



ESCOLA NAVAL

ta sainte & bief faire



Afonso Lobo Sénica

Detecção de Alvos em Sistemas de Radares Passivos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Armas e Eletrónica



Escola Naval, 30 de Março de 2020



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Afonso Sénica

Detecção de Alvos em Sistemas de Radares Passivos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval Ramo de Armas e Eletrónica

Orientação de: Professor Paulo Alexandre Carapinha Marques

Co-orientação de: Professor João Luís Reis Fidalgo Neves

O Aluno Mestrando,

Afonso Lobo Sénica



O Orientador,

Paulo Alexandre Carapinha Marques

O Co-Orientador,

João Luís Reis Fidalgo Neves

Escola Naval, 30 de Março de 2020

A dedicatória tem por finalidade prestar homenagem ou dedicar o trabalho a alguém próximo ou que tenha um especial significado para o autor do trabalho.

É, também, um elemento facultativo na estrutura do trabalho, mas é usual que seja feita dedicando o trabalho aos pais, à família mais chegada ou a alguém com relevância especial na vida do autor.

Agradecimentos

Agradecimento é a expressão registada de uma gratidão às pessoas, entidades ou instituições que, de algum modo, contribuíram para a elaboração do trabalho. Sendo um elemento opcional, quando exista deve incluir-se na frente de folha a colocar logo após a folha de rosto ou das folhas da epígrafe e/ou da dedicatória, deixando o verso em branco.

Resumo

Desde o início da utilização de radares pelos militares que é conhecido o facto da vulnerabilidade da localização do transmissor quando se encontra a transmitir. Não só por este caso, mas também pela poluição do espectro eletromagnético ou pelo custo elevado de um transmissor, o radar passivo é uma solução ideal a todos estes problemas. No entanto, como tudo, tem as suas desvantagens, realçando não se controlar o sinal que é transmitido pelo iluminador de oportunidade e este não estar otimizado para sistemas de radar, o que no final, implica um processamento mais complexo.

Este conceito de radares passivos não é uma ideia recente. A primeira experiência realizada remonta ao ano de 1935, quando Robert Watson-Watt usou um iluminador de oportunidade de onda curta radiada do BBC Empire transmitter em Daventry para detetar um bombardeiro Heyford a uma distância de 8 km. No entanto, o primeiro radar passivo foi desenvolvido uns anos depois pelos alemães, denominado Klein Heidelberg.

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de radar passivo, usando como iluminador de oportunidade, a televisão digital terrestre, Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T) e, simultaneamente, desenvolver um trabalho de pesquisa sobre radares passivos, processamento de sinal nos mesmos, teoria de antenas e formação de imagem utilizando radares passivos. Em jeito de conclusão e em função dos resultados obtidos pretende-se discutir possíveis cenários de implementação na Marinha Portuguesa.

Palavras-chave: Radar Passivo, Deteção, Processamento de Sinal, DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)

Abstract

The concept of passive radars is not a recent idea. In fact, the first experiment carried out dates back to the year of 1935 when Robert Watson-Watt used a BBC Empire transmitter shortwave illuminator of opportunity in Daventry to detect a Heyford bomber at a range of 8 km. However, the first passive radar was developed a few years later by the Germans, called Klein Heidelberg.

This dissertation has as main objective the development of a passive radar system, using DVB-T as an illuminator of opportunity and, simultaneously, to develop a research work on passive radars, its signal processing, basic theory of antennas and passive radars for image formation. As a conclusion and based on the results obtained, it is intended to discuss possible implementation scenarios in the Portuguese Navy.

Keywords: Passive Radar, Detection, Signal Processing, DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)

Índice

1	Introdução	1
1.1	Sistemas Passivos para Detecção e Localização de Alvos	1
1.2	Sistemas de Radar Definidos por Software	1
1.3	Iluminadores de Oportunidade	1
1.4	Motivação e Objetivos	1
1.5	Organização da Dissertação	1
2	Radares Passivos	3
2.1	Contextualização	3
2.1.1	Geometrias Radar	4
2.1.2	Alcance Bistático e <i>Doppler</i>	6
2.1.3	Previsão de <i>Performance</i>	10
2.1.4	Formação de Imagem	10
3	Teoria de Antenas	11
3.1	Teoria Básica de Antenas	11
3.1.1	Tipos de Antenas	11
3.1.2	Parâmetros Fundamentais	15
3.2	Simulação de uma Antena	29
3.2.1	Para Sinais DVB-T	29
4	Processamento de Sinal	31
4.1	Processamento de Sinal	31
4.1.1	Cancelamento de <i>clutter</i>	37
4.1.2	Reconstrução e equalização do sinal direto	40
4.2	Simulação	44
4.2.1	Sinais DVB-T	44
4.3	Bases de Dados	44
4.3.1	Formação de Imagem	44
5	Aplicação	45
5.1	Sistema Desenvolvido	45

5.2	Resultados	45
6	Conclusões e Discussão	47
6.1	Sumário	47
6.2	Discussão e Conclusões	47
6.3	Cenários Possíveis - MARINHA	47
	Conclusão	47
	Bibliografia	51
	Apêndices	53
A	Escreve o título do apêndice	53
	Anexos	55
I	Escreve o título do anexo	55

Lista de Figuras

2.1	Esquema Geometria Radar Passivo	4
2.2	Geometria Monostática	5
2.3	Geometria Bistática	5
2.4	Geometria <i>Forward Scatter</i>	5
2.5	Parâmetros na geometria bistática	6
2.6	Geometria bistática para vários alvos	8
3.1	Antena como meio de transição	12
3.2	Antena de Fio	13
3.3	Antena de Abertura	13
3.4	Antena <i>Microstrip</i>	14
3.5	Antena Refletora	15
3.6	Diagrama de radiação direcional	16
3.7	Diagrama de radiação omnidirecional	17
3.8	Elementos caraterísticos do diagrama de radiação	18
3.9	Campos E e H de um diagrama de radiação de uma antena	19
3.10	Alterações típicas da forma do diagrama de radiação	20
3.11	Alterações típicas da forma do diagrama de radiação	26
3.12	Terminais de referência e perdas na antena	27
4.1	Correlation FFT vs Direct FFT	35
4.2	Aproximação de fase	36
4.3	Perdas SNR	38
4.4	Cenário PCL - Clutter	38
4.5	Mapa da performance dos algoritmos	40
4.6	Mapas de range-Doppler dos diferentes algoritmos utilizados	41
4.7	Constelação 64QAM	42
4.8	Função de ambiguidade - Sinal DVB-T	43
4.9	Diagrama de blocos - Algoritmo de equalização	43

Lista de Tabelas

4.1	<i>Batches algorithm</i> - tempo de processamento	37
-----	---	----

Lista de Abreviaturas

2D-CCF	2-Dimensional Cross-Correlation Function
CCF	Cross-Correlation Function
CNIT	Italian National Consortium for Telecommunications
CPI	Coherent Processing Interval
CZT	Chirp-Z Transform
DFT	Direct Fourier Transform
DVB	Digital Videp Broadcasting
DVB-T	Digital Videp Broadcasting - Terrestrial
ECA	Extensive Cancellation Algorithm
ECA-B	Extensive Cancellation Algorithm - Batched
ECA-S	Extensive Cancellation Algorithm - Sliding window
FFT	Fast Fourier Transform
FLOPS	Floating Point Operations per Second
FNBW	First Null BeamWidth
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HPBW	Half Power BeamWidth
IDFT	Inverse Direct Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LMS	Least Mean Square
NLMS	Normalized Least Mean Square
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCL	Passive Coherent Location
PLF	Polarization de Loss Factor
PSD	Power Spectrum Density
RCS	Radar Cross Section
RLS	Recursive Least Squares
ROE	Relação de Onda Estacionária
SCA	Sequential Cancellation Algorithm
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio

UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency

Lista de Símbolos

a	distance	m
B	largura de banda	Hz
CPI	coherent processing interval	s
D	diretividade	
D_0	diretividade máxima	
F_s	Frequência de amostragem	Hz
G	ganho	
G_0	ganho máximo	
L	dimensão da antena	m
N	número de amostras	
N_f	número de doppler bins	
N_τ	número de range bins	
P	potência	W
r	raio	m
S_r	<i>surveillance signal</i>	
S_{ref}	<i>reference signal</i>	
T_s	intervalo de amostragem	s
U	intensidade de radiação	W sr ⁻¹
U_0	intensidade de radiação isotrópica	W sr ⁻¹
W	densidade de potência	W m ⁻²
ΔR	<i>monostatic range resolution</i>	m
Δr	<i>bistatic range resolution</i>	m
φ	ângulo polar	rad
σ	radar cross section	m ²
θ	azimute	rad
λ	comprimento de onda	m
ν	desvio de <i>Doppler</i>	Hz
τ	<i>delay-Time</i>	s
ω	ângulo sólido	m

Capítulo 1

Introdução

1.1 Sistemas Passivos para Detecção e Localização de Alvos

1.2 Sistemas de Radar Definidos por Software

1.3 Iluminadores de Oportunidade

A escolha do iluminador de oportunidade é crucial para a *performance* do sistema. Dentro dos parâmetros que mais influenciam a escolha do iluminador encontram-se a densidade de potência no alvo, a natureza da onda e a cobertura.

1.4 Motivação e Objetivos

1.5 Organização da Dissertação

Capítulo 2

Radars Passivos

2.1 Contextualização

Os radares convencionais apresentam uma configuração onde são constituídos por um transmissor e um recetor, normalmente no mesmo local. Neste tipo de radares, um pulso é transmitido em forma de energia eletromagnética, e através do conhecimento do tempo levado pelo pulso a ser transmitido e recebido depois de refletido no alvo e da velocidade de propagação da luz, consegue-se determinar um valor de distância.

Num radar passivo, não existe transmissão de energia eletromagnética durante o seu funcionamento. Ao invés, utiliza iluminadores de oportunidade e compara o seu sinal direto com pequenas alterações que ocorrem no campo eletromagnético por alvos em movimento de forma a detetar um alvo (Hugh Griffiths e C. J. Baker 2017).

Este sistema radar pode utilizar uma grande variedade de iluminadores, desde sistemas de navegação por satélite (*Global Navigation Satellite System (GNSS)*) como o Global Positioning System (GPS) ou o GLONASS, *routers* de WiFi ou qualquer sistema de transmissão de frequências rádio como *Digital Video Broadcasting (DVB)* ou estações de rádio. Dito isto, por forma a dimensionar o sistema para o efeito desejado, torna-se necessário uma boa compreensão das mais diversas características dos iluminadores, como é falado mais à frente neste capítulo.

Para a finalidade de deteção de alvos a grandes distâncias, os sinais mais eficazes e consequentemente mais utilizados são os que apresentam elevada potência, como transmissores de Ultra High Frequency (VHF) e de televisão digital em Ultra High Frequency (UHF), não obstante poder-se também utilizar em certos casos outros iluminadores.

O cenário típico de um esquema de detecção usando um radar passivo é, como mostrado na Figura 2.1, constituído por duas antenas recetoras, uma antena que recebe o sinal direto do iluminador (S_{ref}) e outra antena que recebe o sinal que é refletido no alvo (S_r). O sinal refletido no alvo fornece duas informações importantes para a sua detecção: o *bistatic range*, ou seja, a distância ao alvo, conseguida através da diferença de tempo entre o sinal direto e o sinal refletido; e o *Doppler*, que é o desvio de frequência que um alvo em movimento cria no sinal que é refletido devido à sua velocidade. Estes conceitos são discutidos mais à frente neste capítulo.

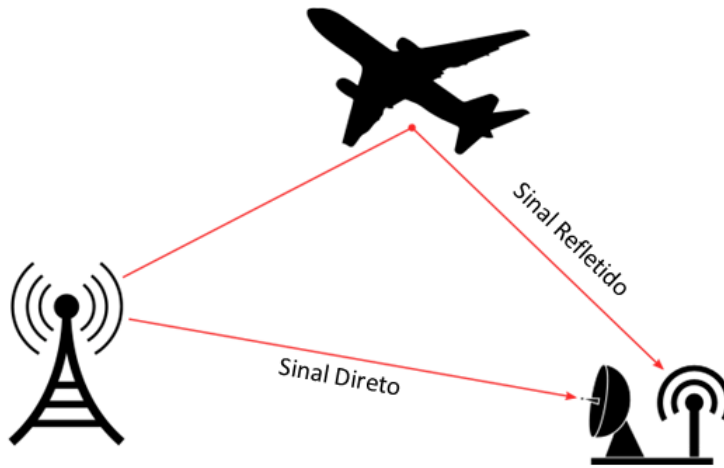


FIGURA 2.1: Esquema da geometria de um radar passivo

O conceito do radar passivo é fazer uma relação cruzada, ou, como mais conhecido o termo, *cross-correlation* entre o sinal direto e o sinal refletido em função das variáveis *delay-time* que pode ser transformado em *bistatic range* e o desvio de *Doppler*. A *cross-correlation*, de forma simples, é uma medida de similaridade entre dois sinais aplicando um atraso num deles, que neste caso, para além do atraso (*delay-time*), também é feita para os diferentes *Doppler*, ou seja, em duas dimensões. No entanto, na prática existem processos analíticos mais eficientes, visto que fazer a *cross-correlation* a duas dimensões em tempo real torna o processo muito pesado computacionalmente.

2.1.1 Geometrias Radar

Podemos classificar os radares quanto à localização dos transmissores e recetores. O ângulo β que estes formam, sendo o seu centro o alvo, determina o tipo de geometria (P. C. Baker 2019). Se $\beta < 20^\circ$, o transmissor e o recetor encontram-se perto ou no mesmo sítio, então estamos perante uma geometria monostática (Figura 2.2). Quando o transmissor e recetor estão mais afastados e formam um ângulo

com centro no recetor dentro dos seguintes limites, $20^\circ < \beta < 145^\circ$, a geometria é bistática (Figura 2.3). Para situações particulares, em que o alvo se encontra a uma cota baixa em relação à linha imaginária que une o transmissor e o recetor ($145^\circ < \beta < 180^\circ$), estamos perante uma geometria *Forward Scatter* (Figura 2.4).

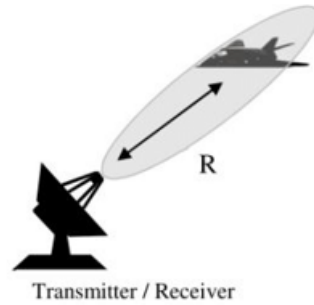


FIGURA 2.2: Geometria Monostática

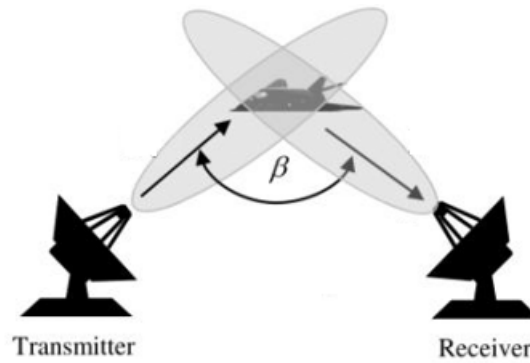


FIGURA 2.3: Geometria Bistática

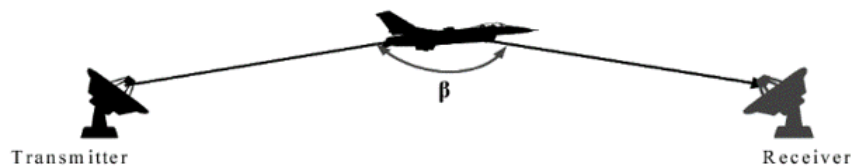


FIGURA 2.4: Geometria *Forward Scatter*

Os radares passivos, como já discutido, têm a vantagem de não transmitirem um sinal, e ao invés usar um sinal a ser transmitido por outra fonte. Isto implica que o transmissor e o recetor não estejam no mesmo sítio nem perto, logo, quando se fala em radares passivos, assume-se uma geometria bistática.

2.1.2 Alcance Bistático e *Doppler*

Como falado no início deste capítulo, o alcance bistático, ou *bistatic range* e o desvio de *Doppler* são variáveis fundamentais para qualquer sistema radar e isso não exclui o radar passivo.

O recetor bistático pode medir 3 parâmetros diferentes:

- A diferença em alcance entre o sinal direto e o sinal que é refletido, ou seja, o *bistatic range*;
- O desvio de *Doppler* do sinal recebido;
- O ângulo θ_R do sinal recebido, se for usada uma antena de *surveillance* direcional.

Alcance Bistático

Tal como representado na Figura 2.5, tomamos os valores R_T como a distância do transmissor ao alvo, R_R como a distância do recetor ao alvo, β como o ângulo entre estes e com centro no alvo, e C como a distância do transmissor ao recetor, ou, *Baseline*.

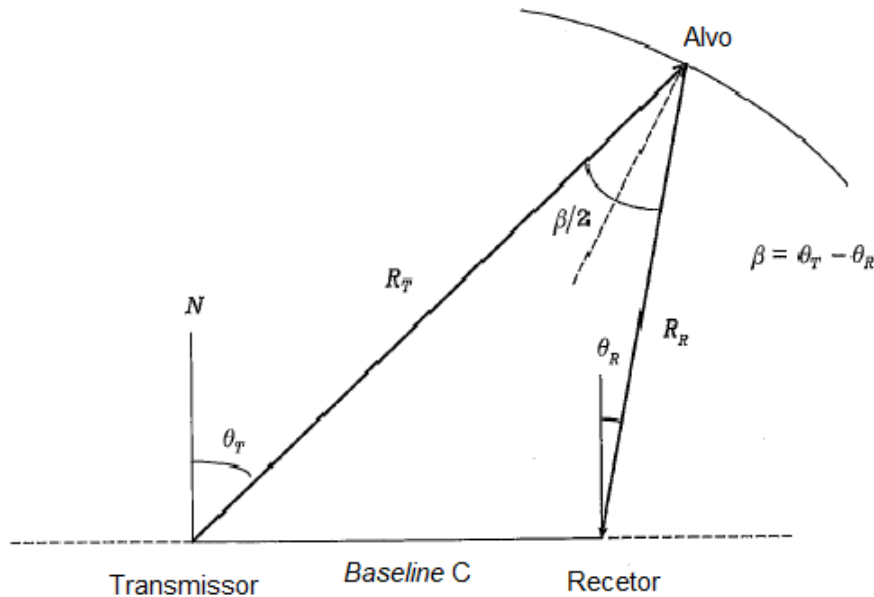


FIGURA 2.5: Parâmetros na geometria bistática

O termo alcance bistático, ou *bistatic range*, é definido em 2.1. Com este valor é possível criar elipses bistáticas (para duas dimensões) ou elipsoides bistáticos (para três dimensões) com o transmissor e o recetor como dois focos das mesmas.

$$R_T + R_R - C \quad (2.1)$$

Contudo, se a *baseline* C for um valor conhecido, pode-se extrair o termo *range sum* $R_T + R_R$.

Através do conhecimento do valor de θ_R , que é mensurável se a antena de *surveillance* for direcional, a distância do alvo ao recetor é dada pela expressão 2.2.

$$R_R = \frac{(R_T + R_R)^2 - C^2}{2(R_T + R_R + C \sin \theta_R)} \quad (2.2)$$

Um dos parâmetros importantes quando se fala em alcance bistático é a *range resolution*, ou seja, a resolução em alcance. Este parâmetro é definido pela capacidade de distinguir os alvos que estão muito próximos. Um bom exemplo de um sistema radar que necessite de grande *range resolution* é um sistema de direção de tiro.

Num radar convencional monostático, a resolução em alcance é dada por $\Delta R = c/2B$, onde c é a velocidade de propagação e B a largura de banda do sinal transmitido. No entanto, num radar passivo, a geometria é bistática, o que leva a existirem diferentes elipses bistáticas concêntricas, isto é, com centro no mesmo ponto, o que tem de ser tomado em conta na expressão que representa a *range resolution*:

$$\Delta r = \frac{c}{2B \left(\frac{\cos \beta}{2} \right)} \quad (2.3)$$

No entanto, este caso é específico para quando os dois alvos estão alinhados relativamente à bissetriz do ângulo β , como é possível observar na figura 2.6 o exemplo dos alvos 1 e 2. Para um caso generalizado, como por exemplo o alvo 1 e o alvo 3, a expressão da *bistatic range resolution* (Expressão 2.4) depende de mais um valor φ representado na figura 2.6 como o ângulo entre o seguimento da bissetriz do ângulo β e o segmento de reta que une o alvo 1 e o alvo 3 com centro no alvo 1.

$$\Delta r = \frac{c}{\left[2B \left(\frac{\cos \beta}{2} \right) \right] \cos \varphi} \quad (2.4)$$

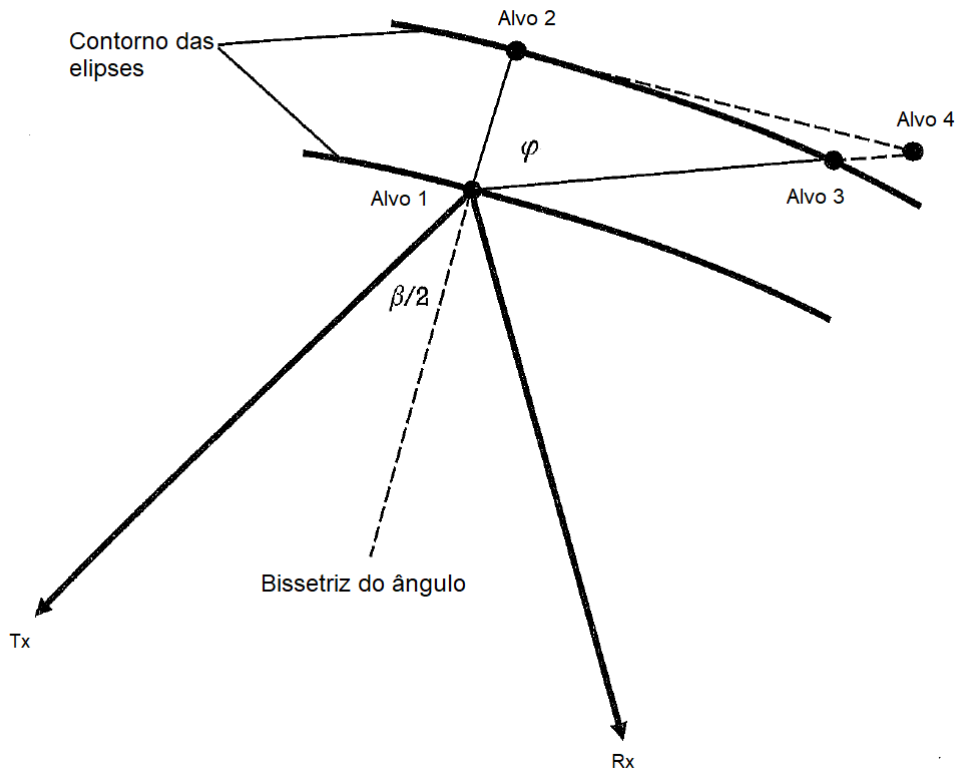


FIGURA 2.6: Geometria bistática para vários alvos (Adaptada da figura 2.4 Hugh Griffiths e C. J. Baker 2017)

A expressão do *bistatic range resolution* permite interpretar a geometria bistática quanto à distância entre o transmissor e receptor. Da expressão 2.4 conclui-se que quanto mais o ângulo β se aproxima de um ângulo reto, o denominador tende para um valor próximo de 0, ou seja, a resolução em alcance torna-se fraca. Contudo, nesta situação estamos perante uma geometria *forward scatter*, discutido no início deste capítulo, o que pode ser contornando usando vários receptores em locais diferentes.

Para radares passivos, continuando a interpretação da expressão 2.4, os iluminadores de oportunidade mais utilizados têm pouca largura de banda B , o que se reflete numa resolução em alcance mais reduzida. No entanto, os sinais de DVB-T, discutidos no Capítulo 1, têm uma largura de banda na ordem dos 8 MHz, o que já permite uma resolução em alcance na ordem dos 40m.

Doppler

Ignorando efeitos relativísticos, o desvio de *Doppler* bistático ocorre quando pelo menos um dos elementos transmissor, alvo, receptor se encontra em movimento.

É definido como a taxa de variação temporal do comprimento total do caminho percorrido pelo sinal refletido, normalizado pelo comprimento de onda λ (Willis 2005). No caso mais comum, em que apenas o alvo se encontra em movimento, o desvio de *Doppler* é dado por (Willis 2005),

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos \delta \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (2.5)$$

onde δ é o ângulo formado pelo sentido do vetor velocidade v e a bissetriz do ângulo β com centro no alvo.

Na equação 2.5, quando $\beta = 180^\circ$, estamos perante uma geometria *forward scatter* e temos um valor de desvio de *Doppler* $f_D = 0$ para todos os ângulos de δ . Quando $\beta = 0^\circ$, fica-se reduzido a uma geometria monostática.

A resolução de *Doppler* no radar bistático é semelhante à resolução de *Doppler* no radar monostático, isto porque depende do tempo de integração T que é um parâmetro escolhido e indiferente à geometria do radar. Quanto maior for o tempo de integração, melhor é a resolução de *Doppler*. A expressão 2.6 define o requisito mínimo entre a separação dos alvos.

$$|f_{a1} - f_{a2}| = \frac{1}{T} \quad (2.6)$$

sendo que f_{a1} e f_{a2} são os desvios de *Doppler* para cada alvo, definidos em 2.5. Substituindo as equações dos alvos em 2.5 na equação 2.6, e resolvendo em ordem a Δv , ou seja, a diferença entre os dois vetores velocidade projetados na bissetriz do ângulo β ($\Delta v = (v_1 \cos \delta_1 - v_2 \cos \delta_2)$), vem,

$$\Delta v = \frac{\lambda}{2T \cdot \cos(\beta/2)} \quad (2.7)$$

Com esta expressão, assumimos que os alvos partilham a mesma bissetriz, o que na realidade é pouco provável. No entanto, esta restrição pode ser ignorada, se,

1. A separação entre os alvos não for suficiente para permitir resolução em *range*;
2. O ângulo entre as bissetrizes dos dois alvos é pequeno.

2.1.3 Previsão de *Performance*

Para qualquer sistema radar é importante conseguir prever com precisão os vários aspetos da *performance* do sistema. O ponto de início de uma análise de *performance* mi, radar passivo é a equação de radar bistática, falada brevemente no capítulo 3 e rescrita de uma forma que reflete as características do radar Passive Coherent Location (PCL) para o caso da geometria bistática vem (H.D. Griffiths e C. Baker 2005),

$$\frac{P_r}{P_n} = \frac{P_t G_t}{4\pi r_1^2} \cdot \sigma_b \cdot \frac{1}{4\pi r_2^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{kT_0 B F} \cdot L \quad (2.8)$$

onde,

P_r : "potência do sinal recebido"

P_n : "potência do ruído do recetor"

P_t : "potência do sinal transmitido"

G_t : "ganho da antena de transmissão"

G_r : "ganho da antena de receção"

r_1 : "alcance do transmissor ao alvo"

r_2 : "alcance do recetor ao alvo"

σ_b : "Radar Cross Section (RCS) bistática do alvo"

λ : "comprimento de onda do sinal"

k : "constante de Boltzmann = $1,380649 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ "

T_0 : "temperatura de ruído de referência, 290K"

B : "largura de banda efetiva do recetor"

F : "*noise figure*¹ efetiva do recetor"

$L(\leq 1)$: "perdas do sistema"

2.1.4 Formação de Imagem

¹*noise figure* representa a diferença em dB entre o ruído de saída do recetor e a saída de ruído do recetor ideal para o mesmo ganho e largura de banda

Capítulo 3

Teoria de Antenas

3.1 Teoria Básica de Antenas

Uma antena é definida como "um dispositivo geralmente metálico (com haste ou fio) para irradiar ou receber ondas de rádio"(Balanis 2016), ou seja, uma antena, é o dispositivo que permite a transição entre o meio que a rodeia e o equipamento, que se pode observar na Figura 3.1. Este dispositivo é um transdutor que converte energia elétrica em ondas eletromagnéticas ou vice versa, sendo que é uma antena de transmissão, se converter um sinal elétrico num sinal eletromagnético e é uma antena de receção, se converter um sinal eletromagnético em sinal elétrico.

3.1.1 Tipos de Antenas

Neste subcapítulo irá ser introduzido de uma forma breve, os vários tipos de antenas, a sua utilização e vantagens entre estes.

Antenas de Fio

Estas antenas são umas das mais antigas, que apresentam uma configuração mais simples, como se pode observar na Figura 3.2, sendo apenas constituídas por um fio que pode variar na sua dimensão e na sua forma e ainda podem ser utilizadas nas mais variadas aplicações. Podem tomar uma forma aleatória, desde um fio direito (dipolo) até um fio com as mais diversas formas.

As antenas de fio podem ser encontradas nos mais variados locais, desde aeronaves, carros ou navios a edifícios.

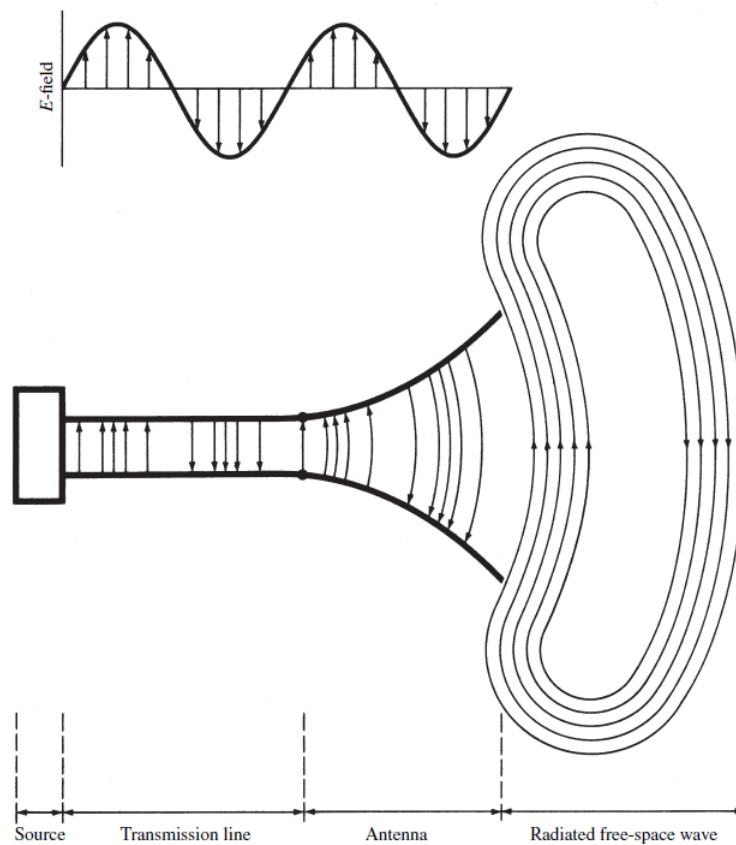


FIGURA 3.1: Antena como um meio de transição (Figura 1.1 - Balanis 2016)

Antenas de Abertura

Os campos no fim de um guia de ondas aberto não são uniformes devido a esta mesma abertura, assim, para este caso, assume-se que os campos são iguais a como se o guia de ondas continuasse fechado. As antenas de abertura entram quando se pretende aumentar a diretividade à saída do guia, abrindo as extremidades do mesmo de forma a dar uma forma como se observa na Figura 3.3. Este tipo de antenas, em específico as antenas de abertura piramidais, são utilizadas para alimentar ou calibrar grandes antenas de prato.

Assim sendo, as antenas de abertura são utilizadas para frequências mais elevadas, especificamente em frequências de micro-ondas e podem ser aplicadas nas mais variadas formas geométricas, como retangulares, elípticas, circulares, piramidais, entre outras.

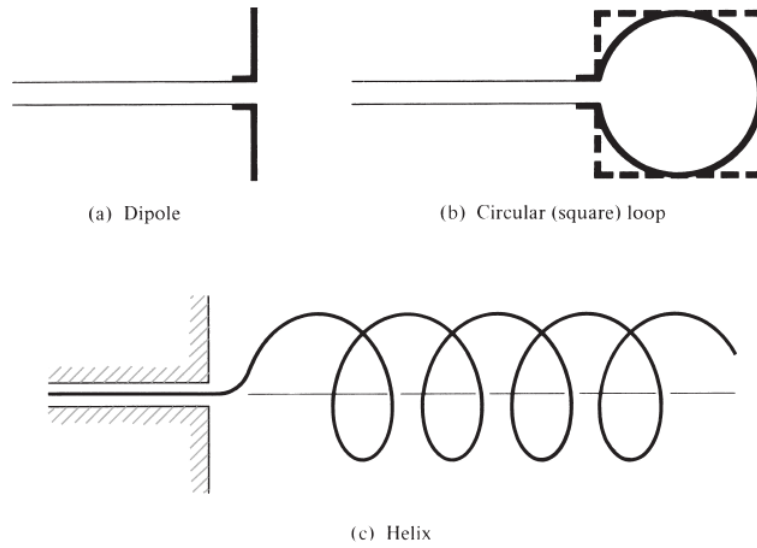


FIGURA 3.2: Exemplos de vários tipos de antenas de fio (Figura 1.3 - Balanis 2016)

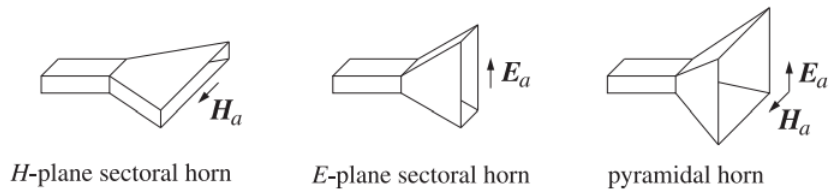


FIGURA 3.3: Antenas de abertura no plano H, E e piramidal

Antenas de *Microstrip*

Uma antena *microstrip*, conhecida como antena impressa, é um tipo de antena que está inserida numa placa de circuito impresso e funciona como uma antena interna.

Hoje em dia são utilizadas em aplicações comerciais, tendo como as suas maiores vantagens o facto de serem baratas e simples de manufaturar e apresentarem um tamanho reduzido. Este tipo de antenas são aplicadas em frequências UHF.

A sua construção consiste num *patch* metálico sobre um substrato. Este *patch* pode apresentar as mais variadas formas como representado na Figura 3.4, sendo as retangulares e circulares as mais comuns. Têm ainda as vantagens de serem impressas em superfícies com as mais variadas formas, sendo robustas e versáteis nos parâmetros da sua frequência de ressonância, polarização e impedância (Balanis 2016).

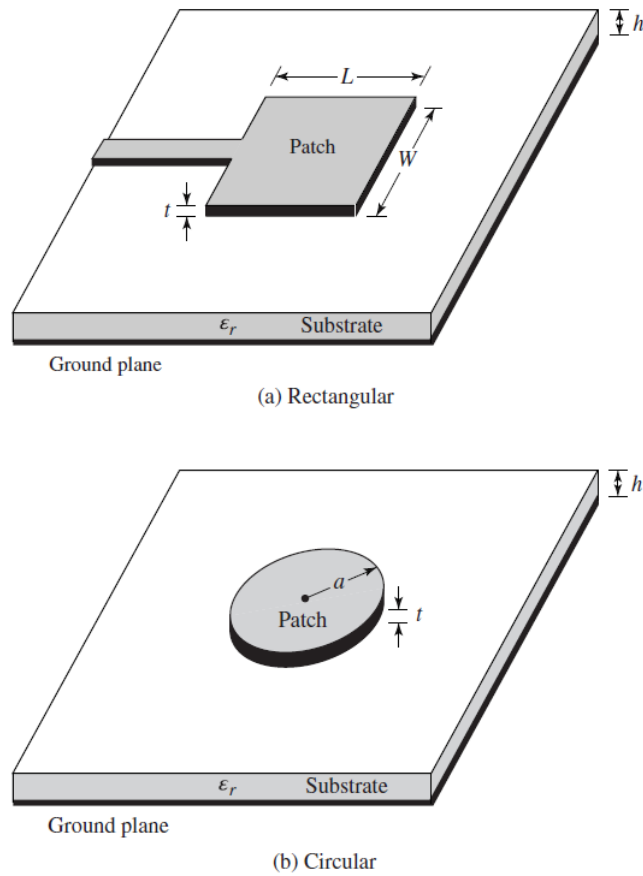


FIGURA 3.4: Exemplos de duas configurações de *patches* diferentes
(Figura 1.5 - Balanis 2016)

Antenas de Matrizes

As antenas de matrizes surgem nas aplicações em que é necessário mais que um elemento. Consegue-se assim agrupar vários elementos de forma a obter as características pretendidas. Algumas alterações às características que se conseguem com este tipo de antenas são o aumento de ganho, alterar o diagrama de radiação, determinar a direção de chegada de um sinal ou maximizar o Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR)¹.

Antenas de Lente

Este tipo de antenas utiliza as propriedades de convergência e divergência das lentes para a receção ou transmissão de sinal. O tamanho da lente a ser utilizada depende da frequência - quanto maior for a frequência, menor a lente. Dito isto,

¹SINR é um indicador de qualidade de transmissão ajustado a comunicações móveis devido à interferência de outros utilizadores ser mais significativa (Jeske e Sampath 2004).

é mais favorável usar este tipo de antenas em frequências mais altas, visto que a lente será menor. As suas aplicações são semelhantes às das refletoras parabólicas, especificamente quando usadas em frequências mais altas e que necessitem de mais largura de banda.

Antenas Refletoras

As antenas refletoras existem desde o final do século XIX, no entanto começaram a ser aplicadas em radares na Segunda Guerra Mundial e a partir do final do século XX em comunicações espaciais. Estas aplicações devem-se à sua capacidade de transmissões a grandes distâncias. Podem-se apresentar nas mais diversas formas, como plano refletor, refletor curvilíneo, entre outros.

O seu modo de funcionamento baseia-se na convergência da energia numa direção como demonstrado na Figura 3.5, o que leva, para além de um grande alcance, a uma grande diretividade.

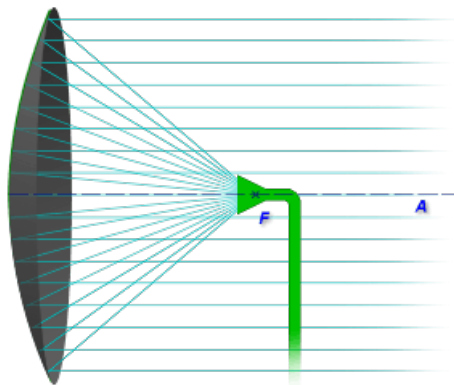


FIGURA 3.5: Funcionamento de uma Antena Refletora

3.1.2 Parâmetros Fundamentais

Neste subcapítulo vão ser discutidos os parâmetros mais relevantes que estão relacionados com o funcionamento de uma antena e com a sua *performance*. Grande parte dos parâmetros estão definidos no IEEE 1983 Standard Definitions for Antennas and Propagation.

Diagrama de Radiação

Um diagrama de radiação é a função ou representação gráfica que descreve as propriedades espaciais de radiação de uma antena. É de extrema importância conhecer este padrão de radiação de uma antena e poder controlá-lo, visto que a

distribuição de energia eletromagnética, se for mal dimensionada, pode comprometer o projeto.

A manipulação do diagrama de radiação de uma antena é dependente do objetivo da mesma. Podemos ter como finalidade um diagrama de radiação que seja direcional (Figura 3.6), como numa ligação ponto a ponto, ou podemos como finalidade, um diagrama de radiação omnidirecional (Figura 3.7), ou seja, que radia, idealmente, com igual intensidade para todas as direções.

Para este efeito são utilizadas coordenadas esféricas (r , φ e θ), sendo que a antena se encontra na origem do referencial. A propriedade mais relevante nos diagramas de radiação é a distribuição espacial, em duas ou três dimensões, da energia radiada em função da posição do observador de acordo com um azimuth (θ constante).

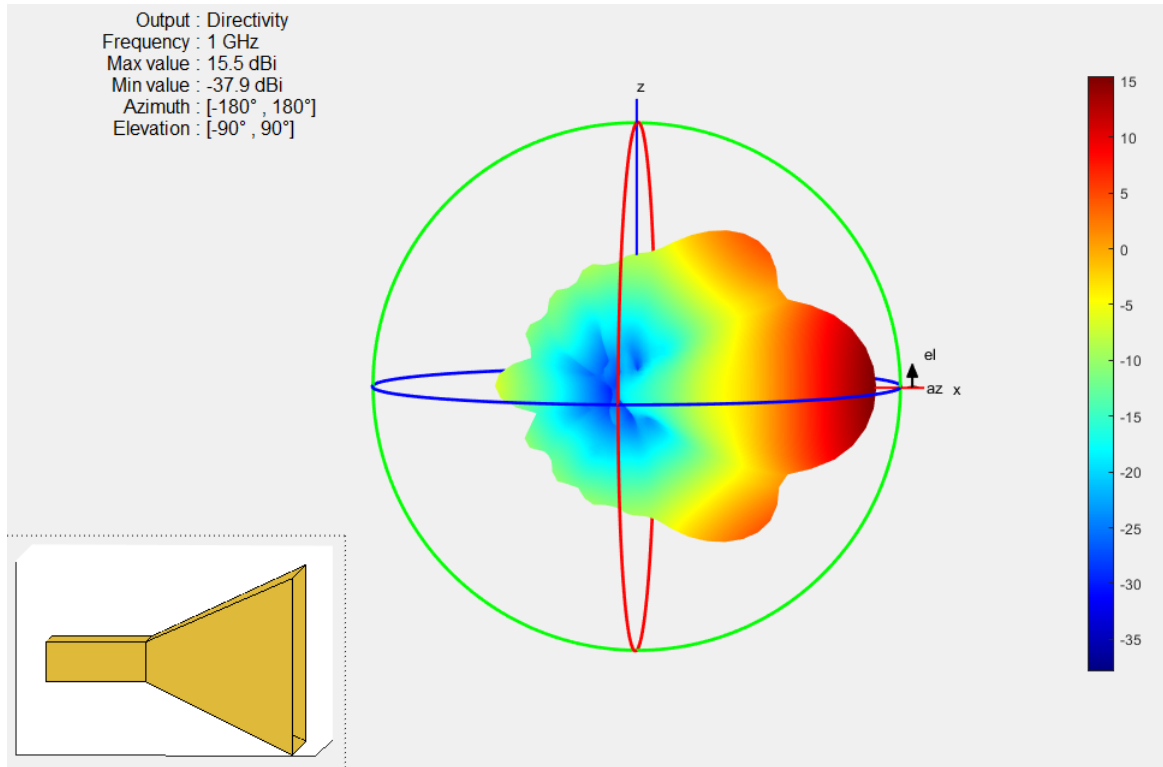


FIGURA 3.6: Diagrama de radiação direcional - Corneta de guia de ondas dimensionada para 1GHz (MATLAB Antenna Designer Tool-kit)

Os lóbulos são um dos parâmetros fundamentais de um diagrama de radiação, que representam a energia radiada numa direção relativamente ao transmissor e podem ser classificados em lóbulos principais, secundários, laterais e posteriores (Figura 3.8). O lóbulo principal é o lóbulo que contém a direção da radiação máxima, que no caso da Figura 3.8, está definido no sentido do eixo dos zz . Os lóbulos

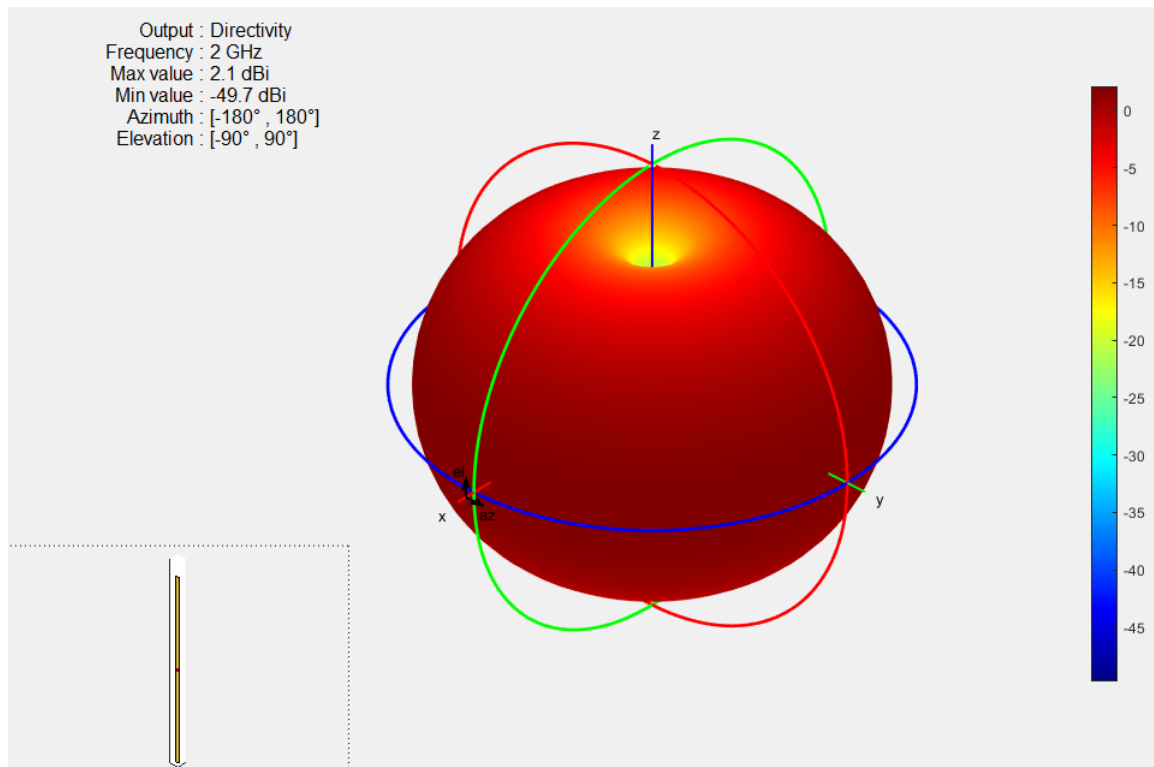


FIGURA 3.7: Diagrama de radiação omnidirecional - Dipolo dimensionado para 2GHz (MATLAB Antenna Designer Toolkit)

secundários são todos os lóbulos excepto o principal. Os lóbulos laterais são todos os que radiam energia para qualquer direção que não seja a pretendida. Os lóbulos posteriores contêm a energia que é radiada num ângulo de 180° em relação à direção do feixe da antena.

A largura de feixe a meia potência (Half Power Beamwidth (HPBW)) e a largura de feixe ao primeiro nulo (First Null Beamwidth (FNBW)) estão relacionadas com a capacidade de resolução da antena, ou seja, a sua capacidade de distinguir dois alvos. O critério para distinguir dois alvos é que a HPBW seja aproximadamente $FNBW/2$, isto é, se dois alvos estiverem separadas por distâncias angulares iguais ou superiores a $HPBW \approx FNBW/2$ de uma antena, esta consegue distingui-los (Kraus 1988). Os fatores que afetam a largura de feixe são o comprimento de onda (λ), a forma do diagrama de radiação e as dimensões da antena.

Os diagramas de radiação podem ser classificados quanto à diretividade em que as antenas radiam. Um radiador isotrópico é definido com uma antena hipotética e sem perdas que radia igualmente em todas as direções e é normalmente tomado como referência para exprimir a diretividade de antenas. o radiador direcional é caracterizado por radiar ondas eletromagnéticas em determinadas direções e o

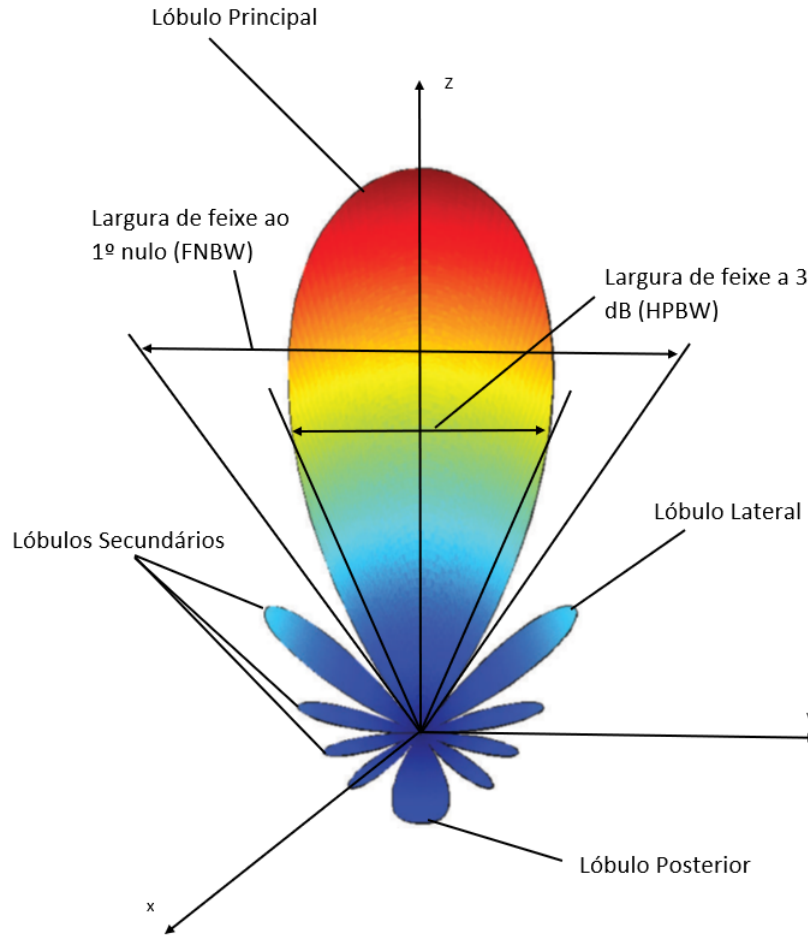


FIGURA 3.8: Elementos caraterísticos do diagrama de radiação

radiador omnidirecional radia energia de igual forma em todas as direções (Balanis 2016).

Planos Principais

Para antenas com polarização linear, discutido com mais detalhe no subcapítulo Polarização, consideram-se os seguintes planos:

- Plano E: Definido pelo plano que contém o vetor do campo elétrico e a direção da máxima radiação;
- Plano H: Definido pelo plano que contém o vetor do campo magnético e a direção da máxima radiação.

Os eixos do sistemas de coordenadas são escolhidos por forma a que pelo menos um dos planos referido coincidas com os planos do referencial, no entanto, há casos em que pode ser mais favorável escolher outro sistema de coordenadas.

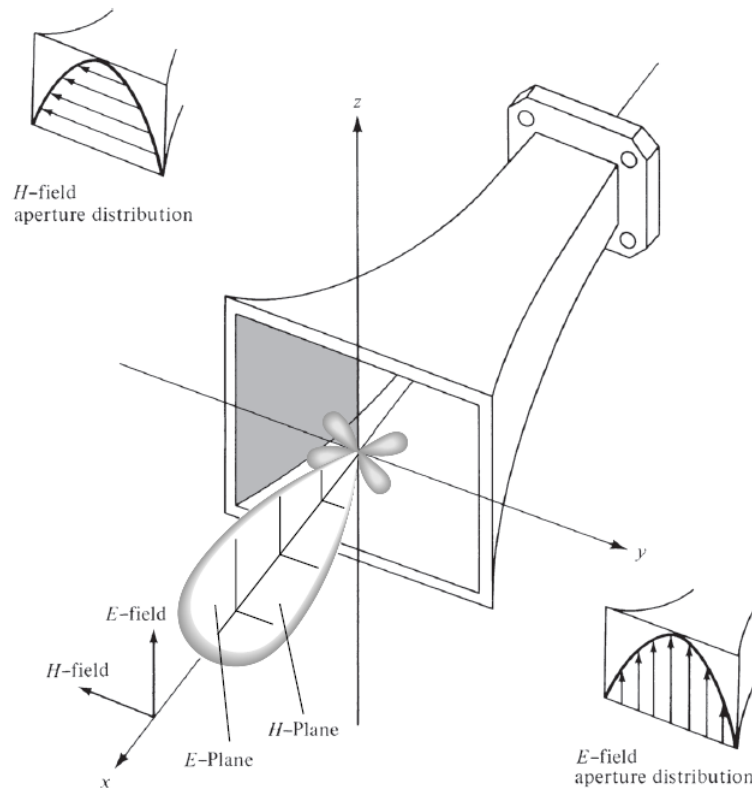


FIGURA 3.9: Campos E e H de um diagrama de radiação de uma antena

Regiões de Campo

De forma a identificar a estrutura do espaço circundante da antena, este é dividido em três regiões (Kraus 1988):

- Região reativa do campo próximo: Definida com a porção do espaço imediatamente em redor da antena, onde predomina o campo reativo;
- Região do campo próximo (*Região de Fresnel*): Definida como a região da antena entre a região reativa do campo próximo e a região de *Fraunhofer* onde predomina o campo radiado e a sua orientação espacial depende da distância à antena;
- Região do campo distante (*Região de Fraunhofer*): Caracterizada pela região onde a distribuição angular do campo é maioritariamente independente da distância à antena.

Tipicamente, a forma diagrama de radiação é alterado consoante as regiões em que se encontra. Segundo a Figura 3.10 presente no artigo Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e Yoccarino 1995, o diagrama é mais disperso e uniforme na região

reativa do campo próximo. À medida em que a distância à antena aumenta, e que se entra nas regiões de *Fresnel* e *Fraunhofer* a forma do diagrama evidencia mais os seus lóbulos e fica mais regular. A separação entre as regiões reativa do campo próximo e região de *Fresnel* e entre a região de *Fresnel* e região de *Fraunhofer* são definidas pelas expressões 3.1 e 3.2 respetivamente (Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e Yoccarino 1995).

$$R = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$R = 0.62\sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} \quad (3.2)$$

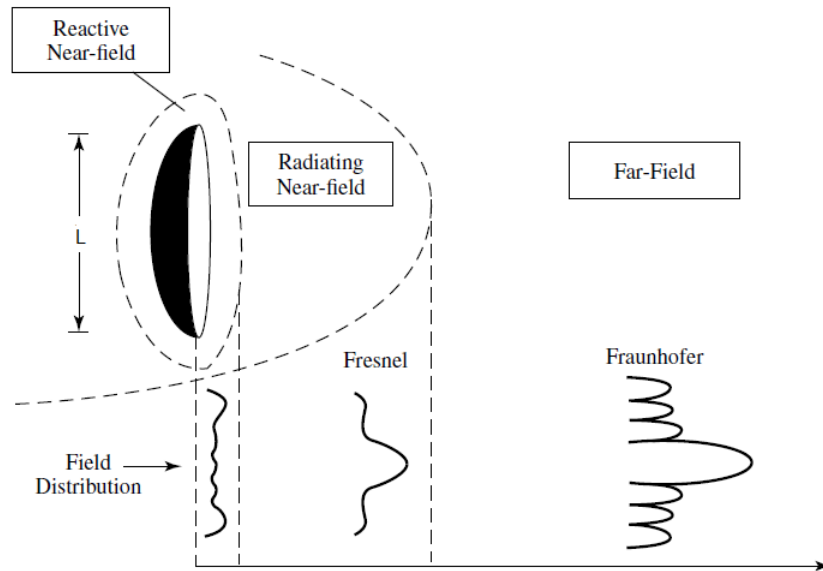


FIGURA 3.10: Alterações típicas do diagrama de radiação desde a região reativa do campo próximo à *Região de Fraunhofer*. (Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e Yoccarino 1995)

Densidade de Potência

As ondas eletromagnéticas resultam da combinação de um campo magnético e de um campo elétrico que se propaga no espaço. A forma de representar a densidade direcional da quantidade de energia transferida de uma onda eletromagnética é através do vetor de *Poynting*, o qual é definido, contabilizando variações temporais sinusoidais, na equação 3.3, expressa em W m^{-2} .

$$W_{av}(x, y, z) = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \quad (3.3)$$

Sendo que o vetor de *Poynting* é uma densidade de potência, ao integrar a componente normal do mesmo, obtém-se na equação 3.4 a potência média radiada pela antena P_{rad} que atravessa uma superfície fechada S .

$$P_{rad} = P_{av} = \oint_S W_{rad} \cdot ds = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}[E \times H^*] \cdot ds \quad (3.4)$$

Como meio de comparação, define-se a potência radiada por um radiador isotrópico na expressão 3.6, com uma densidade de potência dada por,

$$W_0 = \hat{a}_r = \hat{a}_r \left(\frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \right) \quad (3.5)$$

$$P_{rad} = \oint_S W_{rad} \cdot ds = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\hat{a}_r W_0(r)] \cdot [\hat{a}_r r^2 \sin\theta d\theta d\phi] = 4\pi r^2 W_0 \quad (3.6)$$

Diretividade

A diretividade de uma antena é definida com a relação entre a intensidade de radiação numa determinada direção e a intensidade de radiação média em todos as direções. A intensidade média é igual ao quociente entre a potência total radiada pela antena e 4π (IEEE 1997). Sendo que a intensidade de radiação U é obtida pela multiplicação entre a densidade de radiação e o quadrado da distância, a diretividade D de uma antena pode ser descrita pela expressão 3.7.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.7)$$

No entanto, para antenas com componentes de polarização ortogonais podem-se definir diferentes diretividades parciais para cada polarização θ e ϕ ,

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (3.8)$$

onde,

$$D_{\theta} = \frac{4\pi U_{\theta}}{(P_{rad})_{\theta} + (P_{rad})_{\phi}} \quad (3.9)$$

$$D_{\phi} = \frac{4\pi U_{\phi}}{(P_{rad})_{\theta} + (P_{rad})_{\phi}} \quad (3.10)$$

sendo que o índice θ e ϕ representa a direção que contém as componentes do campo θ e ϕ respetivamente.

Para um radiador isotrópico, a diretividade toma o valor unitário, no entanto, em qualquer outro tipo de radiador, o valor da máxima diretividade irá ser sempre superior a ao valor unitário. Na equação 3.7, considerando o cálculo para a diretividade máxima, esta pode tomar valores inferiores a 1, o que não acontece na realidade. Com isto, uma expressão mais geral para a diretividade e para a diretividade máxima podem ser definidas na equação 3.11 e 3.12 respetivamente.

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.11)$$

$$D_0 = 4\pi \frac{F(\theta, \phi) |_{max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.12)$$

onde $F(\theta, \phi)$ é uma função dos componentes do campo elétrico numa região do campo distante, que, multiplicada por uma constante, resulta a intensidade de radiação.

No entanto, a diretividade máxima também pode ser descrita em função do ângulo sólido de feixe Ω_A ,²

$$D_0 = \frac{4\pi}{\left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi \right]} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (3.13)$$

Ganho

A diretividade de uma antena é uma medida que descreve apenas a propriedades direcionais da antena. Por outro lado, o ganho, para além de estar relacionado

²O ângulo sólido Ω é definido como um ângulo tridimensional no centro de uma esfera, que subentende na superfície da mesma uma área medida pelo quadrado do raio da esfera e toma valores adimensionais.

com a diretividade, também tem em conta a eficiência da antena, discutida mais à frente neste capítulo.

O ganho de uma antena é um parâmetro fundamental na *performance* da mesma. Este representa a eficiência em que a antena converte o sinal elétrico em ondas eletromagnéticas, que pode ser definido como ganho absoluto ou ganho relativo. O ganho absoluto de uma antena (definido na equação 3.14) representa a relação entre a intensidade de radiação radiada numa determinada direção e a intensidade de radiação que chega à antena, se a potência que chega à antena fosse radiada de forma isotrópica. No entanto, a antena isotrópica, como já foi falado neste capítulo, é um caso ideal e não corresponde à realidade. Com isto, utiliza-se o ganho relativo que relaciona a intensidade de radiação radiada de uma antena numa dada direção com a intensidade de radiação radiada a partir de outra antena na mesma direção, denominada antena de referência, quando ambas são alimentadas com a mesma potência de entrada.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (3.14)$$

Como falado mais à frente neste capítulo, a potência radiada P_{rad} está relacionada com a potência de entrada P_{in} da seguinte forma,

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \quad (3.15)$$

sendo que e_{cd} representa a eficiência de radiação da antena.

A partir da equação 3.15, usando a 3.14, vem,

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (3.16)$$

Que está relacionado com a diretividade (equação 3.7) da seguinte forma,

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (3.17)$$

No entanto, a equação 3.17 não contempla perdas quando o elemento da antena está conectado a um guia, o que provoca perdas indesejadas, através de reflexões. Isto pode ser solucionado com a introdução do termo e_r que está relacionado com o coeficiente de reflexão,

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.18)$$

Assim sendo, pode-se introduzir o conceito de ganho realizado G_{re} que tem em conta as perdas por reflexão da antena.

$$G_{re}(\theta, \phi) = e_r G(\theta, \phi) = (1 - |\Gamma|^2) G(\theta, \phi) = e_r e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (3.19)$$

É de notar, que se a antena for adaptada ao guia, ou seja, se a impedância de entrada for igual à impedância característica ($|\Gamma| = 0$), então, $G = G_{re}$.

Largura de Banda

A largura de banda é uma gama de frequências, em redor de uma frequência central f_c , para a qual as características da antena se mantêm com um valor aceitável relativamente aos valores obtidos para a frequência central. A largura de banda é, frequentemente, um dos parâmetros determinantes usados para dimensionar a antena.

Dependendo das necessidades de operação da antena que é utilizada, a largura de banda será limitada por certos fatores que são falados neste capítulo, como a impedância de entrada, ganho, forma do diagrama de radiação e polarização. Na prática, a largura de banda pode ser representada de duas formas,

- Antenas de banda larga, que apresentam a característica da frequência mais alta ser maior ou igual que o dobro da menor frequência. A largura de banda é representada pela razão entre estas frequências. Por exemplo, uma razão de 5:1 significa que a frequência mais alta é 4 vezes maior que a menor frequência.
- Antenas de banda estreita, que são caracterizadas por apresentarem uma largura de banda muito menor que a frequência central. Neste caso, a largura de banda é expressa em percentagem. Por exemplo, uma percentagem de 10% de banda larga significa que é aceitável que a diferença da menor frequência para a frequência central, e consequentemente a diferença da frequência central para a maior frequência tome um valor que seja metade dos 10% para cada lado de f_c , ou seja, 5% de f_c para cada lado.

Polarização

A polarização da antena é definida como a polarização da onda radiada pela mesma, que é definida como a direção do campo elétrico da onda radiada, que se nada for dito em contrário, se considera na direção da máxima radiação. No entanto, na prática, a polarização da onda radiada depende da direção de propagação, ou seja, podem existir diferentes polarizações em zonas diferentes do diagrama de radiação.

A polarização pode ser classificada como linear, circular ou elíptica. Uma polarização linear é caracterizada se o vetor que descreve o campo elétrico tiver sempre a mesma direção à medida que a onda se propaga. A polarização circular é caracterizada pelo vetor do campo elétrico que gira numa circunferência no plano xy à medida que a onda se propaga, o que difere para a polarização elíptica, no facto das duas componentes do vetor campo elétrico girarem numa elipse no plano xy . Pode-se definir a polarização linear e circular como casos particulares da polarização elíptica (Figura 3.11), em que as componentes do campo elétrico são múltiplos de π na polarização linear e têm módulos iguais e um desfasamento múltiplo ímpar de $\frac{\pi}{2}$ na polarização circular.

Perdas de Polarização

As perdas de polarização ocorrem quando a polarização da antena recetora é diferente à da onda incidente. Devido a este fator, a potência extraída pela antena do sinal recebido não vai ser máxima.

Assumindo que o campo elétrico da onda incidente pode ser escrito da seguinte forma,

$$\mathbf{E}_i = \hat{\rho}_w E_i \quad (3.20)$$

onde $\hat{\rho}_w$ é o vetor unitário da onda. Então, a polarização do campo elétrico da antena recetora pode ser escrito da seguinte forma,

$$\mathbf{E}_a = \hat{\rho}_a E_a \quad (3.21)$$

As perdas de polarização podem ser definidas pelo fator de perdas de polarização PLF , como na expressão 3.22.

$$PLF = |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 = |\cos\psi_p|^2 \quad (3.22)$$

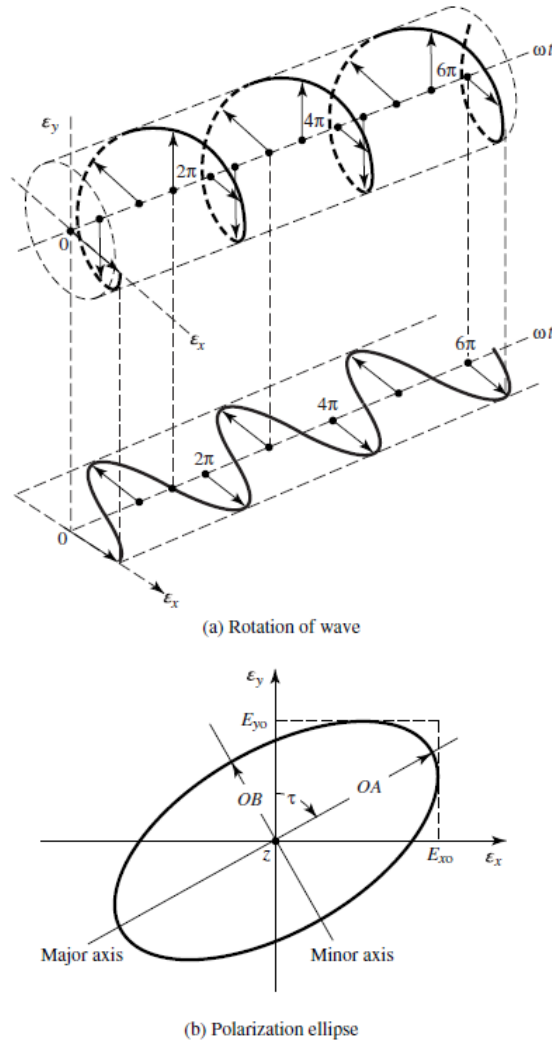


FIGURA 3.11: Rotação de uma onda eletromagnética com polarização elíptica para $z = 0$ (Figura 2.23 Balanis 2016).

onde ψ_p é o ângulo entre os dois vetores unitários.

Eficiência

Eficiência da Antena

A eficiência da antena e_0 descreve perdas nos terminais de entrada e dentro da estrutura da antena. A figura 3.12 representa os terminais de referência da antena e as suas perdas:

- Perdas por reflexão devido à não adaptação entre o guia e a antena
- Perdas por condução e dielétrico

Ou seja, de modo geral, a eficiência pode ser escrita da seguinte forma,

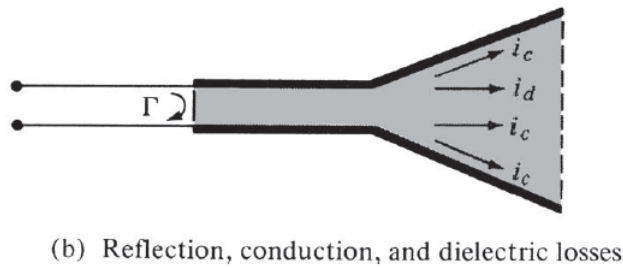
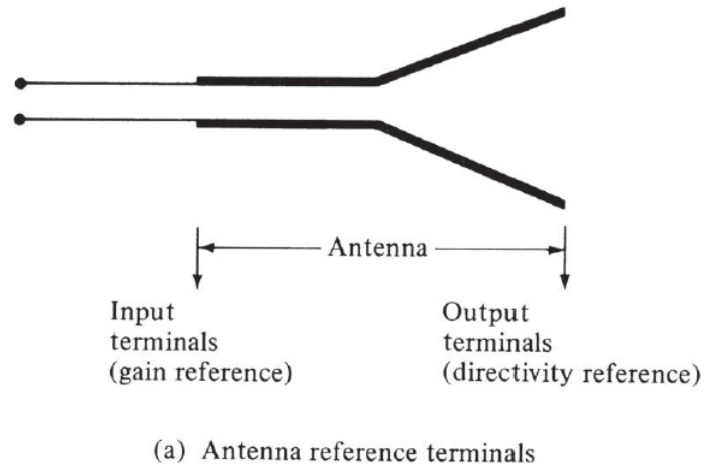


FIGURA 3.12: Terminais de referência e perdas na antena (Figura 2.22 do livro Balanis 2016)

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (3.23)$$

onde

e_0 : "eficiência total"

e_r : "eficiência considerando perdas por reflexão $(1 - |\Gamma|^2)$ "

e_c : "eficiência considerando perdas por condução"

e_d : "eficiência do dielétrico"

Γ : "coeficiente de reflexão nos terminais de entrada da antena"

$[\Gamma = (Z_{in} - Z_0)/(Z_{in} + Z_0)]$ com Z_{in} : impedância de entrada e Z_0 : impedância característica do guia.

com a relação de onda estacionária ROE,

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.24)$$

Por norma, e_c e e_d são muito difíceis de calcular, mas podem ser determinados experimentalmente. Com isto, é comum substituir-se $e_c e_d$ por e_{cd} e representar-se a eficiência total e_0 por,

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.25)$$

Equação Radar

A equação radar pode ser definida através do conhecimento da RCS do alvo.³

A equação radar relaciona a potência recebida com a potência transmitida depois de ter sido refletida num alvo com uma RCS σ

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} e_{cdr} \sigma \frac{D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r)}{4\pi} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2} \right)^2 \quad (3.26)$$

com RCS,

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{W_s}{W_i} \right] \quad (3.27)$$

onde

e_{cdr} : "eficiência considerando perdas dielétrico e por condução no recetor"

e_{cdt} : "eficiência considerando perdas dielétrico e por condução no transmissor"

R : "distância do recetor ao alvo"

W_i : "Densidade de potência radiada"

W_s : "Densidade de potência recebida"

Se considerarmos perdas por reflexão vem,

³RCS é uma representação da capacidade de um alvo de refletir um sinal radar na direção do recetor. Em regra a RCS de um alvo é comparada com a força de um sinal refletido isotropicamente de uma esfera perfeitamente lisa com uma área de secção transversal de $1m^2$

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt}e_{cdr} \left(1 - |\Gamma_t|^2\right) \left(1 - |\Gamma_r|^2\right) \sigma \frac{D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r)}{4\pi} \times \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2}\right)^2 |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a|^2 \quad (3.28)$$

onde

Γ_r : "coeficiente de reflexão nos terminais de entrada da antena de recepção"

Γ_t : "coeficiente de reflexão nos terminais de entrada da antena de transmissão"

$\hat{\rho}_w$: "vetor unitário de polarização nas ondas refletidas"

$\hat{\rho}_r$: "vetor unitário de polarização na antena de recepção"

No entanto, se as antenas estiverem com polarização adaptada para a máxima radiação direcional e recepção, a equação 3.28 fica reduzida a,

$$\frac{P_r}{P_t} = \sigma \frac{G_{0t}G_{0r}}{4\pi} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2}\right)^2 \quad (3.29)$$

3.2 Simulação de uma Antena

3.2.1 Para Sinais DVB-T

Capítulo 4

Processamento de Sinal

4.1 Processamento de Sinal

Como falado em 2.1, o conceito do radar passivo é fazer uma *cross-correlation* entre o sinal direto e o refletido. O problema está no facto de ser computacionalmente muito pesado fazer uma *2-Dimensional Cross-Correlation Function (2D-CCF)*, sendo necessário a utilização de algoritmos mais eficientes para o cálculo da mesma.

O processamento de sinal num radar passivo pode ser, resumidamente, enumerado em oito pontos:

1. Receção e reconstrução do sinal direto (*reference signals_{ref}*)
2. Receção do *surveillance signal* (s_r)
3. *Cross-correlation* do s_{ref} e s_r
4. Integração de produtos da correlação (FFT)
5. Filtragem de *clutter*
6. Deteção de alvos e seguimento no domínio *range/Doppler*
7. Processamento no plano Cartesiano
8. Seguimento no plano Cartesiano

Equivalência entre um filtro adaptado e *cross-correlation*

Para *Software Defined Radios*, a implementação de um filtro adaptado pode ser feita através do cálculo de uma *cross-correlation* (Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.). Considerando $s_0(t)$ o sinal de saída do filtro adaptado e $h_{MF}(t)$ a resposta do filtro vem,

$$s_0(t) = s_R(t) \otimes h_{MF}(t) = \int s_R(\tau) s_{ref}^*(\tau - t) d\tau \quad (4.1)$$

A equação 4.1 mostra que usando um filtro adaptado obtemos um sinal de saída igual ao fazer uma *cross-correlation* entre o s_R e s_{ref} .

Ao implementar uma *cross-correlation* como mostrado em 4.1, não se toma em conta o desvio de *Doppler*, visto que se faz a *cross-correlation* apenas numa dimensão. Para se entrar com o desvio de *Doppler* tem de se estender a 2D-CCF,

$$CCF(\tau, \nu) = \int s_R(\tau) s_{ref}^*(\tau - t) e^{-2\pi j \nu t} d\tau \quad (4.2)$$

onde ν representa o desvio de *Doppler* que é definido pela *cross-correlation* entre o s_R e s_{ref} compensada com o *Doppler shift*.

Como o *delay-time* τ pode ser transformado em *bistatic range*, a 2D-CCF pode ser representada num *bistatic range-Doppler map*, através da equação 4.3 que representa a 2D-CCF numericamente visto que os sinais têm de ser digitalizados com uma certa frequência de amostragem.

$$CCF(l, m) = \sum_{n=0}^{N-1} s_R(n) s_{ref}^*(n - l) e^{-2\pi j \frac{mn}{N}} \quad (4.3)$$

onde n representa o tempo, l o *delay-time*, m o desvio de *Doppler* e N o número total de amostras que depende do Coherent Processing Interval (CPI),

$$N = \frac{CPI}{T_s} = CPI \cdot F_s \quad (4.4)$$

Eficiência do cálculo da 2D-CCF

De modo a ter um cálculo da 2D-CCF mais eficiente, há duas condições principais a referir:

- Cumprir com o teorema de *Nyquist*, ou seja, garantir que a frequência de amostragem é superior ou igual à largura de banda ($F_s \geq B$);
- Ter um CPI longo de forma a obter maior ganho de integração e consequentemente melhor relação sinal-ruído.

No entanto, o cálculo de uma 2D-CCF é computacionalmente muito pesado, e isto pode ser demonstrado com um pequeno exemplo: Para uma largura de banda $B = 10\text{MHz}$, um $CPI = 1\text{s}$ e um número de *range bins* e de *doppler bins* igual a 1000 cada, implica um número de multiplicações muito elevado ($10000000 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot 1000 = 10000000000$ cálculos).

Para solucionar este problemas existem várias soluções numéricas, como *Correlation FFT*, *Direct FFT* e *Batches Algorithm* (Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.).

Correlation FFT

A *Correlation FFT* pode ser obtida através da equação 4.3 mudando o exponencial de posição como representado na eq. 4.5, de modo a obter uma nova expressão que pode ser calculada como uma *cross-correlation* a uma dimensão com uma compensação de *Doppler*, ou seja, *Doppler bin* (m), a *Cross-Correlation Function* (CCF) é a *cross-correlation* entre o *reference signal* S_{ref} e o sinal direto com um *Doppler shift*.

$$CCF(l, m) = \sum_{n=0}^{N-1} s_R(n) e^{-2\pi j \frac{mn}{N}} s_{ref}^*(n-l) \quad (4.5)$$

Substituindo $s_R(n) e^{-2\pi j \frac{mn}{N}}$ por $s_R(n, m)$ vem,

$$CCF(l, m) = \sum_{n=0}^{N-1} s_R(n, m) s_{ref}^*(n-l) \quad (4.6)$$

Com isto, e sabendo que as *cross-correlations* são calculadas mais eficientemente no domínio de *Fourier*, vem,

$$CCF(l, m) = IDFT \left[S_R(k, m) S_{ref}^*(k) \right] \quad (4.7)$$

com

$$S_R(k, m) = DFT [s_R(n, m)] \quad (4.8)$$

$$S_{ref}(k) = DFT [s_{ref}(n)] \quad (4.9)$$

A Direct Fourier Transform (DFT) da versão do sinal direto com *Doppler shift* pode ser calculada apenas uma vez porque a variável m apenas causa um desvio circular. Com isto, pode-se tirar algumas conclusões (Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.):

- Apenas é necessário calcular a *DFT* de $s_R(n, m)$ uma vez para $m = 0$, visto que para outros valores de m podem ser obtidos com um desvio;
- Em cada iteração, são calculadas N multiplicações complexas e uma *Inverse Direct Fourier Transform (IDFT)*.

Com isto, concluímos que quanto menos *doppler bins* existirem em relação aos *range bins*, mais eficiente será o cálculo. Este pode ser expressado através da seguinte função de complexidade:

$$O_{CF} = 2N \log_2(N) + N_f[N + N \log_2(N)] \quad (4.10)$$

onde, N_f : "Número de doppler bins"

Direct FFT

Por outro lado, a *Direct FFT* é um método que, tal como a *Correlation FFT* deriva da interpretação da equação 4.3 mas, para cada *time bin* l , a *CCF* é a DFT do produto do sinal recebido com a versão conjugada com *delay* do *reference signal* S_{ref} .

$$CCF(l, m) = DFT \left[S_R(n) S_{ref}^*(n - l) \right] \quad (4.11)$$

Da interpretação da equação 4.11 conclui-se que, para cada iteração, são calculadas N multiplicações complexas e u,a DFT. A sua função de complexidade pode ser expressa através da expressão 4.12:

$$O_{DF} = N_\tau[N + N \log_2(N)] \quad (4.12)$$

onde, N_τ : "Número de range bins"

Ao contrário da *correlation FFT*, tal como se pode observar na função de complexidade, a eficiência deste método é dependente do N_τ . Isto é, o número de iterações feitas neste método está diretamente relacionado com o número de *range*

cells: quanto maior for o número de *range cells* do mapa *range-Doppler*, menos eficiente é este método.

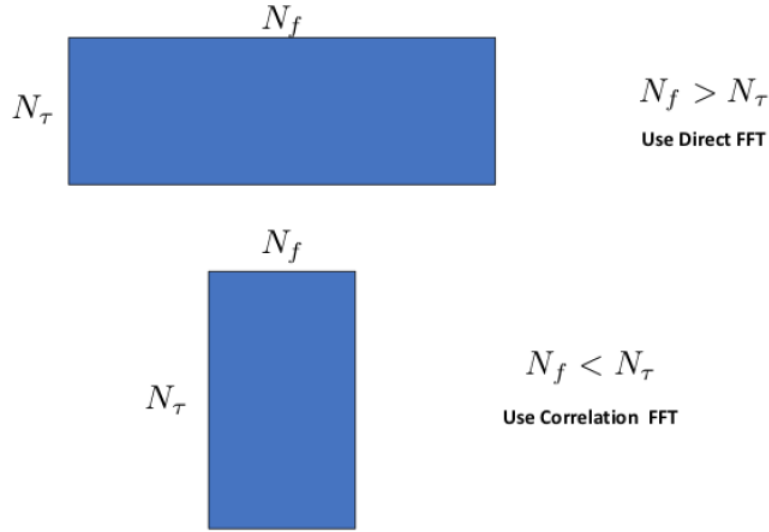


FIGURA 4.1: *Correlation FFT vs Direct FFT* (Figura 2.4 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

A figura 4.1 representa de uma forma ilustrativa quando usar a *Direct FFT* ou *Correlation FFT* de acordo com a relação de *Doppler cells* e *range cells* no mapa de *range-Doppler*. Se existirem mais *Doppler cells* a *Direct FFT* é mais eficiente, enquanto se o contrário se verificar, a *Correlation FFT* torna-se mais eficiente.

Batches algorithm

Tanto os métodos *direct FFT* e *correlation FFT* são mais eficientes que fazer o cálculo da 2D-CCF, no entanto, dependem do número de *range* ou *doppler cells* e continuam a ser muito pesadas computacionalmente porque apenas otimizam o cálculo ao longo de uma dimensão.

Apesar de não existir nenhum método perfeito que produza uma solução exata, um método denominado *Batches algorithm* foi proposto e permite otimizar em duas dimensões com uma pequena perda de *Signal to Noise Ratio (SNR)* reduzindo de forma considerável o peso computacional.

O *Batches algorithm* consiste na subdivisão dos dois sinais recebidos, o sinal direto e o sinal refletido no alvo, em segmentos denominados *batches*. Sendo n_B o número de *batches* e N_B o comprimento do mesmo, com $N = n_B \cdot N_B$, a expressão da CCF é representada pela equação 4.13.

$$CCF(l, m) = \sum_{r=0}^{n_B-1} e^{\left(-j2\pi \frac{mrN_B}{N}\right)} \cdot \sum_{p=0}^{N_B-1} s_R(rN_B + p) s_{ref}^*(rN_B + p - l) e^{\left(-j2\pi \frac{mp}{N}\right)} \quad (4.13)$$

Este algoritmo assume que o efeito de *Doppler* é negligenciado dentro de cada *batch*, ou seja, só é calculado para o início de cada *batch* n_B e assim a equação 4.13 é reduzida à equação 4.14.

$$CCF(l, m) = \sum_{r=0}^{n_B-1} e^{\left(-j2\pi \frac{mrN_B}{N}\right)} \cdot \sum_{p=0}^{N_B-1} s_R(rN_B + p) s_{ref}^*(rN_B + p - l) \quad (4.14)$$

A aproximação feita na eq. 4.14 (frequência com que se calcula o desvio de *Doppler*) pode ser representada por uma função *step-wise* em vez de uma função linear (figura 4.2).

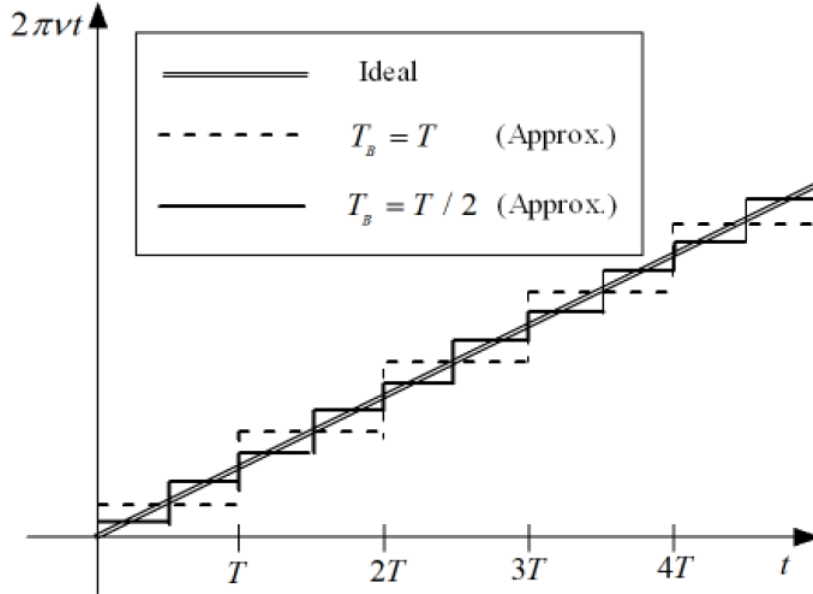


FIGURA 4.2: Aproximação de fase da função de *step* comparada com o ideal: função linear (Figura 2.6 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

A equação 4.14 pode ser interpretada de uma forma mais simples (eq. 4.15) ao considerar o somatório do produto entre s_R e s_{R^*} como uma CCF e a cada n_B é calculado a DFT ao longo de r .

$$CCF(l, m) = \sum_{r=0}^{n_B-1} CCF(l, r) e^{\left(-j2\pi \frac{mrN_B}{N}\right)} = DFT[CCF(l, r)] \quad (4.15)$$

Um dos fatores que influencia a eficiência do algoritmo é a escolha da duração dos *batches*. Com isto, é simples concluir que para um determinado intervalo, ao escolher *batches* com maior duração, vai existir um menor número de *batches*, e consequentemente, a DFT é calculada ao longo de um menor número de pontos o que vai levar a um menor tempo de processamento. No entanto, ao escolher *batches* com maior duração, vai introduzir um erro maior na aproximação de fase e consequentemente mais perdas em SNR.

Contudo, *batches* com menor duração implicam o contrário, ou seja, maior número de *batches*, maior tempo de processamento e menos perdas em SNR.

Foi desenvolvido um estudo de grande interesse (Petri, Moscardini, Martorella, Conti, Capria e Berizzi 2012) que analisa extensivamente a utilização do *batches algorithm* em que foram recolhidos dados com um radar passivo da Italian National Consortium for Telecommunications (CNIT). Os resultados da análise da duração dos *batches* com o tempo de processamento e perdas SNR encontram-se representados na tabela e figura 4.3 respetivamente.

Comprimento do batch	Tempo de processamento
31.28 μs	4.93 s
218.76 μs	0.92 s
333.29 μs	0.71 s
924 μs	0.59 s

TABELA 4.1: *Batches algorithm* - Análise do tempo de processamento devido ao comprimento dos *batches* (Tabela 2.1 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

4.1.1 Cancelamento de *clutter*

No funcionamento do radar passivo, um dos sinais que se quer ter conhecimento é o sinal direto, que é o sinal que é transmitido diretamente do iluminador de oportunidade para o recetor, como representado na figura 2.1. Este sinal é submetido a uma atenuação pequena relativamente ao sinal refletido, isto porque a *baseline C* representada na figura 2.5 é sempre menor que o *bistatic range*. Logo,

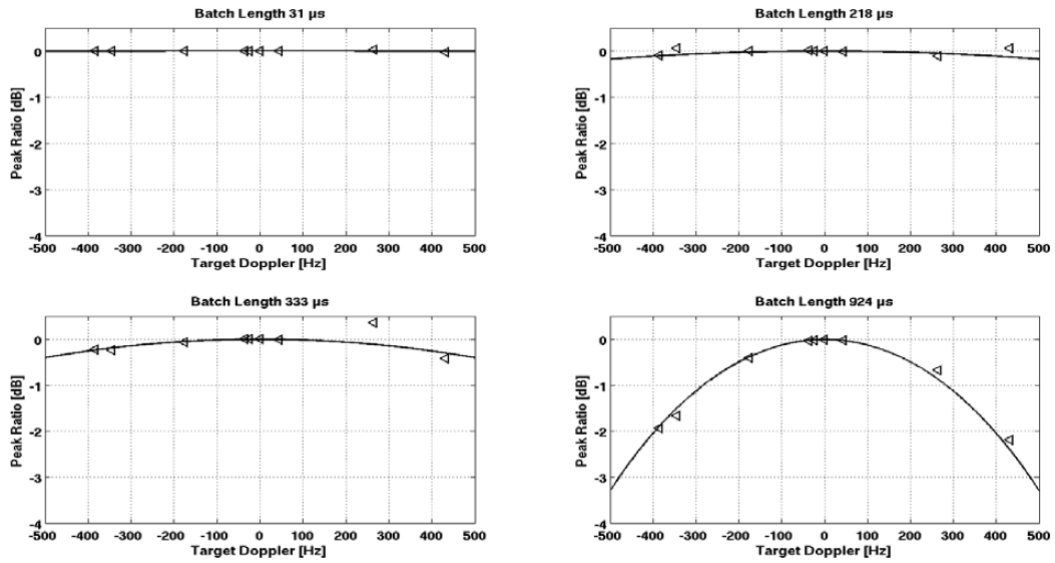


FIGURA 4.3: *Batches algorithm* - Análise perdas SNR devido ao comprimento dos *batches*(Figura 2.8 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

o sinal direto pode ser muito mais forte comparado com os ecos dos alvos, o que dificulta a detecção de alvos.

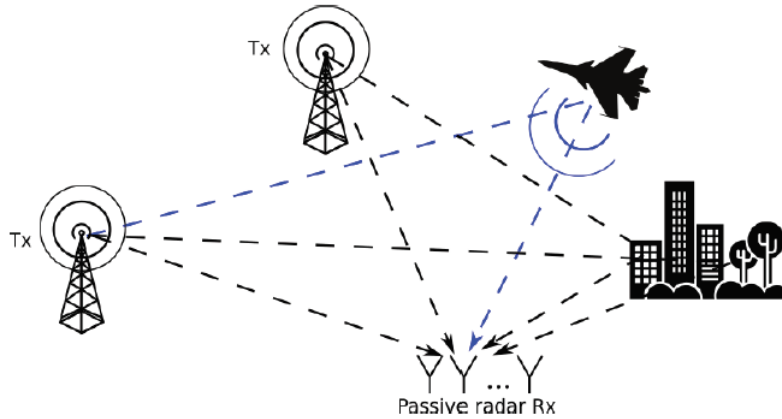


FIGURA 4.4: Cenário PCL - Clutter (Figura 1 Petó e Seller 2018)

Por mais que se tente fisicamente não receber o sinal direto na antena de *surveillance*, este e todas as suas cópias atrasadas no tempo devido a reflexões em objetos e terreno não desejadas (*clutter* representado na figura 4.4) são mais fortes que o sinal refletido no alvo. É possível haver reflexões em edifícios ou algo perto da antena de *surveillance* que possam ser confundidas com o sinal que pretendemos obter, o que pode complicar o cancelamento de todas as réplicas do sinal indesejadas. É de notar, que no caso dos radar *PCL*, ou seja, radares passivos, estamos perante

uma geometria bistática e isto leva a que o nível de *clutter* na zona da *baseline* possa ser muito forte e ser notável em algumas *range cells*. Este efeito em junção com o sinal direto que possa ser captado na antena de *surveillance* podem dificultar a detecção de alvos.

O sinal recebido pode ser interpretado de uma forma mais realista como na equação 4.16 para facilitar os processos de cancelamento de *clutter* e identificação das diferentes componentes do sinal.

$$S_R = A_R s_T(t) + \sum_{m=1}^{N_T} a_m s_T(t - \tau_{T_m}) e^{(2\pi j f_{D_m} t)} + \sum_{i=1}^{N_s} b_i s_T(t - \tau_{c_i}) + n(t) \quad (4.16)$$

Onde o primeiro termo representa a componente do sinal direto, o segundo termo representa o sinal refletido no alvo, o terceiro termo representa o *clutter* e por fim, o quarto termo representa a componente de ruído.

Os aspetos mais importantes na *performance* do cancelamento de *clutter* são a capacidade de operação em tempo real e a eficiência do algoritmo representada no mapa *range-Doppler*. De modo geral, a filtragem, ou cancelamento de *clutter* é feita em dois domínios diferentes: Técnicas de supressão no domínio do espaço para lidar com interferências de alta potência e algoritmos de filtragem de *clutter* no domínio do tempo. Tem sido investigado a aplicação de vários métodos e o artigo Petó e Seller 2018 resume a aplicabilidade e comparação de resultados obtidos na utilização dos mesmos tanto como uma explicação sucinta na sua execução.

Existem várias técnicas de cancelamento de *clutter* utilizadas em radares passivos. Os algoritmos de filtragem no domínio do tempo utilizam o *reference signal* de modo a cancelar as réplicas do sinal com um desvio no tempo e de *Doppler* no canal de *surveillance*. Entre estes podemos salientar a aplicação das técnicas de filtragem de *Wiener* com *sample matrix inversion*, Extensive Cancellation Algorithm (ECA), Extensive Cancellation Algorithm - Batched (ECA-B), Extensive Cancellation Algorithm - Sliding Window (ECA-S) Sequential Cancellation Algorithm (SCA), Least Mean Square (LMS), Normalized Least Mean Square (NLMS) e Recursive Least Squares (RLS).

Como jeito de conclusão deste tópico, as figuras 4.6 e 4.5, retiradas do estudo Petri, Moscardini, Martorella, Conti, Capria e Berizzi 2012 representam a *performance* dos vários algoritmos nos dois aspetos mais relevantes, respetivamente no mapa de *range-Doppler* que permite a observação da distorção e resolução do

algoritmo e do aumento de SINR em relação ao custo computacional medido em Floating Point Operations per Second (FLOPS).

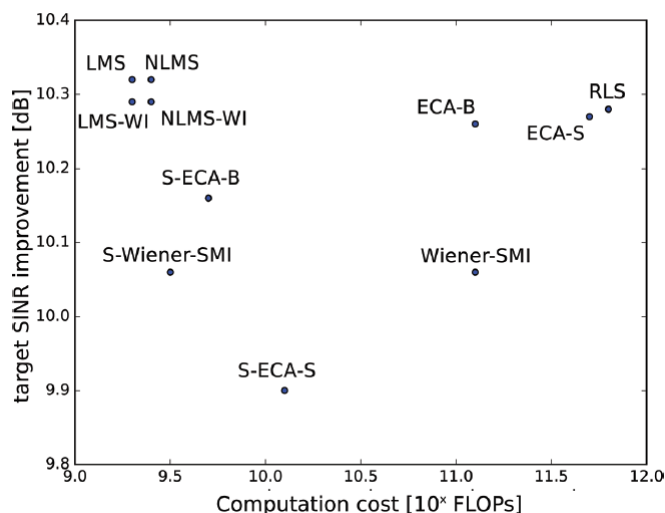


FIGURA 4.5: Mapa da *performance* dos algoritmos de acordo com o aumento de SINR e *computation cost* em FLOPS (Figura 16 Pető e Seller 2018)

Destes resultados obtidos, é de realçar o algoritmo ECA-S que obteve a melhor *performance* ao custo de um grande *computation cost*. Contudo, pode-se observar os algoritmos do tipo LMS e NLMS, que apesar de terem um bom aumento de SINR com pouco custo computacional, apresentam, como observável na figura 4.6, uma grande distorção no mapa *range-Doppler*. Também é de notar, que na figura 4.5, o aumento de SINR é pouco relativamente ao custo computacional, isto porque o referencial não está normalizado, ou seja, a janela do eixo das ordenadas toma valores entre 9.8 e 10.4dB enquanto a janela do eixo das abcissas toma valores entre 10^9 e 10^{12} FLOPS.

4.1.2 Reconstrução e equalização do sinal direto

Uma das principais diferenças do radar passivo para o radar ativo é que no último o *reference signal* é conhecido visto que é transmitido pelo próprio radar. No caso do radar passivo, a utilização de iluminadores de oportunidade tem como consequências o não conhecimento do sinal direto, visto que para além de receber o mesmo, recebemos as suas réplicas atrasadas no tempo e em *Doppler* e ainda ruído.

De forma a melhorar o sinal direto em quando este é digital, neste subcapítulo vão ser discutidos dois métodos diferentes para a remoção de *multipath* e remoção de picos espúrios formados na função de ambiguidade.

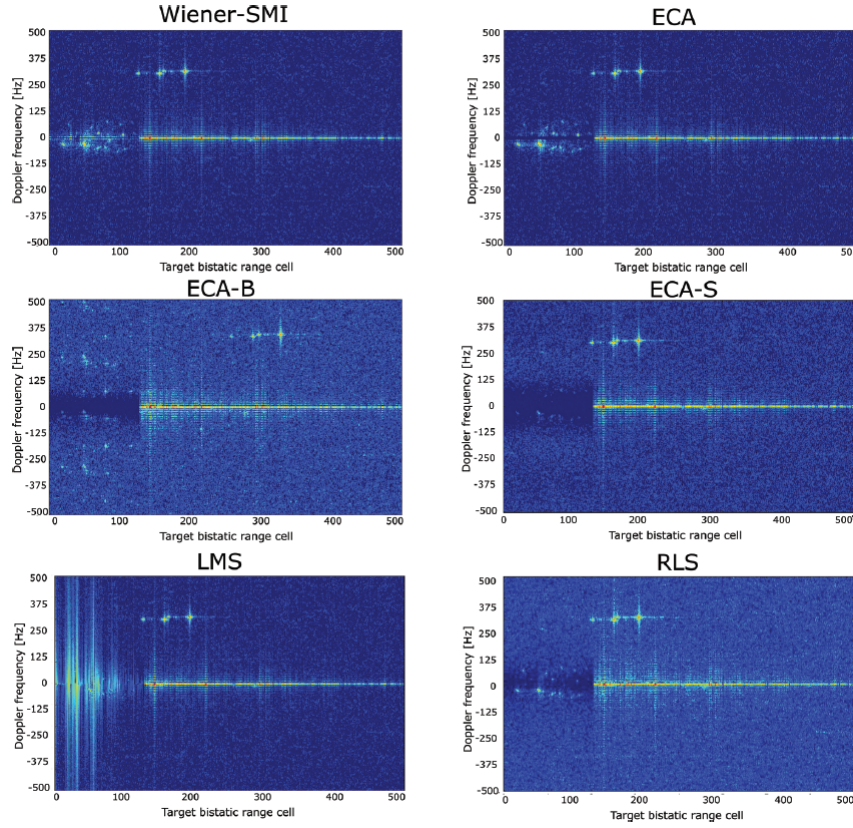


FIGURA 4.6: Mapas de *range-Doppler* dos diferentes algoritmos utilizados (Figura 14 Petó e Seller 2018)

Reconstrução do sinal direto

Alguns sinais digitais transmitidos, como Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T) em específico, permitem a reconstrução do sinal direto através da desmodulação e re-modulação do sinal direto recebido. Por forma a reconstruir o sinal direto, no caso da DVB-T, é importante conhecer o comprimento do símbolo exprimido em amostras, isto porque se a frequência de amostragem do transmissor e do recetor for igual, o comprimento do sinal em amostras é inteiro e a sua recepção consiste em meter o sinal no domínio da frequência, usando uma Fast Fourier Transform (FFT). Se este não for o caso, ou seja, que a frequência de amostragem do recetor não seja a definida pelo *standard* DVB-T, o comprimento do símbolo não vai ser um número inteiro e a constelação do sinal recebido vai ficar distorcida visto que os pontos depois de usar a FFT não vão corresponder às posições de cada subportadora. As soluções para este problema podiam passar por fazer uma nova amostragem do sinal por interpolação, mas isso ia introduzir grandes distorções. Existem várias soluções para este problema, como a utilização de outras transformadas, como a Chirp-Z Transform (CZT).

O próximo passo na recepção do sinal DVB-T é decodificar os símbolos Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Este processo passa por o cálculo inverso no espectro do sinal que foi realizado no transmissor, ou seja, se foi usado uma FFT no transmissor, para decodificar os símbolos OFDM usa-se uma Inverse Fast Fourier Transform (IFFT). É de notar que, como falado no parágrafo anterior, se a frequência de amostragem for diferente no transmissor e recetor, a FFT que é o mais comum, não pode ser usada. Ao invés, usa-se um método baseado na CZT, que não é abordado nesta dissertação, mas pode ser compreendido, tal como todo o processo de reconstrução do sinal direto para radares passivos no estudo Baczyk e Malanowski 2011.

De seguida, tem-se uma constelação do sinal direto reconstruído como na figura 4.7 e o próximo passo é a reprodução do sinal no domínio do tempo sem o efeito de *multipath*.

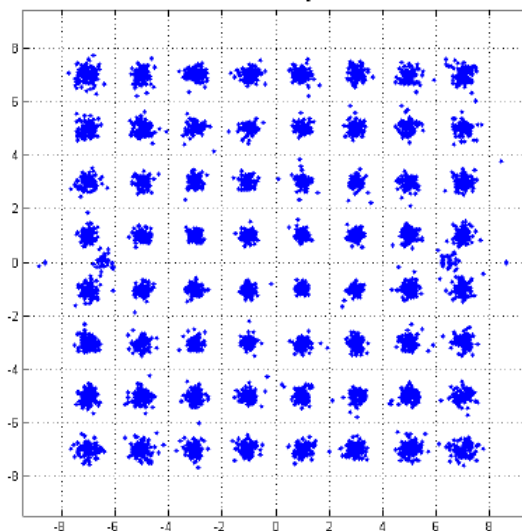


FIGURA 4.7: Constelação 64QAM (Figura 3.4 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

Equalização do sinal direto

Em adição à remoção do efeito *multipath* com a reconstrução do sinal direto, é possível equalizar o sinal de forma a remover picos espúrios formados na função de ambiguidade como representados na figura 4.8 relativamente a sinais DVB-T.

Um algoritmo eficiente para remover estes picos espúrios passa por estimar tanto para o sinal direto S_{ref} como para um sinal, neste caso DVB-T, gerado localmente uma função de *Power Spectrum Density* (*PSD*) e, equalizar através de uma função de filtragem H que posteriormente, é multiplicada com a transformada do

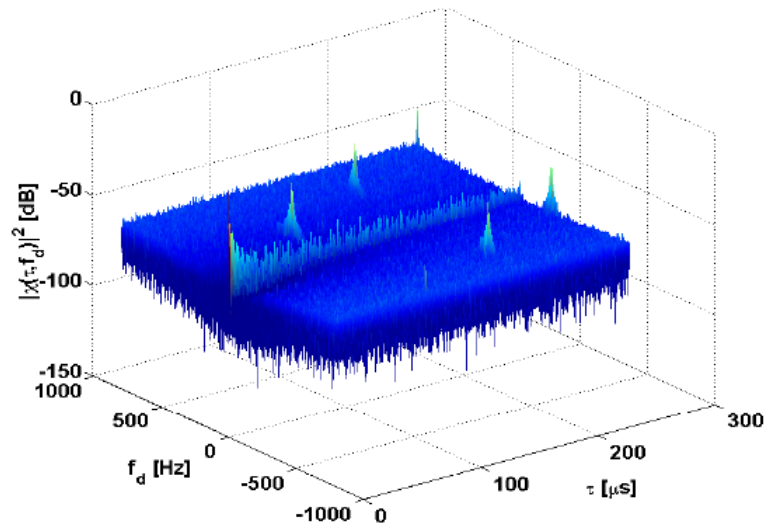


FIGURA 4.8: Função de ambiguidade - Sinal DVB-T - Presença de picos espúrios (Figura 3.5 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

signal direto S_{ref} . De seguida é aplicada a IFFT de forma a gerar um sinal direto mais limpo. Um esquema de blocos do algoritmo está representado na figura 4.9.

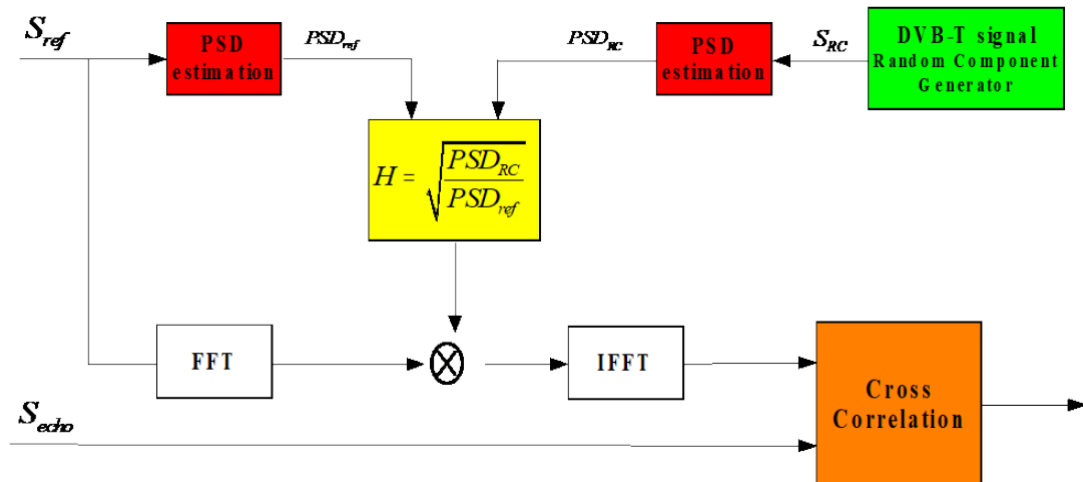


FIGURA 4.9: Diagrama de blocos - Algoritmo de equalização (Figura 3.6 Marco Martorella e Fabrizio Berizzi s.d.)

4.2 Simulação

4.2.1 Sinais DVB-T

4.3 Bases de Dados

4.3.1 Formação de Imagem

Capítulo 5

Aplicação

5.1 Sistema Desenvolvido

5.2 Resultados

Capítulo 6

Conclusões e Discussão

6.1 Sumário

6.2 Discussão e Conclusões

6.3 Cenários Possíveis - MARINHA

Conclusão

A conclusão segue-se ao corpo principal dos capítulos que constituem o trabalho, realçando, de forma resumida e nos aspetos mais relevantes, os passos seguidos e os resultados obtidos (mas evitando fazer um resumo que repita aspetos do corpo). Devem expor-se as dificuldades e limitações sentidas, sobretudo se as mesmas limitaram a investigação e prejudicaram o alcançar dos resultados propostos na introdução.

E, de igual modo, se a investigação desenvolvida mostrou novas vias de trabalho que não puderam ser desenvolvidas, devem evidenciar-se os caminhos que foram abertos, avançando com sugestões e propostas para trabalhos futuros que deem continuidade ao projeto presente.

Bibliografia

- Baczyk, Marcin e Mateusz Malanowski (2011). «Reconstruction of the reference signal in DVB-T-based passive radar». Em: *International Journal of Electronics and Telecommunications* 57.1, pp. 43–48. ISSN: 20818491. DOI: 10.2478/v10177-011-0006-y.
- Baker, Prof Christopher (2019). «PCL Waveforms». Em: pp. 1–16.
- Balanis, Constantine (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th. New Jersey: John Wiley & Sons, pp. 1–1072. ISBN: 9789896540821. DOI: 10.2307/j.ctvfxvc64.18.
- Griffiths, H.D. e C.J. Baker (2005). «Passive coherent location radar systems.» Em: *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation* 152.4, pp. 153–159. ISSN: <null>. DOI: 10.1049/ip-rsn. URL: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-rsn%7B%5C_%7D20010473.
- Griffiths, Hugh e Christopher J. Baker (2017). *An introduction to passive radar*.
- IEEE (1997). *The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms*. 6th. New York.
- Jeske, Daniel R. e Ashwin Sampath (2004). «Signal-to-interference-plus-noise ratio estimation for wireless communication systems: Methods and analysis». Em: *Naval Research Logistics* 51.5, pp. 720–740. ISSN: 0894069X. DOI: 10.1002/nav.20022.
- Kraus, John D- (1988). *Antennas*. Ed. por McGraw-Hill. 2nd. New Delhi.
- Martorella, Marco e Fabrizio Berizzi (s.d.). «PCL Detection Fundamentals». Em: (), pp. 1–19.
- Pető, Tamás e Rudolf Seller (2018). «Adaptive Clutter Cancellation Techniques for Passive Radars». Em: *Topics in Radar Signal Processing*. DOI: 10.5772/intechopen.71289.
- Petri, D, C Moscardini, M Martorella, M Conti, A Capria e F Berizzi (2012). «Performance analysis of the batches algorithm for Range-Doppler map formation in passive bistatic radar». Em: *IET Conference Publications*. Vol. 2012. 603 CP, pp. 1–4. ISBN: 9781849196765. DOI: 10.1049/cp.2012.1570.
- Willis (2005). *Bistatic Radar*. 2nd. Scitech. ISBN: 1891121456. DOI: 10.1049/sbra003e.

Y. Rahmat-Samii, L. I. Williams e R. G. Yoccarino (1995). «The UCLA Bi-polar Planar-Near-Field Antenna Measurement and Diagnostics Range». Em: *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, Vol. 37, No. 6.

Apêndice A

Escreve o título do apêndice

As dissertações e outros trabalhos científicos podem conter apêndices ou anexos onde são expostos documentos ou outros materiais que tenham sido usados durante o trabalho, sendo imprescindível que se juntem a ele, mas que, pelo volume, não devem ser introduzidos com o texto por perturbarem a sua harmonia e lógica. São, desta forma, colocados enquanto elemento pós-textual, logo a seguir aos glossários (se existirem) ou à bibliografia. Importa, contudo, compreender o que os distingue um do outro.

Os Apêndices englobam materiais elaborados pelo autor, como conjuntos de gráficos, quadros ou tabelas de dados, eventualmente, traduções de textos, organogramas ou esquemas julgados necessários e referenciados no próprio texto.

Anexo I

Escreve o título do anexo

Os Anexos são conjuntos de documentos não elaborados pelo autor do trabalho, mas que serviram para a sua elaboração e facilitam a sua compreensão. Podem ser, igualmente, tabelas, quadros, gráficos ou organogramas retirados de outros autores e obras, mas também textos diversos ou imagens.