

# Método de Calibração de Alcance em Radar FMCW de 77 GHz para Aplicações Automotivas

Híterson Silva, João Rocha, Felipe Sobrinho, Rafael Silva, Evandro Teixeira, Daniel C. Araújo, Sébastien Rondineau

**Resumo**—Este trabalho apresenta um método de calibração de alcance para radares automotivos FMCW, utilizando o radar AWR2944EVM da Texas Instruments. A abordagem empírica envolve um ambiente de teste aberto, com baixa reflexão, em que as distâncias medidas pelo radar são comparadas às reais, obtidas com trena a laser. Um algoritmo em Python estima o viés médio, reduzindo o erro médio a zero após a compensação. O desvio padrão residual, de 0,1254 metros, indica a persistência de ruídos e variações no hardware. A calibração foi eficaz, mas requer aprimoramentos para mitigar a dispersão dos erros em ambientes não controlados.

**Palavras-Chave**— Calibração de radar, FMCW, AWR2944EVM, Processamento de sinais, Algoritmo em Python.

**Abstract**—This work presents a range calibration method for FMCW automotive radars using the AWR2944EVM radar from Texas Instruments. The empirical approach involves an open test environment with low reflection, where radar-measured distances are compared to actual distances obtained with a laser tape measure. A Python algorithm estimates the mean bias, reducing the average error to zero after compensation. The residual standard deviation of 0.1254 meters indicates the persistence of noise and hardware variations. The calibration was effective but requires improvements to mitigate error dispersion in uncontrolled environments.

**Keywords**— Radar calibration, FMCW, AWR2944EVM, Signal processing, Python algorithm.

## I. INTRODUÇÃO

Com o crescimento contínuo da indústria automotiva e os avanços tecnológicos, surgiu uma demanda crescente pelo desenvolvimento de veículos autônomos. Esse progresso foi impulsionado pelos circuitos integrados de ondas milimétricas de silício de baixo custo e pelos sistemas compactos de segurança para radares automotivos, que se tornaram amplamente utilizados. Como resultado, esses dispositivos proporcionaram avanços significativos na área automotiva, pois auxiliam na prevenção de colisões ao detectar rapidamente pedestres, veículos ou outros obstáculos. [3].

A principal função de um radar é detectar a presença de um ou mais alvos de interesse e estimar seu alcance, velocidade e ângulos de chegada do sinal [4].

Além do princípio básico de funcionamento do radar, a calibração do alcance é um aspecto fundamental para assegurar a precisão nas medições de distância.

Em sistemas FMCW (Onda Contínua Modulada em Frequência), a relação entre a frequência de batimento e a distância do alvo depende diretamente da taxa de variação da frequência da onda transmitida. Qualquer não linearidade ou variação nessa taxa pode introduzir erros significativos nas estimativas de alcance [4]. Para mitigar esses efeitos, diversas metodologias de calibração têm sido desenvolvidas. Por exemplo, os autores de [7] propuseram uma instalação de simulação biobjetiva para calibração da velocidade e do alcance de radares automotivos de 24 GHz e 77 GHz, demonstrando melhorias na precisão das medições. Além disso, em [5], são descritos métodos automatizados para medições precisas de sinais de radar FMCW de 77 GHz, enfatizando a importância da linearidade da frequência para o desempenho do radar. A Keysight Technologies também oferece soluções para análise e geração de sinais de radar automotivo, permitindo testes abrangentes de desempenho e calibração [1]. Essas abordagens são cruciais para garantir que os sistemas de radar automotivo operem com alta precisão e confiabilidade, especialmente em aplicações críticas de segurança veicular.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Proposição, implementação e validação de um método prático de calibração de alcance para radares automotivos FMCW.
- Aplicabilidade em ambientes reais, sem a necessidade de infraestrutura laboratorial especializada, como câmaras anecoicas.
- Independência de informações internas do fabricante, dispensando o uso da matriz de calibração e utilizando, em seu lugar, um procedimento estatístico simples.
- Base no cálculo de um viés médio, obtido por meio da comparação entre as medições do radar e as distâncias reais aferidas.
- Demonstração experimental de que, mesmo em ambientes abertos e sujeitos a reflexões e perturbações, a calibração proposta é capaz de reduzir significativamente o erro médio nas estimativas de distância.

O presente artigo apresenta um método de calibração de alcance para radares automotivos FMCW, utilizando o radar AWR2944EVM da Texas Instruments.

Inicialmente, a introdução contextualiza a importância da calibração em sistemas de radar automotivo e os desafios inerentes a ambientes não controlados. Posteriormente, a metodologia detalha a configuração dos parâmetros do radar, o algoritmo desenvolvido em Python e o ambiente experimental utilizado para a aquisição de dados. A seção de resultados apresenta as medições realizadas e as análises dos erros relativos, comparando os valores estimados pelo radar com as distâncias reais medidas. Por fim, a conclusão sintetiza os principais achados do estudo, destacando a eficácia do método proposto e sugerindo potenciais aprimoramentos para futuras pesquisas.

## II. MODELO DO SINAL

### A. Sistema de um radar automotivo

O sistema de um radar automotivo FMCW funciona da seguinte maneira: o radar transmite um sinal  $x_T(t)$  de sua antena  $T_x$ . Quando o sinal encontra um alvo, parte de sua energia é refletida de volta para o radar, nas antenas de recepção  $R_x$ , onde é recebido um sinal  $x_R(t)$ . Em seguida, o sistema do radar processa o sinal recebido, extraindo o alcance, a velocidade e o ângulo de chegada, bem como outras características do alvo [2]. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do sistema de um radar automotivo.

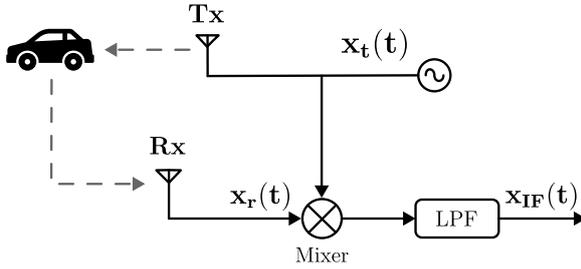


Fig. 1: Diagrama de blocos de um sistema de radar automotivo. Esse diagrama mostra o sinal sendo enviado e recebido pelas antenas Tx e Rx, respectivamente.

A forma de onda FMCW oferece uma alta relação tempo-largura de banda, o que permite alcançar uma alta resolução de alcance e uma elevada relação sinal-ruído simultaneamente. O sinal chirp é caracterizado por uma frequência inicial, uma largura de banda e uma duração de tempo [2]. A Figura 2 mostra uma sequência de sinais chirp que permite detectar o alcance e a velocidade do alvo sem pareamento.

1) *Sinal FMCW*: O sinal transmitido por um radar FMCW é representado por uma onda senoidal [2], cuja expressão matemática é dada por

$$x_T(t) = \cos(2\pi f_c t + \pi S t^2), \quad (1)$$

onde  $f_c$  é a frequência central e  $S$  é a taxa de varredura ou coeficiente da chirp. O parâmetro  $S = \frac{B}{T_c}$  representa o coeficiente da chirp, com  $B$  sendo a largura de banda e  $T_c$  o tempo da chirp.

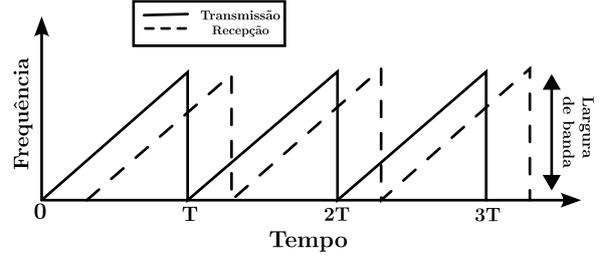


Fig. 2: Um exemplo de sequência do sinal chirp que permite detectar o alcance e a velocidade do alvo.

A frequência instantânea do sinal, definida pela taxa de variação da fase ao longo do tempo, é dada por

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_c t + \pi S t^2) = f_c + S t. \quad (2)$$

Ao refletir no alvo, o sinal recebido,  $x_R(t)$ , é misturado com o sinal transmitido,  $x_T(t)$ , em um mixer, seguido por um filtro passa-baixa, resultando em um sinal de frequência intermediária,  $x_{IF}(t)$ , expresso em

$$x_{IF}(t) = \text{LPF} [x_T(t)x_R(t)] = A \cos(2\pi f_{IF} t + \phi_{IF}), \quad (3)$$

onde  $f_{IF} = f_T(t) - f_R(t)$  é a frequência de batimento. Devido à arquitetura em quadratura do radar, o sinal  $x_{IF}(t)$  pode ser modelado de forma complexa, como mostrado em

$$x_{IF}(t) = A e^{j(2\pi f_{IF} t + \phi_{IF})}. \quad (4)$$

A frequência de batimento é dada por (5).

$$f_{IF} = S\tau = \frac{2Sr}{c} \quad (5)$$

2) *Modelo com erro de calibração*: Na prática, a frequência de batimento medida,  $\tilde{f}_{IF}$ , apresenta uma perturbação  $\Delta f$  decorrente de imperfeições de hardware e de pequenas não linearidades da rampa FMCW, além de ruído de medição  $w_f(t)$ . Assim, em vez de (5), temos em (6) uma forma mais completa:

$$\tilde{f}_{IF}(t) = S\tau + \Delta f + w_f(t) \quad (6)$$

A estimativa de alcance obtida a partir dessa frequência é dada por

$$\hat{r}(t) = \frac{c}{2S} \tilde{f}_{IF}(t) = r + b + n_r(t), \quad (7)$$

em que (8) e (9) representam, respectivamente, o viés de alcance e o ruído de medição.

$$b = \frac{c\Delta f}{2S} \quad (8)$$

$$n_r(t) = \frac{c}{2S} w_f(t) \quad (9)$$

### III. CALIBRAÇÃO ESTATÍSTICA DO ALCANCE

O AWR2944EVM é uma placa desenvolvida pela Texas Instruments, projetada para aplicações automotivas baseadas em radar FMCW na faixa de frequência de 76 a 81 GHz. O módulo AWR2944 é amplamente utilizado em sistemas avançados de assistência ao condutor (ADAS) e em condução autônoma, permitindo a implementação de algoritmos de detecção de alcance, velocidade e ângulo de objetos em movimento. A Figura 3 mostra a placa de desenvolvimento da Texas Instruments utilizada neste trabalho.



Fig. 3: Radar automotivo AWR2944 EVM da Texas Instruments. Esse radar possui um sensor de radar AWR2944 mmWave system-on-chip (SoC)[6].

Considere  $P$  distâncias de referência  $r_p$  com  $p = 1, \dots, P$ . Para cada distância coletam-se  $N_p$  chirps, gerando as medições brutas  $\hat{r}_{p,n}$  com  $n = 1, \dots, N_p$ . O modelo adotado para cada observação  $\hat{r}_{p,n}$  é dado por

$$\hat{r}_{p,n} = r_p + b + n_{p,n}, \quad (10)$$

em que  $b$  representa o viés de alcance — assumido constante para todas as distâncias — e  $n_{p,n}$  é um termo de ruído de média zero com variância  $\sigma_r^2$ .

Defina  $\mathcal{I} = \{(p, n)\}$  como o conjunto total de índices, com  $\sum_p N_p$  observações. Após embaralhamento aleatório com semente fixa, particiona-se  $\mathcal{I}$  em subconjuntos de treino  $\mathcal{T}$  e validação  $\mathcal{V}$ , usando uma proporção  $\rho \in (0, 1)$  para  $\mathcal{T}$ .

O estimador não viesado de  $b$  é a média dos resíduos no conjunto de treino, como mostrado em

$$\hat{b} = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{(p,n) \in \mathcal{T}} (\hat{r}_{p,n} - r_p). \quad (11)$$

Sob a hipótese de ruído i.i.d., vale  $\mathbb{E}[\hat{b}] = b$ . Para cada observação no conjunto de validação calcula-se a medida corrigida por (12) e o erro residual por (13)

$$\tilde{r}_{p,n} = \hat{r}_{p,n} - \hat{b} \quad (12)$$

$$e_{p,n} = \tilde{r}_{p,n} - r_p \quad (13)$$

As métricas reportadas são mostradas em (14) e (15).

$$\mu_e = \frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_{(p,n) \in \mathcal{V}} e_{p,n} \quad (14)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_{(p,n) \in \mathcal{V}} (e_{p,n} - \mu_e)^2}. \quad (15)$$

Valores próximos de zero para  $\mu_e$  indicam que o viés foi removido, enquanto  $\sigma_e$  quantifica a dispersão residual devida a ruído, não linearidades de ordem superior e jitter de relógio. O Algoritmo 1 resume o procedimento, cuja implementação em Python segue diretamente em (10)–(11).

---

**Algorithm 1** Calibração de alcance por estimação de viés

---

- 1: Embaralhar  $\mathcal{I}$  e dividir em  $\mathcal{T}$  e  $\mathcal{V}$
  - 2: **for all**  $(p, n) \in \mathcal{T}$  **do**
  - 3:     Estimar  $\hat{r}_{p,n}$  via FFT
  - 4: **end for**
  - 5: Calcular  $\hat{b}$  pela Eq. (11)
  - 6: **for all**  $(p, n) \in \mathcal{V}$  **do**
  - 7:     Corrigir  $\tilde{r}_{p,n} = \hat{r}_{p,n} - \hat{b}$
  - 8:     Computar erro  $e_{p,n}$
  - 9: **end for**
  - 10: Avaliar  $\mu_e$  e  $\sigma_e$
- 

### IV. MEDIÇÕES E RESULTADOS

#### A. Ambiente de medições e parâmetros de configurações

O ambiente utilizado para as medições foi um estacionamento aberto, sem carros e com poucas reflexões. A Figura 4 ilustra esse ambiente, detalhando o alvo e o posicionamento do radar em relação a ele.

Doze medições foram realizadas a cada 1 metro com o radar, e as distâncias reais foram aferidas com uma trena a laser. Os dados fornecidos pelo radar foram adquiridos usando o programa *MmWave Studio* da Texas Instruments (TI). Os parâmetros de configuração do radar, definidos no programa, estão detalhados na Tabela I.

Apenas uma antena de transmissão e as quatro antenas de recepção foram utilizadas. O radar foi posicionado a  $0^\circ$  em relação ao alvo. A largura de banda configurada foi de 0,7675 GHz, o que corresponde a um alcance máximo de 25 metros, com 256 amostras por chirp e taxa de amostragem de 10 Msps.

#### B. Análise dados radar

Os dados obtidos pelo radar AWR2944EVM para medição de alcance foram processados utilizando um algoritmo desenvolvido em Python. Esse algoritmo calcula a distância do alvo por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), considerando os parâmetros de configuração do radar. A Tabela II apresenta o erro

TABELA I: Configuração dos parâmetros do radar AWR2944EVM.

Parâmetro	Valor
Antenas de transmissão	1
Antenas de recepção	4
Frequência inicial	77 GHz
Banda de operação	0,7675 GHz
Resolução de range	0,1953 metros
Rampa de subida da chirp	29,98 MHz/ $\mu$ s
Amostras ADC	256
Frequência de amostragem	10 Msps
Fim do Tempo da rampa	60 $\mu$ s
Número de Frames	1
Número de chirps por frame	128
Distância máxima	25 metros



Fig. 4: Ambiente onde foi realizado a coleta de dados para estimar a calibração do alcance.

TABELA II: Tabela de comparação entre as medidas do alcance real e as medidas do radar.

Alcance (m)	Medida Real (m)	Medida Radar (FFT) (m)	Erro Relativo (%)
1	1,069	0,98	8,33
2	1,961	1,95	0,54
3	2,929	2,93	0,03
4	3,932	3,91	0,56
5	5,036	5,08	0,87
6	5,969	5,86	1,83
7	7,052	7,04	0,17
8	7,982	8,21	2,86
9	9,016	8,99	0,29
10	9,968	10,16	1,93
11	10,96	11,14	1,61
12	12,22	12,12	0,83

relativo entre as distâncias medidas com a trena a laser e os valores obtidos pelo sistema radar.

O software de aquisição de dados da Texas Instruments (TI) possui um módulo de pós-processamento embutido. Entretanto, esse pós-processamento limita-se a fornecer gráficos e informações tabuladas sobre os alvos, sem disponibilizar os dados processados brutos. Para permitir uma comparação efetiva entre os dados processados pelo algoritmo desenvolvido e os resultados do software da TI, a Tabela III apresenta o erro relativo das doze medições realizadas.

 TABELA III: Tabela de Medidas do alcance comparando o programa *Mmwave Studio* e os dados do algoritmo desenvolvido para o alcance.

Alcance (m)	Medidas programa <i>Mmwave Studio</i> (m)	Medida Radar (FFT) (m)	Erro Relativo (%)
1	0,9764	0,98	0,3656
2	1,9531	1,95	0,1587
3	2,9296	2,93	0,0137
4	3,9058	3,91	0,1075
5	5,0777	5,08	0,0453
6	5,8593	5,86	0,0119
7	7,0305	7,04	0,1351
8	8,2025	8,21	0,0914
9	8,9841	8,99	0,0657
10	10,155	10,16	0,0463
11	11,132	11,14	0,0656
12	12,303	12,12	1,4898

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados gráficos do alcance do alvo detectado pelo radar, posicionado a aproximadamente 5 metros e 8 metros, respectivamente. Esses resultados comprovam a eficácia do algoritmo desenvolvido para detecção de alvos a partir dos dados radar.

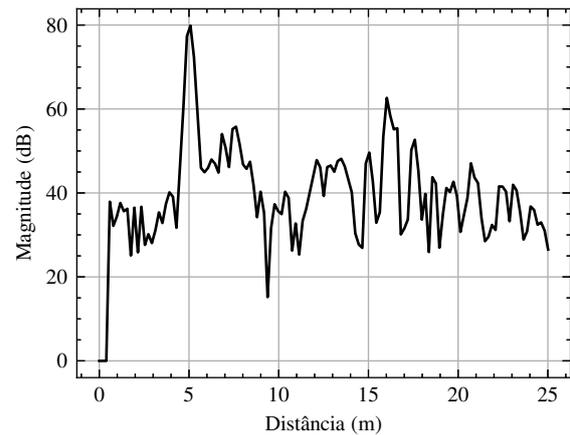


Fig. 5: Gráfico do pico de detecção do alvo a um alcance aproximadamente de 5 metros.

### C. Resultados da calibração

Os resultados apresentados na Tabela IV, que compara o desempenho dos três programas em termos de erros estatísticos, demonstram o êxito do procedimento de calibração proposto, evidenciando também os limites inerentes ao sistema de medição. Foram realizadas doze medições com distâncias reais variando entre 1,069 metro e 12,22 metros. A partir desses dados, o algoritmo estimou um viés médio de 0,0552 metro (5,52 centímetros) em relação às distâncias reais. A aplicação da correção proposta reduziu significativamente o erro sistemático, alcançando valores médios próximos de zero.

Para validar a generalização da calibração, o conjunto de dados foi dividido em subconjuntos de treinamento e teste, utilizando 70% para treinamento e 30%

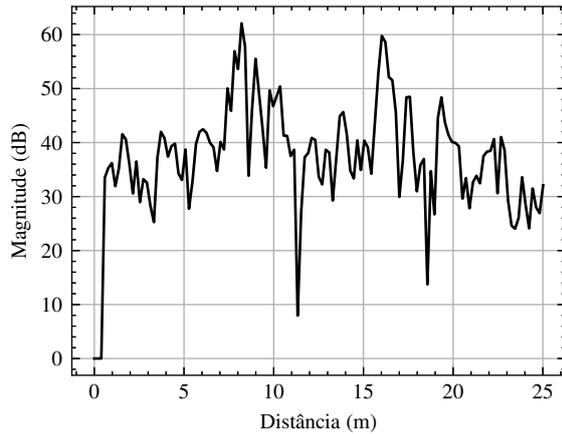


Fig. 6: Gráfico do pico de detecção do alvo a um alcance aproximadamente de 8 metros.

TABELA IV: Comparação dos erros entre os diferentes parâmetros estatísticos entre cada programa.

Programas	Erro Absoluto Médio (m)	Raiz do Erro Quadrático Médio (m)	Desvio Padrão Residual (m)
<i>MmWave Studio</i>	0,0824	0,1093	0,1084
Implementação FFT	0,0843	0,1131	0,1157
FFT com Calibração	0,1044	0,1155	0,1157

para teste. Considerando que o número total de chirps analisados foi de 128, a separação teve como objetivo assegurar que o modelo de compensação fosse avaliado com dados não vistos anteriormente, evitando assim sobreajuste e garantindo a robustez dos resultados obtidos.

No entanto, mesmo após a calibração, observou-se um desvio padrão residual de 0,1254 metro, o que corresponde a uma dispersão residual de aproximadamente 12,54 centímetros em torno das distâncias corrigidas. Essa dispersão pode ser atribuída a fatores como a presença de ruídos no sinal, limitações associadas à resolução da transformada rápida de Fourier (FFT) utilizada na estimação das distâncias, e variações inerentes ao hardware do sistema de radar.

Comparando os diferentes métodos apresentados na Tabela IV, observa-se que o *Mmwave Studio* apresentou um erro absoluto médio de 0,0824 m, enquanto a implementação via FFT resultou em um valor ligeiramente superior, de 0,0843 m. Após a aplicação do procedimento de calibração, a média do erro absoluto aumentou para 0,1044 m, o que pode parecer contraindicativo, mas se justifica pela natureza da correção.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou e validou um método prático de calibração de alcance para radares automotivos FMCW, como o AWR2944EVM da Texas Instruments.

Uma das principais contribuições foi a demonstração da aplicabilidade em ambientes reais e a independência de informações do fabricante, utilizando um procedimento estatístico simples baseado no cálculo de um viés médio.

Os resultados experimentais confirmaram a eficácia do método proposto. O algoritmo desenvolvido em Python estimou um viés médio de 0,0552 metro, e sua aplicação resultou na redução significativa do erro médio a valores próximos de zero. Isso valida o sucesso na compensação do erro sistemático. Contudo, a análise revelou um desvio padrão residual de 0,1254 metro, o que indica a persistência de ruídos no sinal, limitações da resolução da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e variações inerentes ao hardware do sistema de radar.

Para futuras pesquisas, sugere-se a investigação de abordagens alternativas para a estimação do viés, como o uso da mediana, que é mais robusta a valores atípicos, ou métodos de regressão linear, que poderiam modelar a relação entre as medições do radar e as distâncias reais, potencialmente reduzindo a variância residual.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) sob o Acordo de Parceria nº 27192.02.01/2023.02-00. Também esse projeto está sendo realizado sob o Acordo de Parceria nº 23106.086591/2023-16, com o objetivo de fomentar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação. O acordo foi firmado pelas ICTs USP, UnB e UFPE. Gostaríamos de expressar nosso sincero agradecimento à Stellantis, Renault do Brasil, BlueGrid Ltda., Intelbras S.A., Omnisys Engenharia Ltda. e Tecsyst do Brasil Industrial pelo valioso apoio a este projeto.

## REFERÊNCIAS

- [1] Keysight Technologies, *Automotive Radar Signal Analysis and Generation Solutions*, 2023. Available: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05948/data-sheets-archived/5992-2631.pdf>
- [2] Xiaotao Li, Yimin D. Zhang, and Moeness G. Amin, "Signal processing for idm mimo fmcw millimeter-wave radar sensors," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167959–167971, 2021.
- [3] Matt Markel, *Radar for Fully Autonomous Driving*, Artech House, Norwood, MA, USA, 2022.
- [4] Sujeet Patole, Murat Torlak, Dan Wang, and Murtaza Ali, "Automotive radars: A review of signal processing techniques," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 34, no. 2, pp. 22–35, 2017.
- [5] Rohde & Schwarz, *Automated Measurements of 77 GHz FMCW Radar Signals*, 2014. Available: [https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/automated-measurements-of-77-ghz-fmcw-radar-signals-application-note\\_56280-59841.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/automated-measurements-of-77-ghz-fmcw-radar-signals-application-note_56280-59841.html)
- [6] Texas Instruments, AWR2944 Evaluation Module User's Guide (Rev.C), Texas Instruments, 2024, Acesso em: 18 fev. 2025.
- [7] T. Xu, D. Yu, and L. Du, *A Dual-Target Simulation Setup for Automotive Radar Calibration at 24 GHz and 77 GHz*, *Electronics*, vol. 12, no. 13, pp. 2947, 2023. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/13/2947>