·动态综述·

军用射频集成电路技术发展趋势

刘　沛[1]，王健安[2]，赖　凡[3]
（1. 中国航天标准化与产品保证研究院，北京 100071；2. 模拟集成电路重点实验室，重庆 400060；
3. 中国电子科技集团公司 第二十四研究所，重庆 400060）

摘　要： 目前，美国仍然占据世界国防军事微电子科学技术的主导地位，是军用微电子发展战略思想的引领者。长期以来，美国国防高级研究计划局（DARPA）策划并成功组织实施了许多先进军用集成电路发展项目。射频集成电路（RFIC）是实现通信、雷达、电子战系统的关键器件，是 DARPA 大力发展的重要技术之一。通过分析 DARPA 军用 RFIC 系列项目的现状和未来发展规划，提出了高速、高频、宽带、智能化的 RFIC 技术发展趋势。

关键词： 射频集成电路；DARPA；智能化
中图分类号：TN43　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1004-3365(2018)05-0663-04
DOI：10.13911/j.cnki.1004-3365.170560

Development Trends of Radio Frequency Integrated Circuits for Military Applications

LIU Pei[1], WANG Jian'an[2], LAI Fan[3]
(1. *China Academy of Aerospace Standardization and Product Assurance*, *Beijing* 100071, *P. R. China*;
2. *Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory*, *Chongqing* 400060, *P. R. China*;
3. *Sichuan Institute of Solid-State Circuits*, *China Electronics Technology Group Corp.*, *Chongqing* 400060, *P. R. China*)

Abstract: It is currently unquestioned that the America is still playing the world wide dominant role in the realm of microelectronics of national defense, and that of the leader of the strategic thinking of military microelectronics industry development. For a long period of time, the America's Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) has been planned, successfully organized and realized the most advanced integrated circuits projects. Meanwhile, radio frequency integrated circuits (RFIC) are critical devices which enable systems of communication, radar, electronic war for military applications, and are one of the most important technologies developed with great efforts in DARPA's projects. By studying the status of DARPA's projects of RFIC and the prospects for its future developing, the trends of high speed, high frequency, broadband, intelligent of RFICs for future military applications were suggested.

Key words: RFIC; DARPA; intelligent

0　引　言

信息时代的关键推动力是无处不在的对信息的无缝感知和通信能力。射频集成电路（RFIC）是通信、雷达、电子战等系统的基础。大力发展 RFIC 是推动无线通信电子系统不可或缺的重要部份。为了满足信息爆炸和制电磁频谱权的新要求，发展新的电磁频谱感知、转换和通信技术变得愈发重要和紧迫。

美国是军用微电子科学技术和发展战略的主导者和引领者。2017 年，美国战略与预算评估中心

收稿日期：2017-12-20；**定稿日期：**2018-01-12
作者简介：刘　沛（1981－），男（汉族），陕西人，硕士，高级工程师，从事元器件标准质量与可靠性研究工作。

(CSBA)再次发布了《电波制胜：重拾美国在电磁频谱领域的主宰地位》的研究报告，重点阐述了美国如何在未来电磁频谱战中重拾霸主地位的思路[1]，强调持续不断的 RFIC 技术创新对军用电子信息系统发展是至关重要的。前端集成和可编程是目前军用 RFIC 的发展热点之一，也是微系统集成的重要部分之一。美国国防高级研究计划局(DARPA)的重要合作伙伴、全可编程技术和器件领先企业——赛灵思(Xilinx)，近期推出了采用 16 nm FinFET 工艺制作的可编程 RFSoC 系列，成功将 RF 信号链集成在一个单芯片 SoC 中。该芯片可应用于军用宽频通信，是体现 RFIC 高集成度、软件定义、智能化的最新应用案例[2]。

以信息化和体系化为基本特征的作战方式对信息的感知、处理提出了新的要求，同时需要不同应用的 RFIC 具备高速、高频和宽带性能。未来工作于 RF 到 THz 波段的信息系统要求新颖和能量有效的电路和算法；要求自主反应进行信息提取和处理；要求能工作在干扰、拥塞等环境中的自适应和认知无线电系统。这些系统为了感知环境信息，需要按预计方案进行调整，作出快速变化。美国空军研究实验室(AFRL)针对认知无线电网络在编码协议、背压算法、器件等方面进行了大量开发工作[3]。生成这些新的系统能力需要研究性能先进、工作稳定的新器件和新电路，开辟新的工作频段，提升响应速度，突破模拟和混合信号性能限制，降低噪声和功耗，提高灵敏度。工作于模拟域的电路电压相对较高，数字处理电路的电压较低，因此开发新一代模拟信号获取、调理、转换及功率管理技术成为重要研究方向。例如，DARPA 重点关注的压缩采样模拟-信息转换新技术，适用于宽频谱信号接收、快速干扰探测和低功耗传感网络节点频谱扫描器[4]。

先进 RFIC 解决上述挑战的关键技术是在更小尺度上以更大密度异质集成更多功能，包括集成模拟电路、数字电路、MEMS 传感器、功率器件等，以满足不断提高的端到端的系统应用要求。这需要利用全球化技术和资源来实现。同时，开发神经网络芯片等非经典颠覆性的信号获取、转换和处理技术也是必不可少的。在经典技术与颠覆性技术的融合领域，有大量工作需要完成。

1　技术发展现状

美国仍然在射频信号获取、转换等军用器件及 RFIC 关键技术方面处于领导地位，也是微电子发展战略的引领者。通过对 DARPA 在该领域的在研系列项目分析发现，高速、宽带、快速模拟/数字转换是模拟/模数混合信号 IC 的发展主线。DARPA 支持了 SiGe 和 RF CMOS 项目(TEAM 项目)，侧重于提升转换和处理速度；支持了 SMART/ELAST 高频阵列的硅基或化合物项目，侧重于提升功率和频率性能。这两条项目路径加强了通信、电子战、雷达系统的射频信号获取、转换和快速处理能力。DARPA 开发的射频信号获取、转换、系统集成技术中部分项目如图 1 所示[5]。

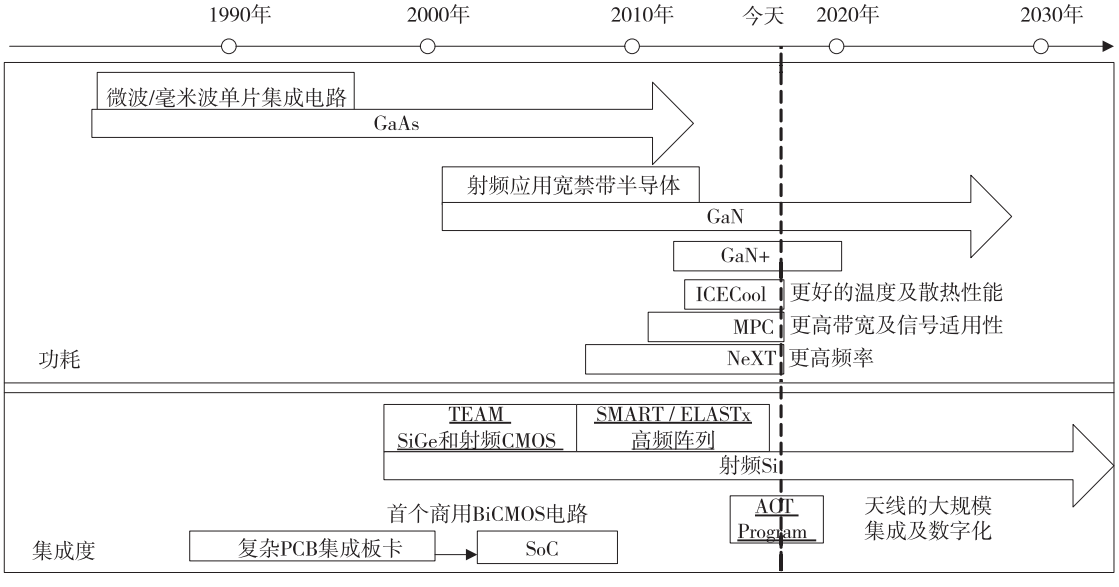

图 1　DARPA 开发的射频信号获取、转换、系统集成技术中部分项目

硅和硅基 RFIC 是 DARPA“集成和功率”计划中侧重于“集成”的关键技术，包括 TEAM/ELASTx、ACT 等项目。频谱和物理界面大框架之下的 ACT 项目的思路是发展标准、通用的构件，即可重构射频前端和通用数字处理模块。采用 14 nm 硅工艺实现 ka 波段直接采样 A/D 转换器是 ACT 项目的重要部分[6]。有效捷变混合信号微系统(TEAM)项目，即先进宽带高动态范围混合信号电路技术(SiGe SoC)，是多束、多功能、元件级数字波束形成阵列的关键技术，可使系统在多功能工作模式下达到最高的灵活性。

GaAs、GaN 等Ⅲ-Ⅴ化合物 RF 技术是 DARPA“集成和功率”计划中侧重“功率”的关键技术，包括 MMIC 系列的 WBGS-RF。WBGS-RF 项目研制应用于雷达的 GaN 基高功率、高效率 MMIC。GaN 基材料项目包括 MPC 项目(实现高频高效的 NeXT、高效高波形)和 ICECool 项目(实现更好冷却效果、更高功率)。通过材料和器件的技术创新，GaN 可能产生高级别、新的系统集成技术，包含电路形式的系统集成和阵列、模块形式的系统集成。

商用技术尺标(ACT)、M3IC、低能信号分析(CLASIC)等项目将进一步推动电子信息系统向智能化程度更高、分析推理更强、自主决策能力更高的认知无线电发展[7]。

1.1　可重构或数字控制的射频前端

具备可编程和适配性的数字射频集成前端具备类似数字 FPGA 的编程功能，会大幅提升射频系统灵活性和捷变能力，重点研究方向是 RF-FPGA 高灵活度收发机[8]。项目关键硬件技术包括 RF 前端(图 2 所示)、芯片级频谱分析仪(CSSA)和低能信号分析 IC。赛灵思公司近期推出了全新的全可编程 SoC，集成了高性能 A/D 转换器、D/A 转换器、无线电、无线回传单元，满足了高灵活性、低功耗和小封装尺寸等要求。

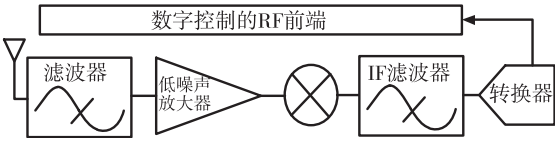

图 2　数字控制的 RF 前端

1.2　全频感知、转换与处理

军用频谱全频感知、转换、处理的数据转换器在 30 GHz 频段时能确保军用频谱在拥挤电磁环境中实现通信、雷达的不间断监视、分析并快速反应。ACT 项目芯片采用格罗方德公司(Global Foundries)32 nm 绝缘体上硅(SOI)制造工艺。ACT 设计将采用格罗方德公司的 14 nm 工艺。

1.3　模拟到信息的处理与转换

模拟到信息(Analog-to Informantion)，即模拟时间信号压缩采样的新数据转换技术和电路信息的处理、转换新技术将成为研究热点[9]。这些技术开辟了模拟 IC 信号处理技术的又一条途径，可满足如手持式装备等多样化软件无线电的要求。

1.4　硅光感知和数据转换处理

DARPA 直接数字采样接收机计划(DISARMER)的目标是研制能够对 X 波段(8～12 GHz)信号进行全波段直接采样的光-电混合型 A/D 转换器。该计划能够在硅平台上发展一种光子-电子混合型的具有跟踪保持功能和相干光学探测功能的新型光子处理器芯片。

2　主要发展路线技术

2.1　经典和非经典路线技术

未来信息获取、转换和处理技术的主流路径将沿着经典(冯·诺依曼体系)和非经典(非冯·诺依曼体系)两条路线发展。经典路线方面，RFIC 向着提升系统反应速度、带宽和智能化程度的方向发展。提升硅材料信息获取、转换和处理是 IC 智能化的重要推动手段。大力发展 A/D、D/A 转换器、RF SoC、可编程模拟前端、高端 RFIC、硅基异质集成射频集成电路，是频率提升和处理速度提高的实现途径。需要开拓多层、有线和无线互联异质结系统等创新技术，发展 GaN、InP 等新一代化合物毫米波功率器件、模块和阵列，以满足军用电子信息系统在功率、高频和动态范围方面的特殊要求。非经典路线方面，RFIC 着重于开发神经网络芯片、量子传感和计算等具有颠覆性的器件，探索以传统 RFIC 为基础且与不断发展的经典路线相结合的技术。

2.2　智能射频系统技术

通过 RF 信号链智能家的实现来推动频谱信息获取、转换、传输智能化，是认知电子战无线信息系统发展的新方向。以机器学习 RF 系统为例。机器学习元件代替人工操作过程，采用定制硅材料，开发全处理链适应性和联合学习能力。智能射频系统如图 3 所示。目前，正在开发的现场可编程门阵列射频(RF-FPGA)项目能实现动态可编程的模拟/射频模块和射频域编程收发器，它们均具有 RF 域灵活性。

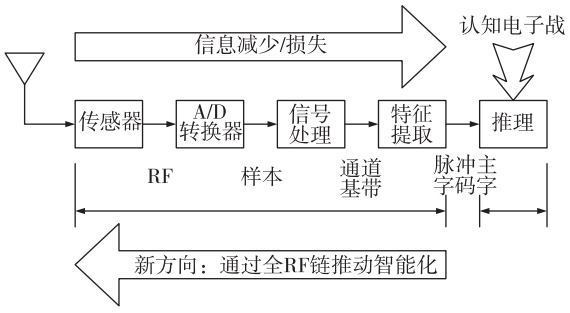

图 3 智能射频系统示意图

2.3 新型模拟域处理集成电路技术

为适应智能化战争要求，将发展下一代机器学习处理芯片，包括新型模拟域处理集成电路，即能直接在模拟域处理的域特定处理芯片和混合处理芯片。2004 年，斯坦福大学研制出了一种基于模拟电路的类脑芯片 Neurogrid。2013 年，欧盟启动了“人脑计划”芯片项目。目前，硬件实现方式有数字电路（IBM、Qualcom）、模拟电路、数模混合电路、各种非硅基神经元器件。卷积神经网络芯片（CNN）的功率效率可达 6.37 TFLOPS/W，有效数据吞吐可达 900 GFLOPS。未来将开发与新型处理芯片适配的 RFIC 技术。

2.4 颠覆性集成电路技术

DARPA 在最近提出的与多个大学联合的最大规模微电子项目“跳跃”（JUMP）议案中，明确指出了“智能、自治、安全、互联、高效和可负担”的微电子未来愿景，瞄准 2025 年后的电子产业需求，希望能开发超越传统微缩方式的新策略和新技术，以实现能随时随地获取信息和具备计算能力的互联世界。这个议案的四个重点主题是：1）射频到 THz 的传感器和通信系统；2）分布式计算和网络化；3）认知计算；4）智能存储器和存储。

未来将研究先进结构和算法，以解决全新计算、通信和存储应用所需的先进 IC 及结构的物理实现；研究先进器件、封装和材料，以解决先进有源和无源器件、互联和封装。这些研究将用于微缩和能效的计算（包括模拟）以及信息获取、转换、处理和存储的突破性范式。

3 结束语

本文通过研究 DARPA 的 RFIC 技术发展路线，得出军用 RFIC 的发展趋势和重点：在智能化技术方向，已实现可编程单芯片的前端集成；在高速、高频、宽带方向，正寻求 RFIC 和计算 IC 的系统集成（系统封装或系统芯片等）技术。在功率器件方面，正向更高频率、更高功率和更高保真度发展；在颠覆性技术方面，正寻求新的计算范式或结构，如模拟-信息新转换模式，或与传统 RFIC 技术结合的神经网络芯片，以实现 RFIC 技术的创新性突破。上述发展模式中，一些是“渐进”的发展模式，另一些是“跳跃”的发展模式。采用这些模式，均能有力推动军用 RFIC 技术向前发展。

参 考 文 献：

[1] CLARK B，GUNZINGER M. Winning the airwaves：regaining America's dominance in the electromagnetic spectrum [EB/OL]. https://csbaonline.org/uploads/documents/CSBA6292-EW-Reprint-WEB.pdf，2015.

[2] FARLEY B，ERDMANN C，VAZ B，et al. A programmable RFSoC in 16 nm FinFET technology for wideband communications [C] // IEEE Asian Sol Sta Circ Conf. Seoul，Korea. 2017：1-4.

[3] SOLTANI S，SAGDUYU Y E，SCANLON S，et al. Joint network coding and backpressure algorithm for cognitive radio networks [C] // MILCOM. Baltimore，MD，USA. 2017：858-863.

[4] YAZICIGIL T R，HAQUE T，KUMAR M，et al. How to make analog-to-information converters work in dynamic spectrum environments with changing sparsity conditions [J]. IEEE Trans Circ & Syst I：Regu Pap，2018，65(6)：1775-1784.

[5] CHZPPELL B，EISENBERG Y. Spectrum and physics interfaces expand our lead in the physical realm [EB/OL]. http://www.darpa.mil/attachments/MTO-Proposers-Day-slides.pdf，2016.

[6] CHAPPELL W. Arrays at commercial timescales (ACT) [EB/OL]. http://www.darpa.mil，2013.

[7] Microsystems Technology Office： DARPA-BAA-10-77，Cognitive radio low-energy signal analysis sensor ICs (CLASIC) [EB/OL]. https://www.fbo.gov/utils，2010.

[8] Microsystems Technology Office： DARPA-BAA-12-13，Radio frequency-field programmable gate arrays (RF-FPGA) [EB/OL]. http://www.darpa.mil，2011.

[9] KIROLOS S，LASKA J，WAKIN M，et al. Analog-to-information conversion via random demodulation [C]// IEEE Conf Design Applic Integr & Software. Richardson，TX，USA. 2006：71-74.