



DOI: 10.5335/rbca.v13i3.13173

Vol. 13, № 3, pp. 77-85

Homepage: seer.upf.br/index.php/rbca/index

ARTIGO ORIGINAL

Técnicas de geolocalização para tecnologia LoRa: um mapeamento sistemático

Geolocation techniques for LoRa technology: a systematic mapping

Darlan Tomazoni Cavalli¹ and Carlos Amaral Hölbig ¹⁰,1

¹Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Universidade de Passo Fundo, Brasil

*darlantomazoni@gmail.com; holbig@upf.br

Recebido: 08/07/2021. Revisado: 23/10/2021. Aceito: 23/11/2021.

Abstract

Native LoRa geolocation is a commercially emerging feature, inherent to the LoRa wireless technology, which however has important limitations. The main limitation is low accuracy: 20–200 m for gateways equipped with high-resolution clocks, and 1–2 km for simpler gateways. In the last years, researches have been carried out with the main aim of improving these accuracy levels. Thus, this systematic mapping obtains an overview of the state-of-the-art of native LoRa geolocation techniques. A total of 43 papers are mapped, published between 2016 and 2021. Multilateration TDoA/RSSI techniques are the most used, along with a wide range of algorithms that calculate the geographical coordinates, such as analytical methods, statistical methods, machine learning, and fingerprinting. Only 23% of the papers are from real LoRaWAN networks, highlighting a research gap in this regard. Overall, improvements in accuracy levels are observed in virtually all mapped works: 25 m on average for simulated ones or experimented in controlled environments, and 300 m for tested in real signal propagation environments, such as large urban areas.

Keywords: Geolocation; LoRa; Machine Learning; RSSI; TDoA.

Resumo

A geolocalização LoRa nativa é um recurso comercialmente emergente, inerente à tecnologia sem fio LoRa, que, no entanto, tem limitações importantes. A principal limitação é a baixa precisão: 20-200 m para gateways equipados com relógios de alta resolução e 1-2 km para gateways mais simples. Nos últimos anos, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo principal de melhorar esses níveis de precisão. Assim, este mapeamento sistemático apresenta uma visão geral do estado da arte das técnicas de geolocalização LoRa nativas. São mapeados 43 artigos publicados entre 2016 e 2021. As técnicas de multilateração TDoA/RSSI são as mais utilizadas, junto com uma ampla gama de algoritmos que calculam as coordenadas geográficas, como métodos analíticos, métodos estatísticos, aprendizado de máquina e impressão digital. Apenas 23% dos artigos são de redes LoRaWAN reais, destacando uma lacuna de pesquisa a esse respeito. No geral, melhorias nos níveis de precisão são observadas em praticamente todos os trabalhos mapeados: 25 m em média para os simulados ou experimentados em ambientes controlados, e 300 m para testados em ambientes reais de propagação de sinal, como grandes áreas urbanas.

Palavras-Chave: Aprendizado de Máquina; Geolocalização; LoRa; RSSI; TDoA.

1 Introdução

A localização geográfica de dispositivos pode ser realizada de maneira nativa em qualquer tecnologia wireless. Atualmente, todas as principais tecnologias de comunicação de baixa potência e longo alcance (LoRa, NB-IoT e Sigfox) possuem suporte para geolocalização nativa, isto é, sem a inclusão de hardware GPS/GNSS.

Na maioria das aplicações IoT, a inclusão de hardware de geolocalização é inviável, principalmente, devido ao consumo excessivo de energia. Mesmo para o *Low Power GPS*, cujo consumo é de um décimo em comparação aos módulos GPS convencionais, o aumento da complexidade de hardware e o aumento de custo do produto são fatores que restringem a sua utilização (Actility, 2018). A geolocalização nativa é, portanto, uma funcionalidade desejável ou mesmo um requisito em algumas aplicações dentro do universo IoT, porém trata-se de um recurso recente, com limitações práticas e ainda em fases iniciais de aplicação comercial.

Em LoRa, embora a proprietária da tecnologia ofereça o serviço pago *LoRa Cloud Geolocation*, que calcula a localização dos dispositivos por meio de técnicas de multilateração TDoA/RSSI, este tem sido um espaço de pesquisa aberto para soluções independentes. Outras técnicas e algoritmos podem ser combinadas e testadas com o intuito de alcançar melhorias nos níveis de acurácia, de acordo com as características particulares da infraestrutura de rede ou da aplicação.

Tendo isso em vista, neste estudo é realizado um mapeamento sistemático com o objetivo de obter uma visão ampla do estado da arte do assunto, isto é, das técnicas utilizadas em geolocalização LoRa nativa, incluindo as abordagens computacionais e os tipos de experimentação realizados. Não faz parte do escopo o aprofundamento de cada técnica encontrada, mas apenas a sua identificação.

Este trabalho é estruturado da seguinte forma: na Seção 2 são apresentadas a metodologia e os protocolos utilizados para a realização do mapeamento sistemático, juntamente com os resultados obtidos; na Seção 3 é apresentada uma síntese das técnicas de geolocalização e das abordagens computacionais resultantes da pesquisa, juntamente com um submapeamento das técnicas de machine learning; e, por fim, na Seção 4 são apresentadas as considerações finais.

2 Procedimento metodológico

O protocolo de mapeamento sistemático é baseado em Petersen et al. (2008), cujo processo está reproduzido na Tabela 1. Trata-se de uma metodologia originalmente destinada para engenharia de software, que foca na frequência de publicações por categorias dentro do assunto pesquisado. São quatro etapas, onde cada uma produz como resultado uma saída que serve de entrada para a etapa seguinte. Ao final da última etapa, é obtido o mapa sistemático propriamente dito.

Tabela 1: Protocolo de mapeamento sistemático adotado (Petersen et al., 2008).

Etapa	Descrição	Saída
1	Definição da questão de pes-	Escopo de revisão
	quisa	
2	Execução da pesquisa	Lista preliminar de
		artigos
3	Triagem dos artigos	Lista de artigos rele-
	5	vantes
4	Classificação e mapeamento	Mapa sistemático

2.1 Questão de pesquisa

O escopo de revisão é composto pela seguinte questão de pesquisa: "Quais são os tipos de técnicas utilizadas em geolocalização LoRa?" Por "técnicas" entende-se não apenas as que são associadas aos aspectos de propagação das ondas de rádio, mas também os tipos de abordagens computacionais, modelos matemáticos e algoritmos utilizados.

2.2 Execução da pesquisa

As bases de dados utilizadas para a pesquisa foram ACM Digital Library, IEEE Xplore, MDPI, Science Direct e Springer.

A chave de busca compõe-se sobre duas palavras-chave da questão de pesquisa: "LoRa" e "geolocalização", com uma série de termos sinônimos para expandir o alcance da busca. A string de pesquisa resultante é a seguinte:

```
("LoRa" OR "LoRaWAN") AND

(
    "geolocation" OR "geo-location" OR
    "GPS-free" OR "tracking" OR "position" OR
    "positioning" OR "localization" OR
    "localisation" OR "location"
)
```

A busca foi realizada levando em consideração apenas os títulos dos artigos, sem restrições de ano de publicação. A data da última atualização da pesquisa é 10/02/2021.

2.3 Triagem dos artigos

Para a seleção dos estudos relevantes, os critérios de inclusão foram: (1) estudos primários; (2) escritos em inglês; (3) que não embarcam tecnologia GPS/GNSS ou hardware que auxilie na geolocalização; (4) de aplicação *outdoor*; (5) que não envolvem comunicação paralela entre end-devices por meio da camada física, como é o caso de redes do tipo *Wireless Sensor Network* (WSN); e (6) que não abordam geolocalização baseada na presença de conectividade. Estas duas últimas restrições são necessárias, pois as redes LoRaWAN não são orientadas para comunicação entre enddevices, e o longo alcance torna pouco prática a abordagem de geolocalização baseada na presença ou não de sinal. Na Tabela 2 é apresentado o resultado da pesquisa e da triagem realizados.

2.4 Classificação e mapeamento

Finalmente, para a formação do mapa sistemático, cada trabalho foi analisado com o objetivo de extrair as seguintes propriedades: (1) técnicas de geolocalização utilizadas

Tabela 2: Total de estudos resultantes do mapeamento	
sistemático	

Base de dados	Total de estudos	Estudos após tria-
		gem
ACM Digital Li-	5	4
brary		
IEEE Xplore	75	29
MDPI	9	3
Science Direct	4	4
Springer	7	3
Total	100	43

– se por RSSI, TDoA ou outros; (2) modelos ou abordagens computacionais utilizados, ou seja, os tipos de modelos matemáticos e algoritmos empregados para realizar o cálculo das coordenadas geográficas; e (3) o tipo de experimentação realizada. Desta última propriedade, três possibilidades de classificação foram consideradas: (a) propostas teóricas ou simulações, sem experimentação empírica; (b) experimentação empírica em ambientes controlados ou experimentais, ou seja, em áreas desobstruídas, próximas das condições ideais, com protótipos comunicando-se sob linha de visão direta (LoS); e (c) experimentação empírica em ambientes reais de aplicação, como em áreas urbanas, ou com dados provenientes de redes LoRaWAN reais.

3 Resultados e discussão

Na Tabela 3 é apresentado o mapeamento sistemático obtido. No cabeçalho estão relacionados os três grupos de propriedades levantadas, isto é, a técnica de geolocalização, o modelo/abordagem computacional e o tipo de experimentação. A correlação com os artigos (coluna "Ref.") é dada pelas células marcadas com "X". Nota-se que, normalmente, os trabalhos são complexos e podem abordar vários modelos ou técnicas simultaneamente. Na parte inferior é apresentado o somatório de incidência de artigos para cada coluna, bem como a legenda com o significado das siglas utilizadas no cabeçalho. Um histograma do ano de publicação dos artigos é apresentado na Fig. 1. Percebese que a geolocalização LoRa é uma área de pesquisa recente, em fases iniciais de aplicação, que coincide com o próprio avanço e popularização da tecnologia.

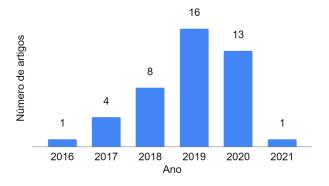


Figura 1: Número de artigos versus ano de publicação.

Nos itens a seguir, essas informações são exploradas e discutidas, sem, no entanto, entrar em detalhes ou realizar descrições e comparativos completos. É realizada a identificação nominal das técnicas de geolocalização utilizadas, dos modelos e abordagens computacionais e dos tipos de experimentação. Por último, uma ênfase é dada à exposição das técnicas de machine learning, tendo em vista o terreno promissor observado nos trabalhos para esse tipo de abordagem.

3.1 Técnicas de geolocalização

As técnicas de geolocalização observadas nos estudos são fundamentadas em quatro propriedades físicas da propagação dos sinais de rádio: intensidade (RSSI), tempo de percurso (ToA e TDoA), ângulo (AoA) e fase (PoA).

Quase a totalidade dos estudos mapeados são baseados em geolocalização por RSSI (60%), TDoA (28%), ou em uma combinação destas (7%). Na prática, as técnicas baseadas em RSSI são as de menor custo, pois não necessitam de recursos especiais de hardware, uma vez que são utilizadas as leituras de intensidade do sinal já presentes nos metadados das mensagens, entretanto, são consideravelmente mais imprecisas. Em contrapartida, as técnicas baseadas em tempo de percurso do sinal são mais acuradas, porém requerem timestamps de alta resolução e relógios precisamente sincronizados nos dispositivos de referência. A maior ocorrência de artigos voltados para geolocalização por RSSI pode ser explicada pelo interesse em melhorar a acurácia dessa técnica, dado o seu menor custo e complexidade, além da incompatibilidade de muitos gateways com os requisitos necessários para TDoA.

Dentre os estudos mapeados, há apenas uma ocorrência de solução baseada em ToA Tumuhairwe and Amanquah (2019), técnica similar ao TDoA. A diferença básica entre as duas está na maneira como os timestamps de alta resolução são produzidos e manipulados. Em ToA, os timestamps são gerados pelo transmissor no momento da transmissão, e enviados juntamente com a mensagem. A localização é determinada comparando-se o tempo absoluto de chegada do sinal em cada receptor, sendo um exemplo típico de aplicação o sistema GPS. Em TDoA, porém, os timestamps são produzidos pelo receptor no momento de recepção, e não são enviados juntamente com a mensagem. Nesse caso, a localização é dada pela diferença relativa entre os tempos de chegada do sinal. A inviabilidade da geolocalização ToA em LoRa está na necessidade de embarcar relógios de alta resolução em cada end-device, o que vai contra as propostas de baixo custo e de baixa complexidade da tecnologia.

A técnica de geolocalização por AoA, também conhecida como triangulação, é uma alternativa de geolocalização baseada no ângulo de incidência do sinal nos gateways. Sua principal vantagem é que são necessários apenas dois gateways para que o dispositivo transmissor seja localizado, enquanto nas técnicas de multilateração é preciso que pelo menos três gateways recebam a mensagem. Conhecendose o ângulo de incidência do sinal em dois gateways, a posição pode ser determinada por meio de trigonometria simples. Como desvantagem mais importante, essa técnica necessita de antenas duplas ou de uma matriz de an-

Tabela 3: Mapa sistemático das técnicas de geolocalização LoRa.

		Mapa :				tecino									Г		. ~ .		
Ref.	Técnica de geolocalização RSSI TDoA ToA AoA PoA					МΔ	Modelo/Abordagem computacional MA ME INT GA FP SAT DEC CL M									Experimentação T/S C R			
(Pospisil et al., 2020)	ROOI	X	1011	HOH	1011	X	X	1111	GA	11	OAI	DLC	CL	X	1/0	X			
(Aernouts et al., 2018)	X	21				11	11			X				X			X		
(Aernouts et al., 2020b)		X		X		X	X										X		
(Aernouts et al., 2020a)		X		X		X	X								X				
(Anagnostopoulos and Kalousis, 2019)	X									X				X			X		
(Anjum et al., 2020)	X					X				X				X		X			
(Baik et al., 2018)	X			X		X										X			
(Bakkali et al., 2017)		X					X								X				
(Bouras et al., 2021)	X					X									X				
(Bouras et al., 2020b)		X				X								X	X				
(Bouras et al., 2020a)	X					X										X			
(Carrino et al., 2019)		X								X				X	X				
(Chen et al., 2019)	X	X												X		X			
(Cho et al., 2019)		X												X	X				
(Choi et al., 2018)	X						X	X		X						X			
(Cui et al., 2018)	X					X	X								X				
(Daramouskas et al., 2019)	X													X			X		
(Dieng et al., 2019)	X					X										X			
(Fargas and Petersen, 2017)		X			**	X										X			
(Gu et al., 2019)	37				X	X	X			37		37		37	X		37		
(Janssen et al., 2020)	X	37				X	37			X		X		X	3.7		X		
(Kremo et al., 2017)	37	X				37	X							37	X	37			
(Kwasme and Ekin, 2019)	X					X							v	X		X X			
(Lam et al., 2018) (Lam et al., 2017)	X X					X							X X			X X			
(Lam et al., 2017) (Lam et al., 2019)	X					X							X			X			
(Lain et al., 2019) (Li et al., 2018)	X					Α	X						Λ			X			
(Lin and Zeng, 2019)	Λ	X					X									X			
(Lin et al., 2020)	X	21				X	21			X	X			X		21	X		
(Lin et al., 2019)	X					X										X			
(Mackey and Spachos, 2019)	X					X										X			
(Pandangan and Talampas, 2020)	X	X								X				X			X		
(Pimpinella et al., 2020)	X							X		X				X		X			
(Plets et al., 2018)	X	X				X	X										X		
(Podevijn et al., 2018)		X				X											X		
(Purohit et al., 2020)	X									X				X	İ		X		
(Radeta et al., 2020)	X					X										X			
(Sanchez et al., 2019)	X					X										X			
(Savazzi et al., 2019)	X					X	X									X			
(Tumuhairwe and Amanquah, 2019)			X			X										X			
(Vazquez-Rodas et al., 2020)	X					X								X		X			
(Verbeke et al., 2016)	37	X				X			37					37	37	X			
(Zhou et al., 2019)	X					X			X					X	X				
				7	Fotal de	artigos													
43	29	15	1	3	1	29	12	2	1	10	1	1	3	17	10	23	10		
		_				enda													
RSSI		ed Signal			itor	MA			alíticos	T/S									
TDoA	Time Difference of Arrival		ME	Métodos estatísticos C Ambientes cont Interpolação R Ambientes reais															
ToA		f Arrival				INT					R	Ambi	entes	reais d	e aplic	açao			
AoA		of Arrival				GA			Genéti	icos									
PoA	rnase	of Arrival				FP		erprinti											
						SAT		as de sa											
						DEC CL		de deci	ISdO										
						CL ML		ering hine lea	arnina										
						TATE	IviaCl	11116 166	arımıg										

tenas em cada gateway, o que aumenta a complexidade e o custo das instalações. No mapa sistemático, apenas três estudos empregam geolocalização AoA, no entanto, todos o fazem em conjunto com as técnicas RSSI ou TDoA, o que indica uma aplicabilidade secundária, mais direcionada ao auxílio das técnicas principais.

Por último, o princípio de geolocalização baseado na fase de chegada do sinal (PoA) é uma técnica apresentada apenas por Gu et al. (2019). Consiste em uma proposta teórica e alternativa às técnicas baseadas em RSSI e TDoA. Segundo o autor, é um método mais promissor do que estes, em razão das limitações básicas que sofrem em ambientes reais. Contudo, o método PoA possui desafios importantes

ainda não testados satisfatoriamente na prática, como a influência da temperatura e o efeito causado pelas flutuações nas frequências das portadoras. Sua principal desvantagem é a necessidade de gateways especiais equipados com o recurso de medição de fase proposto.

3.2 Modelos e abordagens computacionais

Identificou-se uma grande variedade de modelos e abordagens computacionais utilizadas para o cálculo de geolocalização, de modo que, para fins de simplificação, foram organizados nas seguintes categorias: métodos analíticos (MA), métodos estatísticos (ME), interpolação (IP),

Algoritmos Genéticos (GA), fingerprinting (FP), mapas de satélite (SAT), algoritmos de decisão (DEC), clustering (CL) e machine learning (ML). Essas categorias são, ainda, classificadas em dois grupos: (1) abordagens principais (MA, ML, ME e FP), com maior ocorrência nos artigos; e (2) abordagens complementares (CL, INT, GA, SAT e DEC), presentes em poucas publicações.

3.2.1 Abordagens principais

A abordagem mais frequente, e também a mais básica, são os métodos analíticos (MA), presente em 67% dos estudos. Utilizam modelos matemáticos determinísticos e geometria euclidiana para o cálculo da localização. O modelo básico mais utilizado nos casos que utilizam geolocalização por RSSI é o modelo de Atenuação de Percurso em Espaço Livre, ou Path-Loss Model (PLM), em conjunto com a interseção de circunferências em espaço plano. No caso de TDoA, o modelo mais básico utilizado é a interseção de hipérboles em espaço plano. Além dessas pode-se citar outras, tais como modelos de interface esférica, eliminação iterativa e algoritmos de geolocalização clássicos, como o algoritmo de Fang (1990) e o algoritmo de Foy (1976). Embora tenham o maior número de ocorrências, os métodos analíticos apresentam dificuldades diante das complexidades de propagação do sinal LoRa, sendo especialmente afetados pelo fenômeno conhecido como desvanecimento multipercurso, que consiste na tendência de atenuação do sinal após o mesmo sofrer múltiplas reflexões e interferir consigo mesmo no ambiente de propagação.

Em segundo lugar estão as técnicas de machine learning (ML), utilizadas em 40% dos estudos. Para este grupo em particular, foi realizado um submapeamento das técnicas, apresentado na Tabela 4, que consiste em um detalhamento da coluna "ML" da Tabela 3. A coluna referente à abordagem por fingerprinting foi mantida com o intuito de demonstrar que a maior parte dos estudos exploram o conceito de geolocalização híbrido por RSSI-FP. Na categoria das técnicas de machine learning estão incluídos algoritmos de regressão, de classificação e de redes neurais. Dentre os algoritmos de regressão utilizados, como o método dos mínimos quadrados, estão incluídos também os métodos Support Vector Regression (SVR) e Smoothing Spline. Na subcategoria dos algoritmos de classificação, estão presentes os métodos k-Nearest-Neighbors (kNN) e Random Forest. Por sua vez, as redes neurais artificiais (ANN) ocorrem em 16% das publicações, apresentando a seguinte diversidade de arquiteturas: redes densas (DNN) supervisionadas e semi-supervisionadas, redes convolucionais (CNN) e redes Long Short-Term Memory (LSTM), que são um tipo de redes neurais recorrentes (RNN).

Os trabalhos que exploram a utilização de arquiteturas de redes neurais, embora poucos, demonstram uma vantagem promissora para esse tipo de abordagem, apontando para uma melhor afinidade com as complexidades de propagação do sinal LoRa. No entanto, apenas 7 dos 43 artigos mapeados utilizam redes neurais, onde somente três são experimentados em ambientes reais de aplicação. Destes últimos, todos fazem uso do mesmo conjunto de dados originalmente levantado e publicado por Aernouts et al. (2018), obtidos empiricamente por meio do trânsito de veículos equipados com end-devices de aferição. Há nesse ponto uma escassez de trabalhos para uma validação mais

consistente da utilização de deep learning no problema de geolocalização LoRa nativa.

Em terceiro lugar estão os métodos estatísticos (ME), presentes em 30% das publicações. São métodos que estimam a geolocalização com base em modelos probabilísticos. Cita-se, nesta categoria, métodos como redes discretas, inferência bayesiana, *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), Filtro de Wiener, Filtro de Kalman, *Cramér-Rao Lower Band* (CRLB) e o algoritmo de Chan and Ho (1994).

Por último nesta categoria está a técnica de fingerprinting (FP), que ocorre em 24% dos estudos. Trata-se de uma técnica alternativa em que a geolocalização é baseada no mapeamento empírico realizado previamente em uma determinada área geográfica. Diferente da multilateração e de outras técnicas convencionais que são baseadas na determinação de distâncias, o fingerprinting determina a localização geográfica com base na comparação de padrões característicos. Esse mapeamento corresponde, portanto, à "impressão digital" única daquela área, que depende de características ambientais como construções, estradas, relevo, etc. Na maioria dos artigos, essa abordagem é tomada em conjunto com a geolocalização por RSSI.

3.2.2 Abordagens complementares

Além das abordagens principais, algumas abordagens complementares, ou seja, menos frequentes, foram observadas. A mais utilizada delas, o *clustering* (CL), é aplicado como parte dos algoritmos propostos em três publicações de Lam et al. (2018, 2017, 2019). Na categoria de métodos de interpolação (INT), foram identificados os algoritmos *Graph-Based Interpolation* (Pimpinella et al., 2020) e *Radial Basis Function Interpolation* (RBF) (Choi et al., 2018). Há utilização de algoritmos genéticos (GA) por Zhou et al. (2019). Por fim, na categoria de algoritmos de decisão (DEC), o algoritmo *Extended Min Max Algorithm* (EMM) é utilizado por Janssen et al. (2020).

Um método que chama a atenção devido aos resultados obtidos é o proposto por Lin et al. (2020), que utiliza imagens de satélite (SAT) para gerar mapas virtuais de fingerprinting. Imagens de satélite de alta resolução são utilizadas para treinar um modelo que identifica diferentes tipos de terreno, como construções, florestas, campos, água e áreas rurais, e as associa aos diferentes parâmetros empíricos obtidos para o modelo de atenuação de percurso (PLM). O resultado são mapas que preveem a intensidade de sinal esperadas para aquela região, utilizados então como referência para estimar a localização dos dispositivos.

3.3 Tipos de experimentação e níveis de acurácia

Ainda na Tabela 3 nota-se que apenas 10 dos 43 trabalhos realizam suas experimentações em ambientes reais de operação, ou seja, fazem uso de dados provenientes de redes LoRaWAN instaladas em área urbana ampla. A maioria são trabalhos fundamentados em experimentações simuladas ou em redes protótipo montadas em ambientes de propagação favorável.

O principal indicador da eficácia de um sistema de geolocalização é a acurácia, isto é, o erro, em metros, entre a posição calculada e a posição real. Por meio desse indicador, é possível comparar objetivamente a eficiência das diferentes técnicas de geolocalização. Na Fig. 2 é apre-

	-	: Subm	-								_					
Ref.	Técnica de geolocalização					FP				nachine					ıtação	
	RSSI	TDoA	ToA	AoA	PoA		REG	SVR	SS	kNN	RF	DT	ANN	T/S	С	R
(Pospisil et al., 2020)		X					X								X	
(Aernouts et al., 2018)	X					X				X						X
(Anagnostopoulos and Kalousis, 2019)	X					X							X			X
(Anjum et al., 2020)	X					X	X	X	X		X	X			X	
(Bouras et al., 2020b)		X					X							X		
(Carrino et al., 2019)		X				X							X	X		
(Chen et al., 2019)	X	X											X		X	
(Cho et al., 2019)		X											X	X		
(Daramouskas et al., 2019)	X												X			X
(Janssen et al., 2020)	X					X	X	X		X	X					X
(Kwasme and Ekin, 2019)	X						X								X	
(Lin et al., 2020)	X					X					X					X
(Pandangan and Talampas, 2020)	X	X				X				X	X					X
(Pimpinella et al., 2020)	X					X							X		X	
(Purohit et al., 2020)	X					X							X			X
(Vazquez-Rodas et al., 2020)	X						X								X	
(Zhou et al., 2019)	X						X							X		
				То	tal de a	rtigos										
17	13	6	0	0	0	9	7	2	1	3	4	1	7	4	6	7
					T	1.										
neci	Dans'		C4	l. T., J:	Legen		Dan	~-			m/c	m. f				
RSSI	Received Signal Strength Indicator					REG	Regre		w Do	.acciar	T/S		rico/sim			
TDoA	Time Difference of Arrival					SVR	Support Vector Regression C Ambientes co Smoothing Spline R Ambientes re						eais de aplicação			
ToA						SS					R	Ami	nentes i	eais de	apiic	aça0
AoA		of Arrival				kNN		ırest-Ne) i S						
PoA	Pnase	of Arrival	!			RF	капас	om Fore	Sί							

DT

Decision Trees Artificial Neural Networks

Tabela 4: Submapeamento das técnicas de machine learning

sentado um panorama dos níveis de acurácia obtidos nos estudos. Três grupos são evidentes: alta acurácia (< 100 m), média acurácia (entre 100 e 500 m) e baixa acurácia (uma ocorrência na faixa de 4 km).

Fingerprinting

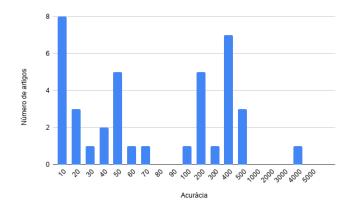


Figura 2: Distribuição dos níveis de acurácia obtidos nos estudos.

O grupo que apresenta alta acurácia corresponde à maioria dos estudos de experimentação teórica, simulados ou testados em ambientes externos controlados. O baixo erro é devido, principalmente, às condições favoráveis ou próximas das condições ideais em que os protótipos foram testados.

O grupo de média acurácia é composto, na maior parte, por estudos experimentados em ambientes reais de aplicação. Nessa categoria, é observada uma média de acurácia de 300 m, com desvio padrão de 120 m. Este, portanto, pode ser considerado o nível de erro esperado para a geolocalização LoRa instalada em ambientes urbanos. Nota-se que é um valor próximo da geolocalização proprietária por TDoA para esse tipo de ambiente. Além disso, comprovase que os níveis das técnicas baseadas em RSSI podem ser consideravelmente melhorados.

Por fim, o estudo que apresenta acurácia na ordem de 4 km corresponde a um caso atípico. Trata-se de uma aplicação para a localização de embarcações em alto-mar, onde esse nível de precisão é aceitável (Radeta et al., 2020).

4 Conclusão

A geolocalização LoRa nativa é um tema recente e um problema em aberto em meio às publicações científicas. A necessidade de se localizar geograficamente os dispositivos, bem como do mercado em potencial nessa área, são percepções que têm acompanhado a popularização da tecnologia. A tentativa de melhorar a acurácia em meio às condições adversas em que as redes LoRaWAN operam é uma temática recorrente. A técnica mais pesquisada é a geolocalização por RSSI, seguida pela técnica TDoA. Os algoritmos e modelos mais utilizados são os métodos analíticos, estatísticos, machine learning e fingerprinting. Os níveis de acurácia obtidos em ambientes reais de aplicação estão na faixa de 300 m, enquanto em simulações e ambientes controlados os níveis de acurácia situam-se na faixa de 25 m, o que é um valor pouco realista para as redes LoRaWAN reais. Os níveis de acurácia são, portanto, suscetíveis a melhorias dependendo do tipo de abordagem computacional utilizada, porém observa-se um limite prático na ordem das centenas de metros. Identifica-se, por

fim, uma lacuna de pesquisa com um viés promissor relacionada ao teste de redes neurais ou deep learning a partir de dados provenientes de redes LoRaWAN reais.

Referências

- Actility (2018). Actility's iot geolocation helps to protect workers and assets. Disponível em https://www.actility.com/iot-geolocation-worker-safety-asset-protection/.
- Aernouts, M., Berkvens, R., Van Vlaenderen, K. and Weyn, M. (2018). Sigfox and lorawan datasets for fingerprint localization in large urban and rural areas, *Data* 3(2). https://doi.org/10.3390/data3020013.
- Aernouts, M., BniLam, N., Berkvens, R. and Weyn, M. (2020a). Simulating a Combination of TDoA and AoA Localization for LoRaWAN, in L. Barolli, P. Hellinckx and J. Natwichai (eds), Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, Springer International Publishing, Cham, pp. 756–765. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33509-0_71.
- Aernouts, M., BniLam, N., Berkvens, R. and Weyn, M. (2020b). TDAoA: A combination of TDoA and AoA localization with LoRaWAN, *Internet of Things* 11: 100236. https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100236.
- Anagnostopoulos, G. G. and Kalousis, A. (2019). A Reproducible Comparison of RSSI Fingerprinting Localization Methods Using LoRaWAN, 2019 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/WPNC47567.2019.8970177.
- Anjum, M., Khan, M. A., Hassan, S. A., Mahmood, A., Qureshi, H. K. and Gidlund, M. (2020). RSSI Fingerprinting-Based Localization Using Machine Learning in LoRa Networks, *IEEE Internet of Things Magazine* 3(4): 53-59. https://doi.org/10.1109/IOTM.0001.2000019.
- Baik, K. J., Lee, S. and Jang, B. J. (2018). Hybrid RSSI-AoA Positioning System with Single Time-Modulated Array Receiver for LoRa IoT, 2018 48th European Microwave Conference, EuMC 2018 pp. 1133—1136. https://doi.org/10.23919/EuMC.2018.8541736.
- Bakkali, W., Kieffer, M., Lalam, M. and Lestable, T. (2017). Kalman filter-based localization for Internet of Things LoRaWAN™ end points, 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292242.
- Bouras, C., Gkamas, A., Kokkinos, V. and Papachristos, N. (2020a). IoT Geolocation Performance Using Lo-RaWAN, in L. Barolli, F. Amato, F. Moscato, T. Enokido and M. Takizawa (eds), *Advanced Information Networking and Applications*, vol. 1151, Springer International Publishing, Cham, pp. 229–239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44041-1_21.
- Bouras, C., Gkamas, A., Kokkinos, V. and Papachristos, N. (2020b). Time Difference of Arrival Localization Study

- for SAR Systems over LoRaWAN, *Procedia Computer Science* 175: 292–299. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.043.
- Bouras, C., Gkamas, A., Kokkinos, V. and Papachristos, N. (2021). Real-Time Geolocation Approach through LoRa on Internet of Things, 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN), pp. 186–191. https://doi.org/10.1109/ICOIN50884.2021.9333860.
- Carrino, F., Janka, A., Abou Khaled, O. and Mugellini, E. (2019). LoRaLoc: Machine Learning-Based Fingerprinting for Outdoor Geolocation using LoRa, 2019 6th Swiss Conference on Data Science (SDS), pp. 82–86. https://doi.org/10.1109/SDS.2019.000-2.
- Chan, Y. T. and Ho, K. C. (1994). A simple and efficient estimator for hyperbolic location, *IEEE Transactions on Signal Processing* **42**(8): 1905–1915. https://doi.org/10.1109/78.301830.
- Chen, Y., Hsu, C., Huang, C. and Hung, H. (2019). Outdoor Localization for LoRaWans Using Semi-Supervised Transfer Learning with Grid Segmentation, 2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/VTS-APWCS. 2019.8851646.
- Cho, J., Hwang, D. and Kim, K. (2019). Improving TDoA Based Positioning Accuracy Using Machine Learning in a LoRaWan Environment, 2019 International Conference on Information Networking (ICOIN), pp. 469–472. https://doi.org/10.1109/ICOIN.2019.8718160.
- Choi, W., Chang, Y.-S., Jung, Y. and Song, J. (2018). Low-Power LoRa Signal-Based Outdoor Positioning Using Fingerprint Algorithm, *ISPRS International Journal of Geo-Information* **7**(11). https://doi.org/10.3390/ijgi7110440.
 - URL: https://www.mdpi.com/2220-9964/7/11/440
- Cui, Z., Cheng, X., Ding, N., Wang, W., Wang, X. and Li, M. (2018). Research and implementation of network location algorithm based on LoRa system, *ACM International Conference Proceeding Series* pp. 239–245. https://doi.org/10.1145/3290420.3290455.
- Daramouskas, I., Kapoulas, V. and Paraskevas, M. (2019). Using Neural Networks for RSSI Location Estimation in LoRa Networks, 2019 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA), pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/IISA.2019.8900742.
- Dieng, O., Pham, C. and Thiare, O. (2019). Outdoor Localization and Distance Estimation Based on Dynamic RSSI Measurements in LoRa Networks: Application to Cattle Rustling Prevention, International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications 2019-Octob: 1–6. https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923542.
- Fang, B. T. (1990). Simple solutions for hyperbolic and related position fixes, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **26**(5): 748–753. https://doi.org/10.1109/7.102710.

- Fargas, B. C. and Petersen, M. N. (2017). GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs, GIoTS 2017 Global Internet of Things Summit, Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/GIOTS.2017.8016251.
- Foy, W. H. (1976). Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **AES-12**(2): 187–194. https://doi.org/10.1109/TAES.1976.308294.
- Gu, C., Jiang, L. and Tan, R. (2019). LoRa-Based Localization: Opportunities and Challenges, *Proceedings of the 2019 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, EWSN '19, Junction Publishing, USA, pp. 413–418. Disponível em https://dl.acm.org/doi/10.5555/3324320.3324420.
- Janssen, T., Berkvens, R. and Weyn, M. (2020). Benchmarking RSS-based localization algorithms with LoRaWAN, Internet of Things 11: 100235. https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100235.
- Kremo, H., Farrell, T., Tallon, J., McDonald, D. and Doyle, L. (2017). A method to enhance ranging resolution for localization of LoRa sensors, 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292386.
- Kwasme, H. and Ekin, S. (2019). RSSI-Based Localization Using LoRaWAN Technology, *IEEE Access* 7: 99856-99866. https://doi.org/10.1109/access.2019.2929212.
- Lam, K., Cheung, C. and Lee, W. (2018). New RSSI-Based LoRa Localization Algorithms for Very Noisy Outdoor Environment, 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Vol. 02, pp. 794–799. https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2018.10340.
- Lam, K. H., Cheung, C. C. and Lee, W. C. (2017). LoRa-based localization systems for noisy outdoor environment, *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications* **2017-Octob**: 278–284. https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115843.
- Lam, K. H., Cheung, C. C. and Lee, W. C. (2019). RSSI-Based LoRa Localization Systems for Large-Scale Indoor and Outdoor Environments, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **68**(12): 11778–11791. https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2940272.
- Li, Y., He, Z., Li, Y., Xu, H., Pei, L. and Zhang, Y. (2018). Towards Location Enhanced IoT: Characterization of LoRa Signal For Wide Area Localization, 2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), pp. 1–7. https://doi.org/10.1109/UPINLBS.2018.8559844.
- Lin, Q. and Zeng, J. (2019). Application of Internet of Things Positioning System Based on LoRa System to Community Correction, 2019 IEEE 11th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), pp. 133–136. https://doi.org/10.1109/ICAIT.2019.8935934.

- Lin, Y., Dong, W., Gao, Y. and Gu, T. (2020). SateLoc: A Virtual Fingerprinting Approach to Outdoor LoRa Localization using Satellite Images, 2020 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), pp. 13–24. https://doi.org/10.1109/IPSN48710.2020.00-50.
- Lin, Y., Sun, C. and Huang, K. (2019). RSSI Measurement with Channel Model Estimating for IoT Wide Range Localization using LoRa Communication, 2019 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), pp. 1–2. https://doi.org/10.1109/ISPACS48206.2019.8986229.
- Mackey, A. and Spachos, P. (2019). LoRa-based Localization System for Emergency Services in GPS-less Environments, INFOCOM 2019 IEEE Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPS 2019 pp. 939-944. https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2019.8845189.
- Pandangan, Z. A. and Talampas, M. C. R. (2020). Hybrid LoRaWAN Localization using Ensemble Learning, 2020 Global Internet of Things Summit (GIoTS), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/GIOTS49054.2020.9119520.
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S. and Mattsson, M. (2008). Systematic mapping studies in software engineering, 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, EASE 2008. https://doi.org/10.14236/ewic/ease2008.8.
- Pimpinella, A., Redondi, A. E. C., Nicoli, M. and Cesana, M. (2020). Machine Learning Based Localization of Lo-RaWAN Devices via Inter-Technology Knowledge Transfer, 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145033.
- Plets, D., Podevijn, N., Trogh, J., Martens, L. and Joseph, W. (2018). Experimental Performance Evaluation of Outdoor TDoA and RSS Positioning in a Public LoRa Network, IPIN 2018 9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (September): 1–8. https://doi.org/10.1109/IPIN.2018.8533761.
- Podevijn, N., Trogh, J., Karaagac, A., Haxhibeqiri, J., Hoebeke, J., Martens, L., Suanet, P., Hendrikse, K., Plets, D. and Joseph, W. (2018). TDoA-based outdoor positioning in a public LoRa network, *IET Conference Publications* **2018**(CP741): 5–8. https://doi.org/10.1049/cp.2018.0574.
- Pospisil, J., Fujdiak, R. and Mikhaylov, K. (2020). Investigation of the Performance of TDoA-Based Localization Over LoRaWAN in Theory and Practice, *Sensors* **20**(19). https://doi.org/10.3390/s20195464.
- Purohit, J., Wang, X., Mao, S., Sun, X. and Yang, C. (2020). Fingerprinting-Based Indoor and Outdoor Localization with LoRa and Deep Learning, GLOBECOM 2020 2020 IEEE Global Communications Conference, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322261.
- Radeta, M., Ribeiro, M., Vasconcelos, D., Noronha, H. and Nunes, N. J. (2020). LoRaquatica: Studying Range

- and Location Estimation using LoRa and IoT in Aquatic Sensing, 2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156088.
- Sanchez, C., Arpi, B., Vazquez-Rodas, A., Astudillo-Salinas, F. and Minchala, L. I. (2019). Performance evaluation of RSSI-based positioning system with low-cost LoRa devices, PE-WASUN 2019 Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, Association for Computing Machinery, Inc, pp. 37–44. https://doi.org/10.1145/3345860.3361512.
- Savazzi, P., Goldoni, E., Vizziello, A., Favalli, L. and Gamba, P. (2019). A wiener-based rssi localization algorithm exploiting modulation diversity in lora networks, *IEEE Sensors Journal* 19(24): 12381–12388. https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2936764.
- Tumuhairwe, R. and Amanquah, N. (2019). Determining the Location of a Bus in Real-Time Using LoRa Technology, 2019 IEEE AFRICON, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/AFRICON46755.2019.9133958.
- Vazquez-Rodas, A., Astudillo-Salinas, F., Sanchez, C., Arpi, B. and Minchala, L. I. (2020). Experimental Evaluation of RSSI-based Positioning System with Lowcost LoRa Devices, *Ad Hoc Networks* p. 102168. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102168.
- Verbeke, T., Olti, E. and Munteanu, A. (2016). Development and Demonstration of a LoRa TDOA-Based Localisation System: Demo, *Proceedings of the 10th International Conference on Distributed Smart Camera*, ICDSC '16, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 206–207. https://doi.org/10.1145/2967413.2974031.
- Zhou, L., Yang, N. and Zhang, K. (2019). Positioning Improvement Algorithm Based on LoRa Wireless Networks, in X. Sun, Z. Pan and E. Bertino (eds), Artificial Intelligence and Security. ICAIS 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11634, Springer International Publishing, Cham, pp. 188–198. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24271-8_17.