



评述

新一代无线电平台数字射频核心技术与工程实践

姚富强

总参第六十三研究所, 南京 210007

E-mail: yaofuqiang63@126.com

收稿日期: 2014-05-05; 接受日期: 2014-07-16

国防专项技术研究计划 (批准号: 31012000000001) 资助项目

摘要 无线电平台数字射频是提高现代无线电系统复杂电磁环境适应能力、机动能力、传输能力和综合集成能力等基础性能的关键. 本文分析了射频技术的发展需求和国内外数字射频领域的研究进展, 以及模拟射频核心单元——模拟射频功放主要指标相互矛盾的机理, 并将数字射频概念扩展到综合数字射频, 重点论述了数字射频核心技术——数字射频功放和全数字发信机的基本原理、优势和关键技术, 提出了基于系统与工艺相结合的数字射频设计方法、数字射频功放的物理模型和一种全数字发信机体系结构以及我国自主可控发展数字射频的技术路线建议. 本文认为在当今时代背景下, 数字射频对于新一代无线电平台具有革命性和可行性; 如果不能自主可控发展该项核心技术, 我国又将出现一个新的受制于人的脆弱点.

关键词 无线电平台 数字射频 综合数字射频 数字射频功放 全数字发信机 复杂电磁环境

1 引言

现代无线电系统一般由无线电平台、天线和应用软件等组成, 无线电平台主要包括发信机和收信机等, 直接关系到系统的信号处理能力、传输能力和体积重量等基础性能.

相比于模拟射频 (analog RF) 在模拟域处理和实现无线电平台的射频功能, 数字射频 (digital RF) 是在数字域处理和实现无线电平台所需的射频功能, 如数字射频功放、数字上下变频、数字射频信号处理、数字射频滤波、数字射频信号产生等, 主要目的是实现电磁环境适应能力强的全数字收发信机. 数字射频实现的过程称之为射频数字化.

相比于综合模拟射频在模拟域综合集成多个无线电平台的射频功能, 综合数字射频是在数字域同时实现和综合集成多个无线电平台的射频功能. 综合数字射频是数字射频的扩展, 数字射频是综合数字射频的前提和基础.

在过去几十年里, 无线电技术的进步已成为信息技术迅速发展的重要推动力. 然而, 自从 100 多年前无线电技术问世以来, 尽管器件经历了电子管、晶体管和集成电路等发展历程, 乃至上世纪后期出现软件无线电 (soft radio, SR) 概念^[1~3], 国内外至今也仅实现了中频以下数字化和接收机前端的部分数字化, 并似乎将较多精力集中于接收机数字化的研究, 逐步推出了一种可以实现的 SR 版本, 即

人们常说的软件定义无线电 (soft define radio, SDR), 但以模拟射频功放 (如: A 类、B 类及 AB 类功放等, 统称模拟射频功放 (analog radio frequency power amplifier, ARFPA)) 为核心的模拟体制发信机 (analog transmitter, ATx) 至今仍未有改变. 这种体制性的缺陷, 制约了无线电系统的信号处理能力、传输能力、机动能力、复杂电磁环境适应能力和系统集成能力等基础性能.

鉴于数字射频和综合数字射频的内涵、相互关系、需求的迫切性和已有研究进展^[4~7], 当前研究的重点主要是数字射频的核心技术——基于数字射频功放 (digital radio frequency power amplifier, DRFPA) 的全数字发信机 (all-digital transmitter, ADTx). 研究和实践表明, 数字射频功放具有高效率、高线性、宽频带等独特优势, 基于数字射频功放的全数字发信机便于重构, 有望解决模拟射频的体制性缺陷和满足新一代无线电平台发展的重大现实需求. 因此, 在新的时代背景下, 针对现有无线电技术体制存在的基础性不足, 借助数字技术和微电子工艺的快速发展, 突破在数字域实现射频信号高效功率放大的设计理论和关键技术, 研制全数字发信机, 实现该项核心技术的自主创新和自主可控, 对于军、民用无线电技术的发展和无线电系统基础性能的跃升都具有十分重要的战略意义.

2 射频技术的发展需求

基于模拟射频功放为核心的模拟发信机虽然在无线电历史进程中发挥了重要作用, 但在信息化时代又成为制约无线电系统发展的重要瓶颈, 难以满足当今军事和社会的发展需求.

需求 1 要求射频功放高效率、高线性和宽频带, 提高无线电系统的基础性能.

射频功放的发信机的核心^[8]. 理论和实践表明, 传统模拟射频功放的效率、线性、带宽等主要性能指标之间相互矛盾^[9,10], 工程中需要根据不同的要求予以折中, 难以同时实现主要性能指标的共同提高, 严重制约了无线电系统尤其是便携式无线电设备的持续工作时间、信号质量和体积重量等基础性能. 为提高无线通信系统频谱利用率和数据传输速率, 对射频功放的线性和带宽等性能又提出了更高要求, 这将进一步降低模拟射频功放的效率, 从而限制了发信机综合性能的提升. 在日益苛刻的线性和带宽指标条件下, 如果能实现数字域射频功率放大, 则可大幅度提高射频功放的效率、线性和频带性能, 减小系统的体积重量和延长工作时间, 对于军用可提高系统的机动性和战场生存能力, 对于民用还可增加电池工作时间, 为节能减排、降低运营成本做出贡献.

需求 2 要求发信机射频可重构, 以兼容不同传输波形, 提高复杂电磁环境适应能力^[11].

软件化的前提是数字化, 没有数字化就无法实现软件化. 虽然得益于数字信号处理 (DSP) 器件时钟频率的显著提升以及直接数字频率合成 (DDS) 等技术的出现, 从基带到射频可实现部分数字化^[12] (包括中频以下数字化), 但因位于发信机末端的射频功放仍为模拟体制, 其参数固定, 难以可重构和可编程, 成为发信机全数字化进程和实现软件无线电架构的最后障碍. 如果能实现通用性强的基于数字射频功放的全数字发信机, 对于军用无线电系统, 便于灵活使用多种通信模式 (如: 不同频段、多种复杂调制波形和可变频带等), 以提高系统的综合抗干扰能力和射频信号低截获性能; 对于民用无线电系统, 可以支持更多的体制, 满足多模多频的应用要求, 降低无线终端成本, 还便于增加传输带宽和支持更多的业务种类.

需求 3 要求在相同装备平台上实现多种射频功能的高效集成, 提高系统电磁兼容性.

随着国家和军队信息化建设的逐步深入, 需要使用越来越多的无线电系统, 如: 无线通信、导航和电子对抗等. 在很多情况下, 还需要将多种无线电系统装载于同一个平台 (如: 车载、舰 (船) 载、机载、星载、弹载等平台), 这就要求在相应平台上同时实现多种射频功能的系统集成, 如: 车载平台多种

无线通信系统的射频综合设计、机载平台的航电一体化等。然而,在模拟域进行射频综合集成时,各种无线电系统的射频单元异构,参数固定,只能对各自存在的射频单元进行射频信号合路的设计,通用性差,插损大,制约了装载平台体积、重量和功耗等性能,形成多种系统射频单元的堆砌。如果能在数字域对不同射频功能进行综合处理和一体化高效集成,则可减小装载平台的载荷,对于军用便于装备减型增效,提高机动性,对于民用可进一步可降低运营成本。

3 国内外研究进展

无线电平台的数字射频技术,尤其是基于数字射频功放的全数字发信机研究,大约已经历了十余年时间。早期是针对模拟射频功放主要指标之间相互矛盾,难以同时满足无线电系统高效率、高线性和宽频带等要求,业界提出了前馈^[13]、反馈^[14]和数字预失真^[15,16]等射频功放线性化技术,以及一些高效功放结构^[17~20],在一定程度上满足了一些使用场合的要求,但始终没有解决模拟射频功放体制存在的根本性矛盾。随着数字技术和微电子器件工艺的快速发展以及数字音频功放的成功应用^[21],为数字射频功放的提出奠定了基础,有望突破射频功放主要技术指标相互矛盾的制约。

采用数字射频功放,设计实现新一代军用通信装备和民用移动通信设备是当前国际上的一个研究热点^[22~30],尤其针对数字射频功放和全数字发信机的新体制、新技术和新工艺的研究十分活跃。美国陆军部较早资助“数字射频信号发信机技术体系结构”研究,其重点是以基带信号数字调制直接驱动高效脉冲功率放大器为核心的数字射频功率放大器^[22]。2011年11月和2012年3月,美国DARPA先后两次资助“新一代高效射频技术”,其核心是高效宽带射频功率放大技术¹⁾和基于高性能氮化镓(GaN)工艺的超高速开关功率器件²⁾。2004年起,美国联合微波公司(M/A-COM)以联合战术无线电系统(JTRS)新的解决方案为目标定位,开展了以数字射频功率放大为突破口的可编程数字发信机技术研究³⁾⁴⁾,提出了名为“DTx”的全数字宽带发信机结构,并称其为新一代军用无线电平台的革命性技术^[25]。2008年,美国Agilent公司和加拿大射频功放专家Stapleton教授联合撰写了一篇研究报告⁵⁾,认为基于带通增量求和调制(BPDSM)方案的S类数字射频功放具有高效率和高线性,输出信号质量完全能满足相关通信体制的要求,数字射频功放是日益增长的手持无线通信系统的必然选择。2009年韩国“半导体技术与科学杂志”的一篇文献^[23]提出了下一代移动手持无线通信设备功放和发信机的技术发展方向是单芯片集成工艺的数字射频功放。德国一研究机构采用GaN工艺,研制了基于带通增量求和调制的S类数字射频功放原理样片(UHF频段,20W),其开关放大单元工作效率可达80%以上^[26,27]。2007年至2012年,瑞典皇家技术学院Rong Liang和Chen Jian博士在Zheng Li-Rong教授的指导下,以SDR为目标,对全数字化发信机及其关键技术进行了深入研究^[28,29]。2012年,美国Balasubramanian等^[24]学者论述了全数字发信机是实现全软件无线电“终极传输”的必经之路。2014年,Francois等^[30]提出了一种基于射频脉宽调制(RFPWM)的用于全数字发信机的

1) Northrop Grumman Corporation. Northrop grumman awarded microscale power conversion contract. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.

2) TriQuint Semiconductor Inc. TriQuint wins new \$12.3 M GaN DARPA contract to develop ultra-fast power switch technology. <http://www.triquint.com/contacts/press/dspPressRelease>.

3) Hurwitz S. Digital polar design facilitates multimode transmitters. <http://powerelectronics.com/site-files/defense-electronicismag.com/files/archive/rfdesign.com/mag/digitalpolaridesign.pdf>.

4) Walid K M, Elias Kpodzo. Interface considerations for SDR using digital transmitters. <http://powerelectronics.com/site-files/defenseelectronismag.com/files/archive/rfdesign.com/mag/504rfdfls.pdf>.

5) Stapleton S P. High efficiency RF power amplifiers using bandpass delta-sigma modulators. <http://nashville.dyndns.org:800/WirelessDownloads/Digital%20Adaptive%20PreDistortion/5989-9347ENbandpassDeltaS-igmaMod.pdf>.

可重构数字功放架构, 相比于 B 类模拟射频功放, 在功率回退 (power back-off) 时, 其功放效率提高近 3.5 倍。但据现有公开的技术资料, 国外在数字射频研究方面, 目前主要是仿真和实验室测试结果, 还未见实用产品和应用的公开报道。

从上世纪 80 年代后期开始, 国内部分高校和工业部门对开关模式的射频功放电路和基于 CMOS 工艺的射频开关功放 IC 等开展了研究^[31~34], 取得了一些有益的学术和实验室成果。近些年来, 作者所在团队结合军事通信的直接需求和其他无线电系统的潜在应用, 得益于国内器件水平的提高, 对数字射频功放和全数字发信机等开展了较为系统的研究与工程实践^[35~41], 形成了初步的设计理论和方法, 针对不同的应用需求, 提出了多种数字射频功放和全数字发信机实现方案, 并与国内具有器件工艺优势的部门进行协同创新, 突破了主要核心关键技术, 研制成功相应频段数字射频功放和全数字发信机原理样机及其所需的多种专用芯片, 验证了数字射频功放和全数字发信机高效率、高线性、宽频带和可重构等综合优势, 实现了该项核心技术的自主可控, 为实现全数字化无线电平台奠定了技术基础。

4 模拟射频功放与数字射频功放对无线电系统性能的影响

模拟射频功放与数字射频功放在工作机理上有重大区别, 导致了其对无线电系统的作用效果差别明显。

4.1 模拟射频功放主要指标相互矛盾的机理

射频功放的主要指标有: 效率、线性和带宽等, 其性能主要取决于实现功率放大的功率晶体管、直流偏置电路、输入输出匹配网络以及输出滤波器。其中功率晶体管的工作状态由直流偏置电路设定的静态工作点决定。

4.1.1 模拟射频功放效率与线性相互矛盾的机理

假设模拟射频功放的输入、输出匹配网络和输出滤波器是理想无损的, 此时模拟射频功放的性能主要取决于功率晶体管, 传递到负载 R_L 的输出功率 P_{out} 是从直流电源输出功率 P_{dc} 中获得的, 而且受输入信号功率 P_{in} 的控制。但从 P_{dc} 到 P_{out} 的功率转换效率不是 100%, 即功放输入总功率 $P_{\text{dc}}+P_{\text{in}}$ 中的一部分转换为包括热耗散和谐波、互调等输出失真在内的耗散功率 P_{dis} 。

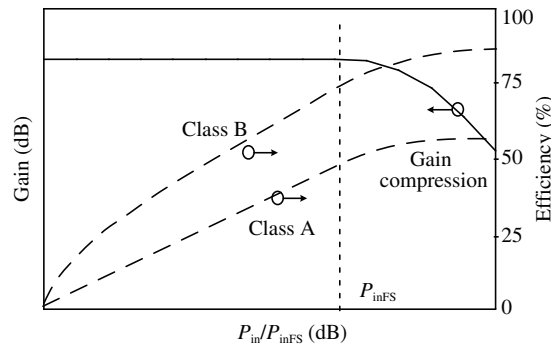
根据能量守恒定律, 功放输入总功率 $P_{\text{dc}}+P_{\text{in}}$ 必须与 P_{out} 和 P_{dis} 的总和相等。要实现功率放大, 功率晶体管必须要能提供一个信号增益 G ^[10]:

$$G \equiv \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = 1 + \frac{P_{\text{dc}} - P_{\text{dis}}}{P_{\text{in}}}.$$

这个关系式表明, 要保证功放输入输出信号之间的线性关系, 就要求 G 为一个恒定值。而模拟射频功放的功率晶体管工作在线性区, 在一定的有源区域内, 功率晶体管输出电流与输入信号的电压线性相关。但由于晶体管的饱和特性, 当输入信号的电压幅值超过某个门限时, 功率晶体管输出电流不再随之增大, 同时也限制了直流电源向功放输出电流的能力, 使得 P_{out} 和 P_{dc} 均不再随 P_{in} 的增大而同步增大, 而且 P_{dis} 永远不会是负数, 因此 G 不再保持恒定 (增益压缩), 必定要显示出非线性特征。

功放的功率附加效率 PAE^[10] 表明了功放效率与信号增益 G 的关系, 即

$$\text{PAE} \equiv \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{dc}}} = (G - 1) \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{dc}}} = \frac{G - 1}{G} \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{dc}}}.$$

图 1 模拟射频功放增益、效率与 P_{in} 的关系Figure 1 Plots of gain and efficiency with P_{in} for analog RF power amplifier

上式表明, 如果要保证线性度 (G 恒定), PAE 将正比于 P_{in} 或 P_{out} 与 P_{dc} 之比. 当 P_{in} 一定时, 要提高 PAE 就要减小 P_{dc} . 由前面分析可知, 要减小 P_{dc} 功放需要进入饱和状态, 而这将带来非线性失真 (增益压缩), 因而效率与线性出现了矛盾. 为了便于理解, 图 1 给出 A 类、B 类模拟功放效率与线性 (增益) 定性的关系曲线, 其中 P_{inFS} 为保证 G 恒定的额定输入功率. 当 $P_{in} \leq P_{inFS}$ 时, G 保持恒定, 对于全周期工作的 A 类功放, 其 P_{dc} 为常量, 而仅正半周期工作的 B 类功放, 其 P_{dc} 与输入信号电压幅值成正比, 且 A 类、B 类功放的效率理论上分别与 P_{in} 成正比例和开平方关系^[8], 均随 P_{in} 的减小而降低. 但实际中, 由于功率晶体管并非理想的线性化器件, 即使在其线性区, 还是会表现出一定的非线性特性, 且越靠近线性区的两端非线性越严重. 因此, 随着 P_{in} 的增大, 虽然功放效率随之增大, 但非线性失真也相应增加. 特别当 $P_{in} > P_{inFS}$ 时, 功放逐渐进入饱和状态, 开始出现由增益压缩引起的非线性失真, 功放效率仍随 P_{in} 的进一步增大而增大, 但增加的趋势变缓. 为获得更优的效率和线性折中, 适当提高 B 类功放的静态偏置电流, 即 AB 类功放设计, 成为采用最多的模拟射频功放形式. 无论何种模拟射频功放形式, 要改善线性均需减小输入功率 (功率回退), 而这将显著降低功放效率, 因此以 A 类、B 类和 AB 类为代表的模拟射频功放设计都要受到严格的线性度—效率之间矛盾关系的影响.

4.1.2 模拟射频功放工作带宽与效率、线性相互矛盾的机理

由于射频功放的工作频率很高, 为实现功放可用功率从源到负载的最大传输, 就必须进行阻抗匹配, 将功率晶体管的输入、输出阻抗匹配到所用传输线的特征阻抗 (一般为 50Ω), 以减小由信号反射引起的回波损耗和非线性失真. 因此即使功率晶体管工作在理想状态, 功放输入、输出匹配网络的性能仍将在很大程度上影响功放的效率和线性. 而模拟射频功放的功率晶体管的输入、输出阻抗随输入、输出电压和电流的变化而变化, 增加了输入、输出匹配网络的实现难度, 甚至只能针对特定工作频段和工作方式进行专门设计, 降低了模拟射频功放的通用性. 特别是当功放工作带宽增加时, 需要在更宽的频带内进行阻抗匹配, 受阻抗匹配原理的限制, 带宽越宽则回波损耗越大, 要实现理想的宽带阻抗匹配十分困难, 其回波损耗与工作带宽的关系示意图如图 2 所示, 在工程实践中, 为了实现模拟射频功放的宽带工作, 只能牺牲匹配网络在工作频带内的性能, 从而降低功放的效率和线性.

4.2 模拟射频功放对无线电系统性能的制约

由于模拟射频功放主要性能指标之间相互矛盾的理论限制, 以及实际工程设计中的折中与妥协,

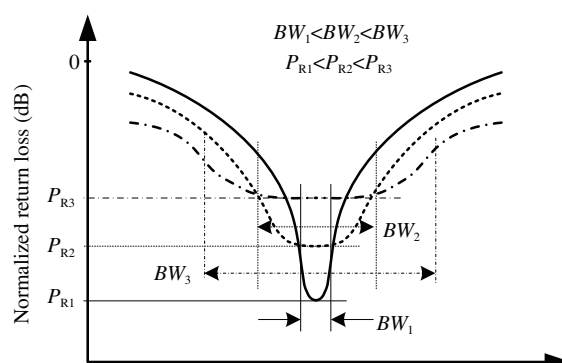


图 2 阻抗匹配网络回波损耗与功放带宽的关系

Figure 2 Plots of return loss with bandwidth for impedance matching net

严重制约了现有无线电系统的基础性能。

4.2.1 模拟射频功放的低效率制约了无线电系统的工作效率

如前所述, 模拟射频功放利用功率晶体管的线性区进行功率放大, 使得模拟功放既放大功率又存在大量静态功耗。实践表明, 在达到一定线性指标条件下, 其效率一般只能做到 30% 左右, 有时甚至不到 10%, 其功耗约占发信机功耗的 60%~70%, 亦即发信机一半以上的功率转换为无益的损耗发热, 制约了系统工作效率的提高和体积重量的减小, 直接影响系统的机动性能和便携式无线电系统的有效工作时间, 还带来散热问题, 甚至由于温升保护频繁, 影响系统的正常工作。

4.2.2 模拟射频功放的非线性制约了无线电系统的信号质量和电磁兼容性

模拟射频功放的非线性主要来源于输出功率增大时的过载失真、小信号时的过零失真和推挽功率器件特性不一致时的失配失真等, 这些非线性降低了输出信噪比, 增加了带外杂散, 不仅制约了无线电系统的传输速率、射频信道线性范围, 而且成为无线电系统间互扰的主要来源, 影响了系统的组网效率、频谱利用率和网系运用能力。业界近年提出的功放线性化等技术, 虽然使模拟功放的线性得到改善, 但带来了系统复杂度的增加。

4.2.3 模拟射频功放的频带特性制约了无线电系统工作带宽的拓展

由于模拟射频功放中放大器件的阻抗特点和宽带阻抗匹配机理的限制, 展宽模拟射频功放的工作带宽将影响功放的输出功率、工作效率、稳定性和输出负载适应性等性能。现代无线电系统既希望在一定频段内能带宽工作, 以提高数据速率, 又希望工作频段可以灵活设置, 但模拟射频功放的频带特性不仅难以适应宽带工作的需要, 而且只能针对特定工作频段和工作方式进行定制设计, 使得模拟射频功放的通用性和应用范围受到很大的限制。

4.2.4 模拟射频功放技术体制制约了无线电系统的射频数字化进程

由于模拟射频功放在模拟域实现射频信号功率放大, 难以满足软件无线电架构对射频数字化的要求。按照常规的通信原理与技术, 射频功放的数字化是难以实现的。在中频以下数字化的发信机中, 已调数字中频信号必须经过数模转换和模拟混频后才能经模拟射频功放进行功率放大, 增加了系统复杂

度. 近些年来, 射频信号的直接数字调制技术发展迅速^[42~44], 但仍然需要采用高速数模转换和模拟射频功率放大, 阻碍了无线电系统发信机的全数字化.

4.3 数字射频功放提高无线电系统性能的机理

得益于先进 DSP 技术和高效开关功放技术, 数字射频功放的主要性能指标之间在理论上不存在制约关系, 可明显提高无线电系统的基础性能.

4.3.1 数字射频功放的工作效率高

与模拟射频功放不同, 数字射频功放的功率晶体管在饱和区和截止区之间进行开关切换, 不需要直流偏置电路提供静态偏置电流, 因此几乎没有静态电流消耗, 电源功率直接转换成输出功率, 理论效率可达 100%. 同时, 当功率晶体管导通时, 有输出电流而几乎没有输出电压, 当晶体管截止时, 有输出电压而几乎没有输出电流, 因此数字射频功放由输出电压、电流交叠而带来的器件损耗远小于模拟射频功放. 由于损耗的减小, 数字射频功放功率晶体管的发热大幅减小, 降低了对散热的要求. 实际效率与数字射频调制的编码效率、驱动和功率晶体管性能以及开关功放电路的拓扑结构等因素有关. 数字射频功放工作效率的提高, 可延长由电池供电的无线电系统的持续工作时间, 减小系统的体积、重量, 提高系统的机动性.

4.3.2 数字射频功放的线性性能好

数字射频功放的功率晶体管虽然工作在饱和区和截止区, 理论上存在比模拟射频功放更严重的非线性, 但由于数字射频功放的工作状态固定且已知, 其功率晶体管要么导通, 要么截止, 其工作状态不随输入功率的变化而变化, 因此经数字射频调制处理后可抵消其非线性, 达到远优于模拟射频功放的线性性能. 理论上输出信号线性范围主要取决于数字处理器的位数和工作频率, 只要其位数和工作频率合适, 就能保证功放所需的线性性能. 实际线性性能与数字射频调制算法、实现工艺和输出滤波电路性能等因素有关. 数字射频功放线性性能的提高, 可改善信号质量, 减小带外杂散, 提高无线电系统的组网效率和频谱利用率等系统级电磁兼容性能.

4.3.3 数字射频功放的工作频带宽

数字射频功放的功率晶体管本质上为一个开关, 可以不需要进行输入、输出阻抗匹配, 从而避免了阻抗匹配网络对工作带宽的制约, 其工作带宽理论上仅取决于数字处理器件的处理速率和功率晶体管所能达到的最高开关频率. 在功率晶体管的最高开关频率满足要求的情况下, 只要选择合适数字处理速率的器件, 或数字处理速率足够高, 就能保证射频功率放大所需的工作带宽. 实际工作带宽与处理器最高频率、驱动速度和功率器件寄生参数等因素有关. 数字射频功放带宽性能的提高, 便于无线电系统宽带工作, 提高系统的数据速率和抗干扰性能以及功放的通用性和灵活性等.

4.3.4 数字射频功放便于射频可重构

数字射频功放是在数字域实现射频信号的功率放大, 增加数字上变频等处理后, 可实现基带数字信号输入、大功率模拟信号输出的全数字发信机, 简化信道机设计, 通过设置功放、滤波等参数, 便于射频可重构. 实际可重构性能主要与数字射频调制和成形滤波等因素有关. 实现全数字发信机和射频可重构, 可更好地满足软件无线电架构、多模式、射频信号低截获和射频信号识别等电磁环境适应能力需求.

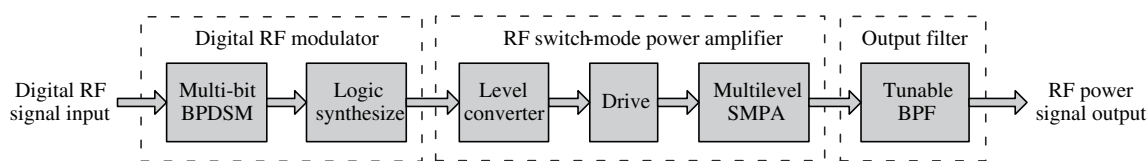


图 3 一种数字射频功放的原理框图

Figure 3 Block diagram of a digital RF power amplifier

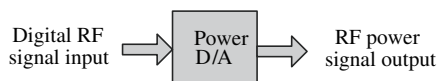


图 4 数字射频功放物理模型

Figure 4 Physical model of the digital RF power amplifier

5 数字射频功放及全数字发信机基本原理

数字射频功放是全数字发信机的核心和基础, 没有射频功放的数字化, 发信机的全数字化就不可能实现。

5.1 数字射频功放基本原理

相对于数字音频功放和模拟射频功放, 数字射频功放是指在数字域实现对射频信号的功率放大, 从而得到预期射频功率的放大器。我们提出的一种数字射频功放方案主要由数字射频调制、射频开关功放和射频成形滤波等单元组成^[36~38], 原理框图如图 3 所示。其工作流程为: 将输入的数字射频信号通过数字射频调制转换成脉冲信号, 控制有源开关器件进行功率放大, 经成形滤波输出得到所需功率的模拟射频信号。

数字射频调制单元的主要原理是: 对输入数字射频信号进行脉冲密度和幅度调制, 输出多电平非周期脉冲调制信号。其中, 通过多电平幅度量化和噪声整形, 将调制信号带内均匀分布的量化噪声转移到工作频带以外, 再经逻辑综合输出适合驱动功率晶体管高速开关工作的脉冲信号。目的是降低射频量化噪声和保证在开关功率放大条件下应有的线性性能。

射频开关功放单元的主要原理是: 对多路多电平非周期脉冲信号进行电平转换和高速驱动, 控制有源高速开关功放进行高效开关功率放大。其中, 有源高速开关功放可设计成阵列, 以满足多电平脉冲信号开关功率放大的要求。目的是大幅提高功放效率。

射频成形滤波单元的主要原理是: 将开关功率放大后的脉冲信号经带通滤波器还原成适合天线发送的大功率模拟射频信号, 实现数字到模拟的转换。其中, 可调带通滤波器中心频率根据频率控制信息可调整, 以满足工作频带内任意频率信号的成形滤波要求。目的是减少带外频谱污染。

可借鉴数字音频功放的原理, 进一步理解数字射频功放的基本原理。首先, 数字射频功放相当于一个射频调制解调器, 即: 先对数字射频信号进行脉冲密度和幅度调制, 经多电平开关功率放大后, 再由成形滤波解调成模拟射频信号, 从而在保证高效率的同时, 弥补开关功放工作在饱和、截止区带来的非线性失真。其次, 数字射频功放又可以理解为一个射频功率 D/A 转换器, 即: 输入为数字射频信号, 输出为大功率模拟射频信号, 其物理模型如图 4 所示。相比于该物理模型, 模拟射频功放是一个输

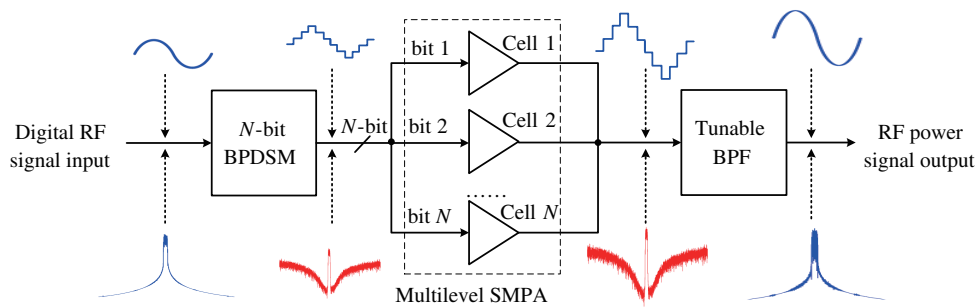


图 5 一种数字射频功放及各单元的输出时域、频域波形示意图

Figure 5 Time and frequency domain waveforms of a digital RF power amplifier

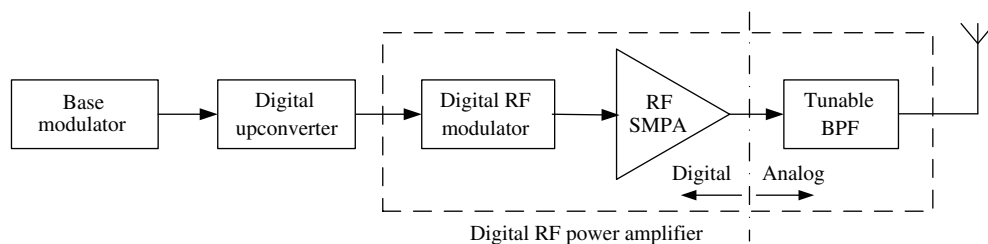


图 6 一种全数字发信机体系结构

Figure 6 A architecture of all-digital transmitter

入、输出均为模拟射频信号的功率放大器. 射频功放物理模型的这种变化直接关系到全数字发信机与模拟发信机体系结构的重大差别, 也是数字射频功放不宜在模拟发信机中直接替换应用的重要原因.

根据以上基本原理, 一种基于 4 电平开关功率放大的数字射频功放各单元时域、频域波形示意图如图 5 所示.

5.2 全数字发信机基本原理

一种适应于较低通信频段的基于数字射频功放的全数字发信机体系结构如图 6 所示. 对于较高工作频段, 其具体方案尤其是数字射频功放技术方案应作相应变化^[45~47].

根据图 6 的体系结构, 数字基带调制信号直接上射频, 不仅可省略传统模拟发信机的中频调制以及射频调制 (模拟混频) 等单元, 大幅简化发信机系统构成, 还便于实现高速跳频控制, 从而简化输出滤波器设计. 数字基带调制信号经数字射频处理和功率 D/A 放大后直接输出到天线口, 从而更好地满足软件无线电架构的要求. 可见, 全数字发信机颠覆了传统模拟发信机的结构.

根据公开资料报道和工程实践体会, 全数字发信机与模拟发信机主要功能与性能对比如表 1 所示. 由此表可见, 与传统模拟发信机相比, 全数字发信机在保证更优的线性和效率等性能条件下, 传输带宽更宽, 且可在最高工作频率 (f_{MAX}) 以内重构工作频段和实现综合射频集成, 但目前的全数字发信机技术还有待成熟, 尤其是工作频段、输出功率和杂散抑制等性能与器件水平和功率合成电路等有关, 还需经历一个逐步发展的过程.

综上所述, 基于数字射频功放的全数字发信机不仅有利于系统基础性能的跃升, 更是无线电通信技术体制的突破.

表 1 全数字发信机与模拟发信机主要功能、性能对比

Table 1 The function and feature comparison between all-digital transmitter and analog transmitter

Function and feature	All-digital transmitter	Analog transmitter
f_{MAX}	More than 1 GHz ^[48]	Higher
P_{out}	mW ~ 100 W ^[49]	W ~ kW/HF, mW ~ 100 W/VHF and above
Efficiency	High ^[30]	Low
Complexity	Simple	Complex
Bandwidth	Broad	Narrow
Reconfiguration	Easy ^[50]	Hard
Linearity	High	Low
Comprehensive integrated	Easy ^[51]	Hard
Maturity	Developing	Mature

6 数字射频功放主要关键技术

尽管数字音频功放已经实用, 但是数字音频功放的技术和工艺远不能支撑数字射频功放的研制需求. 基于国内现有器件工艺条件, 需要运用系统设计与工艺相互弥补的科学方法, 以突破数字射频调制、射频高速驱动、射频开关功率放大和射频成形滤波等关键技术.

6.1 低工作频率的数字射频调制技术

数字射频调制是数字射频功放实现高效、线性放大的前提, 它既要通过一定算法对输入的数字射频源信号进行脉冲编码, 形成适合开关功率放大的脉冲信号, 又要便于功率放大后的脉冲信号能通过成形滤波器恢复线性性能好的大功率模拟信号, 其调制性能主要由调制器的工作频率决定. 为保证所需的线性性能, 通常要求其工作频率远高于源信号载波频率, 这对数字处理器的处理性能提出了很高要求, 现有数字处理器和工艺水平难以实现. 主要难点是在降低工作频率的同时, 还要提高数字射频调制信号编码效率和改善量化噪声抑制能力.

6.2 射频开关功率放大技术

为了降低调制器的射频采样频率, 提高编码效率, 数字射频调制算法往往需要采用多比特调制, 以增加量化电平数量, 减少量化误差, 这就要求开关功放电路具有多电平输出能力, 而不仅仅是 2 电平输出, 但现有开关功放电路结构一般都不具备这种能力. 同时, 还要考虑在射频条件下功放电路和功率晶体管寄生参数的影响. 因此, 必须研究射频应用的高速驱动、多电平开关功放电路、控制策略、功率分配与合成等问题. 主要难点是设计适合于高速开关应用的射频功率器件及其实现工艺, 进一步降低功率器件的静态和瞬态功率消耗, 以实现多比特数字射频调制信号的高效放大.

6.3 射频成形滤波技术

射频成形滤波的性能直接影响数字射频功放输出信号质量和工作效率, 其作用内涵主要有三个方面: 一是滤除开关功放输出功率信号中的带外噪声和杂散分量, 二是实现开关功率放大电路与输出负

载间的宽带匹配, 三是提供中心频率可变的带通滤波, 实现 D/A 转换. 主要难点是突破单一固定频率滤波器设计思路, 在中心频率切换时滤波的主要性能基本保持不变, 且滤波器阻抗特性满足开关功放输出所要求的阻抗特性, 以实现开关模式下低功耗、中心频率可调的宽带阻抗匹配和噪声及谐波抑制.

7 我国自主可控发展数字射频的技术路线建议

基于无线电平台射频数字化的战略意义和技术难度, 需要结合我国的国情和基础, 制定科学的技术路线, 明确发展思路、方向、途径和重点.

7.1 制定数字射频技术发展路线图

数字射频的技术递进路线建议为: 数字射频功放、全数字发信机、全数字收发信机、综合数字射频等, 由模拟射频功放到数字射频功放, 由较低频段到较高频段, 由较小功率到较大功率, 由模拟发信机到全数字发信机, 再到全数字收发信机以及多种功能和多种系统数字射频的综合等. 目前, 已突破了最核心的瓶颈关键技术, 具备了后续发展的技术基础.

7.2 坚持系统设计与工艺相互弥补

该项核心技术的攻关, 涉及到诸多电路、算法、指标分配等系统设计和集成芯片、微系统封装等工艺, 单靠一个部门是很难完成的. 基于我国现有集成电路设计和制造条件, 需要系统设计与工艺相结合并相互弥补, 当工艺难以解决或成本较高时, 即在电路、算法设计上提高要求, 不追求全部指标的先进性, 分析、研究和验证多种可能的工艺, 最终得出优化设计方案.

7.3 立足国内主渠道实现自主可控

目前, 我国虽然在该领域的系统级设计方面, 与发达国家几乎处于相同起跑线上, 但发达国家的基础和工艺具有明显优势, 并对我国进行技术封锁. 基于此, 如果不能抓住数字射频技术自主可控的发展机遇, 我们又将出现一个受制于人的重大脆弱点. 实践表明, 基于国内器件和工艺发展水平, 只要需求明确, 指标合理, 方法得当, 是可以实现一定频段内该项核心技术自主可控的.

7.4 大力推进已有成果实用化进程

我们虽然突破了主要核心关键技术, 取得了一些可喜的进步, 标志着我国在该前沿领域占了一席之地, 但离实用化要求还有不少工程问题需要解决和完善, 如: 技术和工艺最高性价比的匹配、环境适应性、与系统的联合设计等. 需要通过有效途径进行推广应用, 进一步暴露问题, 积累经验, 大力推进其实用化进程, 尤其要关注系统内部的电磁兼容问题.

7.5 以全数字发信机形式推广应用

根据图 4 所示的数字射频功放物理模型, 由于输入为数字信号, 输出为模拟信号, 如果仅在模拟发信机的基础上更换功放单元, 不仅要增加多余的模数转换, 而且还要保留原模拟发信机的其他单元, 难以做到系统的优化设计, 多余的单元仍然占据体积和功耗, 使得其系统性效益不高. 为使其应用效益最大化, 必须要以全数字发信机形式应用, 乃至全数字收发信机联合应用.

7.6 加强核心技术知识产权的保护

数字射频是一项涉及到战略前沿的核心技术, 成为不同国家在无线电领域的一个新的竞赛点. 在我国器件制造水平尚有差距条件下, 实现该项核心技术自主管控是需要付出极大代价的, 因此需要严格保护其知识产权, 以鼓励科研单位进行技术攻关及其投入的积极性. 同时, 为使该项核心技术有序推广应用, 要加强标准体系建设, 以扩大其应用范围和受益面.

8 结束语

经过几年的攻关, 我们在相应频段实现了从模拟射频功放到数字射频功放、从模拟发信机到全数字发信机的两项核心技术的转变, 为实现和推进无线电平台的射频全数字化奠定了基础. 工程实践表明, 只有理论进步与实际需求相结合, 才能推动技术创新; 只有原始创新与国内主渠道相结合, 才能实现自主可控. 数字射频将给军、民用无线电平台带来高效率、高线性、宽频带、可重构和综合数字射频集成等革命性进步. 然而, 这还是一个处于发展中的新技术, 不少理论问题、工艺问题和实用化问题还需进一步深入研究, 文中所述仅是初步的实践体会和建议, 错误之处在所难免, 欢迎各位同仁批评指正和共同研究.

致谢 课题组成员陈江、谭笑、周强、朱蕾、陈剑斌等专家在项目研究中做了大量工作, 为本文撰写奠定了基础, 陈江、周强还对本文提出了很好的修改意见, 没有他们的努力工作, 完成本文是不可能的, 在此一并表示衷心感谢!

参考文献

- 1 Mitola J. Software radio: survey, critical evaluation and future directions. *IEEE Aero El Sys Mag*, 1993, 8: 25–36
- 2 Lacky R J, Upmal D W. Speakeasy: the military software radio. *IEEE Commun Mag*, 1995, 3: 56–61
- 3 Yang X N, Lou C Y, Xu J L. Principle and Application of Software Radio. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001 [杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001]
- 4 Grebennikov A, Sokal N O, Franco M. Switchmode RF Power Amplifiers. Burlington: Elsevier, 2007
- 5 Larson L, Asbeck P, Kimball D. Digital control of RF power amplifiers for next-generation wireless communications. In: Proceedings of 35th European Solid-State Device Research Conference, Grenoble, 2005. 39–44
- 6 Nielsen M, Larsen T. A transmitter architecture based on delta-sigma modulation and switch-mode power amplification. *IEEE Trans Circuits-II*, 2007, 54: 735–739
- 7 Bumman K, Daehyun K, Junghwan M, et al. Digitally enhanced linear power amplifiers. In: Proceedings of 2010 Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, 2010. 948–953
- 8 Cripps S C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications. Norwood: Artech House, 2006
- 9 Pedro J C, Carvalho N B. Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits. Norwood: Artech House, 2003
- 10 Lavrador P, Cunha T R, Cabral P, et al. The linearity-efficiency compromise. *IEEE Microw Mag*, 2010, 11: 44–58
- 11 Yao F Q, Zhao H S, Lu R M. Analysis of complex EME adaptive needs for the new-generation military command information system. *Eng Sci*, 2012, 2: 25–29 [姚富强, 赵杭生, 陆锐敏. 新一代军用指挥信息系统的复杂电磁环境适应性需求分析. 中国工程科学, 2012, 2: 25–29]
- 12 Choi J, Yim J, Yang J, et al. A delta-sigma-digitized polar RF transmitter. *IEEE Trans Microw Theory Technol*, 2007, 55: 2679–2690

- 13 Garcia-Dúcar P, de Mingo J, Valdovinos A. Misalignments feedforward transmitter correction design for nonlinear distortion cancellation in OFDM systems. In: Proceedings of Vehicular Technology Conference, Moutreal, 2006. 1–5
- 14 Gimeno-Martin A, Pardo-Martin J, Ortega-González F J. An adaptive phase alignment algorithm for cartesian feedback loops. *IEEE Signal Proc Mag*, 2010, 27: 116–119
- 15 Kim J, Konstantinou K. Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory. *IEE Electron Lett*, 2001, 37: 1417–1418
- 16 Morgan D R, Ma Z, Kim J, et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans Digit Signal Process*, 2006, 54: 3852–3860
- 17 Garcia P, Ortega A, de Mingo J, et al. Nonlinear distortion cancellation using LINC transmitters in OFDM systems. *IEEE Trans Broadcast*, 2005, 51: 84–93
- 18 Kim B, Kim J, Kim I, et al. The Doherty power amplifier. *IEEE Microw Mag*, 2006, 7: 42–50
- 19 Pedro J C, Garcia J A, Cabral P M. Nonlinear distortion analysis of polar transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Technol*, 2007, 55: 2757–2765
- 20 Wang F P, Ojo A, Kimball D, et al. Envelope tracking power amplifier with pre-distortion linearization for WLAN 802.11g. In: Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium, New York, 2004. 1543–1546
- 21 Andersen M A E. New principle for digital audio power amplifiers. In: Proceedings of 92nd AES Convention, Vienna, 1992
- 22 Asbeck M, Larson E, Galton G. Synergistic design of DSP and power amplifiers for wireless communications. *IEEE Trans Microw Theory*, 2001, 49: 2163–2169
- 23 Choi J, Kang D, Kim D, et al. Power amplifiers and transmitters for next generation mobile handsets. *J Semicond Tech Sci*, 2009, 9: 249–256
- 24 Balasubramanian S, Boumaiza S, Sarbishaei H, et al. Ultimate transmission. *IEEE Microw Mag*, 2012, 13: 64–81
- 25 Ahmed W K M, Bengtson D, O'Horo P. DTX: a revolutionary digital transmitter technology to provide multi-mode/multi-band capability. In: Proceedings of the SDR 04 Technical Conferences and Product Exposition, Phenix, 2004. 1–5
- 26 Meliani C, Wentzel A, Flucke J, et al. Class-S amplifier at 450 MHz using GaN-HEMT power switch MMICs. *Frequenz*, 2009, 63: 55–59
- 27 Maroldt S, Quay R, Haupt C, et al. Broadband GaN-based switch-mode core MMICs with 20w output power operating at UHF. In: Proceedings of IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), Waikoloa, 2011. 1–4
- 28 Rong L. All digital polar transmitter design for software defined radio architecture and low power circuit implementations. Dissertation for Ph.D. Degree. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012
- 29 Chen J. Low noise oscillator in ADPLL toward direct-to-RF all-digital polar transmitter. Dissertation for Ph.D. Degree. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012
- 30 Francois B, Reynaert P. Reconfigurable RF PWM PA architecture for efficiency enhancement at power back-off. In: Proceedings of 2014 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMiC), Leuven, 2014. 1–3
- 31 Gao B X, Liang C G. High efficiency class E amplifier. *Semicond Tech*, 2001, 26: 44–48 [高葆新, 梁春广. 高效率 E 类放大器. *半导体技术*, 2001, 26: 44–48]
- 32 Sun W B, Huang Y X, Liu P. A method to design broadband high efficiency class E amplifier parameter compensation and compress. *Acta Electron Sin*, 2001, 29: 1536–1539 [孙文宾, 黄云新, 刘鹏. 一种设计宽带高效 E 类功率放大器的方法——“参数补偿压缩法”. *电子学报*, 2001, 29: 1536–1539]
- 33 Zhang Y. The design of the integration of digital power amplifier module. *China Sci Technol Inform*, 2009, 15: 170–171 [张杨. 一体化数字功放模块的设计. *中国科技信息*, 2009, 15: 170–171]
- 34 Xu G D, Zhu L J, Lan S C. Design of 2.45 GHz fully integration CMOS power amplifier. *Semicond Tech*, 2007, 32: 62–64 [徐国栋, 朱丽军, 兰盛昌. 2.45 GHz 全集成 CMOS 功率放大器设计. *半导体技术*, 2007, 32: 62–64]
- 35 Yao F Q, Chen J, Zhou Q. Military and civil wireless communication systems important bottleneck RF digital power amplifier engineering practice. In: Proceedings of 9th Chinese Institute of Communications Defense Communications Technology Committee Academic Annual Conference, Beijing: Weapon Industry Press, 2014. 120–123 [姚富强, 陈江,

- 周强. 军民无线通信重要瓶颈射频数字功放的工程实践. 中国通信学会国防通信技术委员会第九届学术年会论文集, 北京: 兵器工业出版社, 2014. 120–123]
- 36 Zhou Q, Tan X, Zhu L, et al. A multilevel Class-S power amplifier for digital transmitters. In: Proceedings of 2nd International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC 2012), Danvers, 2012. 73–76
- 37 Zhou Q, Zhu L, Chen J. Research and implementation of tunable band-pass delta-sigma modulator for class-S RF power amplifier. Appl Electron Tech, 2014, 40: 103–105 [周强, 朱蕾, 陈江. S 类功放的频率可调带通 $\Delta\Sigma$ 调制器研究与实现. 电子技术应用, 2014, 40: 103–105]
- 38 Yao F Q, Zhou Q, Chen J, et al. China Patent, ZL201219802866.8, 2013-7-24 [姚富强, 周强, 陈江, 等. 中国发明专利, ZL201219802866.8, 2013-7-24]
- 39 Yao F Q, Tan X, Zhou Q, et al. China Patent, ZL201218002868.7, 2013-12-18 [姚富强, 谭笑, 周强, 等. 中国发明专利, ZL201218002868.7, 2013-12-18]
- 40 Chen J, Zhu L, Zhou Q, et al. China Patent, ZL201219802867.2, 2013-6-12 [陈江, 朱蕾, 周强, 等. 中国发明专利, ZL201219802867.2, 2013-6-12]
- 41 Zhou Q, Chen J, Tan X, et al. China Patent, ZL201218004139.5, 2014-6-16 [周强, 陈江, 谭笑, 等. 中国发明专利, ZL201218004139.5, 2014-6-16]
- 42 Ye Z, Grosspietsch J, Memik G. An FPGA based all-digital transmitter with radio frequency output for software defined radio. In: Proceedings of 2007 Design Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, Nice, 2007. 1–6
- 43 Keyzer J, Hinrichs J, Metzgeret A, et al. Digital generation of RF signals for wireless communications with band-pass delta-sigma modulation. In: Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, Phoenix, 2001. 2127–2130
- 44 Wagh P, Midya P, Rakers P, et al. An all digital universal RF transmitter. In: Proceedings of IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2004. 549–552
- 45 Syllaos I L, Balsara P T, Staszewski R B. Recombination of envelope and phase paths in wideband polar transmitters. IEEE Trans Circuits-I, 2010, 57: 1891–1904
- 46 Parikh V K, Balsara P T, Eliezer O E. All digital-quadrature-modulator based wideband wireless transmitters. IEEE Trans Circuits-I, 2009, 56: 2487–2497
- 47 Rong L, Zheng L. A polar transmitter architecture with digital switching amplifier for UHF RFID applications. In: Proceedings of 2011 IEEE International Conference on RFID, Orlando, 2011. 128–133
- 48 Marold S, Wiegner D, Vitanov S, et al. Efficient ALGaN/GaN linear and digital-switch-mode power amplifiers for operation at 2 GHz. IEEE Trans Electron, 2010, 93: 1238–1244
- 49 Ortega-Gonzalez F J, Tena-Ramos D, Patiño-Gomez M, et al. High-power wideband L-band suboptimum class-E power amplifier. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2013, 61: 3712–3720
- 50 Dooley J, Corley G, Podsiadlik T, et al. Reconfigurable high frequency class S power amplifier demonstrator. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2011, 58: 2812–2819
- 51 Silva N V, Oliveira A S R, Gustavsson U, et al. A novel all-digital multichannel multimode RF transmitter using delta-sigma modulation. IEEE Trans Microw Wirel Compon Lett, 2012, 22: 156–158

Core technologies of digital radio frequency for advanced radio platform and their engineering practice

YAO FuQiang

The 63rd Research Institute of the General Staff Headquarters, Nanjing 210007, China
E-mail: yaofuqiang63@126.com

Abstract Digital radio frequency (DRF) of radio platforms is the key to enhancing the fundamental capabilities

of radio systems, such as adaptive capability, maneuverability, transmission capability, and integration capability, in the complex electromagnetic environment. This paper first analyses the demands of RF technology development, introduces the research advance in this field both at home and abroad, and illuminates the principle of the contradiction among major indices of analog RF power amplifier (ARFPA). Further, it extends the DRF concept to integrated digital radio frequency (IDRF) with an emphasis on the principles and advantages of the core technology of DRF-digital RF power amplifier (DRFPA) and all-digital transmitter (ADTx). This paper proposes a DRF design based on combination of system design and techniques, presenting a physical model of DRFPA and an architecture of the ADTx, and gives suggestions for independent development of DRF technologies in China. DRF is revolutionary as well as feasible for advanced radio platforms. Developing its core technologies independently is crucial to China, otherwise China will suffer from an Achilles' heel.

Keywords radio platform, digital radio frequency, integrated digital radio frequency, digital RF power amplifier, all-digital transmitter, complex electromagnetic environment



YAO FuQiang was born in 1957. He received his Master degree and Ph.D. respectively in 1990 and 1993 in major of communication and electronic system from Xidian University, Xi'an, China. He is now a Science Researcher at the 63rd Research Institute of the General Staff Headquarters, Fellow of Chinese Institute of Electronics and Fellow of Chinese Institute of Communications. His current research interests include

wireless communication and anti-jamming communication.