



中國電子學會

Chinese Institute of Electronics

中国电子学会 第十六届青年学术年会 论文集

何 友 王红星 王国宏 关 键 主编

2010年9月
中国·烟台



電子工業出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

中国电子学会 第十六届青年学术年会论文集

何 友 王红星 王国宏 关 键 主编

主办单位：中国电子学会

承办单位：中国电子学会青年工作委员会

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书收录了中国电子学会第十六届青年学术年会精选的 113 篇学术论文,涵盖了电子信息、自动控制、计算机、通信网络等领域,汇集了大量的新思想、新技术、新成果,集中反映了我国电子领域的现状和青年科研技术人员近年来的学术水平,具有先进性、创新性和实用性,有较高的学术参考价值。

本书适合从事电子相关领域的科研院所、院校师生和企事业单位技术人员参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

中国电子学会第十六届青年学术年会论文集/何友等主编. —北京:电子工业出版社, 2010.9
ISBN 978-7-121-11783-1

I. ①中… II. ①何… III. ①电子技术—学术会议—文集 ②信息技术—学术会议—文集 IV. ①TN01-53
②G202-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 175244 号

责任编辑:竺南直

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 44.25 字数: 1132 千字

印 次: 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 148.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

海军航空工程学院电子信息工程系简介

海军航空工程学院是全军 22 所学历教育院校之一，院本部地处风景秀丽的海滨城市烟台，在青岛设有分院和训练基地，总占地面积 5000 余亩。主要承担海军生长技术和指挥军官学历教育、研究生教育、任职教育、士官教育和外训等任务，建院 60 年来共为海军部队培养各级各类人才 15 万余人。

电子信息工程系始建于 1959 年，以信息与通信工程学科为主导，涵盖电子科学与技术、仪器科学与技术、军队指挥学、船舶与海洋工程等五个一级学科，拥有 1 个国家重点学科、1 个全军重点学科、1 个山东省重点学科、2 个“泰山学者”设岗学科、3 个博士点、12 个硕士点、1 个博士后科研流动站和 1 个全军重点实验室。

电子信息工程系在多传感器信息融合理论及应用、信号检测估计理论及应用、雷达信号处理与数据处理、自适应信息获取传输与处理、精确制导、信息安全与对抗、电子信息装备保障、航空反潜和航空武器装备仿真等研究方向特色鲜明，成果突出，处于国内领先或国际先进水平。近 10 年来，共承担国家 863、973、国家自然科学基金、全国优秀博士学位论文作者专项基金、教育部高等学校骨干教师资助计划、新世纪优秀人才支持计划、全军和海军型号装备科研、国防预研及横向合作科研项目共 200 多项，有 140 项科研成果获得国家、军队科技进步奖，其中国家科技进步二等奖 3 项，军队科技进步一等奖 8 项。在国内外发表学术论文 2000 余篇，其中有 700 余篇被国际三大检索收录；出版学术专著 18 部，其中 2 部入选国家“百部精品工程”。

电子信息工程系拥有实力雄厚的教学科研队伍，其中中国工程院院士 3 人，“泰山学者”2 人，博士生导师 17 名，教授 23 名，具有博士、硕士学位的比例超过 95%。先后涌现出全国教育系统劳动模范、全国优秀教师和全军优秀教师；11 人获军队育才奖，3 人入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选，1 人获“求是”奖，1 人被评为全国优秀博士后，3 人获得全国百篇优秀博士学位论文奖，11 人享受国务院政府特殊津贴，3 人获军队重大贡献奖，12 人次荣立二等功。

电子信息技术仍然是未来极具发展潜力的核心技术。电子信息工程系全体教职员工将继续同全国各界同仁一道，在电子信息技术领域争创新的业绩，书写新的辉煌，为推动我国电子信息科学技术进步，实现国防现代化建设再上新台阶而努力奋斗！

通信地址：

山东省烟台市二马路 188 号 电子信息工程系 邮编：264001

联系电话：0536-6635666

目 录

基于 3S 多源信息融合的防空雷达组网探测	许 稼 彭应宁 高敏 (1)
旁瓣对消 QRD-LS 算法的一种超强流水 Systolic 结构	林仁春 汪学刚 (7)
基于导航雷达实测数据的 ML 类 CFAR 检测算法分析	赵志坚 宋 杰 关 键 (14)
基于检测前跟踪的匀加速运动目标检测算法	柳树林 曾 涛 龙 腾 (20)
Adaptive Method for Multi-channel SAR Gain and Phase Error Calibration Based on Optimal Correlation Coefficients Rule	Xu Zhongliang Huang Xiaotao Fan Chongyi (26)
Chirp 雷达数字下变频中低通滤波器的高效设计	禹霖阳 龙 腾 李 阳 (33)
一种基于弹载 SAR 的导弹定位模型	祝明波 邹建武 (38)
一种适用于多径环境的无源分布式雷达目标成像方法	伍少华 汪 玲 (44)
基于 FRFT 的 SAR 杂波背景下慢运动目标检测	郭海燕 关 键 张海龙 (50)
太赫兹技术发展现状及应用新进展	冯清娟 黄 锋 崔德勋 (56)
两种检测线性调频信号方法的比较	徐会法 刘 锋 张 鑫 (61)
C^2 -偏差补偿算法在连续波雷达低仰角提取中的应用	吕韶昱 王永杰 金振中 (66)
主被动声探测设备作用距离模型分析与仿真研究	陈庆凤 鞠建波 邱玮玮 赵 明 (73)
泥质砂岩动电效应的微观机理研究	于 华 关继腾 房文静 (79)
仿真环境下目标跟踪算法验证平台设计与实现	高安洁 毛 征 孙乐公 (86)
基于合成孔径技术的高精度雷达高度计	杨双宝 刘和光 徐曦煜 (93)
基于 SAR 极化比的海面风场反演研究	宋莎莎 孟俊敏 (99)
基于极化基变换的全极化 SAR 海冰边缘线检测算法	张 晰 张 杰 孟俊敏 (105)
ENVISAT ASAR 波模式数据用于风场反演的精度评估	苏腾飞 孟俊敏 (112)
战场电磁环境复杂程度变换研究	陈行勇 陈海坚 张殿宗 王 玮 肖昌达 (119)
基于多源遥感数据的 2009-2010 年冬季渤海冰情分析	刘眉洁 张 杰 孟俊敏 (123)
基于速度矢量的双基地雷达模糊函数分析	李国君 唐小明 张财生 (130)
固定观测站对运动辐射源定位的 EKF 算法研究	李炳荣 曲长文 刘朋乐 熊 华 (135)
高频地波雷达目标最大作用距离折算方法	薛文虎 袁湘辉 王金波 (140)
UKF 算法在机载单站无源定位中的应用	何高健 张福光 朱乾坤 李廷军 (146)
起伏界面处雷达目标的回波特性分析	卢建斌 席泽敏 张明敏 (152)

干扰背景下的星间扩频系统性能研究	周 倩 王祖林 郭旭静	(159)
多跳无线自组织网络协议体系模型	姜胜明 蔡业桂 官权升 郭秉义 韦 岗	(166)
认知无线网络中基于中继的合作频谱感知策略	李云欢 陈彩莲 龙承念 关新平	(173)
移动传感器扫描覆盖问题研究	李亚伟 杜军朝 刘 惠	(180)
使用自适应传输和 MRC 的 AF 协作系统容量	孟祥楠 李光球	(187)
Capacity Analysis of Data-Gathering Wireless Sensor Networks with Correlation Aware Aggregation	Yaxiong Liu Cailian Chen Xinping Guan	(194)
基于 CM-MB-STiMi 的 LDPC 译码器设计	董陈武 何 晶	(201)
计算机网络时间同步技术的发展及高精度应用	龚大亮 陈细秋 李 渊 马立君	(208)
北斗卫星导航系统与数据链系统的集成应用	王士军 刘运航	(213)
异构网络 BGP 协议的设计与仿真	邵 华 张 涛 张 军	(219)
带有时滞的多智能体网络系统一致性研究	魏 宇 范洪达 王志峰	(226)
城市场景下的 VANET 路由协议设计与分析	王铁成 王 钢 王瑞松	(232)
基于综合量度的 AODV 路由协议优化方案	陈丽霞 罗喜伶 李智勇	(238)
一种降低 OFDM 的 PAPR 的改进方法	艾艳锦	(243)
衰落信道中的频域 ISI 抑制算法	王杰令 田 斌 易克初	(248)
认知无线电的频谱感知技术发展现状	胡天骄 王祖林 郭旭静	(253)
Adaptive Frame Fragmentation and Aggregation in MAC Layer of the 802.11n System	Zhu Heyan Zheng Zhiqing	(259)
认知无线电动态频谱管理综述	朱秋岩 王祖林 郭旭静	(267)
一种基于固有时间分解的去噪算法	田 斌 顾小昕 安金坤 孙永军 易克初	(273)
非圆信号扩展 MUSIC 估计方法	李京书 陶建武 郭雪松	(279)
一种融合谱减法语音增强算法的研究与实现	梁 岩 夏丙寅 鲍长春	(286)
基于 FFT 的参数立体声编码方法	邓 峰 贾懋珅 鲍长春	(293)
一种改进的盲目式音频频带扩展算法	张兴涛 刘 鑫 鲍长春	(300)
基于软判决矢量量化的语音频带扩展	张丽燕 刘 鑫 鲍长春	(307)
飞行器视觉导航中跑道图像特征的获取	唐大全 沈 宁 毕 波 李 飞	(314)
运动模糊图像复原方法研究	徐 冰 李景文	(321)
基于特征子空间的四元数减秩 MMSE 波束形成	郭雪松 陶建武 李京书	(329)
基于梯度向量流的海上舰船自动检测算法	朱昌盛 周 伟 关 键	(336)
目标自动检测算法研究与实现	邓亚丽 郭 松 毋立芳	(342)
一种改进的造影图像序列运动估计	翟亮亮 王涌天 刘 越 杨 健	(347)

一种基于支持向量机的飞机尾号识别方法	孙天光 罗喜伶 (354)
基于 Arnold 正反变换匹配的周期求解方法	赵海英 徐正光 孙凤玉 (361)
基于共形几何代数的构造型神经网络 BP 覆盖学习算法	李茂宽 关 键 (368)
Conformal Geometric Algebra based Robust Regression for Hypersphere Fitting	WU Xi Li Maokuan LIU Chao (375)
全局特征和局部特征相结合的人脸哈希算法	肖 鹏 吴 雪 刘兴胜 袁松龙 毋立芳 (382)
一种基于极化 SAR 图像地物分类的新方法	周广益 杨 健 (388)
基于势分布概率假设密度滤波的被动目标跟踪	章 飞 周杏鹏 陈小惠 (395)
基于压缩感知和等正弦空间网格化的目标 DOA 估计	林 波 张增辉 朱炬波 谢美华 (403)
基于相关跟踪算法的塔康方位信号处理研究	江志浩 王洪民 王建斌 (410)
The Comparison of Height Uncertainties for Three Spaceborne InSAR Height Measurement Models	Xu Huaping, Zhu Lingfeng (415)
一种利用扩展目标特征信息的修正 PMHT 算法	郑 乐 李 阳 龙 腾 (422)
SAR 调制干扰研究	李相平 冷曙光 张 刚 (429)
基于示波器的相位差测量方法	谢洪森 朱爱红 何高健 刘又铭 于仕财 (434)
多路共地脉冲恒流源研制	李 波 黄 雷 李玺钦 赵 娟 王 卫 (438)
焊接工艺对微波管阴极热效率的影响及模拟优化分析	宋芳芳 冯先龙 (442)
电迁移导致的倒装焊点热冲击性能及失效形貌的转变	陆裕东 成 俊 恩云飞 何小琦 (448)
DPA 在射频功率电阻器质量控制中的应用	刘 欣 (454)
多种栅结构 SOI NMOS 器件 ESD 特性研究	何玉娟 恩云飞 罗宏伟 肖庆中 (460)
一种高速光信号检测电路的设计	胡 杨 温上捷 王 健 (464)
长度伸缩压电振子的 FDTD 数值计算	杜铁钧 (469)
单 bar 大功率半导体激光器寿命评价实验	路国光 黄 云 恩云飞 (473)
Research on the Development and Key Technology of Hybrid Insect MEMS	Hu Kaibo (479)
基于 FPGA 的传感器偏置调零算法	刘校伟 相 征 (486)
高精度交流恒流源仿真设计	于治国 黄 雷 贾 兴 (492)
海底油藏瞬变电磁响应分析	陆 洪 彭怀云 (496)
A High Performance Ka-Band Push-Push Dielectric Resonator Oscillator	Zhou Xin Hu Shixiang Li Ping (503)

一种新型的具有陷波功能的超宽带单极子天线	张海燕	李增瑞	张小军	(508)
简单馈电的准八木微带天线	张小军	李增瑞	张海燕	(513)
微带带阻滤波器的 FDTD 分析	陈佳林	李尚生	殷 勇	宋亚平 丛 军 (519)
电磁带隙结构的数值分析	丛 军	李尚生	陈佳林	宋亚平 殷 勇 (524)
System Verification Technology Based on 8bit CPU	Wei Jinghe	Huang Yun	Qian Liming	Yu Zongguang (529)
基于 ATML 的自动测试系统软件平台研究与设计	冯玉光	吴 亮	奚文骏	(535)
基于 PCI-1721 的虚拟信号产生方法研究	范籍文	谢洪森	刘加能	李廷军 (541)
TCP&UDP 混合模式下的路由器缓存容量分析	臧永飞	颜金尧	张 博	(546)
基于以太网的分布式模拟器数据采集系统设计	刘 凯	张立民	张兵强	(553)
舰载军用计算机加固技术综述	张丽萍	辛旭光		(560)
VHDL 除法运算可综合性分析与除法器设计	毛维平	李国林	粘朋雷	(565)
航空 1553B 总线监测系统的设计与实现	肖楚琬	谢晓方	李德栋	柯振山 (572)
基于多信号模型的装备实时故障诊断方法研究	李晓峰	魏中军	赵建军	(579)
虚拟仪器资源的逻辑约束关系建模方法研究	孙靖杰	赵建军	侯学隆	蔡春涛 (586)
某武器系统单元电路板自动测试设备研究	赵建军	王豪凯	于仕财	(592)
GA 神经网络在非线性系统辨识中的仿真研究	董万里	曲东才		(596)
战斗车辆计算平台系统集成体系结构	曹宏炳	籍 刚	赵向东	(601)
基于 iSCSI 协议的 IP 存储安全研究	赵 勇	薛丽敏	肖 斌	(608)
面向装备体系对抗作战想定及描述语言研究	徐 进	黄晓冬	温 玮	(613)
无缝拼接大屏幕投影系统中的校正技术	陈 锋	詹 力	杨 涛	刘 越 (620)
视景仿真中的地形可视化算法研究与实现	张建廷	刘福太	艾祖亮	(626)
面向飞行模拟的天地线绘制方法	雷励星	范蓉		(632)
高密度封装 IC 加速可靠性试验技术研究	尧 彬	来 萍	刘 建	(638)
失效分析中的失效验证试验	牛付林	魏建中		(644)
闩锁效应对超大规模集成电路的影响及失效分析	林晓玲	章晓文	姚若河	(649)
基于 DSP 和 FPGA 的运动控制器	张 宇			(655)
一种简易捷联惯导系统的实现方法	李 恒			(661)
量子计算技术的发展与军用前景	胡开博	崔德勋		(670)
一种电子航图中经纬线的提取方法	赵小锋	姜本清	方 伟	(676)
串口连接器的失效机理研究	陈 媛	李 萍	来 萍	(682)
高稳定度正弦信号的产生	黄 雷	于治国	赵 娟	(688)

基于 3S 多源信息融合的防空雷达组网探测

许 稼¹ 彭应宁¹ 高效²

(1. 清华大学, 电子工程系, 北京, 100084; 2. 空军装备研究院, 北京, 100096)

摘 要: 在阐述现代防空雷达组网概念的基础上, 本文讨论了基于 3S 信息多源信息融合雷达组网探测的相关内涵和必要性。进而, 介绍了 3S 领域的国内外研究进展, 对基于 3S 信息融合雷达组网探测的具体应用进行了展望并给出了应用实例。

关键词: 组网雷达; 信息融合; 3S 系统; 雷达威力范围; 地理信息系统

Multi-Source information fusion for Air-defense Netted Radar Detection based on 3S system

Xu Jia¹, Peng Yingning¹, Gao Xiao²

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Airforce Equipment Research Institute, Beijing, 100096)

Abstract: For the modern radar network, this paper gives the deep discussion on the meaning and the necessity of the information fusion based on 3S system. Furthermore, the developments on the filed of 3S system are introduced, and the specific applications on the netted radar detection are also given based on the real application cases.

Key words: netted radar; information fusion; 3S system; radar coverage diagram; geographic information system (GIS)

1 引言

在日益复杂的电磁环境中, 防空雷达面临着电子干扰、反辐射导弹、隐身目标和超低空突防等日益严峻的威胁。为此, 现代防空雷达探测不再是单部雷达的孤军作战, 而需通过雷达组网来提高综合的探测性能。防空雷达组网是指对一定空间区域内的多部相同或不同平台(海、陆、空、天等)、相同或不同体制的防空雷达由通信链路实现数据互联, 构成特定拓扑结构的雷达网络。进而, 依据一定的决策指挥原则, 运用空间机动、时间分配、功率控制、波段覆盖、极化选择等手段, 通过多雷达的信息共享、数据融合、协同探测、体系对抗, 提高探测系统的“四抗”能力, 并取得显著超越单雷达的探测性能。

显然, 防空雷达组网可显著提高探测系统的“四抗”性能。在抗干扰方面, 空间、时间和

雷达参数(极化、波长、分辨率等)分布的多传感器难以被同时干扰,并且多雷达系统也可采用交替开机等措施实现有效的干扰抑制;在抗摧毁方面,多传感器系统中单节点摧毁对系统整体探测性能影响不大,并且发射和接收分置、有源和无源并存的多基地传感器系统抗摧毁能力显著增加;在抗隐身方面,由于目标难以在全频段和全方位实现隐身设计,而在频率、空间具有不同分布的同类和异类多传感器系统则可以从多个观测角度、多个频段获得目标散射和辐射信息,从而显著改善对隐身目标的检测性能。在抗低空突防方面,多雷达系统显著降低了雷达探测盲区,增加系统的探测区域。

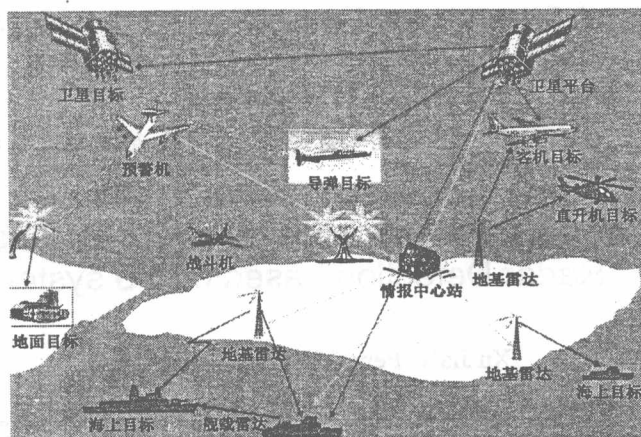


图1 现代防空雷达组网示意图

2 基于‘3S’多源信息融合防空雷达组网

本质上,防空雷达组网是多传感器融合在雷达探测领域的典型应用和实现。从20世纪70年代起,多传感器信息融合技术就得到了世界各国的普遍重视和广泛研究。按照信息抽象的不同层次,多传感器信息融合可分为五级^[1, 3],即检测级融合、位置级融合、属性级融合、态势评估与威胁估计。检测级融合是直接检测判决或信号层上进行的融合。位置级融合是在传感器的观测报告或测量点迹和目标的状态估计基础上进行的融合,即跟踪级融合。属性级融合也称为属性分类或者身份估计,其目的是对目标进行表征和识别以提高识别正确率。态势评估和威胁估计是对战场上战斗力量和敌方意图量化分析的信息处理过程。

值得注意的是,朝着海、陆、空、天不同多平台的方向发展的现代防空雷达组网有了一些新的特点。一方面,雷达平台的空间位置高度地动态变化和机动,为实现信息的融合需要实时动态获取各个雷达平台的局部位置信息。其次,与传统地基防空雷达不同,新体制雷达平台大量出现了下视探测的情形,如空/天基预警雷达^[6]和天/地波超视距雷达等,雷达探测在很大程度上受到地理背景的影响。概而言之,防空雷达组网探测离不开多传感器数据高精度的时空配准和关联,离不开对探测背景信息的有效利用,离不开雷达组网时空分布的合理优化和组合,更离不开多源探测信息的有效融合。

为切合上述需求,当前信息领域迅猛发展的3S集成技术可以为组网雷达的性能改善和提升提供重要的理论和技术支持。3S集成技术是GPS(全球卫星定位系统)、RS(遥感系统)、

GIS（地理信息系统）三种信息系统的统称，意旨对空间位置有关的信息进行定位、处理、存贮管理、分析、分类、识别，进而提供决策信息的综合集成系统。3S 的集成技术可以充分利用 GPS、GIS 和 RS 三类系统的技术特点，显著提升防空雷达组网系统的整体探测性能。例如，利用 GPS 可精确获取雷达平台和探测目标的位置信息，利用 GIS 可综合管理战场地理和时空信息，利用 RS 动态更新的遥感图像信息可以实时获取雷达探测地背景信息。将雷达、红外、激光等传感器配合使用既可弥补雷达盲区，又可利用雷达的全天时全天候弥补其它传感器的缺点。同时，将三者紧密结合，基于 3S 集成系统，可快速、准确、经济地为防空雷达组网探测提供所需时空信息管理和支持。显然，3S 集成技术在雷达组网的各个环节均可承担重要角色。

3 国内外‘3S’系统的发展概况

在此，扼要综述一下 3S 技术的国内外历史和进展情况^[4-5]。在 GPS 技术方面，1964 年美国海军研制成功了著名的子午仪系统（NNSS）。20 世纪 60 年代末 70 年代初，美国又着手研究导航卫星测试，测距全球定位系统，简称 NAVS/GPS 系，即“全球定位系统”（GPS）。目前，用 GPS 卫星发送的导航定位信号能进行厘米/毫米级精度的静态定位，米/亚米级精度的动态定位，亚米/厘米级精度的速度测量和毫微秒级精度时间测量。目前，除了美国的 GPS 全球定位系统之外，具有 GPS 同类功能的卫星系统还有俄罗斯的全球卫星导航 GLONASS 系统，由 24 颗卫星构成，它们分布在高度为 19100Km 的 3 个轨道面上。以及欧洲导航定位卫星系统“伽利略”系统，日本的多功能卫星增强系统、印度的区域导航卫星系统等。实际上，GPS 已成为具有类似功能的卫星定位系统的代名词，图 2 给出了 GPS 的示意图。

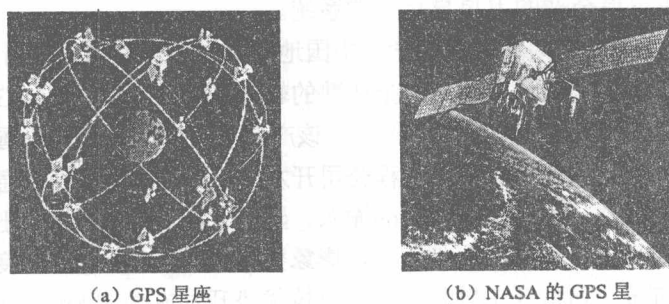


图 2 GPS 系统示意图

在 GIS 方面，1963 年加拿大 Tomlison 博士提出把常规地图变为数字形式存入计算机的想法，并于 1965 年建立了世界上第一个地理信息系统“加拿大地理信息系统（CGIS）”。随后美国城市和区域信息系统协会（URISA）、信息系统全国协会（NASIS）相继成立。此外，国际地理联合会（IGU）于 1968 年设立了地理数据收集和处理委员会（CGDSP），这些组织为传播 GIS 知识和发展 GIS 技术起了关键的作用。经过近 40 年的发展，GIS 技术不断成熟。目前，地理信息系统已经跨越信息存储、管理、查询检索、统计分析和制图表达等基本功能的初级阶段，正朝着实用化的多功能、多目标、多层次的专业化综合分析管理信息系统、空间信息管理决策支持系统、智能化地理信息系统方向开拓发展。同时，地理信息系统亦在与 RS 和

GPS 卫星全球定位系统相结合, 构建区域性甚至全球性高速空间信息网络。随着全球信息网络技术飞速发展, ComGIS (组件式 GIS) 和 WebGIS (万维网 GIS) 等新兴技术应运而生, GIS 发展进入了一个崭新时代。

在 RS 技术方面, 各国的技术都突飞猛进。例如, 美国已经开发出应用于森林资源调查的 3S 技术, 加拿大、日本、印度等国家, 在大约 25 分钟内可以利用前一天接收到的卫星 MSS 和 TM 图像数据, 按照同一指标体系和图例输出整幅的 1:20 万和 1:50 万土地利用/土地覆盖图, 利用 LANDSAT 7 卫星图像可以满足 1:5 万和 1:2.5 万的各类图件更新的需要。在应用 3S 技术方面, 美国、加拿大技术较为成熟, 特别是对地综合数据观测系统, 遥感数据处理系统以及 3S 集成系统都走在前列。如 1 米高分辨率卫星技术, 具有 224/384 个光谱通道的高光谱遥感技术, 不受气候、日照影响, 能穿透云层并能全天候工作的雷达卫星遥感技术。在森林遥感方面, 植被指数已广泛的用来定性和定量评价植被覆盖及其生长活力, 20 多年来已经发展了 40 多个植被指数日本的妹尾在 1990 年提出对山区的遥感数据纠正地形异常所造成的对日照条件的影响方法, 在京都某试验站, 对难以分辨的杉、扁柏的组合达到几乎 100% 的精度 (几乎没有误差), 对扁柏、松、阔叶林组合也可达相似的精度。

我国是开展 3S 理论和技术研究较早的国家之一, 无论从基础理论研究, 还是实际工程应用都取得许多引人瞩目的成就。在 GPS 方面, 我国的“北斗一号”系统 2003 年组网成功, 并投入实际应用。该系统由三颗 (两颗工作、一颗备用) 北斗定位卫星、地面控制中心为主的地面部份、北斗用户终端三部分组成。北斗卫星导航定位系统可向用户提供全天候、二十四小时的即时定位服务, 定位精度可达数十纳秒的同步精度, 其精度与 GPS 相当。2009 年 4 月, 我国西昌卫星发射中心成功将第 2 颗北斗导航卫星 (北斗二号) 送入预定轨道, 而“北斗二号”可以精确到“厘米”之内。中国自主研发的北斗卫星导航系统从今年起进入了组网高峰期, 预计在 2020 年左右形成覆盖全球的卫星导航定位系统。

在 GIS 方面, 国内中科院、武汉大学、中国地质大学等多家科研院所对于 GIS 技术的理论及应用开展了深入研究, 研制成功了一批成熟的软件系统。例如, MAPGIS 地理信息系统是中国地质大学开发的工具型地理信息系统软件, 该产品是国家科技部向全国推荐的国产地理信息系统软件平台。其次, 武汉吉奥信息工程公司开发的 GeoStar 是地理信息系统基础软件吉奥之星系列软件的核心板块。用于空间数据的输入、显示、编辑、分析、输出和构建与管理大型空间数据库, 优点在于矢量数据、属性数据、影像数据、DEM 数据的高度集成。第三, 北京超图地理信息技术有限公司依托中国科学院的科技优势开发成功的 SuperMap GIS 新一代大型地理信息系统平台, SuperMap GIS 系列软件成为了中国主流的 GIS 平台。当然, 还有其它一些国产的 GIS 软件产品, 在此不一一列举了。

在 RS 信息与 GPS 和 GIS 信息融合和集成应用方面, 我国也有许多成功的应用。3S 集成技术的发展和实际应用, 在我国可以分为三个阶段: 20 世纪 80 年代初, 全国土地调查第一次用遥感卫片提供我国的国土面积和耕地数量, 这是 3S 技术应用的萌芽阶段。80 年代末, 我国在国土探测方面广泛应用了遥感遥测技术, 例如, 西藏应用遥感技术在全国第一个完成土地详查, 为西藏的开发决策创造了条件; 黄土高原三北地区遥感调查为该地区经济发展和生态建设提供了依据; 这个阶段应该是 3S 技术探索时期。90 年代至今, 随着 GPS 和 GIS 技术的长足进步, 我国各地区广泛应用 3S 技术进行土地资源调查、森林覆盖面积的测算、农作物估产等方面的研究。这个阶段可以称为是 3S 集成技术应用的快速成长期。

4 ‘3S’系统在防空雷达组网中应用展望

总体而言,目前 3S 信息用于雷达探测系统还较初步,而将 3S 集成应用于防空雷达组网系统还处于探索阶段。3S 技术在雷达中的应用大都是分离的和局部的应用。例如,采用 GPS 技术对于车载雷达、机载雷达等运动平台进行定位,形成运动平台雷达的情报信息。利用 GIS 信息,目前在雷达中的应用,主要用于计算单部雷达探测威力范围和地形遮挡。针对现代防空雷达组网的应用需求,我们认为基于 3S 多源信息融合在现代防空雷达组网领域具有广阔的应用空间。具体而言,应用的领域包括如下一些方面。

一是,基于 3S 支持的防空雷达组网电磁态势三维仿真和定量分析。利用 3S 支持信息,可实现机动防空雷达组网条件下的电磁三维态势实现高性能仿真,对雷达组网的探测性能提供定量分析的基础。对于机动雷达组网而言,按照特定形式组网后多雷达探测性能需要有可信的手段进行分析计算。基于 3S 的多源信息,可以开展防空雷达组网的建模、电磁态势三维可视化、电磁态势的定量分析,为后续雷达组网优化和方案生成、多源传感器融合奠定技术和理论的基础。其中图 3 给出了清华大学课题组^[12]基于 ArcGIS 和 C#开发环境研制的防空雷达组网仿真系统。可以根据实际战场环境获取基于 3S 雷达组网的三维威力范围和不同高度层二维切片。

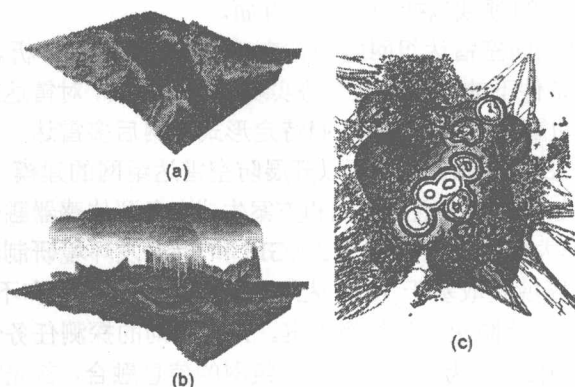
二是,基于 3S 支持优化防空雷达组网方案。针对不同的探测任务优化系统的组网方案,更好地保障雷达网地探测性能。为实现防空雷达组网的信息融合,首先需要解决各局部传感器信息的时空配准问题,需要将各个局部传感器探测信息的坐标统一到组网融合中心的坐标系中。对于车载、球载、机载和星载等运动平台的动态防空雷达组网,更加需要实时、准确和动态地跟踪雷达平台的位置信息,只有同时获取平台高精度的空间位置和姿态信息才能实现实时有效的组网。显而易见,GPS 能够提供雷达平台非常重要的动态位置信息。此外,要实现防空雷达组网的时间同步和配准,采用高精度 GPS 的授时是目前被证明的可行途径之一。总之,GPS 是目前防空雷达组网时空同步的基础。

三是,基于 3S 支持获取雷达探测的背景信息,改善防空雷达组网中多雷达探测的效果,显著提升雷达网的整体探测性能。尤其是,基于地理信息的支持,机载预警和天波超视距等下视探测雷达,能够预先获取地理背景信息知道雷达波束中照射的地物信息,实现基于“知识”的杂波自适应抑制^[6],显著改善下视探测的性能。显而易见,GIS 与 GPS 结合为综合利用探测环境地背景先验知识提供了必要的手段。

四是,基于 3S 支持,可实现红外、可见光等 RS 探测信息和 ESM 信息与雷达探测信息的无缝融合。作为主动传感器,雷达能提供目标完整的位置和多普勒信息,成为现代战场的主要探测手段。但是,由于雷达主动发射电磁波,易遭受电子干扰和反辐射攻击。此外,雷达存在低空盲区,当目标采取隐身措施时,雷达对目标的探测距离就会大大下降。而红外、可见光等传感器不向空中辐射能量,通过接收目标辐射的热能或反射光进行探测和定位,因而不易被侦察或定位,具有较强的抗干扰能力。同时,由于目标不可避免地要辐射热量,从而红外探测下难以隐身,红外传感器还具有测角精度高和目标识别能力强等优点。但是,被动传感器也存在明显缺点:(1)不能提供目标的距离信息等;(2)作用距离较近,受气候影响大。所以,RS 被动传感器与雷达配合使用,成为相互独立又彼此补充的探测跟踪手段。显然,基于 3S 多源信息融合可显著提高防空雷达组网的探测严密性和抗摧毁性等性能。

5 结束语

总之, 基于 3S 多源信息融合在现代防空雷达组网中具有重要的应用空间和潜力。同时, 针对现代防空雷达不断变化的探测环境和探测目标, 需要不断深化 3S 集成技术在防空雷达组网探测应用的关键技术研究, 为新体制高性能防空雷达组网系统工程化奠定理论、方法和关键技术的基础。



(a) 战场地形; (b) 三维探测范围: 上边界和下边界; (c) 二维探测范围

图3 仿真和计算实例

参考文献

- [1] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜等, 多源信息融合. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 周宏仁, 敬忠良, 王培德, 机动目标跟踪. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [3] 何友, 王国宏, 陆大金, 彭应宁. 多传感器信息融合及应用. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [4] 何凯, 3S集成技术在合成孔雷达中德的应用, [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [5] 李德仁, RS, GIS, GPS集成与应用. 北京: 测绘出版社, 1995.
- [6] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] Baker, C.J., and Hume, A.L.: 'Netted radar sensing', IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., 2003, 18, (2), pp. 3-6
- [8] Chernyak, V.: 'Fundamentals of multisite radar systems' (Gordon and Breach Scientific Publishers, 1998)
- [9] Que, W., Peng, Y., Lu, D., and Hou, X., A new approach to data fusion for stealth targets tracking. Int. Radar Conf., Radar 97, October 1997, Edinburgh, UK, pp. 657-661.
- [10] Tenney, R.R. and N.R.Sandell, Detection with distributed sensors [information theory]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981.AES-17 (4) :501-10.
- [11] Guan, J., et al., Three types of distributed CFAR detection based on local test statistic. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002. 38 (1) : p. 278-288.
- [12] Yang L. S, Xu J., Wang X. T., Peng, Y. N, A Novel Three-dimensional Coverage Visualization System of Netted Radars Based on ArcObjects. IET International Radar Conference, 2009: CD-ROM, 16-Radar Environment and Phenomenology.

旁瓣对消 QRD-LS 算法的一种超强流水 Systolic 结构

林仁春 汪学刚

(电子科技大学 电子工程学院电子工程系, 成都 611731)

摘要: 针对雷达自适应旁瓣对消应用阐述了一种 QR 分解最小二乘 (QRD-LS) 算法的超前数据块处理技术。探讨了采用这种技术的 QRD-LS 算法的 Systolic 实现结构, 该结构引入了更强的并行流水机制, 把一路并行流水的数据处理转化为多路并行流水的数据处理, 且仍然由能够完成 Givens 旋转的 CORDIC 运算宏单元组成。这种超强流水 Systolic 结构可以在不损失滤波器收敛性的前提下提高数据采样率。MATLAB 仿真表明了算法的数值稳定性。

关键词: QR 分解最小二乘算法; 数据块处理; Systolic 阵结构; 超强流水线

An ultra-pipelined systolic structure of QRD-LS algorithm to sidelobe cancellation

Lin Renchun, Wang Xuegang

(Department of Electronic Engineering, School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Presents a data-block look-ahead processing technology of QRD-LS (QR Decomposition Least Square) algorithm for adaptive sidelobe cancellation application. The systolic structure of the algorithm is discussed. It introduces an ultra-pipelined mechanism, takes one parallel data processing flow into multiple parallel flows, and is still composed of CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) computing macrocells which can realize Givens rotation. This ultra-pipelined systolic structure can raise data sampling rate without degrading convergence of the filter. MATLAB simulation shows the numerical stability behavior.

Key words: QRD-LS algorithm; data-block processing; systolic structure; ultra-pipeline

1 引言

在电子对抗中, 有源干扰很容易从雷达天线的旁瓣进入。尽管目前天线的旁瓣电平已经做得很低了, 但由于干噪比 (JNR) 往往比信噪比 (SNR) 高很多, 从天线旁瓣进入的干扰信号远大于从主瓣进入的有用信号, 使信号检测很难进行。通常有效的应对方法是采用自适应旁瓣对消 (ASLC, Adaptive Sidelobe Cancellation) 技术, 使天线的波束图在干扰方向形成很深的零点^[1, 2]。采用 QRD-LS 算法来实现自适应旁瓣对消, 主要是因为其收敛速度快, 计算复杂度低, 具有很好的数值稳定性, 并能利用 Systolic 结构高效实现。QR 分解处理使自适应处理的

基本运算——矩阵求逆的运算量降低并使数值稳定性大大提高。一种实现 QR 分解的西阵可由一系列 Givens 旋转实现, CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer, 坐标旋转数字计算机) 是一种有效实现 Givens 旋转的技术, 计算只需简单的移位和加法操作就能完成^[3]。

算法系统构架由 Systolic 阵实现。Systolic 阵是一个局部串行全局并行的拓扑结构, 是一种用并行流水方式实现高速信号处理的硬件实现方式。本文基于输入数据块对 Systolic 结构引入了更强的并行流水机制, 把一路并行流水的数据处理转化为多路并行流水的数据处理。

2 旁瓣对消 QRD-LS 算法简介^{[3][4]}

令第 i 次快拍主天线输入为 $d(i)$, 辅助天线阵 M 维输入矢量为 $\mathbf{x}(i)=[x_1(i) \ x_2(i) \ \cdots \ x_M(i)]^T$, 滤波器自适应权向量为 $\boldsymbol{\omega}=[\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_M]^T$, 估计误差向量为 $\mathbf{e}(n)=[e(1) \ e(2) \ \cdots \ e(n)]^T$, 可得

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{X}(n)\boldsymbol{\omega} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{X}(n)=[\mathbf{x}^T(1) \ \mathbf{x}^T(2) \ \cdots \ \mathbf{x}^T(n)]^T$, $\mathbf{d}(n)=[d(1) \ d(2) \ \cdots \ d(n)]^T$ 。

引入遗忘因子 $\lambda = \beta^2, 0 < \beta < 1$, 定义 QRD-LS 算法的代价函数

$$J(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 = \|\mathbf{B}(n)\mathbf{e}(n)\|^2 \quad (2)$$

式中 $\mathbf{B}(n) = \text{diag}[\beta^{n-1} \ \beta^{n-2} \ \cdots \ 1]$ 。由 $\nabla_{\boldsymbol{\omega}} J(n) = \mathbf{0}$ 可求得最下二乘意义下的正规方程 (正则方程)

$$[\mathbf{X}^H(n)\mathbf{B}^2(n)\mathbf{X}(n)]\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}} = \mathbf{X}^H(n)\mathbf{B}^2(n)\mathbf{d}(n) \quad (3)$$

QRD-LS 算法不是直接对式 (3) 通过矩阵求逆来得到 $\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}$, 而是对式 (3) 进行变换, 在数据域上解线性方程组求得 $\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}$ 。算法之基础在于寻找酉矩阵 $\mathbf{Q}(n)$ 使得 $\mathbf{B}(n)\mathbf{X}(n)$ 变为上三角阵 (即所谓的 QR 分解), 即

$$\begin{aligned} J(n) &= \|\mathbf{B}(n)\mathbf{e}(n)\|^2 \\ &= \|\mathbf{Q}(n)\mathbf{B}(n)\mathbf{e}(n)\|^2 \\ &= \|\mathbf{Q}(n)\mathbf{B}(n)\mathbf{d}(n) - \mathbf{Q}(n)\mathbf{B}(n)\mathbf{X}(n)\boldsymbol{\omega}\|^2 \\ &= \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{u}(n) \\ \mathbf{v}(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R}(n)\boldsymbol{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

则 $J(n)_{\min} = \|\mathbf{v}(n)\|^2$, 而求解最优权 $\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}$ 的公式为 $\mathbf{R}(n)\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}} = \mathbf{u}(n)$ 。

3 QRD-LS 算法超前数据块处理技术

探讨数据块处理, 是为了在 QRD-LS 算法实现结构中建立更强的并行流水机制, 提高数据吞吐率。图 1 是输入数据消除形式对比^[5]。

可以看到通常的 QRD-LS 算法的数据相关性为 $r(n)$ 依赖于 $r(n-1)$, $r(n-1)$ 依赖于 $r(n-2)$, 等等。正是这种相关性限制了算法的数据更新速度, 也就降低了数据采样率。超前数据块处理将突破这种限制: $r(n)$ 的计算不再依赖于 $r(n-1)$, 而是与 $r(n-3)$ 相关; 类似的, $r(n+1)$ 的计算与 $r(n-2)$ 相关, 等等。

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \underline{r} & r & r & \cdot & (n-3) \\ & r & r & \cdot & (n-2) \\ & & r & \cdot & (n-1) \\ \underline{x} & x & x & \cdot & (n) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n-3) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-2) \\ & & r' & \cdot & (n-1) \\ 0 & \underline{x}' & x' & \cdot & (n) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n-3) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-2) \\ & & \underline{r}' & \cdot & (n-1) \\ 0 & 0 & \underline{x}' & \cdot & (n) \end{bmatrix} \\
 & \downarrow \\
 & \begin{bmatrix} \underline{r}'' & r'' & r'' & \cdot & (n) \\ & \underline{r}'' & r'' & \cdot & (n-1) \\ & & \underline{r}'' & \cdot & (n-2) \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & (n-1) \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & (n) \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n-1) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-2) \\ & & \underline{r}' & \cdot & (n-1) \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & (n) \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n-2) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-1) \\ & & \underline{r}' & \cdot & (n) \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & (n) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(a) 通常的QRD-LS算法

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \underline{r} & r & r & \cdot & (n-3) \\ & r & r & \cdot & (n-2) \\ & & r & \cdot & (n-1) \\ \blacksquare & x & x & \cdot & (n) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \underline{r} & r & r & \cdot & (n-3) \\ & r & r & \cdot & (n-2) \\ & & r & \cdot & (n-1) \\ \blacksquare & x & x & \cdot & (n) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \blacksquare & r & r & \cdot & (n-3) \\ & r & r & \cdot & (n-2) \\ & & r & \cdot & (n-1) \\ 0 & x & x & \cdot & (n) \end{bmatrix} \\
 & \downarrow \\
 & \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-1) \\ & & \underline{r}' & \cdot & (n-2) \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & (n-1) \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & (n) \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n-3) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-2) \\ & & \underline{r}' & \cdot & (n-1) \\ 0 & 0 & \blacksquare & \cdot & (n) \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \underline{r}' & r' & r' & \cdot & (n-3) \\ & \underline{r}' & r' & \cdot & (n-2) \\ & & \underline{r}' & \cdot & (n-1) \\ 0 & \blacksquare & x & \cdot & (n) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(b) 采用超前数据块处理的QRD-LS算法

图1 数据更新对比

3.1 超前数据块处理

设 $n-p$ 时刻已经实现了矩阵 $B(n-p)X(n-p)$ 的QR分解, 即已得到酉矩阵 $Q(n-p)$ 使得

$$\begin{aligned}
 & Q(n-p)B(n-p)[X(n-p) \quad d(n-p)] \\
 & = \begin{bmatrix} R(n-p) & u(n-p) \\ 0 & v(n-p) \end{bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中 $Q(n-p) \in \mathbb{C}^{(n-p) \times (n-p)}$, $B(n-p) \in \mathbb{C}^{(n-p) \times (n-p)}$, $X(n-p) \in \mathbb{C}^{(n-p) \times M}$, $d(n-p) \in \mathbb{C}^{(n-p) \times 1}$, $R(n-p) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 是上三角阵, $0 \in \mathbb{C}^{(n-p-M) \times M}$, $u(n-p) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $v(n-p) \in \mathbb{C}^{(n-p-M) \times 1}$; M 为阵元个数, p 为流水路数。

在 n 时刻,

$$[X(n) \quad d(n)] = \begin{bmatrix} X(n-p) & d(n-p) \\ X_p(n) & d_p(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $X_p(n) \triangleq [x^T(n-p+1) \quad x^T(n-p+2) \quad \cdots \quad x^T(n)]^T$, $d_p(n) \triangleq [d(n-p+1) \quad d(n-p+2) \quad \cdots \quad d(n)]^T$ 分别是最新的 p 次快拍的辅助天线阵输入数据和主天线输入数据。引入遗忘因子矩阵 $B(n)$ 和预变换矩阵 $\tilde{Q}(n)$

$$B(n) \triangleq \begin{bmatrix} \beta^p B(n-p) & 0 \\ 0 & E_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tilde{Q}(n) \triangleq \begin{bmatrix} Q(n-p) & 0 \\ 0 & E_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

容易验证 $\tilde{Q}^H(n)\tilde{Q}(n) = \tilde{Q}(n)\tilde{Q}^H(n) = E_n$, 即 $\tilde{Q}(n)$ 是酉矩阵。注意到 (5) 式, 有