

**Marcio Albuquerque de Souza**

**Estimação de Máxima  
Verossimilhança da Direção  
de Chegada de Portadoras  
PSK**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
Programa de Pós-graduação em Sistemas  
de Comunicação**

Rio de Janeiro  
Setembro de 2004

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Marcio Albuquerque de Souza**

**Estimação de Máxima Verossimilhança da  
Direção de Chegada de Portadoras PSK**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Sistemas de Comunicação.

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro  
Setembro de 2004



**Marcio Albuquerque de Souza**

**Estimação de Máxima Verossimilhança da  
Direção de Chegada de Portadoras PSK**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Sistemas de Comunicação. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Mauro Pedro Fortes**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Marcelo da Silva Pinho**

ITA

**Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia**

PUC-Rio

**Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes**

IME

**Prof. Pedro Henrique Gouvêa Coelho**

UERJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Setembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Marcio Albuquerque de Souza**

Graduou-se em Engenharia Elétrica—Sistemas Eletrônicos na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e obteve o grau de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica—Processamento de Sinais na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC–Rio)

#### Ficha Catalográfica

Souza, Marcio Albuquerque de

Estimação de Máxima Verossimilhança da Direção de Chegada de Portadoras PSK/ Marcio Albuquerque de Souza; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

v., 115 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia – Teses. 2. Sistemas de comunicação. 3. Processamento espaço-temporal em *arrays*. 4. Estimação de máxima verossimilhança. 5. Transmissão digital. 6. Estimação de direção de chegada. I. Fortes, José Mauro P. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

aos meus pais, Ivo e Maria Lúcia  
e aos meus irmãos, Cleber e Wagner

## Agradecimentos

A toda a minha família, pelo apoio e compreensão durante as provas que passei ao longo da vida.

Aos professores Raimundo, Weiler e José Mauro, meu orientador, por acompanharem de perto todo o meu desenvolvimento como pesquisador, me auxiliando nos momentos em que mais necessitei.

Aos funcionários do CETUC pelo suporte fornecido, e também ao CNPq por fomentar minha pesquisa.

A todos os amigos da PUC que me acompanharam nesta jornada de seis anos, não ousarei citá-los todos como fiz em minha dissertação de Mestrado, porque estou certo de que esqueceria alguém (pô, são seis anos!) e jamais me perdoaria por tal falta. Saibam apenas que, se meu tempo na PUC passou tão rápido, devo isto única e exclusivamente a vocês. Ah, e ao gamão também.

E a Deus, por transformar a vida em algo tão precioso e maravilhoso.

## Resumo

Souza, Marcio Albuquerque de; Fortes, José Mauro P.. **Estimação de Máxima Verossimilhança da Direção de Chegada de Portadoras PSK**. Rio de Janeiro, 2004. 115p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em sistemas de comunicações móveis, a modulação digital em fase (PSK) é amplamente utilizada em esquemas de transmissão em rádio-propagação. Trabalhos anteriores consideraram alguns métodos baseados no critério de máxima verossimilhança (MV) para estimação de direção-de-chegada de sinais genéricos que atingem um conjunto (*array*) de sensores. Esta tese propõe um novo estimador MV para a direção-de-chegada, desenvolvido especificamente para sistemas de comunicação PSK. Dois modelos de transmissão são concebidos para estimação dos parâmetros: um mais idealizado, considerando todas as portadoras alinhadas no tempo com o receptor, e outro que considera este desalinhamento na forma de retardo. O número de parâmetros a serem conjuntamente estimados é significativamente reduzido ao se calcular o valor esperado dos sinais medidos no *array* de antenas com relação às fases de modulação (dados de informação). O desempenho do estimador em vários cenários simulados é apresentado e comparado ao desempenho do estimador MV clássico desenvolvido sem considerar uma estrutura específica para o sinal. Limitantes de Cramér-Rao para os cenários de portadora única também são calculados. O método proposto se mostra mais robusto por apresentar melhor desempenho que o estimador MV clássico em todas as simulações.

## Palavras-chave

Processamento espaço-temporal em *arrays*; Estimação de máxima verossimilhança; Transmissão digital; Estimação de direção de chegada.

## Abstract

Souza, Marcio Albuquerque de; Fortes, José Mauro P.. **Maximum likelihood estimation of the direction-of-arrival of PSK modulated carriers**. Rio de Janeiro, 2004. 115p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In mobile communication systems, phase shift keying (PSK) modulation is widely used in digital transmission schemes. Previous works have considered several maximum likelihood (ML) methods for the direction-of-arrival (DOA) estimation of generic signals reaching a phased-array of sensors. This thesis proposes a new ML DOA estimator designed to be used in PSK communication systems. Two transmission models are considered for parameter estimation: a simpler one, considering all carrier clocks time-aligned with the receiver clock, and another that considers this misalignment as a delay for each carrier. The number of parameters to be jointly estimated is significantly reduced when the expected value of the antenna array measured signals with respect to the modulation phases is evaluated. The estimator performance in several simulation scenarios is presented and compared to the performance of a classic ML estimator designed for all sorts of signal models. Cramér-Rao bounds for single carrier scenarios are also evaluated. The proposed method robustly outperforms the classic ML estimator in all simulations.

## Keywords

Space-time array processing; Maximum likelihood estimation; Digital transmission; Direction-of-arrival estimation.

## Conteúdo

1	Introdução	10
2	Estimação de máxima verossimilhança em <i>arrays</i>	14
2.1	Modelo genérico	16
2.2	Estimador de máxima verossimilhança determinístico	17
2.3	Estimador de máxima verossimilhança estocástico	19
3	Modelos de sinais	22
3.1	Modelo síncrono	22
3.2	Modelo assíncrono	28
4	Estimadores ML para portadoras PSK	32
4.1	Estimador ML-PSK: modelo síncrono	33
4.2	Estimador ML-PSK: modelo assíncrono	40
5	Simulações e resultados obtidos	51
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	63
A	Critério de Nyquist para supressão da interferência entre símbolos	66
B	Limitante de Cramér-Rao: modelo síncrono com uma portadora BPSK	69
C	Limitante de Cramér-Rao: modelo síncrono com uma portadora QPSK	78
D	Limitante de Cramér-Rao: modelo assíncrono com uma portadora BPSK	87
E	Aproximações para estimadores com uma única portadora	107

“e não se acende uma luz para colocá-la debaixo do alqueire, mas sim para colocá-la sobre o candeeiro, a fim de que brilhe a todos os que estão em casa.”

**Mateus 5,15**, *Novo Testamento*.