

TMLAA for User-Defined Harmonic Beam Steering Using Particle Swarm Optimization

Dr. Nageswar Rao Thadikamalla¹, Dr. Ramesh Amugothu², Dr. Praveen Kumar Mudidhe^{3*}
Dr. Thadikamalla Krishnarjuna Rao⁴, Dr. Sukaraboina Sreenu⁵, Prof. Prakasa Rao A⁶
Dr. Nageswar Rao Thadikamalla¹, Dr. Ramesh Amugothu², Dr. Praveen Kumar Mudidhe^{3*}
Dr. Thadikamalla Krishnarjuna Rao⁴, Dr. Sukaraboina Sreenu⁵, Prof. Prakasa Rao A⁶

¹Assistant Professor School of Engineering, Dept of ECE, Anurag University, Hyderabad, Telangana-India

²Assistant Professor, Dept of ECE, Dayananda Sagar University Bengaluru, Bengaluru, India

³Assistant Professor, Dept of ECE, Vasavi College of Engineering, Hyderabad, Telangana-India

⁴Assistant Professor, Dept of ECE, Siddhartha Institute of Engineering and Technology, Hyderabad, Telangana-India

⁵Assistant Professor, Dept of ECE, Vardhaman College of Engineering, Hyderabad, Telangana-India

⁶Associate Professor, Dept of ECE, National Institute of Technology Warangal, Warangal, Telangana-India

Corresponding Author *: nageswarrao.ece@anurag.edu.in

వినియోగదారు నిర్వచించిన హార్మోనిక్ బీమ్ స్టీరింగ్ కోసం TMLAA
పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్ ఉపయోగించి

¹ అసిస్టెంట్ ప్రొఫెసర్ , ECE విభాగం,, Anurag University, హైదరాబాద్, తెలంగాణ-భారతదేశం

² అసిస్టెంట్ ప్రొఫెసర్ , ECE విభాగం,, Dayananda Sagar University Bengaluru-భారతదేశం

³ అసిస్టెంట్ ప్రొఫెసర్ , ECE విభాగం, వాసవి కాలేజ్ ఆఫ్ ఇంజనీరింగ్ , హైదరాబాద్, తెలంగాణ-భారతదేశం

⁴ అసిస్టెంట్ ప్రొఫెసర్ , ECE విభాగం, సిద్ధార్థ ఇన్స్టిట్యూట్ ఆఫ్ ఇంజనీరింగ్ అండ్ టెక్నాలజీ , హైదరాబాద్, తెలంగాణ-భారతదేశం

⁵ అసిస్టెంట్ ప్రొఫెసర్ , ECE విభాగం, వర్ధమాన్ కాలేజ్ ఆఫ్ ఇంజనీరింగ్ , హైదరాబాద్, తెలంగాణ-భారతదేశం

⁶ అసోసియేట్ ప్రొఫెసర్ , ECE విభాగం, నేషనల్ ఇన్స్టిట్యూట్ ఆఫ్ టెక్నాలజీ వరంగల్, వరంగల్ , తెలంగాణ-భారతదేశం

సంబంధిత రచయిత *: nageswarrao.ece@anurag.edu.in

సారాంశం

ఈ పని టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ లీనియర్ యాంటెన్నా అర్రే (TMLAA) ఉపయోగించి హార్మోనిక్ నమూనాల ఆటోమేటిక్ ఎలక్ట్రానిక్ బీమ్ స్టీరింగ్ కోసం ఒక వినూత్న పద్ధతిని ప్రతిపాదిస్తుంది. విస్తృత ఎత్తు పరిధిలో యూజర్-ముందు నిర్వచించిన డైరెక్షన్ ఆఫ్ అరైవల్ (DOA) వెంట ప్రధాన ఎలిగెంట్/హార్మోనిక్ బీమ్ యొక్క ఎలక్ట్రానిక్ స్టీరింగ్ను ఎనేబుల్ చేసే ఒక నవల ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ను మేము రూపొందించాము. ఈ సందర్భంలో $\pm 80^\circ$ మొదటిసారిగా, TMLAA లో హార్మోనిక్ బీమ్ స్టీరింగ్కు పార్టికల్ స్వామ్ ఆప్టిమైజేషన్ (PSO) అల్గోరిథంను వర్తింపజేస్తాము. ప్రతి శ్రేణి మూలకానికి సరైన ఆన్ మరియు ఆఫ్ స్విచింగ్ క్రమాన్ని కనుగొనడానికి PSO ఉపయోగించబడుతుంది. టైమ్-మాడ్యులేషన్ ద్వారా ఉత్పత్తి చేయబడిన సైడ్బ్యాండ్లను ఉపయోగించడం ద్వారా, మా పద్ధతి ఏకకాలంలో ప్రాథమిక పుంజానికి సంబంధించి సానుకూల మరియు ప్రతికూల దిశలలో బహుళ హార్మోనిక్ కిరణాలను నడిపించగలదు. విధానాన్ని ధృవీకరించడానికి, ఏకరీతి అంతరం మరియు ప్రస్తుత ఉత్తేజంతో 10- మరియు 16- యాంటెన్నా మూలకం టైమ్ మాడ్యులేటెడ్ LAA ని మేము పరిశీలిస్తాము. గణాంక విశ్లేషణ మరియు అనుకరణ ఫలితాలు మొదటి $\pm$ మరియు రెండవ $\pm$ హార్మోనిక్స్ యొక్క ఖచ్చితమైన స్టీరింగ్ను నిర్ధారిస్తాయి, సౌకర్యవంతమైన మరియు సమర్థవంతమైన పుంజం నియంత్రణ కోసం ఈ పద్ధతి యొక్క ప్రభావం మరియు సామర్థ్యాన్ని ప్రదర్శిస్తాయి.

కీలకపదాలు: TMLAA, PSO, DOA, యాంటెన్నా శ్రేణి, SLL.

1. పరిచయం

సిగ్నల్-టు-ఇంటర్ఫరెన్స్-ప్లస్-నాయిస్ రేషియో (SINR), బిట్ ఎర్రర్ రేట్ (BER) మరియు మొత్తం త్రూపుట్ వంటి కమ్యూనికేషన్ సిస్టమ్ల కీలక మెట్రిక్లను మెరుగుపరచడంలో యాంటెన్నా డిజైన్ కీలక పాత్ర పోషిస్తుంది. ఒకే యాంటెన్నాతో పోలిస్తే, యాంటెన్నా శ్రేణి పెరిగిన లాభం మరియు నిర్దేశకంతో సహా గణనీయమైన ప్రయోజనాలను అందిస్తుంది. సిస్టమ్ సామర్థ్యాన్ని పెంచడానికి, ఆదర్శవంతమైన యాంటెన్నా యొక్క రేడియేషన్ బీమ్ లక్షణాలు తక్కువ సైడ్లోబ్ స్థాయిలు (SLL) మరియు ఇరుకైన బీమ్ వెడల్పును కలిగి ఉండాలి. రాడార్, సోనార్, ఇమేజింగ్ మరియు జియోఫిజికల్ మరియు ఆస్ట్రోఫిజికల్ అన్వేషణతో సహా వివిధ రంగాలలో బీమ్-ఫార్మింగ్ పద్ధతులు విస్తృతంగా వర్తించబడతాయి. బీమ్ ఫోకసింగ్ లేదా స్టీరింగ్ అని కూడా పిలువబడే ఈ ప్రక్రియలో, యాంటెన్నా యొక్క ప్రధాన బీమ్ను

దాని శక్తిని ఒక నిర్దిష్ట లక్ష్యంపై కేంద్రీకరించడానికి లేదా జోక్యం యొక్క మూలం వైపు శూన్యతను మళ్ళించడానికి ఆకృతి చేయడం ఉంటుంది [1].

ఎలక్ట్రానిక్ బీమ్ స్కానింగ్ మరియు నిర్దిష్ట రేడియేషన్ నమూనాలను సంశ్లేషణ చేయడం రెండింటికీ యాంటెన్నా శ్రేణి యొక్క పారామితులను నియంత్రించడం చాలా ముఖ్యం. బీమ్ స్టీరింగ్ కోసం ఫేజ్ షిఫ్టర్లు మరియు ట్రా-టైమ్ డిలే (TTD) పద్ధతులతో సహా వివిధ పద్ధతులు అభివృద్ధి చేయబడ్డాయి. రియల్-టైమ్ ఎలక్ట్రానిక్ బీమ్ స్కానింగ్ కోసం, ఫేజ్ యాంటెన్నా అర్రే అనేది దాని భాగాల మధ్య సాపేక్ష ఫేజ్ వ్యత్యాసాన్ని మార్చగల ఆచరణీయ హార్డ్వేర్ పరిష్కారం. అయితే, ఈ సాంప్రదాయ పద్ధతులు తరచుగా విస్తృతమైన వాణిజ్య ఉపయోగం కోసం చాలా ఖరీదైనవి మరియు ప్రధానంగా సైనిక వ్యవస్థల వంటి ఖరీదైన అనువర్తనాలకు పరిమితం చేయబడతాయి. ఫ్రీక్వెన్సీ స్కానింగ్ శ్రేణులు, ఫెర్రోఎలెక్ట్రిక్ ఫేజ్ శ్రేణులు మరియు ట్రా-టైమ్ డిలే వ్యవస్థలు వంటి ప్రత్యామ్నాయాలు కూడా అధిక ధర యొక్క అదే సవాలును ఎదుర్కొంటున్నాయి, ఇది వాటి అనువర్తనాన్ని పరిమితం చేస్తుంది.

వాణిజ్య అనువర్తనాల్లో ఎలక్ట్రానిక్ బీమ్ స్టీరింగ్కు నమ్మకమైన, సరసమైన మరియు ఆధునిక విధానం అవసరం చాలా కీలకం. టైమ్-మాడ్యులేషన్ దీనిని సాధించడానికి తక్కువ-ధర మార్గాన్ని అందించడం ద్వారా ఒక వినూత్న పరిష్కారాన్ని అందిస్తుంది. ప్రతి యాంటెన్నా మూలకాన్ని క్రమానుగతంగా మాడ్యులేట్ చేయడం, ఫలిత హార్మోనిక్స్ను ఉపయోగించి వివిధ దిశల్లో బీమ్ను నడిపించడం దీని ప్రధాన ఆలోచన [2].

[2]లో ఉన్నటువంటి గత పద్ధతులు, ముందుగా నిర్వచించబడిన స్విచింగ్ పరిణామాన్ని ఉపయోగించాయి, కానీ ఇవి నిర్దిష్ట కోణాలకు పరిమితం చేయబడ్డాయి మరియు ఖచ్చితమైన, దశాంశ-విలువ స్టీరింగ్ను నిర్వహించలేకపోయాయి. ఈ మునుపటి పని కావలసిన రాక దిశ (DOA) ఆధారంగా డిజైన్ కంటే స్విచింగ్ నమూనా గురించి ఎక్కువగా ఉంది. హార్మోనిక్స్ తరచుగా వృధా శక్తిగా పరిగణించబడుతున్నప్పటికీ, మా పద్ధతి హార్మోనిక్ ఫ్రీక్వెన్సీ యొక్క బీమ్ స్కానింగ్ను సాధించడానికి వాటిని ఉపయోగిస్తుంది. దీనిని ముందే నిర్వచించిన స్విచింగ్ సీక్వెన్స్ లేదా వాంఛనీయ ఆన్-ఆఫ్ స్విచింగ్ ఇన్స్టంట్తో కనుగొనవచ్చు. గరిష్ట హార్మోనిక్ బీమ్ ఛేంజింగ్ లేదా స్టీరింగ్ను పొందడానికి మునుపటి పరిశోధన అద్భుతమైన ఫలితాలను ఇచ్చింది, కానీ ఇది ముందే నిర్వచించిన సమయ శ్రేణులపై ఆధారపడింది [2]. ఈ విధానం మా పనికి ఆచరణాత్మకం కాదు, ఎందుకంటే సమయ క్రమం బీమ్ కోణం లేదా థీటా సర్దుబాటు చేయబడినప్పుడు చాలాసార్లు మారాలి. ఈ పరిమితిని అధిగమించడానికి, మేము ఒక అనుభావిక సూత్రం లేదా ఖర్చు ఫంక్షన్ను అభివృద్ధి చేసాము, ఇది థీటాలో ఏదైనా మార్పుకు ప్రతిస్పందనగా ఆన్ మరియు ఆఫ్ సమయాలను డైనమిక్గా నవీకరిస్తుంది. ఇది సిస్టమ్ మాన్యువల్గా ముందే నిర్వచించబడిన సీక్వెన్స్ అవసరం లేకుండా కొత్త స్టీరింగ్ దిశకు అనుగుణంగా ఉండగలదని

నిర్ధారిస్తుంది, ఇది మరింత సరళంగా మరియు సమర్థవంతంగా చేస్తుంది. TMLAA యొక్క లక్షణాలు శక్తివంతమైన లక్షణం అయినప్పటికీ, డిజైనర్ వ్యవస్థను సరైన సైడ్ లోబ్ స్థాయి (‘SLL’) లేదా సైడ్ బ్యాండ్ స్థాయి (‘SBL’) తో తగ్గించడానికి ఎప్పుడూ ఇష్టపడడు. TMLAA లోని ప్రతి మూలకం మొత్తం మాడ్యులేటింగ్ సమయంలో చురుకుగా ఉంటే, రేడియేషన్ నమూనా ఏకరీతి పరిమాణంతో సరళ శ్రేణిని పోలి ఉంటుంది [3].

SLL తగ్గించుకు సాంప్రదాయిక విధానంలో, డాల్బ్ నిర్దిష్ట ఉత్తేజిత గుణకాలను ఉపయోగించి అనేక పద్ధతులను ప్రారంభించింది, దీనిని ఇతర పరిశోధకులు తరువాత విస్తరించారు. డాల్బ్-చెబిషెవ్, బైనోమియల్ మరియు టేలర్ సిరీస్ శ్రేణుల కోసం రేడియేషన్ నమూనాలను ప్లాట్ చేయడం అదే విధానాన్ని ఉపయోగించి చేయవచ్చు. TMLAA కోసం ఈ ఆలోచనను సవరించగలిగినప్పటికీ, అధిక-విలువైన బరువులను ఉపయోగిస్తే సిస్టమ్ రూపకల్పన మరింత క్లిష్టంగా మరియు ఖరీదైనదిగా మారుతుంది. టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ లీనియర్ యాంటెన్నా అర్రేస్ (TMLAA)పై ప్రస్తుత పరిశోధనలో ఎక్కువ భాగం వాటి ప్రయోజనాలు మరియు వృధా చేయబడిన రేడియేటెడ్ శక్తిని తగ్గించడానికి ప్రభావవంతమైన మార్గాలపై దృష్టి పెడుతుంది. దీనిని సాధించడానికి, జన్యు అల్గోరిథంలు (GA) మరియు ఇటీవల, హార్మోనిక్ సెర్చ్ అల్గోరిథం (HSA) [4], పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్ (PSO) మరియు నోవల్ పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్ (NPSO) వంటి వివిధ పరిణామ అల్గోరిథంలను ఉపయోగిస్తారు. సైడ్ లోబ్ స్థాయి (SLL) [5,6]ని నియంత్రించడానికి ఇతర పద్ధతులు. హ్యూరిస్టిక్ అల్గోరిథంలు తరచుగా రెండు ప్రధాన సమస్యలతో పోరాడుతున్నాయి: స్థానిక ఆప్టిమమ్ లో చిక్కుకోవడం మరియు వివిధ రకాల సమస్యలలో అనుకూలత లేకపోవడం. దీనిని పరిష్కరించడానికి, మెటా-హ్యూరిస్టిక్ విధానాలు అభివృద్ధి చేయబడ్డాయి, వీటిలో చాలా వరకు ప్రకృతిలో గమనించిన సమిష్టి ప్రవర్తనల నుండి ప్రేరణ పొందాయి. విస్తృతంగా ఉపయోగించే మెటా-హ్యూరిస్టిక్ అయిన పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్ (PSO) అల్గోరిథం అనేక ఇంజనీరింగ్ సవాళ్లకు విజయవంతంగా వర్తింపజేయబడింది. ఈ అనువర్తనాల్లో ఎలక్ట్రికల్ గ్రిడ్లలో విద్యుత్ ప్రవాహాన్ని ఆప్టిమైజ్ చేయడం, డేటా విశ్లేషణ మరియు క్లస్టరింగ్ సమస్యలను పరిష్కరించడం మరియు డిజిటల్ ఇమేజ్ ప్రాసెసింగ్ లో వివిధ విధులను నిర్వహించడం వంటి పనులు ఉన్నాయి. ఈ అధ్యయనం TMLAA (టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ లీనియర్ యాంటెన్నా అర్రే) సమస్యను పరిష్కరించడానికి జనాభా-ఆధారిత PSO అల్గోరిథం యొక్క మొదటి అనువర్తనాన్ని సూచిస్తుంది, ప్రత్యేకంగా దాని పనితీరును ఆప్టిమైజ్ చేయడం ద్వారా. ఈ కొత్త విధానం యొక్క ప్రభావాన్ని అంచనా వేయడానికి గణాంక విశ్లేషణను ఉపయోగించవచ్చు [7,8].

పరిశోధన లక్ష్యాలు మరియు పద్ధతి

ఈ అధ్యయనం రెండు వేర్వేరు యాంటెన్నా శ్రేణి సెట్ల ప్రభావాన్ని పోల్చడం లక్ష్యంగా పెట్టుకుంది , పరిశోధన లక్ష్యాలు:

మునుపటి సవాళ్లను అధిగమించడానికి మేము తీసుకున్న విచిత్ర చర్యలతో పాటు, ఇప్పటికే ఉన్న పద్ధతులతో పోలిస్తే మా ప్రతిపాదిత TMLAA (టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ లీనియర్ యాంటెన్నా అర్రే) విధానం యొక్క ముఖ్య ప్రయోజనాల సారాంశం ఇక్కడ ఉంది:

a . ప్రత్యేకమైన ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ : సైడ్ లోబ్ లెవెల్ (SLL) మరియు సైడ్ బ్యాండ్ లెవెల్ (SBL) లను ఏకకాలంలో తగ్గించే ఒక నవల ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ను మేము అభివృద్ధి చేశాము. ఈ ఫంక్షన్లో ఫస్ట్ నల్ బీమ్విడ్త్ (FNBW) మరియు బీమ్ స్టీరింగ్పై పరిమితులు కూడా ఉన్నాయి, ఇది మా పద్ధతి యొక్క ప్రత్యేకతను గణనీయంగా పెంచుతుంది.

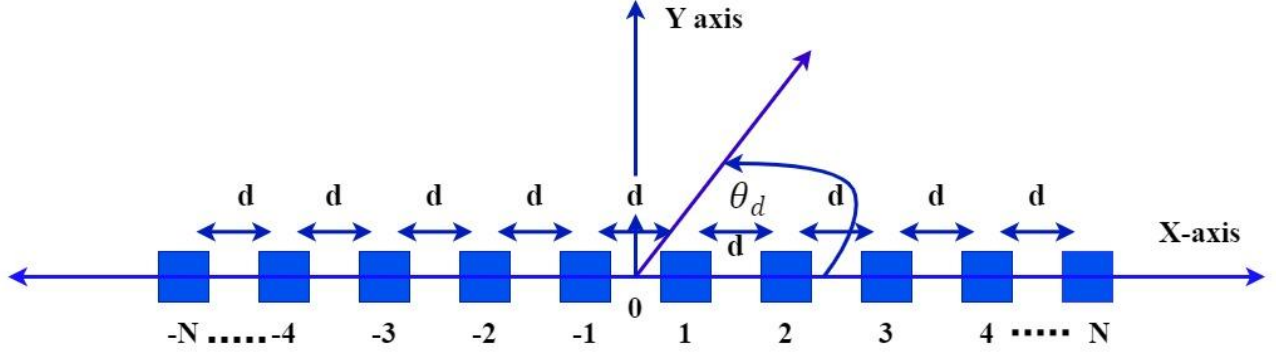
బి. విస్తృత స్టీరింగ్ పరిధి: ప్రతిపాదిత TMLAA విస్తృత శ్రేణి కోణాల్లో హార్మోనిక్ బీమ్ను స్టీరింగ్ చేయగలదు, $\pm 80^\circ$.

2. డిజైన్ పద్ధతులు.

ఈ విభాగంలో బీమ్-స్టీరింగ్ను ఏకకాలంలో సాధించడానికి మరియు సైడ్లోబ్ స్థాయిలు మరియు సైడ్బ్యాండ్ స్థాయిలను తగ్గించడానికి ఒక వివరణాత్మక పద్ధతిని అందిస్తుంది. అత్తి 1లో అమర్చబడిన $\$N\$$ ఐసోట్రోపిక్ మూలకాలతో కూడిన TMLAA ని పరిగణించండి. ఈ ఐసోట్రోపిక్ యాంటెన్నాల యొక్క లీనియర్ శ్రేణి ఏకరీతి వ్యాప్తి మరియు $\lambda/2$ వైనా రెండు ప్రక్కనే ఉన్న మూలకాల మధ్య ఇంటర్-ఎలిమెంట్ అంతరాన్ని కలిగి ఉంటుంది. కోణీయ ప్రీక్వెన్సీ కలిగిన ప్లేన్ వేవ్ ω_0 సైడ్వైస్కు సంబంధించి కోణంలో శ్రేణిపై ప్రభావం చూపితే, ఈ కాన్ఫిగరేషన్ కోసం టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ అర్రే ఫ్యాక్టర్ (AF) క్రింది సమీకరణం ద్వారా ఇవ్వబడుతుంది [8]:

$$AF(\theta, t) = e^{j\omega_0 t} \sum_{n=0}^{N-1} w_n u_n(t) e^{j(knd \sin \theta + \beta)} \quad (1)$$

రేఖీయ యాంటెన్నా శ్రేణి యొక్క జ్యామితి చిత్రం 1లో చూపిన విధంగా.



చిత్రం 1. లీనియర్ యాంటెన్నా శ్రేణి యొక్క జ్యామితి.

శ్రేణి యొక్క ఉత్తేజిత విలువలు ఇలా ప్రదర్శించబడతాయి w_n . $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, తీటా (θ) అనేది ఫ్రంటల్ దిశలో ఎలివేషన్ ప్లేన్లో సంఘటన కోణం, మరియు $u_n(t)$ ఇది పీరియడ్తో కూడిన రెగ్యులర్ ఫంక్షన్/ప్రవర్తనలు T_s . β ప్రతి మూలకం మధ్య దశ సెట్ బ్యాక్ (ఈ పనిలో). $\beta=0$ తో అనుబంధించబడిన $w_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ $w_s = \frac{2\pi}{T_s}$ ఆపరేషన్ల సిగ్నల్ వ్యవధి (), T_0 దీని కంటే చాలా తక్కువగా ఉంటుంది. ప్రాథమిక ఫ్రీక్వెన్సీ హార్మోనిక్ కిరణాల మూలం కాబట్టి, సరైన స్విచింగ్ ఫ్రీక్వెన్సీని ఎంచుకోవడం ఒక ముఖ్యమైన మొదటి దశ. ఈ ఫ్రీక్వెన్సీని ఎంచుకునేటప్పుడు ఒక ముఖ్యమైన అంశం ఏమిటంటే ఇది ముఖ్యమైన ఫ్రీక్వెన్సీ కంటే గణనీయంగా తక్కువగా ఉండేలా చూసుకోవడం. నిర్దిష్ట అప్లికేషన్ మరియు ఉపయోగకరమైన స్విచ్ల ప్రాప్యత స్విచింగ్ ఫ్రీక్వెన్సీకి తక్కువ పరిమితిని నిర్ణయిస్తుంది. మల్టీ-టోన్ కమ్యూనికేషన్ సిస్టమ్ల కోసం, మారుతున్న ఫ్రీక్వెన్సీ చాలా ముఖ్యమైనది. ఇది ముఖ్యమైన ఫ్రీక్వెన్సీ (f_0) కంటే తక్కువగా ఉండాలి కానీ ఛానల్ బ్యాండ్విడ్త్ కంటే ఎక్కువగా ఉండాలి. ఇది కమ్యూనికేషన్ సిస్టమ్లలో ప్రాథమిక మరియు మొదటి హార్మోనిక్ కిరణాలను ఉంచవచ్చని నిర్ధారిస్తుంది [9,10]. అప్పుడు ఒక RF -స్విచ్ టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ శ్రేణిలోని ప్రతి యాంటెన్నా ఎలిమెంట్ కోసం ఆన్ మరియు ఆఫ్ ఇన్ స్టంట్ సీక్వెన్స్ నియంత్రిస్తుంది. ఈ నియంత్రణను ఇలా సూచించవచ్చు:

$$u_n(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq T_{on,n} \leq T_{off} \leq T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$T_{on,n}$ మరియు ఈ అధ్యయనంలో $T_{off,n}$ ఆ నిర్దిష్ట మూలకం యొక్క ఆన్ మరియు ఆఫ్ సమయం n^{th} , మేము స్విచ్ ను దీర్ఘచతురస్రాకార ఫంక్షన్ గా మోడల్ చేస్తాము. ఈ ఫంక్షన్ ఆవర్తనమైనది కాబట్టి, సమీకరణంలో

సూచించిన విధంగా, ఫోరియర్ సిరీస్ను ఉపయోగించి మనం దానిని వేగవంతమైన హార్మోనిక్స్ శ్రేణిగా సూచించవచ్చు:

$$u_n(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_{mn} e^{j m \omega_s t}$$

ఫోరియర్ సిరీస్ గుణకాలు (a_{mn}) ను దీని నుండి పొందవచ్చు

$$a_{mn} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_n(t) e^{-j m \omega_s t} dt$$

ఈ వేరియబుల్ m హార్మోనిక్ క్రమాన్ని సూచిస్తుంది (ఉదాహరణకు, $m=1$ మొదటి హార్మోనిక్కు అనుగుణంగా ఉంటుంది). ఫోరియర్ గుణకాలు, a_{mn} , ను స్విచింగ్ ఆన్ మరియు ఆఫ్ సమయ సందర్భాలను ఉపయోగించి మరింత సరళంగా వ్యక్తీకరించవచ్చు, క్రింద ఉన్న సమీకరణంలో చూపిన విధంగా [11,12]. శ్రేణి యొక్క బరువులను దీని ద్వారా వ్యక్తీకరించవచ్చు, ఆపై సమీకరణం (1)ని ఇలా సవరించవచ్చు:

$$AF(\theta, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j(\omega_0 + m \omega_s)t} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} e^{j k n d \sin \theta}$$

3. పార్టికల్ స్వామ్ ఆప్టిమైజేషన్ (PSO) అల్గోరిథం

పార్టికల్ స్వామ్ ఆప్టిమైజేషన్ (PSO) అనేది మెటాహ్యూరిస్టిక్, జనాభా-ఆధారిత ఆప్టిమైజేషన్ అల్గోరిథం, ఇది పక్షుల మంద లేదా చేపల గుంపు వంటి సమూహాల సామాజిక ప్రవర్తనల నుండి ప్రేరణ పొందింది. PSO లో, ప్రతి సంభావ్య పరిష్కారం ఒక శోధన స్థలం ద్వారా కదిలే "కణం". ప్రతి కణం యొక్క కదలిక దాని స్వంత బాగా తెలిసిన స్థానం మరియు మొత్తం సమూహానికి బాగా తెలిసిన స్థానం ద్వారా మార్గనిర్దేశం చేయబడుతుంది. వ్యక్తిగత మరియు సామాజిక మేధస్సు యొక్క ఈ కలయిక సమూహాన్ని సరైన పరిష్కారంపై కలుస్తుంది. అల్గోరిథం యొక్క ప్రధాన అంశం రెండు కీలక సమీకరణాలలో ఉంది, ఇవి ప్రతి పునరావృతంలో ప్రతి కణం యొక్క వేగం మరియు స్థానాన్ని నవీకరించాయి [13.14].

వేగ నవీకరణ సమీకరణం: ఒక కణం యొక్క వేగం మూడు భాగాలచే ప్రభావితమవుతుంది: దాని మునుపటి వేగం, దాని వ్యక్తిగత ఉత్తమ స్థానం మరియు సమూహానికి ప్రపంచ ఉత్తమ స్థానం [15].

గణిత సూత్రాలు: వేగ నవీకరణ సమీకరణం క్రింది విధంగా ఉంది.

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest - x_i^k)$$

పునరుక్తి వద్ద $k+1$ కణం యొక్క కొత్త వేగం i , పునరుక్తి V_i^{k+1} వద్ద v_i^t కణం k యొక్క ప్రస్తుత వేగం i , w బరువు కారకం, c_1 మరియు c_2 త్వరణ గుణకాలు, r_1 మరియు r_2 యాదృచ్ఛిక సంఖ్యలు, మూలకం $pbest_i$ యొక్క వ్యక్తిగత ఉత్తమం i మరియు $gbest$ గ్లోబల్ బెస్ట్.

స్థాన నవీకరణ సమీకరణం: ఒక కణం యొక్క స్థానం దాని ప్రస్తుత స్థానానికి దాని కొత్త వేగాన్ని జోడించడం ద్వారా నవీకరించబడుతుంది.

$$X_i^{k+1} = X_i^t + V_i^{k+1}$$

ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ మూల్యాంకనం చేయడం: ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ ఏదైనా ఆప్టిమైజేషన్ అల్గోరిథం యొక్క కీలకమైన భాగం. ఇచ్చిన పరిష్కారం ఎంత బాగా పనిచేస్తుందో అంచనా వేయడానికి ఇది ఒక మెట్రిక్ గా పనిచేస్తుంది. ఆప్టిమైజేషన్ అల్గోరిథం యొక్క లక్ష్యం ఈ ఫంక్షన్ యొక్క అవుట్పుట్ ను కనిష్టికరించే లేదా గరిష్టికరించే ఇన్పుట్ పారామితుల సమితిని కనుగొనడం. యాంటెన్నా శ్రేణి రూపకల్పన సందర్భంలో, ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ ఒక నిర్దిష్ట కాన్ఫిగరేషన్ యొక్క "మంచితనాన్ని" లెక్కించడానికి ఉపయోగించబడుతుంది. కావలసిన లక్షణాలతో రేడియేషన్ నమూనాకు దారితీసే ఆన్-ఆఫ్ స్విచింగ్ సమయాలు వంటి నియంత్రణ పారామితుల కోసం సరైన విలువలను కనుగొనడం అల్గోరిథం యొక్క లక్ష్యం. ఉదాహరణకు, ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ ఇలా రూపొందించవచ్చు: సైడ్ లోబ్ స్థాయిలను కనిష్టికరించండి (SLL): జోక్యాన్ని తగ్గించడానికి ఇది చాలా ముఖ్యమైనది. డైరెక్టివిటీని గరిష్టికరించండి: ఇది సిగ్నల్ యొక్క శక్తిని నిర్దిష్ట దిశలో కేంద్రీకరిస్తుంది. ప్రధాన బీమ్ ను నడిపించండి: ప్రధాన బీమ్ దిశ కావలసిన కోణానికి ఎంత దగ్గరగా ఉందో ఫంక్షన్ కొలవగలదు. వివిధ పారామితుల కలయికలను పునరావృతంగా పరీక్షించడం మరియు ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ తో వాటిని మూల్యాంకనం చేయడం ద్వారా, ఆప్టిమైజేషన్ అల్గోరిథం ఇచ్చిన సమస్యకు సాధ్యమైనంత ఉత్తమమైన పరిష్కారంపై కలుస్తుంది.

$$Fitnessfunction = AF_{m=0}(\theta_1) + AF_{m=\pm 1}(\theta_2) + F_{m=\pm 2}(\theta_3)$$

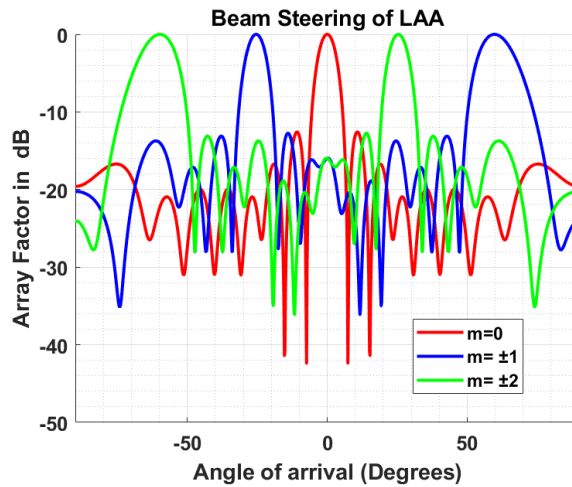
ఎక్కడ $\theta_1 = 90 \text{ degrees}$, $\theta_2 = \pm 80 \text{ degrees}$, $\theta_3 = \pm 80 \text{ degrees}$.

ఆన్-ఆఫ్ స్విచింగ్ ను ఆప్టిమైజ్ చేయడం: ఆన్-ఆఫ్ స్విచ్ కోసం ఆప్టిమైజేషన్ ఆర్డర్ నిర్దిష్ట క్రమం మరియు సమయాన్ని నిర్ధారించడానికి ఎంపిక చేయబడింది. మేము రెండు ప్రాథమిక పరిమితులను ఏర్పాటు చేసాము: $\tau_{on} < \tau_{off}$: ప్రతి స్విచ్ కోసం "ఆన్" సమయం దాని "ఆన్" సమయం కంటే తక్కువగా లేదా సమానంగా ఉండాలి. $\tau_{on,n-1} < \tau_{off,n}$: ఇచ్చిన ఎలిమెంట్ () యొక్క "ఆన్" సమయం n మునుపటి ఎలిమెంట్ ($n-1$) యొక్క ఆన్ సమయం కంటే ఎక్కువగా లేదా సమానంగా ఉండాలి. ఇంకా, మృదువైన మరియు నమ్మదగిన కదలికలకు హామీ ఇవ్వడానికి మూడు తదుపరి అంశాల సమితి క్రింది తనిఖీ పరిమితులు ఇవ్వబడ్డాయి. ఈ కఠినమైన నియమాల సమితి స్విచింగ్ సీక్వెన్స్ యొక్క సమగ్రతను నిర్వహించడానికి మరియు పనితీరును ఆప్టిమైజ్ చేయడానికి సహాయపడుతుంది. ప్రతి బీమ్ స్టీరింగ్ స్థితికి సరైన ఆన్ మరియు ఆఫ్ సీక్వెన్స్ లను పొందడానికి, PSO (పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్) అల్గోరిథం

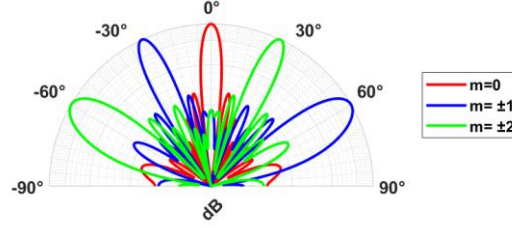
అమలు చేయబడింది. ఈ ప్రక్రియలో ప్రతి కావలసిన స్టీరింగ్ కోణం కోసం అల్గోరిథంను వ్యక్తిగతంగా అమలు చేయడం ఉంటుంది, ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ ఆ నిర్దిష్ట స్థితి కోసం స్విచ్ సీక్వెన్స్ను మూల్యాంకనం చేయడానికి మరియు ఆప్టిమైజ్ చేయడానికి ప్రత్యేకంగా రూపొందించబడింది.

4. అనుకరణ ఫలితాలు

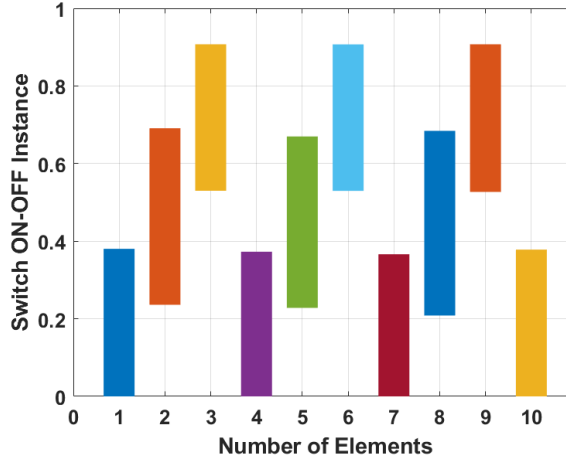
సమయ మాడ్యులేషన్ ఫ్రీక్వెన్సీ సాధారణంగా ప్రధాన సిగ్నల్ యొక్క ఫ్రీక్వెన్సీ కంటే చాలా తక్కువగా ఉంటుంది. సమయ-మాడ్యులేటెడ్ యాంటెన్నా శ్రేణులలో ఇది ఒక ప్రాథమిక సూత్రం, ఎందుకంటే ఇది ప్రాథమిక సిగ్నల్ యొక్క క్యారియర్ ఫ్రీక్వెన్సీతో జోక్యం చేసుకోకుండా హార్మోనిక్ సైడ్ బ్యాండ్లను ఉత్పత్తి చేయడానికి మరియు నియంత్రించడానికి వ్యవస్థను అనుమతిస్తుంది $T_s < T_0$. ప్రతి యాంటెన్నా మూలకాన్ని నిరంతరం శక్తివంతం చేయడానికి బదులుగా, అవి నిర్దిష్ట, ముందుగా నిర్ణయించిన వ్యవధికి మాత్రమే సక్రియం చేయబడతాయి. τ_n దీని పరిధి $\tau_n \leq T_s < T_0$. ఇప్పుడు $\tau_n (0 \leq \tau_n \leq T_s)$ PSO అల్గోరిథంలో ఈ పరిమితిని అమలు చేయడానికి, మీరు సూచిస్తున్న పరిస్థితి, లీనియర్ శ్రేణిలోని ప్రతి మూలకం యొక్క ON సమయం ఒక నిర్దిష్ట విలువను మించకూడదు, ఆప్టిమైజేషన్ సమస్యకు ఎగువ బౌండ్ గా సెట్ చేయాలి. దీని అర్థం ఆప్టిమైజేషన్ ప్రక్రియలో, PSO అల్గోరిథం పరిష్కారాల కోసం శోధిస్తుంది, ఇక్కడ ప్రతి కణం యొక్క స్థానం వెక్టర్, ఇది మూలకాల యొక్క ON సమయాలను సూచిస్తుంది, ఈ పరిమితికి కట్టుబడి ఉంటుంది. ఒక కణం యొక్క కదలిక ఏదైనా ON సమయం ఎగువ బౌండ్ ను మించిపోయేలా చేస్తే, దాని స్థానం ఆ గరిష్ట విలువకు సర్దుబాటు చేయబడుతుంది లేదా "బిగించబడుతుంది". ఇది అల్గోరిథం నిర్వచించబడిన పరిమితులలో భౌతికంగా వాస్తవికమైన మరియు చెల్లుబాటు అయ్యే పరిష్కారాలను మాత్రమే అన్వేషిస్తుందని నిర్ధారిస్తుంది.



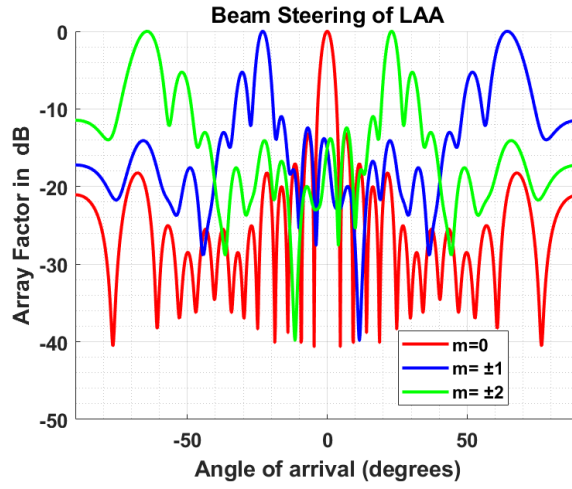
చిత్రం. 2. 10-యాంటెన్నా ఎలిమెంట్ యొక్క అరే ఫ్యాక్టర్ (AF) టైమ్ మాడ్యులేటెడ్ LAA ,
వినియోగదారు నిర్వచించిన రాక దిశ (DOA) వైపు బీమ్ స్టీరింగ్.



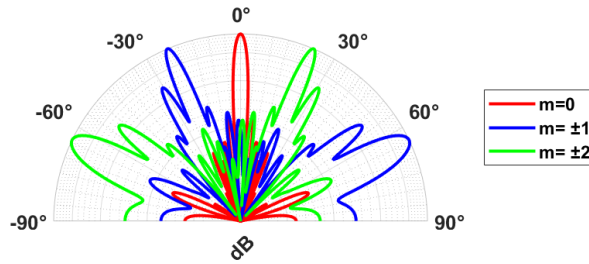
చిత్రం. 3 10-మూలకాల కోసం ధ్రువ రూపంలో స్కాన్ చేయబడిన పుంజం వికీరణ నమూనాలు.



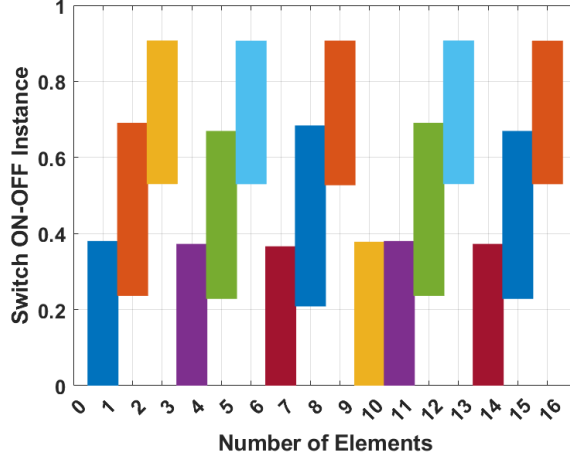
చిత్రం 4 10 మూలకాలకు మార్పిడి క్రమం.



చిత్రం . 5 16-యాంటెన్నా ఎలిమెంట్ యొక్క అర్రే ఫ్యాక్టర్ (AF), టైమ్ మాడ్యులేటెడ్ LAA ,
 వినియోగదారు నిర్వచించిన రాక దిశ (DOA) వైపు బీమ్ స్టీరింగ్.



చిత్రం 3. 10-మూలకాల కోసం ధ్రువ రూపంలో స్కాన్ చేయబడిన పుంజం రేడియేషన్ నమూనాలు.



చిత్రం 7 16 మూలకాలకు మార్పిడి క్రమం.

చిత్రం 2 లో చూపిన విధంగా, 10 మూలకాలకు యాంటెన్నా శ్రేణి యొక్క రేడియేషన్ నమూనాను సూచిస్తుంది, వినియోగదారు నిర్వచించిన పుంజం లేదా ప్రధాన పుంజం వద్దకు వచ్చే దిశ θ^0 , మొదటి హార్మోనిక్ ఫ్రీక్వెన్సీ ($m=\pm 1$) మరియు 60° , -25° రెండవ హార్మోనిక్ ఫ్రీక్వెన్సీకి ($m=\pm 1$) మరియు . చిత్రం 3 ధ్రువ రూపంలోని స్కాన్ చేయబడిన పుంజం బీమ్ స్టీరింగ్ లేదా వినియోగదారు నిర్వచించిన దిశను సూచిస్తుంది 60° మరియు 25° చివరకు చిత్రం 4 నుండి 10 మూలకాలకు మారే సమయ శ్రేణి గురించి వివరించబడింది.

చిత్రం 5 లో చూపిన విధంగా, 16 మూలకాలకు యాంటెన్నా శ్రేణి యొక్క రేడియేషన్ నమూనాను సూచిస్తుంది, వినియోగదారు నిర్వచించిన పుంజం లేదా ప్రధాన పుంజం వద్దకు వచ్చే దిశ θ^0 , మొదటి హార్మోనిక్ ఫ్రీక్వెన్సీ ($m=\pm 2$) మరియు 65° , -24° రెండవ హార్మోనిక్ ఫ్రీక్వెన్సీకి ($m=\pm 2$) మరియు . చిత్రం 6 ధ్రువ రూపంలోని స్కాన్ చేయబడిన పుంజం బీమ్ స్టీరింగ్ లేదా వినియోగదారు నిర్వచించిన దిశను సూచిస్తుంది -65° మరియు 24° చివరకు చిత్రం 7 నుండి 16 మూలకాలకు మారే సమయ శ్రేణి గురించి వివరించబడింది.

ముగింపు

ఈ పత్రం పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్ (PSO) టెక్నిక్ ఉపయోగించి ఒక బీమ్ను వినియోగదారు నిర్వచించిన డైరెక్షన్ ఆఫ్ అరైవల్ (DOA) వైపు మళ్లించడానికి ఆటోమేటిక్ ఎలక్ట్రానిక్ హార్మోనిక్ బీమ్ స్టీరింగ్ కోసం ఒక పద్ధతిని అందిస్తుంది. మా ప్రతిపాదిత, జనాభా-ఆధారిత కాస్ట్ ఫంక్షన్ కావలసిన ఫలితాలను సమర్థవంతంగా సాధిస్తుంది. మా అనుకరణ ఫలితాల ప్రకారం, ఈ ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ ద్వారా పరిధిలోని ఏ కోణానికైనా సరైన బీమ్ స్టీరింగ్ను అనుమతిస్తుంది $\pm 80^\circ$. కావలసిన DOA తెలిసిన తర్వాత, అనుభవించే ఏకైక ఆలస్యం మెమరీ నుండి చదవడానికి పట్టే సమయం. ఎంచుకున్న కాస్ట్ ఫంక్షన్ ఆదర్శవంతమైన ఆన్ మరియు ఆఫ్ స్విచింగ్ సమయాలను నిర్ణయించడానికి PSO పద్ధతిని విజయవంతంగా ఉపయోగిస్తుంది. వివిధ కోణాల నుండి వచ్చే బహుళ సంకేతాలను ఏకకాలంలో గుర్తించడం సాధ్యమని కూడా మా ఫలితాలు చూపిస్తున్నాయి. అయితే, పరిధి వెలుపల $\pm 80^\circ$. సైడ్ లోబ్లు ఆధిపత్యం చెలాయిస్తాయి, ఫలితంగా అధిక స్థాయి జోక్యం ఏర్పడుతుంది. ఫిట్నెస్ ఫంక్షన్ దాని వృద్ధికి అందంగా ఉండాలని కూడా మేము కనుగొన్నాము.

గుర్తింపు

ఈ పనిని పూర్తి చేయడానికి అవసరమైన వనరులను అందించినందుకు రచయితలు స్కూల్ ఆఫ్ ఇంజనీరింగ్, అనురాగ్ యూనివర్సిటీ హైదరాబాద్ కృతజ్ఞతలు తెలుపుతున్నారు. అనామక సమీక్షకులు మరియు సంపాదకుల అంతర్దృష్టితో కూడిన అభిప్రాయానికి కూడా వారు కృతజ్ఞతలు తెలుపుతున్నారు.

ప్రస్తావనలు

1. బాలనిస్, CA (2016). యాంటెన్నా సిద్ధాంతం: విశ్లేషణ మరియు రూపకల్పన. జాన్ విలే & సన్స్.
2. ఎలియట్, RS (2003). యాంటెన్నా సిద్ధాంతం మరియు రూపకల్పన. I NC ., ప్రచురణ .
3. చాపూయ-బ్లోమ్బ్యా, ఎఫ్. (1999). డైరెక్షన్ పరికరాల ద్వారా పల్స్ రైజ్ యొక్క యాదృచ్ఛిక ప్రతిధ్వని మరియు సరైన గుర్తింపు. డిజిటల్ సిగ్నల్ ప్రొసెసింగ్, 9(3), 162-177.
4. హాస్ట్, RL (2017). టైమ్ డొమైన్లో యాంటెన్నా శ్రేణులు: టైమ్ శ్రేణులకు పరిచయం. I IEEE యాంటెన్నాలు మరియు ప్రచార పత్రిక, 59(3), 33-41.

5. రావు తడికమల్ల, ఎన్., & రావు, AP (2024). నవల PSO అల్గోరిథం ఉపయోగించి మెరుగైన వైర్లెస్ కమ్యూనికేషన్ కోసం ఎలిప్టికల్ సిలిండ్రికల్ యాంటెన్నా శ్రేణిని ఆప్టిమైజ్ చేయడం. *జర్నల్ ఆఫ్ సర్క్యూట్స్, సిస్టమ్స్ అండ్ కంప్యూటర్స్*, 33 (16), 2450291.
6. మంజారెన్, డి., లాండా-టోరెస్, ఐ., గిల్-లోపెజ్, ఎస్., డెల్ సెర్, జె., బిల్బావో, ఎంఎస్, సాల్వెడో-సాన్స్, ఎస్., & గిమ్, జెడ్డెట్ల్యు (2013). సామరస్యం శోధన అల్గోరిథం యొక్క అనువర్తనాలపై ఒక సర్వే. *కృత్రిమ మేధస్సు యొక్క ఇంజనీరింగ్ అనువర్తనాలు*, 26 (8), 1818-1831.
7. Ni , G ., He , C ., Chen , J ., Liu , Y ., & Jin , R . (2020). ఏకరీతి కాని కాల మాడ్యులేషన్ ద్వారా సమయ-మాడ్యులేటెడ్ శ్రేణి కోసం క్యారియర్ ఫ్రీక్వెన్సీ వద్ద తక్కువ సైడ్ బ్యాండ్ రేడియేషన్ బీమ్ స్కానింగ్. *IEEE యాంటెన్నాలు మరియు ప్రచారంపై లావాదేవీలు*, 68 (5), 3695-3704.
8. gNB NG -కోర్ నెట్వర్క్ కోసం అనేక వనరుల యొక్క కొత్త సెటప్ శక్తివంతమైన DOA పద్ధతి . 2021లో *కంప్యూటింగ్, కమ్యూనికేషన్ కంట్రోల్ మరియు నెట్వర్కింగ్లో పురోగతిపై 3వ అంతర్జాతీయ సమావేశం (I CAC3N)* (పేజీలు 1315-1320). *IEEE*.
9. తడికమల్ల, NR , & రావు, □□ (2022, డిసెంబర్). ఆప్టిమైజేషన్ అల్గోరిథంను ఉపయోగిస్తున్న టైమ్ మాడ్యులేటెడ్ సర్క్యులర్ అర్రే యాంటెన్నా యొక్క పవర్ ప్యాటర్న్ సింథసిస్. 2022లో *స్ట్రాట్ ఎలక్ట్రానిక్ సిస్టమ్స్పై IEEE ఇంటర్నేషనల్ సింపోజియం (i SES)* (పేజీలు 78-82). *IEEE*.
10. టెన్నెంట్, ఎ., & చాంబర్స్, బి. (2008, జూలై). టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ యాంటెన్నా శ్రేణుల హార్మోనిక్ రేడియేషన్ నమూనాల నియంత్రణ. 2008లో *IEEE యాంటెన్నాలు మరియు ప్రచార సంఘం అంతర్జాతీయ సింపోజియం* (పేజీలు 1-4). *IEEE*.
11. తడికమల్ల, NR , చిదురాల, S , & అమర, PR (2024, డిసెంబర్). పరిణామాత్మక అల్గోరిథంలను ఉపయోగించి కేంద్రీకృత వృత్తాకార శ్రేణి యాంటెన్నాలలో అల్ట్రా-తక్కువ సైడ్ లోబ్ స్థాయి రేడియేషన్ ను ఆప్టిమైజ్ చేయడం. 2024లో *IEEE వైర్లెస్ వేవ్లు, యాంటెన్నాలు మరియు ప్రచారం సమావేశం (MAPCON)* (పేజీలు 1-5). *IEEE*.
12. రామ్, జి., & కుమార్, జిఎ (2025). సాంస్కృతిక అల్గోరిథంలను ఉపయోగించి ఏకపక్ష బహుళ మరియు వినియోగదారు-నిర్వచించిన దిశలలో బీమ్ స్టీరింగ్ కోసం డైరెక్షనల్ టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ లీనియర్ యాంటెన్నా శ్రేణుల నాన్-ఐడియల్ స్విచింగ్-బేస్డ్ డిజైన్. *గ్రీన్ కమ్యూనికేషన్స్ మరియు నెట్వర్కింగ్పై IEEE లావాదేవీలు*.
13. కుమార్, ఎస్., రామ్, జి., మండల్, డి., & కర్, ఆర్. (2025). టైమ్-మాడ్యులేటెడ్ సర్క్యులర్ యాంటెన్నా శ్రేణుల యొక్క ఆప్టిమల్ కాన్ఫిగరేషన్ మరియు పనితీరు మెరుగుదల. *మల్టీస్కేల్ మరియు మల్టీఫిజిక్స్ కంప్యూటేషనల్ టెక్నిక్లపై IEEE జర్నల్*.
14. గార్డ్, హెచ్. (2016). నిర్బంధిత ఆప్టిమైజేషన్ సమస్యలకు హైబ్రిడ్ PSO-GA అల్గోరిథం. *అప్రెడ్ మ్యాథమెటిక్స్ అండ్ కంప్యూటేషన్*, 274 , 292-305.
15. అస్సారెహ్ , ఇ., బెహ్ంగ్, ఎంఎ, అస్సారి , ఎంఆర్, & ఘన్ బర్కాదే, ఎ. (2010). ఇరాన్ లో చమురు డిమాండ్ అంచనాపై PSO (పార్టికల్ స్వార్మ్ ఆప్టిమైజేషన్) మరియు GA (జెనెటిక్ అల్గోరిథం) పద్ధతుల అప్లికేషన్. *ఎనర్జీ*, 35 (12), 5223-5229.

TMLAA for User-Defined Harmonic Beam Steering Using Particle Swarm Optimization

Dr. Nageswar Rao Thadikamalla¹, Dr. Ramesh Amugothu², Dr. Praveen Kumar Mudidhe^{3*}
Dr. Thadikamalla Krishnarjuna Rao⁴, Dr. Sukaraboina Sreenu⁵, Prof. Prakasa Rao A⁶

¹Assistant Professor School of Engineering, Dept of ECE, Anurag University, Hyderabad, Telangana-India

²Assistant Professor, Dept of ECE, Dayananda Sagar University Bengaluru, Bengaluru, India

³Assistant Professor, Dept of ECE, Vasavi College of Engineering, Hyderabad, Telangana-India

⁴Assistant Professor, Dept of ECE, Siddhartha Institute of Engineering and Technology, Hyderabad, Telangana-India

⁵Assistant Professor, Dept of ECE, Vardhaman College of Engineering, Hyderabad, Telangana-India

⁶Associate Professor, Dept of ECE, National Institute of Technology Warangal, Warangal, Telangana-India

Corresponding Author *: nageswarrao.ece@anurag.edu.in

Abstract

This work proposes an innovative method for automatic electronic beam steering of harmonic patterns using a Time-modulated linear antenna array (TMLAA). We've designed a novel fitness function that enables the electronic steering of the main elegant/harmonic beam along the user-pre defined Direction of Arrival (DOA) within a wide elevation range of $\pm 80^\circ$. For the first time in this context, we apply the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to harmonic beam steering in TMLAA. PSO is used to find the optimal ON and OFF switching sequence for each array element. By leveraging the sidebands generated through time-modulation, our method can simultaneously steer multiple harmonic beams in both positive and negative directions relative to the fundamental beam. To validate the approach, we consider a 10- and 16- antenna element Time modulated LAA with uniform spacing and current excitation. Statistical analysis and simulation results confirm the precise steering of the first $\pm$ and second $\pm$ harmonics, demonstrating the effectiveness and potential of this method for flexible and efficient beam control.

Keywords: TMLAA, PSO, DOA, Antenna array, SLL.

1. Introduction

Antenna design plays a crucial role in improving key metrics of communication systems, such as the signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR), bit error rate (BER), and overall throughput. Compared to a single antenna, an antenna array offers significant advantages, including increased gain and directivity. To maximize system efficiency, an ideal antenna's radiation beam characteristics should feature low sidelobe levels (SLL) and a narrow beamwidth. Beam-forming techniques are widely applied in various fields, including radar, sonar, imaging, and both geophysical and astrophysical exploration. This process, also known as beam focusing or steering, involves shaping the antenna's main beam to either concentrate its energy on a specific target or direct a null toward a source of interference [1].

Controlling an antenna array's parameters is crucial for both electronic beam scanning and synthesizing specific radiation patterns. A variety of methods, including phase shifters and true-time delay (TTD) techniques, have been developed for beam steering. For real-time electronic beam scanning, a phased antenna array is a viable hardware solution that manipulates the relative phase difference between its components. However, these traditional methods are often too costly for widespread commercial use and are primarily limited to expensive applications, such as military systems. Alternatives like frequency scanning arrays, ferroelectric phased arrays, and true-time delay systems also face the same challenge of high cost, which restricts their application.

The need for a reliable, affordable, and modern approach to electronic beam steering in commercial applications is critical. Time-Modulation offers an innovative solution by providing a low-cost way to achieve this. The core idea is to periodically modulate each antenna element, using the resulting harmonics to steer the beam in various directions [2].

Past methods, like those in [2], used pre-defined switching consequence, but these were limited to specific angles and couldn't handle precise, decimal-value steering. This previous work was more about the switching pattern itself rather than a design based on the desired direction of arrival (DOA). While harmonics are often seen as wasted energy, our method harnesses them to achieve beam scanning of harmonic frequency. This can be found out either with a predefined switching sequence or an optimum ON-OFF switching instant. Previous research yielded excellent results for obtaining maxima harmonic beam changing or steering, but it relied on predefined time sequences [2]. This approach isn't practical for our work, as the sequence of time must change several times the beam angle, or theta, is adjusted. To overcome this limitation, we have developed an empirical formula, or cost function, that dynamically updates the ON and OFF times in response to any change in theta. This ensures the system can adapt to a new steering direction without needing a manually predefined sequence, making it more flexible and efficient. While the properties of a TMLAA are a powerful attribute, a designer would never want to reduce the system with a optimal

sidelobe level ('SLL') or sideband level ('SBL'). If every element in a TMLAA is active over the whole modulating time, The radiation pattern will resemble that of a linear array with uniform magnitude [3].

In the conventional approach to SLL reduction, Dolph pioneered several methods using specific excitation coefficients, which other researchers later expanded upon. Plotting radiation patterns for Dolph-Chebyshev, Binomial, and Taylor series arrays can be done using the same approach. Although this idea can be modified for TMLAA, the system's design would become more intricate and costly if high-valued weights were used. A great deal of the current research on Time-Modulated Linear Antenna Arrays (TMLAA) focuses on both their advantages and effective ways to minimize wasted radiated power. To achieve this, various evolutionary algorithms are used, such as Genetic Algorithms (GA), and further recently, the Harmonic Search Algorithm (HSA) [4], Particle Swarm Optimization (PSO), and Noval Particle Swarm Optimization (NPSO). Other methods to govern the Side Lobe Level (SLL) [5,6]. Heuristic algorithms often struggle with two major issues: getting trapped in a local optimum and a lack of adaptability across different types of problems. To solve this, meta-heuristic approaches have been developed, many of which are inspired by the collective behaviours observed in nature. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, a widely-used meta-heuristic, has been successfully applied to numerous engineering challenges. These applications include tasks such as optimizing power flow in electrical grids, solving data analysis and clustering problems, and performing various functions in digital image processing. This study represents the first application of a population-based PSO algorithm to solve the TMLAA (Time-Modulated Linear Antenna Array) problem, specifically by optimizing its performance. Statistical analysis can be employed to evaluate the effectiveness of this new approach [7,8].

Research Objectives and Methodology

This study aims to compare the effectiveness of two different antenna array sets, The research objectives are:

Here is a summary of the key advantages of our proposed TMLAA (Time-Modulated Linear Antenna Array) approach compared to existing methods, along with the innovative steps we've taken to overcome previous challenges:

a. Unique Fitness Function: We've developed a novel fitness function that concurrently minimizes Side Lobe Level (SLL) and Side Band Level (SBL). This function also includes constraints on First Null Beamwidth (FNBW) and beam steering, which significantly enhances the uniqueness of our method.

b. Wide Steering Range: The proposed TMLAA is capable of steering the harmonic beam across a broad range of angles, $\pm 80^\circ$.

2. DESIGN methods.

In this section presents a detailed method for simultaneously achieving beam-steering and reducing both Sidelobe levels and Sideband levels. Consider a TMLAA consisting of N isotropic elements arranged in fig 1. This linear array of isotropic antennas has a uniform amplitude and an inter-element spacing of $\lambda/2$ between any two adjacent elements. If a plane wave with an angular frequency of ω_0 impinges on the array at an angle relative to the sideways, the time-modulated Array Factor (AF) for this configuration is given by the following equation [8]:

$$AF(\theta, t) = e^{j\omega_0 t} \sum_{n=0}^{N-1} w_n u_n(t) e^{j(knd \sin \theta + \beta)} \quad (1)$$

As shown in figure 1 geometry of Linear antenna array.

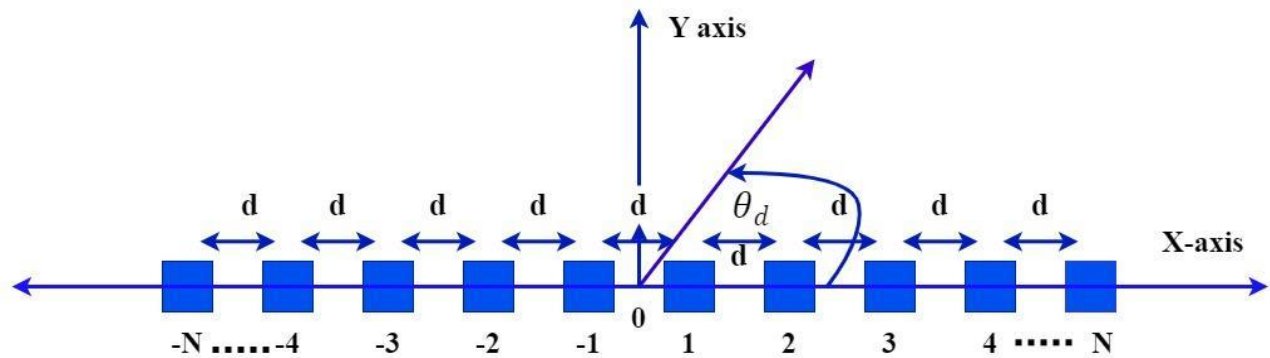


Figure. 1. Geometry of Linear antenna array.

The array's excitation values are displayed as w_n . $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, theta (θ) is the incident angle on the elevation plane in the direction of the frontal, and $u_n(t)$ is the regular function/behaviours with a period T_s . β is phase setback between every element (in this work $\beta = 0$). The operational signal

period (T_0), which is associated with $w_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ & $w_s = \frac{2\pi}{T_s}$, is significantly smaller than this. Since the fundamental frequency is the source of the harmonic beams, choosing the right switching frequency is an essential first step. A key consideration when choosing this frequency is to ensure its significantly lower than the essential frequency. The particular application and the accessibility of useful switches determine the lower limit for the switching frequency. For multi-tone communication systems, the Changing frequency is crucial. It must be less than the essential frequency (f_0) but greater than the channel bandwidth. This ensures that both the fundamental and first harmonic beams can be accommodated within the communication systems [9,10].

An RF-switch then controls the ON and OFF instant sequence for each antenna element in a time-modulated array. This control can be represented as:

$$u_n(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq T_{on,n} \leq T_{off} \leq T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$T_{on,n}$ and $T_{off,n}$ are ON and OFF time of that particular n^{th} element in this study, we model the switch as a rectangular function. Since this function is periodic, we can represent it as a series of rapidly harmonics using a flourier series, as indicated in the equation:

$$u_n(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_{mn} e^{jmw_s t}$$

Fourier series coefficients (a_{mn}) are obtained from

$$a_{mn} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_n(t) e^{-jmw_s t} dt$$

The variable m stands for the harmonic order (for example, $m=1$ corresponds to the first harmonic). The Fourier coefficients, a_{mn} , can be expressed more simply using the switching ON and OFF time instances, as shown in the equation below [11,12]. weights of Array can be expressed by, then eq. (1) can be modified as:

$$AF(\theta, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j(w_0 + mw_s)t} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} e^{jknd \sin \theta}$$

3. Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm

Particle Swarm Optimization (PSO) is a metaheuristic, population-based optimization algorithm inspired by the social behaviours of swarms, such as a flock of birds or a school of fish. In PSO, each potential solution is a "particle" that moves through a search space. Each particle's movement is guided by its own best-known position and the best-known position of the entire swarm. This combination of individual and collective intelligence allows the swarm to converge on the optimal solution. The core of the algorithm lies in two key equations that update the velocity and position of each particle in every iteration [13,14].

Velocity Update Equation: The velocity of a particle is influenced by three components: its previous velocity, its personal best position, and the global best position of the swarm [15].

Mathematical Formulas: Velocity Update equation as follows

$$v_i^{k+1} = wv_i^t + c_1r_1(pb_{best_i} - x_i^t) + c_2r_2(gbest - x_i^t)$$

Where v_i^{k+1} is new velocity of particle i at iteration $k+1$, v_i^t is current velocity of particle i at iteration k , w is weight factor, c_1 and c_2 are the acceleration coefficients, r_1 and r_2 are the random numbers, pb_{best_i} is the personal best of the i element and $gbest$ is global best.

Position Update Equation: A particle's position is simply updated by adding its new velocity to its current position.

$$x_i^{k+1} = x_i^t + v_i^{k+1}$$

Evaluating the Fitness Function: The fitness function is a key component of any optimization algorithm. It serves as a metric to evaluate how well a given solution performs. The goal of the optimization algorithm is to find the set of input parameters that either minimizes or maximizes this function's output. In the context of antenna array design, the fitness function is used to quantify the "goodness" of a particular configuration. The algorithm's objective is to find the optimal values for control parameters, such as ON-OFF switching times, that result in a radiation pattern with the desired characteristics. For example, a fitness function might be designed to: Minimize Side Lobe Levels (SLL): This is crucial for reducing interference. Maximize Directivity: This focuses the signal's energy in a specific direction. Steer the Main Beam: The function can measure how close the main beam's direction is to the desired angle. By iteratively testing different parameter combinations and evaluating them with the fitness function, the optimization algorithm can converge on the best possible solution for a given problem.

$$\text{Fitnessfunction} = AF_{m=0}(\theta_1) + AF_{m=\pm 1}(\theta_2) + F_{m=\pm 2}(\theta_3)$$

Where $\theta_1 = 90 \text{ degrees}$, $\theta_2 = \pm 80 \text{ degrees}$, $\theta_3 = \pm 80 \text{ degrees}$.

Optimizing ON-OFF Switching: The optimization order for the ON-OFF switch is chosen to ensure a specific sequence and timing. We've established two primary constraints: $\tau_{on} \boxtimes \tau_{off}$: The "on" time for each switch must be less than or equal to its "off" time. $\tau_{on,n-1} \boxtimes \tau_{off,n}$: The "on" time of a given element (n) must be greater than or equal to the ON time of the preceding element ($n-1$). Furthermore, following checking constraints are given to a set of three succeeding items to guarantee smooth and reliable movements. This rigorous set of rules helps maintain the integrity of the switching sequence and optimize performance. To obtain the optimal ON and OFF sequences for each beam steering state, the PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm was executed. This process involved individually running the algorithm for each desired steering angle, with the fitness function specifically designed to evaluate and optimize the switch sequence for that particular state

4. Results of Simulation

The time modulation frequency is typically much less than the frequency of the main signal. This is a fundamental principle in time-modulated antenna arrays, as it allows the system to generate and control harmonic sidebands without interfering with the primary signal's carrier frequency that is $T_s < T_0$. Rather than continuously energizing each antenna element, they're activated only for a specific, predetermined duration. τ_n whose range is $\tau_n \leq T_s < T_0$. Now $\tau_n (0 \leq \tau_n \leq T_s)$ to implement this constraint in a PSO algorithm, the condition you're referring to, where the ON time of every element in a linear array must not exceed a certain value, should be set as an upper bound for the optimization problem. This means that during the optimization process, the PSO algorithm will search for solutions where each particle's position vector, which represents the ON times of the elements, adheres to this limit. If a particle's movement causes any ON time to exceed the upper bound, its position is adjusted or "clamped" back to that maximum value. This ensures that the algorithm only explores physically realistic and valid solutions within the defined constraints.

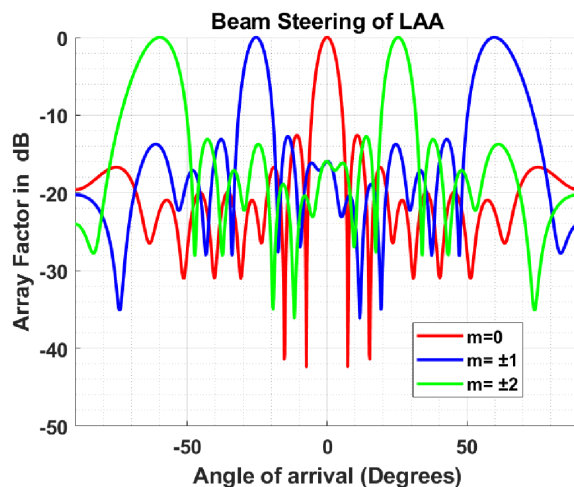


Figure. 2. Array Factor (AF) of a 10-antenna element Time modulated LAA, beam steering toward the user-defined Direction of Arrival (DOA).

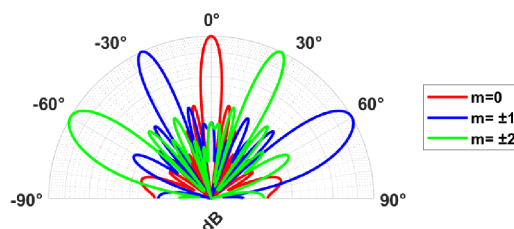


Figure. 3 Scanned beam radiation patterns polar form for 10-elements.

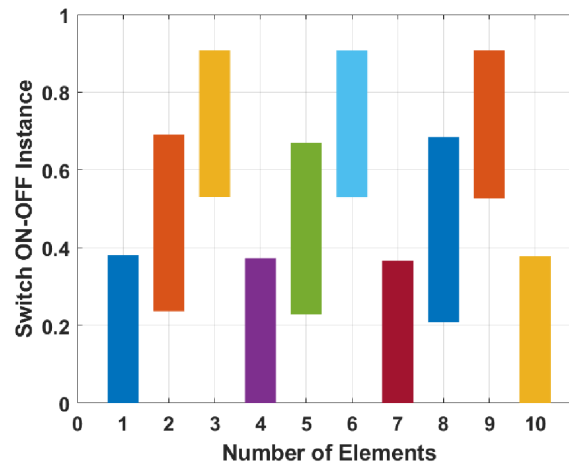


Figure. 4 Switching sequence for 10 elements.

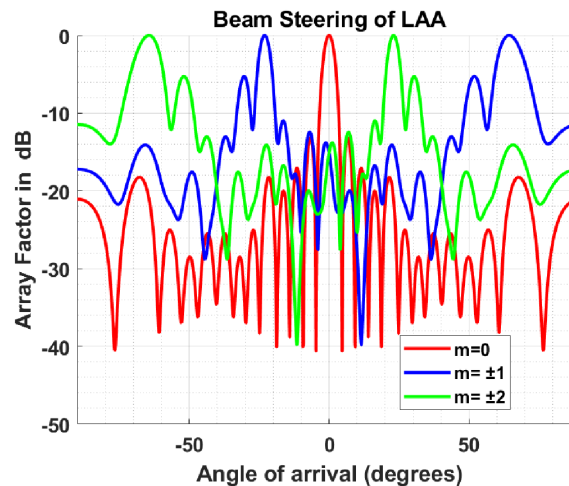


Figure. 5 Array Factor (AF) of a 16-antenna element Time modulated LAA, beam steering toward the user-defined Direction of Arrival (DOA).

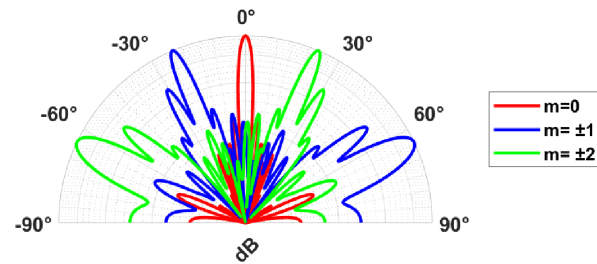


Figure. 3. Scanned beam radiation patterns polar form for 10-elements.

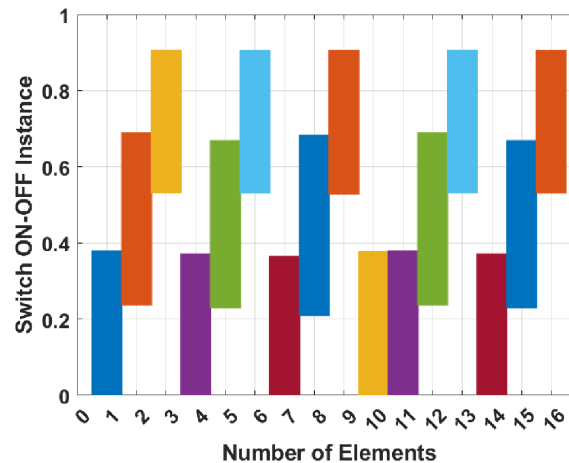


Figure. 7 Switching sequence for 16 elements.

As shown in figure 2 represents the radiation pattern of the antenna array for 10 elements user defined beam or direction of arrival at main beam is θ^0 , first harmonic frequency ($m = \pm 1$) is 60° and -25° , for second harmonic frequency ($m = \pm 1$) is 60° and 25° . Figure 3 indicates the scanned beam of polar form represents the beam steering or user defined direction and finally from figure 4 explained about the switching time sequence for 10 elements.

As shown in figure 5 represents the radiation pattern of the antenna array for 16 elements user defined beam or direction of arrival at main beam is θ^0 , first harmonic frequency ($m = \pm 2$) is 65° and -24° , for second harmonic frequency ($m = \pm 2$) is -65° and 24° . Figure 6 indicates the scanned beam of polar form represents the beam steering or user defined direction and finally from figure 7 explained about the switching time sequence for 16 elements.

Conclusion

This paper presents a method for automatic electronic harmonic beam steering using the Particle Swarm Optimization (PSO) technique to direct a beam toward a user-defined Direction of Arrival (DOA). Our proposed, population-based cost function effectively achieves the desired results. According to our simulation results, by this fitness function enables optimal beam steering to any angle within the range of $\pm 80^\circ$. Once the desired DOA is known, the only delay experienced is the time it takes to read from memory. The chosen cost function successfully employs the PSO method to determine the ideal ON and OFF switching times. Our results also show that it is possible to simultaneously detect multiple signals coming from various angles. However, outside the range of $\pm 80^\circ$. The side lobes become dominant, resulting in a high level of interference. We also find that the fitness function must be graceful to its augmentation.

Acknowledgment

The authors thank School of Engineering, ANURAG University Hyderabad for providing the necessary resources to complete this work. They are also grateful to the anonymous reviewers and editors for their insightful feedback.

References

1. Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
2. Elliott, R. S. (2003). *Antenna theory and design. INC., Publication.*
3. Chapeau-Blondeau, F. (1999). Stochastic resonance and optimal detection of pulse trains by threshold devices. *Digital Signal Processing*, 9(3), 162-177.
4. Haupt, R. L. (2017). Antenna arrays in the time domain: An introduction to timed arrays. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(3), 33-41.

5. Rao Thadikamalla, N., & Rao, A. P. (2024). Optimizing Elliptical Cylindrical Antenna Array for Improved Wireless Communication Using Novel PSO Algorithm. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 33(16), 2450291.
6. Manjarres, D., Landa-Torres, I., Gil-Lopez, S., Del Ser, J., Bilbao, M. N., Salcedo-Sanz, S., & Geem, Z. W. (2013). A survey on applications of the harmony search algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8), 1818-1831.
7. Ni, G., He, C., Chen, J., Liu, Y., & Jin, R. (2020). Low sideband radiation beam scanning at carrier frequency for time-modulated array by non-uniform period modulation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(5), 3695-3704.
8. Thadikamalla, N. R., & Rao, A. P. (2021, December). A New Setup Vigorous DOA Method of Several Sources for gNB NG-Core Networks. In *2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)* (pp. 1315-1320). IEEE.
9. Thadikamalla, N. R., & Rao, A. P. (2022, December). Power Pattern Synthesis of Time Modulated Circular Array Antenna Employing Optimization Algorithm. In *2022 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES)* (pp. 78-82). IEEE.
10. Tennant, A., & Chambers, B. (2008, July). Control of the harmonic radiation patterns of time-modulated antenna arrays. In *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 1-4). IEEE.
11. Thadikamalla, N. R., Chidurala, S., & Amara, P. R. (2024, December). Optimizing Ultra-Low Sidelobe Level Radiation in Concentric Circular Array Antennas Using Evolutionary Algorithms. In *2024 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)* (pp. 1-5). IEEE.
12. Ram, G., & Kumar, G. A. (2025). Non-Ideal Switching-Based Design of Directional Time-Modulated Linear Antenna Arrays for Beam Steering in Arbitrary, Multiple and User-Defined Directions Using Cultural Algorithms. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*.
13. Kumar, S., Ram, G., Mandal, D., & Kar, R. (2025). Optimal Configuration and Performance Enhancement of Time-Modulated Circular Antenna Arrays. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*.
14. Garg, H. (2016). A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 274, 292-305.
15. Assareh, E., Behrang, M. A., Assari, M. R., & Ghanbarzadeh, A. (2010). Application of PSO (particle swarm optimization) and GA (genetic algorithm) techniques on demand estimation of oil in Iran. *Energy*, 35(12), 5223-5229.