

Opportunistic Digital Array Radar and Application Analysis

Wei-Jun Long^{1,2}, De Ben^{1,2}, Ming-Hai Pan¹

1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China.

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210013, China

1. e-mail chinacohit@163.com, 2. e-mail panmh@nuaa.edu.cn

Abstract: Based on the prerequisite consideration of the radar or platform stealth performance, a new radar system, Opportunistic Digital Array Radar (ODAR) is presented which is a kind of multi-function and multi-mode digital phased array radar. Derived from the original description of the ODAR, the connotation and denotation are supplemented; the predominance and application potential are tapped. The technology puzzles of ODAR are analyzed and several solutions are investigated: the pattern synthesis of a group antennas randomly located in 3D space, the synchronization of distributed digital transmitter/receiver (DTR); the complex resource management of multi-freedom “space-time-energy”.

Keywords: opportunistic digital array radar; multi-function radar; Multi-input and multi-output radar (MIMO); ubiquitous radar

机会数字阵雷达概念与应用技术研究

龙伟军^{1,2}, 贲德^{1,2}, 潘明海¹

1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏南京, 中国, 210016

2. 南京电子技术研究所, 江苏南京, 中国, 210013

1. E-mail chinacohit@163.com, 2. E-mail panmh@nuaa.edu.cn

【摘要】机会数字阵雷达是以平台隐身性设计为核心,以数字阵列雷达为基础,兼具多功能、多模式的“一体化”新概念雷达系统。本文在对国外有关其概念雏形论述理解基础之,对其定义和含义进行了注解,并作了补充和完善。分析了机会数字阵雷达不同于传统相控阵雷达的技术特性和应用潜力。针对机会数字阵雷达面临的技术难题,如三维空间单元“机会性”分布优化选取和波束综合,信号传输与同步,以及基于多自由度的系统资源优化管理等问题进行了分析,并给出了初步的解决方案和仿真结果。

【关键词】机会数字阵雷达; 多功能雷达; MIMO 雷达; 凝视雷达

1 引言

机会数字阵雷达是国外学者近年来针对新一代海军隐身驱逐舰 DD(X)提出的一种新概念雷达。机会数字阵雷达以平台隐身性设计为核心,以数字阵列雷达为基础,单元与数字收发组件(DTR)被任意布置于舰船的各个可获取空间。考虑到工程上复杂的电磁兼容性问题、波束综合问题、信号传输与同步等问题,机会阵数字阵雷达是一个比较“冒险”的新概念。因此,美国海军新一代隐身驱逐舰装备 DD(X)最终选择了技术保守的双波段雷达(DBR)。但另一方面,美国海军也看到了新概念机会数字阵雷达所具有的应用潜力,并将其作为一种雷达新体制,开展了长期持续的研究工作^[1-5]。

本文将在对国外学者有关机会阵数字阵雷达概念

雏形论述理解基础之上,对机会数字阵雷达概念的内涵和外延进行补充和完善,并对机会数字阵雷达的应用概念和应用技术进行初步分析和探讨。

2 机会数字阵雷达应用概念

机会阵雷达概念的提出改变了以往作战平台以雷达系统为核心的设计理念。

一般而言,作战平台的设计通常围绕雷达系统展开,比如著名的宙斯盾系统(AEGIS),首先要保证的是雷达系统的作战威力,然后再考虑建造足以庞大的舰船体系。机会数字阵雷达恰恰相反,它首要考虑的是舰船的作战性能,如电磁隐身性和机动性成为设计需要考虑的首要条件,并以此为核心设计雷达系统。因此此雷达系统设计必须受制于舰船的外形和体积。机会

数字阵雷达概念正式针对这一设计核心理念的转变而提出的。这可能会让人想到原有的共形阵雷达，但机会数字阵雷达却远不同于此。

国外学者在对机会数字阵雷达概念的早期描述是将“无线”作为第一修饰词，称之为“无线网络化机会数字阵雷达”^[1]，笔者认为是否采用无线技术并非机会数字阵雷达概念必备的特征。其实，在现有技术条件下，采用光纤传输将更容易实现。机会数字阵雷达可以成为一个独立的概念并具有其本身的特点。

机会数字阵雷达概念目前并没有严格的定义，但首先它应当是一部数字阵雷达，具有数字阵雷达的所有特征。此外，机会数字阵雷达中“机会”一词应当具有如下几层涵义：

1. 单元或收发组件任意分布

“任意”的意思是没有规律，单元可以密布于载体平台任意空间，载体可以是舰船，飞机，卫星，山体等。可以密布与平台表面，也可以是平台内部。可共形，也可非共形；可能稀疏，也可能均匀分布，因此有别于共形阵和稀疏阵概念。通常单元或收发组件应尽可能多的密集分布于整个载体平台。

2. 单元的工作状态是“机会性”的

不像传统阵面单元同时处于工作或关闭状态，而是根据一定的机会，有选择性的工作或关闭。这里的“机会”可以是获得更好的波束形状要求，也可是为获得更大的天线孔径，或获得较好的雷达隐身性等。

3. 雷达的战术功能是“机会性”的

这里的战术功能是指雷达担任的搜索，跟踪，火控，通信等战术任务。传统的做法通常是制造几部具有不同功能的雷达。或者是将多种雷达战术功能划分成不重叠的时间片区。机会数字阵雷达由于拥有密布于三维空间的数量众多的天线单元，数字阵灵活的波束形成能力，完全可以根据战术任务，“机会性”的选择工作方式使雷达“同时”实现一种或多种战术功能。比如搜索的同时可以全空域精密跟踪；当来袭目标处于低空飞行的时候，可以开启舰船侧舷的天线进行低空补盲，当目标处于近距离状态时，可以自适应的调整雷达脉冲重频和脉宽，使之缩小盲区并减少辐射能量。总之雷达的工作状态是非恒定的，而是随战术任务“机会性”的改变。

1. 雷达的工作模式是“机会性”的

机会数字阵雷达可以同时具有多种工作模式。既可以实现一般数字阵雷达的战术功能，也可以成为一部具有多输入多输出的 MIMO 雷达系统，还可以成为具有低截获性能的 Ubiquitous(“凝视”)雷达。

2. 雷达的空-时-能管理是“机会性”的

机会数字阵雷达是一部多功能，多模式，全时空域工作的综合雷达系统，为了实现其多种“机会性”的战术功能，要求雷达资源管理系统必须也是“机会性”的，而不是恒定不变的，雷达自身必须具有对战场环境的评估能力，结合雷达的战术要求，自适应的选择最佳的工作模式，并形成有效的“空-时-能”资源优化分配管理。

3 机会数字阵雷达技术特性分析

机会数字阵雷达概念的最初构想来自于美国海军研究生院(NPS)对新一代隐身形海军驱逐舰 DD(X)的雷达探测系统设计方案，如图 1 所示^[1-5]。

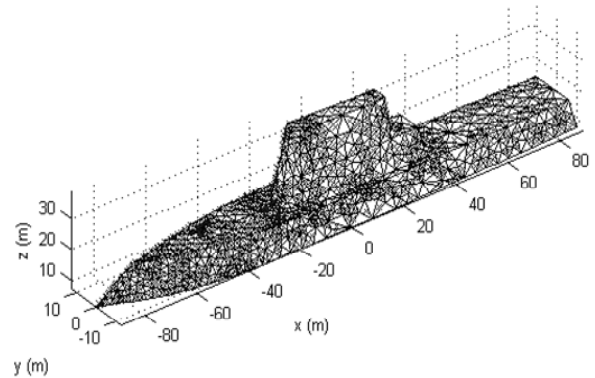


图 1. NPS提出的机会数字阵雷达概念图

图中的网格状模型表示密布舰船的天线单元，有舰船表面单元，也有舰体内部单元，整个舰船约放置了 2000 多个单元。舰船甲板上没有桅杆和不均匀“突起”，以减少舰船的 RCS。

3.1 机会数字阵雷达的工作模式

机会数字阵雷达提供了丰富的系统资源，可以灵活实现多种雷达工作模式。从雷达波束形成来看，目前以数字阵雷达为基础的如图 2 所示的雷达波束，均可在机会数字阵平台实现。图 2(a)为收发分置的“聚焦式”波束，图 2(b)为宽波束发射，多窄波束接收。图 2(c)为全向波束发射，多窄波束接收，一些文献称之为“Ubiquitous”模式，Ubiquitous 的直接意思是“无所不在的”，有学者称作“泛探”模式，也有称之为“凝视”模式，还有直接称之为“全时空”模式等。但笔者倾向于“凝视”的提法，它借用了光学焦平面探测的概念。很形象的表述了机会数字阵这一工作模式特点，即在任意时刻探测空间任意方位，如同光学焦平面“凝视”成像那样可以瞬间获取二维信息但却需要较长时间积累(凝视)来增强信噪比。

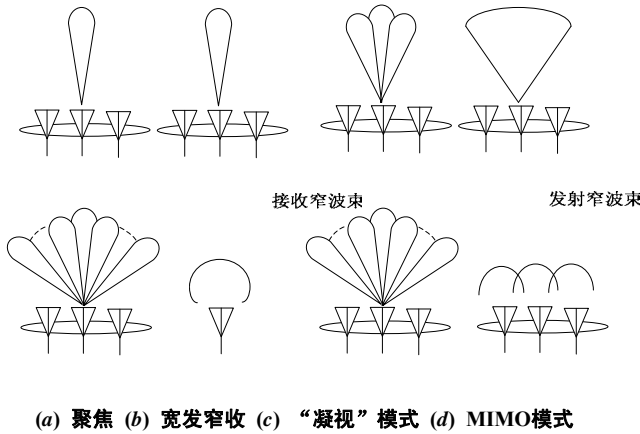


图 2. 机会阵雷达灵活的波束形式

3.2 机会数字阵雷达相比传统数字阵雷达的优势

机会数字阵雷达相比传统数字阵雷达更易实现如波束上所述的几种工作模式。

比如实现雷达“凝视”工作，需要发射“全向”波束，非聚焦的“全向”波束能量随距离成四次方迅速衰减，作用距离大为受限，机会阵突破了传统平面阵的口径限制具有较大的口径和较长的探测基线，因此可以增益不变的条件下增大作用距离。

再如 MIMO 模式工作的数字阵雷达通过分散的天线单元和统计独立的辐射波形以获得较高的空间分集增益，机会数字阵雷达通过“机会性”的选择单元的间距和工作波形恰恰可以很容易实现 MIMO 工作模式，取得更好的空间分集效果。尤其是机会阵宽阔的基线和空间随机分布的单元在对抗目标闪烁和提高雷达空间分集增益方面具有重要意义。

此外，从机会数字阵雷达概念描述中容易看出机会数字阵还具有低截获概率、高的目标检测性能、极高的角分辨率、平台隐身性能和生存能力等优势。

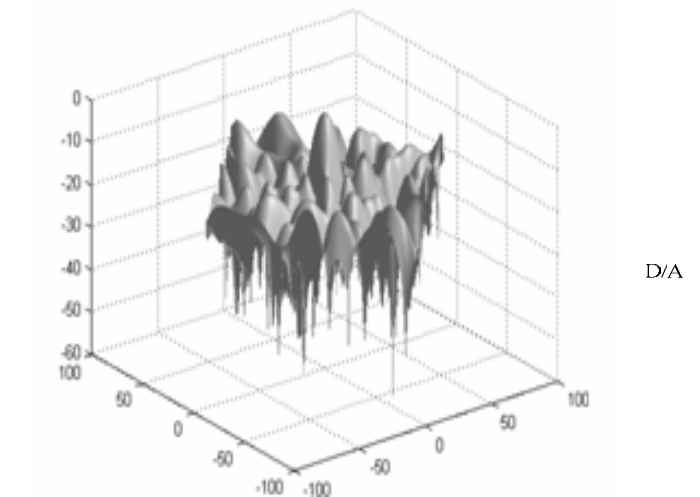
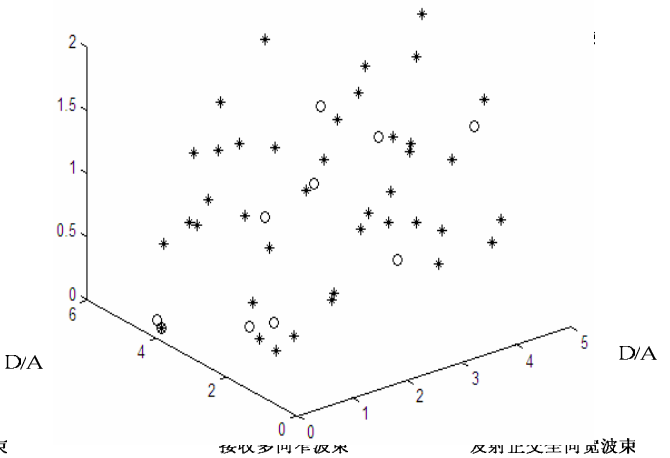
4 机会数字阵雷达应用技术初探

从系统的角度来看，机会数字阵雷达面临如下几方面应用技术难题。

4.1 波束综合

机会数字阵雷达单元数目众多，三维空间任意分布，波束综合比较困难。机会数字阵的波束赋形是随着雷达功能和工作模式“机会性”改变的，实时性要求较高。遗传算法(GA)是一种有效的解决此类复杂多目标优化的算法工具。作为原理性验证工作，本文对分布于 5 个波长空间范围内的机会阵波束综合进行了计算机仿真，结果如图 3 所示。优化的目标函数是获得最大的主副瓣电平比，通过遗传运算，最终“机

会性”的选取了用于工作的天线单元(其中以*表示工作，o 表示关闭)。限于篇幅，详细的数学模型和仿真过程不在此赘述。



(a) 单元的“机会性”选择 (b) GA算法波束综合结果

图 3. 机会数字阵的波束综合

4.2 信号同步与传输

机会数字阵雷达单元任意分布于宽阔的载体平台的任意空间，雷达信号传输、同步与数据分集都存在理论和技术难题。概念的最初提出者提出采用无线传输技术解决阵面与信号处理机之间的上下行链路。如图 4 所示。这不得不说是个冒险而又不乏创新的思路。从图 4 中可以看出，上行信号包括本振、波形参数和时序参考信号等，这些信号除了波形参数没有严格同步性要求。本振的频谱纯度，稳定性，时序信号的相参性(同步性)都直接影响到系统的可实现性^[6]。目前，美国海军研究生院针对这一技术难题开展了原理性验证工作。初步验证了无线本振传输的可行性，工作频率是 2.4G。对于下行链路的技术难题在于实时

的收集数字收发组件的“海量” I/Q 数据，目前，无线传输的数据率难以满足机会数字阵 Gbit/s 的数据率应用需求，但是无线通信中的 MIMO-OFDM 技术的进一步发展有望解决这一技术难题。

在现有技术条件下，笔者认为，光纤传输将是机会数字阵雷达可行的信号传输手段，尤其是舰载系统，光纤要比无线传输可靠得多。根据工程实践来看，光纤不但可以获得纳秒级的同步精度和稳定的频率单色性(低相噪)以解决上行本振和时序参考信号的同步性要求，而且通过层级化的波分复用技术也可实现下行“海量”数据的传输要求。光纤不足之处在于不能摆脱线缆介质，无法实现不同载体平台，如空-天-地之间的立体通信。因此，无线传输和自由空间激光通信将具有极大的应用潜力，二者可以突破平台界限，可使分布于地面-飞机-卫星上的分布式机会数字阵雷达协同工作。随着技术成熟度的提高，无线传输和自由空间激光通信将引起现有雷达体制和信号传输“革命性”的改变。

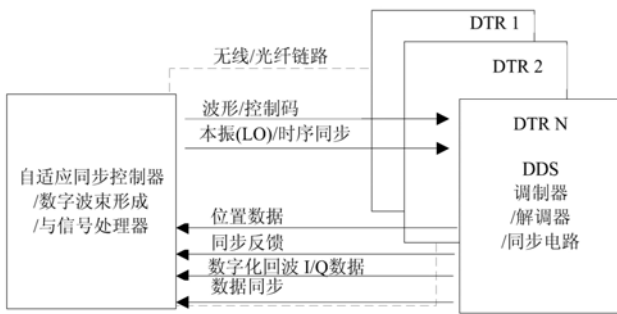


图 4. 机会数字阵雷达信号无线传输链路

4.3 资源管理

机会阵雷达是一部具有多种功能和工作模式的综合一体数字化雷达探测系统，将多种战术功能，如目标搜索、跟踪、制导、引导、通信、火控、电子对抗等融为一体。可同时实现多种雷达工作模式，比如既可以成为远距离探测的长基线外层空间弹道导弹预警雷达，又可以在目标近距离上自适应的改变辐照功率和波束形状成为一个具有低截获性能高精密度跟踪的

“Ubiquitous”模式雷达^[5]。整个系统如同一部具有自主“学习”、“思考”和“决策”的多功能，多模式探测平台。采用先进的统计方法、专家系统或神经网络等理论和技术，实现机会数字阵雷达复杂的系统资源实时优化管理将是一个值得探索的领域。

5 结语

本文阐述了机会数字阵雷达概念的由来，提出背景，理论和技术发展状况。并作了如下几方面工作，首先是在对国外有关其概念雏形描述理解基础之，对其概念进行了深入的分析 and 拓展，并作了补充和完善；其次对机会数字阵雷达不同于传统雷达的技术特性和应用潜力进行了详细的分析；最后对机会数字阵雷达应用技术需要解决的技术难题进行了分析和探讨，结合目前的理论和技术状况给出了初步解决方案和仿真结果。

机会数字雷达作为一种新概念雷达，其创新的设计理念 and 所面临的理论和技术风险同样明显，是一个充满挑战和希望的新领域，有待进一步的研究和发展。

References (参考文献)

- [1] Micael Grahn. Wirelessly networked opportunistic digital phased array: system analysis and development of a 2.4 GHz demonstrator [D]. Naval Postgraduate School, California, 2007.3-27
- [2] Yong Loke. Sensor synchronization geolocation and wireless communication in a shipboard opportunistic array [D]. Naval Postgraduate School, California, 2006.3-37
- [3] Chin H. M. Tong, system study and design of broad-band U-slot microstrip patch antennas for aperstructures and opportunistic arrays [D]. Naval Postgraduate School, California, 2005.5-10
- [4] Jon A. Bartee. Genetic Algorithms as a tool for opportunistic phased array radar design [D]. Naval Postgraduate School, California, 2002.5-40
- [5] Daniel J.R, Peter Parker. Ubiquitous MIMO Multifunction Digital Array Radar [J]. Proc. IEEE Sign. Syst. Comp., 2003.1057-1064
- [6] J Holloway. Design consideration for adaptive active phased array multifunction radar [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 2001. 13(6): 277-281.