PROCESSING METHODS FOR LEFT-RIGHT AMBIGUITY RESOLUTION IN TWINLINE TOWED ARRAY SONAR

BAIJU M NAIR

CENTRE FOR APPLIED RESEARCH IN ELECTRONICS
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DELHI
INDIA

DECEMBER 2023

Processing Methods for Left-Right Ambiguity Resolution in Twinline Towed Array Sonar

by

Baiju M Nair

Centre for Applied Research in Electronics

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology, Delhi

India

December 2023

Dedicated to

My Family

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Processing Methods for Left-Right Ambiguity Resolution in Twinline Towed Array Sonar"** being submitted by **Mr. Baiju M Nair** to the Centre for Applied Research in Electronics, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is the record of the bona-fide research work carried out by him under our supervision. In our opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

(Prof. Arun Kumar)
CARE
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi 110016
India

(Prof. Rajendar Bahl)
CARE
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi 110016
India

Acknowledgments

It gives me great pleasure to express my gratitude to all those who made this thesis possible. I express my heartfelt gratitude to my advisors, Prof. Arun Kumar and Prof. Rajendar Bahl. I warmly thank Prof. Arun Kumar and Prof. Rajendar Bahl, for their helpful advice, valuable supervision, and extensive discussions, without which this work would not have been possible.

I sincerely acknowledge Naval Physical and Oceanographic Laboratory (NPOL) and Defence R&D Organization (DRDO), India, for allowing me to pursue my Ph.D. work. I gratefully acknowledge Dr. Ajith Kumar K, Director, NPOL, Dr. S. Vijayan Pillai, Director (Rtd.), NPOL, and S K Shenoy, Director (Rtd.) NPOL, for allowing me to join IIT Delhi as a Ph.D. scholar. I also express my deep gratitude to Rema Devi.M. and P. V Jose (Rtd.), Associate Directors, NPOL, for their constant encouragement and support for my Ph.D. My seniors, Manjula Rani, Prakash Narayanan M, and Dr. Murali Krishna P, deserve special gratitude for their inspiration and support.

Further thanks go to all the members of the towed array group at NPOL, Dr. Jomon George, Jojish Joseph, Sinchu P, Unnikrishnan N, and Rubin Jose Peter, for their help and support throughout this research work. I am grateful to Dr. Santhanakrishnan T for reviewing my papers on multiple occasions. I am thankful to all of my friends and colleagues at NPOL for their encouragement and support, particularly Shiv Kumar, Dr. Sooraj Ambat, Dr. Hareesh G, Nissar K.E, Dr. Sarath Gopi, Nirmal Mohan, Sham Kumar S, Dr. Satheesh S, Domanic Ricky.

Prof.S.D.Joshi, Prof.Ananjan Basu, and Prof.Monika.Aggarwal, members of my research committee, are thanked for their time and valuable guidance during my research. I am indebted to the Center for Applied Research in Electronics (CARE) Lab members who made my days at IIT a fantastic experience. I would like to thank Sunil Sinha, Bibin Kumar, Nitesh Sahu, Umesh, and Rithesh for their help in various roles throughout my time at Lab. I also extend my gratitude to all the faculty and staff in the Department of CARE, IIT Delhi, for always being helpful and friendly.

Finally, I would like to thank all my family members, my mother, M. Girija, and my father, M. Kunhiraman, for their unconditional love and endless encouragement and support. Many thanks to my in-laws (Lalitha and P. V. Narayanan), brothers (Biju and Bijoy), brother-in-law (Manoj), and sisters-in-law (Sikha, Deepa, and Divya) for their consistent love and support. I also wish to thank my grandparents, A. Govindan (Late) and Karthiyayani, for the endless love and affection they have always offered me. I am extremely grateful to my wife, Sheena, and our kids, Nandana and Hari, for their invaluable love, support, and encouragement. They have always believed in me, perhaps even more than I do, and have always been supportive.

Abstract

A linear array with omnidirectional sensors cannot discriminate between the azimuth angle and its complementary angle due to axisymmetry about the array axis. This thesis examines solutions to the bearing ambiguity problem known as Left-Right (LR) ambiguity using two closely spaced parallel arrays. In the first part of the thesis, we design a Second-order Nulling (SoN) beamformer to produce a cardioid-type spatial response with a null that is electronically steered to the complementary angle of the direction of interest. Three methods, namely SoN, Null Constrained Beamformer (NCB), and 2-Dimension Direct Beamformer (2DDB), are studied. The performance is evaluated in correlated noise conditions modeled by a first-order auto-regressive process. This work establishes analytical results for the bound on the detection gain of the two parallel arrays in terms of the Rayleigh quotient of the circulant noise correlation matrix.

A closed-form expression is developed for estimating the loss due to cardioid processing at small inter-array spacing. The closed-form expressions are validated using Monte-Carlo simulations based on the deflection criterion. Twin array processing using the 2DDB method results in a higher Detection Gain (DG), while cardioid-based beamformers give a higher Rejection Ratio (RR). Data from an at-sea experiment using a towed array is analyzed. Field results show that the deeper null achieved by the cardioid method results in a higher RR compared to 2DDB. From the field data, approximately 19 dB Left-Right discrimination is demonstrated at 1650 Hz for the broadside. Experimental results from a towed array corroborate the analysis and simulations.

In the second problem addressed in the thesis, we examine the role of a sparse

array, specifically the Coprime Sparse Arrays (CSA) on the twin array. CSA with two collocated Uniform Linear Array (ULA) are used to estimate $\mathcal{O}(MN)$ direction of arrivals for a narrow band source with only $\mathcal{O}(M+N)$ sensors. However, CSA cannot discriminate the azimuth and its complementary angle due to the symmetry along the array axis. We design LR resolved CSA (LRCSA) to produce a null that is electronically steered to the complementary angle of the desired direction. LRCSA twin array achieves higher spatial resolution than the conventional fully populated LR array with the same number of sensors, much like the collocated CSA. The bound on the DG is analytically established for the LRCSA under correlated noise scenarios. Twin array processing using the LRCSA method results in narrow main lobe beamwidth along with a higher rejection ratio (RR) compared to 2DDB and NCB. Data obtained from a sea experiment using a towed array is analyzed. The results confirm that CSA based cardioid processing resolves LR ambiguity with a higher RR and narrower beams.

The performance from an adaptive beamformer-based LR ambiguity resolution with twin-array is examined next. We use an adaptive beamformer based on Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) beamformer along with cardioid beamforming to produce a null that is electronically steered to the complementary angle of the desired direction for a twin array. In the adaptive scheme, beamforming is first performed along the azimuth to obtain two sets of beams. The beam signal from each array is then combined linearly with weights determined to minimize the output power at a complementary angle while maintaining a unity response in the desired direction. The minimization principle tends to develop a null in the complementary direction, while the unity response constraint ensures an undistorted signal from the desired direction. We demonstrate the performance of MVDR based beamformer on a twin array in the correlated noise modeled by a first-order auto-regressive process.

This thesis also explores a Deep Neural Network (DNN) technique for LR resolution and analyzes its performance. We develop a framework for the left-right resolution problem based on the probability of error in estimating the correct state (PoE). Binary classification based on DNN is used to resolve the LR ambiguity. The DNN method based on raw sensor data processing is found to be closer to the optimal performance.

अमूर्त

सर्वदिशात्मक सेंसर वाला एक रैखिक सरणी सरणी अक्ष के बारे में अक्ष समरूपता के कारण अज़ीमुथ कोण और उसके पूरक कोण के बीच भेदभाव नहीं कर सकता है। यह थीसिस दो निकट दूरी वाले समानांतर सरणियों का उपयोग करके बाएं-दाएं (एलआर) अस्पष्टता के रूप में ज्ञात असर अस्पष्टता समस्या के समाधान की जांच करती है। थीसिस के पहले भाग में, हम एक शून्य के साथ कार्डियोइड-प्रकार की स्थानिक प्रतिक्रिया उत्पन्न करने के लिए एक दूसरे क्रम के न्यूलिंग (SoN) बीमफॉर्मर को डिज़ाइन करते हैं जो इलेक्ट्रॉनिक रूप से ब्याज की दिशा के पूरक कोण पर संचालित होता है। तीन तरीकों, अर्थात् एसओएन, नल कंस्ट्रेन्ड बीमफॉर्मर (एनसीबी), और 2-डायमेंशन डायरेक्ट बीमफॉर्मर (2डीडीबी) का अध्ययन किया जाता है। प्रदर्शन का मूल्यांकन प्रथम-क्रम ऑटो-रिग्रेसिव प्रक्रिया द्वारा निर्मित सहसंबद्ध शोर स्थितियों में किया जाता है। यह कार्य सर्कुलेट शोर सहसंबंध मैट्रिक्स के रेले भागफल के संदर्भ में दो समानांतर सरणियों के पता लगाने के लाभ पर सीमा के लिए विश्लेषणात्मक परिणाम स्थापित करता है।

छोटी अंतर-सरणी रिक्ति पर कार्डियोइड प्रसंस्करण के कारण होने वाले नुकसान का अनुमान लगाने के लिए एक बंद-रूप अभिव्यक्ति विकसित की गई है। विक्षेपण मानदंड के आधार पर मोंटे-कार्लो सिमुलेशन का उपयोग करके बंद-रूप अभिव्यक्तियों को मान्य किया जाता है। 2डीडीबी विधि का उपयोग करके ट्विन ऐरे प्रसंस्करण के परिणामस्वरूप उच्च डिटेक्शन गेन (डीजी) होता है, जबकि कार्डियोइड-आधारित बीमफॉर्मर उच्च अस्वीकृति अनुपात (आरआर) देते हैं। खींचे गए सरणी का उपयोग करके समुद्र में किए गए प्रयोग के डेटा का विश्लेषण किया जाता है। फ़ील्ड परिणाम बताते हैं कि कार्डियोइड विधि द्वारा प्राप्त गहरे शून्य के परिणामस्वरूप 2DDB की तुलना में उच्च आरआर होता है। फ़ील्ड डेटा से, ब्रॉडसाइड के लिए 1650 हर्ट्ज़ पर लगभग 19 डीबी बाएँ-दाएँ भेदभाव प्रदर्शित होता है। खींचे गए सरणी से प्रायोगिक परिणाम विश्लेषण और सिमुलेशन की पुष्टि करते हैं।

थीसिस में संबोधित दूसरी समस्या में, हम एक विरल सरणी की भूमिका की जांच करते हैं, विशेष रूप से जुड़वां सरणी पर कोप्राइम विरल सारणी (सीएसए)। केवल O(M + N) सेंसर वाले एक संकीर्ण बैंड स्रोत के लिए आगमन की O(MN) दिशा का अनुमान लगाने के लिए दो कोलोकेटेड यूनिफ़ॉर्म लीनियर एरे (ULA) वाले CSA का उपयोग किया जाता है। हालाँकि, सीएसए सरणी अक्ष के साथ समरूपता के कारण अज़ीमुथ और उसके पूरक कोण में भेदभाव नहीं कर सकता है। हम एलआर रिजॉल्व्ड सीएसए (एलआरसीएसए) को एक शून्य उत्पन्न करने के लिए डिज़ाइन करते हैं जो इलेक्ट्रॉनिक रूप से वांछित दिशा के पूरक कोण पर संचालित होता है। एलआरसीएसए ट्विन ऐरे समान संख्या में सेंसर के साथ पारंपरिक पूरी तरह से आबादी वाले एलआर ऐरे की तुलना में उच्च स्थानिक रिज़ॉल्यूशन प्राप्त करता है, जो कि कोलोकेटेड सीएसए की तरह है। सहसंबद्ध शोर परिदृश्यों के तहत एलआरसीएसए के लिए डीजी पर सीमा

विश्लेषणात्मक रूप से स्थापित की गई है। एलआरसीएसए विधि का उपयोग करके जुड़वां सरणी प्रसंस्करण के परिणामस्वरूप 2डीडीबी और एनसीबी की तुलना में उच्च अस्वीकृति अनुपात (आरआर) के साथ संकीर्ण मुख्य लोब बीमविड्थ होता है। एक खींचे गए सरणी का उपयोग करके समुद्री प्रयोग से प्राप्त डेटा का विश्लेषण किया जाता है। परिणाम पुष्टि करते हैं कि सीएसए आधारित कार्डियोइड प्रसंस्करण उच्च आरआर और संकीर्ण बीम के साथ एलआर अस्पष्टता को हल करता है।

ट्विन-एरे के साथ एक अनुकूली बीमफॉर्मर-आधारित एलआर अस्पष्टता रिज़ॉल्यूशन से प्रदर्शन की जांच आगे की जाती है। हम कार्डियोइड बीमफॉर्मिंग के साथ-साथ मिनिमम वेरिएंस डिस्टॉरशनलेस रिस्पॉन्स (एमवीडीआर) बीमफॉर्मर पर आधारित एक अनुकूली बीमफॉर्मर का उपयोग करते हैं, जो एक नल का उत्पादन करता है जिसे इलेक्ट्रॉनिक रूप से एक जुड़वां सरणी के लिए वांछित दिशा के पूरक कोण पर ले जाया जाता है। अनुकूली योजना में, बीम के दो सेट प्राप्त करने के लिए बीमफॉर्मिंग को पहले अज़ीमुथ के साथ किया जाता है। प्रत्येक सरणी से बीम सिग्नल को वांछित दिशा में एकता प्रतिक्रिया बनाए रखते हुए एक पूरक कोण पर आउटपुट पावर को कम करने के लिए निर्धारित वजन के साथ रैखिक रूप से जोड़ा जाता है। न्यूनतमकरण सिद्धांत पूरक दिशा में शून्य विकसित करता है, जबकि एकता प्रतिक्रिया बाधा वांछित दिशा से एक अविरल संकेत सुनिश्चित करती है। हम प्रथम-क्रम ऑटो-रिग्रेसिव प्रक्रिया द्वारा सहसंबंधित शोर में एक जुड़वां सरणी पर एमवीडीआर आधारित बीमफॉर्मर के प्रदर्शन को प्रदर्शित करते हैं।

यह थीसिस एलआर रिज़ॉल्यूशन के लिए डीप न्यूरल नेटवर्क (डीएनएन) तकनीक की भी खोज करती है और इसके प्रदर्शन का विश्लेषण करती है। हम सही स्थिति (पीओई) का अनुमान लगाने में त्रुटि की संभावना के आधार पर बाएं-दाएं समाधान समस्या के लिए एक रूपरेखा विकसित करते हैं। डीएनएन पर आधारित बाइनरी वर्गीकरण का उपयोग एलआर अस्पष्टता को हल करने के लिए किया जाता है। कच्चे सेंसर डेटा प्रोसेसिंग पर आधारित DNN विधि इष्टतम प्रदर्शन के करीब पाई गई है।

Glossary

Boldfaced lower case symbols denote vectors and boldfaced upper case symbols denote matrices respectively. $\mathbf{x}^H$ denotes Hermitian (conjugate-transpose) of $\mathbf{x}$.

$\mathbf{a}_{ULA}$	Array response vector for the linear array.
$\mathbf{A}_{ULA}$	Array response matrix for the linear array.
$\mathbf{A}_T$	Array response matrix for the twin array.
$\mathbf{a}_T$	Array response vector for the twin array.
g_T	Twin array beamformed signal only output.
$\mathbf{n}_b$	Noise received at the b array.
$\mathbf{n}_c$	Noise received at the c array.
n_T	Twin array beamformed noise only output.
$\mathbf{r}$	Range.
$\mathbf{R}_N$	Spatial noise correlation between sensors in an array.
$\mathbf{R}_{N,ij}$	Spatial noise correlation between i^{th} and j^{th} sensors across single linear array.
$\mathbf{R}_{\mathcal{N}}$	Spatial noise correlation between sensors across twin array.
$\mathbf{R}_{S,ij}$	Spatial signal correlation between any i^{th} and j^{th} sensors across single linear array.
$\mathbf{R}_{\mathcal{S}}$	Spatial signal correlation between sensors across twin array.
Σ_N	Diagonal Value.
$\mathbf{w}_{ULA}$	Weight vector for linear beamforming.
$\mathbf{w}_T$	Weight vector for twin beamforming.
$\mathbf{w}_{T,2D}$	Weight vector for twin beamforming using 2-D beamforming.
$\mathbf{w}_{T,NCB}$	Weight vector for twin beamforming using Null Constrained beamforming.
$\mathbf{w}_{T,SoN}$	Weight vector for twin beamforming using Second Order Beamformung.
$\mathbf{x}$	Signal received at the array.

$\mathbf{x}_b$	Signal received at the b array.
$\mathbf{x}_c$	Signal received at the c array.
y_b	Beamformed output at the b array.
y_c	Beamformed output at the c array.
$\tilde{y}_b$	Sparse array beamformed output at the b array.
$\tilde{y}_c$	Sparse array beamformed output at the c array.

Acronyms

2DDB	2-Dimension Direct Beamformer.
3DDB	3-Dimension Direct Beamformer.
3NCB	Three Sensor Null Constrained Beamformer.
ASW	Anti-submarine Warfare.
AUV	Autonomous Underwater Vehicle.
CBF	Conventional Beamforming.
CLRCSA	Correlated CSA based processing for twin array.
CSA	Coprime Sparse Arrays.
CSA_{min}	CSA based on minimum processing technique.
CSA_{pp}	CSA based on product processing technique.
CSDM	Cross-spectral density matrix.
DG	Detection Gain.
DNN	Deep Neural Network.
DOA	Direction of Arrival.
HPBW	Half-Power Beamwidth.
LR	Left-Right.
LRCSA	LR resolved CSA.
LRCSA_{min}	LRCSA based on minimum processing technique for twin array.
LRCSA_{pp}	LRCSA based on product processing technique for twin array.
LRULA_{2D}	LR processing with ULA using 2D CBF.
LRULA_{NCB}	LR processing with ULA using Null Constrained beamformer.
LRULA_{SoN}	LR processing with ULA using Second order Nulling beamformer.
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response.

NCB	Null Constrained Beamformer.
PoE	Probability of error in estimating the correct state.
PSL	Peak Side Lobes.
RIS	Real and Imaginary component of the sensor signal.
RR	Rejection Ratio.
SNR	Signal to Noise Ratio.
SoN	Second-order Nulling.
ULA	Uniform Linear Array.

Contents

List of Figures

List of Tables