

Blindagem Eletromagnética

Cassiano Duarte Sarkis

Trabalho da Disciplina Teoria de Materiais, 1o Semestre de 2000, Prof. Jaime Arturo Ramírez

Abstract Neste trabalho será estudado a efetividade da blindagem para blindagens sólidas com nenhuma abertura.

I. INTRODUÇÃO

UMA blindagem é uma partição metálica localizada entre duas regiões do espaço a fim de controlar a propagação de campos eletromagnéticos de uma das regiões para a outra. A blindagem pode ser utilizada, por exemplo, para conter uma fonte de ruído, evitando a interferência desta fonte de ruído com quaisquer equipamentos externos à blindagem. Igualmente, a blindagem pode ser usada para manter radiação eletromagnética fora de uma região específica do espaço; isto fornece proteção somente para o equipamento (receptor) específico contido dentro da blindagem. Nos casos de estações de transmissão não se pode blindar a fonte; os receptores que devem, quando necessário, serem blindados.

II. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A. Campos próximos e afastados

As características de um campo são determinadas pela fonte, os meios circundantes da fonte, e a distância entre a fonte e o ponto de observação. Em um ponto perto da fonte, as propriedades do campo são determinadas principalmente pelas características da fonte. Longe da fonte, as propriedades do campo dependem principalmente do meio através do qual o campo está propagando. Consequentemente o espaço circundante de uma fonte de radiação pode ser dividida em duas regiões: campo próximo (perto da fonte); campo afastado (distância maior que $\lambda/2\pi$). A região afastada de aproximadamente $\lambda/2\pi$ da fonte é a região de transição.

A razão entre o campo elétrico (E) e o campo magnético (H) é a impedância da onda. Nos campos afastados esta razão E/H é igual a impedância característica do meio (isto é, $E/H = Z_0 = 377\Omega$ para o ar ou o espaço livre). Nos campos próximos a razão é determinada pelas características da fonte e a distância da fonte até onde o campo é observado. Se a fonte tem corrente alta e tensão baixa ($E/H < 377$), o campo próximo é predominantemente magnético. Se a fonte tem corrente baixa e tensão alta ($E/H > 377$), o campo próximo é predominantemente elétrico. Para uma antena retilínea, a impedância da fonte é alta. A impedância da onda próxima à antena (predominantemente um campo elétrico) é também alta. À medida que a distância é aumentada, o campo elétrico perde um pouco de sua intensidade comparada ao campo magnético complementar. No campo próximo o campo elétrico atenua a uma taxa de $(1/r)^3$, ao passo que o campo magnético atenua a uma taxa de $(1/r)^2$. Assim, a impedância de onda de uma

antena retilínea decresce com a distância e assintoticamente aproxima-se da impedância do espaço livre no campo próximo.

Para um campo predominantemente magnético (como aquele produzido por uma antena circular) a impedância de onda próxima à antena é baixa. Quando a distância da fonte aumenta, o campo magnético atenua em uma taxa de $(1/r)^3$ e o campo elétrico atenua em uma taxa de $(1/r)^2$. Portanto, a impedância de onda aumenta com a distância e se aproxima daquela do espaço livre em uma distância de $\lambda/2\pi$.

No campo afastado tanto o campo elétrico quanto o campo magnético atenuam-se a uma taxa de $1/r$.

No campo próximo os campos elétricos e magnéticos devem ser considerados separadamente, uma vez que a razão entre os dois não é constante. No campo afastado, contudo eles se combinam para formar uma onda plana tendo uma impedância de 377Ω . Consequentemente, quando ondas planas são discutidas, elas são assumidas serem do campo afastado. Quando os campos elétricos e magnéticos são discutidos individualmente eles são assumidos serem do campo próximo.

B. Impedâncias de ondas

Para uma onda eletromagnética qualquer, a impedância de onda é definida como

$$Z_w = E/H.$$

A impedância característica de um meio é definida como

$$Z_0 = (j\omega\mu/(\sigma + j\omega\epsilon))^{1/2}.$$

No caso de uma onda plana no campo afastado, Z_0 é também igual à impedância de onda Z_w . Para isolantes ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) a impedância característica é independente da frequência e se torna

$$Z_0 = (\mu/\epsilon)^{1/2}.$$

Para condutores ($\sigma \gg j\omega\epsilon$), a impedância característica é chamada impedância de blindagem Z_s e se torna

$$Z_s = (j\omega\mu/\sigma)^{1/2}$$

Para o cobre em 1kHz, $|Z_s| = 1,16 \times 10^{-5} \Omega$.

C. Efetividade da blindagem

O processo de blindagem pode ser especificado em termos da redução na intensidade dos campos elétricos e/ou magnéticos causada pela blindagem.

A efetividade da blindagem (S) é definida para campos elétricos como

$$S = 20\log(E_0/E_1) \quad \text{dB},$$

e para campos magnéticos como

$$S = 20\log(H_0/H_1) \quad \text{dB}.$$

Onde o índice 0 refere-se à intensidade do campo incidente e o índice 1 à intensidade de campo da onda transmitida quando ela surge da blindagem.

No projeto de um recinto blindado, há duas considerações importantes: (1) a efetividade da blindagem do material, e (2) a efetividade da blindagem devido a descontinuidades e buracos na blindagem.

Primeiramente, a efetividade da blindagem de uma blindagem sólida com nenhuma junção ou buraco é determinada, e então os efeitos das descontinuidades e buracos são considerados. Neste trabalho somente será tratado a efetividade da blindagem para blindagens sólidas com nenhuma abertura. As aberturas são deixadas para um trabalho posterior e mais avançado.

A efetividade da blindagem varia com a frequência, a geometria da blindagem, a posição dentro da blindagem onde o campo é medido, o tipo de campo sendo atenuado, direção de incidência e polarização.

Dois tipos de perdas são encontradas por uma onda eletromagnética incidindo em uma superfície metálica. A onda é parcialmente refletida da superfície, e a porção transmitida é atenuada quando ela passa através do meio. Este último efeito, chamado perda de absorção ou penetração, é a mesma para campos próximos ou afastados e para campos elétricos ou magnéticos. A perda de reflexão, contudo, é dependente do tipo de campo, e da impedância da onda.

A efetividade da blindagem total (S) de um material é igual à soma da perda por absorção (A) mais a perda por reflexão (R) mais o fator de correção (B) para levar em conta reflexões múltiplas nas blindagens finas. Portanto,

$$S = A + R + B \quad \text{dB}.$$

O fator de reflexão múltipla B pode ser desprezado se a perda por absorção A é maior do que 9 dB. De um ponto de vista prático, B pode também ser desprezado para campos elétricos e ondas planas.

D. Perda por absorção

Quando uma onda eletromagnética passa através de um meio sua amplitude decai exponencialmente. Este decaimento ocorre porque correntes induzidas no meio produzem perdas ôhmicas e aquecimento do material. Assim,

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 e^{-t/d}, \\ H_1 &= H_0 e^{-t/d}, \end{aligned}$$

onde E_1 (H_1) é a intensidade da onda em uma distância t dentro da blindagem. A distância requerida para a onda ser atenuada para 1/e ou 37% de seu valor original é definido como profundidade pelicular (d),

$$d = (2/\omega\mu\sigma)^{1/2} \quad \text{m}.$$

Pode ser demonstrado que a perda por absorção é

$$A = 8.69(t/d) \quad \text{dB},$$

onde t é a espessura da blindagem.

Pela equação acima conclui-se que dobrando a espessura da blindagem dobra-se a perda em dB.

A perda por absorção também pode ser colocada em termos da frequência como

$$A = 3.34t(f\mu_r\sigma_r)^{1/2} \quad \text{dB},$$

onde t é igual à espessura da blindagem (em polegadas).

E. Perda por reflexão

A perda por reflexão na interface entre dois meios está relacionada com a diferença na impedâncias características entre os meios. A intensidade da onda transmitida de um meio com impedância Z_1 para um meio com impedância Z_2 é

$$\begin{aligned} E_t &= (2Z_2/(Z_1+Z_2))E_0, \\ H_t &= (2Z_1/(Z_1+Z_2))H_0, \end{aligned}$$

onde, E_0 (H_0) é a intensidade da onda incidente, e E_t (H_t) é a intensidade da onda transmitida.

Quando uma onda passa através de uma blindagem, ela encontra duas fronteiras. A segunda fronteira está entre um meio com impedância Z_2 e um meio com impedância Z_1 ($Z_1|Z_2|Z_1$, onde Z_2 corresponde à impedância da blindagem). A onda transmitida E_t (H_t) após atravessar toda a espessura da blindagem, já no meio com impedância Z_1 novamente, é

$$\begin{aligned} E_t &= (2Z_1/(Z_1+Z_2))E_1, \\ H_t &= (2Z_2/(Z_1+Z_2))H_1. \end{aligned}$$

Caso a blindagem seja grossa comparada à profundidade pelicular e $Z_1 \gg Z_2$ (ou seja, a blindagem é metálica e o meio circundante um isolante), pode-se demonstrar que a perda por reflexão (R), desprezando-se múltiplas reflexões, tanto para os campos E ou H é

$$R = 20\log(|Z_w|/(4|Z_s|)) \quad \text{dB},$$

onde

$Z_w = Z_1$ = impedância da onda antes de entrar na blindagem e depois de sair ($Z_w = E/H$),

$Z_s = Z_2$ = impedância da blindagem ($Z_s = (j\omega\mu/\sigma)^{1/2}$).

Estas equações para a perda por reflexão são para uma onda plana aproximando-se da interface em incidência normal. Se a onda aproxima-se em outra do que a incidência normal, a perda de reflexão aumenta com o ângulo de incidência. Os resultados também aplicam-se em outras ondas que não sejam ondas planas, uma vez que qualquer campo arbitrário pode ser construído a partir da superposição de ondas planas. Os resultados também aplicam-se para uma interface curva, desde

que o raio de curvatura seja muito maior do que a profundidade pelicular.

F. Perda por reflexão para ondas planas

No caso de uma onda plana (campo afastado), a impedância de onda Z_w é igual à impedância característica do espaço livre Z_0 (377Ω). Conseqüentemente, R torna-se:

$$R = 20\log(94,25/|Z_s|) \quad \text{dB}.$$

Ou seja, quanto menor a impedância da blindagem, maior é a perda por reflexão.

G. Perda por reflexão no campo próximo

No campo próximo a razão do campo elétrico para o campo magnético não é mais determinada pela impedância característica do meio. Antes, a razão do campo elétrico para o campo magnético depende mais das características da fonte (antena). Se a fonte tem alta tensão e baixa corrente, a impedância da onda é maior do que 377Ω , e o campo será um campo de alta impedância, ou elétrico. Se a fonte tem baixa tensão e alta corrente, a impedância da onda será menor do que 377Ω , e o campo será um campo de baixa impedância, ou magnético.

Uma vez que a perda por reflexão é uma função da razão entre a impedância de onda e a impedância da blindagem, a perda por reflexão varia com a impedância de onda. Um campo de alta impedância (elétrico) conseqüentemente tem maior perda por reflexão do que uma onda plana. Similarmente, um campo de baixa impedância (magnético) tem perda por reflexão menor do que uma onda plana.

Para qualquer distância especificada entre fonte e blindagem, as curvas de perda por reflexão referentes aos campos elétrico e magnético e à onda plana unem-se na frequência que faz a separação entre fonte e blindagem igual a $\lambda/2\pi$ ($\lambda = v/f$, onde v é velocidade (m/s) e f é frequência (Hz)).

H. Perda por reflexão no campo elétrico

A impedância de onda devido à uma fonte pontual de campo elétrico pode ser aproximada pela seguinte equação quando $r < \lambda/2\pi$

$$|Z_w|_e = 1/(2\pi f \epsilon r),$$

onde r é a distância da fonte para a blindagem (em metros). Assim, R torna-se

$$R_e = 20\log(1/(8\pi f \epsilon r |Z_s|)) \quad \text{dB}.$$

I. Perda por reflexão no campo magnético

A impedância de onda devido a uma fonte pontual de campo magnético pode ser aproximada pela seguinte equação, assumindo $r < \lambda/2\pi$:

$$|Z_w|_m = 2\pi f \mu r,$$

onde r é a distância da fonte para a blindagem em metros. Assim, R torna-se

$$R_m = 20\log(2\pi f \mu r / (4|Z_s|)) \quad \text{dB}.$$

J. Equação geral para a perda por reflexão

Desprezando múltiplas reflexões uma equação generalizada para a perda por reflexão pode ser escrita como

$$R = C + 10\log((\sigma_r/\mu_r)(1/(f^n r^m))),$$

onde as constantes C, n e m são listadas na tabela abaixo para ondas planas, campos elétricos, e campos magnéticos:

TABLE I
CONSTANTES PARA A EQUAÇÃO GERAL PARA PERDA POR REFLEXÃO

Tipo de Campo	C	N	m
Elétrico	322	3	2
Onda Plana	168	1	0
Magnético	14,6	-1	-2

K. Reflexões múltiplas em blindagens finas

Se a blindagem é fina, a onda refletida da segunda fronteira (da blindagem) é re-refletida para a primeira fronteira (da blindagem), e então retorna para a segunda fronteira para ser refletida novamente, e assim por diante. Este efeito pode ser desprezado no caso de uma blindagem grossa, uma vez que a perda por absorção é alta.

Para campos elétricos a maior parte da onda incidente é refletida na primeira fronteira da blindagem, e somente uma pequena percentagem entra na blindagem. Portanto, múltiplas reflexões dentro da blindagem pode ser desprezada para campos elétricos.

Para campos magnéticos a maior parte da onda incidente passa dentro da blindagem na primeira fronteira. Com um campo magnético de tal amplitude dentro da blindagem, o efeito de múltiplas reflexões dentro da blindagem deve ser considerado.

O fator de correção para a reflexão múltipla de campos magnéticos em uma blindagem de espessura t e profundidade pelicular d é

$$B = 20\log(1 - e^{-2t/d}) \quad \text{dB}.$$

Note que o fator de correção é um número negativo, indicando que blindagem menor é obtida de uma blindagem fina devido à reflexão.

III. OBSERVAÇÕES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

A. Perda por absorção

O aço oferece mais perda por absorção do que o cobre para uma mesma espessura. Mesmo quando o aço é usado, contudo, uma lâmina grossa ($> 0,125$ polegadas) deve ser usada para fornecer perda de absorção apreciável (> 66 dB) abaixo de 1000 Hz.

B. Perda por reflexão e absorção para ondas planas

Sabendo-se que R é também função da frequência, verifica-se que embora o aço tenha mais perda por absorção do que o cobre, ele tem menos perda por reflexão. E mais; a perda por

reflexão para ondas planas é maior em baixas frequências e para materiais de alta condutividade.

A perda total para ondas planas no campo afastado é uma combinação das perdas por absorção e reflexão, como indicado na equação $S = A + R + B$. O termo de correção para a reflexão múltipla B é normalmente desprezado para ondas planas, uma vez que a perda por reflexão é alta.

Considerando-se a atenuação total ou efetividade da blindagem no campo afastado de uma blindagem de cobre sólida (0,020 polegadas), pode ser visto que a perda por reflexão decresce com o aumento na frequência; isto porque a impedância da blindagem Z_s aumenta com a frequência. A perda por absorção, contudo, aumenta com a frequência, devido ao decrescimento da profundidade pelicular. A efetividade da blindagem mínima ocorre em uma frequência intermediária, neste caso em 10kHz. Fica evidente que para ondas planas de baixa frequência, a perda por reflexão presta conta da maior parte da atenuação, ao passo que a maior parte da atenuação em altas frequências vem da perda por absorção.

C. Perda por reflexão e absorção para campos elétricos

A perda total para um campo elétrico é obtido pela combinação das perdas por absorção e reflexão, como indicado na equação $S = A + R + B$. O fator de correção para reflexões múltiplas B é normalmente desprezado no caso de um campo elétrico, uma vez que a perda por reflexão é alta. Em baixas frequências, a perda por reflexão é o principal mecanismo de blindagem para campos elétricos. Em altas frequências, a perda por absorção é o principal mecanismo de blindagem.

D. Perda por reflexão e absorção para campos magnéticos

A perda total para um campo magnético é obtido pela combinação das perdas de absorção e reflexão, como indicado na equação $S = A + R + B$. Se a blindagem é grossa (perda por absorção > 9 dB), o fator de correção para reflexão múltipla B pode ser desprezado. Se a blindagem é fina o fator de correção deve ser incluso.

No campo próximo a perda por reflexão em um campo magnético de baixa frequência é pequena. Devido às múltiplas reflexões este efeito é mesmo mais pronunciado em uma blindagem fina. A perda principal para campos magnéticos é a perda por absorção. Uma vez que as perdas por absorção e reflexão são pequenas em baixas frequências a efetividade da blindagem total é baixa. Portanto, é difícil blindar campos magnéticos em baixas frequências. Proteção adicional contra campos magnéticos de baixa frequência pode ser alcançada somente fornecendo um caminho de desvio magnético de baixa relutância para desviar o campo em volta do circuito sendo protegido.

E. Perda por reflexão e absorção (visão geral)

Considerando-se a efetividade da blindagem de uma blindagem de alumínio sólido (0,02 polegadas) para um campo elétrico, onda plana e campo magnético, pode ser visto que há considerável blindagem em todos os casos exceto para campos magnéticos em baixa frequência.

Em altas frequências (acima de 10 MHz), a perda por absorção predomina, e qualquer blindagem sólida

suficientemente grossa para fins práticos fornece mais do que blindagem adequada para a maior parte das aplicações.

F. Blindagem com materiais magnéticos

Resultados experimentais em atenuação magnética (efetividade da blindagem para campos magnéticos) por lâminas metálicas no campo próximo, mostram: (1) O aço é superior ao cobre para a blindagem de campos magnéticos em 1 kHz. Mas, em 100 kHz, o aço é somente levemente melhor do que o cobre. Em algum lugar entre 100 kHz e 1 MHz, contudo, um ponto é alcançado onde o cobre torna-se uma blindagem melhor do que o aço. (2) Em 1 kHz, o mumetal é mais efetivo do que o aço, mas em 10 kHz, o aço é mais efetivo do que o mumetal. Em 100 kHz, aço, cobre e alumínio são todos melhores do que o mumetal.

Em resumo, um material magnético tal como o aço ou mumetal executam uma blindagem de campo magnético melhor em baixas frequências do que um bom condutor tal como o alumínio ou o cobre. Em altas frequências, contudo, os bons condutores fornecem as melhores blindagens magnéticas.

IV. CONCLUSÃO

De fato, a importância do estudo da blindagem para a Engenharia Elétrica ficou evidente com este trabalho. Em diversos momentos o engenheiro eletricitista se depara com a necessidade de proteger equipamentos eletrônicos, principalmente equipamentos de medição, de ondas eletromagnéticas consideradas como ruídos.

REFERÊNCIAS

- [1] H. W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems," John Wiley e Sons, Inc., 1988.
- [2] W. H. Hayt Jr., "Eletromagnetismo," LTC Editora, 1998.
- [3] D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane, "Física," LTC Editora, 1992.
- [4] S. Visacro Filho, "Curso Básico de Teoria Eletromagnética," Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, 1996.
- [5] Sites de Internet.