

MÉTODO INSPIRADO NO 5G PARA A DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIA ENTRE DRONES EM COMPOSIÇÃO DE ENXAME

5G-inspired method for ranging and identification of UAVs in swarming composition

Madjer de Andrade Martins¹, David Alan Garren², Ralph Clark Robertson³

Resumo: O emprego de veículos aéreos não tripulados (VANT) é um fato na guerra moderna. O benefício de usar *drones* como um enxame, trabalhando em conjunto para realizar uma tarefa, ajudará a salvar vidas. No entanto, a comunicação entre *drones* em um enxame é um desafio com a tecnologia disponível, dados principalmente os requisitos de energia para operar em um pequeno dispositivo. Inspirado nas Redes Móveis de Quinta Geração (5G) com o recurso *massive machine-type communication* (mMTC), este trabalho oferece um novo método de identificação e alcance para *drones* no enxame. O canal de acesso aleatório físico de comunicação 5G, ou apenas preâmbulo, ao transportar uma sequência Zadoff-Chu (ZC), permitiria que os *drones* executassem um algoritmo capaz de identificar e localizar outros *drones* no enxame. Esse algoritmo forneceria baixo consumo de energia, menos interferência entre os dispositivos e ainda produziria bons resultados de erro quadrático médio (MSE) quando um filtro casado (MF) é aplicado, uma vez que a sequência ZC possui algumas características únicas. As simulações consideraram um número diferente de *drones* em um enxame ($D = [1, 2, 4, 5, 10, 20, 50, 100]$), distribuídos em ambientes com diferentes níveis de ruído (relação sinal-ruído — SNR = $[-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20]$). Os resultados das simulações demonstraram potencial promissor da sequência ZC utilizada no preâmbulo de uma rede de comunicação 5G de VANT em um enxame.

Palavras-chave: Comunicação 5G. OFDM. Autocorrelação. Filtros casados. Sequências pseudoaleatórias. Veículos autônomos não tripulados. Método do erro médio quadrático.

Abstract: The employment of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is currently a fact in modern warfare. The benefit of using drones as a swarm, working together to accomplish a task, will help save lives. However, the communication among drones within a swarm is a challenge with the available technology, due mainly to the power requirements to operate in a small device. Inspired by the Massive Machine-Type Communication (mMTC) 5th Generation Mobile Networks (5G), this work offers a novel method of identification and ranging for drones in the swarm. The 5G communication channel's Physical Random-Access Channel, or just preamble, when carrying a Zadoff-Chu (ZC) sequence, allows the drones, by running an algorithm, to identify and range other drones in the swarm. This algorithm is expected to provide low power, less interference between devices, and yet yield good Mean Square Error (MSE) results when a Matched Filter (MF) is applied since the ZC sequence has some unique features. Simulations considered a different number of drones within a swarm, $D = [1, 2, 4, 5, 10, 20, 50, 100]$ UAVs, embedded in different levels of noise environments – SNR = $[-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20]$. Simulation results demonstrate the promising potential of the ZC sequence used in the preamble of a 5G communication network of UAVs in a swarm.

Keywords: 5G mobile communication. OFDM. Autocorrelation. Matched filters. Pseudo random sequences. Unmanned autonomous vehicles. Mean square error methods.

1. Capitão de Corveta do Corpo de Engenheiros da Marinha. Mestre em Engenharia Elétrica pela Naval Postgraduate School. Ajudante de Divisão de Estudos e Projetos na Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha (DCTIM), Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, RJ – Brasil. E-mail: madjer@marinha.mil.br

2. PhD pela William and Mary University. Professor associado da Naval Postgraduate School, Department of Electrical and Computer Engineering, Monterey, Califórnia – Estados Unidos da América. E-mail: dagarren@nps.edu

3. PhD pela University of Texas. Professor da Naval Postgraduate School, Department of Electrical and Computer Engineering, Califórnia – Estados Unidos da América. E-mail: crobertson@nps.edu

1. INTRODUÇÃO

A guerra moderna deu um grande passo na proteção de vidas humanas quando os *drones* foram usados em operações pela primeira vez. Em um contexto no qual o objetivo principal é proteger os interesses e vidas da nação, o futuro da guerra seria definido pelo nível de tecnologia aplicada em veículos autônomos não tripulados (VANT) — que a partir daqui chamaremos simplesmente de *drones*.

A operação de *drones* em composição de enxame como alternativa a apenas um deles aumentaria a gama de missões possíveis que poderiam ser realizadas, como por exemplo o aumento de carga útil transportada para o cenário de guerra. Os ambientes onde os drones seriam aplicados, na maioria dos casos, contêm ruído eletromagnético, além de os enxames serem suscetíveis ao efeito Doppler.

A pesquisa descrita aqui teve como foco a análise do uso do preâmbulo, um espaço de dados presente em pacotes de comunicação 5G, que neste caso levaria uma sequência Zadoff-Chu (ZC) com informações de identificação e posição relativas a um *drone* de referência. Mais especificamente, esta pesquisa estabelece um método para obter essas informações por meio da aplicação de um filtro casado (do inglês *matched filter* — MF).

Os MF são amplamente utilizados em sistemas de radar, especialmente para a detecção de alvos. Aqui, a conhecida correlação cruzada, quando aplicada a uma sequência ZC, e às amostras que contêm essa mesma sequência ZC, atuam como um filtro. Os resultados obtidos para este filtro exibem um pico exatamente na posição em que a sequência ZC é iniciada em um grande vetor de amostras. Dados os resultados esperados para o MF, é possível avaliar a influência do ruído e o efeito Doppler, alterando-se esses parâmetros quando os *drones* estão localizados em cenários com essas adversidades.

O emprego de *drones* em zonas de combate é relativamente novo, tendo seu início com a Guerra Fria (VALAVANIS; VACHTSEVANOS, 2014), e estudos recentes investigam as aplicações de muitos deles operando em conjunto, assim como quão eficientes eles poderiam ser em composição de enxame (JIA et al., 2018).

Qiannan Cui produziu em seus estudos de 2017 uma abordagem para determinar a melhor rede para gerenciar enxames de malha: redes *ad hoc* móveis (*mobile ad hoc network* — MANET) ou redes *ad hoc* veiculares (*vehicular ad hoc networks*

— VANET) (CUI et al., 2017). Sua abordagem separou o enxame em pequenos grupos, cada grupo tendo um *drone* mãe que gerencia a comunicação com outros grupos de *drones*.

Uma recente pesquisa de Luji Cui e colaboradores, de 2015, mostrou resultados promissores de estimativa de distanciamento empregando um sistema *orthogonal frequency division-multiplexing* (OFDM) de 60 GHz, mais especificamente utilizando o chamado intervalo de guarda como canal de comunicação (CUI et al., 2015). Além disso, Savaux e Bader (2015) implementaram em seu trabalho de 2015 um método fundamentado em erro quadrático médio (*median squared error* — MSE) para analisar o desempenho do canal OFDM. Finalmente, Min Hua et al. (2014) analisaram o efeito Doppler no desempenho de uma sequência ZC em seu estudo de 2014.

O trabalho aqui apresentado é uma combinação de todas as pesquisas mencionadas acima e, por meio de gráficos de MSE, analisa o desempenho de sequências ZC como forma de identificar e localizar *drones* operando em composição de enxame em um ambiente ruidoso.

2. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NÃO TRIPULADOS

2.1. 5G APLICADO À COMUNICAÇÃO DE UM ENXAME DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS NÃO TRIPULADOS

Uma possível solução para a comunicação entre os *drones* seria a ainda nova tecnologia 5G, que proporcionaria comunicação entre um grande número de dispositivos usando o recurso conhecido como *massive machine-type communication* (mMTC), proporcionando baixo custo e baixo consumo de energia (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018), características necessárias em um ambiente denso de VANT.

A concatenação de símbolos no domínio do tempo para 5G é dada por uma sequência de preâmbulo, símbolo (ou símbolos) e intervalo de guarda. O preâmbulo também é conhecido como canal de acesso aleatório físico (*physical random access channel* — PRACH). Dependendo de seu formato, o preâmbulo 5G pode ter dois comprimentos de sequência suportados: um de comprimento curto $L_{RA} = 139$ e outro de comprimento longo $L_{RA} = 839$ (3GPP TS 38.211, 2019). A Figura 1 apresenta

um cenário hipotético em que *drones* enviam informações de preâmbulo para uma nuvem mMTC 5G. Em uma situação real os preâmbulos não estariam sincronizados e ainda haveria ruído e efeito Doppler associados ao sinal.

O preâmbulo na comunicação 5G fornece informações de sincronização para o *uplink* (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018). Uma vez que os *drones* não precisariam de sincronização, o preâmbulo poderia ser utilizado para outro propósito — por exemplo, conter uma sequência com as informações de identificação de cada VANT.

A sequência ZC foi implementada no campo do preâmbulo desta pesquisa, e os detalhes de como as informações de distância e identificação estão incluídos nele serão explicados nas próximas seções.

2.2. A SEQUÊNCIA DE ZADOFF-CHU E SUAS PROPRIEDADES

Inicialmente estudada em 1972 por David C. Chu (1972), a sequência ZC é uma família de sequências polifásicas normalmente utilizadas como os sinais de referência sonora (SRS) em uma comunicação 5G. As sequências ZC são casos particulares de sequências polifásicas $b_n = e^{-\frac{jn2\pi}{N}}$, em que o fator n é separado em dois fatores, m e p_n , sendo m qualquer inteiro coprimo com um número ímpar N e p_n o n -ésimo número prônico: $n(n+1)$.

Uma sequência ZC é dada pela Equação (CHU, 1972; CUI et al., 2015; DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018):

$$a_n = \begin{cases} e^{\frac{j\pi p_n n^2}{N}} = e^{-\frac{j\pi R n^2}{N_{ZC}}}; & 0 \leq n < N_{ZC}, N_{ZC} \text{ even} \\ e^{\frac{j\pi p_n m(n+1)}{N}} = e^{-\frac{j\pi R m(n+1)}{N_{ZC}}}; & 0 \leq n < N_{ZC}, N_{ZC} \text{ odd} \end{cases} \quad (1)$$

Em que:

m = um inteiro positivo que é primo de N ;

N = ímpar;

p_n = o n -ésimo número prônico (definido como $n(n+1)$) para $0 \leq n < N_{ZC}$.

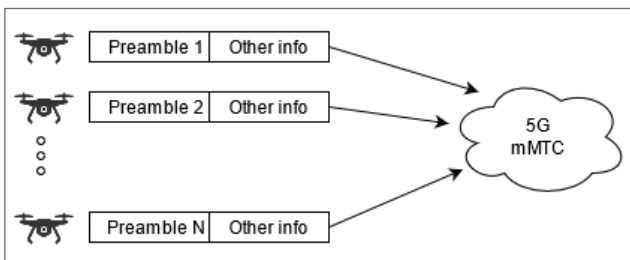


Figura 1. Drones enviando informações para uma rede em nuvem 5G *massive machine-type communication*.

Uma vez que p_n , doravante chamado de *root index* R , define a criação da R -ésima raiz da sequência ZC com comprimento N_{ZC} (MATLAB, 2020), R poderia fornecer identificação para os *drones*. Se o comprimento da sequência é o maior comprimento usado para o preâmbulo no 5G, por exemplo 839, é possível identificar até 839 *drones* em um enxame. Essa foi a razão pela qual, nesta pesquisa, o comprimento utilizado para o preâmbulo foi $L_{RA} = 839$; ele pode fornecer mais espaço para *drones* em um cenário de enxame.

David Chu estendeu a ideia de sequência polifásica de Frank para um código de qualquer comprimento N (embora o requisito acima seja ímpar, Chu também fornece uma fórmula separada se N for par), demonstrando matematicamente uma propriedade valiosa da sequência ZC, a propriedade de amplitude constante igual a 1 (*constant amplitude* — CA) e autocorrelação nula (*zero auto-correlation* — ZAC) (CAZAC) (FRANK; ZADOFF; HEIMILLER, 1962; CHU, 1972; SETA, 2010). A sequência é dita CA se, para qualquer valor de R , tem uma amplitude constante $|a_n| = 1$ (FRANK; ZADOFF; HEIMILLER, 1962).

Um motivo digno para a utilização de sequências do tipo CA nesta pesquisa é a estimativa precisa do canal (CHUNG, 2020), bem como o recurso de economia de energia muito útil em um enxame de *drones*. A Figura 2A apresenta graficamente essa propriedade da sequência ZC. Por outro lado, uma dada sequência é dita ZAC se tem uma autocorrelação periódica ideal (SETA, 2010). A Figura 2B mostra uma grande autocorrelação no ponto zero de uma série de números $k = 0$ (*lag* = 0), o que demonstra a propriedade ZAC da sequência ZC. A próxima seção explicará essa propriedade das sequências ZC, bem como o porquê de essa propriedade ser importante neste trabalho.

Quando a correlação cruzada linear é aplicada entre uma sequência ZC e um vetor maior contendo essa mesma sequência, funciona como um MF (MANOLAKIS; INGLE; KOGON, 2005) (Equação 2):

$$R_{XY}[k] = E\{x[n]y^*[n-k]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y^*[n-k] \quad (2)$$

Em que, neste trabalho:

$x[n]$ = uma sequência numérica Zadoff-Chu;

$y[n-k]$ = um extenso vetor de valores que contém $x[n]$;

k = a posição, ou *lag*, em que $x[n]$ está localizado em $y[n]$.

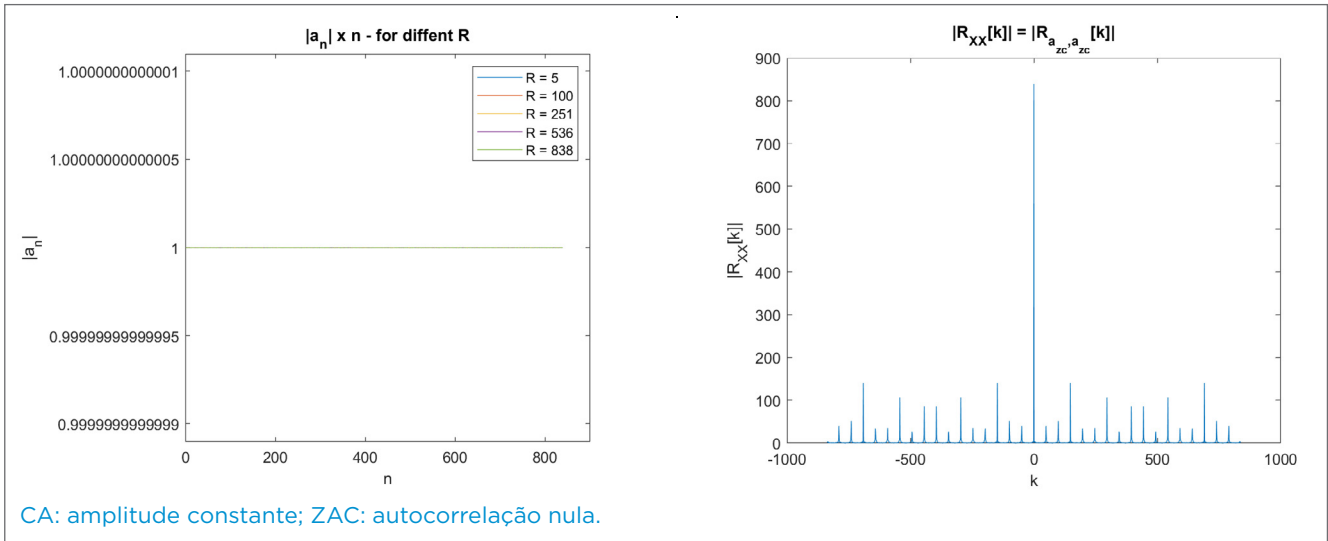


Figura 2. Propriedade constant amplitude and zero auto-correlation (CAZAC) das seqüências numéricas Zadoff-Chu.

Este trabalho identifica $x[n]$ como a seqüência ZC $a_{zc}[n]$ e a amostra longa, $y[n]$, que contém uma seqüência ZC $a_{zc}[n]$, como $s[n]$. A Figura 3 revela a posição correspondente em que a seqüência ZC foi inserida ($ZC_{POS} = 3.215$), apresentando um impulso de amplitude $N_{zc} = 839$.

3. DISTANCIAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

3.1. DESCOBRINDO O DISTANCIAMENTO ENTRE OS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

A seção 2.2 demonstrou que o pico máximo da correlação cruzada R_{xy} estará na posição k , em que o *drone* está localizado em relação ao *drone* referência. Com essa informação nas mãos, um algoritmo poderia ser aplicado para calcular essa posição em termos de distância. Assim, suponhamos que um *drone A* receba o preâmbulo transmitido por outro *drone B*. Agora, suponhamos que o *drone B* possua um algoritmo capaz de aplicar a correlação cruzada da extensa seqüência numérica recebida com sua própria seqüência de 839 elementos. É esperado que a resultante R_{xy} contenha um valor máximo exatamente na posição k , que representa a distância entre os dois *drones* (Equação 3):

$$Distância_{A,B} = f(\text{Max}(R_{xy}[k])) = f(\text{Max}(R_{a_{zc},s[k]})) \quad (3)$$

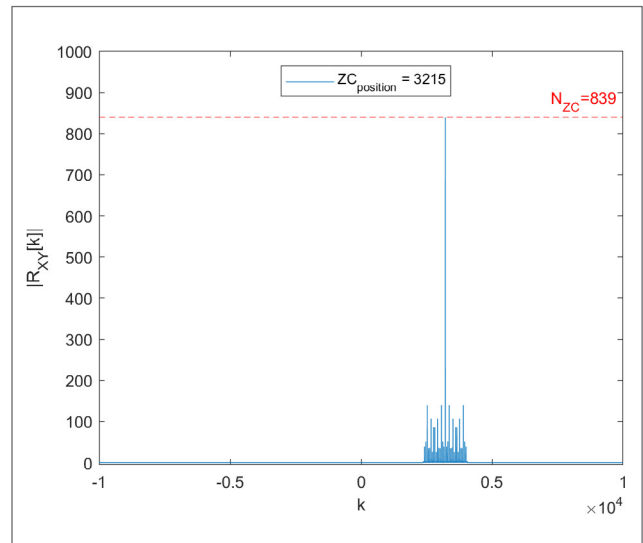


Figura 3. R_{xy} de uma seqüência Zadoff-Chu e o vetor de zeros contendo essa mesma seqüência.

3.2. IDENTIFICANDO OS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Como já mencionado, a seqüência ZC pode ser utilizada como método de identificação para *drones* em uma composição de enxame. Considerando-se os fatores N_{zc} e R fixos, a seqüência de números será sempre única para cada *drone*. Tomando-se o comprimento das seqüências para ser fixado em $N_{zc} = 839$, o único fator variável na seqüência é o *root index* R . Como R deve estar no intervalo

$0 < R < N_{ZC}$, existem apenas 838 seqüências ZC possíveis, de comprimento $N_{ZC} = 839$. Dito isto, os *drones* poderiam ter um banco de memória com todas as seqüências utilizadas no enxame, em que o *root index* R seria o identificador de cada *drone*.

Sendo uma seqüência $s[n]$ de valores — o preâmbulo — recebida pelo *drone*, este aplicaria um algoritmo interno de correlação cruzada linear $R_{a_{ZC}^*s[k]}$ e identificaria o *drone* aplicando a ZC correta para o R daquele que enviou a seqüência especificada, pois o máximo valor de $R_{a_{ZC}^*s[k]}$ ocorrerá apenas para a seqüência ZC específica desse *drone*.

A Figura 4 mostra um sinal contendo dois *drones* hipotéticos, identificados pelos *root indexes* $R = 17$ e $R = 19$, localizado nas amostras das posições $k = 3.215$ e $k = 4.702$. Aplicando-se a correlação cruzada entre as amostras $s[n]$ e a seqüência ZC a_{ZC} com $R = 17$, é possível identificar a posição do *drone* na amostra de posição 3.215 de $R_{a_{ZC}^*s[k]}$. O mesmo método funciona também para outro *drone*, identificado por $R = 19$ na amostra de posição 4.702 de $R_{a_{ZC}^*s[k]}$.

3.3. SIMULAÇÕES

As simulações realizadas neste trabalho incluem mudanças no número de *drones* D do enxame, assim como atribui distâncias ZC_{POS} para cada *drone* no enxame em relação a um de referência.

Para auxiliar no entendimento dos cenários simulados, um *drone*, que recebe os preâmbulos de todos os outros no cenário, será considerado como o ponto de vista de um *drone*

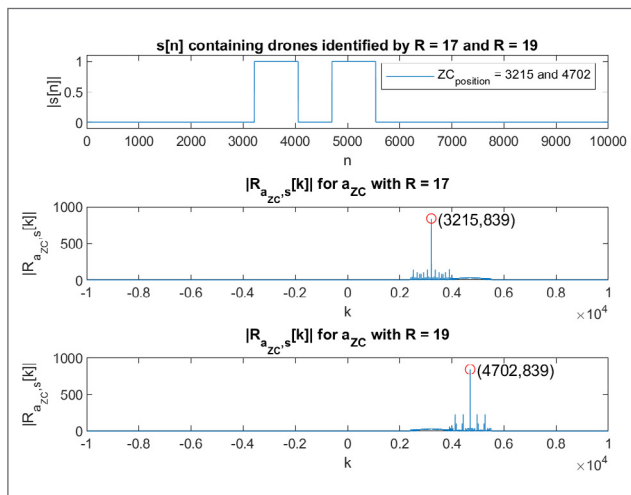


Figura 4. Identificação dos *drones*.

de referência hipotético. Outros *drones* que estejam enviando os preâmbulos são referidos aqui como $R\#$, ilustrando que eles têm um *root index* R diferente, não necessariamente o número indicado por $\#$. Assim, as seqüências ZC para cada *drone* $R\#$ foram inseridas em um grande vetor com 10 mil amostras $s[n]$.

O número de *drones* D nas simulações variou entre as seguintes quantidades: 1, 2, 4, 5, 10, 20, 50 e 100. Era esperado que o aumento do número de *drones* no cenário considerado afetasse a contagem de erros.

Esta pesquisa não excluiu a possibilidade de que um mesmo ZC_{POS} fosse alocado para mais de um *drone* $R\#$ ou sobrepujasse amostras da seqüência ZC de outros *drones*, conforme demonstra a Figura 5. Este método permite que alguns *drones* tenham a mesma distância do de referência.

4. RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa foram obtidos com o emprego de mil iterações para um método de Monte Carlo, utilizando vetores $s[n]$ com $N = 10.000$ valores. Após todos os cálculos de MSE para cada cenário com *drones* D , foi gerado um gráfico de MSE combinado, para o eixo y, contendo no eixo x valores de ruído (SNR), com curvas representando diferentes números de *drones* D nos enxames. A Figura 6 mostra o MSE para um cenário que considera vários diferentes SNR.

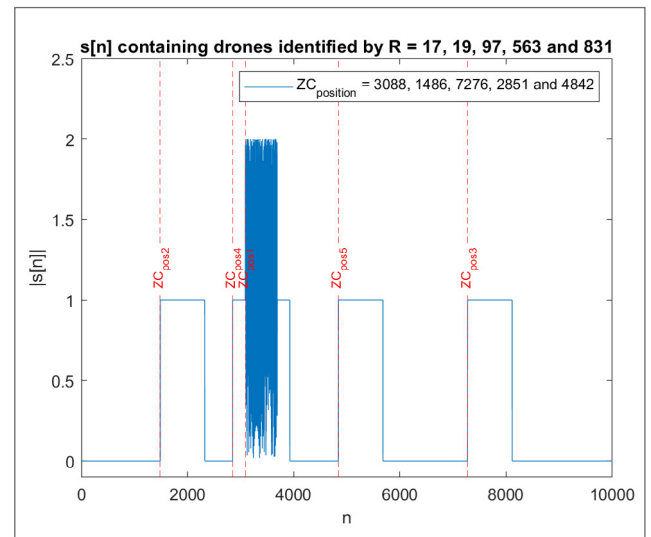


Figura 5. Sobreposição de seqüências Zadoff-Chu na seqüência $s[n]$.

5. CONCLUSÃO

O objetivo principal desta pesquisa foi alcançado ao fornecermos uma compreensão completa do funcionamento da sequência ZC como um identificador e fator de alcance para *drones* em um enxame. Os excelentes resultados em um cenário sem efeito Doppler, mas com baixo SNR, demonstram o potencial promissor da sequência ZC usada no pré-amplio de uma 5G rede de comunicação de VANT em enxame.

Trabalhos futuros podem obter outros resultados para mais cenários, que poderiam incluir efeito Doppler, refinamento na seleção dos R_s , e casos extremos em que todos os *drones* estão localizados em um mesmo ZC_{POS} — distância para um *drone* de referência. Esses resultados permitiram uma compreensão sobre fatores de influência na comunicação de um enxame de VANT e forneceriam dados úteis para a mitigação de erros.

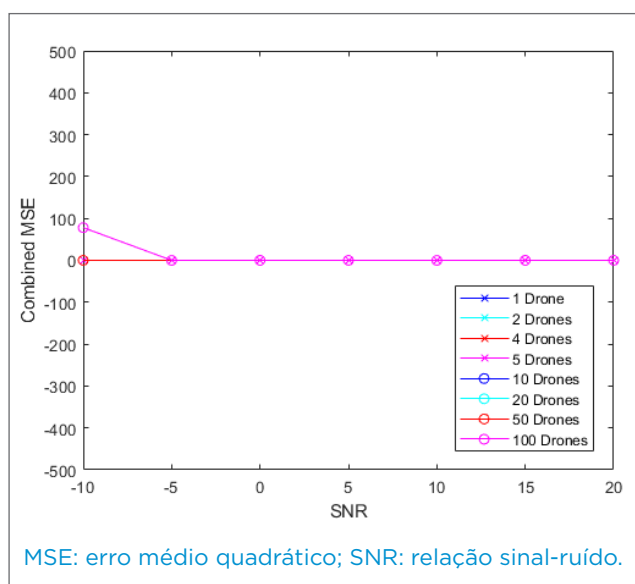


Figura 6. Resultado de erro médio quadrático em um ambiente ruidoso.

REFERÊNCIAS

3GPP TS 38.211 v15.7.0. [S.l.], 2019.

CHU, D. Polyphase codes with good periodic correlation properties (corresp.). *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 18, n. 4, p. 531-532, 1972. <https://doi.org/10.1109/TIT.1972.1054840>

CHUNG, C.-D.; CHEN, W.-C.; YANG, C.-K. Constant-amplitude sequences for spectrally compact ofdm training waveforms. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 11, p. 12974-12991, 2020. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3017524>

CUI, L.; ZHANG, H.; LIU, X.; GULLIVER, T.A. A ranging method for 60ghz ofdm system based on improved preamble sequence. In: IEEE PACIFIC RIM CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, COMPUTERS AND SIGNAL PROCESSING, 2015. *Anais [...]*. IEEE, 2015. p. 246-251. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2015.7334842>

CUI, Q.; LIU, P.; WANG, J.; YU, J. Brief analysis of drone swarms communication. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED SYSTEMS, 2017. *Anais [...]*. 2017. p. 463-466. <https://doi.org/10.1109/ICUS.2017.8278390>

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *5G NR: the next generation wireless access technology*. Londres: Academic Press, 2018.

FRANK, R.; ZADOFF, S.; HEIMILLER, R. Phase shift pulse codes with good periodic correlation properties (corresp.). *IRE Transactions on Information Theory*, v. 8, n. 6, p. 381-382, 1962. <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057786>

HUA, M.; WANG, M.; YANG, K. W.; ZOU, K. J. Analysis of the frequency offset effect on zadoff-chu sequence timing performance. *IEEE Transactions on Communications*, v. 62, n. 11, p. 4024-4039, 2014. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.2364597>

JIA, N.; YANG, Z.; LIAO, T.; DOU, Y.; YANG, K. A system dynamics model for analyzing swarming uavs air combat system. In: ANNUAL CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING, 13., 2018. *Anais [...]*. IEEE, 2018. p. 74-81. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2018.8428707>

MANOLAKIS, D.; INGLE, V.; KOGON, S. *Statistical and adaptive signal processing: spectral estimation, signal modeling, adaptive filtering and array processing*. Norwood: Artech House, 2005.

MATLAB. Version 9.9.0 (R2020b). Natick: The MathWorks Inc., 2020.

SAVAUX, V.; BADER, F. Mean square error analysis and linear minimum mean square error application for preamble-based channel estimation in orthogonal frequency division multiplexing/offset quadrature amplitude modulation systems. *IET Communications*, v. 9, n. 14, p. 1763-1773, 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2014.1181>

SETA . Sequences and Their Applications - SETA. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 6., 2010, Paris. *Anais [...]*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. (Theoretical Computer Science and General Issues, n. 6338.)

VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J. *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Dordrecht: Springer, 2014.