do bloco de tempo dominante. Assume-se um mapeamento semelhante para o bloco recebido como $DFT\{y_n^{(r)}; k = 0, 1, \dots, N - 1\} = \{Y_k^{(r)}; k = 0, 1, \dots, N - 1\}$.

Após remover o prefixo cíclico, e assumindo um prefixo cíclico mais longo do que a resposta global de impulso do canal de cada canal, usando a representação matriz-vetorial, o sinal de domínio de frequência recebido chega,

$$\mathbf{Y}_k = [\mathbf{Y}_k^{(1)}, \dots, \mathbf{Y}_k^{(R)}]^T = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{N}_k \quad (28)$$

Onde $\mathbf{x}_k = [X_k^{(1)}, \dots, X_k^{(T)}]^T$ representa os símbolos de dados do domínio de frequência transmitidos, onde H_k denota $R \times T$ a matriz do canal para o SUB portador k th, com (r, t) th elemento de $H_k^{(t,r)}$, e onde H_K denota a resposta de frequência do canal para o SUB portador k th (assumido invariante durante a transmissão de um determinado bloco). Note-se que o mapeamento entre os domínios de tempo e frequência do canal é definido por $\{H_k; k = 0, 1, \dots, N-1\} = DFT\{h_n; n = 0, 1, \dots, N-1\}$. Além disso, N_k é o ruído do bloco de frequência do canal para essa SUB portadora.

3.2 SISTEMA E MODELO DE SINAL PARA OS RECETORES

Um recetor muito eficiente normalmente associado aos esquemas SC-FDE é o IB-DFE [18]. Tal recetor iterativo utiliza coeficientes de *feedforward* e *feedback* para processar os sinais no domínio da frequência, atingindo um desempenho tipicamente muito melhor do que o de um recetor não iterativo. O IB-DFE pode ser visto como uma equalização turba [19]. O recetor ZF tende a ser complexo porque requer o cálculo do pseudoinverso da matriz do canal, para cada componente de frequência. Este artigo evita esta complexidade ao implementar o m-MIMO utilizando recetores MRC e EGC, simplificando o seu processamento. Além disso, estes recetores são iterativos sendo, neste estudo, associados às transmissões SC-FDE. Assumindo um recetor não iterativo, os símbolos de dados do domínio da frequência estimada $\tilde{\mathbf{x}}_k = [\tilde{X}_k^{(1)}, \dots, \tilde{X}_k^{(R)}]^T$ como:

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{y}_k \quad (29)$$

Dependendo do algoritmo, B_k pode ser calculado como $\mathbf{B}_k = \mathbf{H}_k^H (\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)^{-1}$ para o ZF, $\mathbf{B}_k = \mathbf{H}_k^H$ para o MRC, e $\mathbf{B}_k = \exp\{j \arg(\mathbf{H}_k^H)\}$ para o EGC [21].

Como descrito, o recetor ZF é um algoritmo linear que aplica o pseudoinverso da resposta de frequência do canal, para cada componente de frequência do canal. Por conseguinte, o nível de complexidade e cálculo é muito elevado, o que também se traduz num elevado consumo de bateria. Além disso, o ZF é muito eficiente na remoção da interferência dos intersímbolos, mas tem a desvantagem de apresentar um aumento do ruído quando utilizado no pós-processamento. Por conseguinte, tende a degradar o desempenho para níveis médios a altos de ruído. Por outro lado, o MRC e o EGC tendem a mitigar estas limitações devido à sua simplicidade, mas geram alguma interferência residual gerada no processo de descodificação,

especialmente para valores moderados de T / R [21] . Isto pode ser mitigado através do emprego de um recetor iterativo que implementa a seguinte função:

$$\tilde{\mathbf{X}}_k = \mathbf{B}_k^H \mathbf{Y}_k - \mathbf{C}_k \bar{\mathbf{X}}_k \quad (30)$$

onde a matriz de interferência de cancelamento pode ser calculada como:

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{A}_k^H \mathbf{H}_k - \mathbf{I} \quad (31)$$

e onde \mathbf{I} é uma matriz de identidade $R \times R$, onde $(i, i')^{th}$ são elementos da matriz \mathbf{A} definidos como $[\mathbf{A}]_{i,i'} = [\mathbf{H}]_{i,i'}^H$ para a MRC e $[\mathbf{A}]_{i,i'} = \exp(j \arg([\mathbf{H}]_{i,i'}))$ para a EGC ou seja, têm valor absoluto 1 e fase idêntica ao elemento correspondente da matriz \mathbf{H} .

4 CRONOGRAMA

Tabela 3: Cronograma [elaboração própria]

Atividades/Meses	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Escolha do Tema de Pesquisa	X	X				
Seminários do Projeto (Objetivos, Metodologia, Estrutura do Trabalho)	X	X	X			
Revisão da Literatura			X	X		
Seminário-Desenvolvimento da Proposta				X	X	
Redação Preliminar					X	
Ajustes Metodológicos, Conceituais, Formatação					X	X
Preparação Para Defesa					X	X
Apresentação do Trabalho Final						X

5 RESULTADOS OBITIDOS

O conjunto de simulações que serão apresentadas iram ilustrar como o LIS funciona com diferentes parâmetros em cada simulação de comunicações de redes sem fio. As simulações irão demonstrar a troca de sinal entre uma superfície inteligente e o recetor do sinal. As figuras 12 e 13 ilustram a transferência de dados entre 4 paineis LIS e 2 utilizadores num near-field. Cada painel tem um conjunto de antenas que fazem *beamforming* e equivalem a 25 antenas no total. O Sistema LIS considera que o recetor está no "Near-Field" de todo o sistema LIS (e não é para considerar as antenas elementares). Neste cenário, o *beam* aponta para um angulo, mas também para uma certa distância (como uma lupa). Se tivermos um utilizador interferente no mesmo angulo (azimute e elevação) mas com uma distância diferente, ele não recebe nada. O Sistema LIS é uma antena ativa, em que cada elemento de antena do painel é multiplicado por um fator de ganho e desfasamento, para criar o *beam*, exatamente tal como no *Beamforming*. A única diferença é que considera o Near-Field (feixe em direção e distância), em vez do Far-Field (beams apenas em direção).

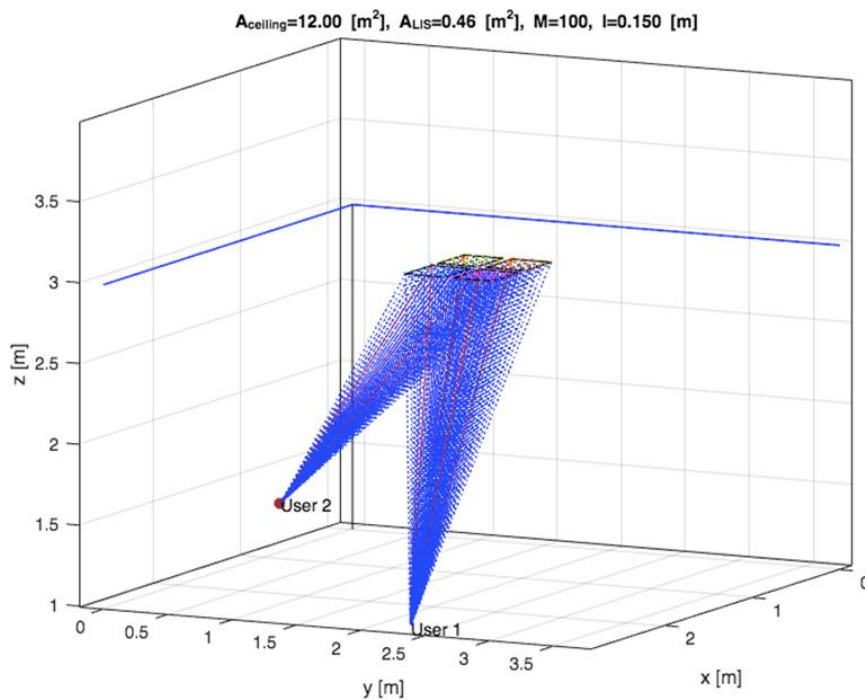


Figura 12 LIS Near-field [elaboração própria].

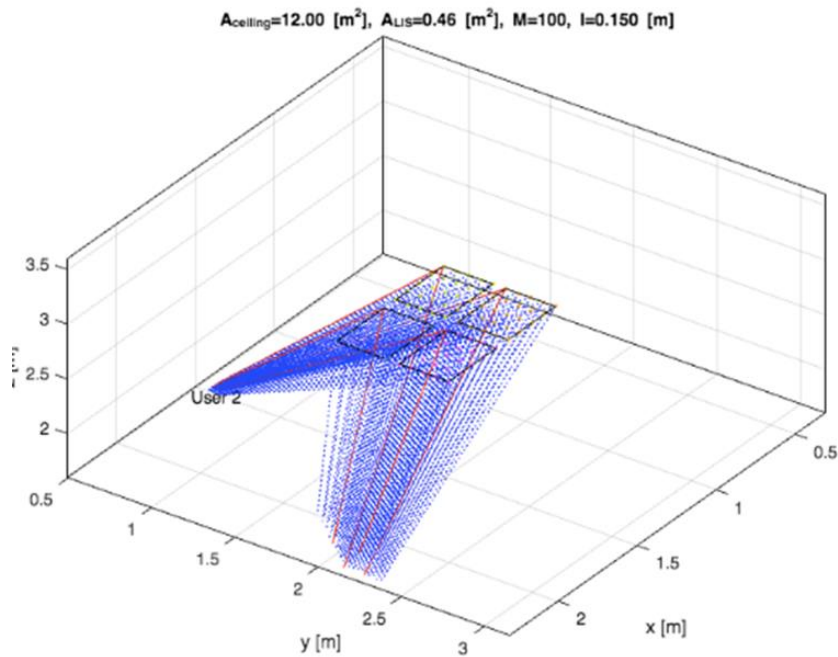


Figure 13 LIS 4 Paineis Ilustrados [elaboração própria].

5.1 BASELINE

Tabela 3 Lista de baseline utilizados para simulações [elaboração própria].

	Número de Paineis LIS	Número de antenas em cada painel	Número de utilizadores	Objetivo	Figuras
<i>Baseline 1</i>	4	25 vs 64	2	Comparar a performance quando o número de antenas em cada painel aumenta.	
<i>Baseline 2</i>	4 vs 9	25 vs 100	2	Ilustrar a diferença do sinal entre 4x25 vs 9x100	

Baseline 3

4	25	4 vs 6	Observar se o aumento de utilizadores alguma interferência no sinal
---	----	--------	---

A tabela 3 ilustra a comparação de sinais com múltiplos painéis, utilizadores e inúmeras antenas. Para realizar essa simulação foi utilizado o método de Monte Carlo, onde enumeras simulações massivas são utilizadas para obter resultados numéricos.

A Baseline 1, ilustra a diferença de sinal entre 4X25 e 4X64. Quanto maior o número de antenas em cada painel, melhor é a performance do LIS. Como ilustrado na figura 14, mantemos o mesmo número de painéis, mas aumentamos a diferença no número de antenas em cada painel. Notamos uma subida no sinal dos recetores ZF25 VS ZF64 devido o aumento da potência nas antenas um pouco mais distantes do alvo. O ZF e o IB-DFE são os recetores com sinal mais próximos do MFB cujo é o desempenho ideal.

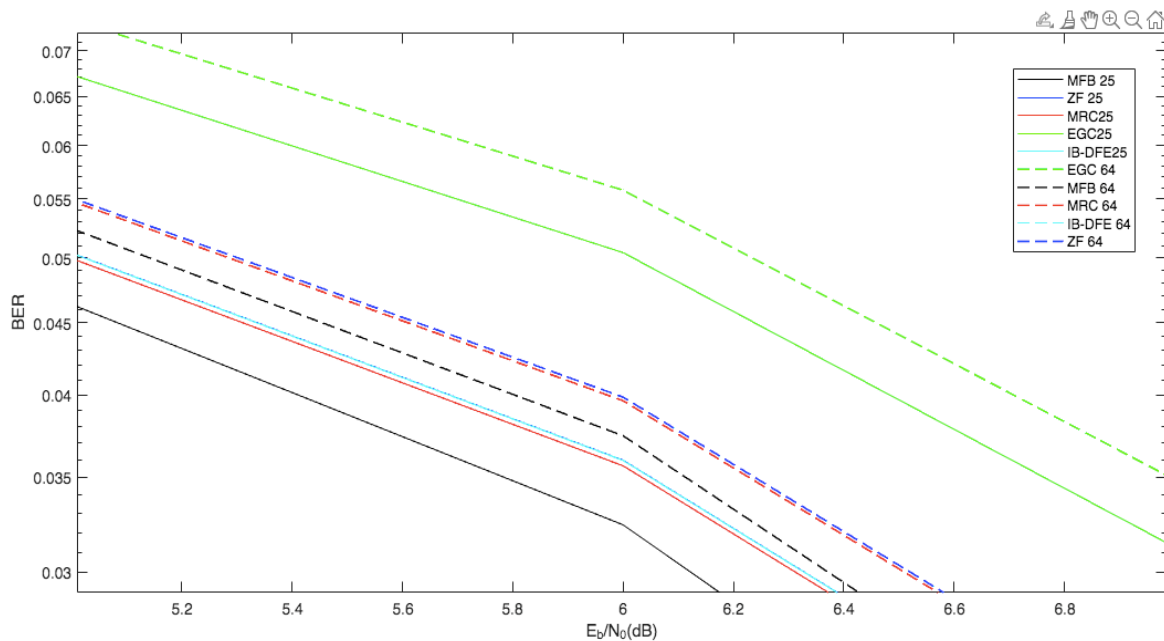


Fig. 14 Comparação a performance quando o número de antenas em cada painel aumenta 4X25 vs4X64 [elaboração própria].

Ao analisar a figura 15 (baseline 2), nota-se resultados semelhantes a baseline 1 devido o aumento de painéis e antenas. A simulação demonstra um LIS 9X100 com um aumento significativo no sinal para alcançar alvos com uma maior distância da antena. Os painéis dão prioridade nos alvos mais distantes assim tornando a conexão mais segura. Devido a potência fixa, para o sinal do ZF100 alcançar o alvo sofre uma queda no desempenho por estar mais distante. Porém, o sinal ZF 25 existe uma maior concentração da potência devido ao menor número de antenas, então a distribuição é muito mais equilibrada mantendo um melhor desempenho em cada painel. Os sinais dos recetores ZF e IB-DFE sobrepõem-se nos dois casos mesmo existindo uma diferença no número de painéis e antenas. O EGC continua a ter o pior desempenho dos recetores.

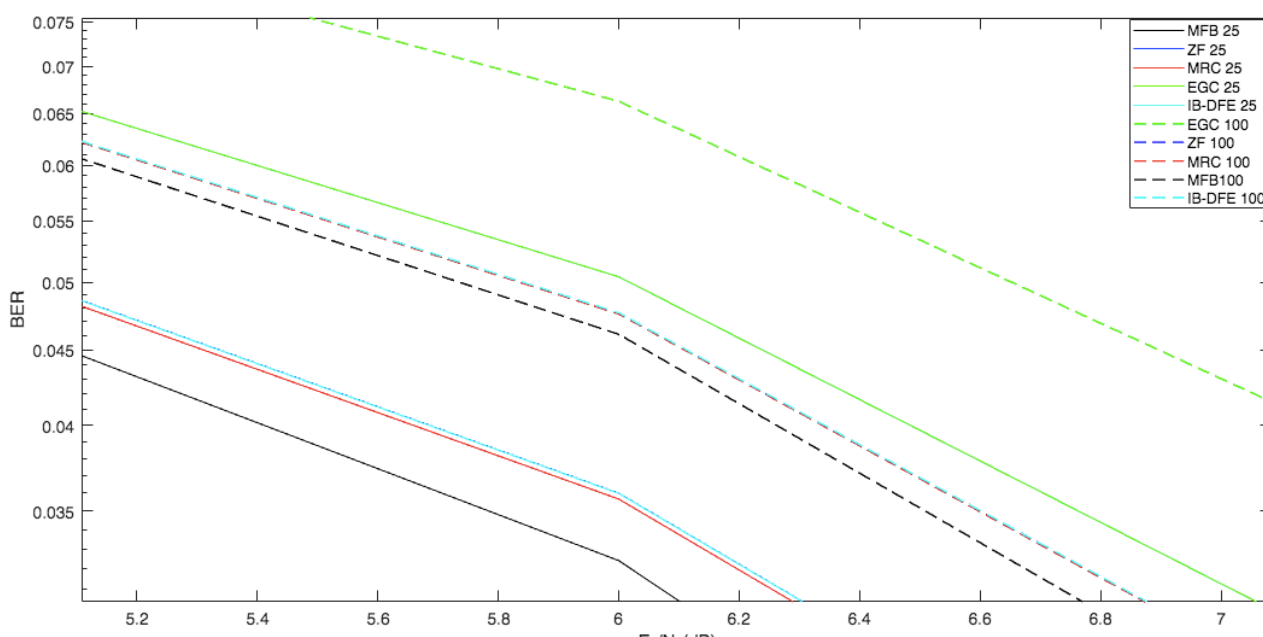


Figure 15 Ilustrar a diferença do sinal entre 4x25 vs 9x100 [elaboração própria].

A figura 16 (Baseline 3), ilustra a diferença quando aumentamos o número de utilizadores mantendo o mesmo número de painéis e antenas. Utilizamos um LIS 4x25 com uma potência fixa nos dois casos. Notamos que o MFB para os dois casos não sofre nenhuma alteração, mas os outros recetores tal como o ZF sofre um pequeno aumento quando existe um maior número de utilizadores. O ZF com 6 utilizadores, sofre uma queda de desempenho devido

a distribuição do sinal pela antena aos alvos. Comparando com o aumento de antenas, o aumento de utilizadores causa uma menor queda desempenho.

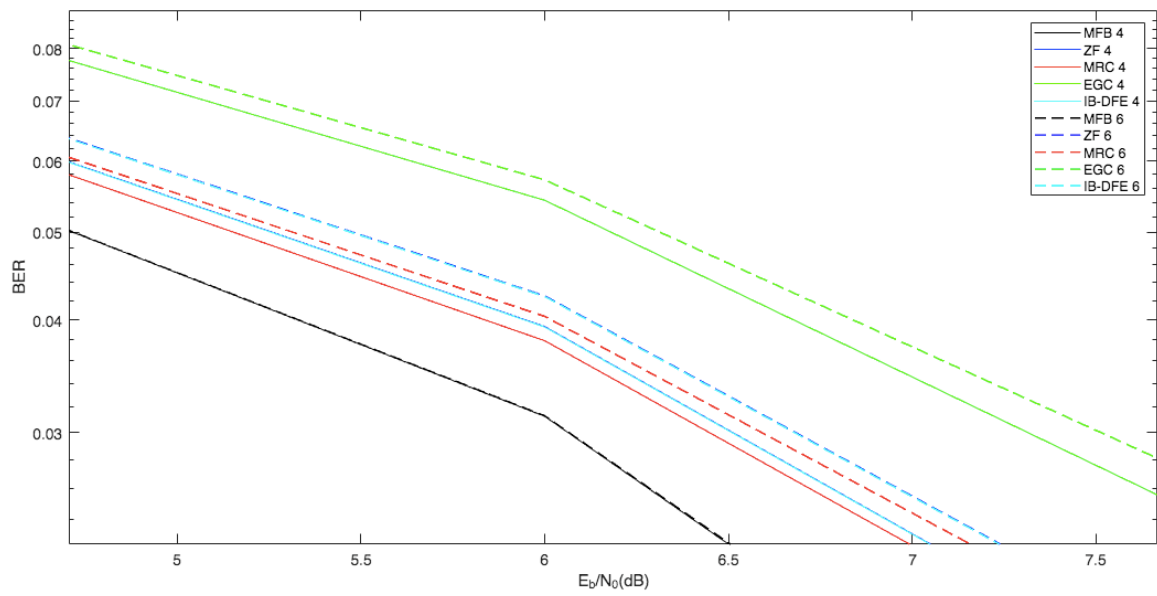


Figure 16 Simulação do LIS com diferente número de utilizadores 4vs6 [elaboração própria].

6 CONCLUSÃO

As grandes superfícies inteligentes (LIS) são uma tecnologia promissora da camada física para sistemas B5G. Tal tecnologia não só melhora a QoS dos sistemas sem fios, mas também reduz o grande consumo de energia, em comparação com as redes tradicionais. LIS são constituídos por meta-materiais EM reconfiguráveis que são capazes de modular os dados sobre os sinais recebidos, personalizar as alterações das ondas de rádio, e detetar inteligentemente o ambiente. Este documento fornece uma mistura única que levanta os princípios de funcionamento físico do LIS, em conjunto com as suas estruturas de otimização e análise de desempenho. Esta dissertação apresentou a tecnologia LIS e o seu princípio de funcionamento. Em seguida, apresentou várias técnicas de otimização que visam a otimização de objetivos específicos, nomeadamente, maximizando a eficiência energética, potência, taxa de soma, sigilo e cobertura. Esta dissertação analisou também vários trabalhos de análise de desempenho relevantes, incluindo o impacto das deficiências de hardware na capacidade, análise da taxa de dados de ligação ascendente/ descendente e probabilidade de falha de energia. Esta dissertação apresentou ainda o impacto da adoção da tecnologia LIS para aplicações de posicionamento. Finalmente, identificaram-se numerosos e excitantes desafios abertos para as redes sem fios B5G assistidas por LIS, incluindo novos problemas de atribuição de recursos, sistemas híbridos RF-VLC, considerações de saúde, e localização. O sistema LIS esclarece as direções de investigação promissoras para as formulações de problemas práticos no futuro B5G sistemas.

Esta dissertação um estuda um Sistema de Antena Inteligente associado à técnica de transmissão SC-FDE, para quatro tipos diferentes de recetores: ZF, MRC, EGC e IB-DFE. O ZF e o IB-DFE apresentam um desempenho mais próximos do MFB, cujas curvas são quase sobrepostas, enquanto o EGC é o que apresenta pior desempenho. É de ressaltar que o ZF é um recetor complexo, pois requer o cálculo da pseudo-inverso da matriz do canal, para cada componente de frequência. Pode-se concluir que o uso da equalização não traz nenhum valor agregado em termos de melhoria de desempenho. Consequentemente, o sistema LIS contribui para a simplificação do recetor.

Por fim, pode-se concluir que um sistema composto por Sistema LIS associado à técnica de transmissão SC-FDE, e com um recetor de baixa complexidade, é uma boa combinação para alcançar futuras evoluções das comunicações celulares.

7 BIBLIOGRAFIA

[1] E. Basar, M. Di Renzo, J. Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, Aug. 2019.

[2] X. Yuan, Y.-J. Zhang, Y. Shi, W. Yan, and H. Liu, “Reconfigurable-intelligent-surface empowered 6G wireless communications: Challenges and opportunities,” arXivpreprint, Jan.2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2001.00364>

[3] E. Basar, “Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G,” *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1–1, Feb. 2020.

[4] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “Beyond massive MIMO: The potential of data transmission with large intelligent surfaces,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 10, pp. 2746–2758, May 2018.

[5] R. Alghamdi, R. Alhadrami, D. Alhothali, H. Almorad, A. Faisal, S. Helal, R. Shalabi, R. Asfour, N. Hammad, A. Shams, N. Saeed, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Intelligent surfaces for 6G Wireless Networks: A survey of optimization and Performance Analysis Techniques,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202795–202818, 2020.

[6] N. Kaina, M. Dupr e, G. Lerosey, and M. Fink, “Shaping complex micro-wave fields in reverberating media with binary tunable metasurfaces,” *Scientific reports*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, Oct. 2014.

[7] C. Huang, G. C. Alexandropoulos, A. Zappone, M. Debbah, and C. Yuen, “Energy efficient multi-user MISO communication using low resolution large intelligent surfaces,” in *IEEE Global Commun. Conf. Workshops*, Dec. 2018, pp. 1–6.

[8] X. Ma et al., “Intelligent reflecting surface enhanced indoor terahertz communication systems,” *Nano Commun. Netw.*, vol. 24, p. 100284, May 2020.

[9] C. Liaskos, A. Tsioliariidou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, “Using any surface to realize a new paradigm for wireless communications,” *Commun. ACM*, vol. 61, no. 11, pp. 30–33, Oct. 2018.

[10] M. Di Renzo et al., “Smart radio environments empowered by AI reconfigurable meta-surfaces: An idea whose time has come,” *EURASIPJ. Wireless Commun. Netw.*, vol. 129, pp. 1–20, May 2019.

[11] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliariidou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, “Realizing wireless communication through software-defined hypersurface environments,”

in Proc. IEEE 19th Int. Symp. on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Netw.” (WoWMoM), Jun.2018, pp. 14–15.

[12] Q. Wu and R. Zhang, “Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, Nov. 2019.

[13] L. Subrt and P. Pechac, “Intelligent walls as autonomous parts of smart indoor environments,” *IET Commun.*, vol. 6, no. 8, pp. 1004–1010, May 2012.

[14] J. He, H. Wymeersch, L. Kong, O. Silvén, and M. Juntti, “Large intelligent surface for positioning in millimeter wave MIMO systems,” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, May 2020, pp. 1–5.

[15] J. Zhao and Y. Liu, “A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs) :Towards 6G wireless communication networks,” *arXiv preprint*, Nov.2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1907.04789>

[16] E. Björnson and L. Sanguinetti, “Power scaling laws and near-field behaviors of massive MIMO and intelligent reflecting surfaces,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, Sep. 2020

[17] T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun, and Y. Chen, “MIMO-NOMA networks relying on reconfigurable intelligent surface: A signal cancellation based design,” *IEEE Trans. Commun.*, Aug. 2020.

[18] Y. Cheng, K. H. Li, Y. Liu, K. C. Teh, and H. V. Poor, “Downlink and uplink intelligent reflecting surface aided networks: NOMA and OMA,” *arXiv preprint*, May 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2005.00996>

[19] X. Yue and Y. Liu, “Performance analysis of intelligent reflecting surface assisted NOMA networks,” *arXiv preprint*, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2002.09907>

[20] J. Zuo, Y. Liu, Z. Qin, and N. Al-Dhahir, “Resource allocation in intelligent reflecting surface assisted NOMA systems,” *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1–1, Aug. 2020.

[21] T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun, Y. Chen, and L. Hanzo, “Reconfigurable intelligent surface aided NOMA networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Jul. 2020.

[22] Z. Ding and H. Vincent Poor, “A simple design of IRS-NOMA transmission,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 1119–1123, 2020.

[23] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, “On the impact of phase shifting designs on IRS-NOMA,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 1–1, Apr. 2020.

- [24] G. Pan, J. Ye, J. An, and M.-S. Alouini, “When full-duplex transmission meets intelligent reflecting surface: Opportunities and challenges,” arXiv preprint, May 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2005.12561>
- [25] S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, “Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 183–198, Jan. 2014.
- [26] S. Gonget al., “Towards smart radio environment for wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A comprehensive survey,” arXiv preprint, May. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1912.07794>
- [27] M. Najafi, V. Jamali, R. Schober, and V. H. Poor, “Physics-based modeling and scalable optimization of large intelligent reflecting surfaces,” arXiv preprint, Apr. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2004.12957>
- [28] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “Beyond massive MIMO: The potential of positioning with large intelligent surfaces,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 7, pp. 1761–1774, Apr. 2018.
- [29] M. Jung, W. Saad, Y. R. Jang, G. Kong, and S. Choi, “Performance analysis of large intelligence surfaces (LISs): Asymptotic data rate and channel hardening effects,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Jan. 2020.
- [30] M. Jung, W. Saad, and G. Kong, “Performance analysis of large intelligent surfaces (LISs): Uplink spectral efficiency and pilot training,” arXiv preprint, Jun. 2019. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1904.00453>
- [31] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, “Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial,” 2020.
- [32] Q.-U.-A. Nadeem, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, and M.-S. Alouini, “Asymptotic max-min SINR analysis of reconfigurable intelligent surface assisted MISO systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Apr. 2020.
- [33] S. Foo, “Liquid-crystal reconfigurable metasurface reflectors,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag.*, Jul. 2017, pp. 2069–2070.
- [34] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “The potential of using large antenna arrays on intelligent surfaces,” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, Jun. 2017, pp. 1–6.
- [35] W. Shi, X. Zhou, L. Jia, Y. Wu, F. Shu, and J. Wang, “Enhanced secure wireless information and power transfer via intelligent reflecting surface,” arXiv preprint, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1911.01001>

[36] Q. Wu and R. Zhang, “Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, May 2019, pp. 7830–7833.

[37] Q. Wu and R. Zhang, “Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, Jan. 2020.

[38] D. Mishra and H. Johansson, “Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted MISO wireless energy transfer,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, May 2019, pp. 4659–4663.

[39] C. Huang, A. Zappone, M. Debbah, and C. Yuen, “Achievable rate maximization by passive intelligent mirrors,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 3714–3718.

[40] M. D. Renzo and J. Song, “Reflection probability in wireless networks with metasurface-coated environmental objects: An approach based on random spatial processes,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, p. 99, Dec. 2019.

[41] L. Zhanget al., “Space-time-coding digital metasurfaces,” *Nature Commun.*, vol. 9, Oct. 2018.

[42] Z. He and X. Yuan, “Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 210–214, Feb. 2020.

[43] X. Tan, Z. Sun, D. Koutsonikolas, and J. M. Jornet, “Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, Apr. 2018, pp. 270–278.

[44] X. Tan, Z. Sun, J. M. Jornet, and D. Pados, “Increasing indoor spectrum sharing capacity using smart reflect-array,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, May 2016, pp. 1–6.

[45] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics. Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge Univ. Press, 1997.

[46] T. L. Jensen and E. De Carvalho, “An optimal channel estimation scheme for intelligent reflecting surfaces based on a minimum variance unbiased estimator,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, May 2020, pp. 5000–5004.

- [47] S. Nie and I. F. Akyildiz, “Beamforming in intelligent environments based on ultra-massive MIMO platforms in millimeter wave and terahertz bands,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, May 2020, pp. 8683–8687.
- [48] B. Sainath and N. B. Mehta, “Generalizing the amplify-and-forward relay gain model: An optimal SEP perspective,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 11, pp. 4118–4127, Nov. 2012.
- [49] Q. Wu and R. Zhang, “Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 586–590, May 2020.
- [50] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [51] A. Taha, M. Alrabeiah, and A. Alkhateeb, “Deep learning for large intelligent surfaces in millimeter wave and massive MIMO systems,” in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Dec. 2019, pp. 1–6.
- [52] —, “Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning,” *arXiv preprint*, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1904.10136>
- [53] A. Taha, Y. Zhang, F. B. Mismar, and A. Alkhateeb, “Deep reinforcement learning for intelligent reflecting surfaces: Towards standalone operation,” in *Proc. IEEE 21st Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun. (SPAWC)*, Aug. 2020, pp. 1–5.
- [54] X. Yu, D. Xu, and R. Schober, “MISO wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces,” in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*, Aug. 2019, pp. 735–740.
- [55] S. Abeywickrama, R. Zhang, Q. Wu, and C. Yuen, “Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization,” *IEEE Trans. Commun.*, Jun. 2020.
- [56] H. Guo, Y.-C. Liang, J. Chen, and E. G. Larsson, “Weighted sum-rate optimization for intelligent reflecting surface enhanced wireless networks,” *arXiv preprint*, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.07920>
- [57] L. Dong and H. Wang, “Secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 1–1, Jan. 2020.
- [58] H. Shen, W. Xu, S. Gong, Z. He, and C. Zhao, “Secrecy rate maximization for intelligent reflecting surface assisted multi-antenna communications,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 9, pp. 1488–1492, Sep. 2019.

- [59] J. Qiao and M.-S. Alouini, “Secure transmission for intelligent reflecting surface-assisted mmWave and terahertz systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Jun. 2020.
- [60] D. W. H. Cai, T. Q. S. Quek, and C. W. Tan, “A unified analysis of max-min weighted SINR for MIMO downlink system,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 8, pp. 3850–3862, Aug. 2011.
- [61] A. S. Y. Poon, R. W. Brodersen, and D. N. C. Tse, “Degrees of freedom in multiple-antenna channels: A signal space approach,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 523–536, Feb. 2005.
- [62] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “Capacity degradation with modeling hardware impairment in large intelligent surface,” in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Dec. 2018, pp. 1–6.
- [63] B. Zheng, Q. Wu, and R. Zhang, “Intelligent reflecting surface-assisted multiple access with user pairing: NOMA or OMA?” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 753–757, Jan. 2020.
- [64] H. Zhang, B. Di, L. Song, and Z. Han, “Reconfigurable intelligent surfaces assisted communications with limited phase shifts: How many phase shifts are enough?” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 1–1, Feb. 2020.
- [65] L. Subrt and P. Pechac, “Controlling propagation environments using intelligent walls,” in *Proc. Eur. Conf. Antennas Propag. (EUCAP)*, Mar. 2012, pp. 1–5.
- [66] M. Jung, W. Saad, Y. Jang, G. Kong, and S. Choi, “Reliability analysis of large intelligent surfaces (LISs): Rate distribution and outage probability,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 6, pp. 1662–1666, Aug. 2019.
- [67] E. Basar, “Transmission through large intelligent surfaces: A new frontier in wireless communications,” in *Proc. Eur. Conf. Netw. Commun. (EuCNC)*, Jun. 2019, pp. 112–117.
- [68] M. Badiu and J. P. Coon, “Communication through a large reflecting surface with phase errors,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 1–1, Oct. 2019.
- [69] M. Di Renzo and J. Song, “Reflection probability in wireless networks with metasurface-coated environmental objects: An approach based on random spatial processes,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, no. 1, p. 99, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1403-7>
- [70] M. D. Renzo et al., “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 798–807, Jun. 2020.

[71] M. A. Kishk and M.-S. Alouini, "Exploiting randomly-located blockages for large-scale deployment of intelligent surfaces," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Aug. 2020.

[72] O. Ozdogan, E. Bjornson, and E. G. Larsson, "Using intelligent reflecting surfaces for rank improvement in MIMO communications," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, May 2020, pp. 9160–9164.

[73] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliariidou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 9, pp. 162–169, Sep. 2018.

[74] V. Arun and H. Balakrishnan, "RFocus: Practical beamforming for small devices," *arXiv preprint*, May 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.05130>

[75] H. Samedeen, N. Saeed, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Next generation terahertz communications: A rendezvous of sensing, imaging, and localization," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 1–6, May 2020.

[76] M. A. Khan, N. Saeed, A. W. Ahmad, and C. Lee, "Location awareness in 5G networks using RSS measurements for public safety applications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21 753–21 762, 2017.

[77] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, "Cramr-rao lower bounds for positioning with large intelligent surfaces," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, Sep. 2017, pp. 1–6.

[78] S. Hu and F. Rusek, "Spherical large intelligent surfaces," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, May 2020, pp. 8673–8677.

[79] S. Sun, M. Fu, Y. Shi, and Y. Zhou, "Towards reconfigurable intelligent surfaces powered green wireless networks," in *Proc. IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf. (WCNC)*, Jun. 2020, pp. 1–6.

[80] L. Zhao, Z. Wang, and X. Wang, "Wireless power transfer empowered by reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Syst. J.*, pp. 1–4, Apr. 2020.

[81] D. Xu, X. Yu, Y. Sun, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Resource allocation for IRS-assisted full-duplex cognitive radio systems," *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1–1, Sep. 2020.

[82] S. Rehman, S. Ullah, P. Chong and S. Yongchareon, and D. Komosny, "Visible light communication: A system perspective overview and challenges," *Sensors*, vol. 19, p. 1153, Mar. 2019.

[83] A. M. A. Abdelhady, A. S. Salem, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "VLC via intelligent reflecting surfaces: Metasurfaces vs mirror arrays," Submitted to

IEEE Trans. Wireless Commun., Feb. 2020.[Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10754/661379>

[84] L. Chiaraviglio, A. Elzanaty, and M.-S. Alouini, “Health risks associated with 5G exposure: A view from the communications engineering perspective,” arXiv preprint, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2006.00944>

[85] A. B. Miller et al., “Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices,” *Frontiers in Public Health*, vol. 7, p. 223, Aug. 2019.

[86] “mmWave health effects,” NYU WIRELESS, May 2017. [Online]. Available: <https://wireless.engineering.nyu.edu/mmwave-health-effects/>

[87] M. Wyde, M. Cesta, C. Blystone, A. Brix, J. Bucheret et al., “Toxicology and carcinogenesis studies in Hsd: Sprague 23 and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones,” National Toxicology Program, US Department of Health and Human Services, Tech. Rep., Nov. 2018.

[88] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, and S. Parolari, “Potential key technologies for 6G mobile communications,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 63, pp. 1–19, Aug. 2020.

[89] Q. Zhang, Y.-C. Liang, and H. V. Poor, “Large intelligent surface/antennas (LISA) assisted symbiotic radio for IoT communications,” arXiv preprint, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2002.00340>

[90] L. Ge, P. Dong, H. Zhang, J. Wang, and X. You, “Joint beamforming and trajectory optimization for intelligent reflecting surfaces-assisted UAV communications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 78 702–78 712, Apr. 2020.

[91] Q.-U. Nadeem, H. Alwazani, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, and M.-S. Alouini, “Intelligent reflecting surface assisted multi-user MISO communication: Channel estimation and beamforming design,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, pp. 1–1, May 2020.

[92] X. Guan, Q. Wu, and R. Zhang, “Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: Is artificial noise helpful or not?” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, pp. 1–1, Jan. 2020. dawley SD rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz)