

Sistema de Localização com Ultra-sons

Daniel Albuquerque, José Vieira and Carlos Bastos

Abstract – In this paper, we present a robot location system using ultrasonic beacons. The robot-beacon distance is computed from the measured time-of-flight of the sound waves. In order to distinguish the different beacons we used Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation with Gold sequences as the modulated signal. The robot uses Differential BPSK (DBPSK) demodulation and a match-filter to detect the emitted pulses. The position of the robot is computed by using the triangulation of the distances from the robot to each beacon.

Practical test results showed that this system can obtain the robot's position with a maximum error of 30 cm.

Resumo – Neste paper, nós apresentamos um sistema de localização de robôs usando ondas de ultra-sons. O sistema foi implementado recorrendo a um grupo de faróis activos. A distância robô-farol é calculada com base no tempo-de-voe de uma onda binária de ultra-sons com modulação Binary Phase Shift Keying (BPSK). O robô usa desmodulação Diferencial BPSK (DBPSK) e um filtro-óptimo para obter a distância. A posição do robô é calculada recorrendo a triangulação da distância a cada farol.

Resultados práticos mostram que este sistema é capaz de obter a posição de um robô com um erro máximo de 30 cm.

I. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos recentes e o aumento das aplicações robóticas, tem existido, nos últimos anos, um forte crescimento na utilização dos robôs em aplicações fora da área industrial. Os robôs autónomos são utilizados, na maioria das vezes, para substituir o homem em tarefas que este não pode ou não deseja realizar. Actualmente já são encontrados robôs domésticos autónomos como é o exemplo de aspiradores e cortadores de relva automáticos. Um dos aspectos fundamentais para qualquer robô autónomo é o mecanismo de localização no espaço. O Robô depende da correcta localização para poder planear a sua rota e tomar decisões do melhor percurso a tomar. O sistema de localização ideal seria aquele que utilizasse apenas a informação disponível para os humanos (sem a necessidade de equipamento adicional no meio circundante), contudo, as dificuldades inerentes à construção de um tal sistema levam a que se opte por soluções de estruturação do ambiente de forma a auxiliar os robôs na tarefa de localização. Em ambientes industriais temos, a título de exemplo, os sistemas com cabo enterrado que emite um sinal de RF, os baseados em raios Laser, ou ainda os baseados em marcadores ópticos no chão [1], [2], [3] e [4]. Todos estes sistemas utilizam normalmente a odometria como um auxiliar na localização. A conjugação da odometria com sistemas de posicionamento remoto permite manter

as vantagens dos dois sistemas, precisão elevada para curtas distâncias proporcionada pela odometria e localização global oferecida pelos sistemas Laser, etc. Este artigo tem como principal objectivo apresentar um sistema de localização com referencial fixo que apresenta um custo de implementação reduzido, e pretende substituir, em algumas aplicações, os sistemas mais dispendiosos com os de raio Laser.

II. SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO COM FARÓIS

O sistema que apresentamos obtém a localização bidimensional (x, y) a partir das distâncias a cada um dos faróis utilizando o conhecido método de intercepção de esferas, formulado por Schau e Robinson [5], aplicado ao caso bidimensional. A distância do receptor a cada farol é estimada a partir do tempo que o sinal acústico leva para se propagar desde os faróis até ao receptor (ver secção III). Após o conhecimento das distâncias a cada farol e aplicando o método de intercepção de esferas obtém-se uma estimativa da posição do receptor num eixo de coordenadas pré-estabelecido (Figura 1). Para tal, será necessário ter conhecimento da posição exacta de cada farol.

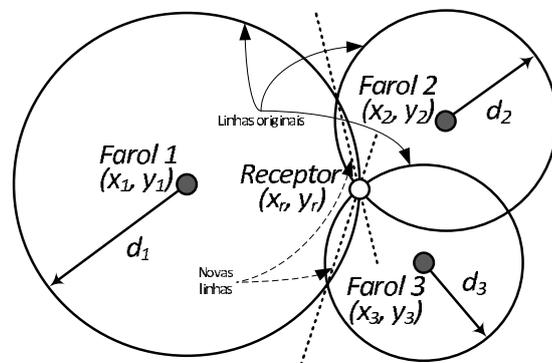


Fig. 1 - Descrição do problema de localização.

As distâncias d_i podem ser apresentadas como a distância entre o farol i e o receptor:

$$d_i^2 = (x_i - x'_r)^2 + (y_i - y'_r)^2 \quad i \in \mathbb{N} \quad (1)$$

$$= x_i^2 - 2x_i x'_r + x_r'^2 + y_i^2 - 2y_i y'_r + y_r'^2 \quad (2)$$

Pela equação 2 verifica-se que serão necessários pelo menos três faróis para que a solução seja única. Contudo, a análise que se segue considera igualmente o caso de existirem mais faróis e a forma como se pode tirar partido dessa informação adicional para se reduzir o erro de localização.

Como se pode observar pela equação 2 está-se perante um sistema não linear de segunda ordem. Caffery mostrou em [6] a forma de transformar este problema num sistema de equações linear mais fácil de resolver. Para tal

será necessário considerar que a origem dos eixos de coordenadas está sobre o farol 1. Esta mudança não implica uma perda de generalidade pois pode sempre ser efectuada uma translação do sistema de $(-x_1, -y_1)$, efectuados os cálculos seguindo-se novamente uma translação de (x_1, y_1) . Obtém-se assim a nova equação para as distâncias:

$$\begin{cases} d_1^2 = x_r^2 + y_r^2 \\ d_i^2 = x_i^2 - 2x_i x_r + x_r^2 + y_i^2 - 2y_i y_r + y_r^2 \end{cases} \quad (3)$$

Subtraindo a primeira expressão da segunda obtém-se o sistema linear como desejado:

$$2x_i x_r + 2y_i y_r = x_i^2 + y_i^2 + d_1^2 - d_i^2 \quad \forall i \geq 2 \quad (4)$$

Ou seja, num sistema de três faróis passamos a ter apenas a intersecção entre duas rectas, da qual resulta a posição do receptor (Figura 1).

Apresenta-se de seguida a forma matricial da equação 4 para representar o sistema de uma forma mais simples,

$$2Hr = C + d \quad (5)$$

Em que:

$$H = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots \\ x_m & y_m \end{bmatrix} \quad r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \\ \vdots \\ x_m^2 + y_m^2 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 \\ d_1^2 - d_3^2 \\ \vdots \\ d_1^2 - d_m^2 \end{bmatrix}$$

em que m é o número de faróis.

Por forma a obter a posição do receptor r basta resolver a equação 5:

$$r = \frac{1}{2} H^+ (C + d) \quad (6)$$

em que H^+ representa a pseudo-inversa de H [7]. No caso particular em que temos apenas dois faróis é igual à inversa.

Como se está perante um sistema linear sem discontinuidades ir-se-á aplicar a fórmula fundamental do cálculo dos erros [8] para obter uma estimativa do erro associado à posição r . De todas as parcelas de r a única que está sujeita a erro é a parcela d à qual estão associados os termos dinâmicos do sistema. As restantes são estáticas e considera-se que não têm qualquer erro associado. Desta forma o erro de r pode ser representado da seguinte forma:

$$\Delta r = \frac{1}{2} H^+ \Delta d \quad (7)$$

aplicando a fórmula fundamental do cálculo dos erros Δd pode ser aproximado por:

$$\Delta d = \begin{bmatrix} 2d_1 \Delta d_1 + 2d_2 \Delta d_2 \\ 2d_1 \Delta d_1 + 2d_3 \Delta d_3 \\ \vdots \\ 2d_1 \Delta d_1 + 2d_m \Delta d_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

Obtém-se, finalmente, a expressão para a posição do receptor:

$$r = \frac{1}{2} H^+ (C + d) \pm \frac{1}{2} H^+ \Delta d \quad (9)$$

Num sistema deste tipo em que os faróis são estáticos, as matrizes H^+ e C são conhecidas à partida, podendo residir em memória, sendo necessário apenas efectuar o cálculo da matriz d .

No caso particular de termos apenas 3 faróis a matriz pseudo-inversa é dada por:

$$H^+ = \frac{1}{x_3 y_2 - x_2 y_3} \begin{bmatrix} -y_3 & y_2 \\ x_3 & -x_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

e se escrevermos as coordenadas do ponto 3 relativas ao ponto 2

$$x_3 = x_2 + \Delta x \quad e \quad y_3 = y_2 + \Delta y \quad (11)$$

obtemos a seguinte versão da equação 10:

$$H^+ = \frac{1}{y_2 \Delta x - x_2 \Delta y} \begin{bmatrix} -y_2 - \Delta y & y_2 \\ x_2 + \Delta x & -x_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Da expressão pode-se concluir que quando Δx e Δy tendem para zero, o erro na determinação da posição (7) pode ser muito grande.

III. MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS COM ULTRA-SONS

Como já foi mencionado, o sistema deve ser capaz de medir a distância a cada farol. Existem muitas técnicas para efectuar esta medição, desde a óptica até à radio-frequência passando pela acústica [2], [3] e [4]. Como se pretendia um sistema fidedigno e económico optou-se pela acústica, mais propriamente pelos ultra-sons. Os faróis utilizados emitem um pulso de duração finita na gama dos ultra-sons e o receptor calcula a distância pelo tempo que este demora a viajar até si.

No sistema por nós proposto os faróis emitem uma sequência binária, conhecida pelo receptor, modelada em BPSK (Bipolar Phase Shift Keying). Sabendo o tempo que a sequência demora a viajar desde do farol até ao receptor e conhecendo a velocidade de propagação facilmente se determina a distância. Perante este cenário cinco questões se levantam:

- Como será efectuado o sincronismo?
- Como se determinará a velocidade de propagação?
- Como se efectuará a partilha do meio entre os vários faróis?
- Como será efectuada a desmodulação?
- Como encontrar a sequência enviada no sinal recebido?

De seguida, apresentamos a solução encontrada para lidar com estes cinco problemas.

A. Sincronismo para o cálculo do tempo de voo

Para o cálculo do tempo de voo será necessário a partilha de uma base temporal para efectuar o sincronismo entre os faróis e o receptor. Para tal recorreu-se a um pulso de RF enviado pelo receptor, ficando desta forma os faróis a conhecer o instante $t = 0$;

B. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A velocidade de propagação varia com inúmeros factores e raramente se pode considerar constante [9]. Através de algumas aproximações e considerando apenas a variação com a temperatura pode-se obter uma forma aproximada para a velocidade de propagação [10]:

$$v_{Som} = 331.3 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.15}} \quad (m/s) \quad (13)$$

em que θ é a temperatura em Grau Celsius.

Considerando que a amplitude térmica que o sistema está sujeito é baixa, podemos aproximar a equação 13 aos dois primeiros termos da expansão em série de Maclaurin. Desta forma resulta uma expressão muito simples para o cálculo da distância do receptor a cada farol:

$$d = (331.3 + 0.6\theta)t_{Voo} \quad (m) \quad (14)$$

em que t_{Voo} é o tempo, em segundos, que a onda demora a se propagar do emissor até ao receptor.

Como se está perante um sistema linear sem discontinuidades ir-se-á aplicar a fórmula fundamental do cálculo dos erros [8] para obter uma estimativa do erro associado à distância d . Desta forma d pode ser apresentado da seguinte forma:

$$d = (331.3 + 0.6\theta)(t_{Voo} \pm \Delta t_{Voo}) \pm 0.6t_{Voo}\Delta\theta \quad (15)$$

em que Δt_{Voo} é o erro associado à determinação do instante de recepção e $\Delta\theta$ o erro associado à temperatura ambiente.

C. Partilha do meio entre os faróis

Todo o sistema foi inicialmente projectado considerando a utilização de CDMA (Code Division Multiple Access) de forma a proporcionar a partilha do meio acústico. A cada farol foi atribuído um código diferente, sendo este conhecido pelo receptor, e para além disto, este código deve perante outro, ter um comportamento idêntico ao do ruído, estando descorrelacionado. Para tal, utilizaram-se sequências pseudo aleatórias conhecidas por sequências de Gold [11].

Após alguns testes verificou-se que o sistema, perante duas sequências de energia distintas, era incapaz de detectar a que apresenta menor energia, conhecido como problema Near-Far [12]. Existem muitas formas de contornar o problema Near-Far, mas na maioria das vezes são muito complexas e não resolvem completamente o problema [12].

Como solução de recurso implementou-se uma técnica de TDMA (Time Division Multiple Access), para partilha do meio. Ou seja, cada farol emite a sua sequência em diferentes intervalos de tempo.

D. Desmodulação do sinal recebido

Para evitar a implementação de um sistema de extracção da portadora para realizar a desmodulação síncrona do sinal BPSK, recorreu-se a uma técnica de desmodulação que não necessita de ter conhecimento da portadora. Esta técnica designa-se por DBPSK (Differential Bipolar Phase Shift Keying) e pode ser vista como uma técnica não coerente da desmodulação de um sinal modelado BPSK [13].

E. Encontrar a sequência enviada no sinal recebido

Após a passagem para a banda base poder-se-ia tentar recuperar o sinal binário com um simples limiar de decisão e de seguida procurar a sequência emitida. Este facto não tira total partido do conhecimento do sinal emitido. Neste sistema recorreu-se a um filtro-óptimo [14] para tirar o máximo partido do conhecimento do sinal emitido. O filtro-óptimo tem como principal objectivo maximizar a relação sinal-ruído. Segundo a teoria do filtro-óptimo o máximo da relação sinal-ruído ocorre quando a resposta impulsional do filtro for igual ao sinal a detectar invertido no tempo. Ou seja, o pico à saída do filtro óptimo indica o instante de tempo em que terminou a recepção da sequência conhecida no sinal.

IV. SISTEMA IMPLEMENTADO

A. Descrição geral

Para testar o sistema proposto foi construído um campo de testes, Figura 2. Este campo é constituído por três faróis, que emitem uma sequência de Gold de 63 bits modulada em BPSK com frequência da portadora de $40kHz$, e apenas um receptor, com três transdutores de ultra-sons configurados em triângulo (Figura 3).

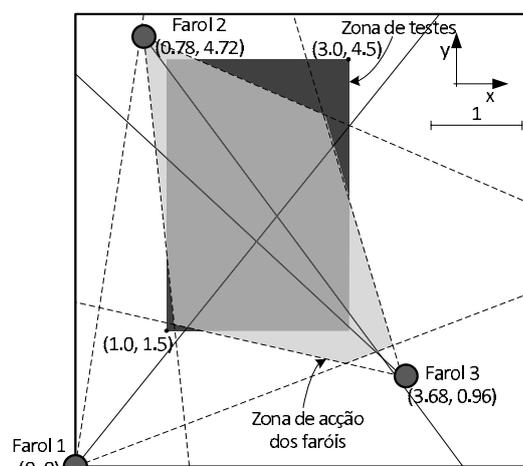


Fig. 2 - Campo de testes. (Unidades: metro)

Na Figura 2 está também apresentado o diagrama de radiação de cada sensor, bem como a área comum, onde será possível a boa recepção do sinal proveniente de cada

farol. Note-se que na área de teste existe uma pequena zona que não é abrangida pela área mencionada anteriormente.

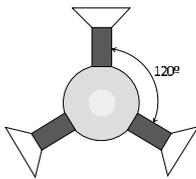


Fig. 3 - Configuração do receptor

B. Funcionamento de um farol

O sistema de funcionamento de um farol pode ser representado por quatro diferentes blocos (Figura 4).

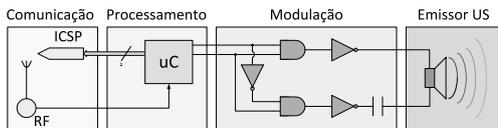


Fig. 4 - Diagrama de blocos de um farol

O módulo de rádio frequência (bloco comunicação) é responsável pela recepção da ordem de emissão, informando de seguida o bloco de processamento deste facto. É também através do bloco de processamento que é possível alterar o código a correr no bloco de processamento, disponibilizando uma ficha ICSP¹. No bloco de processamento é feita toda a gestão do sistema: fica à espera de uma ordem de emissão, emite na timeslot adequada (TDMA) e envia a onda já quantificada digitalmente para o bloco de modulação. O bloco de modulação transforma o sinal quantificado num sinal analógico, pronto a ser transmitido. O Bloco de transmissão é constituído, apenas, por um transdutor de ultra-sons, responsável por emitir o sinal.

C. Funcionamento do receptor

O hardware do receptor pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 5.

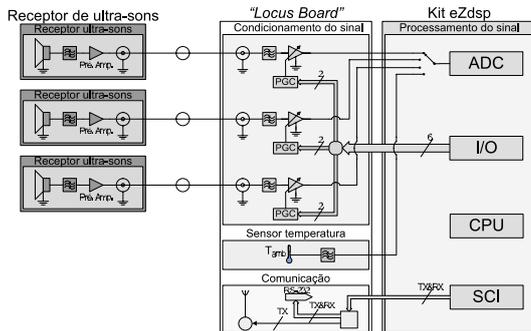


Fig. 5 - Diagrama de blocos do hardware do receptor

O bloco do receptor de ultra-sons é responsável pela transformação do sinal de ultra-sons recebido num sinal eléctrico, bem como, a sua pré-amplificação e filtragem. No bloco de condicionamento de sinal é feita a interligação

¹In Circuit Serial Programming, standard muito usado, permite a troca do software do microcontrolador sem ser necessário a sua remoção do circuito

entre o bloco receptor de ultra-sons e o processamento de sinal. Para além disso, possibilita a amplificação do sinal recebido com vários ganhos discretos. O bloco de processamento de sinal é o gestor principal de todo o sistema, responsável pelo processamento do sinal recebido (desmodulação, filtragem, decimação, etc). Ordena a emissão dos pulsos de ultra-sons e envia a posição do receptor via comunicação série (RF e RS-232). É neste bloco que é efectuado o algoritmo de localização. O bloco sensor de temperatura coloca na sua saída um valor de tensão proporcional à temperatura ambiente, previamente filtrado para minorar os efeitos do ruído. O bloco de comunicação possibilita o envio de informação para os faróis, via rádio frequência, bem como a troca de informação com outros dispositivos, via RS-232².

O funcionamento do software pode ser aproximado pelo diagrama da Figura 6

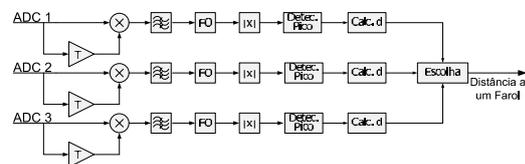


Fig. 6 - Diagrama de blocos do software do receptor

O software implementado é responsável por adquirir o sinal, bem como realizar a sua desmodulação DBPSK passando o sinal para a banda base. O sinal em banda base é processado pelo filtro-óptimo da sequência a detectar. Após a aplicação da função módulo à saída do filtro é aplicado um detector de pico, este procura a posição do máximo do sinal. Posteriormente é efectuado o cálculo da distância a que o índice do pico corresponde, para tal recorre-se à equação 14, em que se estima a velocidade do som em função da temperatura ambiente. A escolha da distância, é exclusivamente feita pela saída do filtro óptimo que apresentar maior energia (melhor relação sinal-ruído). Note-se que o procedimento mencionado anteriormente é repido para os restantes faróis no sistema.

Após a recepção de todos os sinais emitidos e do cálculo da distância correspondente, o sistema, recorrendo às distâncias obtidas, para determinar a sua posição, utiliza a equação 6.

V. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foram realizados dois testes fundamentais para a demonstração do funcionamento do sistema. O primeiro teve como objectivo a verificação da medição correcta da distância entre o robô e um farol. O segundo teve como objectivo verificar o correcto funcionamento do sistema de localização com os três faróis.

Na Figura 7 está apresentado o gráfico com os resultados da medição de distâncias, por parte do sistema, entre um farol e o receptor. Para cada distância foram efectuadas 100 medidas. Como se observa o sistema é bastante preciso, sendo o erro relativo da medição inferior a 2%.

²padrão para troca série de dados binários entre um terminal de dados e um emissor de dados.

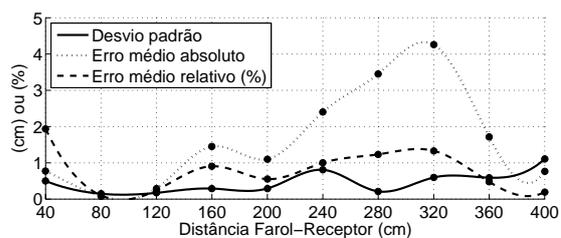


Fig. 7 - Erro na determinação da distância com um farol.

Na Figura 8 está apresentado o gráfico do erro na determinação da posição por parte do sistema implementado. O erro apresentado, não é mais do que a distância entre o local efectivo e o local determinado pelo sistema. As medidas foram obtidas na “Zona de testes” da Figura 2, e em cada ponto de teste, foram efectuadas 100 medidas. Foi utilizada um grelha de 50 cm.

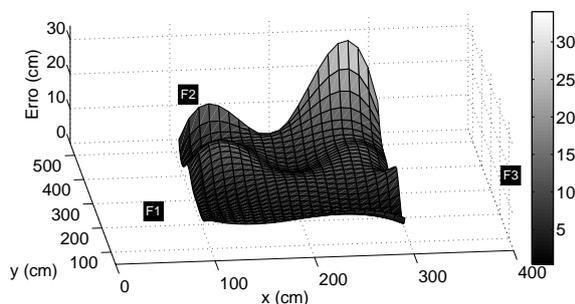


Fig. 8 - Erro na localização com 3 faróis.

Pela observação da Figura 8 verifica-se que, na maioria das situações, o erro de localização não ultrapassa os 15cm o que se pode considerar um valor aceitável para a localização de um robot autónomo. Existe uma pequena zona onde o erro da medida é superior a 30cm. Este erro exagerado pode ficar-se a dever a dois factores: O receptor encontra-se fora da zona de acção do faróis, logo o sinal que este recebe é bastante atenuado; ou o sistema receptor está consideravelmente afastado do farol 1 (F1), cerca de 500cm. A esta distância o eco do chão é tão relevante no sistema como a onda directa e como percorre uma distância superior introduz um erro associado elevado (nota: o sistema encontra-se a 50 cm do chão). Um estudo mais aprofundado da influência dos ecos na medição das distâncias deve ser considerado como um possível trabalho futuro.

Após os testes efectuados verificou-se que a aplicabilidade do sistema está limitada à zona de acção dos faróis onde o erro médio absoluto não ultrapassa os 15 cm.

Apesar do sistema se encontrar ainda numa fase experimental, obtiveram-se resultados bastante animadores motivando desta forma a construção de uma versão final plenamente funcional.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Hightower e G. Borriello, “Location systems for ubiquitous computing”, *Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57–66, 2001, 0018-9162.
- [2] Gurvits L. Betke M., “Mobile robot localization using landmarks”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 13, pp. 251–263, Abril de 1997.

- [3] João Mota, “Localisation of a mobile robot using laser scanner and reconstructed 3d models”, Master’s thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Novembro de 2001.
- [4] Gurvits L. Betke M., “Mobile robot localization using a single image”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 978–983, May de 1989.
- [5] Robinson A. Z. Schau J. M., “The spherical interpolation method for closed-form passive source localization using range difference measurements”, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-35, pp. 1223–1225, Aug. de 1987.
- [6] Caffery J., “A new approach to the geometry of toa location”, *VTC*, pp. 1943–1949, 2000.
- [7] Strang G., *Linear Algebra And Its Applications*, Brooks/Cole, 3 edição, 1988.
- [8] Canale C. Chapra S., *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hill, second edição, 1990.
- [9] Cheeke J., *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, CRC Press, 1 edição, 2002.
- [10] et. al. Kinsler L., Frey A., *Fundamentals of Acoustics*, Wiley, 3 edição, 1982.
- [11] Geraniotis E. Gerakoulis D., *CDMA Access and Switching*, Wiley, 1 edição, 2001.
- [12] et. al. Parkvall S., Ottersten B., “Asynchronous near-far resistant ds-cdma receivers without a priori synchronization”, Relatório técnico.
- [13] Carlson A., *Communication Systems*, McGraw-Hill, 3 edição, 1986.
- [14] Turin G., “An introduction to matched filters”, *IRE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, pp. 311–329, 1960.