

采用3电平非均匀量化的脉冲编码策略*

陈剑斌^{1,2}, 张江², 周强², 魏志虎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:作为全数字发信机系统中广泛应用的一种脉冲编码技术, Delta-Sigma 调制 (Delta-Sigma Modulation, DSM) 通过增加量化电平, 能够实现调制性能的提升。但限于全数字发信机系统开关功放的具体结构, 多电平 DSM 序列无法直接驱动后级功放电路。在传统 3 电平 DSM 基础上, 通过引入面积等效原理和非均匀量化技术, 提出了适用于开关功放的一种新的脉冲编码策略。理论分析和仿真结果表明, 相比常规 2 电平 DSM 序列, 采用该策略获得的调制脉冲序列具有更优的带内 SNR 和编码效率性能。

关键词: 开关功放; 全数字发信机; 脉冲编码; 面积等效原理; 非均匀量化

中图分类号: TN911.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2020)03-137-07

Pulse encoding strategy using 3-level non-uniform quantizing

CHEN Jianbin^{1,2}, ZHANG Jiang², ZHOU Qiang², WEI Zhihu²

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

2. The Sixty-third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: As a widely used pulse encoding technique in the full-digital transmitter, the DSM (Delta-Sigma modulation) can obtain a better performance by increasing the quantizer's levels. But the multi-level DSM output cannot drive the switching amplifier directly due to the structural restriction of switching amplifier in full-digital transmitter. By using the area equivalent theory and non-uniform quantizing technique, a novel pulse encoding strategy for switching amplifier was proposed and analyzed. The theoretical analysis and simulation results reveal that the pulse output created by the novel pulse encoding strategy gives rise to a much better in-band SNR (signal noise ratio) and coding efficiency performance compared to the traditional 2-level output.

Keywords: switching amplifier; full-digital transmitter; pulse encoding; area equivalent theory; non-uniform quantizing

随着当前无线通信业务类型的快速增长, 新的通信体制不断涌现, 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, 因而在带宽、效率、重配置能力等方面面临着更高的要求和挑战。针对上述问题, 人们提出了软件定义无线电 (Software Define Radio, SDR) 的概念, 通过引入采用数字信号处理技术的硬件来替代传统模拟器件, 以实现针对不同通信业务的无缝适配^[1]。其中, 基于高效开关模式功率放大器 (Switched-Mode Power Amplifier, SMPA)^[2-3] 的全数字发信机, 能够在数字域中完成信号的高效功率放大, 同时具有良好的可重配置特性, 被认为是解决上述挑战、实现 SDR 系统的理想方案。

如图 1 所示, 全数字发信机系统主要由数字射频调制器、SMPA 以及调谐滤波器构成^[4-6]。其中, 数字射频调制器包含数字上变频和脉冲编

码两部分功能。基带信号在数字射频调制器中首先进行上变频, 得到的射频信号在脉冲编码器进一步完成脉冲调制。生成的调制脉冲信号将驱动后级功率晶体管工作在开关状态, 理论上能够获得 100% 的效率, 从而实现数字域的信号高效放大。脉冲编码器输出脉冲序列不仅决定了全数字发信机系统输出的信号质量, 同时还直接影响后级 SMPA 的工作效率。因此, 脉冲编码器是全数字发信机实现高效率和高线性的核心。作为目前被广泛应用的一种脉冲编码技术, Delta-Sigma 调制 (Delta-Sigma Modulation, DSM)^[7-8] 由于具有内在噪声整形效果, 其输出脉冲序列具有良好的带内调制性能。同时通过增加 DSM 量化电平数, 可以进一步提升输出脉冲序列的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 以及调制器的稳定性。理论上, 每增加 1 bit 量化电平, 能够提升 6 dB 的调制

* 收稿日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (61631021)

作者简介: 陈剑斌 (1986—), 男, 福建龙岩人, 工程师, 博士研究生, E-mail: 04dzjscjb@163.com

SNR。此外,数字射频调制器稳定性的提升有利于增加 SMPA 的效率上限,从而优化全数字发信机系统的整体效率^[9]。

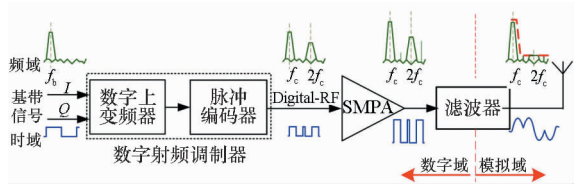


图 1 全数字发信机系统框图

Fig. 1 Structure diagram of ADT system

由于传统 SMPA 电路仅能实现对 2 电平脉冲序列的放大,为了实现对多电平 DSM 脉冲调制序列的开关放大,文献[10]设计了一种多电平 SMPA 电路,该电路将多个具有独立电源的功放单元进行串联,每个功放单元分别处理 1 bit 调制信号,并通过后级的功率合成器将多路信号合成后输出。上述方案需要针对每个功放单元独立设计供电电路和输入控制逻辑电路,从而增加系统的硬件实现复杂度。后级功率合成器在影响整体系统效率的同时,也制约了系统宽的宽带应用能力。此外,对于多电平 DSM 方案,由于实际 SMPA 电路非理想特性,多电平脉冲信号经过 SMPA 功放放大后,不同量化电平间的量化步进不再相等,从而引入额外的非线性,影响最终的信号质量^[11]。

为了在利用多电平 DSM 优势的同时实现对传统 SMPA 的直接驱动,本文基于传统 3 电平 DSM 方案,通过引入面积等效原理和非均匀量化技术,设计了一种新的脉冲编码策略。理论分析和仿真结果表明,相比传统 2 电平 DSM 输出,本文策略获得的输出脉冲序列具有更优的带内 SNR 性能和编码效率性能。

1 基于面积等效原理的电平变换策略

采样控制理论中有一种面积等效原理^[12]:冲量相等而形状不同的窄脉冲作用于惯性环节,其最终的输出情况基本相同,冲量即指窄脉冲的面积。该原理为多电平序列转化为可驱动开关功放的 2 电平序列提供了思路。考虑如图 2(a)所示的 3 电平 DSM 输出脉冲序列,其包含了 A 、 0 和 $-A$ 三种电平,单位脉宽周期为 T 。采用如图 2(b)所示的对称等面积变换 (Symmetric Equal-area Transformation, SET) 策略实现了 3 电平 DSM 序列到 2 电平序列的变换。在 SET 策略下,原始的 0 电平脉冲被转换为面积相等但极性相反的正负脉冲,从而保证变换前后对应周期内

的电平面积代数和相同。同时变换后的脉冲波形关于周期中心左右对称。从后面的分析可以看到,这一特性使得 SET 策略保留了原始序列的相位信息。



(a) 原序列 (b) 面积等效输出
(a) Original input pulses (b) Equal-area output pulses

图 2 面积等效变换示意图

Fig. 2 Sketch map of equal-area transformation

为了说明 SET 策略的有效性,下面首先分析 SET 变换前后两种序列的频谱特性。对于图 2(a)所示的 3 电平脉冲序列, N 个采样周期下的离散傅里叶变换为:

$$\begin{aligned}
 F(n) &= \frac{1}{NT} \int_0^{NT} f(t) e^{-jnw_p t} dt \\
 &= \frac{1}{NT} \left\{ \sum_{k_1 T}^{(k_1+1)T} (A) \cdot e^{-jnw_p t} dt + \right. \\
 &\quad \sum_{k_2 T}^{(k_2+1)T} (0) \cdot e^{-jnw_p t} dt + \\
 &\quad \left. \sum_{k_3 T}^{(k_3+1)T} (-A) \cdot e^{-jnw_p t} dt \right\} \\
 &= s(n) \cdot G(n) + s_0(n) \cdot E(n) \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 k_i = N \\ w_p = \frac{2\pi}{NT} \\ s(n) = A \cdot \frac{e^{-jnw_p T} - 1}{-jnw_p} \\ s_0(n) = \lim_{A \rightarrow 0} (s(n)) \\ E(n) = \sum_{k_2}^{k_2} e^{-jnw_p k_2 T} \\ G(n) = \left(\sum_{k_1}^{k_1} e^{-jnw_p k_1 T} - \sum_{k_3}^{k_3} e^{-jnw_p k_3 T} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$G(n)$ 和 $E(n)$ 反映了序列中 A 电平、 $-A$ 电平和 0 电平的位置信息,定义为序列公共项。从后面的分析可以看到,SET 变换前后序列的公共项部分相等。同时定义 $s(n)$ 、 $s_0(n)$ 为序列原始项,其反映了原序列在单位脉宽周期内的脉冲结构信息。其中, $s_0(n)$ 可以看作是 $s(n)$ 在 $A \rightarrow 0$ 条件下的特殊情况。

同理,根据图 2(b)可得 SET 序列的离散傅里叶变换为^[12]:

$$\begin{cases} F'(n) = s(n) \cdot G(n) + s_1(n) \cdot E(n) \\ s_1(n) = \frac{1 + 2e^{-jnw_p T} - 2e^{-jnw_p 0} - e^{-jnw_p T}}{-jnw_p} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} t_0 = \frac{T}{4} \\ t_1 = \frac{3T}{4} \end{cases} \quad (4)$$

与 $s_0(n)$ 对应,这边定义 $s_1(n)$ 为等面积变换序列的差异项,其决定了变换后序列的具体特性。差异项与原始项之间的幅频、相频关系如图 3(a)、图 3(b) 所示,仿真中令 $A=1$ 。从图 3 中仿真结果可以看出,在低频端序列原始项、差异项的幅值基本相同,但随着频率的升高,序列原始项、差异项之间的幅值差异逐渐增加。此外,如前文分析,由于 SET 变换后的脉冲波形关于周期中心左右对称,因此在整个频率范围内 $s_0(n)$ 与 $s_1(n)$ 具有相同的相位值。

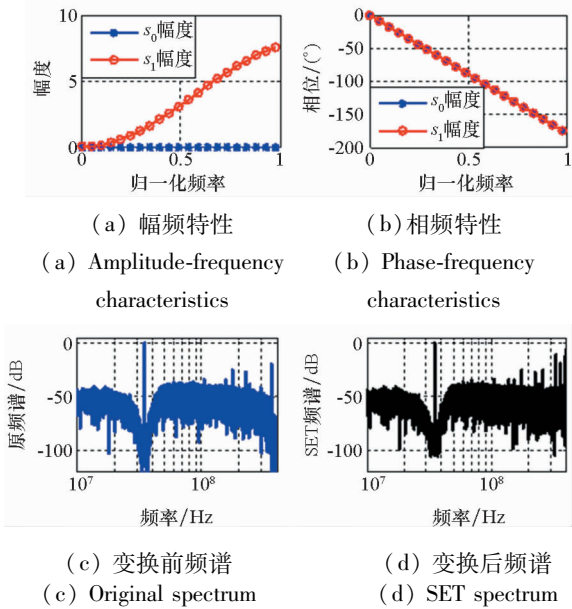


图 3 面积等效策略的特性分析
Fig.3 Characteristic analysis of SET

为不失一般性,采用谐振器级联输出反馈型 (Cascade Resonator FeedBack, CRFB) 结构的 4 阶带通 DSM^[13],量化电平数为 3。输入为 35 MHz 单音信号,系统采样频率为 400 MHz。当输入信号幅度为 0 dB-FS 时原始 3 电平序列和 SET 变换序列的频谱分别如图 3(c)、图 3(d) 所示。可以看到,2 电平 SET 序列频谱在低频端与 3 电平的原序列频谱具有较高的相似度,其中在 35 MHz 附近的噪声整形效果接近于原始序列。

面积等效变换带来序列平均转换频率^[14]的提升,从而增加了后续放大电路的工作损耗,且损

耗提升程度与原始序列中 0 电平出现概率相关。此外,面积等效变换引入的变换误差也与 0 电平出现概率相关,因此 0 电平出现概率同时影响着 SET 序列的带内 SNR 性能。综上所述,考虑在传统 3 电平 DSM 基础上引入非均匀量化,通过调整量化门限值控制 DSM 序列中 0 电平的概率,从而实现 SET 序列平均转换频率和带内 SNR 性能的优化。

2 基于非均匀量化的 DSM 性能分析

2.1 理论分析

下面从理论上分析非均匀量化引入的噪声情况。图 4 为 3 电平量化示意图,方格部分代表传统均匀量化策略下的量化误差,阴影部分代表非均匀量化策略下量化误差的变化情况。传统 3 电平均匀量化 DSM 的两个量化门限分别为 $\delta_1 = +0.5$ 和 $\delta_2 = -0.5$ 。在本文采用的非均匀量化 DSM 策略下,固定量化门限 δ_1 并调整变化门限 δ_2 。理论上,增大 δ_2 可以减少 DSM 输出序列中 0 电平的概率。

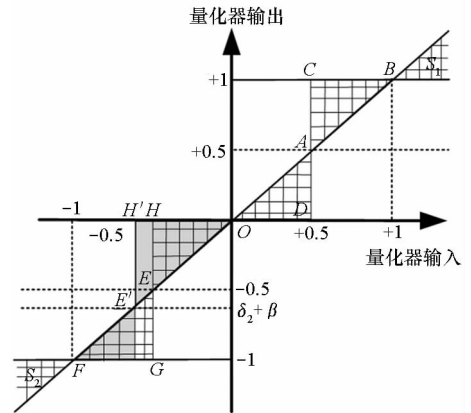


图 4 非均匀量化示意图

Fig.4 Sketch map of non-uniform quantizing

根据图 4 可得,相比传统均匀量化 DSM,非均匀量化策略下,由于量化门限 δ_2 变化而引入的误差面积增加量为:

$$S_{\Delta} = |HH'|^2 \quad (5)$$

根据式(5)有:非均匀程度越高,对应的量化误差增加量越大,这说明非均匀量化引入的额外量化噪声越多。下面进行定量分析。假设量化器输入的幅度样本点在 $[-1, 1]$ 内均匀分布,则在均匀量化方案下,量化门限 δ_2 引入的量化噪声 e 的平均功率为:

$$E = \int_{-\delta}^{\delta} e^2 f(e) de = \int_{-\delta}^{\delta} e^2 \frac{1}{2} de = \frac{\delta^2}{3} \quad (6)$$

其中, $\delta = 0.5$, 为量化步进值的 1/2。对于非均匀量化,假设量化门限偏移为 β , 则门限 δ_2 引入的

化噪声的平均功率为:

$$E' = \int_{-(\delta+\beta)}^{\delta-\beta} e^2 f(e) de = \frac{\delta^2}{3} + \beta^2 \quad (7)$$

以上结论表明,相比常规量化,非均匀量化的平均量化噪声功率增加了 β^2 。这与前面针对图 4 的直观分析结果相吻合。

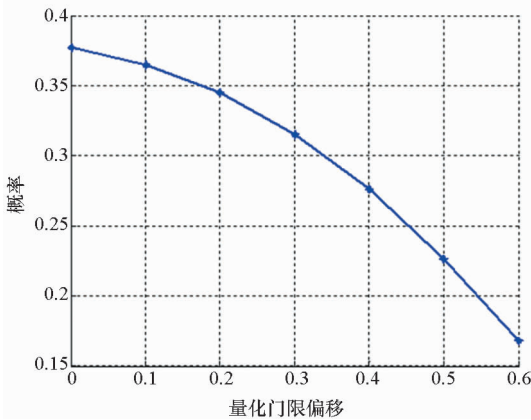
2.2 仿真结果

保持前文的仿真参数不变,下面进一步利用仿真验证 DSM 输出序列性能特性与量化门限偏移 β 之间的关系。图 5(a)所示为 DSM 输出 0 电平概率与量化门限偏移 β 之间的关系。根据仿真结果,随着 β 的增大,DSM 输出序列中的 0 电平概率逐渐减小,这验证了前面的分析。图 5(b)给出了 DSM 输出序列的量化噪声功率电平随量化门限偏移 β 的变化情况。根据前面的分析,这边同时给出量化噪声功率电平的理论曲线:

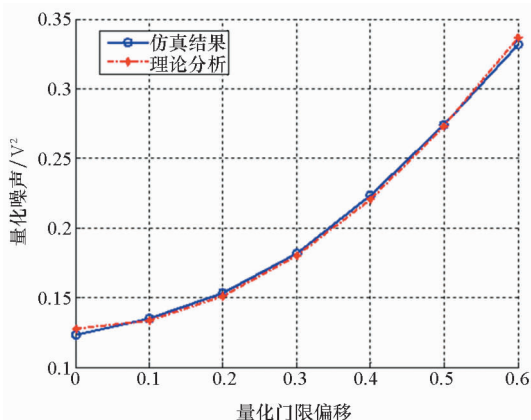
$$E_{\text{theory}} = \alpha + k\beta^2 \quad (8)$$

其中, $\alpha=0.128, k=0.58$ 。可以看出,仿真结果与前面的理论分析基本吻合。

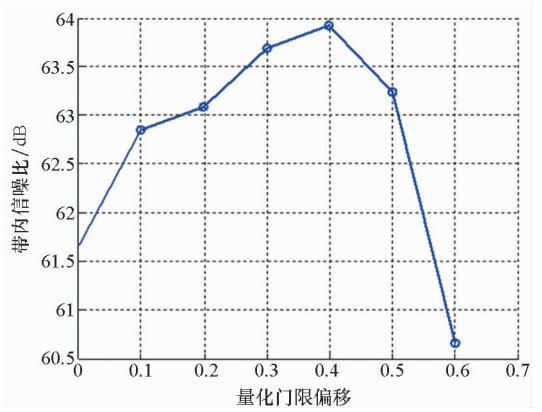
需要说明的是,虽然增大量化门限偏移 β 会增加 DSM 输出序列中的量化噪声总功率,但对于



(a) 0 电平概率
(a) Probability of level 0



(b) 量化噪声功率电平
(b) Power level of quantization noise



(c) DSM 带内 SNR
(c) The in-band SNR of DSM

图 5 量化门限偏移影响分析

Fig. 5 Effect of the shift of quantization threshold

DSM 成型带宽内的 SNR,在一定范围内增大量化门限偏移 β 反而有利于其性能的提升,如图 5(c)所示。分析其原因,这主要得益于 DSM 具有的内在噪声整形能力,此时输出序列中的量化噪声主要表现为频率低端的直流分量以及频率高端的谐波分量。然而,随着 β 的进一步增大,当 DSM 噪声整形能力无法抑制非均匀量化所引入的大量量化噪声时,对应 DSM 输出序列的带内 SNR 将急剧下降。

3 基于非均匀量化的脉冲编码策略

综合以上分析,在 SET 策略的基础上设计一种基于非均匀量化的改进对称等面积变换策略 (Symmetric Equal-area Transformation with Modification, SET-M):首先在传统 3 电平量化 DSM 中引入非均匀量化门限,以调整控制输出序列中的 0 电平概率。在此基础上,对 0 电平脉冲执行等面积变换,从而得到最终的 2 电平脉冲序列,以驱动后级的 SMPA。脉冲编码器的具体原因如图 6 所示。根据前面的理论分析与仿真结论,在非均匀量化 DSM 部分,量化门限偏移 β 设置为 0.4。下面分别利用理论分析和软件仿真来验证 SET-M 策略的性能。



图 6 基于非均匀量化的脉冲编码策略
Fig. 6 Pulse encoding strategy based on non-uniform quantizing

考虑到功放实际硬件电路特性,此处仿真在传统 DSM 输出序列电平的基础上增加了直流偏

置 $A^{[11]}$ 。此时,2电平DSM方案下最终输出序列电平为 $(0, 2A)$,3电平下最终输出序列电平为 $(0, A, 2A)$,同时对电平为 A 的脉冲执行等面积变化。

3.1 序列的带内信噪比及平均转换频率

在带内信噪比性能方面,根据前文的分析及仿真,SET策略在3电平DSM序列基础上直接进行等面积变换,由于存在频域转换误差,从而带来了相应的SNR性能损失。在SET基础上,SET-M策略通过引入非均匀量化,一方面提升了输出3电平DSM序列的SNR,另一方面由于非均匀量化减小了需要等面积变化的0电平概率,从而有利于降低此过程带来的SNR损失。因此可以预见,相比SET序列,SET-M策略能够有效提升输出序列的带内SNR性能。

3电平DSM策略,SET策略以及SET-M策略下的带内SNR性能仿真结果如图7所示。此处引入幅度增益对信号电平进行调整,以分析信号大小对策略性能的影响,其中幅度增益0dB对应信号的最大值为0dB-FS。为了对比常规SMPA驱动方案,这边同时仿真了2电平DSM下的序列情况。

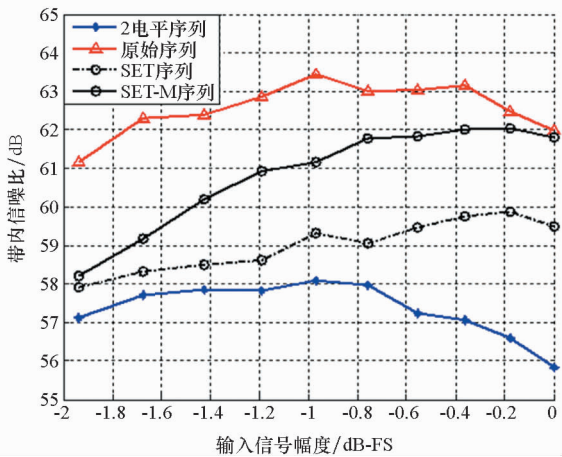


图7 输出脉冲序列带内SNR

Fig. 7 The in-band SNR of output pulse train

首先可以看到相比2电平序列,原始3电平量化序列在带内信噪比性能方面具有明显优势。但其代价是要求后级的SMPA电路进行相应的适配修改,从而增加了系统硬件复杂度。SET策略在原始3电平量化序列的基础上,直接采用等面积变换得到最终的2电平序列。可以看到,在整个输入信号幅度变化范围内,SET序列的带内SNR变化趋势与原始3电平序列基本一致,两者之间的性能差异代表了等面积变换过程所引入的变换误差。进一步对比SET策略和传统SMPA

方案下的2电平序列,可以看到SET策略提升了序列的带内SNR性能,且随着输入信号幅度的增加,带内SNR性能提升的幅度越显著。

对比SET和SET-M策略,可以看到仿真结果验证了前文的分析。相比SET策略,由于非均匀量化本身带来的SNR优化效应以及减小了等面积变化过程中引入的SNR损失,SET-M实现了带内SNR的大幅度提升。当输入单音信号的幅度为0dB-FS时,SET-M策略下得到序列的带内SNR性能接近原始3电平序列。

此外,功放电路在进行开关状态转换时会引入相应的功率损耗,因此输出脉冲序列中的电平转换频率直接影响着SMPA的效率,序列平均转换频率 f_{av} 定义为^[14]:

$$f_{av} = \frac{1}{T_{av}} = N_{tr} \frac{f_s}{N} \quad (9)$$

其中: f_s 为系统采样频率; N 为序列采样周期数。 N_{tr} 为高低电平切换次数,反映脉冲序列中的脉冲总数。平均转换频率越大,意味着功放单位时间内的电平切换次数越多,从而带来的系统开关损耗也越大^[14]。

理论上,根据图2所示的SET具体实现过程,相比原始3电平序列,SET序列增加的平均转换频率与3电平序列中需要进行等面积变化的电平概率 p 成正相关。SET-M策略通过引入非均匀量化,减小了概率 p ,从而能够在一定程度上降低平均转换频率。

图8给出了不同策略下的序列平均转换频率。可以看到,相比2电平和3电平方案,SET策略由于引入了面积等效变换,得到序列的平均转换频率有较大幅度的增加。且输入信号幅度越小,增加的幅度越大。这对应于此时3电平序列

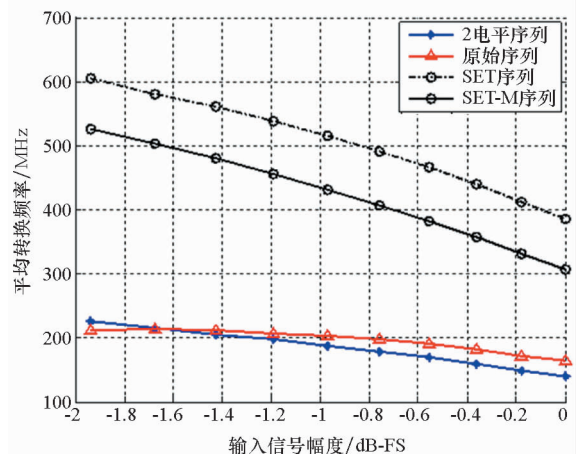


图8 输出脉冲序列的平均转换频率

Fig. 8 Average transition frequency of output pulse train

中需要进行等面积变化的电平概率 p 越大。而 SET-M 策略通过在面积等效变化前首先引入非均匀量化,减小了输出序列中的中间电平概率,从而降低了序列的平均转换频率。根据仿真结果,相比 SET 策略,在整个信号输入幅度范围内,SET-M 策略得到序列的平均转换频率约下降了 16.2%。

3.2 序列的带内信噪比及平均转换频率

除了带内 SNR 和序列平均转换频率,脉冲编码部分还需要关注的一个重要指标是序列编码效率。脉冲编码序列的编码效率代表了有用信号能量在调制序列总能量中所占的比例,其大小直接影响了全数字发信机的整体效率^[14-15]。

$$\eta = \frac{P_{\text{sig}}}{P_{\text{all}}} \quad (10)$$

其中, P_{sig} 为有用信号能量, P_{all} 为输出脉冲序列的总能量。根据面积等效变化以及非均匀量化的具体实现过程,对于不同的脉冲编码策略,最终输出序列中有用信号的能量可以认为近似不变,而序列总能量为:

$$P_{\text{all}} = p_0 (0)^2 + p_1 (A)^2 + p_2 (2A)^2 \quad (11)$$

其中, p_0 、 p_1 和 p_2 分别为最终输出序列中 0、A、2A 电平的概率。

根据量化前后信号均值相同的原则,对于传统的均匀量化方案,可以近似认为 p_0 和 p_2 相等^[10]。在此基础上,对于 2 电平量化方案,可以得到最终输出序列的总能量为 $2A^2$ 。注意到 $p_0 + p_1 + p_2 = 1$, 则 3 电平量化方案下序列的总能量为 $(1 + 2p_2)A^2 = p_e A^2$ 。由于此时 $p_2 < 0.5$, 因此 3 电平序列的总能量要小于 2 电平序列,从而有利于编码效率的提升。

对于 SET 序列,序列总能量为:

$$P_{\text{SET}} = \left(p_0 + \frac{p_1}{2}\right)(0)^2 + \left(p_2 + \frac{p_1}{2}\right)(2A)^2 = 2A^2 \quad (12)$$

与 2 电平量化方案下的序列总能量相同。

对于 SET-M 策略,最终输出序列总能量为:

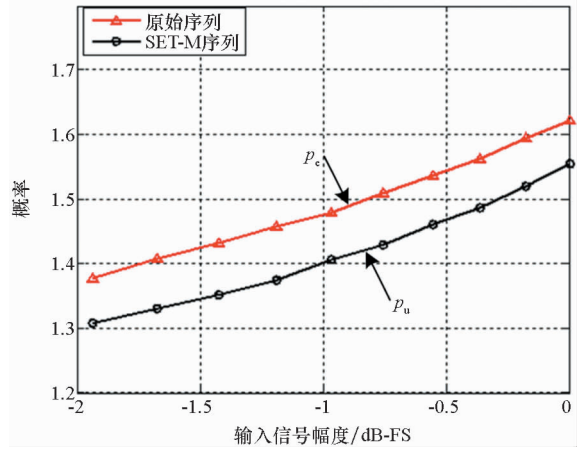
$$P_{\text{Ue}} = \left(p'_0 + \frac{p'_1}{2}\right)(0)^2 + \left(p'_2 + \frac{p'_1}{2}\right)(2A)^2 = (4p'_2 + 2p'_1)A^2 = p_u A^2 \quad (13)$$

与非均匀量化输出序列中 A 电平和 2A 电平的概率直接相关。下面进行仿真验证。

首先分析概率 p_e 和 p_u 值,仿真结果如图 9(a) 所示。可以看到,在整个输出信号幅度范围内, p_e 和 p_u 的值都小于 2。这说明原始 3 电

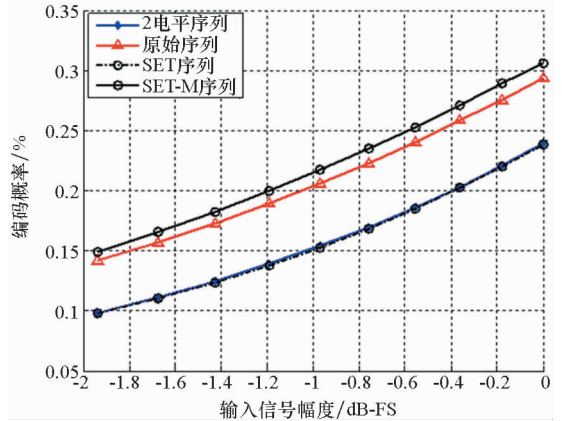
序列和 SET-M 策略得到序列的能量要小于 2 电平序列和 SET 策略,从而有利于编码效率性能的提升。进一步对比 p_e 和 p_u ,可以得到 SET-M 策略生成序列具有最小的总能量。

不同策略下序列的编码效率性能如图 9(b) 所示。可以看到,与文献[8]的结论以及前面的分析相吻合,通过增加量化电平数,原始 3 电平序列相比常规 SMPA 方案下的 2 电平序列,其编码效率性能得到了较大幅度的提升。对于 SET 策略,其编码效率与常规 2 电平序列一致,而 SET-M 策略通过引入非均匀量化,调整了输出序列中相关电平的概率,得到了最小的输出序列能量,从而获得最优的序列编码效率。



(a) 不同电平的概率

(a) Probability of different levels



(b) 编码效率

(b) Coding efficiency

图 9 输出序列的编码效率

Fig. 9 Coding efficiency of output pulse train

4 结论

为了在获得多电平 DSM 优势的同时实现对后级开关功放的直接驱动,本文在传统 3 电平 DSM 的基础上,利用面积等效变换原理设计了

SET策略,将3电平DSM输出序列转换为2电平脉冲序列。理论分析和仿真结果表明,SET策略下获得的脉冲调制序列具有比常规2电平DSM序列更优的带内SNR性能。

在此基础上,文章通过引入非均匀量化,提出了SET-M策略。SET-M策略在提升3电平DSM输出带内SNR的同时减小了序列中需要进行面积等效变换的电平概率,从而实现了SET调制性能的优化。理论分析和仿真结果表明,SET-M策略在SET基础上全面提升了脉冲编码性能,同时相比常规SMPA下的2电平DSM序列,SET-M策略能够获得更优的带内SNR和编码效率性能。

参考文献 (References)

- [1] Mitola J. The software radion architecture [J]. IEEE Communication Magazine, 1995, 33(5): 26-38.
- [2] Raab F H. Class-D power amplifier with RF pulse-width modulation [J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2010: 924-927.
- [3] Fritzin J, Svensson C, Alvandpour A. Design and analysis of a class-D stage with harmonic suppression [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems Part 1 Regular Papers, 2012, 59(6): 1178-1186.
- [4] Dinis D C, Rui F C, Oliveira A S R, et al. A fully parallel architecture for designing frequency-agile and real-time reconfigurable FPGA-based RF digital transmitters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2018, 66(3): 1489-1499.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Fujimoto Y, Ré P L, Miyamoto M, et al. A delta-sigma modulator for a 1-bit digital switching amplifier [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(9): 1865-1871.
- [8] Ebrahimi M M, Helaoui M, Ghannouchi F M, et al. Delta-sigma-based transmitters [J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14(1): 68-73.
- [9] 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.
- [10] Zhou Q, Tan X, Zhu L, et al. A multilevel class-S power amplifier for digital transmitter [C]// Proceedings of the International Conference on Electronics, Communication and Control, 2012: 73-76.
- [11] Podsiadlik T, Dooley J, Farrell R. Improved coding-efficiency two-level source encoder for RF switch-mode power amplifiers[J]. IEEE Transactions and Circuits System II: Express Briefs, 2012, 59(10): 618-622.
- [12] 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 Jianbin, ZHOU Qiang, TAN Xiao, et al. The research of level-transform strategy for switching amplifier based on 2 bit delta-sigma modulator [J]. Electronics Letters, 2015, 43(7): 1413-1417. (in Chinese)
- [13] Norsworthy S R, Schreier R, Temes G C. Delta-sigma data converters (theory, design, and simulation) [M]. New York: Wiley IEEE Press, 1996.
- [14] Johnson T, Sobot R, Stapleton S. Manchester encoded bandpass sigma-delta modulation for RF class D amplifiers [J]. LET Circuits Devices & Systems, 2007, 1(1): 21-26.
- [15] Johnson T, Stapleton S P. Comparison of bandpass $\Sigma \Delta$ modulator coding efficiency with a periodic signal model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 55(11): 3763-3775.