

Relatório

## Experiência 6 - Beamforming

PSI3531 - Processamento de Sinais Aplicado (2020)

Matheus Bordin Gomes - 9838028

Essa experiência tem como intuito explorar a técnica conhecida como *beamforming*. Essa consiste no uso de um arranjo de  $M$  antenas ou microfones distribuídos uniformemente em linha reta, de forma a intensificar sinais recebidos com uma determinada angulação, ao passo que sinais incidentes com outros ângulos serão atenuados.

### 1. Parte Experimental 1

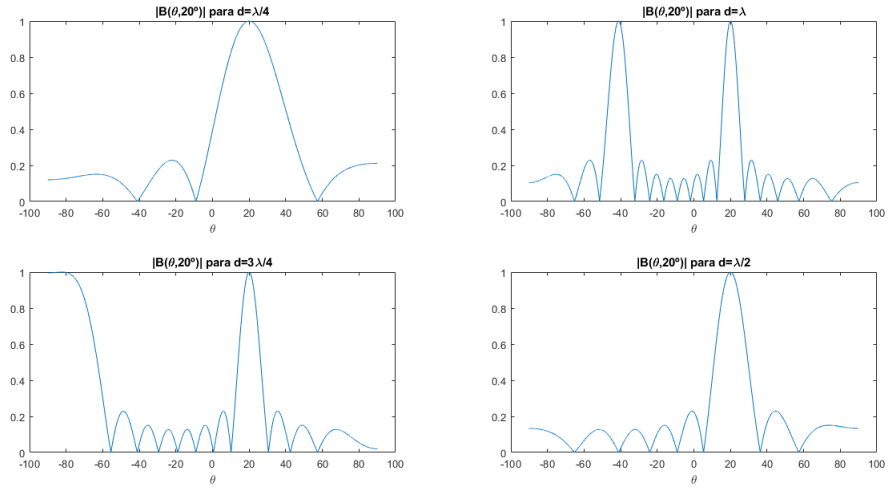
Esse exercício foi implementado no *script* "exp6\_1.m", entregue juntamente com este relatório. Nessa etapa, serão estudados os efeitos do distanciamento entre as antenas no sinal recebido e de um sinal interferente recebido com uma inclinação diferente daquela para qual o sistema foi projetado.

1. O gráfico de  $|B(\theta, \theta_0)|$  para os parâmetros dados no enunciado e  $d = \lambda/4$  pode ser visto na figura 1. É possível notar que sinais vindos com a direção próxima a qual o sistema foi projetado ( $20^\circ$ ) não terão a amplitude afetada significativamente, ou seja, terão ganho próximo de 1. Já sinais vindos de outras direções, terão suas amplitudes atenuadas, ganho menor do que 1. Esse comportamento de rejeição de sinais vindos de outras direções se torna mais notável a medida que o ângulo de incidência se torna mais distante de  $20^\circ$ .
2. Os gráficos de  $|B(\theta, \theta_0)|$  para os espaçamentos  $d = \lambda/2$ ,  $d = 3\lambda/4$  e  $d = \lambda$  podem ser vistos na figura 1.

Pode-se notar um comportamento periódico nos gráficos do módulo de  $B(\theta, \theta_0)$ , de modo que quanto maior o espaçamento entre as antenas, menor será o período. Esse comportamento é muito importante, pois quando temos um espaçamento maior do que  $\lambda/2$ , podemos ter uma repetição do maior pico, o que geraria um ganho indesejado em uma ou mais direções. Esse comportamento é análogo ao *aliasing*, quando tratamos de amostragem de sinais. A distância máxima entre as antenas pode ser determinada com a equação  $B(\theta, \theta_0)$ :

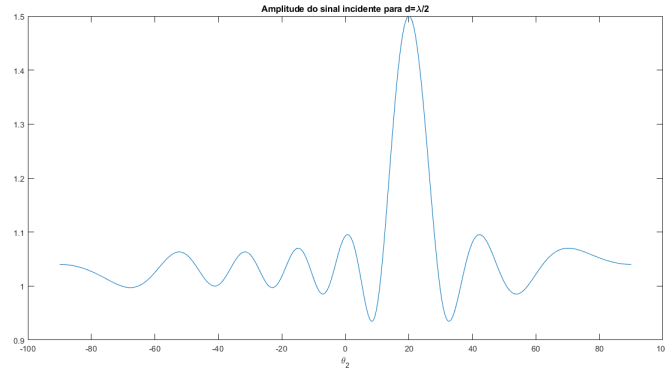
$$B(\theta, \theta_0) = \frac{1}{M} * \frac{1 - e^{j\omega M(u(\theta) - u(\theta_0))}}{1 - e^{j\omega(u(\theta) - u(\theta_0))}}$$

Tal que  $u(\theta) = \frac{d \sin \theta}{T_{ac}}$ . Dessa forma, basta garantirmos que  $B(\theta, \theta_0)$  seja igual a 1 apenas uma vez no intervalo  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ . Resolvendo o problema, encontramos que  $d < \lambda/2$ .



**Figura 1.** Gráficos de  $|B(\theta, \theta_0)|$ , para diferentes espaçamentos entre as antenas.

3. O gráfico da amplitude do sinal incidente, estimada pelo *Beamforming Delay-and-Sum*, em função de  $\theta_2$  pode ser vista na figura 2. Pode-se ver que, quando o sinal interferente incide com uma direção diferente da qual o sistema foi projetado para amplificar, a amplitude é próxima de 1, ou seja, é próxima da amplitude do sinal desejado. Porém, quando o sinal interferente incide com direção igual ou próxima de  $\theta_0$ , ele também é amplificado, de modo que a interferência se torna mais significativa.



**Figura 2.** Estimativa da amplitude do sinal incidente, composto por um sinal vindo da direção para qual o sistema foi projetado e por outro sinal vindo da direção  $\theta_2$ .

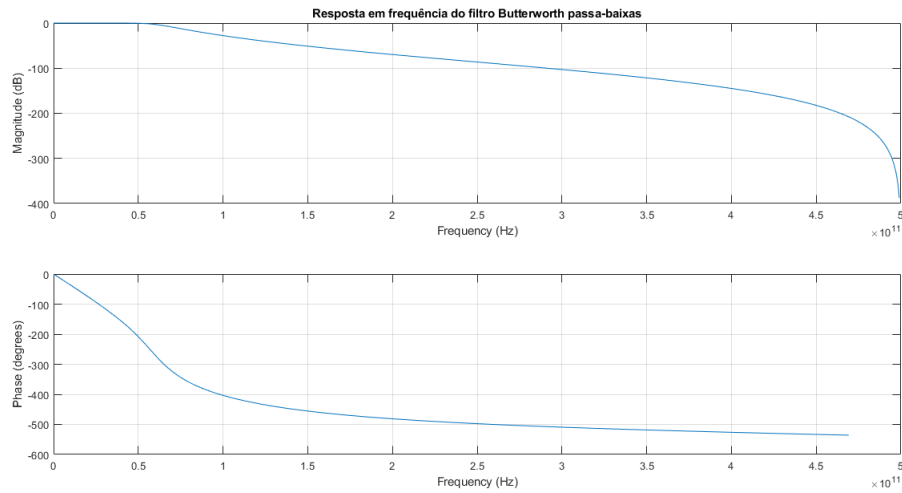
## 2. Parte experimental 2

Esse exercício foi implementado no *script* "exp6\_2.m", entregue juntamente com este relatório. Nessa etapa, foi fornecido os sinais recebidos por 8 antenas, que são combinações do sinal de interesse, com interferências e ruídos. Foi necessário criar um sistema para decodificar o sinal recebido e avaliar a quantidade de erros cometidos.

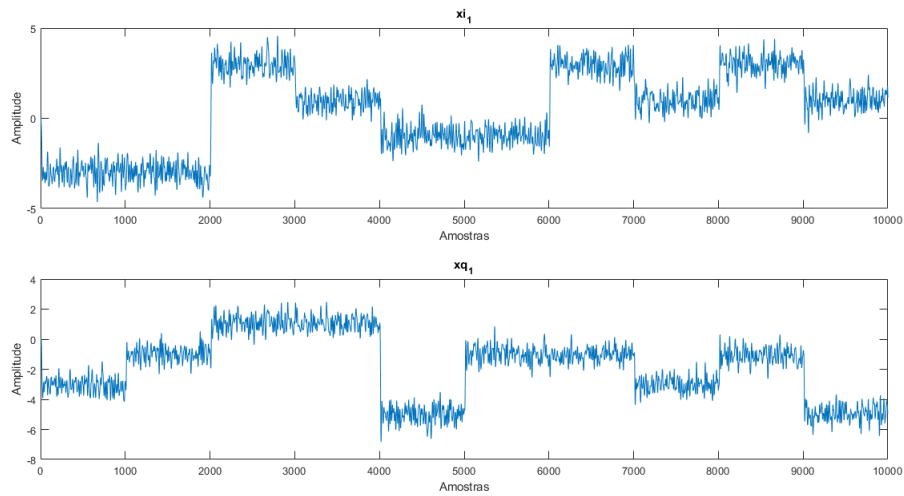
1. A resposta em frequência do filtro Butterworth projetado pode ser vista na figura 3. Já a recuperação do sinal recebido na antena 1, a qual resulta em  $x_1 = x_{i1} + j * x_{q1}$ , pode ser vista na figura 4.

Observa-se que o sinal recebido possui uma quantidade de ruído e interferência significativa, mesmo após a passagem pelo filtro passa-baixas. Isso poderia afetar a decodificação da

mensagem original, e esse é um dos motivos do uso da técnica de *beamforming*, que pode ajudar a obter um sinal mais próximo do originalmente transmitido.

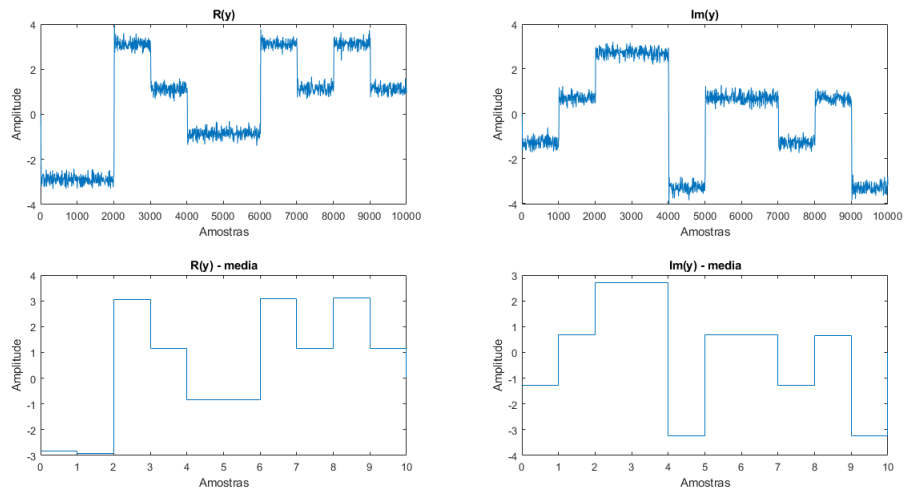


**Figura 3.** Resposta em frequência do filtro Butterworth passa-baixas de ordem 6 projetado.



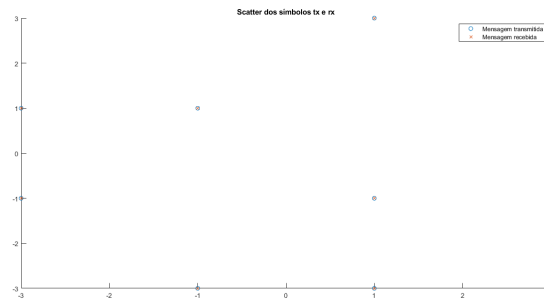
**Figura 4.** Sinal recebido na antena 1 recuperado, em que  $xi_1$  é a parte real e  $xq_1$  é a parte imaginária.

2. Após o *Delay-and-Sum*, é notável que os patamares de amplitude ficaram mais nítidos no sinal, como se pode ver na figura 5.



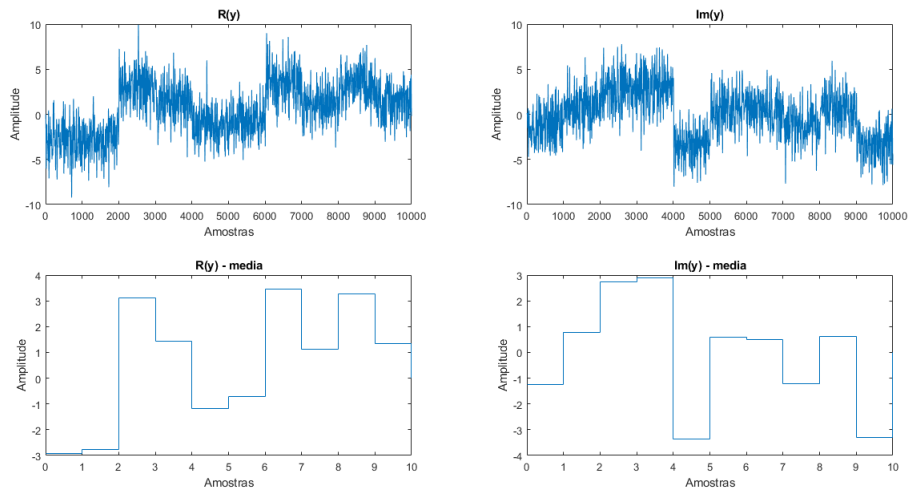
**Figura 5.** Parte real e imaginária do sinal recebido após o *Delay-and-Sum* ( $y$ ), junto com a média a cada  $N$  amostras correspondentes a um símbolo.

3. Pode-se observar a média a cada  $N = 1000$  amostras do sinal  $y[n]$  na figura 5. No total, foram transmitidos 10 símbolos.
4. A decisão de qual símbolo foi recebido pode ser vista entre as linhas 107 e 109 do *script* supracitado.
5. Ao se comparar a reconstrução dos símbolos com os símbolos efetivamente transmitidos, nota-se que não foram cometidos erros. Esse fato pode ser observado na imagem 6, que apresenta no plano complexo os símbolos que foram enviados e os que foram recebidos.

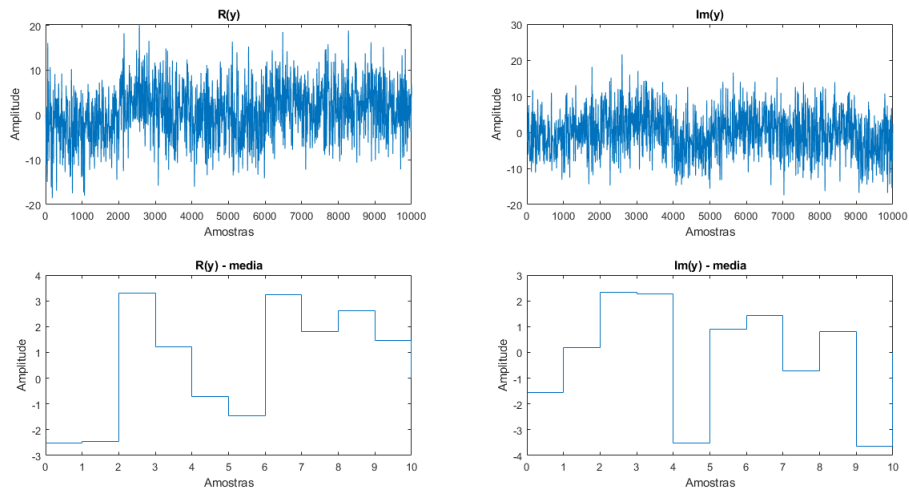


**Figura 6.** Plano complexo com os símbolos enviados (círculos) e os símbolos recebidos (xis).

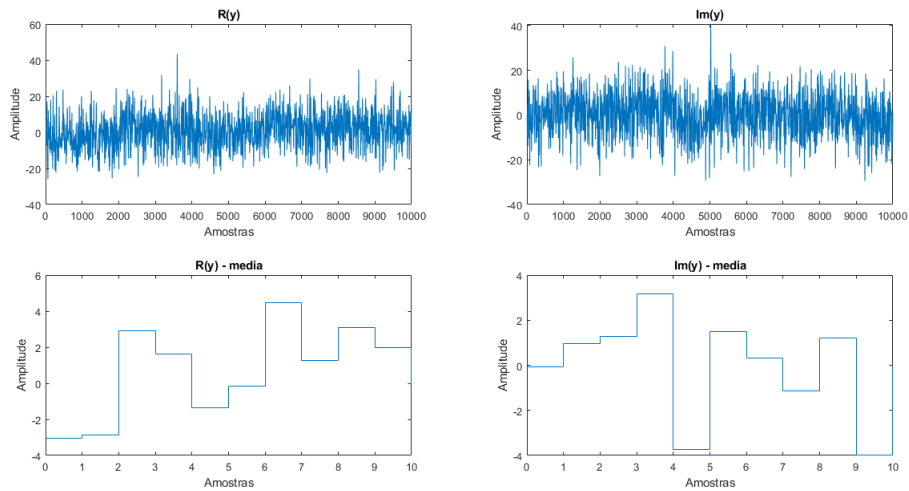
6. Para executar esse item no *script* "exp6\_2.m", basta selecionar a amplitude desejada para o ruído na linha 19.



**Figura 7.** Parte real e imaginária do sinal recebido após o *Delay-and-Sum* ( $y$ ), junto com a média a cada  $N$  amostras correspondentes a um símbolo, para amplitude do ruído adicional igual a 10.

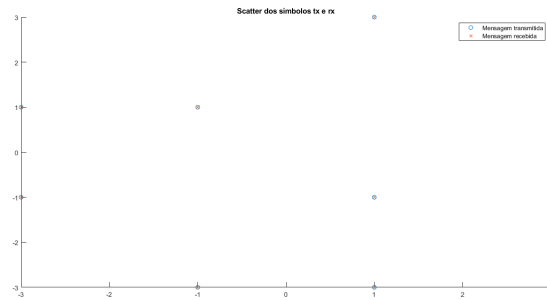


**Figura 8.** Parte real e imaginária do sinal recebido após o *Delay-and-Sum* ( $y$ ), junto com a média a cada  $N$  amostras correspondentes a um símbolo, para amplitude do ruído adicional igual a 30.

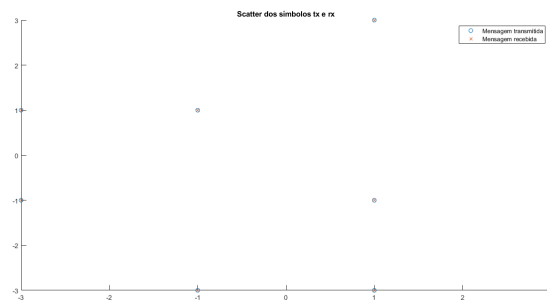


**Figura 9.** Parte real e imaginária do sinal recebido após o *Delay-and-Sum* ( $y$ ), junto com a média a cada  $N$  amostras correspondentes a um símbolo, para amplitude do ruído adicional igual a 50.

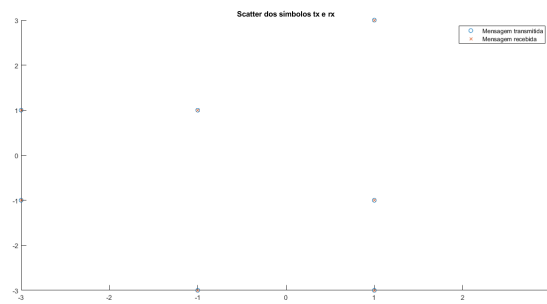
É possível notar nas figuras 7, 8 e 9 que os ruídos distorcem significativamente o sinal  $y[n]$ , de modo que chegar a ser impossível de distinguir os patamares de amplitude nos casos mais extremos (amplitude igual a 30 e a 50). Entretanto, como os ruídos possuem média zero e a média de cada símbolo é feita sobre um número relativamente grande de amostras ( $N = 1000$ ), o efeito do ruído pode ser praticamente anulado. Isso fica claro com a quantidade de erros obtida para cada caso: zero erros para amplitude do ruído igual a 10, zero erros para amplitude do ruído igual a 30 e um erro para amplitude do ruído igual a 50. Os gráficos *scatter* para cada caso podem ser vistos a seguir, nas figuras 10, 11 e 12.



**Figura 10.** Plano complexo com os símbolos enviados (círculos) e os símbolos recebidos (xis), para amplitude do ruído adicional igual a 10.



**Figura 11.** Plano complexo com os símbolos enviados (círculos) e os símbolos recebidos (xis), para amplitude do ruído adicional igual a 30.



**Figura 12.** Plano complexo com os símbolos enviados (círculos) e os símbolos recebidos (xis), para amplitude do ruído adicional igual a 50.