

CARACTERIZAÇÃO DA ASSINATURA DE RADARES PARA MOTOCICLETAS E A SUA INFLUÊNCIA EM ALGORITMOS DE DETECÇÃO

Luiz Henrique Aguiar Campos¹, Herick Yves Ribeiro¹, Pietro Lo Presti Campos¹,
Vinicius Frias A. Leite¹, Johannes von Lochter¹ e Lester de Abreu Faria²

¹BRAIN – FACENS, Sorocaba, SP, Brasil

²IP – FACENS, Sorocaba, SP, Brasil

RESUMO

O RADAR é um sistema de detecção e rastreamento de alvos que utiliza ondas eletromagnéticas. Esse sistema é amplamente utilizado no ambiente automotivo, já que é barato e eficaz em ambientes com climas adversos como chuva e neve, podendo ser utilizado em vários *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS), como em um detector de canto. Este sistema visa, usando sensores como o radar, detectar alvos que estão no ponto cego do espelho retrovisor do motorista, evitando acidentes graves, sendo eficaz em países com tráfego irregular, onde motoristas e motociclistas cometem inúmeras violações de trânsito, como o Brasil. Assim, esta pesquisa visa caracterizar a assinatura de radar para motocicletas e compreender sua influência nos algoritmos de detecção. Dessa forma, foi possível destacar com sucesso quais características da reflexão de uma motocicleta melhoram ou deterioram sua detecção.

PALAVRAS-CHAVE

Radar, RCS, Detecção, ADAS, Motocicleta

1. INTRODUÇÃO

A detecção de um objeto por um radar é baseada na intensidade do sinal que é capturado pelos receptores após a emissão e reflexão das ondas eletromagnéticas. Quando essas ondas atingem um objeto, elas são refletidas em várias direções e apenas uma pequena parte da energia emitida retorna ao radar, sendo suscetível à corrupção por ruído, tanto térmico (gerado pelo circuito do radar) quanto atmosférico (Danielsson, 2010).

Além do ruído, outros fatores têm influência sobre a intensidade do sinal capturado, como seu ângulo de incidência, irregularidades na superfície de reflexão e o material que compõe o alvo (Danielsson, 2010). Estes fatores afetam diretamente a capacidade do alvo de refletir ondas eletromagnéticas, sendo essa capacidade medida pelo *Radar Cross Section* (RCS). Como exemplo, os materiais metálicos são mais reflexivos do que o plástico ou a madeira. Também é possível aplicar tintas especiais ou materiais absorventes para tornar o alvo mais difícil de ser detectado pelo radar, uma técnica amplamente utilizada no setor militar.

Normalmente, o valor do RCS é uma área, expressa em m², ou em dBm², relacionando a intensidade do sinal refletido a um metro quadrado. Assim, o valor expressa a capacidade do radar de detectar um alvo: quanto menor o RCS, menor é a capacidade do sistema de detectar um determinado alvo. Em geral, veículos como carros, caminhões e motocicletas têm um RCS de $\sigma = 1...10.000\text{m}^2$, enquanto os pedestres têm um valor muito menor: $\sigma = 0,01...0,1\text{m}^2$ (Franz *et al.*, 2015).

O RCS tem sido usado em tecnologias para auxiliar os motoristas, que são cada vez mais comuns em veículos, tais como os sistemas de *Blind Spot Detection* (BSD), que detectam se um veículo está no ponto cego do espelho retrovisor e podendo utilizar radares para realizar esta detecção (Bagi *et al.*, 2019). Nesse caso, quanto mais informações sobre os padrões de reflexão de um determinado veículo, melhor será a detecção.

Logo, o objetivo desta pesquisa é observar como as ondas eletromagnéticas emitidas por um radar são refletidas por uma motocicleta e como estas características de reflexão podem influenciar um algoritmo de detecção que utiliza dados de um sensor de radar. Assim, as próximas seções abordarão, respectivamente, a metodologia escolhida para realizar os experimentos, os resultados e a conclusão da pesquisa.

2. METODOLOGIAS

Considerando o trabalho de diferentes autores (Geary *et al.*, 2012, 2013; Bel Kamel, Peden and Pajusco, 2017), neste trabalho foi utilizada a seguinte metodologia para obter os valores RCS de uma motocicleta: o veículo foi colocado sobre uma plataforma giratória capaz de girar 360° e depois as medições foram iniciadas usando um sensor de radar, obtendo-se a intensidade do sinal retornado para todos os ângulos do veículo, tentando encontrar a parte mais reflexiva do alvo. Entretanto, antes de realizar este tipo de medição, foram realizados dois experimentos diferentes: a simulação do RCS e o teste da capacidade do sensor de radar utilizado (INRAS RadarLog TX2RX16) para medir o RCS.

2.1 Simulação do RCS

O objetivo de simular o RCS de uma motocicleta era comparar a simulação com os experimentos realizados com um sensor real para observar quão próximos estão os valores e suas características de reflexão. Assim, foram utilizadas ferramentas para realizar o escaneamento em 360° de uma motocicleta Fazer 150 (mesmo modelo utilizado para realizar experimentos na vida real) e criar seu modelo 3D, sendo possível utilizá-lo para simular o RCS do alvo, comparando-o com as medidas reais de uma forma mais precisa. Logo, com o modelo em mãos, foi possível simular o RCS do radar utilizando o projeto *Open-Source RadarSimPy*.

Neste caso, o projeto utiliza a tecnologia *raytracing* para simular as ondas eletromagnéticas de um radar, sendo possível estimar a intensidade dos sinais das ondas e permitir o cálculo do RCS. O modelo pode ser visto na Figura 1. O RadarSimPy possui várias configurações, tais como simulações de radares do tipo *Frequency-Modulated Continuous Wave* (FMCW), radares do tipo *Multiple-Input Multiple Output* (MIMO), seleção de frequência, número de pulsos etc., provando ser muito eficaz para simulações envolvendo sensores radar.



Figura 1. Modelo 3D da Fazer150. Fonte: Autoria Própria

2.2 Validação do RadarLog

Como foi dito anteriormente, antes de realizar as medições de 360° RCS, houve a necessidade de testar a capacidade do RadarLog de extrair os valores RCS corretamente, considerando que este modelo não foi feito especificamente para realizar esta tarefa. Assim, novos algoritmos foram desenvolvidos para que este modelo pudesse processar os dados corretamente e obter os valores RCS.

A equação do RCS é representada pela Equação 1, onde as potências de transmissão (P_t) e recepção (P_r) estão relacionadas, assim como os respectivos ganhos das antenas de transmissão (G_t) e recepção (G_r), o comprimento de onda (λ) e a distância entre o alvo e o radar (R). Para o desenvolvimento do sistema que calcula o RCS, foram utilizados como base os códigos fornecidos pela INRAS (empresa desenvolvedora do sensor), onde a maioria dos valores seria facilmente calculada. Entretanto, a maior dificuldade foi a necessidade de

ambas as potências estarem na mesma unidade, visto que a potência emitida é dada em dbm (Decibel-milliwatt), que pode ser facilmente convertida para W (watts), seguindo a Equação 2, e o sinal recebido é dado em dbV (Decibel-Volt), havendo a necessidade de converter este valor para W.

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_r}{P_t G_t G_r \lambda^2}$$

Equação 1. Equação geral do RCS

$$P_t = 10^{\frac{Pt dBm}{10}} * 0.001$$

Equação 2. Potência de transmissão

Assim, para realizar este cálculo, é necessário possuir os valores de capacitância e indutância do circuito de radar para criar um filtro passa-alto, convertendo assim o valor do sinal recebido para W. Tendo a potência em W, é necessário fazer os ganhos das unidades da antena em um formato sem dimensões, seguindo a Equação 3. A distância entre o alvo e o radar é facilmente obtida pelo próprio sensor, após o processamento dos dados, e o comprimento de onda pode ser calculado seguindo a equação 4, onde F_m é a frequência média entre a frequência inicial e final da medição do radar.

$$G_x = 10 * \left(\frac{G}{10} \right)$$

Equação 3. Ganho da antena

$$\lambda = \frac{C}{F_m}$$

Equação 4. Equação de Lambda

Com o algoritmo para obter o RCS validado, foi possível realizar experimentos em campo e verificar se o valor proveniente dos cálculos teóricos, realmente, corresponderia aos valores adquiridos nos experimentos. Assim, os experimentos foram realizados em um campo de futebol, já que ele estava vazio, reduzindo ruídos de outras fontes, mas contendo um pouco de ruído advindo do chão. O experimento consistiu em verificar o RCS para diferentes distâncias, uma vez que seu valor deveria ser o mesmo. A imagem do experimento pode ser vista na Figura 2 e seus resultados podem ser analisados na Figura 3. No caso, a figura 3 descreve a média entre 10 medições do sinal para cada distância, sendo possível visualizar que, para cada média, um pico aparece em sua devida distância. Além disso, é possível analisar que, para distâncias diferentes (5m, 10m e 15m), o valor do RCS do refletor de canto é o mesmo. Este comportamento é esperado, já que a distância não é um fator que influencia o RCS. Entretanto, quando a medição foi realizada em 25m, o RCS diminuiu um pouco, sendo uma das possíveis razões a elevação da temperatura do sensor que, após inúmeros experimentos aumento, juntamente ao dia abafado da realização desse experimento, gerando certo ruído nas medições.



Figura 2. Setup do experimento utilizando refletor de canto. Fonte: Autoria Própria

Além disso, também há a possibilidade de a medição ter um valor diferente por estar em uma posição próxima ao limite de distância da detecção do radar (cerca de 30m), o que pode interferir na recepção de ondas eletromagnéticas e, conseqüentemente, "diminuir" o RCS do alvo. Assim, foi possível mensurar o RCS do alvo a partir do sinal refletido por ele. Logo, o valor de RCS de um refletor de canto triédrico, pode ser calculado

pela equação 5. Neste caso, o refletor de canto tem L igual a 10cm, assim, ao substituir o valor na equação, e convertendo sua unidade para dbsm (*Decibel Squared Meter*), seguindo a equação 6, o resultado é de aproximadamente 14.4dbsm. Tal valor se compara com o de uma motocicleta, que é cerca de 12dbsm, e inferior ao de um carro, que é cerca de 20dbsm.

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi L^4}{3\lambda^2}$$

Equação 5. RCS do Refletor de Canto

$$\sigma(dbm) = 10 \cdot \log_{10}(RCS)$$

Equação 6. RCS (dbm)

2.3 Experimentos em 360 Graus

Após validar a capacidade do modelo de sensor radar utilizado para obter os valores RCS corretamente, foi possível realizar os experimentos utilizando a metodologia mais adotada em outras pesquisas na área: girar o objeto em 360° enquanto as medições de RCS eram realizadas, sendo possível compreender a capacidade refletiva do alvo para várias direções.

Assim, para a realização do experimento, foi construída uma plataforma capaz de girar 360°. A plataforma foi feita de madeira, cuja resistência era suficiente para segurar uma motocicleta, e foram incluídos quatro eixos para girá-la. Além da plataforma, foi criada uma estrutura para simular uma câmara anecoica (câmara produzida para reduzir ruídos eletromagnéticos) a fim de reduzir pelo menos parte do ruído ambiente e tornar a medição mais precisa. A estrutura foi feita de tubos de PVC e espumas absorvedoras de alta frequência que, juntamente com a plataforma, pode ser vista na Figura 4.

A experiência prosseguiu da seguinte forma: a plataforma foi girada em 360°, de 1° em 1°, ou seja, foram feitas 360 medições, para que os resultados fossem os mais precisos possíveis. Esta abordagem não é observada com frequência, pois os pesquisadores geralmente fazem medições de 10 ou 15 graus. Os resultados dos experimentos serão mostrados na próxima seção.

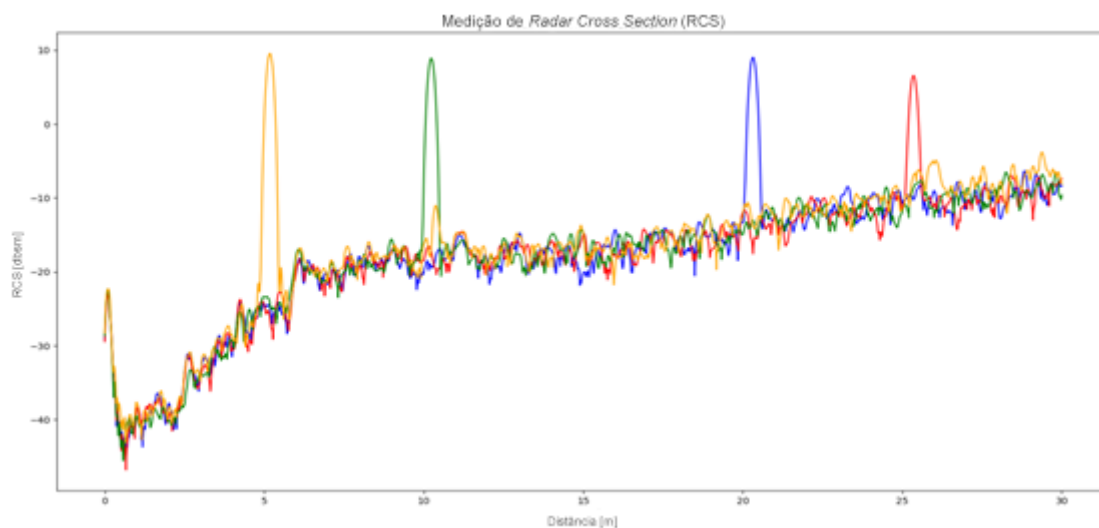


Figura 3. Resultados de medições do RCS para diferentes distâncias. Fonte: Autoria Própria



Figura 4. Setup do experimento. Fonte: Autoria Própria

3. RESULTADOS

3.1 RCS em Simulação

Como o modelo 3D descrito na seção anterior é muito complexo, houve a necessidade de reduzir o número de malhas do mesmo para diminuir o tempo necessário para a simulação completa. O resultado do experimento pode ser visto na Figura 5. Neste caso, a parte frontal da motocicleta está localizada a 0° , portanto, suas partes laterais, cujo RCS é superior, estão a 90° e 180° , respectivamente. Em primeiro lugar, é notável o alto valor do RCS, que se aproxima dos 20dbsm. A razão para este valor é a incapacidade do RadarSimpy de diferenciar entre os diferentes materiais do modelo, tratando todos eles como um único bloco metálico. Entretanto, ainda é possível ver uma forma de assinatura como a esperada para os veículos de duas rodas. Também é bastante claro que um lado tem um pico maior que o outro e isto acontece devido à diferença na disposição de seus componentes, já que em um lado está situado o escapamento, por exemplo. Assim, a realização da medição de 360° para veículos de duas rodas é relevante, mas essa necessidade diminui quando se trabalha com veículos de quatro rodas, pois eles normalmente são iguais em ambos os lados.

3.2 Medição de RCS em 360 Graus

As últimas experiências a serem performadas foram aquelas que procuraram encontrar o RCS para 360° graus da motocicleta. Este experimento procurou compreender as características de reflexão do sinal de radar para uma motocicleta em todos os graus de forma precisa. Os resultados podem ser vistos na Figura 6, e uma comparação de ambas as configurações e resultados pode ser vista na Figura 7. Como pode ser visto, em primeiro lugar, os valores são muito diferentes. A simulação, como dito anteriormente, tem valores muito mais altos por causa de seu material, o que resulta em que as partes frontal e lateral tenham um RCS elevado. Mas na medição real, como estas peças são basicamente feitas de plástico, seu RCS acaba sendo muito mais baixo. Quanto às partes laterais da motocicleta, pode-se ver que uma das partes laterais tem um RCS mais alto. Uma causa principal para isto pode ser o escapamento e outras partes da moto, assim como na simulação, mas os ângulos são invertidos, já que a parte com o escapamento está em 270° nas medidas reais e em 90° na simulação.

3.3 Influência do RCS em Algoritmos de Detecção

Como discutido nas seções anteriores, o RCS mede uma característica importante quando se trabalha com sensores radar: a capacidade do alvo de refletir ondas eletromagnéticas. Neste caso, este valor, se capturado corretamente, nos permite compreender qual objeto está sendo detectado pelo radar, de forma relativamente simples.

Contudo, as aberturas dos algoritmos de detecção que utilizam esse valor começam quando os valores não são corretamente capturados ou o algoritmo não foi treinado para lidar corretamente com esses valores. Tal problemática pode ser mais bem descrita no exemplo a seguir: se seu algoritmo pode detectar motocicletas e usa somente RCS para tal tarefa, é muito simples de enganá-lo, basta usar um refletor de canto com um RCS similar ao de uma motocicleta, como usado no experimento descrito na seção 2.2. Como o único dado usado pelo algoritmo é o RCS, provavelmente ele será enganado e dará a classe do alvo como uma motocicleta.

Neste caso, esse problema também pode ser contornado usando múltiplas características, ou características, para fazer a previsão. Ao usar características como distância, velocidade e angulação, o problema persiste, já que a maioria dos veículos pode chegar a uma distância, velocidade e angulação semelhantes perante o radar. Entretanto, quando estas características são usadas em conjunto com outras, tais como tamanho do alvo em imagens Range-Doppler, e algoritmos de rastreamento, que podem comparar e analisar várias sequências de valores em cada vez, o problema será atenuado.

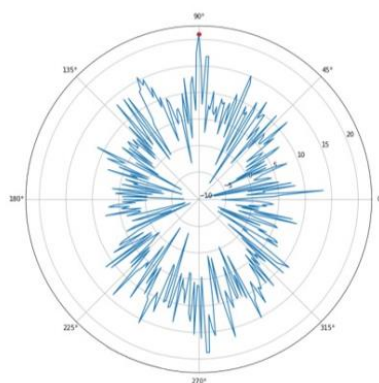


Figura 5. RCS utilizando RadarSimpY. Fonte: Autoria Própria

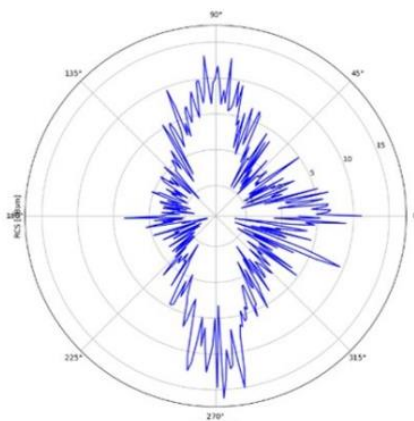


Figura 6. Resultado dos experimentos de RCS. Fonte: Autoria Própria

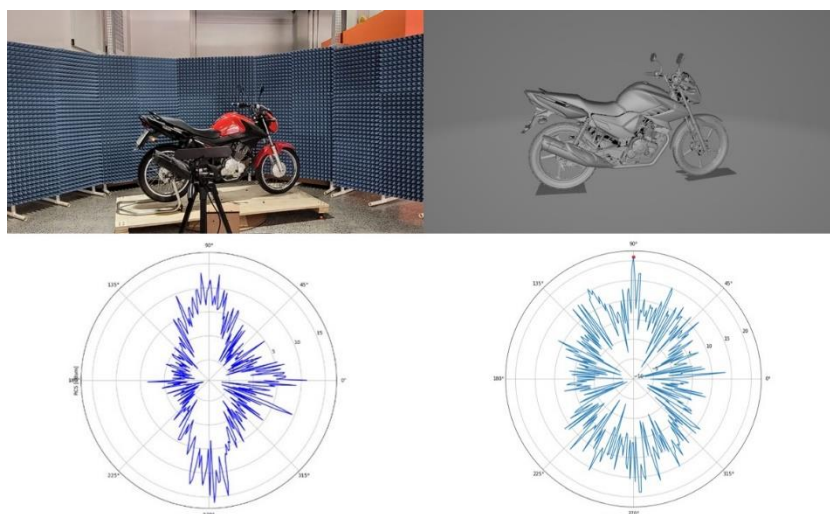


Figura 7. Comparação entre o RCS real e simulado. Fonte: Autoria Própria

4. CONCLUSÃO

Os objetivos desta pesquisa foram caracterizar a assinatura de radares de motocicletas e compreender sua influência nos algoritmos de detecção, sendo possível destacar quais características de reflexão podem melhorar ou piorar o desempenho de um algoritmo de detecção. No caso, visto que as laterais da moto são mais reflexivas, seria mais fácil detectar uma moto obtendo a reflexão de sua lateral, ao mesmo tempo que seria mais difícil detectá-la somente com reflexões frontais, ou seja, os valores de RCS podem influenciar diretamente os resultados da detecção, sendo uma excelente característica para utilizar em um modelo de detecção baseado em aprendizado profundo, por exemplo. Porém, visto que em cenários de trânsito usuais, os radares iriam detectar as informações sobre uma motocicleta pela sua parte frontal ou traseira, o RCS não seria uma métrica totalmente confiável, sendo necessário mais informações sobre o alvo, podendo até mesmo serem obtidas de outras tecnologias, como as câmeras.

Para pesquisas posteriores, seria válido a criação de um algoritmo de detecção que utilize o RCS como recurso para suas estimativas, otimizando-o com outras métricas e comparando suas possíveis combinações. Caso o sistema de detecção seja baseado em aprendizado de máquina, seria possível testá-lo utilizando abordagens de Interpretabilidade (um campo de estudo no aprendizado de máquinas que visa compreender mais facilmente modelos complexos), como *SHapley Additive exPlanations* (SHAP) ou *Local Interpretable Model-Agnostic Explanations* (LIME), gerando percepções mais precisas sobre o funcionamento desses sistemas e facilitando a compreensão de modelos como redes neurais, que são consideradas caixas pretas (difícil compreender o que acontece entre as camadas).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, esta pesquisa é fruto do programa ROTA 2030/Linha V 27192.02.01/2020.08-00, financiado pela Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP), que nos deu a oportunidade de pesquisar sobre uma área com muito futuro no país. Além disso, gostaríamos de agradecer à todas as pessoas do *Brazilian Artificial Intelligence Nucleus* (BRAIN) que contribuíram indiretamente com o desenvolvimento deste trabalho. Também gostaríamos de agradecer aos pesquisadores do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e *Center of Automotive Research on Integrated Safety Systems and Measurement Area* (CARISSMA), juntamente do grupo BOSCH e Stellantis pela parceria com o projeto. E, por último, gostaríamos de agradecer aos desenvolvedores da INRAS que nos deram suporte para o desenvolvimento das aplicações utilizando RCS.

REFERÊNCIAS

- Bagi, S. S. G. *et al.* (2019) 'Sensing Structure for Blind Spot Detection System in Vehicles', *ICCAIS 2019 - 8th International Conference on Control, Automation and Information Sciences*. doi: 10.1109/ICCAIS46528.2019.9074580.
- Bel Kamel, E., Peden, A. and Pajusco, P. (2017) 'RCS modeling and measurements for automotive radar applications in the W band', in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 2445–2449. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928266.
- Danielsson, L. (2010) *Tracking and radar sensor modelling for automotive safety systems*, Department of Signals and Systems.
- Franz, B. *et al.* (2015) *Conduct-by-wire, Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort*. doi: 10.1007/978-3-319-12352-3_59.
- Geary, K. *et al.* (2012) 'Characterization of automotive radar targets from 22 to 29 GHz', *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, pp. 0079–0084. doi: 10.1109/RADAR.2012.6212115.
- Geary, K. *et al.* (2013) 'Automotive radar target characterization from 22 to 29 GHz and 76 to 81 GHz', *IEEE National Radar Conference - Proceedings*. doi: 10.1109/RADAR.2013.6586128.