



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102017022081-8 A2



(22) Data do Depósito: 13/10/2017

(43) Data da Publicação Nacional: 07/05/2019

(54) **Título:** SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA A FORMAÇÃO DE FEIXES MÚLTIPLOS PARA SISTEMAS DE ANTENAS DIGITAIS DE RADIOFREQUÊNCIA

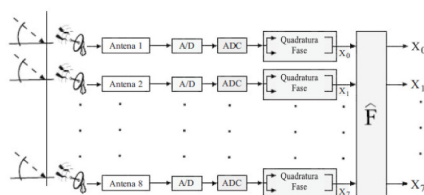
(51) **Int. Cl.:** H04B 7/08.

(52) **CPC:** H04B 7/086; H04B 7/0897.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM.

(72) **Inventor(es):** RENATO JOSÉ DE SOBRAL CINTRA; FÁBIO MARIANO BAYER; DIEGO FELIPE GOMES COELHO.

(57) **Resumo:** A presente invenção, que se situa no campo da engenharia eletrônica e de telecomunicações, descreve um sistema de computação de direção de feixes em conjunto de antenas alinhadas usando uma aproximação para a transformada discreta de Fourier, conhecida pela sigla DFT e se baseia em uma aproximação com reduzida complexidade computacional resultando em hardware mais simples necessitando apenas de operações de soma e deslocamento de bits, e compreende a substituição da DFT por uma transformada aproximada, tendo como consequência, a implementação em hardware ou software com redução da complexidade computacional, do consumo de energia e também do tempo de necessário para a computação do feixe.



SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA A FORMAÇÃO DE FEIXES MÚLTIPLOS PARA SISTEMAS DE ANTENAS DIGITAIS DE RADIOFREQUÊNCIA

01. A presente inovação pertence ao campo da eletrônica, mais especificamente do tratamento de sinais, exatamente do processamento de sinais, por meio de matriz específica, para a formação de feixes múltiplos para sistemas de antenas digitais de radiofrequência.

→ Análise do estado da arte

02. Uma matriz linear uniforme de antenas é um grupo de sensores ou antenas implementados com um padrão geométrico que coleta sinais eletromagnéticos ou acústicos usados no processamento para a formação de feixes. A formação de feixe digital, ou *beamforming*, é uma técnica de processamento digital de sinais (DSP) utilizada em matrizes de antenas de rádio frequência (RF) para a transmissão e recepção de sinais, fornecendo versatilidade no domínio espacial.

03. O objetivo do *beamforming* é estimar a amplitude de um sinal em uma direção desejada, tanto na recepção como na transmissão, na presença de sinais de ruído e interferência a fim de conseguir seletividade espacial. O receptor de *beamforming* tem a capacidade de formar feixes múltiplos, cada um com uma direção diferente.

04. A formação de feixes é necessária para melhorar a direcionalidade da propagação de ondas baseado nas suas direções de chegada (DOAs). O conhecimento da direção de máxima sensibilidade é necessário para objetivos múltiplos, sobretudo, para monitorar continuamente ameaças em sistemas de radar, sonar e sistemas sismológicos. Além disso, possuem grande importância na transmissão

de sinais de rádio, comunicações sem fio, radioastronomia, acústica e biomedicina.

05. O sinal procedente de uma fonte chega a cada antena e é processado após percorrer uma considerável distância entre a fonte e a antena. O sinal percorre diferentes distâncias e caminhos, fazendo com que existam atrasos na chegada do mesmo às antenas. O processo de formação de feixe ajusta-se à distância e a fase de cada sinal para compensar os diferentes atrasos e rotas.

06. Estes ajustes são alinhados em cada antena para os sinais que chegam de uma direção particular. Os sinais recebidos são somados e aqueles que não estão alinhados ou que chegam de outras direções são anulados entre si, ao passo que os sinais que chegam da direção de formação do feixe incrementam-se construtivamente para melhorar a medida de relação sinal-ruído. Mediante o ajuste eletrônico da fase em cada trajetória, a antena é direcionada de forma efetiva na direcionalidade correta. Para isso, em um sistema de *beamforming*, N antenas são dispostas em uma matriz linear. A frequência da antena é tal que cada sinal pode ser amplificado, filtrado e reconvertido a uma frequência imediata (IF) para que possa ser digitalizada por um conversor analógico/digital (A/D). A amostragem sincronizada em todos os canais de RF é obrigatória para preservar uma relação de fase fixa na formação de feixe. As amostras de cada A/D são processadas como a soma da parte real (I , fase) e a parte imaginária (Q , quadratura) ($I+Q$) para serem processadas por um filtro passa-baixa em um ADC (*analog-to-digital converter*), que também inclui a fase específica do canal e os ajustes de ganho para os pesos na formação de feixes. Os N sinais $I+Q$ são somados em um bloco de somatório para produzir o sinal final.

07. A sequência temporal é combinada linearmente pelo *beamformer* ou formador de feixes, da mesma forma que um filtro de resposta ao impulso finita (filtro FIR) combina os dados amostrados

temporalmente. Para sinais de onda de banda estreita que se propagam no espaço, um filtro de sinais de tempo discreto é usado para processamento. Neste filtro, o sinal de saída na amostra k , representado por X_k , é dado por uma combinação linear das amostras coletas pelos arranjo espacial de sensores. Desta forma, para um sinal x_n e N sensores no tempo n , temos que:

$$X_k = \sum_{n=1}^N w_n^* \cdot x_n \quad (1),$$

em que $*$ representa o complexo conjugado e w_n representa o valor do peso complexo para o n -ésimo sensor. Os pesos dos sensores são números complexos, dado que o receptor usa cada um dos sensores para gerar um dado em fase e quadratura.

08. Notemos que (1) pode ser escrito de forma matricial como:

$$X = W^H \cdot x \quad (2),$$

em que, x é o vector do sinal de entrada de comprimento N , X o vetor do sinal de saída de comprimento N , W o vetor de pesos para cada sensor e o superescrito H representa o hermitiniano da matriz W (matriz complexa conjugada).

09. Uma CPU analisa, soma e ajusta os coeficientes de fase e quadratura para controlar, seguir ou adaptar-se a novos objetivos. A versatilidade que oferece a análise mediante *beamforming* é muito ampla dado que há muitas aplicações em que é necessário trocar a função de filtragem em tempo real para manter a supressão interferência do sinal eficaz. Esta mudança é facilmente implementada em um sistema de amostragem discreto, alterando a forma em que o *beamformer* combina os dados do sensor.

10. Uma técnica para construir feixes independentes de RF de forma múltipla é baseada na aplicação da DFT de N pontos para cada tempo de amostragem. A DFT tem um papel importante no projeto, análise e realização de sistemas e algoritmos de tratamento de sinais

em tempo discreto com aplicações em várias áreas do conhecimento, sobretudo em processamento de sinais. Além disso, as propriedades da DFT permitem analisar e projetar sistemas no domínio da frequência de modo conveniente e prático.

11. A DFT pode ser vista como uma transformação linear que

relaciona um vetor de entrada $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_N \end{bmatrix}^T$ de comprimento N a um vetor de saída com N coeficientes espectrais, denotado por

$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & \dots & X_N \end{bmatrix}^T$, da seguinte forma:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \omega_N^{kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

em que $j = \sqrt{-1}$ e $\omega_N = \exp \left\{ -\frac{2\pi j}{N} \right\}$ é a N -ésima raiz da unidade.

12. A expressão acima pode ser colocada em formato matricial, mediante a seguinte relação:

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}_N \cdot \mathbf{x} \quad (3),$$

em que $\mathbf{F}_N$ é a matriz de transformação da DFT, cujos (i, k) -ésimos

elementos são dados por $F_{i,k} = \omega_N^{(i-1)(k-1)}$, para $i, k = 1, 2, \dots, N$.

13. Um fator de influência na eficiência computacional da DFT é a quantidade de multiplicações por elementos de ponto flutuante exigidos pelo algoritmo que a implementa.

14. A implementação direta das operações requeridas pela DFT exige uma quantidade relevante de recursos computacionais, tornando em operações lentas. Este mesmo problema aparece em outras transformadas discretas, como a transformada discreta do cosseno (DCT).

15. As multiplicações operadas sobre aritmética de ponto flutuante representam uma forte restrição para a implementação de

procedimentos computacionais em *hardware* de baixo consumo (p.e. sensores e *wearable computing*).

16. A larga utilização da DFT se deve ao conjunto de algoritmos computacionalmente eficientes, ou algoritmos rápidos, desenvolvidos para sua implementação chamados coletivamente de transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform, FFT*).

17. A FFT computa a DFT para um sinal de comprimento N com um custo computacional em $\mathcal{O}(N \log_2(N))$ enquanto que a implementação direta da DFT exige um custo computacional em $\mathcal{O}(N^2)$.

18. Na formação de feixes múltiplos, a matriz de pesos em (2) é substituída pela matriz da transformada de Fourier de comprimento N apresentada em (3). No momento do processamento do sinal são utilizados os algoritmos rápidos para o computo eficiente da DFT para chegar a uma implementação mais veloz.

19. O diagrama de processamento de sinais em um *beamforming* utilizando a FFT pode ser mais bem compreendido por meio da Figura 1.

20. A busca por implementações eficientes da DFT, ainda, possui grande interesse da comunidade científica.

21. A grande demanda por métodos de baixa complexidade computacional que resultem em implementações em *hardware* de baixo consumo impulsiona a criação de novas técnicas que reduzam o custo computacional da DFT.

22. Décadas de pesquisa nessa área resultaram em procedimentos extremamente sofisticados, nos quais há pouco espaço para minimização da quantidade de operações requeridas para o computo exato da FFT.

23. Os algoritmos existentes para DFT exata exibem duas dificuldades para as demandas atuais: (i) por serem extremamente sofisticados, há pouco espaço para significativas contribuições

científicas que substancialmente minimizem seus custos computacionais e (ii) exigem aritmética de ponto flutuante devido à necessidade da operação de multiplicações por elementos irracionais, tais como $\sqrt{2}/2$.

24. Nesse contexto, uma alternativa ao cálculo tradicional da DFT são as transformadas apresentadas em Mitra e Kuo (2006), “Digital signal processing: a computer-based approach”.

25. As transformadas aproximadas já foram implementadas para a DCT em Bayer, Cintra, Edirisuriya e Madanayake (2012), “A digital hardware fast algorithm and FPGA-based prototype for a novel 16-point approximate DCT for image compression applications”; Cintra e Bayer (2011), “A DCT approximation for image compression”; e Cintra, Bayer e Tablada (2014), “Low-complexity 8-point DCT approximations based on integer functions”.

26. De modo similar, o cômputo direto da DCT requer multiplicações não triviais.

27. As transformadas aproximadas são transformações lineares de baixíssimo custo computacional que fornecem resultados próximos - em algum sentido - aos oferecidos por uma dada transformada exata.

28. Como as transformadas discretas são essencialmente matrizes, a teoria da aproximação matricial é uma ferramenta natural nessa área.

29. De modo geral, as transformadas aproximadas têm por objetivo prover estimadores para os coeficientes espectrais a um custo computacional bastante reduzido, resultando frequentemente em procedimentos computacionais livres de multiplicações.

30. O fato de que uma determinada transformada aproximada ser um procedimento livre de multiplicações faz com que esta seja uma ferramenta com possibilidades de cômputo em tempo real superior à sua respectiva transformada exata.

31. Em aprofundada análise da técnica pode-se apreender que o esquema apresentado por Suarez, Cintra, Bayer, Sengupta, Kulasekera e Madanayake (2014), “Multi-beam RF aperture using multiplierless FFT approximation”, ensina uma arquitetura de formação de feixe para um arranjo de 8 antenas que não precisa de multiplicações utilizando uma transformada aproximada da DFT para o processamento no bloco de somatório que inclui, na sua parte real e imaginária valores no conjunto $\{0, \pm 1/2, \pm 1\}$. A inovação que se propõe difere na matriz de transformada em que os coeficientes da parte real e imaginária só tem os valores $\{0, \pm 1\}$.

32. O esquema em Potluri, Madanayake, Cintra, Bayer e Rajapaksha (2012), “Multiplier free DCT approximations for RF multi-beam digital aperture-array space imaging and directional sensing”, apresenta uma arquitetura para a formação de feixe em um arranjo de 8 antenas que não precisa de multiplicações utilizando no bloco de somatório uma matriz de comprimento 8×8 que surge de uma aproximação para a DCT. A inovação que se propõe utiliza uma aproximação para a DFT, considerando assim pesos complexos que permitem a separação do sinal em fase e quadratura.

33. A patente US 7,671,800, de Lee (2010), “Beamforming apparatus and method in a smart antenna system”, propõe a formação de feixe em um sistema de antenas inteligentes que utiliza como processador de base a transformada discreta de Fourier que inclui os valores de ponto flutuante para qualquer comprimento. A inovação que se propõe considera somente um arranjo de 8 antenas e o processamento envolve somente valores no conjunto de baixa complexidade $\{0, \pm 1\}$.

34. O documento US 6,980,614 de Miller e Reed (2005), “System and method for subband beamforming using adaptive weight normalization”, apresenta um método e um sistema para a conformação

de feixes para uma pluralidade de antenas para sinais de sistemas de posicionamento global (GPS). O processador utilizado faz uso da FFT exata e é dividido em sub-bandas de forma adaptativa para gerar o sinal em frequência. Na inovação que se propõe a conformação de feixes é feita por meio de uma aproximação para a DFT, de forma que o processamento do sinal só implica em multiplicações triviais na parte real e imaginária no conjunto $\{0, \pm 1\}$.

35. A proposta feita em Lei e Chin (2004), “Post and pre-FFT beamforming in an OFDM system”, apresenta a formação de feixe para um sistema OFDM combinando as saídas das antenas com a FFT para maximizar a relação sinal/ruído e fazendo estimativas para evitar o uso de inversas. A inovação que se propõe diminui o tempo de cálculo evitando operações de ponto flutuante no processo de formação de feixe por meio do uso de uma matriz de aproximação.

36. O esquema apresentado pela proteção US 427 7,330,701, de Mukkavilli, Sabharwal e Aazhang (2008), “Low complexity beamformers for multiple transmit and receive antennas”, apresenta uma inovação para conformadores de baixa complexidade com um critério de desenho da formação de feixe baseado em construções que fazem uso da retroalimentação do sistema para sua agilidade. Nesta, procuram-se os valores dos coeficientes do bloco de somatório que produzem maior recepção para minimizar a complexidade. Assim, não se especifica o uso da FFT e, diferentemente da inovação que se propõe, admite números complexos de elevada complexidade computacional diferentes de $\{0, \pm 1\}$.

37. A US 6,172,970 de Ling, Chuang e Chunning (2001), “Low-complexity antenna diversity receiver”, fornece uma técnica que reduz a complexidade na formação de feixe. A redução é obtida mediante o uso de comutadores que amostram o sinal recebido por cada uma das antenas com uma cadeia de sinais multiplexados. O bloco de

processamento do sinal para a aplicação da FFT é subdividido. Em cada bloco de aplicação utiliza a FFT exata incluindo valores de ponto flutuante. Na inovação proposta, a transformada aproximada é implementada para valores de $\{0, 1\}$. A inovação na referência US 8,000,744 de Yoon e Lee (2011), “Apparatus and method for beamforming in a communication system”, apresenta uma arquitetura e um método de formação de feixe para sistemas de comunicação. A formação de feixe minimiza a taxa de erro do canal invertendo o vetor de pesos e utiliza a FFT no processador para a codificação do sinal. Na inovação que se propõe utiliza-se como codificador do sinal uma matriz aproximada e não a FFT.

38. A inovação US 8,797,212 de Wu, Shen, Zhou, Zhang e Lou (2014), “Beamforming scheme for phased-array antenas”, apresenta um esquema geral para sistemas de comunicação sem fio e técnicas para a formação de feixe em arranjos de antenas considerando um bloco de processamento por meio da FFT. Na inovação que se propõe considera-se a formação de feixe, sendo uma aproximação para a DFT, onde o bloco de processamento é feito com uma transformada específica que considera valores em $\{0, \pm 1\}$ na sua parte real e imaginária.

39. As invenções KR101334494 de Ho e Sang (2013), “High-speed low-complexity radix-2 to the fifth fast Fourier transform apparatus and method”; CN 201,410,038,962, de He, Chen, Cuimei, Yizhuang, Liang e Teng (2014), “Low-complexity universal mixed-radix FFT design method”; e KR101036873, de Sub (2011), “Flag based low-complexity, expandable split radix FFT system” apresentam métodos de implementação da DFT sem aproximação. Na inovação que se propõe se considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

40. A inovação em US 13/537,346, de Lee e Xu (2013), “Signal transformation apparatus applied hybrid architecture, signal

transformation method, and recording medium” apresenta um método de implementação de várias transformadas discretas, como a DCT, DST e DFT sem aproximação. Na inovação que se propõe se considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

41. A patente TW201227351, de Fang, Chi, Chieh e Ho (2012), “Recursive modified discrete cosine transform and inverse discrete cosine transform system with a computing kernel of RDFT”, apresenta um método de implementação da DCT por meio da DFT sem aproximação. Na inovação que se propõe se considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

42. A inovação CN 101,441,618 de Ran, Wu, Chi, Zhang, Zhang, Sha e Jun (2010), “Low sampling rate signal recovery method of weight fraction Fourier transformation field”, apresenta um método de aquisição de sinais quando a taxa de amostragem fica abaixo do limite inferior estipulado por Shannon para recuperação perfeita do sinal. Nela, os inventores consideram a DFT exata sem aproximação. Na inovação que se propõe é considerada a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

43. A inovação em Nourisson e Bouttier (2010), “Computation module to compute a multi radix butterfly to be used in DTF computation”, apresenta um método computacional baseado na DFT exata sem aproximação. Na inovação que se propõe se considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

44. A inovação US 12/139,957, de Reznik (2009), “Fast computation of products by dyadic fractions with sign-symmetric rounding erros”, apresenta um método computacional aproximado para o produto de um inteiro arbitrário por uma quantidade irracional qualquer. Na inovação que se propõe se considera a formação de feixe

por meio de uma aproximação para a DFT e não o produto de um inteiro qualquer por uma única quantidade irracional.

45. A inovação em CN2009/070,074, de Zhang e Zhang (2009), “A control method and apparatus for quantizing noise leakage”, apresenta um método para tratamento de sinais arbitrário em regime transiente, sem considerar a DFT. Na inovação que se propõe considera-se a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não o tratamento de sinais em regime transiente.

46. A patente US 11/869,085, de Tsai, Huang e Luo (2009), “Method and apparatus of low-complexity psychoacoustic model applicable for advanced audio coding encoders”, apresenta um método para tratamento de sinais acústicos sem considerar a DFT. Na inovação que se propõe, é considerada a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não o tratamento de sinais acústicos.

47. A proteção US 8,571,340, de Reznik (2013), “Efficient fixed-point approximations of forward and inverse discrete cosine transforms”, apresenta aproximações para a DCT e a IDCT. Na inovação que se propõe se considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a DCT e sua inversa.

48. A referência US 11/775,486, de Zhong e Yang (2009), “Time de-interleaver implementation using an embedded dram in a TDS-OFDM receiver”, apresenta um esquema para implementação de um circuito de desentrelaçamento de sinais usando a DFT exata. Na inovação que se propõe aplica-se a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

49. A EP 20,060,008,407, de Ruan, Heyne, Götze e Sun (2007), “Method and circuit for performing a cordic based Loeffler discrete cosine transformation (DCT), particularly for signal processing”, apresenta aproximações para a DCT baseadas no algoritmo de Loeffler.

Na inovação que se propõe considera-se a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a DCT.

50. A US 49510/990,917, de Zhou (2005), “8x8 transform and quantization”, apresenta uma aproximação para a DCT. Na inovação que se propõe é considerada a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a DCT.

51. A patente US 10/975,638 de Dang (2005), “Low power, high performance transform coprocessor for video compression”, apresenta um esquema de processamento de vídeo baseado em uma aproximação inteira para a DCT. Na inovação que se propõe há a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a DCT.

52. A proteção US 10/838,949, de Azary (2005), “System and method for analyzing an electrical network”, apresenta um esquema para a computação de atraso de grupo em redes elétricas. Na inovação que se propõe considera-se a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT, que não tem relação com atraso de grupo de redes elétricas.

53. A patente US 10/736,697 de Gazor (2004), “Methods and systems for tracking of amplitudes, phases and frequencies of a multicomponent sinusoidal signal”, apresenta um esquema para detecção de picos de ondas sinusoidais baseado na minimização da função de verossimilhança para sinais arbitrários. Difere da inovação que se propõe que considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

54. A US 7,379,500 de Lu, Yu, Li e Li (2008), “Low-complexity 2-power transform for image/video compression”, apresenta um esquema de compressão de vídeos baseado em aproximações para a DCT de comprimento potência de dois. Na inovação que se propõe é considerada a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a DCT.

55. A patente US 10/065,154 de Yeh (2004), “Pipelined low complexity FFT/IFFT processor”, apresenta um esquema para implementação de um circuito que computa a DFT exata. A inovação que se propõe apresenta a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não a DFT exata.

56. As invenções apresentadas em PCT/IB2002/001,000, de Lan, Zhong e Chen (2002), “Reduced complexity IDCT decoding with graceful degradation”; US 09/741,724, de Krishnamachari e Peng (2002), “Approximate inverse discrete cosine transform for scalable computation complexity video and still image decoding”; e EP 19,880,102,545, de Neuner e Gärtner (1988), “Method for bidimensional discrete inverse cosine transformation”, apresentam um esquema de aproximação para a IDCT. Na inovação que se propõe considera-se a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a IDCT.

57. A inovação em US 6,507,623, de Gustafsson, Claesson e Nordholm (2003), “Signal noise reduction by time-domain spectral subtraction”, apresenta um esquema de filtragem de sinal baseado na DFT exata. Na inovação que se propõe considera-se a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT e não para a DFT exata.

58. A proteção US 6,178,269, de Acharya (2001), “Architecture for computing a two-dimensional discrete wavelet transform”, apresenta um esquema de computação de *wavelet* em duas dimensões, diferente da inovação que se propõe, que demonstra a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

59. A US 6,047,303, de Acharya (2000), “Systolic architecture for computing an inverse discrete wavelet transforms”, apresenta um esquema de computação da *wavelet* discreta inversa. A inovação se propõe ensina a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

60. A patente US 5,995,210, de Acharya (1999), “Integrated architecture for computing a forward and inverse discrete wavelet transforms”, apresenta um esquema de computação da *wavelet* discreta direta e inversa. Na inovação que se propõe é apresentada a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

61. A inovação apresentada em US 6,310,919, de Florencio (2001), “Method and apparatus for adaptively scaling motion vector information in an information stream decoder”, apresenta um esquema de compressão de imagens com objetivo de reduzir espaço em memória e utiliza a DCT exata, diferentemente da inovação que se propõe que considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

62. A inovação em US 6,434,111, de Voyer e Murai (2002), “Soft decision rule for demodulation of bi-orthogonal signals”, apresenta um esquema de demodulação de sinais sem especificar o tipo de transformação que faz uso.

63. A inovação em US 5,805,483, de Shim (1998), “Method of converting data outputting sequence in inverse DCT and circuit thereof”, apresenta um esquema de processamento de imagens que faz uso da DCT exata. Difere da inovação que se propõe que promove a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

64. A proteção US 5,825,420, de Yang e Bai (1998), “Processor for performing two-dimensional inverse discrete cosine transform”, apresenta um esquema de processamento de imagens que faz uso da IDCT exata. Na inovação que se propõe a formação de feixe ocorre por meio de uma aproximação para a DFT.

65. A patente US 5,774,595, de Kim (1998), “Contour approximation method for representing a contour of an object”, revela um método de extração de contorno de imagens que da inovação que se

propõe que antecipa formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

66. A inovação EP 19,950,402,749 apresentada por Coromina, Yarwood, Ventura-Traveset e Bosch (1996), “Beam forming array for radiofrequency antenna with fast Fourier transform and device using such array, in particular for space applications”, ensina um esquema para a formação de feixes que faz uso da DFT exata. Na inovação que se propõe há a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

67. A inovação apresentada em US 5,699,286 de Lee e Baek (1997), “Wavelet transform processor using a pipeline with a bit unit”, apresenta um esquema para a computação de uma transformada discreta *wavelet*. Difere da inovação que se propõe que considera a formação de feixe por meio de uma aproximação para a DFT.

68. Percebe-se, pois, na arte uma lacuna no que tange a processamentos de sinais suficientemente velozes no sentido de proporcionar menor consumo de energia em sistemas, dispositivos e *softwares* tais como sistemas de comunicação, radares, sonares e sistemas de posicionamento global, comumente usuários de processamento por meio de DFT.

→ Descrição resumida da inovação

69. Propõe-se, deste modo, sistemas, dispositivos e *softwares* usuários de processamento de sinais para a formação de feixes múltiplos para sistemas de antenas digitais de rádio frequência (RF) que se baseia na substituição de bloco de somatório comumente implementado por meio da transformada discreta de Fourier (DFT) por outra transformada específica que se aproxima ao uso da DFT, com alto poder de formação de feixes e com uma reduzida complexidade aritmética. Este procedimento faz com que o processamento do sinal em cada tempo de

amostragem seja mais veloz, demandando menor consumo de energia, quando comparado a DFT.

70. Esta inovação trata da formação de feixes múltiplos para a recepção de sinais de uma ULA de 8 antenas em linha para proporcionar uma indicação da direção da fonte do sinal recebido.

71. Pode ser utilizado em sistemas de comunicação, radar, sonar, sistemas de GPS ou qualquer aplicação em que a formação de feixe seja feita por meio da transformada discreta de Fourier.

72. A inovação é baseada em uma nova transformada que evita a necessidade de operações em ponto flutuante durante a etapa de processamento em bloco de somatório em que usualmente seria utilizada a DFT.

73. A transformada proposta é uma matriz de comprimento 8 x 8 com alto poder de conservação da energia quando comparada a DFT.

74. Apresenta-se uma transformada com um erro de energia de 8.62 em relação à DFT. Comparativamente, a transformada aproximada apresentada em Suarez, Cintra, Bayer, Sengupta, Kulasekera e Madanayake (2014), “Multi-beam RF aperture using multiplierless FFT approximation” apresenta um erro de energia de 4.31, embora, a matriz aqui apresentada não necessite de deslocamentos de bit.

75. A presente inovação difere em aspectos relevantes de esquemas e sistemas já patenteados por não contar com operações de ponto flutuante na transformada. Ao fazer uso unicamente dos valores complexos $\{z \in \mathbb{C} : \Re\{z\} \wedge \Im\{z\} \in \mathcal{P}\}$, em que $\mathcal{P} = \{0, \pm 1\}$, a complexidade multiplicativa no processamento em bloco de somatório é nula.

76. A eliminação da complexidade multiplicativa implica em uma redução da complexidade computacional se traduzindo em uma redução no consumo de energia do sistema e assim uma redução no tempo de cômputo.

→ Descrição detalhada da inovação

77. A seguir, apresentamos o método proposto para a formação de feixe. O esquema se baseia em uma nova transformada aqui proposta com o respectivo algoritmo rápido, aqui denominada de “transformada discreta de Fourier” ($\hat{F}$).

78. O método proposto se baseia numa transformação para o processamento do sinal na formação de feixe.

79. Em um arranjo linear de 8 antenas na formação de feixe. O processamento em bloco de somatório é feito por meio da FFT e é computado pela matriz (Figura 8).

80. A inovação consiste em substituir a matriz F pela transformação que define a matriz (Figura 7).

81. A matriz apresentada tem complexidade multiplicativa nula. A complexidade aritmética desta transformação é dada unicamente pelas adições necessárias para sua implementação. Além disso, a matriz F pode ser fatorada como o produto de matrizes com complexidade aditiva menor como: $\hat{F} = P \cdot A_4 \cdot D \cdot A_3 \cdot A_2 \cdot A_1$ (Figura 9).

82. $D = \text{diag}([1, 1, 1, j, 1, j, j, 1])$ e $P = [e_1 | e_5 | e_3 | e_6 | e_2 | e_8 | e_4 | e_7]^T$ é a matriz de permutação em que e_i é o vetor coluna de comprimento 8 cujo i -ésimo elemento é 1 e as outras entradas do vetor são 0, para $i = 1, 2, \dots, 8$.

83. O diagrama de fluxo da fatoração matricial de $\hat{F}$ é apresentado na Figura 3.

84. O método proposto para a formação de feixe é representado no esquema da Figura 2. Neste esquema, para um arranjo de 8 antenas, a matriz da FFT para o processamento do bloco de somatório é substituída pela matriz $\hat{F}$. A implementação deste esquema só precisa

de multiplicações triviais e a sua implementação requer unicamente 26 adições.

85. Uma razão pela qual a matriz $\hat{\mathbf{F}}$ é considerada na proposta é pela sua capacidade de formação de feixe de forma eficiente quando comparada com a formação para a FFT no cenário em que são aplicadas espacialmente por meio de uma ULA de antenas.

86. Note-se que cada uma das linhas de uma dada matriz de aproximada $\hat{\mathbf{F}}$ pode ser vista como os coeficientes de um filtro discreto. Assim, a função de transferência relacionada a cada linha da transformação é dada por Suarez, Cintra, Bayer, Sengupta, Kulasekera and Madanayake (2014), “Multi-beam RF aperture using multiplierless FFT approximation”

$$H_m(\omega; \hat{\mathbf{F}}) = \sum_{n=0}^7 f_{m,n} \cdot \exp(-jn\omega), \quad m = 0, 1, \dots, 7,$$

em que $\omega \in [-\pi, \pi]$ é a frequência espacial por meio da ULA e $f_{m,n}$ é o $(m + 1, n + 1)$ -ésimo elemento de $\hat{\mathbf{F}}$. A frequência temporal normalizada da onda plana incidente deve ser $\omega_t < \pi$, implicando que $\omega = -\omega_t \sin \psi$, para $-\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2$. O vetor de padrões é dado por:

$$P_i(\psi; \mathbf{F}) = \frac{|H_i(-\omega_t \sin(\psi); \mathbf{F})|}{\beta_i} \quad (4),$$

em que $\beta_i = \max_{\psi} |H_i(-\omega_t \sin(\psi))|$, para $i = 0, 1, \dots, 7$, é a normalização do vetor. O vetor de padrões baseado na aproximação proposta é denotado por $P_i(\psi, \mathbf{F})$, $i = 0, 1, \dots, 7$.

87. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os diagramas polares dos vetores de padrão associados a cada uma das linhas de $\mathbf{F}$ e $\hat{\mathbf{F}}$ respectivamente.

88. Os oito feixes independentes são apresentados para os ângulos $\psi_k = 0.00, \pm 14.47, \pm 30.00, \pm 48.59, 90.00$ em graus. Para quantificar a diferença

entre os vetores de padrões para a aplicação da FFT e a transformação proposta, considera-se a seguinte função de erro:

$$D_i(\psi) \triangleq \left| P_i(\psi; \mathbf{F}) - P_i(\psi; \hat{\mathbf{F}}) \right|, \quad i = 0, 1, \dots, 7. \quad (5).$$

89. Na Figura 6, é apresentado o diagrama polar de $D_i(\psi)$ para todas as linhas de $\hat{\mathbf{F}}_8$.

90. O esquema de formação de feixes aqui proposto apresenta as seguintes vantagens: não precisa-se de operações de ponto flutuantes; a formação de feixes de baixa é de complexidade computacional; apresenta alta velocidade de processamento dos sinais para detecção e busca da direcionalidade de chegada dos sinais de interesse; e reduzido consumo de energia associado à complexidade computacional.

91. Em resumo, os sistemas, dispositivos e *softwares* usuários de processamento de sinais para a formação de feixes múltiplos para sistemas de antenas digitais de radiofrequência de formação de feixes, por meio da substituição do bloco de somatório comumente implementado por meio da transformada discreta de Fourier (DFT) por uma transformada específica que se aproxima ao uso da DFT, com alto poder de formação de feixes e com uma reduzida complexidade aritmética, apresenta as vantagens de não utilizar operações de ponto flutuantes, permitindo a formação de feixes de baixa complexidade computacional, com alta velocidade de processamento dos sinais para detecção e busca da direcionalidade particular de chegada e apresentando reduzido consumo de energia associado à complexidade computacional.

92. Esta inovação não se limita às representações aqui comentadas ou ilustradas, devendo ser compreendida em seu amplo escopo. Muitas modificações e outras representações da inovação virão à mente daquele versado na técnica à qual essa inovação pertence, tendo o benefício do ensinamento apresentado nas descrições

anteriores e desenhos anexos. Além disso, é para ser entendido que a inovação não está limitada à forma específica revelada, e que modificações e outras formas são entendidas como inclusas dentro do escopo das reivindicações anexas. Embora termos específicos sejam empregados aqui, eles são usados somente de forma genérica e descritiva e não como propósito de limitação.

→ Relação de figuras

93. A Figura 1 apresenta o esquema geral de formação de feixe para uma ULA.

94. A Figura 2 apresenta o esquema geral proposto de formação de feixe para uma ULA.

95. A Figura 3 apresenta o diagrama de fluxo de sinal da implementação da aproximação proposta na Figura 7. As linhas tracejadas representam multiplicações por -1.

96. A Figura 4 apresenta o diagrama polar da função de transferência na formação de feixe de acordo com (4) quando é utilizada a FFT.

97. A Figura 5 apresenta o diagrama polar da função de transferência na formação de feixe de acordo com (4) quando é utilizada a aproximação proposta na Figura 7.

98. A Figura 6 apresenta o diagrama polar da função de erro, entre a formação de feixe utilizando a FFT e a aproximação aqui proposta, construída de acordo com (5).

REINVIDICAÇÕES

- 1) SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS, para a computação da DFT, de forma aproximada para sinal discreto, de comprimento 8, caracterizado pelo uso da transformada discreta de Fourier ($\hat{F}$), compreendida pela configuração mostrada na Figura 7.
- 2) SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS, para a computação, de forma rápida, da DFT aproximada para um sinal discreto, de comprimento 8, de acordo com a Reivindicação 1, caracterizado pela transformada $\hat{F}$ usar o diagrama de sinal do fluxo da fatoração matricial de $\hat{F}$, compreendido pela configuração mostrada na Figura 3.
- 3) SISTEMA PARA A FORMAÇÃO DE FEIXE, em sistema de comunicação, radar e sonar, para antenas alinhadas, de acordo com a Reivindicação 1, caracterizado pelo uso da transformada $\hat{F}$ como processador.
- 4) SISTEMA PARA A FORMAÇÃO DE FEIXE, para 8 antenas alinhadas, de acordo com a Reivindicação 1, caracterizado pela substituição da DFT, ou FFT, pela transformada $\hat{F}$.

FIGURAS

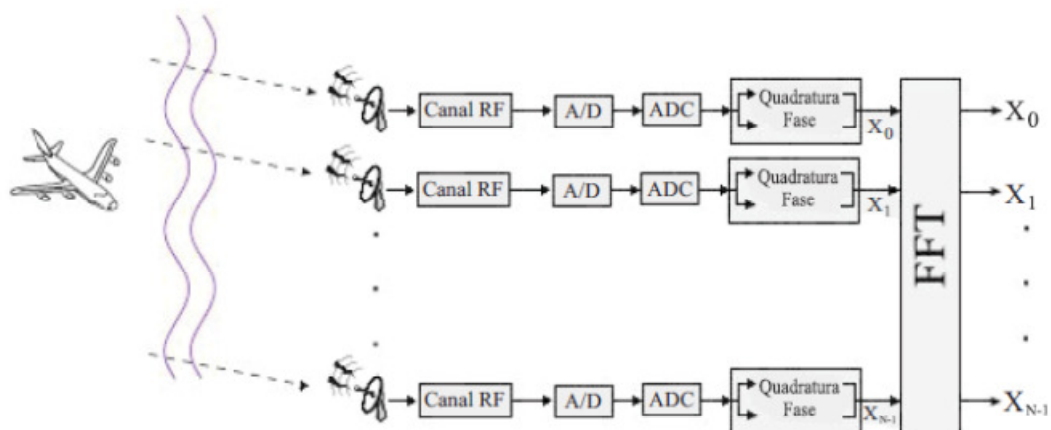


Figura 1

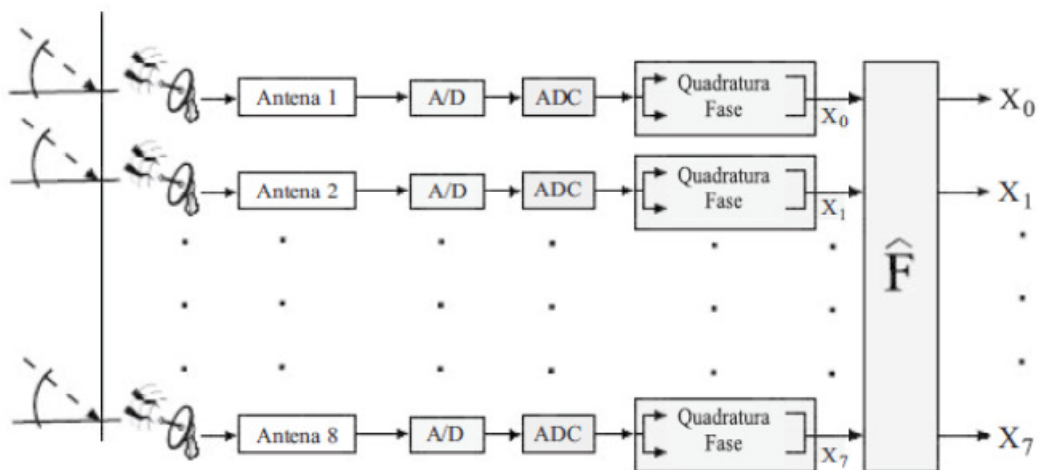


Figura 2

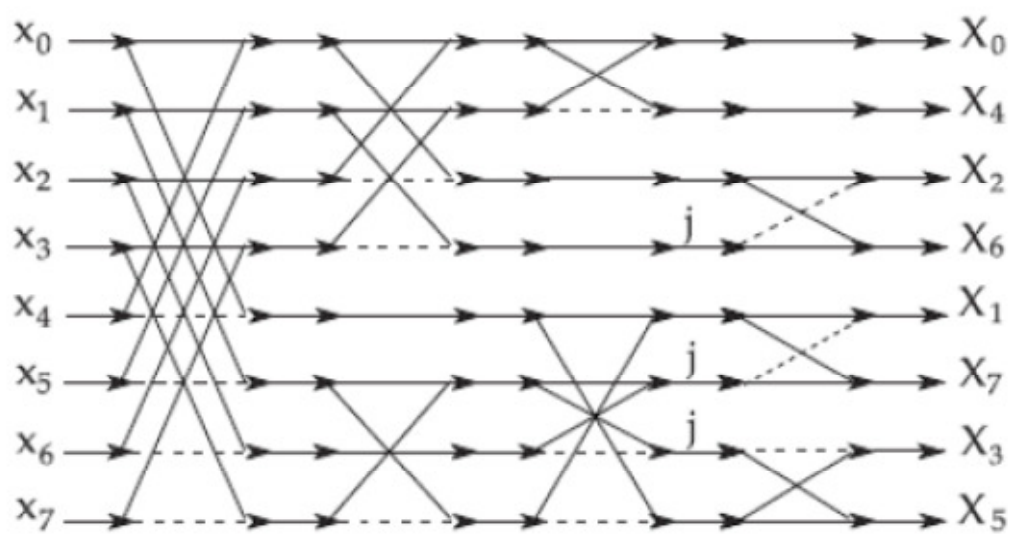


Figura 3

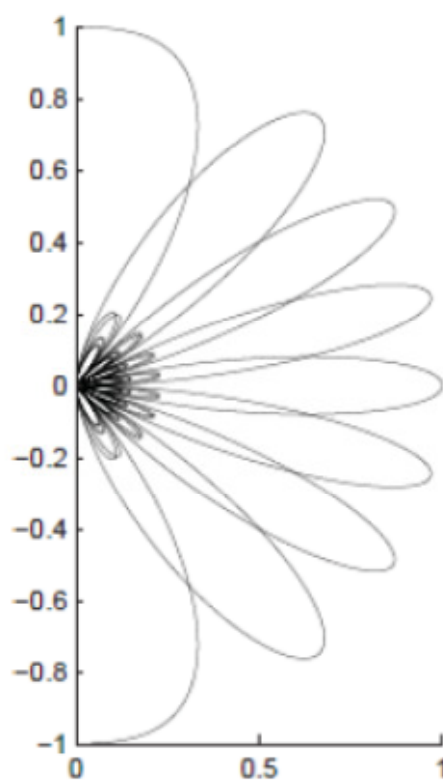


Figura 4

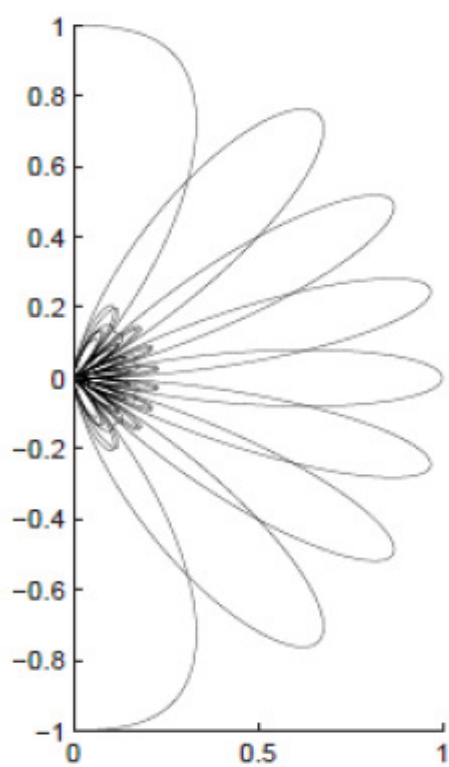


Figura 5

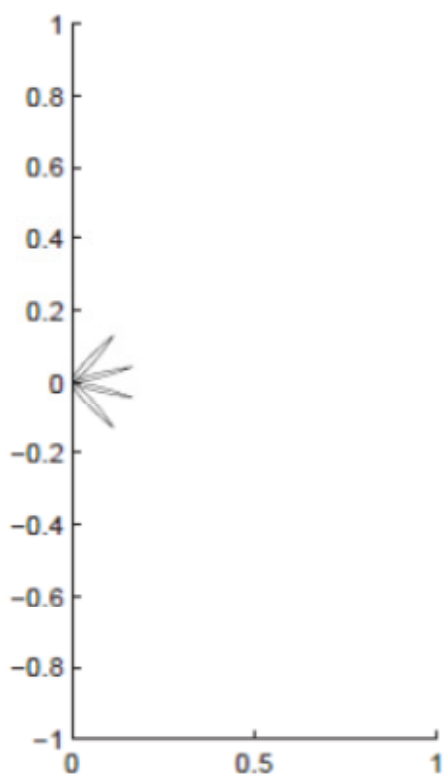


Figura 6

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1-j & -j & -1-j & -1 & -1+j & j & 1+j \\ 1 & -j & -1 & j & 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1-j & j & 1-j & -1 & 1+j & -j & -1+j \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1+j & -j & 1+j & -1 & 1-j & j & -1-j \\ 1 & j & -1 & -j & 1 & j & -1 & -j \\ 1 & 1+j & j & -1+j & -1 & -1-j & -j & 1-j \end{bmatrix}$$

Figura 7

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \frac{1-j}{\sqrt{2}} & -j & -\frac{1+j}{\sqrt{2}} & -1 & -\frac{1-j}{\sqrt{2}} & j & \frac{1+j}{\sqrt{2}} \\ 1 & -j & -1 & j & 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -\frac{1+j}{\sqrt{2}} & j & \frac{1-j}{\sqrt{2}} & -1 & \frac{1+j}{\sqrt{2}} & -j & -\frac{1-j}{\sqrt{2}} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -\frac{1-j}{\sqrt{2}} & -j & \frac{1+j}{\sqrt{2}} & -1 & \frac{1-j}{\sqrt{2}} & j & -\frac{1+j}{\sqrt{2}} \\ 1 & j & -1 & -j & 1 & j & -1 & -j \\ 1 & \frac{1+j}{\sqrt{2}} & j & -\frac{1-j}{\sqrt{2}} & -1 & -\frac{1+j}{\sqrt{2}} & -j & \frac{1-j}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Figura 8

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & 1 & & & & & -1 & & & \\ & & 1 & & & & & -1 & & \\ & & & 1 & & & & & -1 & \\ & & & & 1 & & & & & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & -1 & & & & & & \\ & & & & -1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & -1 \end{bmatrix}, \\
\mathbf{A}_3 &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & -1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & -1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & -1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Figura 9

RESUMO**SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA A FORMAÇÃO DE FEIXES
MÚLTIPLOS PARA SISTEMAS DE ANTENAS DIGITAIS DE
RADIOFREQUÊNCIA**

A presente invenção, que se situa no campo da engenharia eletrônica e de telecomunicações, descreve um sistema de computação, de direção de feixes em conjunto, de antenas alinhadas, usando uma aproximação para a transformada discreta de Fourier, conhecida pela sigla DFT, e se baseia em uma aproximação com reduzida complexidade computacional, resultando em *hardware* mais simples, necessitando apenas de operações de soma e deslocamento de bits, e compreende a substituição da DFT por uma transformada aproximada, tendo, como consequência, a implementação em *hardware* ou *software*, com redução da complexidade computacional, do consumo de energia, e, também, do tempo necessário para a computação do feixe.