

# Método de "Deinterleaving" de Emissões Radar utilizando a Amplitude

Ricardo Marzullo de Britto, Jorge Costa Pires Filho e Sergio Rodrigues Neves  
Instituto de Pesquisas da Marinha, Grupo de Guerra Eletrônica, Rua Ipiru, 2- CEP: 21930-090 - Rio de Janeiro- RJ-Brasil

**Resumo** — A amplitude de pulsos radar não tem sido amplamente utilizada para desembaralhamento (deinterleaving) de emissores por ser considerada pouco confiável, uma vez que seu valor absoluto pode variar muito na recepção em função de diversos fatores; tais como distância, superposição, varredura, reflexões e intempéries. Entretanto, a amplitude é um parâmetro que sofre pouca influência intencional do emissor. As técnicas convencionais não são muito eficientes nos dias de hoje, devido aos emissores apresentarem agilidade em praticamente todos os outros parâmetros.

Nesse artigo, é proposto um método para "deinterleaving" baseado no fato de que as amplitudes dos pulsos provenientes de um mesmo emissor não sofrem grandes variações em um intervalo de tempo suficientemente pequeno. Pulsos adjacentes ou que estejam dentro de um mesmo intervalo de tempo suficientemente pequeno, deverão pertencer a emissores diferentes se apresentarem grande diferença de amplitude, mas têm grande probabilidade de pertencerem a um mesmo emissor se apresentarem amplitudes muito próximas.

**Palavras-chaves** — Deinterleaving, MAGE, radar, amplitude, agilidade.

## I. INTRODUÇÃO

O desembaralhamento (deinterleaving) de pulsos de radar recebidos de diferentes fontes em um único canal é uma tarefa de vital importância para sistemas de reconhecimento passivos tais como MAGE e ELINT. Tais sistemas irão medir as características desses pulsos, separá-los e associá-los a determinada ameaça.

Os algoritmos de "deinterleaving" são baseados na análise de vários parâmetros dos pulsos recebidos, tais como tempo de chegada do pulso, ângulo de chegada, amplitude, largura de pulso e frequência da portadora (figura 1). Além desses parâmetros intrapulso ou primários, podem também ser utilizados parâmetros interpulso ou secundários, como o intervalo ou a frequência de repetição de pulsos e a taxa de varredura. Os parâmetros interpulso ou secundários ao contrário dos parâmetros intrapulso ou primários, dependem de uma seqüência de pulsos para que sejam definidos.

"Deinterleaving" não é um problema recente. Em [1] Mardia desenvolve um método que utiliza histogramas das diferenças de tempo de chegada (DTOA). Esse método teve sua eficiência aumentada em [2]. Em [3] e [4] algoritmos baseados em modelos estocásticos lineares dinâmicos foram apresentados, tendo também como parâmetro chave a medida do tempo de chegada. Diversos artigos nesse campo de

conhecimento descrevem outros métodos, como em [5] e [6], onde é utilizada a transformada wavelet rápida.

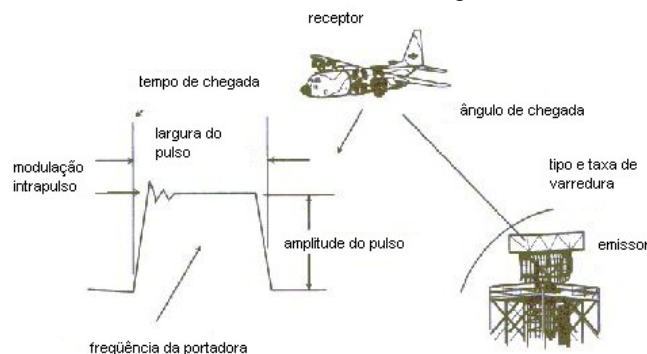


Figura 1 : Parâmetros medidos por sistema MAGE.

O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de utilizar as amplitudes dos pulsos como parâmetro de "deinterleaving", na tentativa de melhorar a eficiência do processo nos casos de emissores com qualquer tipo de agilidade. A amplitude, assim como o ângulo de chegada, ainda são parâmetros que sofrem pouca influência intencional dos emissores. As técnicas convencionais não são muito eficientes atualmente devido ao fato de que os emissores modernos apresentam agilidades em, praticamente, todos os parâmetros. A tabela abaixo apresenta uma idéia das técnicas que estão sendo utilizadas pelos radares em operação.

TABELA 1 : Técnicas utilizadas por emissores com impacto nos processos de "deinterleaving" tradicionais [7].

Técnicas utilizadas na emissão	% de radares em operação
Modulação de frequência, de fase ou ambas	59,8%
Agilidade de frequência	57,2%
Sinal contínuo, modulação de Frequência e de fase	42,0%
Modulação de PRI	39,3 %
Sinal contínuo e agilidade de frequência	37,5%
Agilidade de frequência, sinal contínuo, modulações de fase e frequência.	38,8%

Ricardo M. de Britto, marzullo@ipqm.mar.mil.br;  
Sergio R. Neves, sergio@ipqm.mar.mil.br;  
Jorge C. Pires Filho, jpires@ipqm.mar.mil.br.

Observando a tabela 1, pode-se inferir a dificuldade encontrada quando se tenta fazer o "deinterleaving" de pulsos radar através de qualquer parâmetro utilizado tradicionalmente, com exceção do ângulo de chegada.

A amplitude não tem sido amplamente utilizada no "deinterleaving" [8] por ser considerada pouco confiável, uma vez que seu valor absoluto pode variar muito na recepção em função de diversos fatores; tais como distância, superposição, varredura, reflexões e intempéries. Entretanto, a amplitude ainda é o parâmetro, além do ângulo de chegada, que não é influenciado intencionalmente pelo emissor. O ângulo de chegada não pode ser mudado em um intervalo de tempo pequeno porque depende de deslocamentos rápidos do emissor. A amplitude também não é alterada intencionalmente a cada pulso, uma vez que os radares, em princípio, transmitem sempre na máxima potência disponível. Assim, pode-se dizer que, num intervalo de tempo suficientemente curto, amplitudes constantes dentro de uma faixa de tolerância de uma seqüência de pulsos, indicam com boa probabilidade que eles são provenientes de um mesmo emissor. Com maior certeza pode-se dizer que mais de um emissor estará presente se, em um intervalo de tempo pequeno, houver pulsos com amplitudes muito diferentes. O problema básico para o uso da amplitude como parâmetro de "deinterleaving" é determinar o intervalo de tempo necessário para que não ocorram grandes variações de amplitude nos pulsos provenientes de um mesmo emissor. Esse artigo está organizado da seguinte forma: em II são apresentados, de maneira breve, os aspectos teóricos que justificam o uso da amplitude como parâmetro de "deinterleaving", em III um algoritmo é proposto e em IV temos a conclusão.

## II – CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Os principais fatores que influenciam diretamente a potência do sinal recebido e a amplitude são:

- A velocidade relativa entre emissor e receptor;
- A frequência da portadora;
- A varredura executada pelo emissor;
- Reflexões ou efeito multicaminho ("multipath") de um sinal proveniente de uma mesma fonte;
- Obstrução das zonas de Fresnel;
- A superposição de pulsos provenientes de emissores diferentes e
- Fatores climáticos.

Breves conclusões sobre a consequência da influência de cada um destes fatores para o método proposto serão relatados a seguir. Para uma descrição mais completa recomenda-se a referência [9].

O modelo utilizado para o sinal recebido de um radar foi [8]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \quad \text{ou} \quad P_r = \frac{P_t A_t A_r}{R^2 \lambda^2}$$

Onde:

$\lambda$  = Comprimento de onda

$P_r$  = Potência recebida

$P_t$  = Potência transmitida

$G_t$  = Ganho da antena transmissora

$G_r$  = Ganho da antena receptora

$R$  = Distância entre antenas receptora e transmissora

$A_t$  = Área da antena transmissora

$A_r$  = Área da antena receptora

Nesta expressão foram omitidas as perdas, que podem ser consideradas como parte dos ganhos ou das áreas das antenas. A seguir vamos avaliar as variações de amplitude em função dos diversos fatores que a influenciam, do ponto de vista do receptor, dentro de um intervalo pequeno de tempo (20 ms). Em [9] foram testados diversos intervalos de tempo, sendo determinado que 20 ms atendem à maior parte dos casos..

### *Influência da velocidade do emissor*

A velocidade do emissor na direção do receptor provoca variação da potência do sinal recebido pois significa mudança da distância "R" no tempo. A distância "R" aparece elevada ao quadrado na expressão da potência do sinal recebido.

Através do modelo adotado, para o caso típico de  $\lambda = 0,3$  m,  $P_t = 25$  kW,  $A_t = A_r = 0,79$  m<sup>2</sup>, pode-se inferir que:

# Para que a potência, recebida por uma antena, proveniente de um emissor se aproximando com velocidade de 2 mach (680 m/s), a uma distância inicial de 10 Km, aumente 3dB, ou seja,  $\Delta P_r/P_r=1$ , é necessário o tempo de aproximadamente 4,3 s.

# Para que a potência, recebida por uma antena, proveniente de um emissor se afastando com velocidade de 2 mach (680 m/s), a uma distância inicial de 10 Km, caia 3dB, ou seja,  $\Delta P_r/P_r = 0,5$ , é necessário o tempo de aproximadamente 6,09 s.

Assim, mesmo para velocidades relativamente altas, a variação de amplitude no receptor é muito pequena em um intervalo de tempo pequeno. Se considerarmos 20ms, podemos afirmar que a amplitude praticamente não varia em função da velocidade do emissor.

### *Influência da frequência da portadora*

A frequência da portadora é um fator muito importante porque além de ser um parâmetro muito utilizado diretamente nos algoritmos tradicionais de "deinterleaving", aparece também na expressão da potência do sinal em uma antena receptora na forma de comprimento de onda elevado ao

$$\text{quadrado: } P_r = \frac{P_t A_t A_r}{R^2 \lambda^2}$$

Experimentando-se o caso típico de  $P_t = 25$  KW,  $A_r = A_t = 0,79$  m<sup>2</sup> e  $R = 10$  Km, temos que, para frequências em torno

de 10GHz, a relação  $\frac{\partial P_r(dB)}{\partial f(GHz)}$  é aproximadamente 0,87, o que dá uma variação de 0,44 dB por 500 MHz.

Como não se espera encontrar agilidades de frequência dos emissores muito acima de 1GHz, as mudanças de amplitude de pulsos provenientes de um mesmo emissor, em função da frequência, serão abaixo de alguns décimos de dB.

### *Influência da varredura do emissor*

Como as antenas de radar são diretivas, ou seja, possuem ganho bem mais acentuado em uma determinada direção, a potência do sinal que chega a um receptor muda sensivelmente com os movimentos de varredura efetuados

pelo emissor. Este é o fator que causa maior variação de amplitude nos pulsos recebidos.

Os piores casos acontecem para emissores que fazem varredura circular (figura 2), quando ocorre uma considerável variação da amplitude para o ponto de vista do receptor.

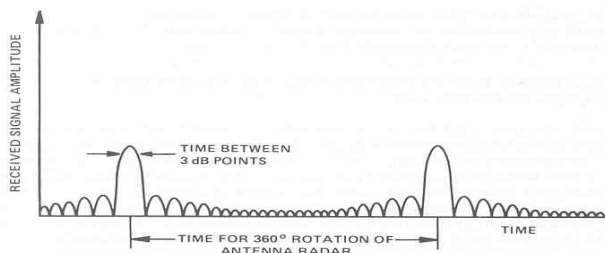


Figura 2: Amplitude de um sinal recebido em função do tempo, proveniente de um emissor que está executando varredura circular. Os picos grandes mostram a passagem dos lóbulos principais e os pequenos, dos lóbulos secundários.

Nestes casos, dependendo da velocidade da varredura, nem sempre se pode considerar que haverá pouca variação de amplitude no intervalo de 20 ms. Devemos considerar então a variação pulso a pulso, que continua a ser bastante pequena, a não ser que a PRI seja muito grande, sendo que neste caso, o emissor não deverá representar ameaça imediata, pois uma quantidade muito pequena de pulsos estará chegando ao receptor.

Os emissores de varredura que se enquadram neste caso são normalmente os menos letais (navegação ou busca). Os mais letais são do tipo “lock on” (direção de tiro).

#### *Influência de reflexões ou efeito “multipath”*

O efeito “multipath” é a transmissão de um sinal por diferentes caminhos, o que faz com que ocorra no receptor a superposição de amostras deste mesmo sinal com diferentes fases. Dependendo das fases e das amplitudes, estas amostras do sinal podem se somar ou se subtrair, resultando numa amplitude de recepção que varia desde um valor máximo, quando as fases são iguais, até um mínimo, quando as fases são opostas.

Apesar de, em determinadas situações ocorrerem significativas variações da diferença entre os percursos, com conseqüentes variações de fase da onda refletida em relação à direta, as perdas sofridas pela onda refletida na superfície do mar fazem com que a resultante da combinação no receptor com a onda direta seja praticamente a própria onda direta. Então é válido afirmar que em um intervalo curto de tempo as variações de amplitude no receptor provocadas pelo efeito “multipath” são pequenas para quaisquer movimentos efetuados pelas plataformas transmissora e receptora.

#### *Zonas de Fresnel*

Um sinal que chega a um receptor por um caminho que tenha obstáculos próximos sofre atenuação, mesmo que a linha de visada esteja desobstruída. Isto se deve à obstrução das zonas de Fresnel [11] (vide figuras 3, 4 e 5). Uma das maneiras de explicar a variação da potência recebida por uma antena, quando ocorre mudança da posição relativa entre as

plataformas transmissora e receptora, que ocorre além da perda de propagação pela atenuação do espaço livre, é através da variação do nível de obstrução das zonas de Fresnel.

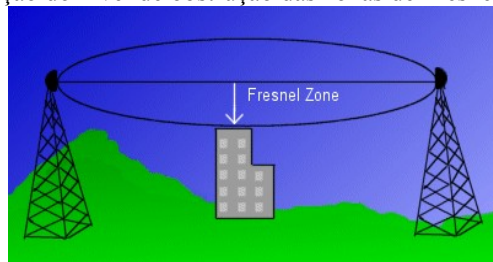


Figura 3: Ilustração de uma das zonas de Fresnel de um “link” de comunicação. As zonas de Fresnel são delimitadas por elipsóides concêntricos.

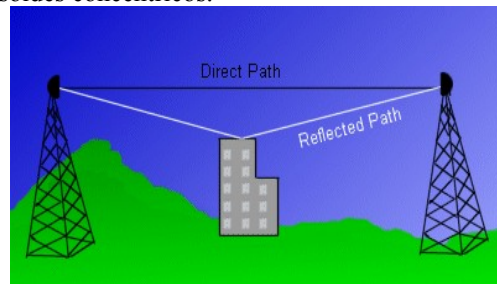


Figura 4: Ilustração dos percursos direto e refletido de um sinal de um “link” de comunicação.

A zona de Fresnel na qual se encontra o ponto de reflexão define se o sinal refletido terá uma contribuição aditiva ou subtrativa e a sua intensidade ao se combinar com o sinal direto no receptor. Com movimentos relativos entre as antenas transmissora e receptora, muda-se o ponto de reflexão em relação às zonas de Fresnel.

O estudo das zonas de Fresnel é normalmente utilizado em elos de comunicação com antenas fixas, para determinar quais alturas deverão ter as antenas para melhor eficiência do elo.

Para o intervalo de 20 ms, também não ocorrem variações significativas de amplitude devido a esse tipo de análise.

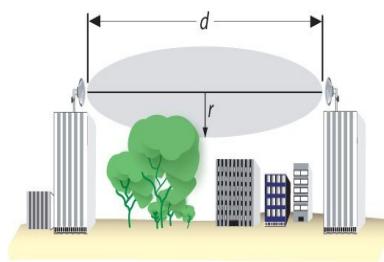


Figura 5: Ilustração de uma zona de Fresnel de raio  $r$  sendo parcialmente obstruída.

#### *Superposição de pulsos provenientes de emissores diferentes*

Quando pulsos de vários emissores estão presentes, existe a probabilidade de que alguns deles sejam superpostos ou de que cheguem em intervalos de tempo tão pequenos que não possam ser processados pelo receptor. A probabilidade de que isto ocorra [10] é função da taxa de pulsos e do tempo de

recuperação, sendo este o tempo necessário para que o sistema esteja pronto para receber e processar um novo pulso. A superposição causa perda de pulsos, mas não causa problemas para a análise de amplitude porque o sistema receptor simplesmente não mede estes pulsos ou quando o faz, dá uma indicação de que a medida não é confiável, podendo esta então ser descartada. Esse descarte não compromete o resultado final de processamento, visto que a taxa de superposição dos pulsos no tempo é baixa.

#### *Influência de fatores climáticos*

A atmosfera absorve energia dos sinais de radares, principalmente devido às oscilações dos dipolos magnético e elétrico das moléculas de oxigênio e de vapor d'água, respectivamente [12]. A figura 6 mostra a absorção de energia em dB/Km devida a estes dois fatores, em função da frequência.

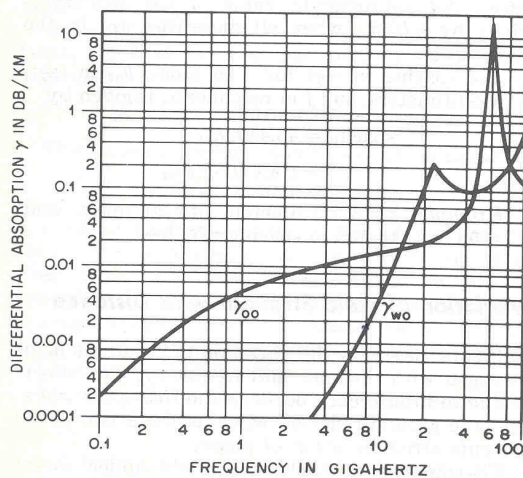


Figura 6: Gráfico das absorções de energia de uma onda eletromagnética pelas moléculas de oxigênio ( $\gamma_{oo}$ ) e de água ( $\gamma_{wo}$ ), na atmosfera. [12].

Na figura 6, para uma mudança de frequência de 8 GHz a 10 GHz, a absorção total muda de 0,0165 dB/Km para 0,02 dB/Km. Então a variação da absorção e, conseqüentemente, a variação de amplitude para sinais radar nesta faixa de frequência é bem pequena, já que as variações de frequência de um radar ágil, tipicamente não são maiores que 1 GHz.

Não é esperado que ocorram variações climáticas tão rápidas, quando comparadas ao intervalo de tempo (20ms), a ponto de alterar consideravelmente a atenuação do sinal. As variações rápidas de atenuação que podem ocorrer são devidas à agilidade de frequência, que não causam grandes diferenças de amplitude, conforme mostrado acima.

### III – TESTES REALIZADOS

Para demonstrar a efetividade da amplitude como parâmetro de deinterleaving, foram realizadas simulações em MATLAB, utilizando cenários gravados pelo Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, onde aparecem emissores com e sem agilidade de frequência. Foram experimentadas duas abordagens para este uso da amplitude: (a) comparação de amplitudes dentro de um

intervalo fixo de tempo (20ms) e (b) comparação de amplitudes pulso a pulso.

Os mesmos cenários foram submetidos também a uma simulação em MATLAB de um algoritmo tradicional, que faz a separação por frequência e ângulo de chegada, em células com faixas de frequência desde 50 MHz até 500 MHz para ser realizada a comparação da efetividade dos algoritmos.

Como a forma de tratamento do ângulo de chegada é a mesma, todos os emissores presentes nos cenários foram considerados como sendo provenientes de uma mesma direção, simulando assim uma maior quantidade de emissores a serem separados.

Na abordagem (a) para o uso da amplitude como parâmetro de separação, o algoritmo funciona bem para emissores que não fazem varredura, mas é deficiente para emissores de varredura devido a sua grande variação de amplitude, mesmo para o intervalo de tempo de 20 ms.

Com a abordagem (b) ocorre o problema do cruzamento de valores de amplitudes de dois ou mais emissores, quando há algum emissor de varredura no cenário. Este problema é solucionado com o uso da técnica preditiva associada a cada célula, descrita no item anterior.

O resultado destes testes e sua comparação se encontram detalhados em [9].

### IV – MÉTODO PROPOSTO

Partindo das considerações expostas, é possível a proposição de um método de "deinterleaving" utilizando como parâmetro chave a amplitude do sinal radar emitido.

Esse método considera a hipótese de que um mesmo emissor tem uma variação máxima modular de 3 dB, dentro de um intervalo de aproximadamente 20 ms. Essa hipótese baseia-se nas considerações anteriores, em [9] e na observação das características dos radares que hoje equipam os navios da Marinha do Brasil.

A partir da digitalização da informação de RF (constituindo a PDW – pulse descriptor word), que contém seus diversos parâmetros primários. É realizada, então, para cada ângulo de chegada, uma separação dos pulsos recebidos em células, comparando-se a amplitude do pulso recebido com o valor do último pulso de cada célula. Quando o novo pulso não se enquadra em nenhuma célula, é criada uma nova.

Por conta da diversidade de valores de amplitude para os emissores de varredura, existe a possibilidade de colisão entre células com conseqüente erro de separação.

Para contornar esse empecilho, pode ser aplicada, além da comparação com a amplitude do último pulso de cada célula uma técnica preditiva, baseada nos últimos valores de amplitude, com o intuito de estabelecer um parâmetro complementar que julga a tendência de variação de amplitude de cada célula.

Quando um novo pulso atende às duas condições, valor próximo ao último pulso e mesma tendência, para mais de uma célula, este novo pulso é descartado.

## V - CONCLUSÃO

Tanto a abordagem (a) quanto a abordagem (b), descritas no item III, apresentaram melhores resultados do que o algoritmo tradicional.

A presença de emissores de varredura nos levou a optar pela abordagem (b), desenvolvida no item IV como melhor opção para o “deinterleaving” com uso do parâmetro amplitude.

Estes testes, realizados nos cenários obtidos através de gravações reais, mostraram que a amplitude realmente pode e deve ser utilizada como alternativa para o “deinterleaving” de pulsos radar, quando praticamente todos os parâmetros, com exceção do ângulo de chegada, podem ser variados intencionalmente pelos emissores.

O uso da Amplitude como parâmetro de entrada num processo de deinterleaving, a fim de se determinar os emissores presentes e as amostras de cada emissor num cenário, apresenta algumas vantagens e alguns problemas.

Um dos problemas, além do cruzamento de amplitudes descrito no item III, é quando o receptor deixa de receber o sinal do emissor e volta a recebê-lo após algum tempo. Este fato ocorre principalmente com os radares que fazem varredura circular. Neste caso, essa interrupção deverá ser tratada por um algoritmo especializado, que visa associar o grupo de pulsos originados pelo emissor antes da interrupção com os pulsos gerados pelo o mesmo emissor após a interrupção.

A maior vantagem do uso da amplitude no deinterleaving se mostra contra radares ágeis e de direção de tiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. K. Mardia, "New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences," *IEE proceedings*, 1989.
- [2] D. J. Milojevic e B. M. Popovic, "Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses," *IEE proceedings*, 1992.
- [3] J. B. Moore e V. Krishnamurthy, "Deinterleaving pulse trains using discrete-time stochastic dynamic-linear models," *IEEE transactions on signal processing*, 1994.
- [4] A. Logothetis e V. Krishnamurthy, "An interval amplitude algorithm for deinterleaving stochastic pulse train sources," *IEEE transactions on signal processing*, 1998.
- [5] Y. Kuang, Q. Shi, Q. Chen, L. Yun e K. Long "A Simple Way to Deinterleaving Repetitive Pulse Sequences", *7<sup>th</sup> WSEAS int. Conf. On Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering*, 2005.
- [6] J. P. Zubelli, R. G. F. Távora, M. A. G. M. Maia e E. L. Pinto, "An algorithm for deinterleaving pulse trains using the fast wavelet packet transform," *CNPq, PUC, TELEBRÁS, IMPA, IME*, 1996.
- [7] C. A. C. M. J. Marcelo, "O Estado da Arte na identificação de emissores usando dados intrapulso.," *CIAW*, 2004.
- [8] R. G. Wiley, *Electronic intelligence: The analysis of radar signals: Artech House*, 1993.
- [9] R. M. de Brito, "O Parâmetro Amplitude no “Deinterleaving” de Pulsos Radar”, *Dissertação de Mestrado, COPPE/UF RJ*, 2005.
- [10] D. Schilleher, "Electronic Warfare in the information age" *Artech house*, 1999.
- [11] J. P. a. D. Mittleman, "Defining the Fresnel zone for broadband radiation," *The American Physical Society, Department of electrical and computer engineering - Rice University*, 2002.
- [12] Reference data for radio engineers, 5 ed: ITT - Howard W. Sams & Co., Inc., 1973.