

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Decodificação de Sinais DTMF Via Transformada
Aritmética de Fourier**

Juliano Bandeira Lima

Juliano Bandeira Lima

**Decodificação de Sinais DTMF Via Transformada
Aritmética de Fourier**

Recife

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DECODIFICAÇÃO DE SINAIS DTMF
VIA TRANSFORMADA ARITMÉTICA DE FOURIER

por

JULIANO BANDEIRA LIMA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: RICARDO M. CAMPELLO DE SOUZA, Ph.D.

Recife, Junho de 2004.

© Juliano Bandeira Lima, 2004



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DE

JULIANO BANDEIRA LIMA

TÍTULO

“DECODIFICAÇÃO DE SINAIS DTMF VIA
TRANSFORMADA ARITMÉTICA DE FOURIER”

A comissão examinadora composta pelos professores: RICARDO MENEZES CAMPELLO DE SOUZA, DES/UFPE, HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA, DES/UFPE e FRANCISCO MADEIRO BERNARDINO JÚNIOR, DEI/UNICAP, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **Juliano Bandeira Lima APROVADO**.

Recife, 09 de julho de 2004.


JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Coordenador do PPGE


RICARDO MENEZES CAMPELLO
DE SOUZA
Orientador e Membro Titular Interno


FRANCISCO MADEIRO BERNARDINO
JÚNIOR
Membro Titular Externo


HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA
Membro Titular Interno

Aos meus amados pais – Beto e Elza,

e ao meu estimado irmão – Renato.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por todos os dons que Ele me concedeu e que, hoje, posso colocar a serviço das outras pessoas. Agradeço aos meus pais que, durante toda a minha vida, sempre me apoiaram incondicionalmente, e a todos que me ofertaram incentivo, força, consolo e carinho.

Agradeço também:

- Ao Prof. Dr. Ricardo Menezes Campello de Souza, pela orientação cuidadosa e estimulante, pela experiência que me foi transmitida e pela confiança em mim depositada.
- Ao Prof. Dr. Hélio Magalhães de Oliveira, pela contagiante vibração que torna ainda mais prazerosa a aquisição do conhecimento, a pesquisa e as descobertas.
- Aos demais professores e colegas do curso de Engenharia, que contribuíram na minha formação profissional e pessoal.

JULIANO BANDEIRA LIMA

Universidade Federal de Pernambuco

15 de Junho de 2004

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

DECODIFICAÇÃO DE SINAIS DTMF VIA TRANSFORMADA ARITMÉTICA DE FOURIER

Juliano Bandeira Lima

Junho/2004

Orientador: Ricardo M. Campello de Souza, Ph.D.

Área de Concentração: Comunicações.

Palavras-chave: Série de Fourier, Transformada Discreta de Fourier, Transformada Aritmética de Fourier, algoritmos rápidos, DTMF.

Número de Páginas: xv + 94.

A sinalização DTMF (*Dual-Tone Multifrequency*) tem diversas aplicações importantes, sendo usada em muitos sistemas de Telecomunicações, tais como telefonia a teclado, correio de voz, comércio eletrônico e sistemas bancários interativos. Com a demanda crescente por taxas de transmissão cada vez mais elevadas nesse contexto, a velocidade de decodificação dos sinais DTMF torna-se um parâmetro importante no projeto desses sistemas. Uma vez que a decodificação é realizada via multiplexação temporal em um processador digital de sinais, um menor tempo de decodificação implica capacidade de processar simultaneamente um maior número de canais. Esta dissertação propõe um novo método, baseado na Transformada Aritmética de Fourier, para a decodificação dos sinais DTMF. O método proposto é mais eficiente, em termos de complexidade computacional, do que as técnicas usualmente utilizadas nesse cenário. São enfatizadas as vantagens computacionais que esta nova técnica oferece sobre outros algoritmos que calculam a Transformada Discreta de Fourier. Resultados de simulações são apresentados e algumas implementações são sugeridas. Uma breve análise do desempenho do método proposto, na presença de quantizadores, é feita.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

DTMF DECODING VIA ARITHMETIC FOURIER TRANSFORM

Juliano Bandeira Lima

June/2004

Supervisor: Ricardo M. Campello de Souza, Ph.D.

Area of Concentration: Communications.

Keywords: Fourier Series, Discrete Fourier Transform, Arithmetic Fourier Transform, fast algorithms, DTMF.

Number of Pages: xv + 94.

Dual-Tone Multifrequency (DTMF) signalling has manifold applications and has been used in a broad range of modern Telecommunication systems, such as, for instance, telephony, voice mail, e-commerce, and interactive home banking. Due to the ever increasing demand for higher transmission rates in this scenario, the fast decoding of a DTMF signal becomes a highly important requirement for such systems. A smaller decoding time results in a capacity of simultaneously processing a larger number of channels. In this dissertation, a new method for the decoding of DTMF signals is proposed. The approach, which applies the Arithmetic Fourier Transform, is more efficient, in terms of computational complexity, than existing techniques, thus allowing a faster DTMF decoding. Theoretical aspects and features that determine the accuracy and the complexity of the proposed technique are discussed. The robustness of this method in the presence of quantizers is also examined. Simulation results are presented and a few implementations are suggested.

Sumário

Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras	xi
Prefácio	xii
Capítulo 1 A Representação em Série de Fourier de Sinais Periódicos e a Transformada Discreta de Fourier	1
1.1 Representação em Série de Fourier de Sinais Periódicos em Tempo Contínuo . . .	2
1.2 A Transformada Discreta de Fourier	4
1.3 A DFT e os Coeficientes da Série	6
1.4 Algoritmos Rápidos: Cooley-Tukey e Goertzel	8
1.4.1 A Transformada Rápida de Fourier de Cooley-Tukey	9
1.4.1 O Algoritmo de Goertzel	10
Capítulo 2 A Transformada Aritmética de Fourier	12
2.1 Preliminares Matemáticos	13
2.2 Tufts-Sadasiv	14
2.3 Reed-Tufts	16
2.4 Reed-Shih (AFT Simplificada)	19
2.5 Exemplos e Comentários	21
Capítulo 3 O Sistema DTMF e os Parâmetros da AFT	24
3.1 O Sistema DTMF	24
3.2 A Frequência de Amostragem	27
3.3 O Comprimento da Transformada	28
3.4 A Interpolação	32

Capítulo 4 A Aplicação da AFT	34
4.1 A Decodificação DTMF: $N = 114$	35
4.1.1 $N = 114$, Interpolação de Primeira Ordem	36
4.1.2 $N = 114$, Interpolação de Ordem Zero	40
4.2 O Arredondamento na AFT	47
4.3 Comentários e Outros Resultados	51
Capítulo 5 Implementações e Complexidade Computacional	53
5.1 O Número de Operações	53
5.2 $N = 114$, Interpolação de Primeira Ordem	55
5.3 $N = 114$, Interpolação de Ordem Zero	57
5.4 AFT Arredondada	58
5.5 AFT <i>versus</i> Outros Algoritmos	60
Capítulo 6 Efeitos da Quantização na Decodificação DTMF	62
6.1 A Quantização	62
6.2 A AFT e os Sinais DTMF Quantizados	64
Capítulo 7 Conclusões	70
Apêndice A Demonstração dos Teoremas 2.6 e 2.7	73
A.1 Teorema 2.6	73
A.2 Teorema 2.7	75
Apêndice B Listagem de Programas	77
Apêndice C Jean Joseph Baptiste Fourier	84
Apêndice D Notação	87
Apêndice E Artigos	89
Bibliografia	90

Lista de Tabelas

1.1	Resumo das Propriedades da DFT.....	5
2.1	Amostras exigidas para o cálculo das médias de Bruns.....	22
3.1	Frequências DTMF e índices j correspondentes	31
4.1	Índices dos coeficientes harmônicos correspondentes às frequências DTMF ($N = 114, F_s = 8$ kHz)	35
4.2	Somas de Bruns associadas ao n -ésimo coeficiente harmônico ($N = 114, F_s = 8$ kHz)	36
4.3	Descrição das amostras necessárias ao cálculo das somas de Bruns ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem).....	37
4.4	Descrição das amostras necessárias ao cálculo das somas de Bruns ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem).....	38
4.5	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem).....	39
4.6	Descrição das amostras necessárias ao cálculo das somas de Bruns ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de ordem zero)	41
4.7	Descrição das amostras necessárias ao cálculo das somas de Bruns ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de ordem zero)	43
4.8	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de ordem zero)	46
4.9	Índices dos coeficientes harmônicos associados a $2n$ -ésima soma de Bruns ($N = 114, F_s = 8$ kHz)	48
4.10	Somas de Bruns associadas ao n -ésimo coeficiente harmônico usando arredondamento ($N = 114, F_s = 8$ kHz)	49
4.11	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF, usando arredondamento ($N = 114, F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem)	49

4.12	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF, usando arredondamento ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de ordem zero)	50
4.13	Valor médio do erro percentual de estimativa para cada frequência DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolações de ordem um e zero).	52
5.1	Complexidade computacional da <i>AFT Simplificada</i> na decodificação de sinais DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz)	54
5.2	Descrição das amostras necessárias ao cálculo de $B_{20}(0)$ e $B_{24}(0)$ ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem).	54
5.3	Número otimizado de adições necessárias ao cálculo de cada soma de Bruns na decodificação de sinais DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem)	56
5.4	Complexidade computacional da <i>AFT Simplificada</i> , usando arredondamento, na decodificação de sinais DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz)	60
5.5	Comparativo entre a complexidade computacional da FFT de Cooley-Tukey de base 2 ($N = 128$), do algoritmo de Goertzel ($N = 114$) e da AFT ($N = 114$) na decodificação de sinais DTMF ($F_s = 8$ kHz)	61
6.1	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem, 256 níveis de quantização)	65
6.2	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de ordem zero, 256 níveis de quantização)	66
6.3	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF, usando arredondamento ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem, 256 níveis de quantização)	67
6.4	Módulos dos coeficientes harmônicos e erros percentuais de estimativa para cada sinal DTMF, usando arredondamento ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de ordem zero, 256 níveis de quantização)	68
6.5	Valor médio do erro percentual de estimativa para cada frequência DTMF ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolações de ordem um e zero, 256 níveis de quantização)	69

Lista de Figuras

3.1	Teclado DTMF	26
3.2	Sinal $x_1(t)$ correspondente ao dígito “1” do sistema DTMF	27
3.3	Diagrama simplificado da parte transmissora de um sistema PCM	28
3.4	Seqüência $x_1[i]$ correspondente ao dígito “1” do sistema DTMF	29
3.5	Diferenças entre as freqüências DTMF e as freqüências amostradas pela DFT	31
5.1	Diagrama otimizado para o cálculo de $B_{20}(0)$ e $B_{24}(0)$ ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem)	55
5.2	Diagrama otimizado para o cálculo de $B_{120}(0)$ ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem)	57
5.3	Diagrama simplificado para o cálculo dos coeficientes a_n ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação ordem zero)	58
5.4	Diagrama otimizado para o cálculo dos coeficientes a_n e b_n , usando arredondamento ($N = 114$, $F_s = 8$ kHz, interpolação de primeira ordem)	59
6.1	Quantizador uniforme com 8 níveis	63
6.2	Modelo de ruído aditivo para o erro de quantização.	64
C.1	Jean Baptiste Joseph Fourier	84
E.1	Frontispício dos artigos redigidos aceitos	89