

# A influência da disposição espacial dos receptores de Guerra Eletrônica sobre a precisão da localização por TDOA

Cap Com Leonardo POSSIDELI Moreira\*

## RESUMO

O presente trabalho realiza o estudo preliminar sobre a influência da disposição espacial dos receptores sobre a precisão da localização eletrônica por Time Difference of Arrival (TDOA). A análise foi realizada considerando um ambiente bidimensional ( $xOy$ ) sobre a influência de um canal com desvanecimento por multipercurso. O algoritmo de localização foi baseado no método de Chan e foram testadas as geometrias em linha, em cunha, em cunha invertida e circular, a fim de identificar variáveis que se relacionam com a raiz do erro quadrático médio (RMSE) da localização. Os resultados demonstram a influência do ângulo de interseção entre hipérbolas sobre a precisão dos resultados. Para as geometrias em cunha e circular parece existir uma relação inversa entre o ângulo de interseção e o RMSE da localização, apresentando maior precisão para os ângulos próximos a  $90^\circ$ . Outras variáveis espaciais, tais como a distância e a forma do arranjo, também influenciam a precisão. O arranjo em linha não apresentou resultados válidos pelo método de Chan, sendo descartado desse estudo. As conclusões foram estruturadas de forma a identificar premissas para otimizar o posicionamento dos receptores com o intuito de aumentar a precisão dos resultados.

**Palavras-chave:** Localização eletrônica. TDOA. Geometria.

## Influence of the spatial arrangement of the receivers of Electronic Warfare on the accuracy of the location by TDOA

### ABSTRACT

This paper presented a preliminary study on the influence of geometries of receivers on the accuracy of the location by Time Difference of Arrival (TDOA). For analysis was considered a two-dimensional environment ( $xOy$ ) in an channel fading by multipath.

The location algorithm was based on the method of Chan and were tested the geometries in a line, curve, inverted curve and circular to identify space variables that are related to the root mean square error (RMSE) of the location. The results demonstrated the influence of the intersection angle between hyperboles. For circular and curve geometries was observed an inverse relationship between the angle of intersection and the RMSE, with greater precision for angles near  $90^\circ$ . Other spatial variables such as the distance and shape, also influence the results accuracy. The line geometry did not provide valid results by the method of Chan. The conclusions have been structured to identify rules to optimize the placement of receivers in order to increase the accuracy of the results.

**Keywords:** Geolocation. TDOA. Geometry.

## 1 INTRODUÇÃO

O Exército Brasileiro intensificou sua participação nos últimos anos em operações de não-guerra em ambiente urbano, por exemplo, Operação Arcanjo na região do Complexo do Alemão, Operação São Francisco no Complexo da Maré, ambas na cidade do Rio de Janeiro-RJ, e Operação de Segurança da Copa do Mundo de 2014, abrangendo cidades em todo o território nacional.

A atividade de Guerra Eletrônica esteve presente nessas operações como fonte de informação a partir do sensoriamento do espectro eletromagnético e da localização eletrônica de ameaças.

No entanto, a atuação em cenário urbano acentua o erro de localização devido ao aumento do ruído eletromagnético e a grande densidade de obstáculos, por exemplo, prédios, automóveis, aeronaves e pessoas, que determinam um canal com desvanecimento por multipercurso.

A velocidade com que uma ameaça é identificada e contida depende do tamanho da região da localização, que, por sua vez, está diretamente relacionada aos erros inerentes ao sistema, das características do canal de transmissão e da disposição espacial dos receptores.

A diferença de tempo de chegada (TDOA) apresenta-se como uma das técnicas empregadas pelos sistemas de localização para determinar a posição de um transmissor.

Considerando a incapacidade de alterar as características do canal ou do sistema de guerra eletrônica, seria possível reduzir o tamanho da área de localização posicionando adequadamente os receptores com o intuito de atingir a maior precisão.

No entanto, entende-se que a falta de informações a respeito da influência da disposição espacial sobre a precisão do resultado, poderá ocasionar o posicionamento inadequado do arranjo, reduzindo sua capacidade para detectar ameaças.

Dessa forma, esse estudo buscou identificar regras para otimizar a escolha da posição dos receptores e aumentar a precisão da localização eletrônica de ameaças.

## **2 LOCALIZAÇÃO POR DIFERENÇA DE TEMPO DE CHEGADA (TDOA)**

Os estudos sobre a localização eletrônica por TDOA iniciaram durante a Segunda Guerra Mundial motivados pela necessidade de criação de um sistema de navegação. Nesse período foi desenvolvido o *Long Range Navigation* (LORAN) que possibilitou a determinação da posição do receptor em um plano de duas dimensões a partir de três transmissores conhecidos e sincronizados.

Atualmente esse sistema foi substituído pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS) que possibilita a localização em três dimensões, contudo o modelo matemático que determina a posição continua essencialmente o mesmo (COMPAGNONI; NOTARI, 2014).

A localização por TDOA não necessita conhecer o tempo em que a emissão originou-se para estimar a posição do transmissor (MUÑOZ, 2009). Essa característica é uma vantagem sobre outros métodos de localização baseados no tempo de chegada (TOA), possibilitando o seu emprego na atividade de guerra eletrônica, uma vez que a informação sobre o tempo em que o sinal foi transmitido é desconhecida para

o sistema de monitoração.

A localização da fonte ocorre a partir do cruzamento de duas ou mais curvas da hipérbole geradas a partir de múltiplas medidas extraídas por meio da mudança da posição dos receptores ou acrescentando mais elementos ao arranjo. A localização em três dimensões pode ser realizada por meio da interseção de hiperbolóides geradas em um plano Oxyz.

Matematicamente, a diferença do tempo de chegada da onda eletromagnética, determinada a partir de dois receptores posicionados em um plano euclidiano xOy nas posições  $P_1(x_1, y_1)$  e  $P_2(x_2, y_2)$ , define uma hipérbole com focos em  $P_1$  e  $P_2$  na qual uma de suas curvas contém a posição do transmissor  $T(x_t, y_t)$  (COMPAGNONI; NOTARI, 2014).

A localização é definida pela interseção de duas ou mais hipérbolas, definidas por um conjunto de no mínimo 3 (três) receptores.

As equações de cada hipérbole formam um sistema não-linear que exige métodos específicos para linearização a fim de determinar o ponto de interseção.

Devido a sua característica de não linearidade, um arranjo formado por apenas 03 (três) receptores em um plano 2-D e por 04 (quatro) para um plano 3-D poderá determinar mais de uma região de interseção, demonstrando ambiguidade nos resultados. A literatura identifica essa situação como *bifurcation problem*. (COMPAGNONI; NOTARI, 2014).

O presente estudo considerou um modelo de localização bidimensional (xOy) a partir de 3 (três) receptores que usa o método de Chan para resolver o sistema hiperbólico que indica a posição do transmissor. Os *scripts* utilizados nos testes foram criados a partir do *software* MATLAB.

## **3 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DOS RECEPTORES SOBRE A PRECISÃO DA LOCALIZAÇÃO**

A acurácia da localização eletrônica por TDOA depende não apenas do algoritmo de localização, mas também do erro na estimação da diferença do tempo de chegada e da geometria entre os receptores e o transmissor (MUÑOZ et al, 2009).

Estudos empregando as propriedades do *Cramer-Rao lowerbound* (CRLB) para otimizar o arranjo de sensores a partir da identificação do tempo de chegada e do ângulo de chegada que

proporcionassem o menor CRLB identificaram que a otimização do arranjo de receptores a partir de uma geometria adequada reduz o erro de localização do transmissor. (CAKIR, 2013).

Na mesma direção, pesquisas sobre o emprego complementar de algoritmos baseados em TDOA a fim de melhorar a acurácia da localização aferida por tempo de chegada do sinal (TOA) identificaram que a posição dos receptores influencia a precisão do resultado e que esta apresenta boa acurácia quando submetida a uma geometria adequada (MARTIN-ESCALONA, BARCELO-ARROY, 2008).

O presente trabalho busca identificar quais variáveis da disposição espacial dos receptores influenciam a precisão da localização e qual comportamento elas apresentam, a fim de propor premissas para a otimização do posicionamento do sistema de guerra eletrônica.

Durante uma operação militar, o posicionamento dos receptores considera aspectos técnicos e táticos, possibilitando atingir a configuração adequada para o desempenho dos sistemas com a adequada segurança dos equipamentos e do pessoal envolvido. É utilizado como referência a área de interesse a qual se deseja monitorar, definida como a região espacial que apresenta alta probabilidade da existência de ameaças.

A partir da avaliação preliminar, os receptores são posicionados próximos à área de interesse por meio de distintos arranjos geométricos que apresentam variações de distâncias e ângulo entre os elementos do conjunto.

A falta de informação sobre a influência da geometria do arranjo de receptores sobre a precisão da localização eletrônica poderá ocasionar um posicionamento indevido dos equipamentos de monitoração reduzindo a capacidade do sistema de aferir a posição do alvo.

## 4 TESTES E RESULTADOS

Foram testados os arranjos de receptores em linha, em cunha, em cunha invertida e circular nos ambientes sem multipercusos e com multipercusos. Utilizou-se o método de Chan para resolver o sistema de localização hiperbólica.

### 4.1 TESTE EM AMBIENTE SEM MULTIPERCURSO

Nesse primeiro teste foram avaliados a resposta do método de Chan em um cenário sem multipercursos ou ruído, sendo identificados os

seguintes resultados:

a) o método de Chan não apresentou nenhuma solução quando os receptores foram posicionados em linha.

b) de acordo com a forma geométrica adotada e a posição do transmissor, o método de Chan apresentará 02 (duas) possíveis soluções. Tal situação demonstra a existência de ambiguidade de resultados, estando alinhado com estudos teóricos sobre a localização por TDOA (COMPAGNONI, 2014). Nesses casos, é necessário um método auxiliar para identificar qual a resposta correta, por exemplo, a direção geral do alvo, obtida por meio de técnicas de Direção de Chegada.

c) o arranjo circular com a área de interesse interna apresentou menor porcentagem de ambiguidade nos resultados, seguido pela disposição em cunha e por último a geometria em cunha invertida, com maior proporção de soluções ambíguas.

### 4.2 TESTE EM AMBIENTE COM MULTIPERCURSO

Nesse teste foi verificado a relação entre a raiz do erro médio quadrático (RMSE) da localização com as seguintes variáveis espaciais: ângulo de interseção entre as hipérbolas, distâncias entre os receptores e ângulos internos do arranjo.

Foram analisadas as geometrias em cunha, em cunha invertida e circular em um cenário com erros provocados por multipercusos, sendo identificadas as seguintes conclusões:

a) o ângulo de interseção entre as hipérbolas relaciona-se com a precisão do resultado no arranjo em cunha e circular. Verificou-se que na medida que o ângulo de interseção cresceu monotonicamente, o RMSE da localização decresceu. Tal relação, no entanto, não foi verificada para a disposição em cunha invertida;

b) para a geometria em cunha e circular existem outras variáveis espaciais que influenciam a precisão da localização além do ângulo de interseção;

c) a geometria circular apresentou resultados com alta precisão quando os receptores são dispostos nos vértices de um triângulo equilátero, mantendo o transmissor no centro. Nessa disposição, quanto maior a distância entre os receptores e o transmissor, maior é a precisão da localização;

d) a geometria circular com a disposição equidistantes dos receptores e transmissor no centro apresentou resultados com menor RMSE do que o arranjo em cunha.

### 4.3 PREMISSAS PARA DISPOSIÇÃO DOS RECEPTORES

Verificou-se que a melhor forma para dispor o sistema de localização por TDOA é a geometria circular com os receptores dispostos sobre os vértices de um triângulo equilátero e o transmissor no centro.

Percebeu-se ainda que para a geometria circular, quanto mais afastados os receptores estiverem do centro da área de interesse menor será o RMSE. Tal configuração garante alta precisão e baixa ambiguidade nos resultados.

No entanto, devido a limitações decorrentes do tipo de operação militar que inviabilize o uso do arranjo circular, é possível posicionar os

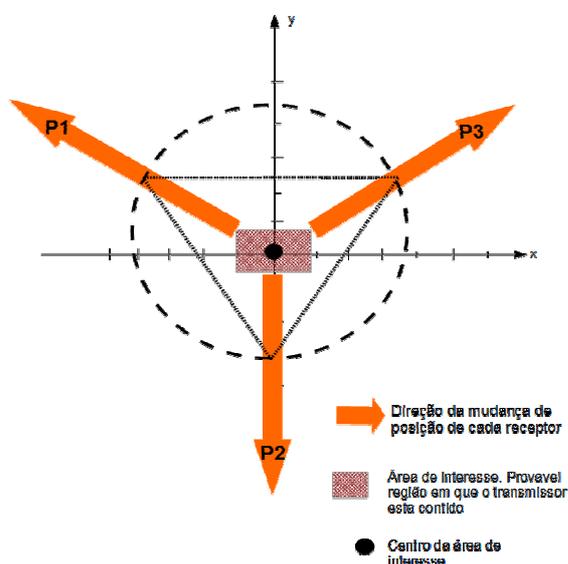
sensores na geometria em cunha e atingir resultados com boa precisão, desde que dispostos a partir de relações adequadas.

As geometrias em linha e cunha-invertida, por sua vez, são inadequadas para desdobrar sistemas TDOA devido a dificuldade para o processamento matemático dos dados de entrada.

As informações obtidas complementam a doutrina sobre o assunto, auxiliando o planejamento de guerra eletrônica.

A Figura 1 apresenta os parâmetros a serem considerados para a disposição em geometria circular.

**Figura 1—Parâmetros do arranjo circular**



Fonte: o autor (2018).

Para aumentar a precisão da localização para disposição circular deve-se observar as seguintes situações:

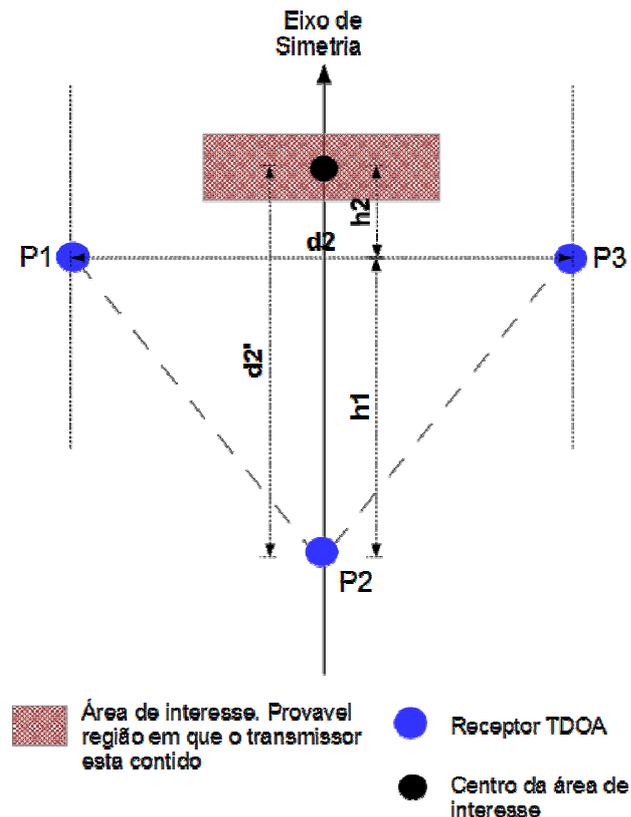
- a) a disposição circular apresenta RMSE menor que a disposição em cunha;
- b) o percentual de resultados ambíguos é menor para a geometria circular do que para o arranjo em cunha;
- c) área de interesse deve ser posicionada ao centro do círculo formado pelo vértice de um triângulo equilátero;
- d) a distância do centro da área de interesse até cada receptor deve ser igual;

e) quanto mais afastado os receptores forem posicionados do centro da área de interesse maior será a precisão da localização;

f) existem outras configurações em que os receptores podem ser dispostos na geometria circular que apresentam um RMSE ligeiramente menor do que obtido utilizando a formação circular a partir de um triângulo equilátero, contudo a falta de um padrão de formação inviabiliza a utilização desses outros tipos de configuração.

A **Figura 2** define os principais parâmetros a serem consideradas durante a disposição em cunha.

**Figura 2—Parâmetros do arranjo em cunha**



Fonte: o autor (2018).

A maior precisão da localização para disposição em cunha é obtida por meio da adequação com as seguintes condições:

- a) posicionar o arranjo de forma simétrica, com o receptor central P2 e o centro da área de interesse (região onde encontra-se o transmissor) sobre o eixo de simetria;
- b) a área de interesse deve estar contida dentro dos limites definidos pelos receptores das extremidades P1 e P3 a fim de garantir maior ângulo de interseção;
- c) maior distância ( $d2'$ ) entre o receptor central P2 e o transmissor para garantir maior comprimento da região correlacionada;
- d) maior distância ( $d2$ ) entre os receptores P1 e P3 a fim de proporcionar maior ângulo de interseção entre as hipérboles. Não ultrapassar o limite da região correlacionada;
- e) para as posições em que  $h1 \geq h2$ , a distância ( $d2$ ) entre P1 e P3 pode atingir o valor máximo de  $2x(h1+h2)$ , sem que eles saiam do ponto limite de correlação da linha.
- f) posicionar os receptores P1 e P3 mais próximos do transmissor (**menor valor de h2**). Nas simulações foi utilizada a distância mínima de 1 Km;

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a influência da disposição espacial dos receptores de guerra eletrônica baseados em diferença de tempo de chegada (TDOA) sobre a precisão da localização.

A acurácia do resultado de um sistema por TDOA sofre a influência do canal, do erro na estimação do tempo de chegada, do algoritmo de localização e da geometria dos receptores.

Considerando a incapacidade para alterar parâmetros relacionados ao *hardware*, ao algoritmo de localização e ao canal, uma forma alternativa para reduzir o erro de localização seria dispor os receptores em uma determinada geometria que possibilite a máxima precisão do sistema.

Desse modo, esse trabalho buscou identificar variáveis espaciais que apresentem relação com a precisão em um ambiente de multipercursos e modo como se relacionam, a fim de estruturar regras para otimizar a escolha da posição e auxiliar o planejamento de Guerra Eletrônica.

Verificou-se que a melhor forma para dispor o sistema de localização por TDOA é a geometria circular com os receptores dispostos sobre os vértices de um triângulo equilátero e o transmissor no centro, contudo, observou-se que também é possível posicionar os receptores na geometria em cunha e atingir resultados com boa precisão quando dispostos por meio de regras adequadas.

Cabe ressaltar que as conclusões atingidas foram baseadas no método de Chan para solucionar o sistema hiperbólico. Mesmo sendo um método consagrado, não é possível garantir que essas relações sejam mantidas caso o algoritmo de localização seja baseado em outro modelo matemático, cabendo maiores estudos a fim de confirmar se as conclusões apresentadas nesse trabalho podem ser mantidas para outros métodos.

Dessa forma, percebe-se que o tipo de geometria adotada e a escolha das posições, com distâncias e ângulos distintos, possuem grande influência sobre a precisão da localização. Logo, o estudo sobre as relações espaciais que permitem a otimização do posicionamento dos receptores é de grande importância, uma vez que permite reduzir o erro de localização em ambientes com multipercursos, garantindo maior rapidez para identificação e contenção de possíveis ameaças em um cenário militar.

As análises apresentadas complementam as informações doutrinárias sobre o assunto e contribuem para o planejamento de guerra eletrônica a fim de garantir a máxima eficiência do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAKIR, O., et al. Dynamic orientation of receiver arrays using particles warm optimisation. **Electronics Letters**, v. 49, n. 21, p. 1313-1315, nov. 2013.

COMPAGNONI, Marco; NOTARI, Roberto. TDOA-based localization in two dimensions: the bifurcation curve. **Fundamenta Informaticae**, v. 135, n. 1-2, p. 199-210, 2014.

MARTIN-ESCALONA, Israel; BARCELO-ARROY, Francisco. Impact of geometry on the accuracy of the passive-TDOA algorithm. In: Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2008. IEEE 19th International Symposium. **Proceedings...** France (Cannes): IEEE, 2008. p. 1-6.

MUÑOZ, David, et al. **Location Techniques and Applications**. Burlington: Elsevier, 2009. 257p.

\*Artigo realizado a partir do trabalho de conclusão do Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (CEAAE) em 2015 pelo Capitão de Comunicações Leonardo Possideli Moreira do Exército Brasileiro. Email: leonardo.possideli@eb.mil.br