

四阶 Doherty 功率放大器效率分析与设计

陈俊, 苏凯雄, 姚金聪

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 在 OFDM 系统中, 已有的二阶与三阶 Doherty 功率放大器的峰值效率范围无法满足要求, 为此提出四阶 Doherty 放大器的结构设计, 并对四阶 Doherty 放大器进行理论分析, 得到相对应的效率计算公式. 通过 ADS 软件对四阶 Doherty 放大器进行仿真, 得到预期的结果.

关键词: 四阶 Doherty; 放大器; 效率

中图分类号: TN928

文献标识码: A

Design and efficiency analysis of four - stage Doherty power amplifier

CHEN Jun, SU Kai - xiong, YAO Jin - cong

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: AS in the OFDM system, the peak efficiency range of two - stage and three - stage Doherty power amplifier can't meet the requirements, we put forward the structure design of four - stage Doherty amplifier, and make the theoretical analysis, also get the corresponding efficiency calculation formulas. We have done the simulation for four - stage Doherty amplifier through the ADS software, and get the desired results.

Keywords: four - stage Doherty; amplifier; efficiency

随着近年来社会信息化、传输网络化、内容多样化、终端移动化、运营商业化的进程不断推进, 有力地促进了高速移动通信系统和宽带多媒体广播系统的快速更替与发展. 随着无线传输信号带宽的不断增大, 无线信道固有的频率选择性衰落和窄带干扰成为影响无线传输效果的主要因素.

在采用 OFDM(正交频分复用技术)调制方式的系统中, 其 PAPR(峰值平均功率比)高于目前其它移动通信系统(PAPR 超过 12dB 的概率可达 1%), 而目前较为成熟的二阶和三阶 Doherty 功放^[1]的峰值效率范围仅分别为 6 dB 和 9 dB^[2], 无法满足要求. 因此, 本工作开展对理论峰值效率范围可达 12 dB 的四阶 Doherty 功放的研究.

1 四阶 Doherty 放大器的结构

为了使射频功率放大器能够满足大功率峰均比、高频率带宽的 DTMB(中国地面数字电视传输标准)发射系统的应用要求, 所研究的射频功率放大器的峰值效率范围应达到 12 dB, 工作效率应超过 50%. 因此, 在射频功率放大器总体结构方案选择上采用四阶 Doherty 功放电路结构^[3]. 同时, 考虑到各个平行支路放大器电路参数的平衡性问题, 设计了两个二阶 Doherty 功放电路组成的四阶 Doherty 功放电路结构, 如图 1 所示, 这可以利用对称性好、参数一致性好的 LDMOS 射频功率对管器件, 以有利于不同支路的有源器件参数和匹配网络参数保持相同的温度、电压变化特性, 保证整个放大器的稳定性和可靠性^[4].

为了获得理想的工作效率的要求目标, 可以通过适当选择各路放大器的直流偏置工作点, 使所设计的四阶 Doherty 功率放大器的四个峰值效率回退点 P1、P2、P3 和 P4 分别处于 0、3、6 和 12 dB^[5-6], 如图 2 所示. 图 2 仿真模拟的四阶 Doherty 功率放大器的饱和输出功率为 48dBm, 以保证该功率放大器的峰值效率范围达到 12 dB 的要求.

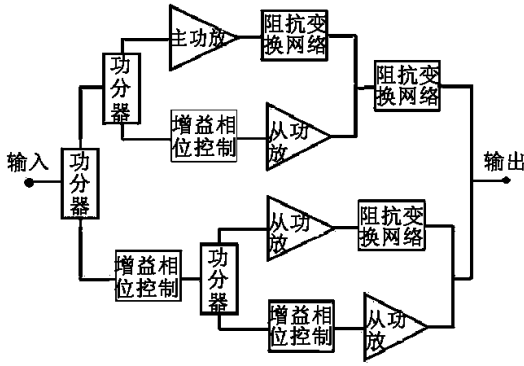


图 1 四阶 Doherty 功放的结构图

Fig. 1 The structure chart of four-stage Doherty amplifier

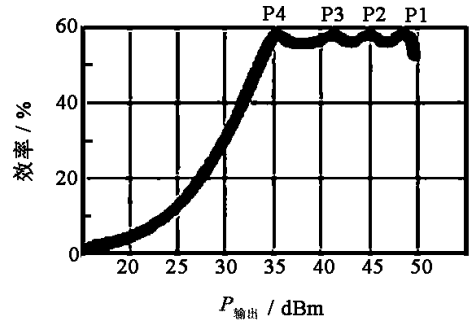


图 2 功放的效率峰值效率点

Fig. 2 The efficiency points of power amplifier

2 四阶 Doherty 放大器效率的理论分析

四阶 Doherty 放大器般由一个主放大器 (Carrier amplifier) 和三个辅助放大器 (Peak amplifier) 组成, 是在三阶 Doherty 放大器的基础上增加一个辅助放大器实现的^[7]. 主放大器采用 AB 类放大器, 辅助放大器采用 C 类放大器, 为了保证四路的信号具有相同的相位特性, 在电路中加入了相应的相位延迟线和四分之一波长的延迟线进行补偿. 电路的框图如图 3 所示.

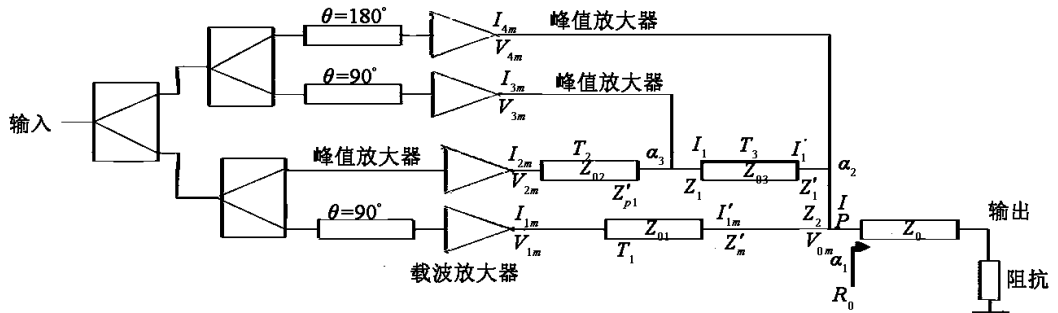


图 3 四阶 Doherty 功放电路结构

Fig. 3 The circuit configuration of four-stage Doherty amplifier

首先对出现的符号进行说明: V_{1m} 、 V_{2m} 、 V_{3m} 、 V_{4m} : 主功放、从功放 1、从功放 2、从功放 3 的工作电压; T_1^2 、 T_2^2 、 T_3^2 分别为三段传输线的电压增益; V_{DD1} 、 V_{DD2} 、 V_{DD3} 、 V_{DD4} : 主功放、从功放 1、从功放 2、从功放 3 的工作电压; V_{om} : 功放输出电压; V_m : 主功放饱和时电压; V_{DD} : 功放的饱和电压; Z_{01} 、 Z_{02} 、 Z_{03} 、 Z_0 : 各段 $\lambda/4$ 变换线的特性阻抗; Z_m 、 Z'_m : 传输线的阻抗; η : 功放总效率.

2.1 峰值功率工作时

从图 3 可以看出: $V_{1m} = V_{DD1}$, $V_{2m} = V_{DD2}$, $V_{3m} = V_{DD3}$, $V_{4m} = V_{om} = V_{DD4}$, 假设 $V_{DD1} = V_{DD2} = V_{DD3} = V_{DD4} = V_{DD}$, 因为 $T_1^2 = \frac{V_{0m}^2}{V_{1m}^2} = \frac{Z'_m}{Z_m} = \frac{Z_{01}^2}{Z_m^2} = 1$, 所以有:

$$Z_{01} = Z_m = Z'_m \tag{1}$$

同理可以推出, $T_2^2 = \frac{V_{3m}^2}{V_{2m}^2} = \frac{Z'_{p1}}{Z_{p1}} = \frac{Z_{02}^2}{Z_{p1}^2} = 1$, $T_3^2 = \frac{V_{4m}^2}{V_{3m}^2} = \frac{Z'_1}{Z_1} = \frac{Z_{03}^2}{Z_1^2} = 1$, 于是得到:

$$Z_{02} = Z_{p1} = Z'_{p1} \tag{2}$$

$$Z_{03} = Z_1 = Z'_1 \tag{3}$$

假设 α_1 为主功放功率 (P_C) 与总功率 (P_0) 比, 即 $\alpha_1 = \frac{P_C}{P_0}$, 则有:

$P_c = \alpha_1 P_0 = \alpha_1 \frac{V_{0m}^2}{2R_0} = \frac{V_{1m}^2}{2Z'_m} = \frac{V_{0m}^2}{2Z'_m}$, 所以 $Z'_m = \frac{R_0}{\alpha_1}$, 由式(1)可以得到:

$$Z_{01} = Z'_m = \frac{R_0}{\alpha_1} \quad (4)$$

同理可以推出:

$$Z_{02} = \frac{Z_1}{\alpha_3} \quad (5)$$

$$Z_{03} = \frac{Z_2}{\alpha_2} \quad (6)$$

其中: α_3 为峰值功放1功率(P_1)与峰值功放1和峰值功放2功率和($P_1 + P_2$)之比, α_2 为峰值功放1和峰值功放2功率和功率($P_1 + P_2$)与峰值功放1、峰值功放2功率和峰值功放3之和($P_1 + P_2 + P_3$)之比. 又

因为($P_1 + P_2 + P_3$) = $(1 - \alpha_1)P_0$, 所以有 $Z_2 = \frac{R_0}{1 - \alpha_1}$, 这时可以推出:

$$Z_{03} = \frac{Z_2}{\alpha_2} = \frac{R_0}{(1 - \alpha_1)\alpha_2} \quad (7)$$

$$Z_{02} = \frac{Z_1}{\alpha_3} = \frac{Z_{03}}{\alpha_3} = \frac{R_0}{(1 - \alpha_1)\alpha_2\alpha_3} \quad (8)$$

2.2 低功率, 只有主功放工作

假设使用的传输线是无耗, 根据功率守恒有 $\frac{1}{2}I_{1m}^2 Z_m = \frac{V_{0m}^2}{2Z'_m}$, 又因为 $Z'_m = \frac{Z_{01}}{\alpha_1}$, 所以有:

$$I_{1m} = \frac{V_{om}}{Z_{01}} = \frac{\alpha_1 V_{om}}{R_0} \quad (9)$$

以B类功放计算, 因为 $I_{dc} = \frac{2}{\pi}I_{1m} = \frac{2}{\pi} \frac{\alpha_1 V_{om}}{R_0}$, 所以:

$$\eta = \frac{\frac{V_{0m}^2}{2R_0}}{I_{dc} V_{DD}} = \frac{\pi}{4} \frac{V_{om}}{V_{DD}} \frac{1}{\alpha_1} \quad (10)$$

当 $V_{1m} = V_{DD}$ 时, 主功放达电压饱和, 此时 $V_m = I'_{1m} Z_{01} = I_0 Z_{01} = \frac{V_{om}}{R_0} \frac{R_0}{\alpha_1} = \frac{V_{om}}{\alpha_1} = V_{DD}$ 即

$$V_{om} = \alpha_1 V_{DD} \quad (11)$$

2.3 主功放电压饱和, 辅助功放1开启

这时有 $V_{1m} = V_{DD}$, $I_{1m} = \frac{V_{om}}{Z_{01}} = \frac{\alpha_1 V_{om}}{R_0}$, $I'_{1m} = \frac{V_{1m}}{Z_{01}} = \frac{\alpha_1 V_{DD}}{Z_{01}}$, 同时存在 $V_{2m} = I_1 Z_{02} = \frac{V_{om}}{Z_{03}} Z_{02} = \frac{V_{om}}{\alpha_3}$,

$I_{2m} = \frac{V_{3m}}{Z_{02}} = \frac{I'_1 Z_{03}}{Z_{02}} = \frac{I_2 Z_{03}}{Z_{02}} = \alpha_3 I_2 = \alpha_3 (\frac{V_{om}}{R_0} - I'_{1m}) = \alpha_3 (\frac{V_{om}}{R_0} - \frac{\alpha_1 V_{DD}}{Z_{01}})$, 可以推出:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\frac{V_{0m}^2}{2R_0}}{I_{dc} V_{DD}} = \frac{\frac{V_{0m}^2}{2R_0}}{\frac{2}{\pi} (I_{1m} + I_{2m}) V_{DD}} = \frac{\pi}{4} \frac{V_{om}}{V_{DD}} \frac{\frac{V_{om}}{R_0}}{\frac{\alpha_1 V_{om}}{R_0} + \frac{\alpha_3 V_{om}}{R_0} - \alpha_1 \alpha_3 \frac{V_{DD}}{R_0}} \\ &= \frac{\pi}{4} \frac{V_{om}}{V_{DD}} \frac{V_{om}}{\alpha_1 V_{om} + \alpha_3 V_{om} - \alpha_1 \alpha_3 V_{DD}} \end{aligned} \quad (12)$$

当 $V_{2m} = V_{DD}$ 时, 峰值功放1也达电压饱和, 此时:

$$V_{om} = \alpha_3 V_{DD} \quad (13)$$

2.4 主功放和辅助功放1电压饱和, 辅助功放2开启

这时有

$$\begin{aligned}
 V_{1m} &= V_{2m} = V_{DD}, I_{1m} = \frac{\alpha_1 V_{om}}{R_0}; \\
 I_{2m} &= \frac{V_{3m}}{Z_{02}} = \frac{I'_1 Z_{03}}{Z_{02}} = \frac{I_2 Z_{03}}{Z_{02}} = \alpha_3 I_2 = \alpha_3 \left(\frac{V_{om}}{R_0} - I'_{1m} \right) = \alpha_3 \left(\frac{V_{om}}{R_0} - \frac{\alpha_1 V_{DD}}{R_0} \right), \\
 I_{3m} &= (I_1 - I'_{2m}) = \frac{V_{om}}{Z_{03}} - \frac{V_{2m}}{Z_{02}} = \alpha_2 (1 - \alpha_1) \frac{V_{om}}{R_0} - \alpha_3 \alpha_2 (1 - \alpha_1) \frac{V_{DD}}{R_0}
 \end{aligned}$$

所以可以推出

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\frac{V_{om}^2}{2R_0}}{I_{dc} V_{DD}} = \frac{\frac{V_{om}^2}{2R_0}}{\frac{2}{\pi} (I_{1m} + I_{2m} + I_{3m}) V_{DD}} \\
 &= \frac{\pi V_{om}}{4 V_{DD} (\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{om} - (\alpha_1 \alpha_3 + \alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3) V_{DD}} \quad (14)
 \end{aligned}$$

当 $V_{3m} = V_{DD}$ 时, 峰值功放 1 也达电压饱和, 即

$$V_{3m} = I'_1 Z_{03} = \left(\frac{V_{om}}{R_0} - I'_{1m} \right) Z_{03} = \left(\frac{V_{om}}{R_0} - \frac{\alpha_1 V_{DD}}{R_0} \right) Z_{03} = \frac{1}{(1 - \alpha_1) \alpha_2} (V_{om} - \alpha_1 V_{DD}) = V_{DD}$$

此时

$$V_{om} = (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{DD} \quad (15)$$

2.5 主功放和辅助功放 1、2 电压饱和, 辅助功放 3 开启

这时有

$$\begin{aligned}
 V_{1m} &= V_{2m} = V_{3m} = V_{DD}, I'_{1m} = \frac{V_{1m}}{Z_{01}} = \frac{\alpha_1 V_{DD}}{Z_{01}}, I'_{2m} = \frac{V_{DD}}{Z_{02}} = \frac{V_{DD}}{R_0} (1 - \alpha_1) \alpha_2 \alpha_3 \\
 I_1 &= \frac{V_{om}}{Z_{03}} = \frac{V_{om}}{R_0} (1 - \alpha_1) \alpha_2, I_{1m} = \frac{\alpha_1 V_{om}}{R_0}; I_{2m} = \frac{V_{3m}}{Z_{02}} = \frac{V_{DD}}{R_0} (1 - \alpha_1) \alpha_2 \alpha_3 \\
 I_{3m} &= I_1 - I'_{2m} = \frac{V_{om}}{R_0} (1 - \alpha_1) \alpha_2 - \frac{V_{DD}}{R_0} (1 - \alpha_1) \alpha_2 \alpha_3 \\
 I_{4m} &= I_{0m} - I'_{1m} - I_1 = \frac{V_{om}}{R_0} - \alpha_1 \frac{V_{DD}}{R_0} - (1 - \alpha_1) \alpha_2 \frac{V_{DD}}{R_0}
 \end{aligned}$$

所以可以推出

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\frac{V_{om}^2}{2R_0}}{I_{dc} V_{DD}} = \frac{\frac{V_{om}^2}{2R_0}}{\frac{2}{\pi} (I_{1m} + I_{2m} + I_{3m} + I_{4m}) V_{DD}} \\
 &= \frac{\pi V_{om}}{4 V_{DD} (1 + \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{om} - (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{DD}} \quad (16)
 \end{aligned}$$

综上: 四路 Doherty 的效率为:

$$\eta = \begin{cases} \frac{\pi V_{om}}{4 V_{DD} \alpha_1} & (0 \leq V_{om} \leq \alpha_1 V_{DD}) \\ \frac{\pi V_{om}}{4 V_{DD} \alpha_1 V_{om} + \alpha_3 V_{om} - \alpha_1 \alpha_3 V_{DD}} & (\alpha_1 V_{DD} < V_{om} \leq \alpha_3 V_{DD}) \\ \frac{\pi V_{om}}{4 V_{DD} (\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{om} - (\alpha_1 \alpha_3 + \alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3) V_{DD}} & (\alpha_3 V_{DD} < V_{om} \leq (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{DD}) \\ \frac{\pi V_{om}}{4 V_{DD} (1 + \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{om} - (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{DD}} & ((\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2) V_{DD} < V_{om} \leq \alpha_1 V_{DD}) \end{cases} \quad (17)$$

3 仿真与实现

为了验证分析和研究四阶 Doherty 功率放大器性能, 采用了基于飞思卡尔 LDMOS MRF6P3450 大信号

模型的功率放大器模块, 利用 ADS 软件进行模拟仿真. Doherty PA 应用在 DVB - T 应用系统中 UHF 波段. 根据所选择的 $\alpha_1 = 1/4$ 、 $\alpha_2 = 1/2$ 、 $\alpha_3 = 2/3$, 以及各路输入信号的功率比为 1: 1: 1: 1, 选择 $Z_{01} = 200 \Omega$, $Z_{02} = 200 \Omega$, $Z_{03} = 100 \Omega$, 其中 $R_0 = 50 \Omega$ 为 $1/4$ 波长传输线的特性阻抗. 图 4 所示的模拟电路原理图使用了 30 mm 的 RO4350 基质. 仿真结果如图 5 所示, 其中当使用四路均衡信号模式且输出功率为 300 W 时输出效率可达到 52%. 该四阶 Doherty 功率放大器在使用 64QAM 调制信号时的可测 P_{1dB} 为 59 dBm, 并且功率回退 6 dB (53 dBm) 时效率为 34%. 在 53 dBm 时 ACPR (邻信道功率比) 和 MER (调制误差比) 所获得的输出功率分别为 31 和 28 dB.

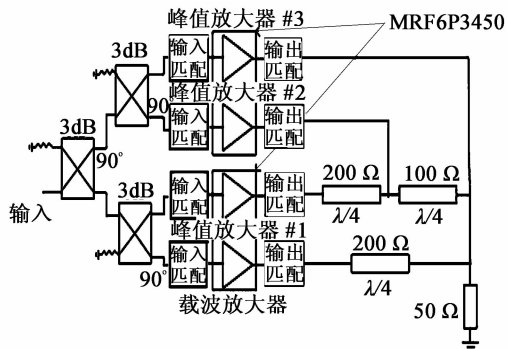


图 4 模拟电路原理图

Fig.4 Simulated circuit schematic

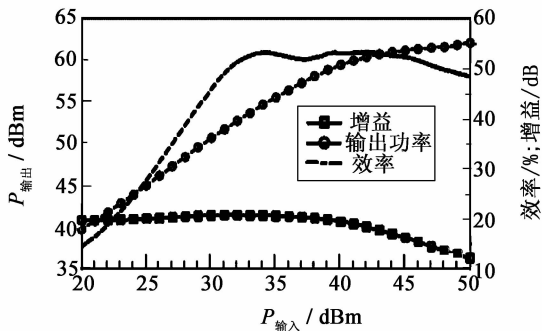


图 5 四阶 DPA 输出功率、增益及 PAE

Fig.5 Output power, gain, and PAE of the four - stage DPA

4 结论

为了进一步提高功率放大器 Doherty 的效率, 设计了一种新型的四阶 Doherty 功率放大器. 理论分析和仿真结果显示, 设计的四阶 Doherty 功率放大器可以在一定动态范围内提高效率, 并且降低四路峰值效率的范围, 提高整个系统的性能.

参考文献:

- [1] Doherty W H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves[C]// Proceedings of the Institute of Radio Engineers. [s. l.]: IEEE,1936, 24(9) : 1 163 - 1 182.
- [2] 陈俊, 苏凯雄, 姚金聪, 等. 新型三路 Doherty 功放的设计[J]. 微波学报, 2012, 28(4) : 60 - 65.
- [3] Yang Y, Cha J, Shin B, et al. A fully matched N - way Doherty amplifier with optimized linearity [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(3) : 986 - 993.
- [4] Srirattana N, Raghavan A, Heo D, et al. Analysis and design of a high - efficiency multistage Doherty power amplifier for wireless communications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(3) : 852 - 860.
- [5] Markos A Z, Bathich K, Golden F, et al. A 50 W unsymmetrical gan Doherty amplifier for LTE applications[C]// Proceedings of the 40th European Microwave Conference. Paris: IEEE, 2010: 28 - 30.
- [6] Neo W C E, Qureshi J, Pelk M J, et al. A mixed - signal approach towards linear and efficient N - way Doherty amplifier [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(5) : 866 - 879.
- [7] Yao Jin - cong, Shen Guo - qing, Zhang Guang - fei, et al. A novel four - stage 200W Doherty power amplifier for DVB - T transmitter [C]// 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2012, 1: 1 - 3.

(责任编辑: 林晓)