

Adrian Figueroa

Advanced system architectures and processing
algorithms for digital beamforming radars

Beiträge aus der Elektrotechnik

Adrian Figueroa

**Advanced system architectures and processing
algorithms for digital beamforming radars**

 VOGT

Dresden 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet
at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2021

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Advanced system architectures and processing algorithms for digital
beamforming radars“ von Adrian Figueroa überein.

© Jörg Vogt Verlag 2021
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-047-6

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden
Dissertation

**Advanced system architectures
and processing algorithms
for digital beamforming radars**

Adrian Figueroa

Platzhalter für Titelei

Technische Universität Dresden

Advanced system architectures and processing algorithms for digital beamforming radars

Dipl.-Ing.
Adrian Figueroa

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen
Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Plettemeier (TU Dresden)

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Ellinger (TU Dresden)

2. Gutachter: Prof. Dr. Eckhard Grass (Humboldt-Universität zu Berlin)

Tag der Einreichung: 07.12.2020

Tag der Verteidigung: 25.03.2021

A perfect plan doesn't mean having everything go within expectations.
A perfect plan is achieved when it has the plasticity needed
to flexibly deal with troubles.

Hikaru Miyoshi

Contents

List of Figures	xiii
List of Tables	xvii
List of Acronyms	xix
Dank	xxiii
Abstract	xxv
Zusammenfassung	xxvii
Introduction	xxix
Previously published original work	xxxiii
1 Radar principles	1
1.1 General properties of radar systems	1
1.1.1 Primary and secondary radar	2
1.1.2 The radar equation	3
1.2 CW-radar	6
1.2.1 Basic system architecture	7
1.2.2 Mathematical background	7
1.2.3 Doppler effect	12
1.3 Pulse radar	13
1.3.1 Simple pulse radar	13
1.3.2 Pulse-Doppler radar	16
1.3.3 Pulse-compression radar	16
1.4 UWB radar	17

1.5	Angular estimation	20
1.5.1	History	20
1.5.2	Antenna arrays	21
1.6	Phased arrays	25
1.7	MIMO radar	28
1.7.1	Requirements	28
1.7.2	Virtual antenna arrays	30
2	Processing principles	33
2.1	The Fourier series and transform	33
2.1.1	The Fourier series	34
2.1.2	Arbitrary period lengths	37
2.1.3	The Fourier transform	38
2.1.4	The discrete Fourier transform	43
2.1.5	Resolution	44
2.1.6	A brief look at window functions	45
2.2	Processing gain	48
2.2.1	Noise signal properties	48
2.2.2	Noise suppression mechanics	50
2.3	Range evaluation	53
2.4	DAS approach	55
2.4.1	Basic idea	55
2.4.2	Using DAS for FMCW MIMO radar	60
2.5	The radar cube	63
3	Nonideality	65
3.1	Distortions	65
3.2	Thermal noise	70
3.3	Quantization noise	73
3.4	Time and phase mismatch	74
3.5	Phase noise	77
3.6	Quantification of oscillator coherence	78
4	FMCW radar simulator	81
4.1	Basic functionality	81
4.2	Baseband signal generation	82
4.3	Replication of nonideality effects	84
4.3.1	Distortion	84
4.3.2	Thermal noise	85
4.3.3	Quantization noise	85
4.3.4	Time and phase mismatch	86
4.3.5	Phase noise	88

5	FMCW radar prototype	91
5.1	System architecture	91
5.1.1	Requirements	92
5.1.2	The architecture	93
5.2	Radar hardware	94
5.2.1	Inter-station connectivity	94
5.2.2	Analog hardware	96
5.2.3	Digital hardware	100
5.3	Radar software	103
5.3.1	Overview and communication	103
5.3.2	Embedded software	104
5.3.3	Control software	106
5.3.4	Processing and display software	107
5.4	Radar assembly	109
6	Processing enhancements	115
6.1	Automatic calibration	115
6.1.1	Metrics	118
6.1.2	The optimizer	119
6.1.3	Coordinate systems	119
6.1.4	Baseband phase skew	120
6.1.5	Suitability of different metrics	123
6.1.6	Simulation and reality	126
6.2	Frequency hopping	126
6.2.1	Offsetting the baseband frequency	132
6.2.2	The shifting of harmonic frequencies and intermodulation products	134
6.2.3	Spectral rotation	137
6.2.4	Spectral recombination	140
6.2.5	Practical implementation and evaluation	144
6.2.6	Application to MIMO radar systems	145
6.2.7	Simulation and measurements	147
6.2.8	The corner case of extreme distortion	151
6.3	Target extraction	151
6.3.1	Types of cells, and selection strategies	154
6.3.2	Cell averaging	156
6.3.3	Ordered statistics	157
6.3.4	Detections in a radar image	158
6.4	CLEAN algorithm	158
6.4.1	Sidelobes in radar images	160
6.4.2	Mitigation approach	160
7	Measurement scenarios	165
7.1	Cables	165
7.2	Archery range	166

7.3	The open sea	166
7.4	System demonstration	168
7.4.1	Prerequisites	169
7.4.2	Measurement results	169
7.4.3	Takeaway	174
8	The conclusion and a look ahead	175
	Bibliography	177
	List of Symbols	183
	Adrian Figueroa – curriculum vitae	187

List of Figures

1.1	Reflectivity of different kinds of objects	4
1.2	FMCW-radar system architecture and signal shapes	8
1.3	Range resolution in pulse radar - an analogy	14
1.4	Pulse with a width of 1 (unscaled rectangular function)	18
1.5	Pulse with a width of 0.1 (compressed rectangular function)	19
1.6	Judging the shape of a planet, depending on the size of the observer	22
1.7	Linear antenna array with a target at an angle of α in its far-field	24
1.8	Phased array in receive mode	26
1.9	Phased array in transmit mode	28
1.10	Conventional and sparse virtual antenna arrays	30
2.1	Chopped sine wave	38
2.2	Chopped sine wave, repeated with a period of 5	39
2.3	Fourier coefficients of chopped sine wave, repeated with a period of $T = 5$	41
2.4	Fourier coefficients of chopped sine wave, repeated with a period of $T = 20$	41
2.5	Continuous Fourier transform of chopped sine wave	42
2.6	Window functions and their spectra	46
2.7	Windowed test signal	46
2.8	Comparison of window functions in a simulated radar image with one target	49
2.9	Discrete spectra of cosine functions with different frequencies	56
2.10	Antenna array with two elements, seeing two targets	57
2.11	Block diagram of a minimal delay-and-sum beamformer	58
2.12	Time domain signals of the individual signal paths	58
2.13	Measurement scenario, including an antenna array for MIMO radar	61
2.14	Time domain signals of the individual signal paths	61

2.15	Illustration of the radar data cube with a target in it	63
2.16	General radar image, a spatial data representation	64
3.1	Time domain signals with and without distortion	69
3.2	Spectra of signal components with and without distortion	71
3.3	Spectra of sum signals with and without distortion	72
3.4	Phase noise spectra	77
3.5	Influence of phase noise on the baseband signal	80
4.1	Radar image without nonideality simulation	83
4.2	Effects of single or double distortion with the same parameters .	84
4.3	Radar image with simulated distortion in the baseband	85
4.4	Output of a simulated 3 bit ADC that is excited full-scale	87
4.5	Radar image with simulated phase mismatch between antennas	88
4.6	Phase error distribution	89
5.1	Complete FMCW MIMO system architecture	95
5.2	Central station with PLL architecture	97
5.3	Central station with DDS architecture	98
5.4	Transmitter block	99
5.5	Receiver block	100
5.6	Digital block	102
5.7	Software communication flow	104
5.8	Embedded software architecture	105
5.9	Control software architecture	107
5.10	Control software	108
5.11	Display software architecture	109
5.12	Display software	110
5.13	Mechanical assembly overview	111
5.14	Mechanical assembly swivel storage	112
5.15	Mechanical assembly cooling	113
5.16	Individual receiver modules, connected to patch antennas	114
6.1	Optimization flow	117
6.2	Radar coordinate systems	121
6.3	Metrics compared with regard to convergence behaviour	124
6.4	Metrics compared with regard to remaining phase error ©2020, IEEE	125
6.5	Entropy metric compensation effectiveness	125
6.6	Automatic calibration, applied to simulation results	127
6.7	Automatic calibration, applied to actual measurements	128
6.8	Measurement scenario for testing automatic calibration on the archery range	129
6.9	Signal flow in the hopping system	133
6.10	Spectra of baseband signals during frequency hopping	142
6.11	The combined measurements	143

6.12	Decay of hopping suppression, based on SNR	144
6.13	Radar spectra at different stages of the frequency hopping algorithm.	146
6.14	Measurement scenario on the archery range for testing frequency hopping	148
6.15	Radar images from simulation ©2020, IET	150
6.16	Radar images from measurements ©2020, IET	152
6.17	Radar images from simulation, high distortion	153
6.18	Reference region around the cell under test	155
6.19	Reference region around the cell under test with guard ring	156
6.20	Line-based reference region around the cell under test with guard ring	157
6.21	Simulated radar image, and the purpose of CFAR	159
6.22	Sum spectrum to be CLEANed, along with its individual components	162
6.23	Different stages during the execution of the CLEAN algorithm	163
7.1	Measurement scenario on the archery range, top view	167
7.2	Measurement scenario on the archery range, side view	167
7.3	Position of radar sensor in Maleme, Crete (Greece)	168
7.4	Position of the radar on the coast and the target ship	169
7.5	Impact of earth's curvature on maximum measurable range	170
7.6	Radar system at its elevated measurement location	170
7.7	Observation area, as seen from behind the radar sensor	171
7.8	Radar image of the coastline in front of the radar sensor	172
7.9	Radar image that shows a large ship in front of the radar	172
7.10	Radar image that shows a small boat in front of the radar	173
7.11	Size comparison of the 8 m boat, the 50 m ship, and a human	173

List of Tables

1.1	Array path combinations for the full and the sparse array.	31
3.1	Distortion coefficients	68
4.1	List of simulated targets	83
5.1	System requirements	93
6.1	Comparison with existing work ©2020, IET	131
6.2	Distortion components and their reaction to frequency hopping	137
6.3	Target list for simulation and measurement	148
6.4	Distortion levels for simulation	149
6.5	Distortion levels for high-distortion simulation	151
6.6	Positions of spectral peaks	161
6.7	Positions of spectral peaks as found by CLEAN	162
7.1	Demonstration results in numbers	172

List of Acronyms

Notation	Description
SNR	signal-to-noise ratio xxiv, xxvi, 50, 52, 53, 70, 73, 74, 85, 100, 130, 141, 143
ADC	analog-to-digital converter 7, 9, 10, 48, 53, 73, 74, 86, 87, 100, 101, 103, 132
CA-CFAR	cell-averaging constant false alarm-rate 157
CFAR	constant false alarm-rate 108, 151, 154, 155, 158, 159
CW	continuous-wave 6, 13
DAC	digital-to-analog converter 97
DAS	delay-and-sum 55, 57, 59, 60
DC	direct current 67
DDS	direct digital synthesis 96, 97, 99, 100, 106–108
DFT	discrete Fourier transform 7, 45, 53, 55
FFT	fast Fourier transform 7, 108
FMCW	frequency-modulated continuous-wave xxiii–xxvi, 1, 6, 7, 9, 13, 16, 17, 19, 20, 33, 44, 48, 50, 53, 60, 70, 74, 75, 77, 78, 81, 92, 93, 96, 97, 106, 115, 123, 129, 130, 132, 145, 154, 158, 165, 168
FPGA	field-programmable gate array 101
GPS	global positioning system 20

Notation	Description
GUI	graphical user interface 107
HAL	hardware abstraction layer 104
IC	integrated circuit 60
LM-BFGS	limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno 119, 124
LNA	low noise amplifier 7, 70, 73, 99
LOS	line-of-sight 160
MCU	microcontroller unit 101, 104
MIMO	multiple-input multiple-output xxiii–xxvi, 21, 28–30, 60, 74, 82, 86, 92, 115, 123, 145, 147, 149, 151, 154, 165, 168, 175
NLOS	non-line-of-sight 160
OS-CFAR	ordered statistics constant false alarm-rate 157
PC	personal computer 103, 104, 106, 107, 110
PCB	printed circuit board 75, 92
PLL	phase-locked loop 96, 97, 101
PMCW	phase-modulated continuous-wave 7
PSD	power spectral density 19, 50, 88
PSF	point-shape function 160–162
RF	radio frequency 7, 9, 75, 77, 79, 81, 93, 96, 99, 100
RMS	root mean square 74
RPC	remote procedure call 103, 106
RTOS	real-time operating system 104
SAR	synthetic aperture radar 23, 117
SDRAM	synchronous dynamic random access memory 101
SPI	serial peripheral interface 106
TDM	time-division multiplex 166
TUD	Technische Universität Dresden 94, 96
UWB	ultra wide band 17, 19, 20
VGA	variable-gain amplifier 100

Notation	Description
WGN	white Gaussian noise 85, 88

Dank

Ich danke an dieser Stelle all denen, die mich während meiner Arbeit am Lehrstuhl und bei meiner Dissertation unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. sc. techn. habil. Dipl. Betriebswissenschaften Frank Ellinger gebührt mein Dank für die einmalige Gelegenheit, an seinem Lehrstuhl promovieren zu dürfen und spannende, innovative Themen aus der aktuellen Forschung bearbeiten zu können.

Für seine Unterstützung während meiner Dissertation, seine reiche Erfahrung, seinen fachlichen und persönlich Rat und ein immer offenes Ohr, danke ich besonders Niko Joram.

Belal Al-Qudsi und Manu Thayyil danke ich für die Durchsicht meiner Dissertationsschrift und ihre hilfreichen Anmerkungen. Meinen Kollegen aus dem Büro danke ich für eine motivierende Atmosphäre, eine gelegentliche Ablenkung und anregende Gespräche.

Ich danke meiner Familie und meinen Freunden, die mich immer unterstützt und die mir ihre Zeit geschenkt haben.

Abstract

All existing radar systems suffer from effects of nonideality, like noise, distortions, and component or channel mismatch. These are often a result of limitations in the current level of technology, but can also stem from the desire to develop systems with the least complexity and cost. Among the most impactful effects are time and phase misalignments between individual channels in multi-antenna sensors, as well as distortions in the analog domain.

Firstly, this work provides deep theoretical knowledge about frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radar systems that employ the multiple-input multiple-output (MIMO) principle and describes the design and construction of a prototype system that serves as a development and experimenting platform. Alongside it, a new and efficient radar simulator was developed and used for rapidly iterating over possible system architectures and testing advanced processing strategies. The radar system was built from the ground up, beginning at the base component level. Analog and digital hardware, antennas, and a capable radar software framework were created, ensuring a successful operation of the complete system. Various obstacles during the design and implementation efforts had to be overcome and are extensively discussed in this work. As a remedy to unwanted system nonidealities, novel algorithms and architectures are introduced, which improve upon the state of the art of radar signal processing. The final radar prototype was tested to achieve a maximum range of 3 km for a target of 50 m length and an average angular resolution in the order of 2.4° . With an update rate of at least 10 Hz for the complete radar image, the radar offers real-time capabilities for use in a maritime environment. This allows tracking of fast-moving targets and grants the radar operator a natural view on the sensor's surroundings.

One of the major challenges in designing a distributed radar system with multi-

ple transmit and receive elements, is to align the separate channels with regard to timing and phase. Differences in path length due to cables, or traces on circuit boards can lead to variations in signal propagation. Without countering these timing issues, the produced radar data is often unusable, since angular target information cannot be recovered. The proposed automatic calibration approach solves this problem elegantly, by correcting the time and phase relations of the individual channels in MIMO radar systems without the need for a physical calibration target. For achieving this, an optimizer maximizes a contrast metric that judges the sharpness of the radar image. Since the calibration quality of the radar sensor correlates with the sharpness of the radar image, it is possible to find the ideal phase correction coefficients for the individual signal paths, regardless of the target situation in front of the radar sensor.

Many radar systems have in common that they employ a number of analog components, which can alter the signal that passes through them in shape. Mixers and amplifiers, particularly in the baseband signal path of FMCW radar, introduce harmonic distortions. The presented frequency hopping approach thus tackles this impactful kind of system nonideality by cancelling harmonic contributions within the baseband, regardless of their origin. In consequence, the quality of radar images can be significantly improved without the need for specialized hardware blocks. By performing a number of only four repeated measurements with unique chirp parameters, the algorithm is able to achieve an improvement of spurious-free dynamic range of 45 dB, given a signal-to-noise ratio (SNR) of 60 dB between the desired target beat signal and the noise floor of the frontend.

Zusammenfassung

Jedes Radarsystem leidet unter Effekten der Nichtidealität, wie Rauschen, Verzerrungen, oder einem fehlerhaften Abgleich von Bauteilen und Signalkanälen. Während einige dieser Effekte auf die Einschränkungen der aktuellen Technologien zurückzuführen sind, entstehen sie nicht zuletzt aufgrund von Einsparungen während der Produktentwicklung, mit dem Ziel Kosten und Komplexität zu reduzieren. Zwei der wichtigsten Effekte sind Zeit- und Phasenfehler zwischen Kanälen eines Systems mit mehreren Antennen, sowie Verzerrungen durch analoge Bauteile.

Zu Beginn beleuchtet diese Arbeit die theoretischen Grundlagen von frequency-modulated continuous-wave (FMCW) Radarsystemen, sowie dem multiple-input multiple-output (MIMO) Winkelmessverfahren und beschreibt den Entwurf und Aufbau eines Prototypen, der als Entwicklungs- und Experimentierplattform dient. Darüber hinaus wird ein vollständiger und neuartiger Radarsimulators beschrieben, der zur Erprobung von Systemarchitekturen und fortschrittlichen Strategien zur Signalverarbeitung dient. Von der Systemarchitektur bis hin zur tiefsten Ebene der elektronischen Schaltungen wurden alle notwendigen Bausteine des Radars entworfen und implementiert. Dies beinhaltet digitale und analoge Schaltungen, Antennen, sowie ein umfassendes Softwarepaket zur Steuerung und Signalverarbeitung. Zahlreiche Herausforderungen mussten bei der Implementierung überwunden werden und sind in dieser Arbeit detailliert dokumentiert. Zur Unterdrückung von Nichtidealitätseffekten werden neue Algorithmen und Systemarchitekturen vorgestellt, die über den Stand der Technik hinausgehen. Der Prototyp erzielt eine maximale Reichweite von 3 km bei einem Ziel von 50 m Länge. Die durchschnittliche Winkelauflösung beträgt 2.4° . Hervorzuheben ist die Echtzeitfähigkeit des Radars für die Nutzung in maritimen Anwendungen. Mit einer Rate von mindestens 10 Hz wird das ausgegebene Radarbild vollständig aktualisiert. Dies erlaubt die Verfolgung von Zielen mit einer hohen Fortbe-

wegungsgeschwindigkeit und ermöglicht eine natürliche Beurteilung der Umgebung des Radarsensors.

Eine besondere Herausforderung beim Entwurf eines verteilten Radarsystems mit mehreren Sende- und Empfangselementen, ist der Zeit- und Phasenabgleich der individuellen Signalkanäle. Sehr häufig führen unterschiedliche Pfadlängen in Kabeln oder Leiterbahnen zu Schwankungen der Signallaufzeit. Ohne einen Abgleich dieser Fehler ist das erzeugte Radarbild unbrauchbar und lässt keine Winkelschätzung für die Ziele zu. Als Lösung wird in diesem Dokument eine fortschrittliche automatische Kalibrierung vorgestellt, die den Kanalabgleich in einem MIMO Radarsystem durchführt, ohne dabei ein physikalisches Kalibrierziel zu benötigen. Sie nutzt ein Optimierungsverfahren, um Phasenkorrekturkoeffizienten zu errechnen, die daraufhin zur Kompensation der Phasenfehler verwendet werden. Die Schärfe des Radarbildes ist mit der Qualität der Phasenkalibrierung korreliert und kann durch eine Metrik rechnerisch ermittelt werden. Das Optimierungsverfahren maximiert diese Schärfemetrik, um die idealen Phasenkorrekturfaktoren zu bestimmen. Die Methode funktioniert unabhängig von der Zielsituation in der Umgebung des Radarsensors.

Viele Radarsysteme haben gemeinsam, dass sie analoge Komponenten einsetzen, die die Form von Signalen unerwünscht verändern können. Verstärker und Mischerblöcke, die in FMCW Radaren häufig im Basisbandpfad eingesetzt werden, sind meist die Quelle von Verzerrungen. Das vorgestellte Frequenzsprung-Verfahren unterdrückt dieses Phänomen der Nichtidealität von Radarsystemen. Es ermöglicht die Beseitigung von harmonischen Verzerrungen verschiedenen Ursprungs aus dem Basisband eines FMCW Radars. Dieses Verfahren führt zu einer signifikanten Aufwertung der Qualität ausgegebener Radarbilder, wobei keine spezialisierten Hardwarekomponenten benötigt werden. Mit nur vier Einzelmessungen und bei Nutzung spezieller Rampenparameter, konnte das Frequenzsprung-Verfahren den Dynamikumfang des Radars um 45 dB erhöhen. Dieser Wert wurde bei einem signal-to-noise ratio (SNR) von 60 dB im Abstandsspektrum ermittelt.