

基于面积等效原理的数字射频调制策略

陈剑斌^{1,2}, 张江², 周强²

(1. 陆军工程大学通信工程学院, 江苏南京 210007; 2. 国防科技大学第六十三研究所, 江苏南京 210007)

摘要: 为了驱动后级开关功放, 全数字发信机需要利用数字射频调制器将输入信号转换为相应的脉冲序列信号. 针对现有脉宽调制(PWM)和Delta-Sigma调制(DSM)策略在调制性能及系统实现方面存在的不足, 本文利用面积等效原理提出一种新的数字射频调制策略. 理论分析和仿真结果表明, 本文策略相比PWM和DSM, 不仅简化了硬件实现难度, 而且能够获得更优的带内SNR和编码效率性能.

关键词: 数字射频调制; 全数字发信机; 面积等效原理; 编码效率

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2019)04-0880-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.016

The Digital RF Modulation Strategy Based on Area Equivalent Theory

CHEN Jian-bin^{1,2}, ZHANG Jiang², ZHOU Qiang²

(1. College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

2. 63rd Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: In order to drive the switched mode power amplifier (SMPA) for full-digital transmitter, the input Radio Frequency (RF) signal of full-digital transmitter first needs to be transformed into pulse sequences by using the digital RF modulator. Considering the disadvantages in modulation performance and system realization of existing digital RF modulation strategies, especially the Pulse Width Modulation (PWM) and Delta-Sigma Modulation (DSM), a digital RF modulation strategy was proposed and analyzed in this paper by using the area equivalent theory. The theoretical analysis and simulation results show that, compared to the PWM and DSM, the proposed modulation strategy not only reduces the hardware implementation difficulty, but also achieves better performance of the SNR and coding efficiency.

Key words: digital RF modulation; full-digital transmitter; area equivalent theory; coding efficiency

1 引言

随着当前无线通信业务需求的快速增长, 新的通信体制不断涌现. 无线通信终端在减少体积功耗的同时要求兼容更多的频段、标准及功能. 基于上述需求, 人们提出了软件无线电(Software Radio, SR)的解决方案, 以期通过系统的软件重构来实现单一硬件平台对多种通信体制的支撑. 以此为目标, 文献[1~3]在传统发信机基础上提出了全数字发信机的概念. 通过引入开关模式功放^[4-6], 全数字发信机能够在数字域完成信号功率放大, 真正意义上实现了射频可重构.

全数字发信机主要由数字射频调制器、开关功放以及调谐滤波器构成. 其中, 为了实现功放的开关工作, 前端数字射频调制器(Digital RF Modulation, DRFM)需

要将输入 n -bit 数字射频信号转换为对应的脉冲信号. 产生脉冲信号的经典方式是 PWM^[7,8] 和 DSM^[9,10]. 其中 PWM 通过将射频信号包络与特定参考信号进行比较来产生调制脉冲信号, 适合于模拟域实现. 但在数字域, 为了保证其 SNR 性能系统需要极高的过采样率, 从而增加了硬件实现难度. 相比 PWM, DSM 具有内在的噪声整形特性, 可以获得更高的带内 SNR. 但其劣势是系统结构复杂, 工作频率受限, 从而制约了其在宽带信号场合下的应用. 同时 DSM 存在的稳定性问题制约了其编码效率性能的提升^[1]. 基于此, 本文首次利用面积等效原理, 提出一种全新的适用于全数字发信机的射频调制策略, 并对其原理及性能进行了理论分析和仿真验证. 结论表明相比 PWM 和 DSM, 应用本文策略得到的调制脉冲序列具有更优的综合性能.

2 基于面积等效的调制策略

2.1 调制策略原理分析

采样控制理论中的面积等效原理指出:冲量相等而形状不同的窄脉冲作用于惯性环节,其最终输出情况基本相同,其中冲量代表窄脉冲的面积.基于上述原理,本文提出一种基于等面积变换的数字射频调制策略(Equal-area Transformation based Digital RF Modulation, ETDM),将 n -bit 数字射频信号转化为可驱动开关功放的脉冲序列.如图 1 所示,原信号采样频率为 f_s ,对应序列单位脉宽周期为 $T = 1/f_s$.若一个采样周期内的信号归一化幅度为 $-1 \leq A \leq 1$,则等面积变化下的对应输出脉宽为 $|A|T$.

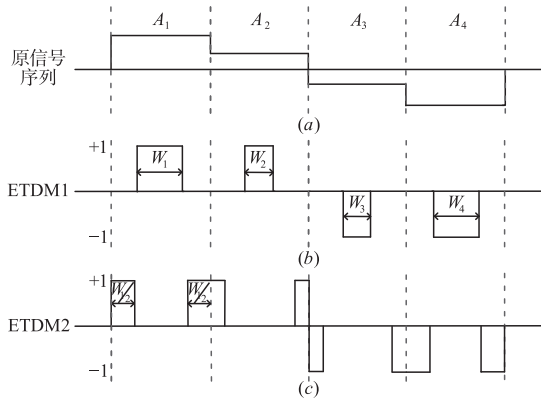


图1 等面积变换序列示意图

为了尽可能的保留相位信息,ETDM 策略在具体实现时采用重心重合的等面积变换原则^[11],此时变换前后序列面积重心都位于周期中心.本文考虑如图 1 所示的 ETDM1 和 ETDM2 两种具体的重心重合等面积变换方式.

信号在时域上的变化必然会在频域引起相对应的改变.下面分析 ETDM 变化前后信号序列的频谱特性.如图 1 所示, N 个采样周期下原序列的离散傅里叶变换可以表示为

$$F(n) = \int_0^{NT} s(t) e^{-jnw_p t} dt = \sum_{l=1}^{L/2} f_l(n) \cdot E_l(n) \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^L \text{num}(k_l) = N; w_p = \frac{2\pi}{NT}; A_l = \frac{(L+1-2l)}{L-1} \\ E_l(n) = \left(\sum_{k_l} e^{-jnw_p(k_l T)} - \sum_{k_{l+1}} e^{-jnw_p(k_{l+1} T)} \right) \\ f_l(n) = A_l \left(\frac{e^{-jnw_p T} - 1}{-jnw_p} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和(2)中, L 为信号序列量化电平数,第 l ($1 \leq l \leq L$) 个量化电平为 A_l , k_l 代表序列中幅度等于 A_l 的所有

采样点. $E_l(n)$ 定义为序列公共项,它反映了序列中不同电平的位置信息,变换前后序列公共项部分相等.同时定义 $f_l(n)$ 为序列原始项,其反映了原序列在各单位脉宽周期内的脉冲幅度信息.

同理,根据 ETDM 策略下脉冲序列的具体变换过程,同时考虑到互为相反数的幅度在对应脉冲波形上的对称性,对于 ETDM1 序列有

$$\begin{cases} F^1(n) = \sum_{l=1}^{L/2} f_l^1(n) \cdot E_l(n) \\ f_l^1(n) = \left(\frac{e^{-jnw_p \frac{(T+A)T}{2}} - e^{-jnw_p \frac{(T-A)T}{2}}}{-jnw_p} \right) \end{cases} \quad (3)$$

对于 ETDM2 序列有

$$\begin{cases} F^2(n) = \sum_{l=1}^{L/2} f_l^2(n) \cdot E_l(n) \\ f_l^2(n) = \left(\frac{e^{-jnw_p \frac{AT}{2}} - 1 + e^{-jnw_p T} - e^{-jnw_p (T-\frac{AT}{2})}}{-jnw_p} \right) \end{cases} \quad (4)$$

与 $f_l(n)$ 对应,这边定义 $f_l^1(n)$ 、 $f_l^2(n)$ 分别为两种 ETDM 变换方式下的序列差异项,其决定了变换后脉冲序列的具体特性.根据式(2)~(4),利用洛必达法则容易得到 n 较小时, $f_l(n)$ 、 $f_l^1(n)$ 和 $f_l^2(n)$ 三者趋于相等,这表明等面积变换前后序列的频谱在频率低端具有较高的相似度.

2.2 ETDM 策略原理仿真

下面利用仿真定量分析 ETDM 策略的两种变换方式下,序列差异项与原始项之间的幅度、相位关系,如图 2 所示.

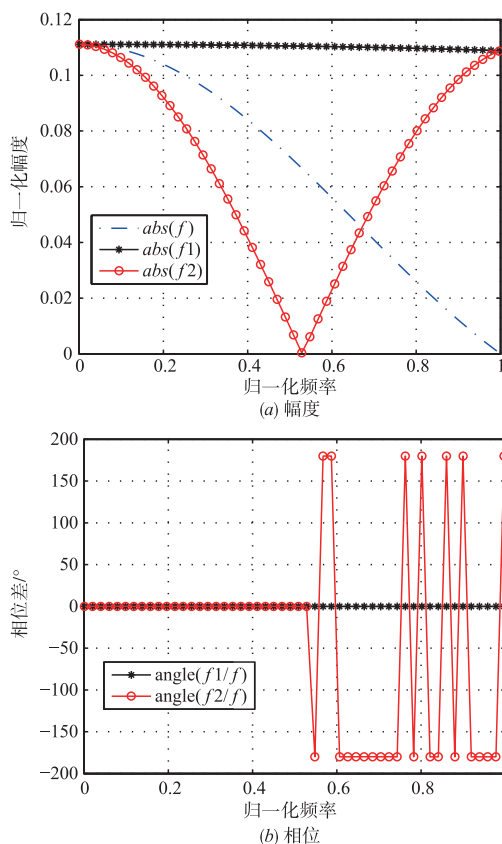
从图 2 的仿真结果可以看到:序列原始项、差异项的幅值在频率低端基本相同,随着频率的升高序列原始项、差异项之间的幅值差异增大,这与前文分析吻合.进一步对比 $f_l^1(n)$ 和 $f_l^2(n)$,容易证明以归一化幅度 $A' = 0.5$ 为分界,小于 A' 时 $f_l^1(n)$ 幅度更接近原始项,反之则为 $f_l^2(n)$.

在相位特性方面,差异项 $f_l^1(n)$ 在整个采样频率范围内与原始项都具有相同的相位值.对于 $f_l^2(n)$,在频率低端与原始项都具有相同的相位值.当频率增大到一定程度之后 $f_l^2(n)$ 与原始项异号,在该部分频率范围内两者的相位差在 $\pm \pi$ 之间切换.

综上所述,可以预见 ETDM 策略下的调制序列与原始序列的频谱特性在频率低端应该具有较高的一致性.下面通过仿真进行验证.

输入 16QAM 调制信号分别观察原信号序列和变换后序列频谱,如图 3 所示.其中原始信号序列采用 $L = 64$ 电平量化,载波频率为 35MHz,采样频率为 400MHz,信号序列最大值为 -4dBFS .

图 3 所示的序列频谱进一步验证了前文分析.可以

图2 序列原始项和差异项对比(归一化幅度0.111, $l=29$)

看到,变换前后序列频谱在频率低端具有高相似度.而在频率高端变换前后序列频谱差异明显,原序列频谱在采样频率附近的成型效果在 ETDM1 和 ETDM2 序列下已完全不可见.进一步观察载波频率处的频谱,如图 3(b)所示,可以看到变换前后信号频谱基本一致.同时比较 ETDM1 和 ETDM2,由于此时 ETDM1 的差异项在幅度和相位方面与原始项具有更小的差异,因此 ETDM1 下的频谱整体上与原序列更为接近.

需要进一步说明的是,图 3 仿真虽然只针对 16QAM 信号,但由于 ETDM 策略是通过等面积变换实现传统调制信号到最终脉冲序列信号的转变,与具体的信号调制方式无关.因此对于其它调制信号,可以获得与图 3 相似的仿真结果.另一方面注意到图 2 仿真结果中,在固定的归一化幅度下,随着频率升高序列原始项、差异项之间的幅值差异增大,这说明载波频率会在一定程度上影响 ETDM 策略的最终性能,此时变换前后信号频谱相似度逐渐降低.

3 性能分析及优化

前面从原理和仿真验证了 ETDM 策略的可行性,下面进一步分析其性能.对数字射频调制而言,其本质是用脉冲信号表示原始信号的一个近似映射过程.在这

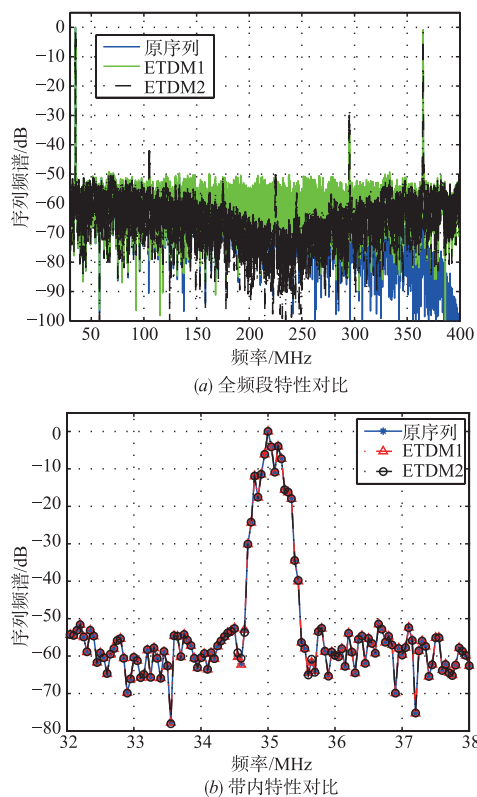


图3 变换前后信号序列频谱

个过程中必然会引入相应的转换量化噪声.引入的量化噪声形式直接影响到调制后序列的带内信噪比^[11]和编码效率^[12],如图 4 所示.此处引入幅度增益对信号电平进行调整,以分析信号大小对 ETDM 策略的影响,其中幅度增益 0dB 下对应信号的最大值为 0dBFS.

从图 4 仿真结果可以看到,原始量化信号的带内信噪比随着幅度增益的增加而逐渐增大.根据前文分析,ETDM 策略下序列变换过程的量化噪声主要反映为频率高端的底噪抬升,而在频率低端调制序列与原序列的频谱特性基本相同.因此不同幅度增益下 ETDM 序列的带内信噪比与原序列基本一致.同时注意到在幅度增益较小时信号序列 SNR 较低,此时转换量化噪声淹没在原信号的量化噪声之中,因此 ETDM 序列与原序列之间的 SNR 差异更小.在编码效率方面,可以看到 ETDM 序列相比原序列有大幅度下降.这是由于 ETDM 策略得到序列的频谱在频率高端不再具有噪声成型效果,对应底部噪声被抬高所造成的.对比 ETDM 策略下的两种具体变换方式,由于 ETDM1 差异项 $f_i^d(n)$ 的幅度在平均意义上更为接近原始项,且与原序列具有完全一致的相位值,因此其带内信噪比和编码效率性能要优于 ETDM2.

另一方面,数字调制器的编码效率代表有用信号能量在调制后脉冲序列总能量中所占的比例,其大小

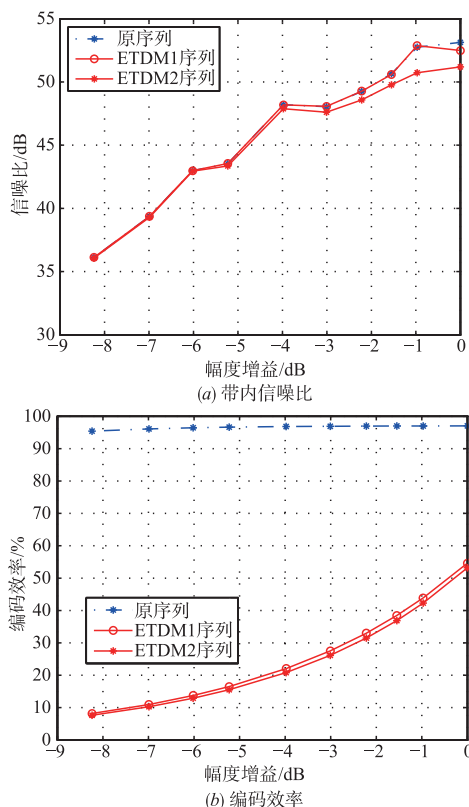


图4 变换前后的序列性能比较

直接影响全数字发机系统的整体效率^[12]. 因此下面考虑对 ETDM 策略进行优化以提升其编码效率性能.

根据前文的分析和仿真,在 ETDM 策略基础上提出消噪调制(ETDM with Noise Cancellation, ETDM-NC) 策略:观察图 2 中 ETDM1 和 ETDM2 的差异项相位,可以看到两者在频率高端的相位差为 180° (相位相反). 因此理论上,通过将 ETDM1、ETDM2 序列直接进行或操作将消除高频端的噪声. 注意上述操作只针对幅度增益小于 -3dB 的情况,此时 ETDM1 和 ETDM2 脉冲没有重叠部分,执行或操作仍能保证等面积条件. 当幅度增益大于 -3dB 时,ETDM-NC 策略退化为较优的 ETDM1 策略.

保持图 3 仿真条件不变,下面分析 ETDM-NC 策略的性能. 为了与传统数字射频调制策略进行对比,这边同时仿真了 3 电平 DSM^[11] 和 PWM^[12] 下的调制序列情况. 仿真结果如图 5 所示.

首先对比 ETDM-NC 和 ETDM1,由于两种策略都是基于面积等效原理,因此对应序列的频谱特性在频率低端都接近于原始序列. 此时可以看到两种调制策略下,序列的带内信噪比性能基本一致. 在编码效率性能方面,当幅度增益较小时 ETDM-NC 策略由于引入了噪声消除处理,此时相比 ETDM1 策略其序列编码效率有了大幅度提升. 当幅度增益大于 -3dB 时,ETDM-NC 退

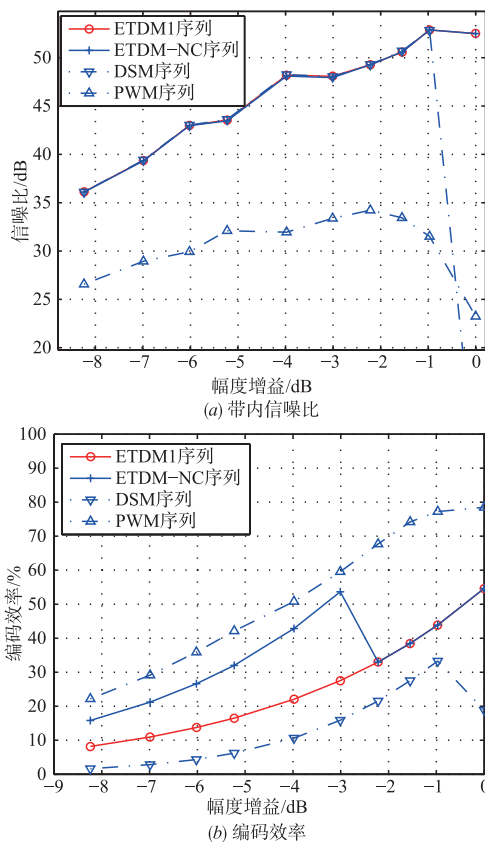


图5 不同调制算法性能比较

化为 ETDM1,此时两个序列的编码效率完全一致.

下面对比 ETDM-NC、DSM 和 PWM 策略. 在带内 SNR 性能方面,DSM 具有内在的噪声整形效果,理论上能够获得最优的带内 SNR 性能. 但是由于原始数字信号采用有限位数量化,其量化噪声决定了此时 DSM 可获得的带内 SNR 性能. 另一方面注意到,当幅度增益增大到 0dB 时 DSM 策略下的序列带内信噪比急剧下降,此时对应 DSM 调制器进入失稳状态. 对于 PWM,由于在数字域实现时存在采样分辨率误差,因此其噪声性能最差. 同时注意到,随着幅度增益增大 PWM 带内信噪比总体呈现先增大后减小趋势,这对应于 PWM 处理复杂信号时出现过动态范围比较失真的情况. 相比以上两种调制策略,ETDM-NC 能够获与 DSM 相近,而远优于 PWM 的带内信噪比性能,且不存在稳定性方面的问题.

编码效率性能方面,DSM 在引入噪声整形保证带内信噪比的同时,使得带外噪声显著抬升,从而限制其编码效率. 与 SNR 情况类似,当幅度增益过大时 DSM 调制器失稳,此时编码效率性能下降. 相较于 DSM, PWM 的噪声主要表现为特定频率位置的谐波分量,因而具有更高的编码效率. 对于 ETDM-NC,在幅度增益较小时经过消噪处理,有效抑制了频率高端的量化噪声

分量,因此相比 ETDM1 其编码效率得到了显著的提升.当幅度增益大于 -3dB 时 ETDM-NC 等效于 ETDM1,此时编码效率性能有所下降但仍优于 DSM.

结合上述分析,本文设计的数字射频调制策略与传统 PWM 和 DSM 策略的特性对比如表 1 所示.

表 1 射频调制策略特性对比

射频调制策略	带内信噪比	编码效率	系统实现
PWM	低	高	结构较复杂,适合于模拟域实现
DSM	高	低	结构复杂,且存在稳定性问题
ETDM1	高	低	结构简单,可通过查找表结构实现
ETDM-NC	高	较高	结构简单,可通过查找表结构实现

4 结语

针对传统数字射频调制策略在性能和实现上存在的问题,本文基于面积等效原理提出一种等面积变换射频调制策略.文章首先利用理论分析和软件仿真验证了 ETDM 策略的原理及其可行性,在此基础上通过性能仿真研究了其有效性.仿真结果表明,ETDM 策略得到的调制脉冲序列可以获得与原信号序列相近的带内信噪比,但其编码效率下降明显.

为了优化编码效率以提升全数字发信机的整体效率,文章进一步设计了基于噪声消除的 ETDM 策略.通过两路异相噪声相互抵消,ETDM-NC 在 ETDM 基础上有效提升了脉冲序列的编码效率.与现有 DSM 和 PWM 策略的比较,本文策略在带内信噪比和编码效率性能之间获取了一个更优的综合性能.

最后,本文策略可以基于查找表映射方便的实现幅度到脉宽映射,同时利用延时线结构^[13]在数字域完成脉冲宽度的精确控制.因此相比 PWM 和 DSM,本文策略在简化系统硬件实现方面也具有一定的优势.

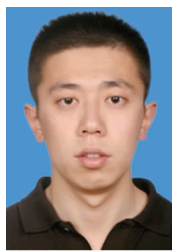
参考文献

- [1] FRAPPÉ A, FLAMENT A, STEFANELLI B, et al. An all-digital RF signal generator using high-speed $\Delta\Sigma$ modulators [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(10): 2722 – 2732.
- [2] 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, 2012, 22(3): 156 – 158.
- [3] ZHOU B, ZHANG K, ZHOU W, et al. Reconfigurable fully digital transmitter with carrier-frequency pulse-width modulation [J]. Electronics Letters, 2013, 49(19): 1244 – 1246.
- [4] HUNG T P, RODE J, LARSON L E, et al. Design of H-bridge class-D power amplifiers for digital pulse modulation transmitters [J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 2007, 55(12): 2845 – 2855.
- [5] 冯辉, 秦毅男, 林争辉. D 类功放中全数字 PWM 结构的非线性误差校正方法 [J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1442 – 1445.
FENG Hui, QIN Yi-nan, LIN Zheng-hui. The method of nonlinear error calibration for digital PWM structure in class-D amplifier [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 35(8): 1442 – 1445. (in Chinese)
- [6] 朱蕾, 周强, 谭笑. 基于多比特带通 $\Delta\Sigma$ 调制器的射频数字功放 [J]. 电子技术应用, 2013, 39(8): 102 – 105.
ZHULEI, ZHOU Qiang, TAN Xiao. RF digital amplifier utilizing multi-bit bandpass delta sigma modulator [J]. Application of Electron IC Technique, 2013, 39(8): 102 – 105. (in Chinese)
- [7] 杨金辉, 戴瑜兴, 易龙强. 基于 DSP 的 SVPWM 与载波 PWM 的统一性研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1646 – 1653.
YANG Jin-hui, DAI Yu-xing, YI Long-qiang. DSP based equivalence of SVPWM and carrier-based PWM study [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1646 – 1653. (in Chinese)
- [8] RUOTSALAINEN H, ARTHABER H, MAGERL G. A new Quadrature PWM modulator with tunable center frequency for digital RF transmitters [J]. IEEE Transactions on Circuits System II Express Briefs, 2012, 59(11): 756 – 760.
- [9] EBRAHIMI M M, HELAOUI M, GHANNOUCHI F M. Delta-sigma-based transmitters: Advantages and disadvantage [J]. IEEE Microwave Magazine, 2012, 14(1): 68 – 78.
- [10] MARKERT D, YU X, HEIMPEL H, et al. An all-digital single-bit RF transmitter for massive MIMO [J]. IEEE Transactions on Circuits System I Regular Papers, 2017, 64(3): 696 – 704.
- [11] 陈剑斌, 周强, 谭笑, 等. 基于 2 比特 DSM 的开关功放电平变换策略研究 [J]. 电子学报, 2015, 43(7): 1413 – 1417.
CHEN Jian-bin, ZHOU Qiang, TAN Xiao, et al. The research of level-transform strategy for switching amplifier based on 2 bit delta-sigma modulator [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(7): 1413 – 1417. (in Chinese)
- [12] SILVA N V, OLIVEIRA A S R, CARVALHO N B. Design and optimization of flexible and coding efficient all-digital RF transmitters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(1): 625 – 632.
- [13] NUYTS P A J, SINGERL P, DIELECHER F, et al. A fully digital delay line based GHz range multimode transmitter front-end in 65-nm CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(7): 1681 – 1692.

作者简介



陈剑斌 男. 1986 年 2 月出生, 福建龙岩人. 2008 年、2011 年分别在浙江大学、解放军理工大学获得工学学士和工学硕士学位, 现为国防科技大学第六十三研究所工程师、陆军工程大学在读博士研究生, 主要从事全数字发信机、认知无线电以及微波射频技术方面的研究.
E-mail: 04dzjscjb@163.com



张江 男. 1984 年 1 月出生, 山西太原人. 2006 年毕业于太原理工大学通信工程学院, 获学士学位. 2009 年和 2013 年毕业于解放军理工大学通信工程学院获硕士和博士学位. 现为国防科技大学第六十三研究所工程师, 从事通信抗干扰和全数字发信机技术方面的研究工作.