

O EFEITO LLOYD-MIRROR E SUAS APLICAÇÕES



Capitão de Corveta Diego Felipe Gimenez de Andrade

1 INTRODUÇÃO

Este artigo não poderia se iniciar de outra maneira melhor que com a seguinte citação obtida de [5]:

[...] em silêncio e furtivamente, mas, mais importante ainda, em segredo, os submarinos de ataque realizaram até duas mil missões de espionagem enquanto monitoravam submarinos soviéticos. O mais crucial era rastrear os “boomers”, submarinos soviéticos maiores do que os campos de futebol que carregavam até vinte mísseis balísticos. Esses mísseis poderiam lançar até dez ogivas nucleares cada, e um único míssil poderia criar uma tempestade de fogo maior que o poder combinado de todas as bombas lançadas na Segunda Guerra Mundial. O fato de esses arsenais serem portáteis e ocultos no mar os tornou muito menos vulneráveis e muito mais perigosos do que as bombas projetadas para serem lançadas a partir de aviões ou de pontos fixos em terra.

Não é necessário ser um *expert* em história para conhecer a fama dos submarinos. O povo brasileiro experimentou, em um passado não muito distante, a capacidade de emprego desses meios navais. Além de ser um operador dessas fascinantes máquinas, o Brasil também sofreu baixas devido ao emprego dos mesmos por nações inimigas durante as duas grandes guerras mundiais[7]. Cabe ressaltar que, ao longo da Segunda Guerra Mundial, um total de trinta e cinco navios brasileiros foi afundado por submarinos alemães e italianos. Desse total, trinta e três eram navios mercantes[7]. O total de mortos no mar superou as baixas sofridas pela Força Expedicionária Brasileira na Itália[7]. Diante do exposto, não é difícil perceber a dificuldade de se detectar esses meios navais que, obviamente, graças ao avanço tecnológico, se tornam cada vez mais

silenciosos, discretos e eficientes. O principal sensor utilizado pelos submarinistas e também contra os submarinistas é o Sonar (Sound Navigation and Ranging), que utiliza a propagação de ondas sonoras em proveito da detecção, análise de movimento do alvo (AMA) e da classificação de contatos. Um fenômeno físico e natural que pode contribuir para a detecção passiva de submarinos (aquela que depende somente da energia sonora irradiada pelo alvo) é o Efeito Lloyd-Mirror, que será apresentado a seguir.

2 EFEITO LLOYD-MIRROR

O efeito Lloyd-Mirror, batizado com esse nome em homenagem ao matemático Humphrey Lloyd (1800-1881), foi amplamente estudado com o objetivo de avaliar as potencialidades do seu emprego em proveito da acústica submarina pelo Comitê Nacional de Pesquisa e Defesa norte-americano (NRDC), como apresentado em [1]. Basicamente, esse efeito consiste em um padrão de interferência acústica criado por uma fonte pontual colocada perto de uma suave e perfeitamente refletora superfície do mar[2].

Enquanto a fonte sonora (um alvo) se aproxima do receptor do sinal (um hidrofone de fundo, sonoboia ou um submarino), as frequências geradas pelo alvo sofrem sucessivas interferências construtivas e destrutivas que podem ser observadas através de um espectrograma. Na Figura1, gerada em proveito de [3], podemos observar essas interferências construtivas (regiões mais iluminadas) e destrutivas (regiões mais escuras) para várias frequências produzidas pelo ruído de banda larga gerado pela cavitação do hélice de um alvo.

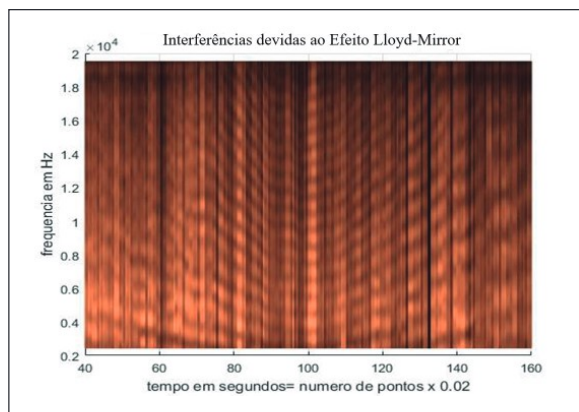


Figura 1: Exemplo de interferências devidas ao Efeito Lloyd-Mirror. O Ponto de maior aproximação (PMA) entre a fonte sonora e o hidrofone está próximo do ponto 100, onde as estrias ficam na direção horizontal.

A geometria característica desse efeito pode ser observada na Figura 2, onde S indica a posição da fonte a uma profundidade z_s , abaixo da superfície do mar ($z = 0$). Para um campo pontual qualquer $P(r, z)$, em uma região de águas profundas (desconsiderando reflexões no fundo), existem apenas dois caminhos de energia possíveis conectando a fonte ao receptor: o caminho direto SP e o caminho refletido pela superfície SAP.

Assumindo uma reflexão especular na superfície do mar, o caminho refletido pode ser tratado como se tivesse sido gerado a partir da fonte imaginária S' .

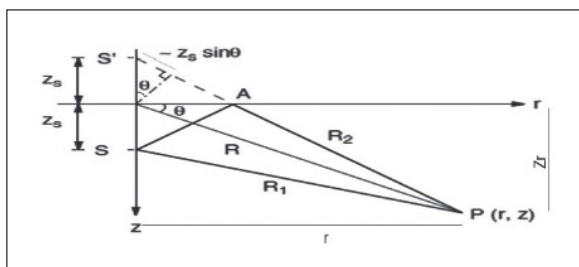


Figura 2: Esquema básico do efeito Lloyd-Mirror, adaptado de [2].

Assim, o campo total em $P(r, z)$ pode ser escrito simplesmente como a soma de contribuições devidas a duas fontes pontuais [2]:

$$p(r, z) = \frac{e^{ikR_1}}{R_1} - \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (1)$$

Onde $k = 2\pi/\lambda$ é o número de ondas acústico e os valores de R_1 e R_2 podem ser obtidos por:

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - z_s)^2} \text{ e } R_2 = \sqrt{r^2 + (z + z_s)^2}$$

O sinal de menos na equação (1) é necessário para satisfazer a condição de fronteira na superfície (*pressure release surface*, $p = 0$) [2] que acarreta na inversão de fase do sinal refletido na superfície. Uma explicação matemática mais detalhada pode ser obtida em [3]. Os níveis da fonte são normalizados para dar amplitude unitária a 1 m de distância da fonte.

A equação (1) representa um padrão de interferência bastante complexo, para o qual pode-se derivar uma expressão simplificada assumindo que a distância R da origem seja muito maior que a profundidade da fonte z_s ; denotando o ângulo de declinação por θ , encontramos que, para $R \gg z_s$, as distâncias R_1 e R_2 podem ser aproximadas por [2]:

$$R_1 \approx R - z_s \sin\theta \text{ e } R_2 \approx R + z_s \sin\theta \quad (3)$$

Considerando também que as distâncias que aparecem nos denominadores de ambos os termos podem ser substituídas simplesmente pela distância inclinada R , sabendo-se que as amplitudes decaem lentamente com alcance e substituindo as duas exponenciais por uma função trigonométrica com base na Equação de Euler, podemos chegar à fórmula simplificada [2]:

$$|p| = \frac{2}{R} |\sin(kz_s \sin\theta)| \quad (4)$$

Em [2], o autor apresentou as fórmulas e seus valores simplificados, mas omitiu as resoluções matemáticas necessárias para se chegar à fórmula apresentada acima. Todas essas resoluções matemáticas foram apresentadas em [3], onde também foram explicitadas considerações sobre os erros devidos às simplificações.

A superfície refletora do mar é vista gerando um padrão direcional com sucessivos valores de pressões sonoras máximas e mínimas devidas às sucessivas interferências construtivas e destrutivas dadas por [2]:

$$|p|_{\max} = \frac{2}{R} \text{ para } \sin\theta = \frac{(2m-1)\pi}{2kz_s} \text{ onde } m = 1, 2, \dots, \text{ ou seja, múltiplos ímpares de } \pi/2 \quad (5)$$

$$|p|_{\min} = 0 \text{ para } \sin\theta = \frac{m\pi}{kz_s} \text{ onde } m = 1, 2, 3, \dots, \text{ ou seja, nos múltiplos pares de } \pi/2 \quad (6)$$

Na Figura 3 podemos observar a clássica imagem do padrão de interferências devidas ao Efeito Lloyd-Mirror. Observe que o máximo de pressão corresponde ao dobro do valor de uma única fonte (interferência construtiva), enquanto o mínimo de pressão é zero (interferência destrutiva)[2]. O número M de feixes de Lloyd é finito e também pode ser determinado como apresentado em [2] e [3]

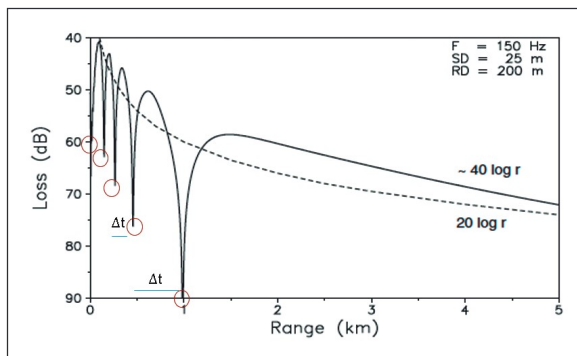


Figura 3: Exemplo obtido de [2] representando uma fonte a 25 m de profundidade emitindo uma frequência de 150 Hz com $\lambda = 10$ m, velocidade do som $C = 1500$ m/s, profundidade do receptor 200 m. Os círculos vermelhos assinalam os instantes de ocorrência dos “mínimos” e permitem observar os feixes de Lloyd.

À medida que a superfície do mar se torna rugosa devido principalmente ao vento, o som refletido na superfície será espalhado em todas as direções[4] acarretando em uma redistribuição da energia incidente em raios, não correspondendo ao caminho refletido esperado[6]. Uma vez que o efeito Lloyd-Mirror consiste justamente na interferência entre as ondas sonoras que percorrem um caminho direto entre a fonte sonora e o receptor e as que são refletidas na superfície antes de chegar ao receptor, torna-se necessário estudar o efeito que a rugosidade do estado do mar pode acarretar nesse processo. Uma fórmula muito eficiente e confiável para descrever a refletividade em uma fronteira rugosa é a equação de Rayleigh[2]:

$$R'(\theta) = R(\theta)e^{-0,5\tau^2} \quad (7)$$

onde $R'(\theta)$ é o novo coeficiente de reflexão, reduzido devido à dispersão na interface aleatoriamente rugosa[2], e τ é o parâmetro de rugosidade de Rayleigh definido como[2]:

$$\tau = 2k\sigma\sin\theta \quad (8)$$

Onde $k = 2\frac{\pi}{\lambda}$ é o número de onda, σ é a amplitude das ondas da superfície do mar em valor root-mean-square (RMS) e θ é o “grazing angle” (complemento do ângulo de incidência)[2].

Observe que o coeficiente de reflexão para uma superfície perfeitamente lisa é -1 em função dos processos de condensação e rarefação que acarretam na inversão de fase da onda refletida na superfície, como já anteriormente comentado (*pressure release condition*), de modo que a Equação 7 pode ser reescrita como[2]:

$$R'(\theta) = -e^{-0,5\tau^2} \quad (9)$$

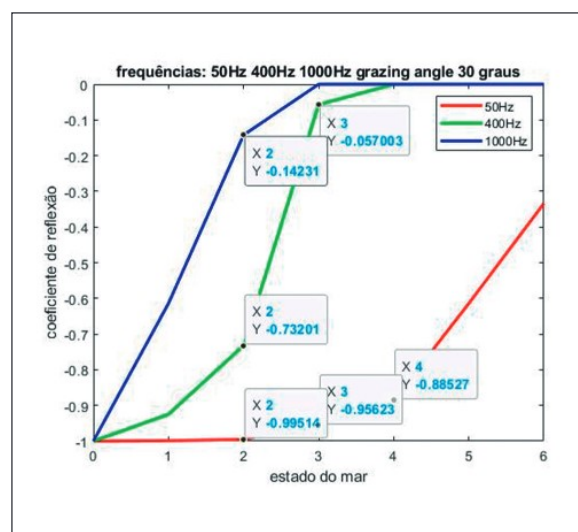


Figura 4: Gráfico elaborado em MATLAB, fornecendo o coeficiente de atenuação que deve ser multiplicado ao termo referente ao sinal refletido na superfície (segundo termo da Equação 1), produzido durante a pesquisa que deu origem à dissertação apresentada em [3].

Na Figura 4 obtemos os coeficientes a serem multiplicados ao segundo termo da Equação 1 para três diferentes frequências em função do estado do mar. Observe que maiores frequências apresentam menores coeficientes para um mesmo estado do mar, ou seja, quanto maior a frequência, mais agressiva é a atenuação em função de um estado do mar mais severo.

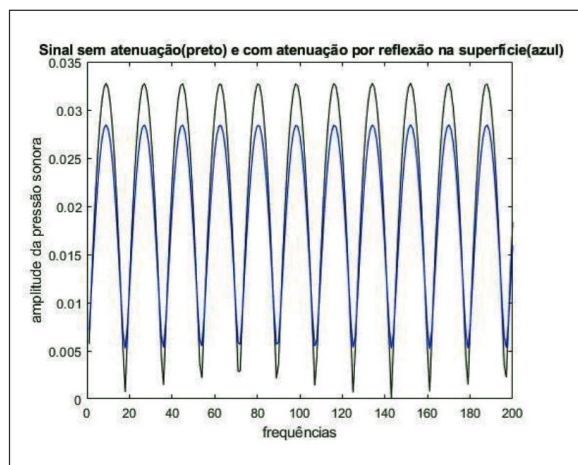


Figura 5: Representação gráfica do resultado de uma simulação criada durante a dissertação apresentada em [3], com objetivo de analisar o efeito do estado do mar em um tom discreto submetido ao Efeito Lloyd-Mirror; nota-se que as posições dos “mínimos” não se alteram.

Na Figura 5, em preto temos uma frequência de 400 Hz submetida ao efeito Lloyd-Mirror considerando uma superfície perfeitamente lisa e livre de perdas. Em azul, a mesma frequência considerando a perda no caminho refletido na superfície em função do espalhamento devido ao estado do mar. Esse gráfico também foi gerado em proveito de [3]. O resultado é coerente com o apresentado no artigo [1], publicado na revista *Acoustics Today*, em que o autor comenta que o efeito do estado do mar “achata” o sinal submetido ao efeito Lloyd-Mirror, preenchendo os “nulos” e reduzindo os picos. Além disso, observe que as posições dos “mínimos” não se alteram.

3 CONCLUSÃO

O Efeito Lloyd-Mirror é um fenômeno que ocorre naturalmente para todas as frequências e que depende basicamente da profundidade da fonte sonora, profundidade do receptor do sinal, da velocidade do som na água, da frequência que está sendo analisada e da distância entre a fonte sonora e o receptor do sinal. Uma vez que o alvo esteja emitindo ruídos de banda larga ou estreita, e que esse fenômeno seja detectado, uma solução para a AMA poderá ser obtida.

No caso específico da utilização desse efeito como uma ferramenta auxiliar para a detecção de submarinos, podem ser apresentadas aqui ao menos três formas possíveis de emprego: primeiramente em so-

noboias lançadas por aeronaves, contribuindo para a defesa da esquadra; outra possibilidade seria a utilização em hidrofones de fundo, de modo que podem ser empregados para o monitoramento da costa; por fim, esse fenômeno pode ser adotado em sistemas de combate empregados por submarinos, em que os sistemas podem ser utilizados como uma ferramenta de auxílio em caso de um eventual combate contra um submarino inimigo.

Partindo-se do princípio que os tons discretos gerados por equipamentos empregados a bordo de submarinos serão submetidos ao efeito Lloyd-Mirror, o padrão de interferências pode ser aproveitado como instrumento de determinação dos parâmetros da AMA para uma solução de tiro que pode fornecer uma solução passiva que permita obter a distância ao alvo, seu rumo, velocidade e profundidade, como apresentado em [3]. Durante a pesquisa realizada em [3] foram utilizados dois programas que apresentaram resultados bastante promissores. O primeiro programa simula os intervalos de tempo entre as ocorrências de “mínimos” de sinal em função de vinte valores de cada um dos seguintes parâmetros: ângulo de proa, velocidade relativa, distância e profundidade do alvo, gerando ao todo cento e sessenta mil possibilidades (20^4) que se esperam obter para um determinado sinal e, para cada uma dessas possibilidades, eram gerados trinta intervalos de tempo entre os “mínimos”. Em seguida, um outro programa fornece a solução da AMA através da comparação entre os intervalos reais, medidos em um sinal real e aqueles gerados pelo programa de simulação. Ainda em [3] foram feitos testes que permitiram observar que, mesmo que haja erros na determinação dos “mínimos” ou que a detecção ocorra na presença de ruídos, uma solução será fornecida e a margem de erro observada nesses casos parece ser aceitável diante da capacidade do armamento a ser empregado. Cabe ressaltar que a determinação passiva da profundidade de um submarino consiste em uma inovação para a Marinha do Brasil e que poderia maximizar a probabilidade de sucesso do armamento em um eventual combate contra um submarino inimigo.

Outro aspecto importante a ser considerado é que a análise dos “máximos” de sinal, embora seja menos precisa, pode garantir uma relação sinal-ruído suficiente para detecção nos casos em que, a princípio, o



alvo ainda não havia sido detectado, seja devido a um maior ruído ambiente ou a um excelente isolamento acústico. Por fim, cabe ressaltar que o tempo necessário para obter uma solução é função da frequência do tom discreto, uma vez que maiores frequências fornecerão mais “mínimos” e “máximos” em um mesmo intervalo de tempo.

REFERÊNCIAS

CAREY, W. M. Lloyd's Mirror image interference effects. Boston, Revista Acoustics Today v. 5, Acoustical Society of America, 2009. 14-19.

JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B. et al. Computational ocean acoustics. 2 ed. New York, Springer, 2011, 17-20 e 51-52.

GIMENEZ, D. F. Determinação de Parâmetros de Alvos submarinos a partir de interferências devidas ao Efeito Lloyd-Mirror, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, UFRJ, 2020. 27-81.

ETTER, P. C. Underwater acoustic modelings, London, Chapman e Hall, 1996, 48-50.

SONTAG, S., DREW, C. Blind man's bluff. The untold story of american submarine espionage, New York, Public Affairs, 1998, XII e XIII

HODGES, R. P. Underwater acoustics: analysis, design and performance of sonar. 2ed. West Sussex, United Kingdom, Wiley, 2010. 101-107

BITTENCOURT, A. S., ALMEIDA, F. E., et al. Introdução à história marítima brasileira. Rio de Janeiro, Serviço de Documentação da Marinha, 2006. 142