

文章编号: 2095-4980(2022)09-0953-06

# 面向多功能综合射频系统的多通道全数字发信机

周 强, 朱 蕾

(国防科技大学 第六十三研究所, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 多功能综合射频系统(MIRFS)是解决舰载、机载、星载等空间受限平台雷达、无线通信、电子战、导航定位等多种射频功能综合集成的重要途径, 其核心是孔径综合、射频综合和软件综合。针对射频综合对 MIRFS 射频信道的多任务共用需求, 提出一种多通道全数字发信机架构。该架构具有多个参数独立配置的数据通道, 每个通道首先将输入基带 I/Q 数据数字正交上变频到一个合适的中频; 然后利用 2 对带通增量求和调制器(BPDSM)分别对中频 I/Q 数据进行脉冲编码, 产生 2 对反相数字脉冲序列。对所有通道产生的 BPDSM 脉冲序列进行内插, 最后通过数据交织合并为 1 路数字脉冲序列, 从而实现对多路射频调制信号的数字综合。仿真表明, 通过对多个通道参数的独立配置, 该架构可提高 MIRFS 的灵活性和适应性。

**关键词:** 多功能综合射频系统; 射频数字综合; 全数字发信机; 多通道

**中图分类号:** TN832<sup>+</sup>.4; TN97

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019513

## Multichannel All-Digital Transmitter for Multifunction Integrated RF System

ZHOU Qiang, ZHU Lei

(The 63rd Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Multifunctional Integrated RF System(MIRFS) is an important way to integrate various RF functions of shipborne, airborne, spaceborne and other space-limited platforms, such as radar, wireless communication, electronic warfare, navigation and positioning, and its core is aperture integration, RF integration and software integration. Aiming at the multi-task sharing requirement of RF integration for MIRFS, a multichannel all-digital transmitter architecture is proposed. This architecture has the data channels with independent parameters configuration, each channel starts by digitally orthogonal up-conversion of the input baseband I/Q data to an appropriate Intermediate Frequency(IF). Then, two pairs of inverting digital pulse sequences are generated by pulse coding of IF I/Q data with two pairs of Band-Pass Delta Sigma Modulator(BPDSM). The BPDSM pulse sequences generated by all channels are interpolated, and the data are finally integrated into 1-way digital pulse sequences through data interweaving, so as to realize the digital synthesis of multi-channel RF modulation signals. Simulation shows that the architecture can improve the flexibility and adaptability of MIRFS by independently configuring multiple channel parameters.

**Keywords:** Multifunctional Integrated RF System; RF digital integration; all-digital transmitter; multichannel

随着电磁环境日渐复杂以及应用需求多样化, 舰载、机载、星载等空间受限平台需配备越来越多基于射频信道的电子信息设备, 如: 雷达、无线通信、电子战和导航定位等, 这些设备的重要性日益突出。由于相关设备各自独立, 自成系统, 多种电子信息设备的简单叠加使平台载荷及体积质量大幅增加, 功耗急剧上升, 削弱了平台机动能力, 其可靠性、可维护性以及电磁兼容性问题突出, 难以实现多种射频功能的有机结合, 降低了复杂电磁环境中相关设备的抗干扰能力, 严重制约了平台综合效能的提升。

随着软件无线电技术和微电子技术的快速发展, 针对上述空间受限平台的电子信息系统一体化综合, 即综合电子信息系统呈现迅猛发展趋势, 具有减少设备数量、提高系统性能以及操作维护简便的优势<sup>[1]</sup>。电子信息系统

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-04-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61631021)

统的一体化综合包括天线孔径一体化综合、射频一体化综合、信号一体化综合和数据处理一体化综合等。相对而言,越到后端的一体化综合越容易实现。随着数字信号处理技术的发展,国内外已基本可实现对信号和数据处理的一体化综合,但这种综合方式不能满足多任务系统同时工作这一目标。作为未来综合电子信息系统发展的必然趋势,以孔径和射频一体化综合为核心的多功能综合射频系统(MIRFS)受到了世界各国的广泛重视<sup>[2-3]</sup>,有望解决上述问题。

MIRFS 采用共用设计,其核心思想是用宽带多功能射频孔径代替平台上数量众多、各种功能的天线孔径,采用综合的、通用的、开放式的射频、信号处理、软件体系架构,进行灵活的资源调度和管理,实现雷达、通信、电子战和导航定位等多种射频功能以及多源信息融合,即基于一个共用硬件平台,通过加载不同软件实现所有的电子信息功能<sup>[4]</sup>。近年来,随着数字射频技术的发展,基于通用化的硬件平台,已可通过软件重构实现多种射频功能的切换<sup>[5]</sup>。但仅是重构(切换)还不能满足 MIRFS 对射频通道的多任务共用需求。利用单一硬件平台实现多射频任务共用,宽带化和线性化是基本要求,不仅需要提高射频通道的瞬时带宽和线性度,同时还将给 MIRFS 的低功耗和小型化带来很大挑战。为此,本文拟对宽带数字发信机进行研究,旨在利用单一硬件平台同时实现多种射频功能,从而为实现 MIRFS 要求的射频信道多任务共用提供方案和手段支撑。

## 1 多任务共用的宽带发信机架构

宽带发信机,类似于移动通信系统中的频谱聚合技术<sup>[6]</sup>,为实现单一射频通道的多任务共用(类似于多路独立射频载波信号的并行传输),主要有以下两种不同宽带发信机实现架构:

1) 基于宽带功放的多载波信号综合。该架构的核心是先合成再放大,即将多路射频载波聚合为 1 个宽带信号,再经宽带功放实现功率放大,如图 1(a)所示。

2) 基于窄带功放的多载波功率聚合。该架构的核心是先放大再合成,即先由多个窄带功放对每路射频载波信号进行功率放大,再通过功率合成实现多载波功率聚合,如图 1(b)所示。

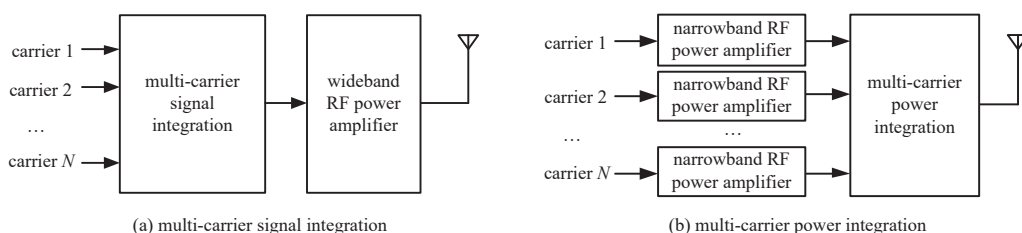


Fig.1 Schematic diagram of broadband transmitter architecture

图 1 宽带发信机架构示意图

对于常规以模拟射频功放为核心的模拟射频体制发信机,上述两种架构都存在难以克服的瓶颈问题:对于前者,模拟射频功放通过宽带阻抗匹配实现带宽拓展,不仅带来较大的匹配损耗,且随着带宽及信号峰均比的增加,发信机性能随之下降;对于后者,虽然可以避免宽带功放带来的性能下降问题,但功率合成仍将带来一定损耗,且多个窄带功放并行的结构还将带来成本、体积、质量等问题。同时,模拟射频功放的参数相对固定,难以实现射频重构。因此, MIRFS 所需的宽带发信机面临一个核心技术挑战:基于单一射频通道,如何实现高度灵活的射频架构以及多路不同数据速率、调制方式、载波频率射频载波信号的数据综合与高效传输。传统的模拟射频体制发信机难以应对上述挑战。

近年来,结合数字射频技术、高效功放技术和高性能半导体器件技术的全数字发信机(All-Digital Transmitters, ADTx)发展迅速<sup>[5]</sup>,其上变频和功率放大等主要功能都在数字域实现,在实现可重构射频使数字化进一步接近天线的同时,还能大幅降低发信机损耗,显著提高发信机综合性能,有望满足射频一体化数字综合的重大现实需求。

针对 MIRFS 发信机面临的上述挑战,基于现有 ADTx 架构<sup>[7-8]</sup>,本文提出了一种可配置的多通道 ADTx 架构,基于单个可编程逻辑器件(Field Programmable Gate Array, FPGA),可实现对多路独立射频载波信号的数字综合,不仅有望实现基于单一射频通道的多任务共用,还可利用理论效率可达 100% 的开关模式功放(Switched Mode Power Amplifier, SMPA)<sup>[9]</sup>,实现高效功率放大。该架构可对每路载波信号射频参数进行快速配置,从而提高发信机的灵活性和适应性。

## 2 可配置多通道全数字发信机

如图2所示,本文提出的多通道ADTx架构具有多个结构相同且可独立配置的数据通道,以对应MIRFS所需的多种射频功能。根据 $k$ 种( $k$ 为大于1的正整数)射频功能对应输入的 $k$ 路数据流( $S_1, S_2, \dots, S_k$ )及数据速率、调制方式和载波频率等信息,基带处理器产生 $k$ 对正交基带信号( $b_{i1}/b_{q1}, b_{i2}/b_{q2}, \dots, b_{ik}/b_{qk}$ )。为实现对每个通道射频参数的快速配置,该架构采用2级数字正交上变频。

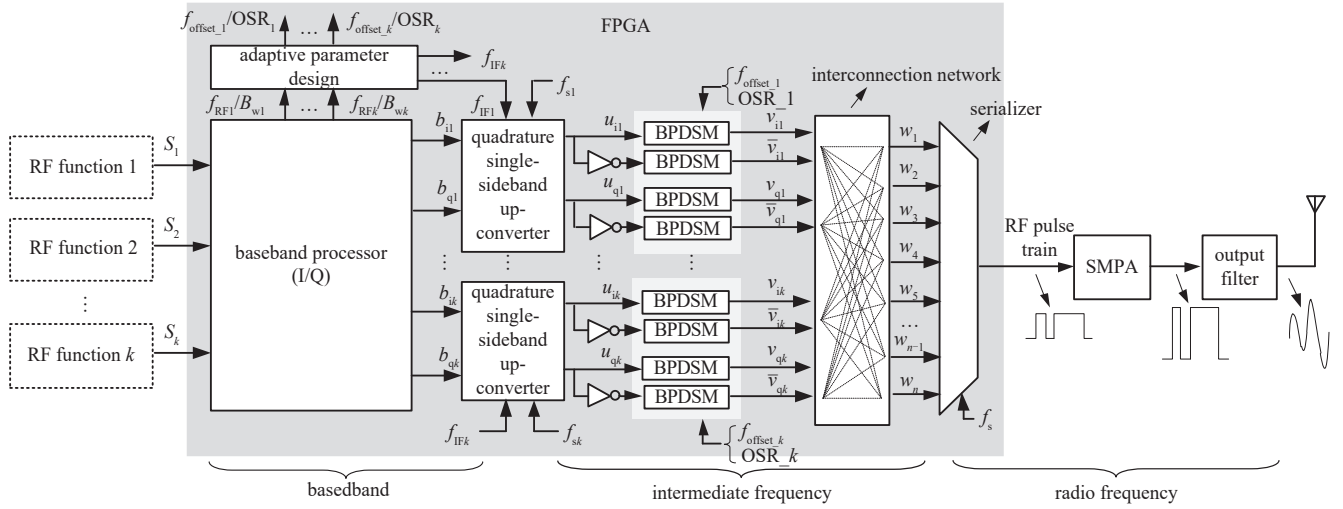


Fig.2 Block diagram of reconfigurable multichannel APTx architecture

图2 可配置多通道ADTx原理框图

为抑制中频镜像,第1级数字正交上变频采用正交单边带上变频<sup>[10]</sup>, $k$ 个中频( $f_{IF1}, f_{IF2}, \dots, f_{IFk}$ )由自适应参数设计模块根据 $k$ 个射频载波频率( $f_{RF1}, f_{RF2}, \dots, f_{RFk}$ )产生。其中,对于第 $m$ 个( $1 \leq m \leq k$ )通道:基带信号 $b_{im}/b_{qm}$ 被转换为数字中频信号 $u_{im}/u_{qm}$ ,则由正交单边带上变频,可得 $u_{im}/u_{qm}$ 的表达式为:

$$\begin{cases} \text{下边带:} \begin{cases} u_{im} = b_{im} \cos(2\pi f_{IFm}) + b_{qm} \sin(2\pi f_{IFm}) \\ u_{qm} = -b_{qm} \cos(2\pi f_{IFm}) + b_{im} \sin(2\pi f_{IFm}) \end{cases} \\ \text{上边带:} \begin{cases} u_{im} = -b_{im} \cos(2\pi f_{IFm}) + b_{qm} \sin(2\pi f_{IFm}) \\ u_{qm} = b_{qm} \cos(2\pi f_{IFm}) + b_{im} \sin(2\pi f_{IFm}) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

变换到数字中频 $f_{IFm}$ 后(采样速率 $f_{sm}$ ),采用2对(共4个)具有相同参数的带通增量求和调制器(BPDSM)<sup>[11]</sup>,分别对数字中频信号 $u_{im}/u_{qm}$ 及其反相信号进行噪声整形和脉冲编码,输出2对(4路)高速脉冲序列 $v_{im}/\bar{v}_{im}, v_{qm}/\bar{v}_{qm}$ 。图3为BPDSM的原理框图,其中 $f_{sm}$ 为第 $m$ 通道的采样频率, $OSR_m$ 为过采样率,调制器带宽 $B_{Mm} = f_{sm}/(2OSR_m)$ 。经过带通环路滤波和幅度量化,输入的中频I/Q数据被编码为2个或有限电平的数字脉冲序列。其中带通环路滤波器的传递函数 $H(z)$ 在信号带内具有高增益,在带外具有低增益,可将带内量化噪声移至带外(噪声整形)。BPDSM调制器输出 $V(z) = U(z)H_u(z) + E(z)H_e(z)$ ,其中 $U(z)$ 为输入信号, $E(z)$ 为量化噪声, $H_u(z) = H(z)/(1+H(z))$ 为信号传递函数, $H_e(z) = 1/(1+H(z))$ 为噪声传递函数。图4为BPDSM的输出频谱示意图, $B_{wm}$ 为信号带宽且 $B_{wm} < B_{Mm}$ 。在 $f_{sm}$ 一定时,为进一步减小带内量化噪声,可采用多电平量化器来提高BPDSM的稳定性和信噪比。

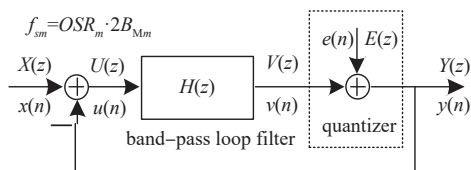


Fig.3 Block diagram of the BPDSM

图3 BPDSM原理框图

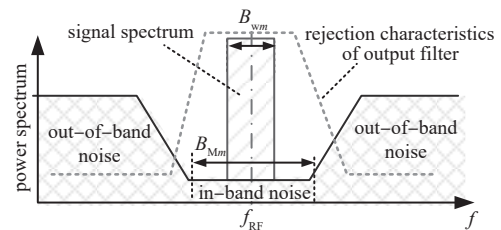


Fig.4 Output spectrum diagram of the BPDSM

图4 BPDSM输出频谱示意图





射关系条件下, 可实现所需调谐功能; 而当射频载波频率变化较大时, 在配置BPDSM参数基础上, 通过改变各DSM输出数据内插和交织的映射关系, 可实现对各通道射频载波频率的大范围调谐。对此, 给出了仿真示例: a) 若载波1的中心频率由163 MHz变为155 MHz, 而载波2及各通道的数据速率和调制方式不变, 则仅需调整 $f_{IF1}$ 为5 MHz; b) 若载波1的中心频率由163 MHz变为211 MHz, 而射频载波2及各通道的数据速率和调制方式不变, 则需调整 $f_{s1}=f_{s2}=100$  MHz,  $f_{IF1}=11$  MHz,  $f_{IF2}=1.5$  MHz, 此时 $N_1=2, N_2=3, N=6$ , 同时改变数据交织的映射关系, 最终需48位并串转换后输出, 即 $W'$ 为:

$$W' = [v_{i1} \ v_{i2} \ v_{i1} \ v_{i2} \ v_{i1} \ v_{q2} \ v_{q1} \ v_{q2} \ v_{q1} \ \bar{v}_{i2} \ v_{q1} \ \bar{v}_{i2} \ \bar{v}_{q2} \ \bar{v}_{i1} \ \bar{v}_{q2} \ \bar{v}_{i1} \ v_{i2} \ v_{q1} \ v_{i2} \ \bar{v}_{q1} \ v_{q2} \ \bar{v}_{q1} \ v_{q2} \ v_{i1} \ \bar{v}_{i2} \ v_{i1} \ \bar{v}_{i2} \ v_{i1} \ \bar{v}_{q2} \ v_{q1} \ \bar{v}_{q2}] \quad (4)$$

此时并串转换器所需的时钟频率为2.4 GHz, 输出脉冲序列的速率为4.8 Gbps。图7(a)~(b)分别给出了射频载波1不同调谐要求时对应的输出频谱仿真波形, 验证了上述频率调谐方法的可行性和有效性。

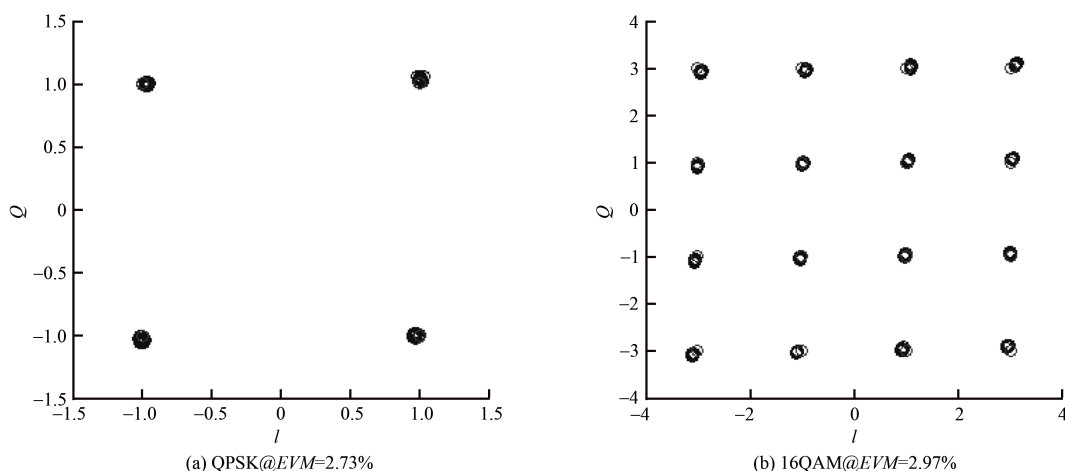


Fig.6 Constellation diagram of output pulse train for the two-channel ADTx

图6 2通道ADTx输出射频脉冲序列的星座图

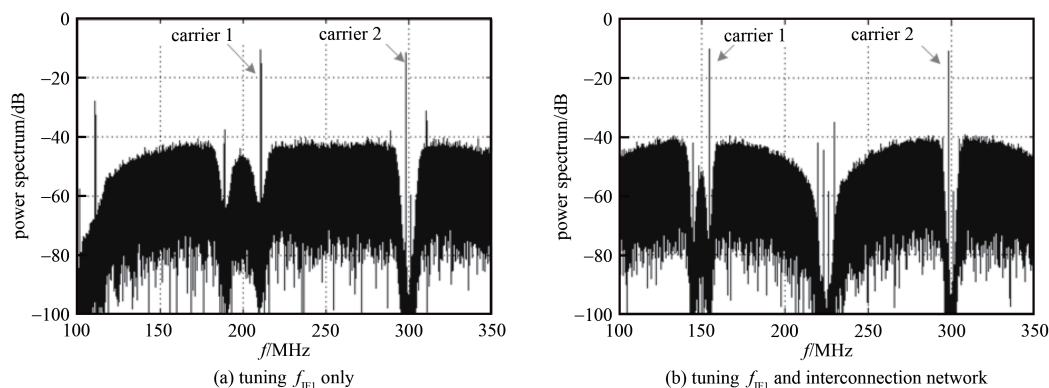


Fig.7 Simulation spectrum of output pulse train of the two-channel ADTx when tuning  $f_{IF1}$  and interconnection network

图7 改变 $f_{IF1}$ 和互连网络后的2通道ADTx输出频谱

#### 4 结论

针对MIRFS的多任务射频共用需求, 本文提出一种可重构多通道ADTx架构。该架构的多个数据通道可进行独立配置, 多个射频载波信号被分别进行脉冲编码和数字上变频, 并通过数字内插和交织, 最终实现数字射频综合, 因此可用于各平台(如机载、舰载、车载等)MIRFS的射频综合集成, 并可基于高效SMPA提高多载波信号的传输效率。同时, 基于多个通道射频参数的快速配置和重构内插和交织的映射关系, 可实现多个射频载波信号的灵活调谐, 有利于提高MIRFS的灵活性和适应性。

但该ADTx架构对并串转换器的采样速率要求较高, 且随着通道数的增加, 其实现难度将相应增大, 同时在数据交织过程中也将引入中频镜像和互调等无用发射分量。因此, 还需进一步优化该ADTx架构的实现方案, 研究相应的非线性失真的抑制和补偿方法, 以提高其综合性能, 降低实现难度。

## 参考文献:

- [1] 李军. 综合电子战系统发展趋势及其对策[J]. 雷达与对抗, 2001,21(4):11-14,67. (LI Jun. Development trend and counterplot on integrated EW system[J]. Radar & ECM, 2001,21(4):11-14,67.)
- [2] TAVIK G C, HILTERBRICK C L, EVINS J B, et al. The advanced multifunction RF concept[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(3):1009-1020.
- [3] 赵佩红. 多功能综合射频系统技术综述[J]. 雷达与对抗, 2011,31(3):9-13. (ZHAO Peihong. The technologies of multifunction integrated RF system[J]. Radar & ECM, 2011,31(3):9-13.)
- [4] 胡元奎, 靳学明, 范忠亮. 多功能综合射频系统技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2015(3):233-239. (HU Yuankui, JIN Xueming, FAN Zhongliang. Research on multi-function integrated RF system technology[J]. Radar Science and Technology, 2015(3): 233-239.)
- [5] 姚富强. 新一代无线电平台数字射频核心技术与工程实践[J]. 中国科学:信息科学, 2014,44(8):965-979. (YAO Fuqiang. Core technologies of digital radio frequency for advanced radio platform and their engineering practice[J]. Science in China(Information Sciences), 2014,44(8):965-979.)
- [6] 刁心玺, 许玲, 马志锋. LTE 后续演进中基于频谱聚合的协同通信[J]. 中兴通讯技术, 2010,16(1):44-49. (DIAO Xinxi, XU Ling, MA Zhifeng. Spectrum aggregation based cooperative communications in the LTE further evolution[J]. ZTE Technology Journal, 2010,16(1):44-49.)
- [7] SILVA N V, OLIVEIRA A S R, GUSTAVSSON U, et al. A novel all-digital multichannel multimode RF transmitter using delta-sigma modulation[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013,22(3):156-158.
- [8] SILVA N V, OLIVEIRA A S R, CARVALHO N B. Novel fine tunable multichannel all-digital transmitter[C]// 2013 IEEE MTT-S International Symposium. Seattle, WA, USA: IEEE, 2013:1-3.
- [9] GREBENNIKOV A, SOKAL N O, FRANCO M. Switchmode RF power amplifiers[M]. Burlington: Elsevier, 2007.
- [10] DONALD J, WEAVER K. A third method of generation and detection of single-sideband signals[J]. Proceedings of the IRE, 1956,44(12):1703-1705.
- [11] 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[J]. 电子技术应用, 2014,40(6):103-105. (ZHOU Qiang, ZHU Lei, CHEN Jiang. Research and implementation of tunable band-pass delta-sigma modulator for Class-S RF power amplifier[J]. Application of Electronic Technique, 2014,40(6):103-105.)
- [12] MAROLDT S, QUAY R, HAUPT C, et al. Broadband GaN-based switch-mode core MMICs with 20 W output power operating at UHF[C]// 2011 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2011.

## 作者简介:

周 强(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为射频数字功放、全数字发信机以及机械式低频电磁发信技术.email:zhouqiang63@nudt.edu.cn.

朱 蕾(1983-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字信号处理及射频调制、微波电路及控制.