



TÉCNICO LISBOA

Guerra Eletrónica

Pedro Afonso 66277 João Manito 73096 Daniel de Schiffart 81479

Sistemas Aviônicos Integrados

Dezembro de 2018

Conteúdo

1 Introdução

2 História

3 Ataque Eletrónico

4 Protecção Electrónica

5 Suporte Electrónico de Guerra

Introdução

Nesta apresentação vamos discutir

- A definição de guerra eletrónica
- A história e desenvolvimentos da guerra electrónica no combate aéreo
- Sistemas actuais de Ataque, Protecção e Suporte Electrónico em combate aéreo

História

- Os primeiros incidentes ocorreram na guerra civil americana.
- Soldados do exército confederado cortavam linhas de telégrafo das forças da união.

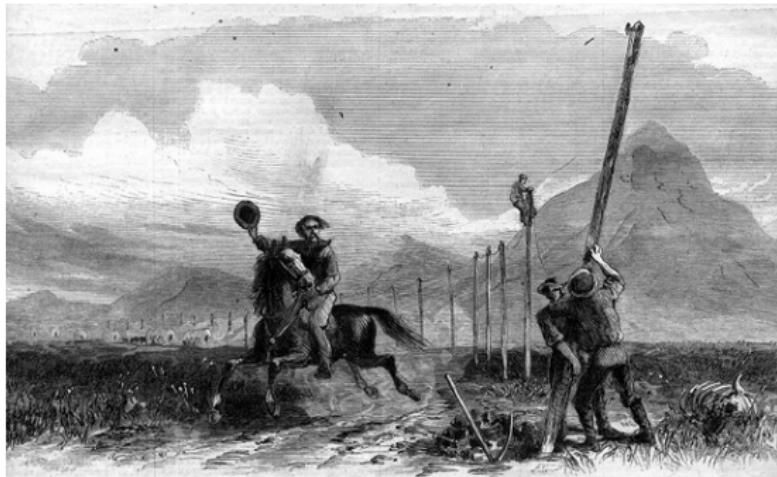


Figura 1: As primeiras linhas de telégrafo a serem construídas nos Estados Unidos [4].

Primeiro jamming de rádio

- Com o aparecimento de sistemas de comunicação de rádio apareceu o *jamming* intencional.
- Numa corrida de iates da *America's Cup*, um iate utilizou um transmissor mais potente para transmitir informação à imprensa para maior atenção e lucro.
- Foi a primeira instância de *jamming* conhecida.



Figura 2: Corridas de iates americanos testemunharam o primeiro jamming de rádio [2].

Implementação militar

- Os primeiros usos de *jamming* de rádio militar foram treinadas pelo Reino Unido em 1902 e pelos Estados Unidos em 1903.
- As primeiras aplicações ocorreram na marinha.
- A guerra Russo-Japonesa entre 1904 e 1905 teve o primeiro grande uso de *jamming* militar.
 - Foi a primeira grande guerra onde ambas as partes utilizavam rádio para comunicações.

Primeira Guerra Mundial

- Comunicação por rádio na guerra manteve-se bastante primitiva.
- O pouco treino e hábito dos sistemas levou a pouco uso eficiente de *jamming*.
- Ocorria bastante *jamming* accidental entre forças aliadas devido a demasiadas transmissões num espaço reduzido.



Figura 3: Primeiros aparelhos de rádio usados na Primeira Guerra Mundial [1].

Período Entre Guerras

No período após a Primeira Guerra Mundial, o potencial do rádio foi percebido e o desenvolvimento rápido.

- Transmissores diminuíram de tamanho e peso;
- A sua performance melhorou;
- A educação da população aumentou.

Estes fenómenos levaram a uma melhoria dos sistemas de comunicação entre terra, mar e ar.

Radar

Este período também viu o surgimento do radar.

- No início dos anos 1930, os radares conseguiam detetar alvos a 30 quilómetros.
- No fim da década, os radares aumentavam os seus alcances para mais de 160 quilómetros.
 - O fator principal tornava-se a curvatura da Terra.
- Também começavam a correr testes de *jamming* de radar.



Figura 4: Um transmissor-recetor de radar [5].

Segunda Guerra Mundial

O rádio e os radares eram cada vez mais utilizados pelas forças armadas dos países europeus.

- A paragem de comunicação do inimigo teria cada vez mais importância no cenário da guerra.
- Rapidamente, a guerra tornou-se numa guerra de contra-medidas e contra-contra-medidas.

Battle Of The Beams

Um cenário que ilustra esta natureza da guerra eletrónica é o período do *Battle Of The Beams* entre a Alemanha e o Reino Unido.

- A Alemanha fez extensivo uso de radares para voar no escuro.
- Os radares utilizados serviam como um sistema de navegação primitivo.
- As forças aliadas foram apanhadas desprevenidas por bombardeamentos noturnos.

A primeira fase deste período viu os alemães utilizarem uma variante do radar Lorenz.

- Este radar utiliza dois feixes para alinhar um avião com uma pista de aterragem.
- Os feixes apresentam características diferentes.
- Isto permite o piloto aterrinar com segurança.

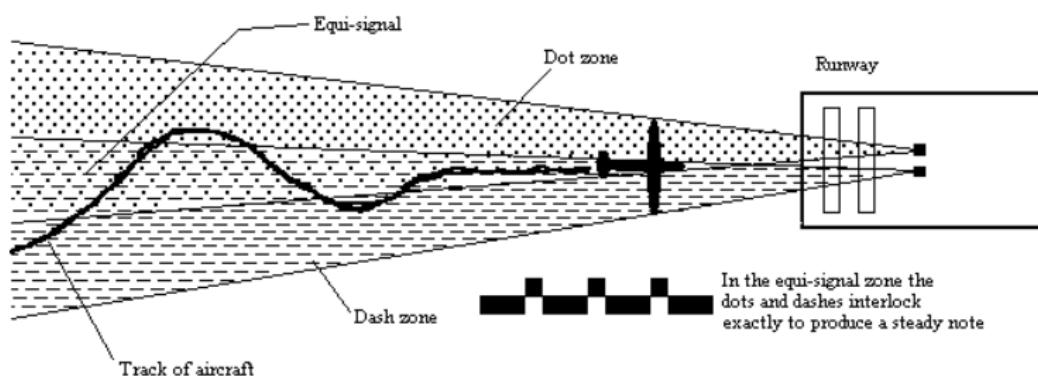


Figura 5: Funcionamento do radar Lorenz [3].

- Os dois radares foram utilizados pelos alemães para encontrar o alvo.
- Os britânicos redirecionaram os feixes de radar e emitiram réplicas próprias para desorientar os pilotos alemães.
- Isto causou despistes alemães e alguns pilotos até aterraram em solo inglês pensando que era a Alemanha.



Figura 6: Mapa do uso do Knickebein nos bombeamentos em Derby.

Desenvolvimentos seguintes

- As forças alemães desenvolveram novos sistemas de navegação via radar para combater a intervenção dos ingleses.
- Isto levou ao desenvolvimento dos radares X-Gerät e mais tarde Y-Gerät.
- A captura de aviões contendo esta tecnologia permitiu às forças inglesas bloquear as frequências utilizadas e impedir o uso destes radares.
- Este período terminou quando a força aérea alemã divergiu a sua atenção para a frente soviética.
- A *Battle Of The Beams* ilustrou a natureza ataque-contra-ataque da guerra eletrónica.

Fim da Segunda Guerra Mundial

O fim da Segunda Guerra Mundial também viu o desenvolvimento e adopção de *chaff*.

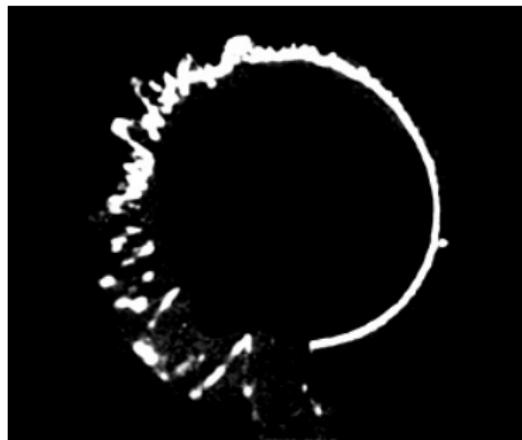


Figura 7: Exemplo de *chaff* num display de radar.

O uso de guerra eletrónica na frente do Pacífico também viu o uso de bastante *jamming*, mas pouco desenvolvimento.

- O período do pós-guerra viu muitas nações a considerarem a relevância do radar no campo de batalha.
- Começaram a ser definidos departamentos e oficiais dedicados à guerra eletrónica.
- Este período também viu o aparecimento primitivo do sector de **stealth**, o desenvolvimento de tecnologia para evitar deteção por radares anti-aéreos.
- O primeiro míssil auto-guiado *surface-to-air* foi desenvolvido neste período inicial.
 - Este levou ao desenvolvimento dos primeiros sistemas de *jamming* de mísseis.

Início da Guerra Fria

- O início da guerra fria viu o confronto de inteligência entre os Estados Unidos da América e a União Soviética.
- Embora não houvesse confronto direto, ambas as partes faziam missões para obtenção de inteligência no inimigo.
- Com o risco de descoberta ser poder levar a resposta aprontada do inimigo, as missões eram realizadas com discreção extrema.
- Este período viu um investimento em tecnologia de obtenção de inteligência.

Missões ELINT

- As missões de obtenção de inteligência electrónica dos Estados Unidos começaram por esta altura.
- Utilizando aeronaves como o *Lockheed U-2* obtiam informações sobre radares e sistemas de comunicação da União Soviética evitando deteção.

Informações como

- Frequência de pulsação;
- Intervalo de tempo;
- Velocidade de scanning;
- Direcção de scanning;
- Localização de radares.



Figura 8: O *Lockheed U-2* utilizado pelos Estados Unidos.

As missões terminaram quando um avião foi alvejado após detecção por tecnologia nova da União Soviética.

A Guerra do Vietname

- O envolvimento dos Estados Unidos na guerra do Vietname implicou um grande progresso na evolução.
 - A grande quantidade de baixas sofridas devido a armamentos anti-aéreos levou ao estudo de armamento anti-radar.

Os Wild Weasels



Figura 9: A cauda de um F-16 Wild Weasel.

- Aviões começaram a ser equipados com mísseis que seguem sinais de radares, para destruir zonas mais fortificadas.
- Estes aviões foram denominados *Wild Weasels*, que escoltavam aviões de artilharia pesada e protegiam-nos dos armamentos anti-aéreos terrestres.
- Esta combinação possibilitou o domínio aéreo e a invasão de zonas fortificadas nos terrenos vietnamitas.

Guerra do Golfo

A guerra no Golfo Persa em 1990 e 1991 iniciou a era moderna da guerra eletrónica.

- As forças da coalção concentraram o seu poder de fogo nas estruturas de comunicação, deteção e armamento anti-aéreo para debilitar a força eletrónica do exército iraquiano.
- Rapidamente se criou um domínio aéreo sobre a região que acabou por decidir o resultado da guerra.

Inovações da Guerra do Golfo

A guerra trouxe várias tecnologias de guerra eletrónica para o campo de batalha.

- Reunião de inteligência foi feita por aviões *stealth*, indetectáveis ao radar inimigo.
- A utilização de *decoys* afetou a deteção dos radares e permitiu a entrada de artilharia aérea pesada sem perigo.
- A destruição de radares facilitou a invasão de tropas terrestres.

Ataque Eletrônico

Ataque Electrónico (AE) - Jamming

- Mudando as características elétricas e magnéticas do ambiente;
- Reduzindo a detectibilidade no radar e detectibilidade térmica da aeronave;
- Nos dias actuais, o significado básico de ataque electrónico é o uso de vários sinais Jamming que afectam directamente os sistemas electrónicos na banda de radio frequênciа.

Ataque Electrónico (AE) - Jamming

Jammer constituído por:

- Sistemas de controlo e suporte;
- Um subsistema que produz sinais de Jamming;
- Amplificadores de alta frequência e geradores com moduladores;
- Dispositivos de Antena.

Jammer automático

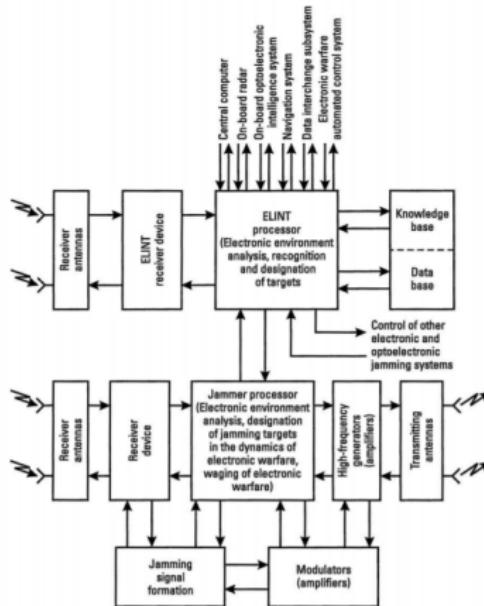


Figura 11: Diagrama de blocos para um Jammer automático

Jamming

Tipos de Jamming:

- Destruutivo;
- Dissimulação;
- Ilusão.

Jamming destrutivo

- Potência da emissão de Jamming

$$P_{rec} = \frac{P_j G_j}{4\pi D_j^2} A_{rec} \gamma_j \eta_j$$

- Gama dinâmica limitada de receptores

$$K_{drr} = \frac{P_{recmax}}{P_{recmin}}$$

P_{recmin} - limite de sensibilidade , D_j - distância do jammer ao alvo, K_{drr} - gama dinâmica do receptor P_{recmax} - Potência radiada requerida para causar uma sobrecarga dinâmica

- Nível táctico - Destruição das defesas Anti-Aéreas num ataque;
- Nível Operacional - Simular dano nas defesas de forma a criar uma ilusão ao inimigo que realiza um ataque.

Jamming

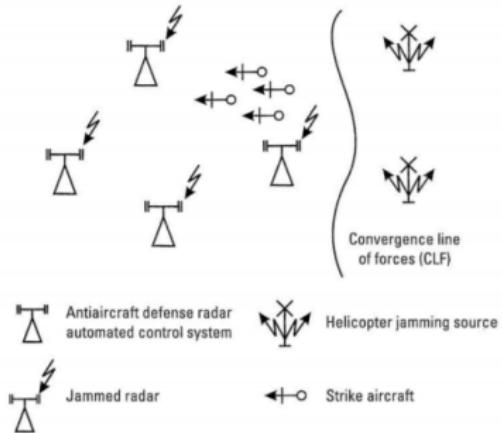


Figura 12: Métodos de ocultação de aviões (helicópteros) e outros alvos de áreas fixas usando jamming

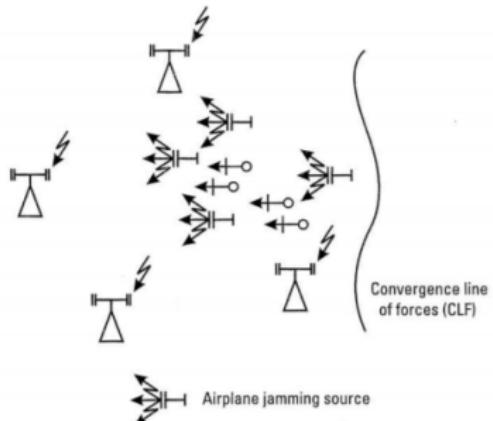


Figura 13: Métodos de ocultação de aviões em formação de batalha usando jamming.

Protecção Electrónica

Protecção Electrónica (PE)

- Negar o efeito do jamming inimigo, mantendo capacidades operacionais aliadas;
- Ciclo contínuo de AE \Rightarrow PE \Rightarrow AE
- Vários métodos em uso, entre eles:
 - Compressão de pulso
 - Espectro de difusão em frequência variável
 - Anulamento de lóbulo secundário
 - Polarização
 - Chaff
 - Direcccionamento por radiação

Compressão de pulso

Exemplo: Radar de pulso

- Pulso sinusoidal de período T
- $SNR = \frac{K^2 A^2 T}{\sigma^2}$
- $\Delta R = \frac{1}{2} c \Delta T$
- Como reduzir efeitos de *jamming*?
 - Aumento do período do pulso
 - Maior SNR
 - Aumento da energia, diminuição da resolução de distância



Figura 14: Jammer militar Krasukha-2

Compressão de pulso

Modulação linear em frequência do pulso - *chirping*

- Modulação em torno da frequência da portadora, f_0
- Banda de modulação Δf
- Correlação centrada em $t = 0$, aproximadamente função *sinc*

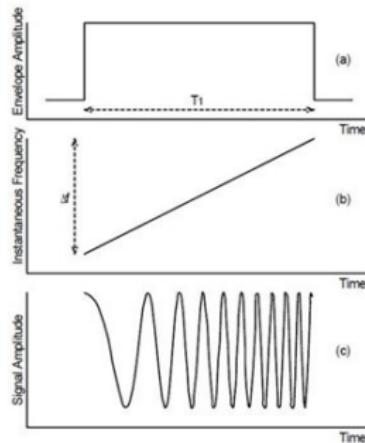


Figura 15: Modulação do pulso em frequência - *chirping*

Compressão de pulso

Modulação linear em frequência do pulso - *chirping*

- Duração do pulso: $T' = \frac{1}{\Delta f}$
- Para certos valores de Δt , $T \geq T' \Rightarrow$ compressão
- Relação entre potências: $P' = P \times \frac{T}{T'}$

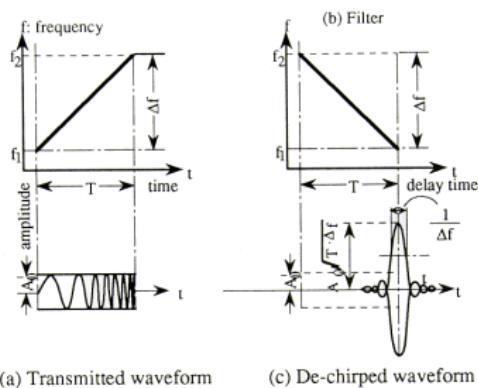


Figura 16: Pulso e sinal de eco desmodulado

Espectro de difusão em frequência variável

- Mudança da frequência de operação ao longo do tempo;
- Sincronia usando códigos pseudoaleatórios

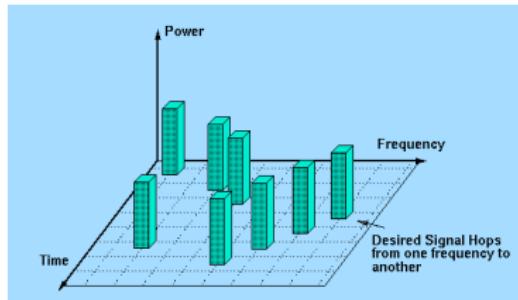


Figura 17: Exemplo de variação da frequência no tempo

Espectro de difusão em frequência variável

- *Jammers* necessitam de cobrir um espectro de frequências maior
- Menos potência de transmissão disponível para frequências específicas
- Redução da capacidade de *jamming* dos sinais

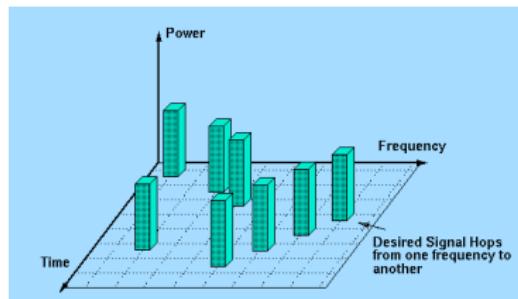


Figura 18: Exemplo de variação da frequência no tempo

Anulamento de lóbulo secundário

- Antenas direcionais apresentam padrões de radiação com lóbulos secundários
- Potencial de *jamming*
- Redução da capacidade de *jamming* dos sinais

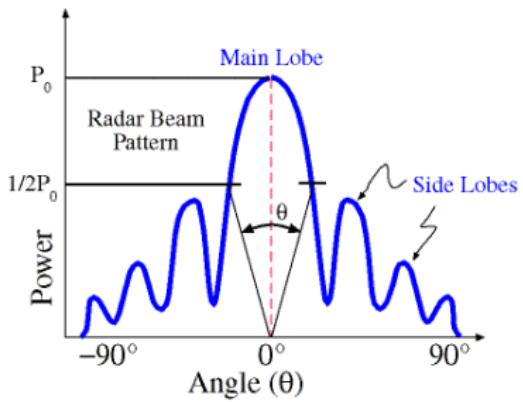


Figura 19: Padrão de radiação de uma antena de radar

Anulamento de lóbulo secundário

Solução: Utilização de uma antena secundária omnidireccional

- Ganho do receptor secundário superior ao ganho dos lobulos secundários
- Comparação de intensidades de sinal
- Receptor secundário com sinal superior à antena principal \Rightarrow lobulos secundários em recepção
- Minimização significativa de sinais fora do eixo da antena

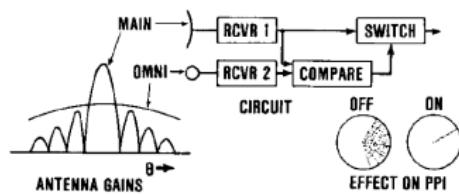


Figura 20: Esquema de funcionamento de anulamento de lóbulo secundário

Polarização

- Ondas transmitidas são polarizadas
- Necessário igualar polarizações para recepção óptima

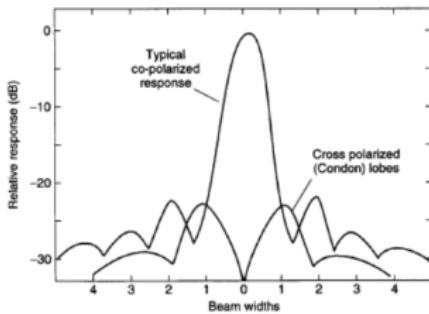


Figura 21: Resposta de uma antena parabólica a ondas polarizadas

Polarização

Jammer com uma única polarização

- Solução simples: duas antenas com polarizações diferentes
- Apenas uma das antenas recebe interferência

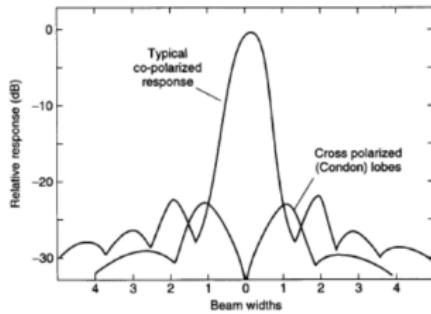


Figura 22: Resposta de uma antena parabólica a ondas polarizadas

Chaff

- Pequenas peças de metal espalhadas no ar
- Antenas de meio dipolo
- Método antigo mas eficaz



Figura 23: *Chaff* moderno

Chaff

- Cria ecos de radar quando iluminado
- Curta duração
- Permite mascarar aeronave de misseis, artilharia terrestre e outras aeronaves

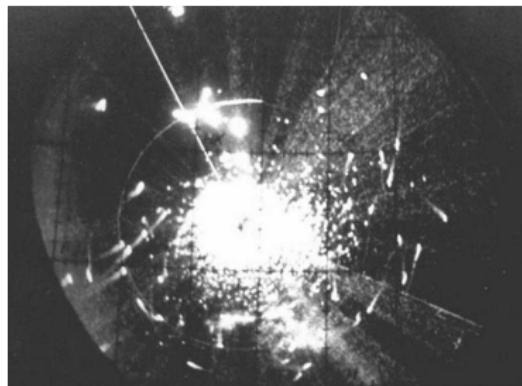


Figura 24: Eco de radar devido a uma núvem de *Chaff*

Direcccionamento por radiação

Usar sinais de *jamming* contra eles mesmos

- Detecção da localização de um sistema de *jamming* usando a radiação deste
- Direcccionamento de míssil contra a fonte de radiação
- Exemplo: usando supressão de lóbulo lateral
 - Detecção do sinal de *jamming*
 - Determinação do ângulo de chegada do sinal
 - *Lock-on* do míssil para a fonte da radiação



Figura 25: Míssil anti-radiação (ARM) AGM-88 HARM

Suporte Electrónico de Guerra

Suporte Electrónico de Guerra - Localização do alvo

- Sabendo a localização dos alvos, indica-nos a disposição das forças;
- Pode dar uma indicação do tipo de entidade numa localização particular, agrupando diferentes tipos de emissores.

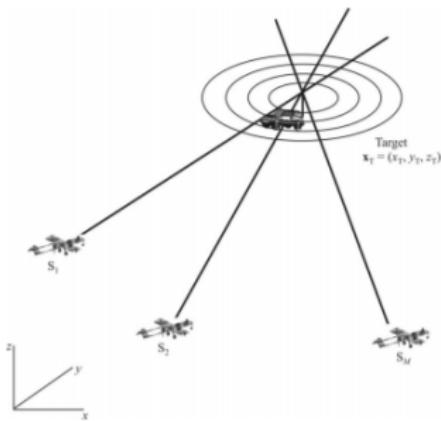


Figura 26: Intersecção das linha de direcção medidas - *Line of Bearing*

Suporte Electrónico de Guerra - Triangulação

- Pode ser implementada numa variedade de plataformas (aviões);
- Requer um aglomerado de Antenas;
- Fornece métodos para estimar o azimute dos ângulos de chegada dos sinais com base na medição da diferença de tempo de chegada ou diferença de fase dos sinais em duas antenas espaçadas a metade (ou menos) do comprimento de onda do sinal.

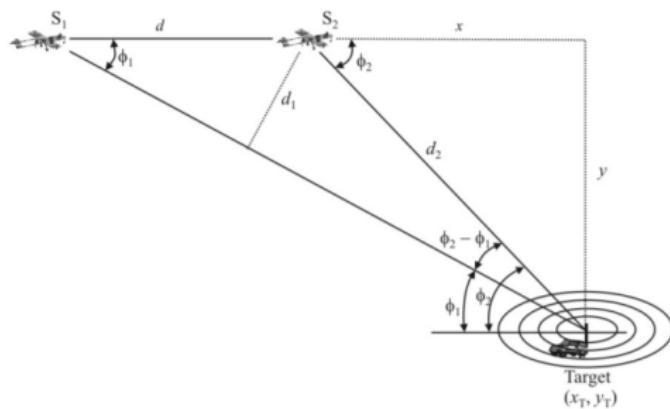


Figura 27: Relações Geométricas para o Ponto Fixo pela triangulação

Suporte Electrónico de Guerra - Triangulação

- $\sin \phi_1 = \frac{d_1}{d} \Rightarrow d_1 = d \sin \phi_1$
- $\sin \phi_2 - \phi_1 = \frac{d_1}{d_2} \Rightarrow d_2 = \frac{d_1}{\sin \phi_2 - \phi_1} \Rightarrow d_2 = \frac{d \sin \phi_1}{\sin \phi_2 - \phi_1}$
- As distâncias para o alvo ao sensor S_2 , x and y , podem ser obtidas:

$$x = d_2 \cos \phi_2$$

$$y = d_2 \sin \phi_2$$

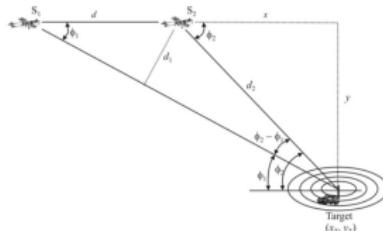


Figura 28: Relações Geométricas para o Ponto Fixo pela triangulação

Suporte Electrónico de Guerra - Triangulação

- Algoritmos disponíveis para o cálculo do Ponto fixo baseados nas técnicas de estimação do *LSE*;
- Estes princípios podem-se extender a 3 dimensões e ao uso de mais de 2 sensores.
- Desenhar as linhas de direcções medidas e observar directamente onde se cruzam é outra técnica de triangulação. Os sensores podem ser apenas um a mover-se ou três estacionários, como mostra a figura 29.

Suporte Electrónico de Guerra - Triangulação

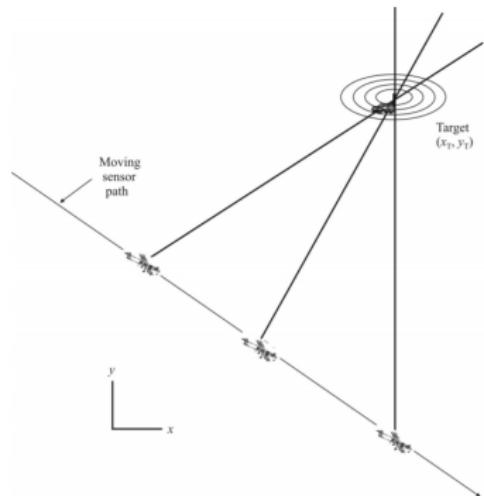


Figura 29: Triangulação

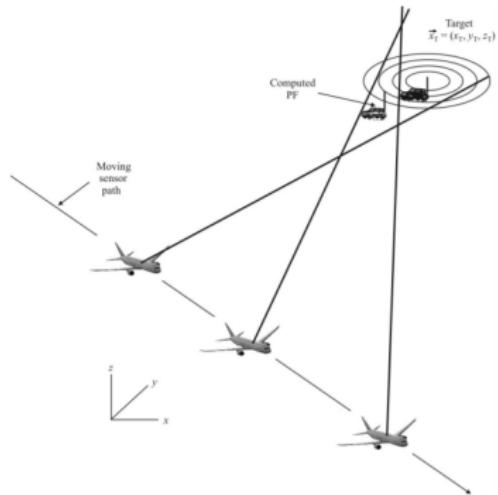


Figura 30: Erros aleatórios no cálculo do Ponto Fixo

Suporte Electrónico de Guerra - Triangulação

- Em geral os sinais são corrompidos por erros de medição e ruído (Branco Gaussiano de zero de média);
- Se o ruído for aleatório, a linha de direcções medida poderá ser maior ou menor do que a actual, resultando na elipse de erro;
- Os sensores podem exibir *bias*.

Localização do alvo - Triangulação

- Três métodos não estatísticos para estimar a localização do alvo dado um triângulos, figura 31

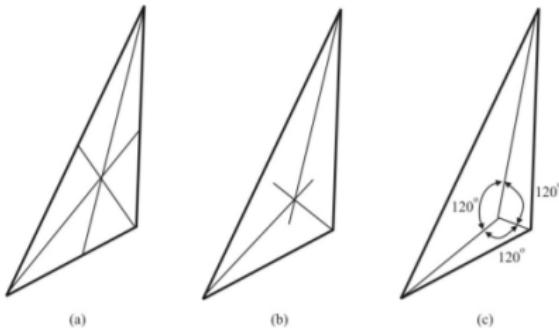


Figura 31: Cálculos de Ponto Fixo não estatísticos com só três linhas de direcção. (a) intersecção das médias (b) intersecção dos ângulos bissectores e (c) Ponto Steiner (definido pelo ponto onde os ângulos entre as linhas de direcção que vêm dos cantos são todas 120°). Todos eles são métodos para estimar o centroide do triângulo.

Métodos de Optimização de localização do Ponto fixo

- Baseados na minimização do erro entre o valor estimado e o Ponto Fixo;
- Generalizações do algoritmo da estimação dos mínimos quadrados.
- Estimação total dos mínimos quadrados - permite a existência de ruído nas medições;
- Estimação do Pesos dos Mínimos Quadrados - Matriz dos Pesos $W_k \neq I$

Triangulação - Métodos de Optimização

- Estimação do Pesos dos Mínimos Quadrados - Matriz dos Pesos $W_k \neq I$
- Algoritmo de triangulação dos Mínimos quadrados do Brown, figura 32.

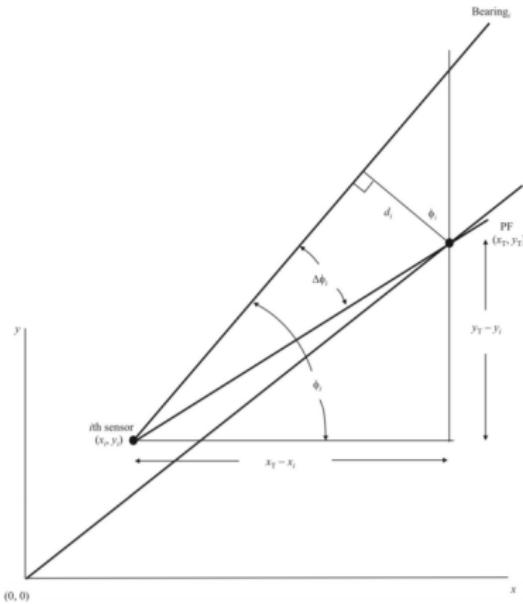


Figura 32: Definição dos termos de derivação do algoritmo do método dos mínimos quadrados de Brown

Triangulação - Métodos de Optimização

- Algoritmo de Estimação do Erro dos mínimos quadrados Hemisférico - A medição da linha de direcção a partir de um sensor ϕ_i projectada na superfície da Terra no hemisfério Norte

-

$$\cos \phi_i = \frac{y_t - y_i}{\sqrt{(y_T - y_i)^2 + (x_T - x_i)^2}}$$

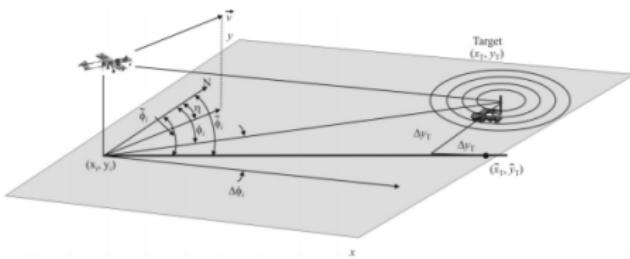


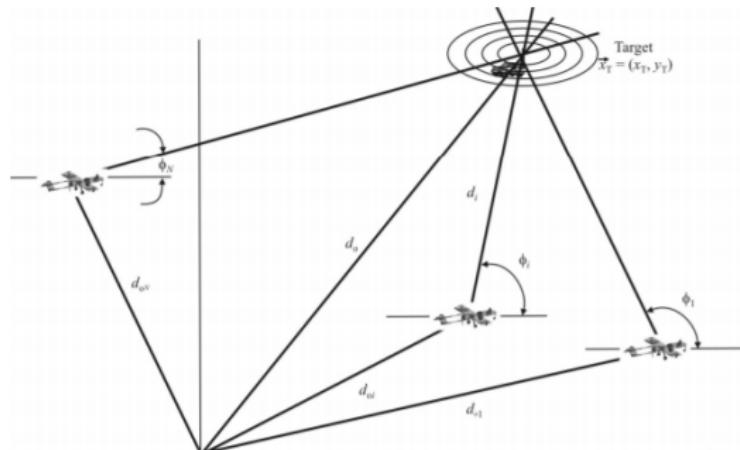
Figura 33: Geometria para o hemisférico calculado pelos mínimos quadrados

Triangulação - Métodos de Optimização

- Algoritmos da Estimação Mínimos Quadrados Pages-Zamora baseado nos requisitos de telemóvel impostos pelo *Federal Communications Committee* nos Estados Unidos da América.

- $$\vec{d}_0 = d_{oi} + \vec{d}_i v_i$$

- $$x_T = x_i + d_{oi} \cos \phi_i$$
$$y_T = y_i + d_{oi} \sin \phi_i$$



Triangulação - Métodos de Optimização

- Método da Estimação dos mínimos quadrados total - obtém-se elevando ao quadrado a equação do do método de Estimação dos mínimos quadrados Hemisférico:
-

$$\cos \phi_i^2 = \frac{(x_t - x_i)^2}{(y_T - y_i)^2 + (x_T - x_i)^2}$$

Triangulação - Métodos de Optimização

- O filtro de Kalman pode também ser aplicado na estimação do ponto fixo;
- No caso da aplicação filtro de Kalman padrão, os resultados são óptimos no método dos mínimos quadrados relativamente aos erros.

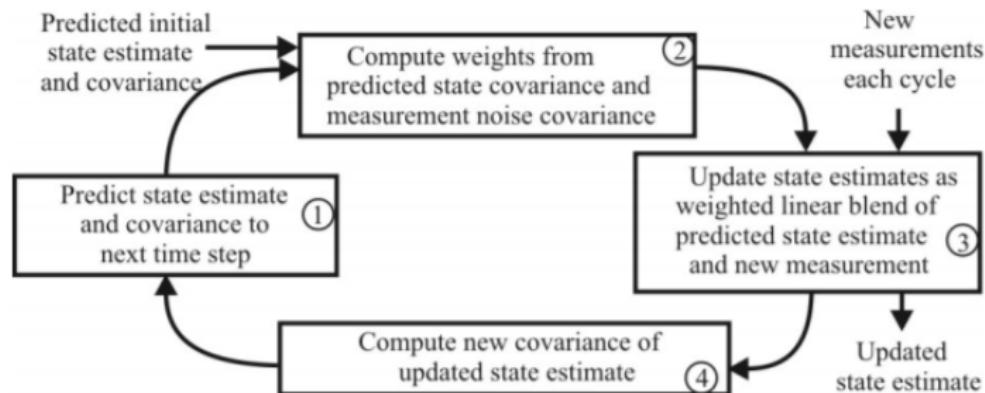


Figura 35: Algoritmo do filtro de Kalman

Triangulação - Métodos de Optimização

- A Extenção do filtro de Kalman resulta na aplicação do filtro de Kalman em sistemas não lineares com ruído aditivo Branco Gaussiano linearizando a não linearidade;
- Problema na convergência para uma estimativa razoável. Por exemplo, se a tentativa inicial é pobre ou se o ruído é demasiado grande com influência na linearização que descreve o sistema.

Triangulação - Métodos de Optimização

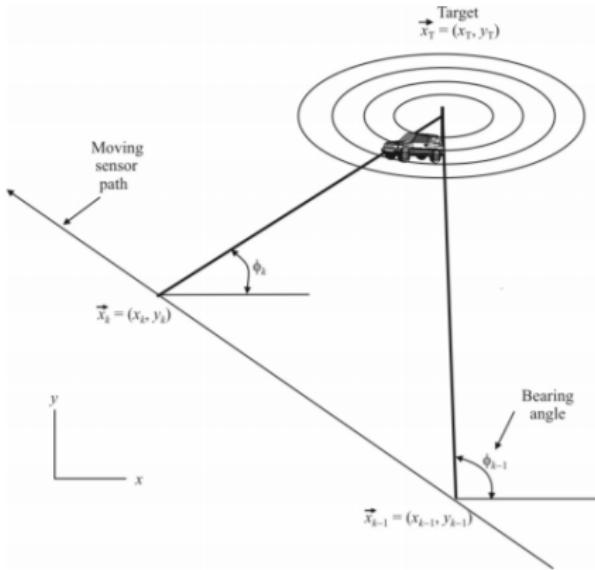


Figura 36: Geometria para o Filtro de Kalman Estendido na análise do ponto fixo

Referências

- [1] *4 Technologies invented in World War One that we still use today.* URL:
<https://www.worldwar1centennial.org/index.php/communicate/press-media/wwi-centennial-news/1420-4-technologies-invented-in-world-war-1-that-we-still-use-today.html> (acedido em 17/12/2018).
- [2] *Early Radio – Wireless Telephone Apparatus 1907.* URL:
<http://earlyradio.blogspot.com/2012/07/wireless-telephone-apparatus-1907.html> (acedido em 17/12/2018).
- [3] *Night Level-Bombing Navigation Tactics. Knickebein (crooked leg). Arsenal of Dictatorship.* URL:
<http://www.oocities.org/pentagon/2833/general/tactics/knickebein/knickebein.html> (acedido em 16/12/2018).
- [4] *Pony Express.* URL: <https://www.peachridgeglass.com/2012/02/old-telephone-poles> (acedido em 17/12/2018).
- [5] *Radar de proximidade do Aeroporto de Lisboa avariou.* URL:
<https://pplware.sapo.pt/informacao/radar-proximidade-do-aeroporto-lisboa-avariou/> (acedido em 17/12/2018).