

引用格式:刘策伦,罗靖杰,王芳.一种适用于 QAM-OFDM 自适应分配算法 [J]. 微电子学与计算机,2021,38(3):61-65.
[LIU C L, LUO J J, WANG F. An adaptive bit allocation algorithm for QAM-OFDM[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(3):61-65.]

一种适用于 QAM-OFDM 自适应分配算法

刘策伦,罗靖杰,王 芳

(北京理工大学 信息与电子学院,北京 100088)

摘 要:为解决在正交幅度调制-正交频分复用调制(QAM-OFDM)系统中的自适应比特分配算法复杂度过高的问题,提出了一种子载波比特分配方案.基于边缘自适应准则,通过对信道增益的预处理,在迭代分配中利用与运算以及移位操作来减少贪婪(greedy)算法中的计算和搜寻操作.仿真结果显示:在相同的仿真环境下,改进算法与贪婪算法有着几乎相同的比特分配效果以及误比特率性能,并且较贪婪算法所用的时间更少,由此验证了改进算法具有很高的实用性.

关键词: 正交频分复用;自适应调制;比特分配;正交幅度调制

中图分类号: TN802

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)03-0061-05

An adaptive bit allocation algorithm for QAM-OFDM

LIU Ce-lun, LUO Jing-jie, WANG Fang

(School of information and electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problem of excessive complexity of the adaptive bit allocation algorithm in the orthogonal amplitude modulation-orthogonal frequency division multiplexing modulation (QAM-OFDM) system, an adaptive bit allocation algorithm is proposed. Based on the edge adaptation criterion, with the preprocessing of the channel gain, the iterative allocation uses AND operations and shift operations to reduce the calculation and sorting operations in the greedy algorithm. In the same simulation environment, the simulation results show that the improved algorithm has almost the same bit allocation effect as the greedy algorithm, and it takes less time than the greedy algorithm, thus verifying that the improved algorithm has high practicability.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; adaptive modulation; bit allocation; orthogonal amplitude modulation

1 引言

正交频分复用技术,即 OFDM,是一种子载波时域相互正交,频域相互重叠的多载波调制技术^[1]其基本思想是将高速的数据流通过串并转换变换为多路速率较低的子数据流.这样,一个宽带频率选择性信道便可以划分为多个窄带平坦衰落信道.由于子信道上数据传输速率较低,OFDM 具有很强的抗多径衰落和抗干扰能力^[2].而相较于频分多路复用技术(FDM),OFDM 具有较高的频谱利用率和数据

速率^[3].正交幅度调制(QAM)技术是一种幅度和相位联合控制的正交调制技术,与正交频分复用(OFDM)相结合,可以大幅度提高系统的频带利用率^[4].在一个 OFDM 通信系统中可以引入信道估计技术来确定不同子信道的实时信道状态信息(CSI),信道增益的大小也决定了不同子信道的传输能力.自适应的比特分配算法能够随着信道信息自适应的对每个子信道使用不同的调制方式^[5],从而充分利用信道条件较好的子信道以及避免某些干扰较大的子信道^[6].第五代移动通信技术(5G)是目

前国内外移动通信领域的研究热点,而 5G 最大的特点即是高带宽,低延时.因此对 OFDM 自适应调制算法的实时性以及其实现复杂度提出了更高的要求^[7].

当前对 OFDM 系统自适应比特分配的研究,主要基于以下两种准则:一种是速率自适应准则,即在发射功率固定的情况下最大化传输速率;另一种是边缘自适应准则,即在总传输速率固定的情况下最小化发射功率或最小化系统的误比特率^[8].基于边缘自适应准则设计的算法中,贪婪算法(Greedy 算法)能够达到最佳的比特和功率分配结果^[9].在该算法的步骤为,在每次分配分配前,找到增加 1 个比特所需额外功率最小的子信道,将该子信道的比特数目增加 1 个,直到分配完所有的比特数^[10].但贪婪算法需要对子信道进行大量的计算和搜寻操作,其计算复杂度很大,不适用于实时性要求较高的通信场合.本文依据贪婪算法的设计思路,综合了动态子带划分算法中依据信道条件划分子带的想法,提出了一种改进的适用于 QAM-OFDM 系统的自适应比特分配算法.该算法在计算额外功率时利用近似操作,将信道增益存储为二进制数据,并通过与运算来找到信道增益较大的子信道组,并给这部分子信道分配信息比特.分配后,通过移位操作更新信道增益表,依次迭代,直到剩余比特数不足以分配给找到的子信道组,再对剩余的子信道进一步的分配.仿真结果显示,该算法的分配结果与贪婪算法基本一致,并且显著降低了算法的时间复杂度,在子信道数量以及信息比特数量较大时,算法运行时间低于贪婪算法以及 CHOW 算法,是一种算法时间很短且适用于工程落成的算法.

2 系统模型

自适应的 OFDM 系统模型如图 1 所示.自适应分配器利用信道估计技术得到宽带衰落信道的实时信道状态信息,并通过自适应分配器对子信道进行自适应的比特分配.发射端通过 QAM 调制器将对每个子信道设置相应的调制方式,然后经过 IFFT,并串转换,增加循环前缀等操作之后发射到衰落信道.接收端从衰落信道接收到消息后经过去除循环前缀,串并转换和 FFT 后,QAM 解调器使用对应的解调方式恢复出相应的用户数据.

故基于边缘自适应原则的 OFDM 自适应调制的优化模型为

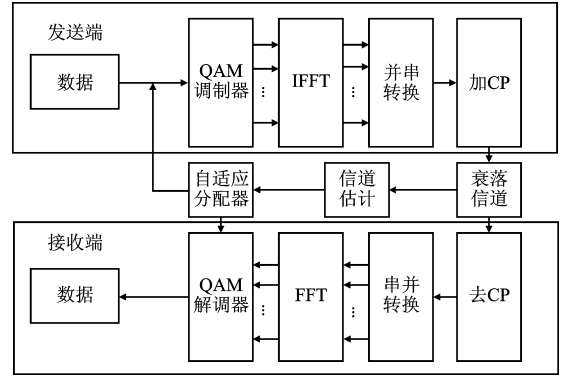


图 1 OFDM 系统框图

$$\min P_T = \sum_{i=1}^N \epsilon_T(i) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } R_T = \sum_{i=1}^N R_i \quad (2)$$

3 改进的比特分配算法

3.1 算法原理

改进算法使用的调制方式为 QAM 调制,星座点的个数是 2 的次方,常见的 QAM 形式有 16-QAM、64-QAM、256-QAM 等.

假设子信道信息比特的分配步长为 b .若星座图中点之间最小距离为 d ,则 M 进制 QAM 调制所需要的平均能量为

$$\epsilon_{\text{avg}}^{\text{QAM}} = (M-1)d^2/6 \quad (3)$$

式中, $M=2^c$, c 为信息比特数量.则在单边功率谱密度为 N_0 的高斯白噪声的 AWGN 信道中,误比特率为 P_e .

$$p_e \leq 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\frac{d}{\sqrt{2N_0}}\right) \leq 4Q\left(\frac{d}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (4)$$

式中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$,为概率积分函数.改进算法基于边缘自适应准则,则在此调制方式下,在目标误比特率 P_e 的要求下,星座点之间最小距离可由 (4) 式近似为

$$d^2 = 2N_0 [Q^{-1}(P_e/4)]^2 \quad (5)$$

接收端所需接收的最小能量为

$$\epsilon_R(c) = \frac{N_0}{3} [Q^{-1}(P_e/4)]^2 (2^c - 1) \quad (6)$$

由于子信道可看作窄带平坦信道,设信道增益 $|H|^2$,发射端所需发送的最小能量为

$$\epsilon_T(c) = \frac{\epsilon_R(c)}{|H|^2} \quad (7)$$

信道分配比特的值增加 b ,发射端所需增加的发射能量为

$$\epsilon_T(c+b) - \epsilon_T(c) = \frac{N_0}{3} [Q^{-1}(P_e/4)]^2 (2^b - 1) \frac{2^c}{|H|^2} \quad (8)$$

式中,若系统的目标误比特率 P_e 以及分配步长 b 保持一定,可设置定值 α

$$\alpha = \frac{N_0}{3} [Q^{-1}(P_e/4)]^2 (2^b - 1) \quad (9)$$

则可计算出每增加固定步长 b 比特数,发射端所需增加的发射能量为

$$\epsilon_T(c) = \alpha \frac{2^c}{|H|^2} \quad (10)$$

所以,在 OFDM 调制的情况下,若子信道 i 已分配的比特数为 c_i ,该子信道的信道增益为 $|H_i|^2$,则在子信道 i 上增加步进 b 的比特数所需要额外提供的能量为 $\Delta\epsilon_i(c_i)$

$$\epsilon_i(c_i) = \alpha \frac{2^{c_i}}{|H_i|^2} \quad (11)$$

贪婪算法在每一次比特分配步骤,通过计算 $\Delta\epsilon_i(c_i)$,搜寻额外分配能量最小的子信道,然后将比特分配给该子信道^[11]. 在下次分配中重新计算该子信道所需的额外能量 $\Delta\epsilon_i(c_i)$. 而在 QAM 调制中可以看出, $\Delta\epsilon_i(c_i)$ 在每一次分配所需的额外能量只与当前已分配比特数相关. 若比特分配的步进 b 的值为 2,则子信道 i 在分配比特之后,所需要的额外能量为分配前所需能量的 4 倍. 这个特性在工程应用中可使用二进制移位操作来替换贪婪算法中分配后的计算.

可以使用 $\Delta\epsilon_i(c_i)$ 的倒数来进行搜寻,每次迭代分配比特给信道增益最大的子信道 i^*

$$i^* = \operatorname{argmax}_i |H_i|^2 / 2^{c_i} \quad (12)$$

3.2 对信道信息的预处理

改进算法在预处理中,首先计算每个子信道的 $|H_i|^2 / 2^{c_i}$ 值,初始时 $c_i = 0$,则需要计算的值为子信道的信道增益 $|H_i|^2$,将 $|H_i|^2$ 的值增大 2^{bias} 再取整转为二进制存储,即可得到 $\beta(i)$. 为了保证存储的精度, $\beta(i)$ 的最大值需要尽量达到存储器的有效位数. bias 的值根据具体 $|H_i|^2$ 的值域范围来确定. 即在初始时, $\beta(i)$ 中每个元素存储的便是放大 2^{bias} 的信道增益,作为“等效信道增益”. 在后续分配比特步骤后,根据式(11),只需将 $\beta(i)$ 向右移位步进值 b ,即等价于 $\beta(i)$ 的值除以 2^b ,即可得到该子信道分配后的“等效信道增益”,节约了大量的运算.

3.3 搜寻步骤的优化

由于 3.2 节中将子信道增益通过预处理再以二进制的形式储存为 $\beta(i)$. 假设存储器位数为 64 位,

则可以从高位依次向低位搜寻 $\beta(i)$ 较大的子信道组. 在搜寻定义变量 j , 则 2^j 的二进制表示是一个 j 位为 1, 其他位都为 0 的数(0 位为最低位). 将 j 的初始值定为 63, 搜寻 $\beta(i)$ 和 2^j 与运算结果大于 0 的 n 个子信道. 若剩余比特数大于 $n \times b$, 则对分组内 n 个子信道进行比特分配, 并将分配后的子信道 $\beta(i)$ 向右移位步进值 b . 分配步骤结束后, 将 j 的值递减继续进行下一轮的搜寻, 直到所有比特分配完毕或 j 的值为 0.

若在某次分配步骤中剩余比特数 rest 不足以对分组内子信道进行分配, 则搜寻 $\beta(i)$ 较大的 rest/ b 个子信道进行分配.

3.4 算法详细步骤

(1) 首先初始化子信道数量 Nfft, 比特分配的步进为 b , 每个子信道可分配的最大比特数为 $C_{\max}$. 通过信道估计技术得到每个子信道的实时信道状态信息, 计算出信道增益 $|H_i|^2$, $i = 1, 2, \dots, \text{Nfft}$, 再将信道增益通过预处理得到每个信道的 $\beta(i)$. j 的初始值为 63, 剩余比特数初始为总比特数 R_T . 子信道初始信息比特数 $N_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, \text{Nfft}$.

(2) 搜寻阶段: 将 2^j 与 $\beta(i)$ 作与运算, K 为运算值大于 0 的子信道集合, card K 表示 K 的元素个数 n . 若 n 的值大于 0, 则执行步骤 3, 若 K 的集合为空, 则将 j 减 1 后继续执行步骤 2.

(3) 判断剩余比特数 rest 是否足够本次分配, 若足够, 则执行步骤 4. 否则执行步骤 6.

(4) 对 K 内的子信道进行比特分配, 若该子信道未达到可分配的最大比特数 $C_{\max}$, 则将比特分配给该子信道, $N_i = N_i + b$, 并将 $\beta(i)$ 的值向右移位 b . 若该子信道已分配的比特数达到可分配的最大比特数, 则将该子信道的 $\beta(i)$ 值赋值为 0, 后续迭代中该子信道均无法参与分配.

(5) 将 j 的值减少 1, 若 j 的值大于等于 0, 跳至步骤 2, 否则结束.

(6) 通过 $\beta(i)$ 的性质可知, 对于 K 中的每一个子信道 i , 都有 $2^j \beta(i) < 2^{j+1}$, 所以本次分配中每个子信道最多只可分配 b 比特. 只需将 K 中子信道的 $\beta(i)$ 排序, 寻找较大的 rest/ b 个子信道并进行比特分配.

(7) 结束比特分配, 依据目标误比特率对子信道进行功率分配.

4 复杂度分析

经典的贪婪算法在每次分配比特时都需要计

算、搜寻, 这些都会使得系统的复杂度提高, 缺乏实用性. 假设步进 b 为 1, 子信道数量为 N_{fft} , 需传输的总比特数为 R_T . 则经典的贪婪算法需要进行 R_T 次比特分配步骤, 每次分配时需要搜寻功率增长量最小的子信道, 需要进行 N_{fft} 次比较, 而后对功率增长量更新. 所以, 经典的贪婪算法所需的计算次数为 $N_{fft} + R_T$, 所需的搜寻次数为 $R_T \times N_{fft}$. 改进算法的复杂度主要取决于选择的存储位数 N_b , 所需的计算次数为初始信道增益的计算并预处理为 $\beta(i)$, 需要进行 N_{fft} 次计算; 每次 j 的值更新后需要搜寻信道条件较好的子信道组, 在算法最差情况下, 共需进行 $N_b \times N_{fft}$ 次与运算以及移位操作; 在剩余比特数不足以完成本次分配时, 需要对本次筛选子信道组的 $\beta(i)$ 进行排序, 若使用一般的归并排序算法, 算法的时间复杂度为 $N_{fft} \times \log_2 N_{fft}$. 综上所述, 贪婪算法的时间复杂度为 $R_T \times N_{fft}$, 而改进后的 OFDM 自适应比特分配算法的时间复杂度为 $\max(\log_2 N_{fft}, N_b) \times N_{fft}$.

改进算法在预处理后, 利用与运算和移位操作, 可以在一次迭代中搜寻到多个信道条件较好的子信道并进行分配, 减少了算法迭代次数, 通过大量仿真, 算法结束时迭代次数一般在 20 次以内. 改进算法的时间复杂度与 R_T 无关, 图 2 是算法在相同设备下的 100 次运算的平均运行时间, 需分配的比特数 R_T 为子信道数量的 4 倍. 由仿真结果可以看出, 在子载波数量较少时, 改进算法的时间优势较小. 随着子载波数量以及需要分配比特数量增大, 改进算法的时间复杂度会远远低于经典的贪婪算法和 CHOW 算法.

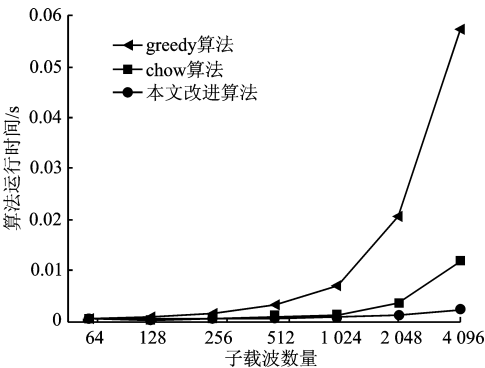


图 2 算法运行时间

5 仿真结果

仿真所使用平台为 matlab R2017b, 仿真中使用的子信道数量为 64, 步进 $b=2$, 给定误码率 $P_e=$

$1e-5$, 一个符号所需传输的总比特数为 256, 每个信道最大可传输 8 个比特, 改进算法预处理步骤中 $bias$ 选择为 60, 存储位数 $N_b=64$. 信道选用具有频率选择性的六径瑞利衰落信道. 图 3 为贪婪算法与本文改进算法的比特分配图, 图 4 为二者的功率分配图.

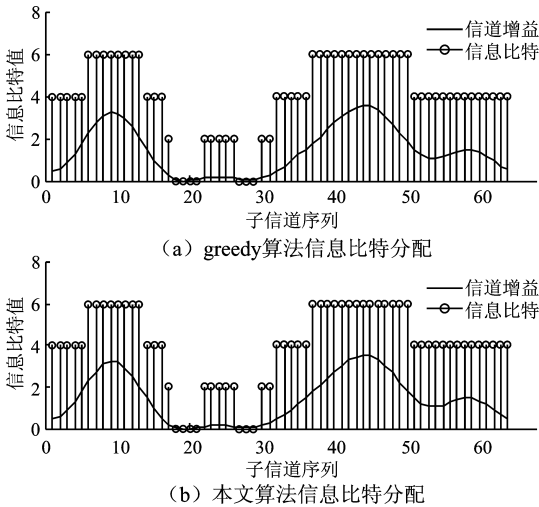


图 3 比特分配结果

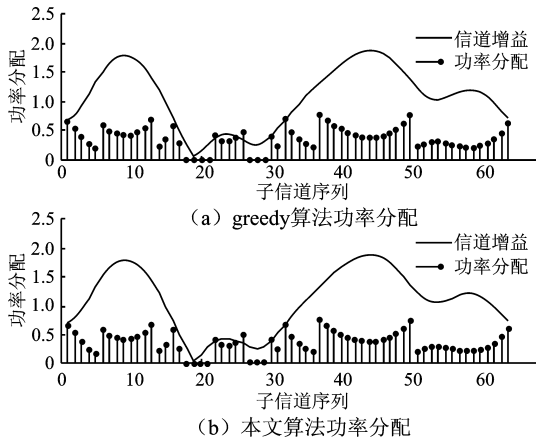


图 4 功率分配结果

大量的仿真结果可以证明, 当预处理步骤的 $bias$ 数值以及 $\beta(i)$ 的存储位数 N_b 选择适当时, 改进算法与贪婪算法在比特分配的结果基本一致. 在信道条件较好的子信道上所分配的比特数更多, 信道条件差的子信道所分配的比特数更少或不为其分配信息比特, 符合理论分配情况.

图 5 为改进算法与贪婪算法在相同条件下的误比特率对比, 可以看出, 改进算法的误比特率性能与贪婪算法相差并不显著. 证明改进算法分配结果的可靠性.

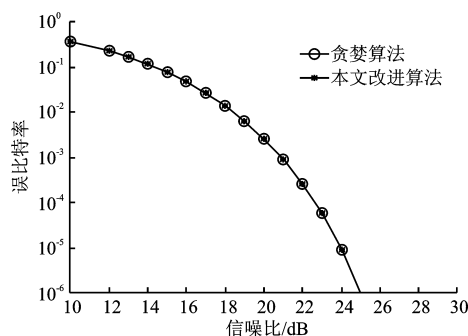


图5 算法误比特率性能

6 结束语

本文针对 QAM-OFDM 系统中贪婪算法在自适应比特分配的算法复杂度过高的不足,在一定的近似前提下,提出了一种通过预处理以及移位来减少运算复杂度的改进算法。通过大量仿真可以证明,该算法的比特分配结果与贪婪算法接近,并且在子信道数量和需分配比特数量较大时,该算法的运算时间显著的小于经典的贪婪算法。另外,该算法所使用的与运算和移位运算,也能够方便的在嵌入式系统或 FPGA 系统上实现,大大提高了算法的实用性。

参考文献:

- [1] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
YIN C C, LUO T, LE G X. Multi-carrier broadband wireless communication technology [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004.
- [2] 袁彦春. OFDM 频偏估计算法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YUAN Y C. Algorithm of OFDM frequency offset [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [3] 李向宁, 谈振辉. OFDM 基本原理及其在移动通信中的应用 [J]. 重庆邮电学院学报, 2003, 15(2): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-825X.2003.02.007.
LI X N, TAN Z H. OFDM Principle and Its applications in mobile communication [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2003, 15(2): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-825X.2003.02.007.
- [4] 杨勇军, 梅进杰, 胡登鹏, 等. ACE 降低 QAM-OFDM 雷达通信一体化共享信号 PAPR 研究 [J]. 空军预警学院学报, 2018, 32(5): 317-320. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5839.2018.05.002.
- [5] 朱继华, 王竞鑫, 申茜, 等. OFDM 系统中一种改进的低复杂度自适应比特功率分配算法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(2): 202-207. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.010.
ZHU J H, WANG J X, SHEN Q, et al. An improved adaptive bit power allocation algorithm with the low complexity for OFDM system [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 29(2): 202-207. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.010.
- [6] 李海波. MIMO-OFDM 无线通信系统中资源调度算法的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
LI H B. Research on resource scheduling algorithm in MEMO-OFDM wireless communication system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [7] 刘先桥, 杨凡, 阮定良, 等. 无线通信中自适应调制技术的现状与发展 [J]. 微处理机, 2017, 38(3): 34-37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2279.2017.03.008.
LIU X Q, YANG F, RUAN D L, et al. Situations and developments of adaptive modulation in wireless communications [J]. Microprocessors, 2017, 38(3): 34-37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2279.2017.03.008.
- [8] 袁建国, 南蜀崇, 袁梦, 等. 多用户 OFDM 系统中一种新颖的自适应功率分配方案 [J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 412-419. DOI: 10.16818/j.issn1001-5868.2019.03.023.
YUAN J G, NAN S C, YUAN M, et al. A new adaptive power allocation scheme for multiuser OFDM systems [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 412-419. DOI: 10.16818/j.issn1001-5868.2019.03.023.
- [9] 李黎. MIMO-OFDM 自适应传输技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
LI L. Research on adaptive transmission techniques for MIMO-OFDM systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [10] 刘凯明. OFDM 系统中的自适应调制技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
LIU K M. Adaptive modulation techniques in OFDM systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006.

荷泵达到升压和降压的目的,所以在选择工艺模型时要重点研究工艺的耐压程度与器件是否存在漏电,这在以后的电荷泵电路设计中是要重点关注的问题^[10].

参考文献:

- [1] SCHIMPF S, BAUR H, FRUEHAUF N. P-135: Dickson charge pumps made of indium gallium zinc oxide thin film transistors on foil substrates[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48 (1): 1765-1768. DOI: 10.1002/sdtp.12018.
- [2] YANG F, ZHENG Y A, WANG C G, et al. A single-poly EEPROM with low leakage charge pump and peripheral circuits for passive RFID tag in a standard CMOS technology[J]. IEICE Electronics Express, 2017, 14 (10): 20170315. DOI: 10.1587/elex.14.20170315.
- [3] NAVIDI M M, GRAHAM D W. A regulated charge pump with extremely low output ripple[J]. Electronics, 2019, 8 (11): 1293. DOI: 10.3390/electronics8111293.
- [4] KORDETOODESHKI E, HASSANZADEH A. Design of low voltage low power DC-DC converters using adiabatic technique[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2018, 27(6): 1850094. DOI: 10.1142/S0218126618500949.
- [5] PENG H, DE PAUW H, BAUWENS P, et al. A monolithic low-power-consumption driver circuit based on a Dickson charge pump for MEMS actuator applications[J]. Solid-State Electronics, 2020(164): 107683. DOI: 10.1016/j.sse.2019.107683.
- [6] ZHU T Z, ZHANG Y N, JI R D. Design of a charge pump for high voltage driver applications based on

0.35 μm BCD technology[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31 (19/21): 1740008. DOI: 10.1142/S0217984917400085.

- [7] ZHANG W J, YANG F, DUAN J B, et al. Design of a new constant voltage output charge pump for MEMS microphones[J]. Research & Progress of SSE, 2013, 33(3): 300-304. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3819.2013.03.020.
- [8] FU X L, PANG Z L, JIA C. Design of a low ripple voltage charge pump for AMOLED display driver[J]. China Integrated Circuit, 2015, 24(7): 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.1681-5289.2015.07.008.
- [9] ZHAN Y, HUANG W K, XU J H, et al. Design of charge pump for H-bridge power driver circuit[J]. Microelectronics & Computer, 2014, 31(1): 107-111. DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2014.01.025.
- [10] YIN F F, WU C Y, LI W C, et al. Design of a novel charge-pump integrated circuit for double output positive and negative double voltage[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2007, 34 (3): 211-213. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5846.2007.03.006.

作者简介:

于云男,(1995-),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计.

谢亮男,(1983-),博士,副教授.研究方向为ASIC设计、ADC、红外传感方向.

张文杰男,(1986-),博士.研究方向为模拟集成电路设计.

金湘亮(通讯作者)男,(1974-),教授,博士生导师.研究方向为信号处理、CMOS传感器与集成电路设计.

E-mail: xiangliangjin@163.com.

(上接第65页)

- [11] 张成文. 多用户 MIMO-OFDM 下行链路自适应资源分配技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- ZHANG C W. Downlink adaptive resource allocation techniques for multiuser MIMO-OFDM system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

作者简介:

刘策伦男,(1983-),博士,硕士研究生导师.研究方向为电子工程和云存储技术.

罗靖杰(通讯作者)男,(1995-),硕士研究生.研究方向为电子工程. E-mail: 708961943@qq.com.

王芳女,(1995-),硕士研究生.研究方向为电子工程.