

# Um Estudo Sobre os Limites de Viabilidade da Aplicação do Algoritmo MUSIC para a Detecção da Direção de Chegada de Sinais RF

Pedro Henrique Guimarães Ferreira, Cláudia Jacy Barenco Abbas, Sérgio Augusto Barreiros Bittencourt

**Resumo**—Nesse trabalho, uma análise detalhada da performance, em diferentes cenários, do algoritmo MUSIC para detecção de ângulo de chegada é conduzida, bem como seus limites teóricos de viabilidade são identificados e discutidos quanto à distância da fonte, qualidade do canal de comunicação e condição climática.



## 1 Introdução

A detecção da Direção de Chegada (DoA, do inglês *Direction of Arrival*) de sinais consiste em um tópico de interesse em diversas áreas, com aplicações que variam desde a formação de imagens em radares até a confecção de nanossensores biológicos [1], [2].

Como a detecção da DoA é uma etapa fundamental no processo de caracterização da estrutura espacial do entorno dos dispositivos, seu estudo atraiu grande interesse ao longo dos anos, sendo um dos assuntos mais explorados da área de processamento de sinais em arranjos. Dessa forma, diversas técnicas foram desenvolvidas para endereçar o problema, consistindo em duas principais famílias de algoritmos: os não-paramétricos, que dispensam suposições sobre o sistema e são robustos à presença de fontes coerentes, dentro os quais se destacam o DAS e o SVAM, e os paramétricos, como o MUSIC e o ESPRIT, que embora sejam sensíveis a erros de modelagem, em geral apresentam resolução e acurácia consideravelmente superiores [1], [2], [3], [4], [5].

Atualmente, com a popularização da Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) e o aumento massivo do número de sensores e dispositivos inteligentes presentes no mercado o desenvolvimento de uma nova gama de aplicações baseadas em estimação de posicionamento [6], [7] foi impulsionado. Entretanto, a chegada do IoT também impôs novas restrições ao problema de detecção de DoA, adicionando o custo computacional, a escalabilidade e a conectividade à lista de fatores a serem considerados na decisão sobre a viabilidade da adoção de uma determinada solução [6].

Essa demanda crescente por aplicações baseadas em estimação de posicionamento vem gerando adaptações em diversos protocolos de comunicação visando

aprimorar seu suporte, integração e compatibilidade com a detecção de DoA [8], [9], [10], [11]. Recentemente, o protocolo *Bluetooth Low Energy (BLE)* implementou, em sua versão 5.1, alterações em sua camada física para oferecer suporte para a detecção de posicionamento com precisão de cerca de 2cm [11], embora a escolha do algoritmo de detecção tenha sido deixada livre para os fabricantes.

Em adição à atender os requisitos de ordem técnica, para que uma solução de identificação de DoA seja viável é necessário, ainda, que seja garantida a compatibilidade do algoritmo escolhido com as condições esperadas de operação. Em linhas gerais, podemos dividir as condições de operação para detecção de DoA em duas grandes famílias: A de localização *indoor*, cuja performance é afetada principalmente por efeitos relacionados à propagação *multipath*, como refração, difração, interferência, dispersão, desvanescimento e obstrução dos sinais [12], [13], [14], e a localização *outdoor*, cuja influência sobre a performance é exercida preponderantemente apenas pelas perdas no espaço livre (distância), pela relação sinal ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) e eventuais atenuações adicionais relacionadas à condições atmosféricas (chuva, neblina e quantidade de gases na atmosfera) [15], [16], [17], [18].

Nesse artigo, um estudo sobre a viabilidade da aplicação do algoritmo MUSIC para a detecção *outdoor* da DoA em um sistema inteligente, que se comunica utilizando protocolo *BLE* na versão 5.0, será conduzido visando, simultaneamente, determinar, em termos do raio de operação, da qualidade inerente do canal e das condições climáticas, os limites de operação do sistema e permitir uma comparação entre a capacidade de detecção da DoA das versões 5.0, sem suporte nativo à DoA, e 5.1 do *BLE*.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Estimação do Ângulo de Chegada

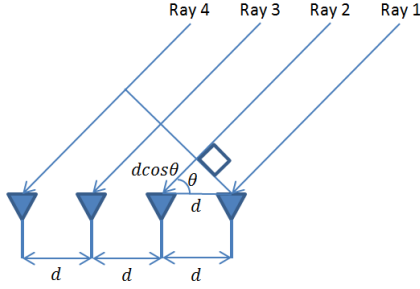


Figura 1. Incidência de Sinais em um arranjo linear uniforme de antenas (ULA). Copyright 2018, RAYmaps

Assumindo uma fonte de sinal puntiforme e localizada em campo distante, o ângulo de chegada pode ser estimado ao se aferir a diferença de fase nos sinais captados por duas ou mais antenas separadas por uma distância conhecida [5], [19], uma vez que as ondas eletromagnéticas se propagam com velocidade constante e conhecida no meio, a diferença de fase entre as antenas será causada unicamente pela diferença de caminhos percorrida pelo sinal para chegar em cada antena. Matematicamente, para duas antenas separadas por uma distância  $d$  e uma onda plana incidindo com um ângulo  $\theta$ , como na figura 2.1, e velocidade de propagação  $c$ , a diferença do tempo de chegada do sinal entre as duas antenas,  $\tau$ , pode ser dada pela Equação 1 [20]:

$$\tau = \frac{d \cdot \cos(\theta)}{c} \quad (1)$$

E, portanto, se a diferença de tempo de chegada entre as antenas  $\tau$  é conhecida, o ângulo de incidência  $\theta$  pode ser isolado em 1 e determinado diretamente a partir da equação 2

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{c \cdot \tau}{d}\right) \quad (2)$$

Para assegurar que nenhuma amostra do sinal será perdido, é necessário que, para cada antena no arranjo, o tempo de propagação do sinal entre a fonte e a antena seja inferior à duração da amostra [5], impondo, assim, uma restrição sobre a largura de banda do sinal. Como, sinais BLE operam na faixa entre 2.4 GHz e 2.485 GHz, a largura de banda é consideravelmente menor do que a frequência central, de forma em que essa restrição não acarreta em restrições adicionais.

### 2.2 Algoritmo MUSIC

Embora a estimação do ângulo de chegada de um sinal possa ser realizada de maneira relativamente

direta pela aplicação da equação 2, para a qual são necessárias apenas duas antenas, essa estimação no domínio do tempo demanda uma medida precisa para a diferença de tempo  $\tau$  entre as antenas, de forma que, para a obtenção de bons resultados, é necessário garantir que as antenas estarão sincronizadas e operando com o mesmo *clock* [21], [22], implicando, assim, em altos custos.

Por outro lado, abordagens no domínio da frequência são desejáveis uma vez que dispensam sincronismo entre as antenas. No entanto, embora seja possível relacionar a diferença de fase dos sinais nas antenas,  $\phi$  com a diferença dos tempos de chegada por meio da equação 3 [5], onde  $\lambda$  representa o comprimento de onda do sinal, a aplicação direta da equação 3 não é eficiente em cenários reais uma vez essa abordagem, por depender de uma medição acurada da fase do sinal nas duas antenas, é bastante sensível ao ruído.

$$\phi = e^{-j2\pi \frac{d \cdot \cos(\theta)}{\lambda}} \quad (3)$$

Nesse cenário, os métodos baseados em estimação espectral por meio de buscas em sub-espacos, como o MUSIC, surgem como uma alternativa para atenuar os efeitos do ruído sobre a estimação, permitindo que as vantagens das abordagens no domínio da frequência sejam exploradas [3], [4], [23].

Para isso, o *Multiple Signal Classification* (MUSIC) busca, por meio da utilização de múltiplas antenas e de múltiplas amostras do sinal, fornecer uma estimativa não-enviesada do ângulo de chegada dos sinais a partir da matriz de correlação dos sinais recebidos, assumindo que, em cada elemento do arranjo, o ruído presente no sinal recebido é gaussiano branco, com média 0 e variância  $\sigma^2$  e independente simultaneamente do sinal e do ruído dos outros elementos do arranjo [5], [19], [24].

Dessa forma, para um arranjo com  $M$  antenas uniformemente separadas e  $P$  sinais cujo ângulo de chegada deve ser estimado, com  $P < M$ , podemos denotar a matriz dos sinais recebidos,  $x$ , de acordo com a equação 4, onde  $A$  é uma matriz  $1 \times M$  onde seu  $j$ -ésimo elemento contém a diferença de fase entre a  $j$ -ésima antena e a antena de referência, podendo ser obtido pela equação 3 – note que, em um arranjo linear uniforme com antenas separadas por uma distância fixa  $y$ , temos  $d = (j - 1) \cdot y$ . Por sua vez,  $s$  é uma matriz  $P \times 1$  cujo  $j$ -ésimo elemento é dado pelo  $j$ -ésimo sinal recebido,  $s_j(t)$  e  $\eta$  é a matriz de ruídos entre cada sinais e cada antena [5], [4], [19].

$$x = A \cdot s + \eta \quad (4)$$

Da mesma forma, a matriz de correlação dos sinais recebidos,  $R_{xx}$ , pode ser obtida, por definição [25], [26], a partir da matriz de sinais recebidos,  $x$ , por meio da equação 5.

$$R_{xx} = \mathbb{E}[xx^*] \quad (5)$$

Ao se substituir a equação 4 na equação 5, obtem-se a equação 6, que relaciona diretamente a correlação dos sinais recebidos,  $R_{xx}$ , com a correlação dos sinais transmitidos,  $R_{ss}$ , e a variância do ruído,  $\sigma^2$ .

$$R_{xx} = AR_{ss}A^* + \sigma^2 I \quad (6)$$

Dessa forma, assumindo que a potência dos sinais seja superior à potência do ruído, podemos esperar que os  $P$  maiores autovalores da matriz de correlação correspondam ao sinal, enquanto os demais  $M - P$  correspondam apenas ao ruído. Dessa forma, é possível realizar uma busca no sub-espço ruidoso ao se empregar a decomposição harmônica de Pisarenko para a estimação do ângulo de chegada dos sinais [27], [28], variando  $\theta$  entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$  na equação 7 e determinando os picos do espectro  $PS(\theta)$ .

$$PS(\theta) = \frac{1}{\|\nu^* A(\theta)\|^2} \quad (7)$$

Onde a equação 7, denominada Estimador de Pisarenko, relaciona um pseudo-espectro,  $PS(\theta)$ , cujo significado está associado à versossimilhança da estimação, com o ângulo de chegada  $\theta$ . Na equação,  $\nu$  denota a matriz dos autovetores associados aos  $M - P$  menores autovalores. Por sua vez,  $A(\theta)$  denota a matriz de diferença de fases  $A$  aplicada no ponto  $\theta$ .

### 3 Procedimentos

Usualmente, a determinação dos limites de viabilidade de uma solução consiste na análise de duas parcelas: uma inerente à solução, relacionada aos parâmetros que influenciam a performance da solução, e outra externa, relacionada com o cenário de operação, de forma em que uma solução é dita viável se é possível encontrar uma solução de compromisso entre os parâmetros inerentes à solução e seu cenário de operação.

Aplicando essa metodologia ao problema de detecção do ângulo de chegada de um sinal *BLE* por meio da aplicação do algoritmo MUSIC, podemos determinar os parâmetros inerentes do MUSIC: o número de antenas utilizado e a relação sinal ruído do sinal recebido. É importante ressaltar que, para um par de antenas transmissora e receptora omni-direcionais, o erro na estimação no MUSIC é invariante ao ângulo de chegada [29]. Por outro lado, o cenário de operação pode ser descrito pela potência do transmissor, a distância entre a fonte e receptor, as condições climáticas - presença de chuva, temperatura ambiente, densidade dos gases na atmosfera -, bem como do nível de ruído no canal.

Considerando que o *BLE 5.1* garante uma precisão de  $2\text{cm}$ , para que um sistema de estimação de

ângulo de chegada com *BLE 5.0* tenha a mesma granularidade do *BLE 5.1*, é necessário que, para cada distância  $d$ , o erro  $\theta_e$  atenda à desigualdade 8.

$$\theta_e \leq 360^\circ \cdot \frac{0.02}{d} \quad (8)$$

Dessa forma, verificaremos, para  $M = 2, 4, 8, 16, 32$  e  $64$  antenas, para cada distância  $d$ , o impacto na potência de transmissão necessária para que o ângulo de chegada seja identificado pelo MUSIC com erro compatível com o *BLE 5.1*, considerando uma propagação sem a presença de chuva e negligenciando as perdas por absorção atmosférica. Analogamente, serão determinadas as perdas por chuva para cada distância  $d$ , para um sinal *BLE* de frequência de  $2.4\text{ GHz}$ , de acordo com a recomendação ITU-838 [30], para taxas de precipitação  $RR = 0, 2.5, 10, 30$  e  $60\text{ mm/h}$ , valores característicos para ausência de chuva, chuva fraca, chuva moderada, chuva forte e tempestade [31], e as perdas por absorção por gases atmosféricos, modeladas pela resolução ITU-636 [32], para valores de humidade absoluta do ar  $\rho = 0, 10, 20$  e  $30\text{ g/m}^3$ , que representam humidades relativas do ar de, respectivamente,  $0\%, 33\%, 67\%$  e  $100\%$  para uma temperatura de  $30^\circ\text{ C}$  [33].

Por fim, serão traçadas curvas relacionando, para cada distância, as potências de transmissão mínimas necessárias para garantir a compatibilidade com a identificação nativa do *BLE 5.1*, para temperaturas equivalentes de ruído  $T_0 = 300\text{K}, 500\text{K}, 1000\text{K}$  e  $2000\text{K}$ , assumindo que todo ruído do sistema possa ser modelado como de natureza térmica  $TN$ , sendo obtido, em decibéis, por meio da equação 9, onde  $BW$  é a largura de banda do sinal, sendo igual à  $85\text{ MHz}$  para uma transmissão *BLE*.

$$TN = 10\log_{10}(k \times T_0) + 10\log_{10}(BW) \quad (9)$$

Como a comunicação entre o transmissor e o receptor é feito por meio de uma rede *BLE*, analisaremos, em passos de  $0.5\text{m}$ , distâncias até o limite de  $d = 430\text{m}$ , determinado empiricamente como a distância máxima de uma comunicação *BLE 5.0 outdoor* para uma camada física PHY 1LE [34]. É importante perceber que a escolha da camada física como PHY 1LE permite que os resultados obtidos sejam estendidos para sistemas *BLE 4.0* ao mesmo tempo em que não implica em perda de generalidade, uma vez que os resultados de [34] permitem representar a escolha de uma camada codificada como na forma de aumento na potência do transmissor.

Já em termos de potência transmitida,  $P_{TX}$ , devemos lembrar que as especificações do *BLE 5.0* estabelecem três diferentes classes de potência: A Classe 3, para transmissões de até  $-30\text{dBw}$ , a Classe 2, com transmissões até  $-26\text{dBw}$  de potência e a

Classe 1, destinada para transmissões com potência máxima de  $-20\text{dBw}$  [35]. Dessa forma, as potências de transmissão válidas estarão limitadas superiormente à  $-20\text{dBw}$ .

## 4 Resultados

Um dos principais desafios da análise de viabilidade proposta é o *trade-off* entre quantidade de antenas e a potência necessária para transmissão. Enquanto um aumento no número de antenas é desejado por aumentar a robustez ao ruído e reduzir a potência de transmissão necessária, ele também implica em aumentos de custo, além de reduzir a compatibilidade com dispositivos *BLE 5.0* já instalados, uma vez que, para atender ao requisito do número mínimo de antenas no arranjo, pode ser necessário adquirir e instalar *hardware* externo.

A figura 2 descreve a potência mínima de transmissão necessária para que, para cada distância, o erro de estimação não ultrapasse a restrição imposta pela equação 8, para um sistema operando à temperatura  $T_o = 300\text{K}$  cuja única fonte de ruído é térmica. Por ela é possível verificar que, embora um aumento na quantidade de antenas de fato reduza a potência transmitida necessária, o ruído térmico da temperatura ambiente é razoavelmente pequeno, de forma em que um dispositivo Classe 3 permitiria uma boa integração do sistema baseado em MUSIC no *BLE 5.0* com o sistema nativo do *BLE 5.1* para qualquer quantidade de antenas, sendo conveniente, assim, selecionar um valor de  $M$  pequeno, como  $M = 2$  ou  $M = 4$ .

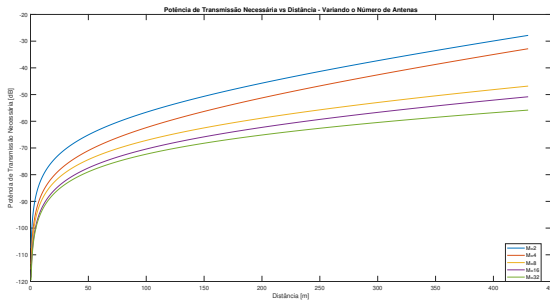


Figura 2. Potência de Transmissão vs Distância para Diferentes Quantidades de Antenas

Por sua vez, considerando que o objeto de análise é um sistema que opera *outdoor*, perdas causadas por absorção por gases atmosféricos ou por chuva também devem ser avaliadas, permitindo que, caso necessário, a potência de transmissão seja adequada para garantir um maior *uptime* e que os limites de operação sejam determinados. Para isso, para cada distância, as perdas por absorção na atmosfera e por chuvas foram representadas nas figuras 3 e 4, respectivamente,

considerando diferentes níveis de humidade e taxas de precipitação.

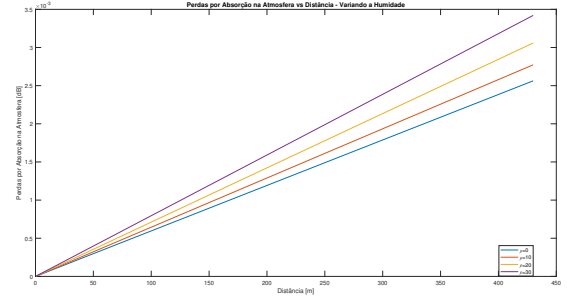


Figura 3. Perdas de Absorção na Atmosfera vs Distância para Diferentes Níveis de Humidade

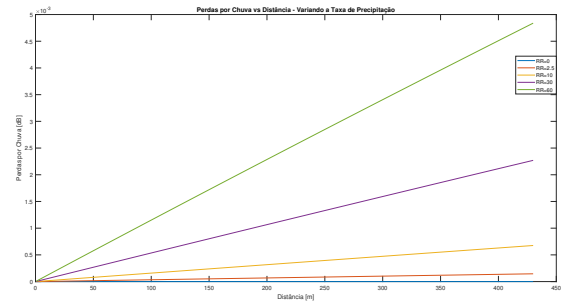


Figura 4. Perdas por Chuva vs Distância para Diferentes Taxas de Precipitação

Uma análise das figuras 3 e 4 revela, entretanto que, na faixa de frequências e distância do *BLE*, as perdas por absorção e chuvas são desprezíveis mesmo em cenários severos, sendo, somadas inferiores à  $0.01\text{dB}$ , sendo, portanto, claro que a estimação do ângulo de chegada em sistemas com tecnologia *BLE* é robusta à variações climáticas, tendo sua dinâmica afetada basicamente por dois fatores: as perdas de espaço livre e o nível de ruído ambiente.

Assim, resta a análise do impacto do nível de ruído sobre a aplicabilidade da solução. Para isso, duas curvas são levantadas, a primeira, apresentada na figura 5, relaciona a potência de transmissão necessária e a distância da fonte para diferentes níveis de ruído para um sistema utilizando apenas duas antenas, enquanto a segunda, ilustrada pela figura 6, estabelece, para cada distância, os limite máximos de ruído tolerável para sistemas com diferentes números de antenas - assumindo, para isso, a utilização de dispositivos de Classe 1, cuja potência transmitida é a maior potência regulamentada pelo padrão *BLE* -, representando efetivamente os limites de operação do sistema.

Enquanto a figura 5 revela que um sistema com apenas duas antenas ainda seria razoavelmente resis-

tente ao ruído térmico, podendo ser implementado por dispositivos de Classe 3 ainda para uma temperatura equivalente de ruído  $T_o = 500K$ . No entanto, para níveis mais elevados de ruído, como  $T_o = 1000K$  e  $T_o = 2000K$ , a estimação só seria possível com dispositivos Classe 3.

Visando estender essa análise, os limites de operação são determinados na figura 6, sendo possível perceber que a quantidade de antenas empregadas tem grande impacto em cenários com a presença de fonte externa de ruído ou em canais instáveis cuja qualidade da conexão possa se deteriorar rapidamente, em contraste com cenários onde a única fonte de ruído é a temperatura ambiente, nos quais o ângulo de chegada pode ser estimado adequadamente por um sistema com apenas duas antenas.

Assim, podemos notar que embora o nível de ruído tolerado decaia de forma hiperbólica com o aumento da distância, o número de antenas utilizado controla a taxa de decaimento. Consequentemente, para níveis de ruído elevados, a utilização de 2 ou 4 antenas é viável apenas para enlaces curtos, enquanto sistemas com 8, 16 e 32 antenas se compoem de maneira similar e apresentam, mesmo a longa distância, boa robustez aos níveis de ruídos.

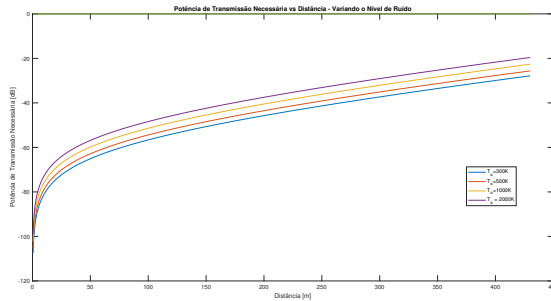


Figura 5. Potência de Transmissão Necessária vs Distância para Múltiplos Níveis de Ruído em um Sistema com Duas Antenas

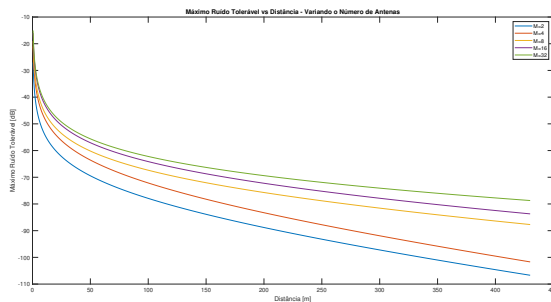


Figura 6. Máximo Ruído Tolerável vs Distância para Diferentes Quantidades de Antenas

Dessa forma, o impacto dos fatores ambientais

e da potência de transmissão sobre a performance do algoritmo MUSIC pode ser sumarizado por meio da figura 7, que relaciona a SNR do sinal recebido e o erro, em graus, na estimação realizada pelo MUSIC. Uma análise cuidadosa da figura 7 permite a identificação de três diferentes faixas de erro para o MUSIC. A primeira, caracterizada por baixos SNRs, têm estimativas com erros não-limitados e comportamento inconsistente. Nesse cenário, uma vez que a potência de ruído domina a potência do sinal, podemos concluir que, em detrimento da frequência característica do sinal, a frequência dominante do ruído é destacada ao se realizar a decomposição espectral, fazendo com que o algoritmo retorne uma estimação aleatória, sendo completamente inútil para o problema em estudo.

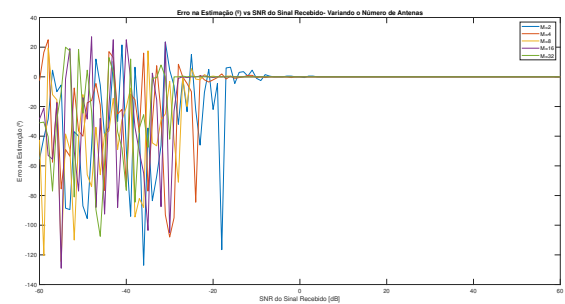


Figura 7. SNR do Sinal Recebido vs Erro na Estimação para Diferentes Quantidades de Antenas

Por sua vez, na segunda zona de operação, caracterizada por SNRs na faixa entre  $-29dB$ , para um sistema com 32 antenas e  $-17dB$ , para um sistema com 2 antenas, a estimação realizada ocorre com erro limitado e oscila em torno do valor verdadeiro do ângulo. Nesse cenário, embora a presença de ruído possa introduzir componentes de frequências espúrias no sinal, provocando um erro na estimação da posição, o algoritmo se comporta de forma consistente, de forma em, para aplicações com maior tolerância ao erro, a operação nessa zona pode ser aceitável. Por fim, a terceira zona de operação apresenta previsões consistentes com estimação exata ou erro mínimo, sendo caracterizada por SNRs elevados, tendo, por exemplo, seu início em  $-24dB$  para um sistema com 32 antenas e  $4dB$ , para um sistema com 2 antenas. O número de antenas utilizadas influencia consideravelmente.

Dessa forma, caso a qualidade esperada do canal, a decisão escolha da quantidade adequada de antenas e da classe de potência de transmissão dos dispositivos pode ser realizada diretamente por meio da figura 7. Da mesma forma, se são conhecidos a distância de transmissão e o nível de ruído do canal e o erro máximo de estimação, a classe de potência adequada pode ser determinada ao se combinar as informações das figuras 6 e 7.

## 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Por meio desse estudo, foi possível demonstrar que, resguardada uma relação apropriada entre a quantidade de antenas empregadas e o nível de ruído aceitável, o algoritmo MUSIC pode ser utilizado para estimar o ângulo de chegada em dispositivos *BLE 5.0* operando *outdoor*, permitindo uma interação com dispositivos com *BLE 5.1*, dotados nativamente dessa funcionalidade, sem provocar deterioração na performance, mesmo para longas distâncias. Esse é resultado se mostra importante em um contexto de IoT uma vez que abre espaço para a integração de novos dispositivos *BLE 5.1* com sistemas *BLE 5.0* já instalados, dispensando assim a necessidade de aquisição de novo *hardware*.

Adicionalmente, por meio da figura 6, os limites de viabilidade do sistema também são determinados, sendo possível estabelecer as faixas de operação apropriadas para o emprego de poucas – distâncias curtas ou ausência de fontes externas (não-térmicas) de ruído – ou muitas – em canais ruidosos, na presença de fontes externas de ruído ou para evitar substituição de *hardware BLE* por *hardware* equivalente de uma classe de potência maior – antenas. Da mesma forma, verificou-se, ainda, que as perdas por chuva e absorção são desprezíveis para o controno do problema, de forma em que o sistema é robusto às condições climáticas.

Por fim, futuros trabalhos poderiam investigar os limites de operação e a compatibilidade entre o algoritmo MUSIC para estimação da direção de chegada em sinais *BLE 5.0* e a funcionalidade nativa do *BLE 5.1* para cenários de propagação *indoor*.

## Referências

- [1] Q. Zhang, H. Abeida, M. Xue, W. Rowe, and J. Li, "Fast implementation of sparse iterative covariance-based estimation for source localization," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 2, pp. 1249–1259, Feb. 2012.
- [2] E. Almazrouei, R. Shubair, and F. Saffre, "Internet of nanothings: Concepts and applications," 09 2018.
- [3] P. Gupta and S. P. Kar, "Music and improved music algorithm to estimate direction of arrival," in *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, April 2015, pp. 0757–0761.
- [4] S. Suhas Balabadrappatruni, "Performance evaluation of doa estimation using matlab," 11 2012.
- [5] H. Tang, "Doa estimation based on music algorithm," Ph.D. dissertation, 2014. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-35058>
- [6] S. Kumar and M. Zaveri, "Event localization based on direction of arrival using quasi random deployment in internet of things," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, Nov. 2018, pp. 170–188.
- [7] A. A. S. Afsa, "Compressive sensing based estimation of direction of arrival in antenna arrays," Ph.D. dissertation, 2017. [Online]. Available: <https://spectrum.library.concordia.ca/983077/>
- [8] Y. Khare, V. Prakash Tiwari, A. Patil, and K. Bala, "Li-fi technology, implementations and applications," 01 2016.
- [9] S. Kulkarni, A. Darekar, and P. Joshi, "A survey on li-fi technology," in *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, March 2016, pp. 1624–1625.
- [10] J. Yang and Y. Chen, "Indoor localization using improved rss-based lateration methods," in *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, Nov 2009, pp. 1–6.
- [11] N. B. Suryavanshi, K. Viswavardhan Reddy, and V. R. Chandrika, *Direction Finding Capability in Bluetooth 5.1 Standard*, 05 2019, pp. 53–65.
- [12] W. S., "Angle of arrival localization in indoor multipath environments," in *International conference on indoor positioning and indoor Navigation*, October 2015.
- [13] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1–1, 2019.
- [14] S. Wielandt and L. Strycker, "Indoor multipath assisted angle of arrival localization," *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2522, Nov. 2017.
- [15] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [16] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [17] P. Nagaraj, "Impact of atmospheric impairments on mmwave based outdoor communication," 06 2018.
- [18] L. Luini and C. Capsoni, "Efficient calculation of cloud attenuation for earth-space applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1136–1139, 2014.
- [19] B. Sharma, G. Singh, and I. Sarkar, "Study of doa estimation using music algorithm," 2015.
- [20] M. Sadiku, *Elements of electromagnetics*. Oxford University Press, 2015.
- [21] "Direction-of-arrival methods (doa) and time difference of arrival (tdoa) position location technique," in *Proceedings of the Twenty-Second National Radio Science Conference, 2005. NRSC 2005.*, March 2005, pp. 173–182.
- [22] H. I. Ahmed, P. Wei, I. Memon, Y. Du, and W. Xie, "Estimation of time difference of arrival (tdoa) for the source radiates bpsk signal," 2013.
- [23] J. G. Proakis and D. K. Manolakis, *Digital Signal Processing (4th Edition)*. Pearson, 2006.

- [24] T.-J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoothing of estimation of coherent signals," *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 806 – 811, 09 1985.
- [25] L. R. Rabiner and B. Gold, *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 1975.
- [26] J. A. Gubner, *Probability and Random Processes for Electrical and Computer Engineers*. Cambridge University Press, 2006.
- [27] V. Pisarenko, "The retrieval of harmonics from a covariance function," *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 33, pp. 347 – 366, 04 2007.
- [28] H. So and K. Chan, "Reformulation of pisarenko harmonic decomposition method for single-tone frequency estimation," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 1128 – 1135, 05 2004.
- [29] E. F. Davide Dardari and M. Luise, *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques*. Elsevier, 2012.
- [30] *Recommendation ITU-R P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union, 2013.
- [31] *Fact sheet No. 3 – Water in the atmosphere*, National Meteorological Library and Archive, 2019.
- [32] *Recommendation ITU-R P.676-10: Attenuation by atmospheric gases*, Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union, 2013.
- [33] "Climate humidity indexes," 2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/climate-meteorology>
- [34] H. Karvonen, C. Pomalaza-raez, K. Mikhaylov, M. Hämäläinen, and J. Iinatti, "Experimental performance evaluation of ble 4 vs ble 5 in indoors and outdoors scenarios," 09 2017.
- [35] *Bluetooth 5 Core Specification*, Bluetooth SIG, 2019.