



Homework 35 referente às aulas do Capítulo III de “Técnicas de Radar – ELC1149”, aulas disponibilizadas em <http://www.fccdecastro.com.br/download.html>.

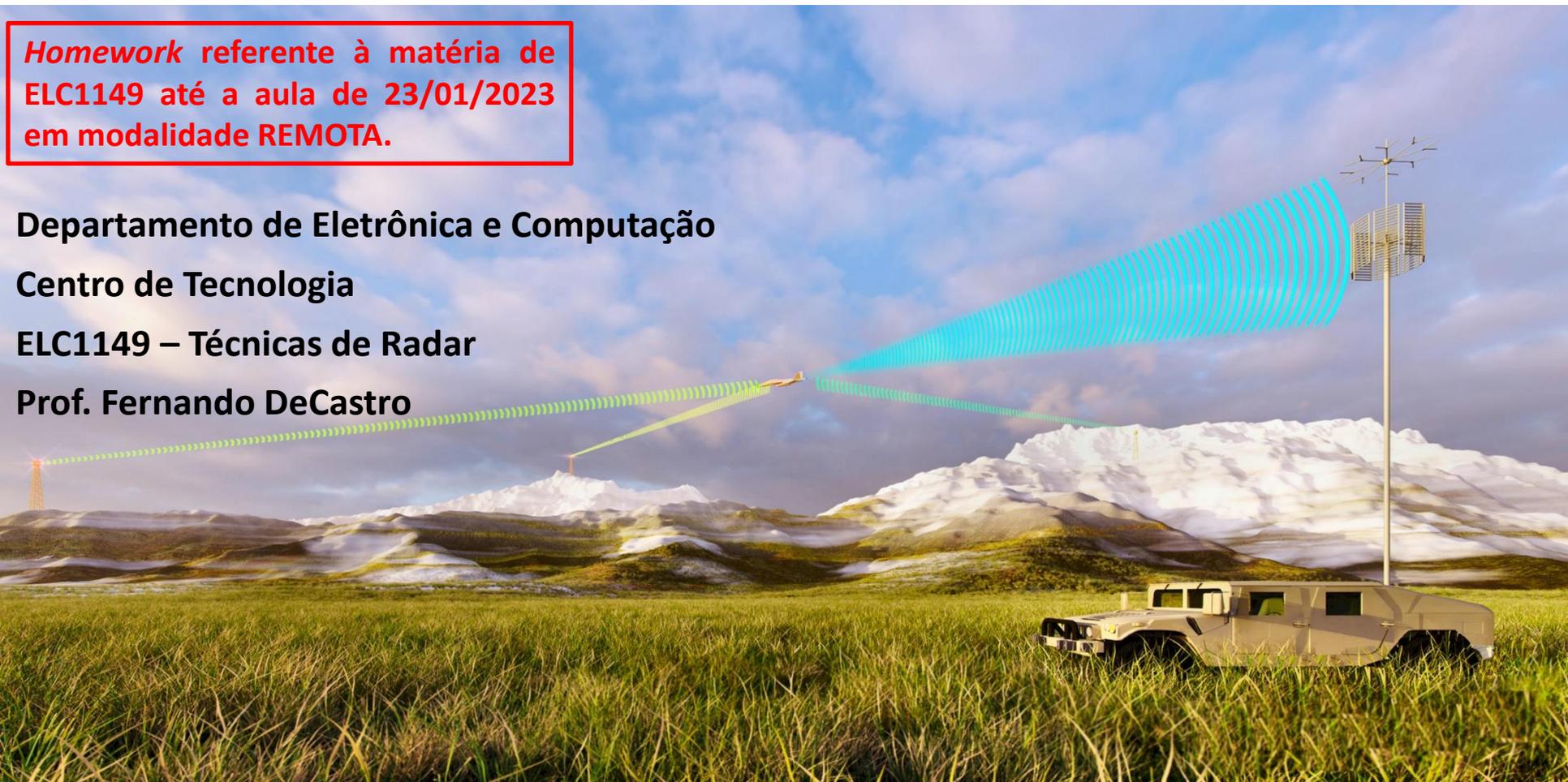
***Homework* referente à matéria de ELC1149 até a aula de 23/01/2023 em modalidade REMOTA.**

Departamento de Eletrônica e Computação

Centro de Tecnologia

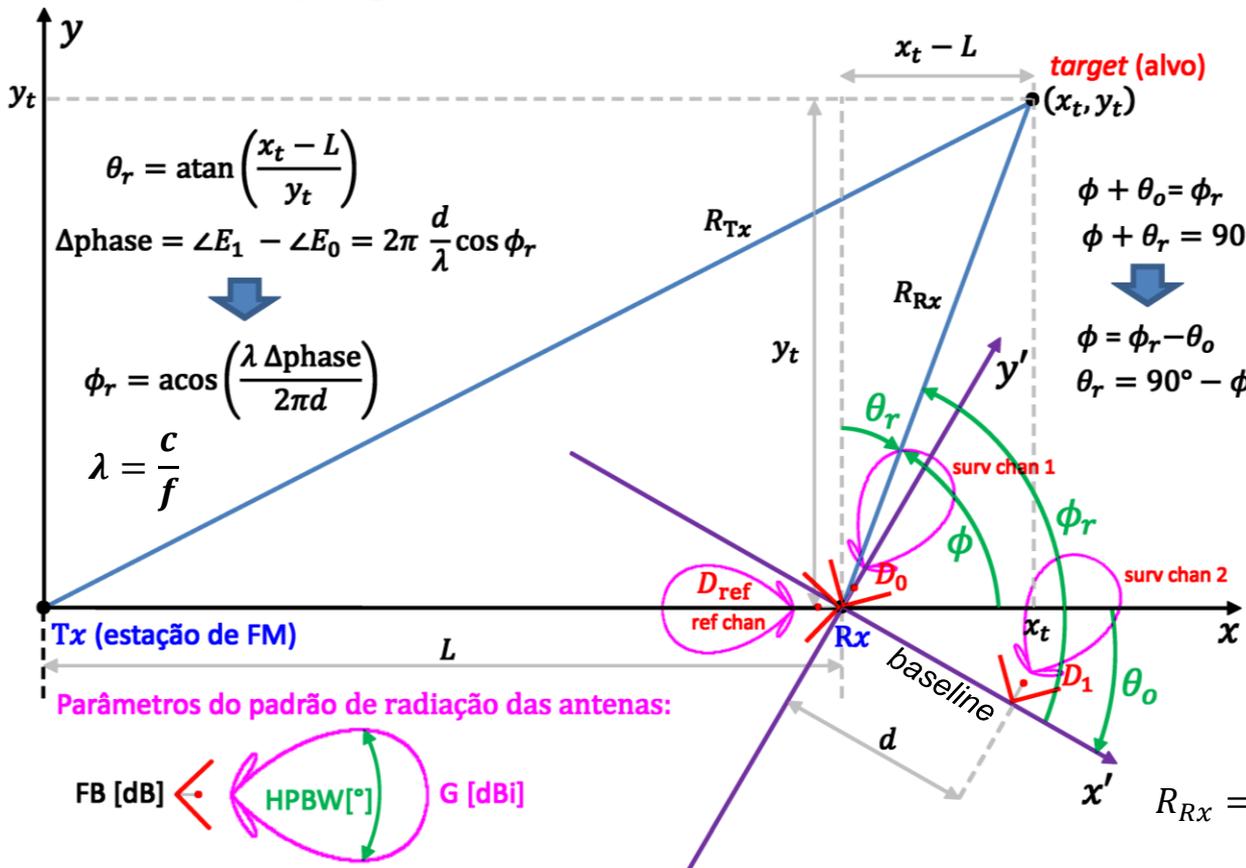
ELC1149 – Técnicas de Radar

Prof. Fernando DeCastro



Homework 35

Conforme descrito no Cap III.9 de Técnicas de Radar, a figura abaixo mostra a geometria e a equação para a determinação da distância R_{Rx} do alvo a partir do *range* bistático diferencial definido por $range = R_{Tx} + R_{Rx} - L$, sendo o valor de *range* determinado pelo algoritmo CFAR no processamento em banda-base efetuado em um PC, conforme mostram os diagramas de blocos nos slides 4 e 3 a seguir. O processamento em banda-base efetuado no PC é conforme mostrado no slide 4 e encontra-se descrito nos Cap III.5 ao Cap III.8 de Técnicas de Radar. Na figura e na equação que define R_{Rx} abaixo, L é a distância entre a antena da estação de FM e o centro de fase do *array* formado pelas antenas dos *surveillance channels* 1 e 2 (antenas D_0 e D_1 na figura abaixo). O ângulo ϕ_r de azimute do alvo é também determinado no processamento efetuado no PC, que, conforme descrito no Cap III.8 de Técnicas de Radar, determina ϕ_r por interferometria a partir do ângulo elétrico de diferença de fase Δ_{phase} entre os dois *streams* de símbolos IQ em banda-base que resultam respectivamente dos sinais captados pelas antenas D_0 e D_1 . Os sinais nos terminais de D_0 e D_1 são *down*-convertidos para banda-base por um RX SDR dual, conforme mostrado nos slides 3 e 4.



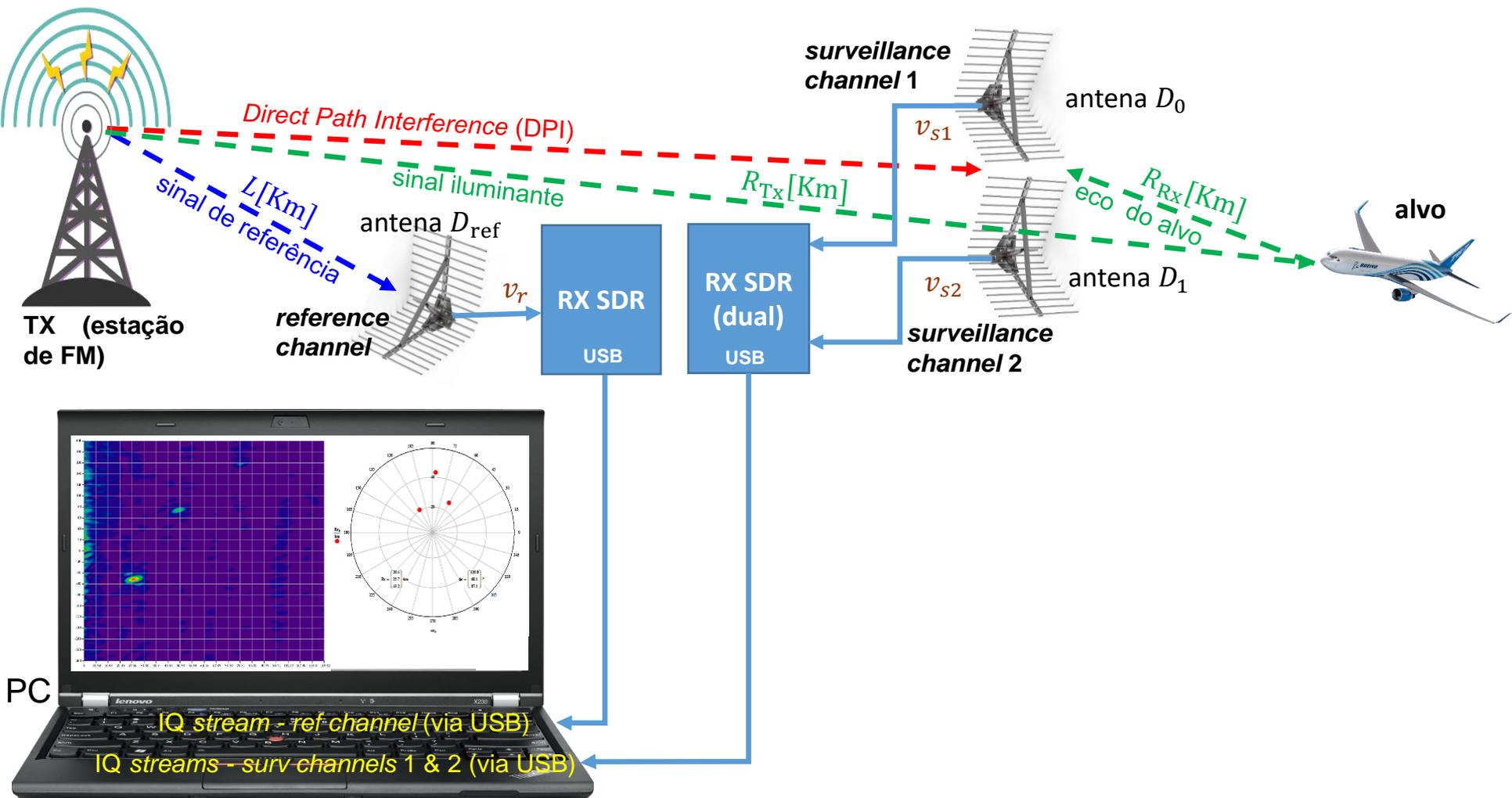
O sinal de referência captado pela antena D_{ref} é *down*-convertido em um *stream* de símbolos IQ de referência, em banda-base, operação que fica ao encargo de um RX SDR dedicado ao *reference channel*, conforme mostrado nos slides 3 e 4.

ϕ é o ângulo de azimute do alvo referido ao sistema cartesiano xyz .

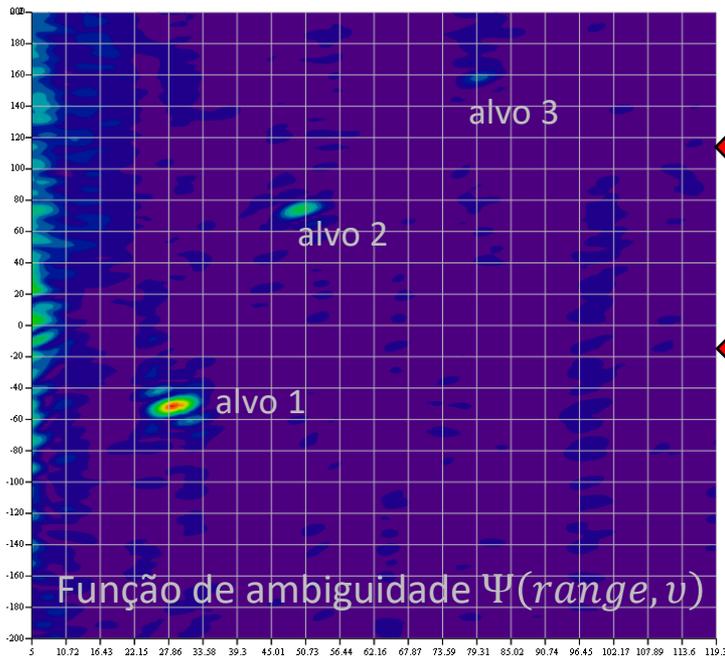
O ângulo θ_0 é o ângulo de rotação no plano xy , mecanicamente ajustável, e que controla o azimute da *baseline* de tamanho d do *array* formado pelas antenas D_0 e D_1 . O ângulo θ_0 é mecanicamente ajustado para minimizar o DPI, conforme discutido nos slides 28 e 29 do Cap III.4 de Técnicas de Radar.

$$R_{Rx} = \frac{(range + L)^2 - L^2}{2(range + L + L \sin(90^\circ - (\phi_r - \theta_0)))}$$

Diagrama de blocos do *Passive Bistatic Radar (PBR)* sob estudo



Doppler [Hz]



Range bistático diferencial [Km]

Constant False Alarm Rate (CFAR)

Supressão dos multiple hits

Localização dos alvos (range, azimuth)

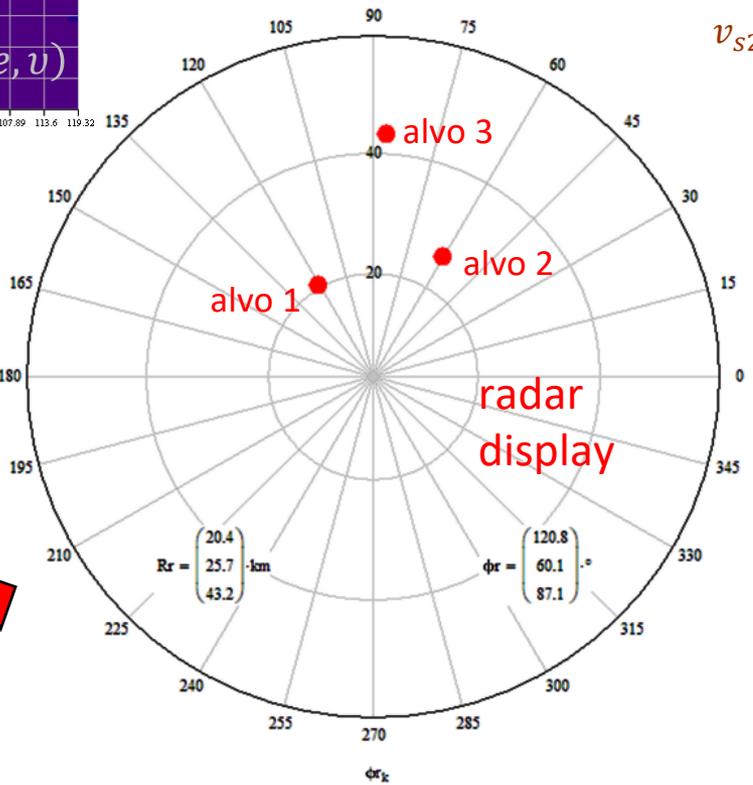
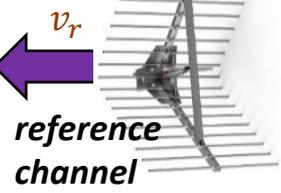
Homework 35

Supressão do Direct Path Interference (DPI)

RX SDR

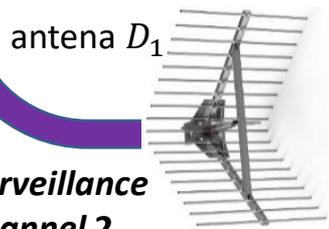
Processamento em banda-base efetuado no PC

RX SDR (dual)



v_{s2} v_{s1}

surveillance channel 1



surveillance channel 2

Homework 35

Seja então um radar PBR conforme discutido nos slides anteriores, operando na faixa de 88-108 MHz, em que o sinal que ilumina os alvos detectados pelo radar é a onda EM irradiada pelo TX de uma estação comercial de FM. A frequência e a potência ERP do TX de FM são $f = 105.1$ [MHz] e $P_{tx} = 100$ [Kw]. A distância entre TX e RX é $L = 25$ [Km]. O *stream* IQ resultante da onda EM do sinal de referência que incide na antena D_{ref} é idêntico ao *stream* IQ gerado com $N = 65536$ símbolos IQ e gravado em disco na solução do item (d) do Homework 33 (ver http://www.fccdecastro.com.br/HW/TR_2022-2_HW33.pdf).

As antenas D_0 , D_1 e D_{ref} operam na frequência f do TX de FM, apresentando ganho $G_{rx} = 12$ [dBi], impedância $R_r = 50$ [Ω] e FB = 35 [dB]. A distância entre os centros de fase das antenas D_0 e D_1 respectivas aos *surveillance channels* 1 e 2 é $d = 0.5\lambda$. O ângulo de rotação no plano xy entre os sistema cartesianos xyz e $x'y'z'$ é $\theta_0 = 30^\circ$ (θ_0 é o ângulo de rotação no plano xy que controla o azimute da *baseline* de tamanho d do *array* formado pelas antenas D_0 e D_1).

Três alvos são iluminados pela onda EM irradiada pela antena da estação de FM, conforme especificado na tabela abaixo, que são os mesmos alvos especificados no enunciado do Homework 34 (ver http://www.fccdecastro.com.br/HW/TR_2022-2_HW34.pdf). Os alvos estão em movimento e a tabela indica suas respectivas velocidades radiais em relação à localização geográfica onde situam-se antenas D_0 , D_1 e D_{ref} , que são consideradas serem co-localizadas. Uma velocidade radial negativa indica um alvo se afastando das antenas D_0 , D_1 e D_{ref} e uma velocidade radial positiva indica um alvo se aproximando das antenas D_0 , D_1 e D_{ref} .

| | Range bistático absoluto [Km] | Azimute ϕ do alvo [$^\circ$] | RCS [m^2] | Velocidade radial [Km/h] |
|---------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Alvo 1: | 40 | 95 | 80 | - 260 |
| Alvo 2: | 60 | 35 | 80 | 430 |
| Alvo 3: | 80 | 60 | 100 | 860 |

O blocos funcionais do processamento em banda-base efetuado no PC, conforme mostrado no slide 4, adotam os seguintes parâmetros:

A taxa de símbolos IQ em cada *stream* em banda-base (= frequência de amostragem do conversor A/D) é $SymbolRate = 250$ [KHz]. A relação sinal-ruído tanto no *reference channel* quanto nos *surveillance channels* 1 e 2 é $SNR = 35$ [dB].

Homework 35

Os dois filtros GAL (*Gradient Adaptive Lattice*) para minimização do DPI (*Direct Path Interference*) operam sob os seguintes parâmetros:

Ordem do filtro GAL: $M = 10$.

Constante do *single pole averaging filter* (que opera sobre os erros de predição quadráticos): $\beta = 0.95$.

Passo de adaptação dos coeficientes de reflexão do *lattice*: $\mu_{\text{GAL}} = 0.0004$.

Passo de adaptação do algoritmo NMLS que segue o *lattice* do GAL: $\mu_{\text{NLMS}} = 0.003$.

$\delta = 20$ e $\alpha = 1.0$.

O procedimento que implementa a função de ambiguidade $\Psi(\text{range}, \text{Doppler}F)$ opera sob os seguintes parâmetros:

Frequência mínima do desvio Doppler dos alvos: $\text{MinDoppler}F = -200$ [Hz].

Frequência máxima do desvio Doppler dos alvos: $\text{MaxDoppler}F = 200$ [Hz].

Número de frequências Doppler no domínio *DopplerF* da função Ψ : $\text{NumDoppler}F = 200$

Range mínimo dos alvos: $\text{MinRange} = 0$ [Km].

Range máximo dos alvos: $\text{MaxRange} = 100$ [Km].

Número de pontos de *range* no domínio *range* da função Ψ : $\text{NumRangePoints} = 200$

O algoritmo *Constant False Alarm Rate* (CFAR), especificamente o CFAR-CA-2D (CFAR *Cell Averaging* em duas dimensões), adota uma janela retangular de tamanho $\text{WindowSize} = 23$ e $\text{Threshold} = 4.0$.

Dica: O radar PBR descrito pelos parâmetros de configuração acima referidos, e o respectivo processamento em banda-base referido no diagrama de blocos do slide 4, têm a sua operação simulada bloco a bloco no *script* MathCad em [https://www.fccdecastro.com.br/HW/PBR Simulator_R3\(3 alvos\).zip](https://www.fccdecastro.com.br/HW/PBR Simulator_R3(3 alvos).zip) .

Pede-se:

(a) Plote a função de ambiguidade $\Psi(\text{range}, \text{Doppler}F)$ para o radar PBR que opera sob os parâmetros acima referidos.

(b) Plote o *display (scope)* deste radar PBR, mostrando os *blips* dos alvos e o valor numérico de suas respectivas coordenadas polares (R_{Rx}, ϕ_r) . Compare o quanto as coordenadas (R_{Rx}, ϕ_r) detectadas para os alvos se aproximam das coordenadas (R_{Rx}, ϕ_r) originalmente especificadas na solução do Homework 34.

(c) Desative os 2 filtros GAL (GAL_BYPASS:=1 no *script* MathCad referido em “**Dica**” acima) e refaça os itens (a) e (b). Analise comparativamente os resultados obtidos em (c) em relação aos resultados obtidos em (a) e (b).

Homework 35

(d) Considere um cenário operacional de guerra eletrônica com alta incidência de ecos de *clutter*, em que, adicionalmente ao problema do *clutter*, a facção inimiga utilize uma formação de aeronaves navegando em baixa altitude e baixa velocidade para efeito de reduzir a probabilidade de detecção pelo CFAR (helicópteros e drones, por exemplo). Nesta situação operacional, o desvio Doppler e a intensidade dos ecos destas aeronaves inimigas são quase os mesmos dos ecos do *clutter*. Suponha que o *range* bistático diferencial desta formação de aeronaves inimigas seja 20 [Km]. Qual o valor máximo da ordem M do filtro GAL adequado para este cenário operacional?

(e) Considere que um 4° alvo se fez presente no volume de interesse do radar PBR, além dos 3 alvos especificados na tabela do slide 5, conforme mostra a tabela abaixo. Refaça os itens (a) e (b) nesta nova condição operacional.

| | Range bistático absoluto [Km] | Azimute ϕ do alvo [°] | RCS [m ²] | Velocidade radial [Km/h] |
|---------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Alvo 1: | 40 | 95 | 80 | – 260 |
| Alvo 2: | 60 | 35 | 80 | 430 |
| Alvo 3: | 80 | 60 | 100 | 860 |
| Alvo 4: | 100 | 20 | 110 | – 710 |