

毫米波自适应调制解调器的 FPGA 设计实现

张 健¹, 高泽峰¹, 吴倩文¹, 周志刚²

(1. 杭州电子科技大学, 电子信息学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 毫米波通信链路是 5G/6G 以及无线专网的重要传输技术, 自适应调制解调器可以对抗雨衰等环境影响, 有效保障通信链路质量。利用 System generator 和 Vivado 等工具在 FPGA 实现并验证了适应于毫米波通信链路的自适应调制解调模块, 支持 BPSK~4096QAM 的 7 种调制方式, 实现时延小于 18 个时钟周期, 并保证误信率在低于 10^{-5} 情况下, 可依据信道测量和信令指令进行自动切换。

关键词: 毫米波通信; 自适应调制解调器; QAM; system generator

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200503

中文引用格式: 张健, 高泽峰, 吴倩文, 等. 毫米波自适应调制解调器的 FPGA 设计实现[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 116~120, 133.

英文引用格式: Zhang Jian, Gao Zefeng, Wu Qianwen, et al. Implementation and verification of adaptive modem for MMW communication link[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 116~120, 133.

Implementation and verification of adaptive modem for MMW communication link

Zhang Jian¹, Gao Zefeng¹, Wu Qianwen¹, Zhou Zhigang²

(1. School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Millimeter wave(MMW) communication link is an important transmission technology of 5G/6G and wireless private network. Adaptive modem can resist environmental influences such as rain attenuation and effectively guarantee the quality of communication link. In this paper, the system generator, Vivado and other tools were used to realize and verify the adaptive modem module adapted to MMW communication link on FPGA, which supported seven modulation modes of BPSK to 4096QAM, realized the time delay less than 18 clock cycles, and could be automatically switched according to channel measurement and signaling instructions in the condition of ensuring the SNR is below 10^{-5} .

Key words: millimeter wave communication; adaptive modem; QAM; system generator

0 引言

随着人们对移动通信技术要求的不断提高, 5G 技术应运而生。作为 5G 的重要传输技术, 毫米波通信具有高带宽、高传输速率以及极强的抗干扰性能等显著优势。相较优势而言, 毫米波通信还存在严重影响通信链路性能的三大因素: 路径损耗、大气吸收特性以及雨水衰减特性^[1~2]。在对抗衰落特性的研究中, 主要的方法有自适应功率控制技术、自适应分级接收技术、自适应时分多址接入(Time Division Multiple Access, TDMA)技术以及自适应信道估计技术。其中自适应信道估计技术包括了自适应编码技术、自适应调制技术等。自适应调制要求在保持系统发射功率不变的情况下, 根据信道状态的反馈结果, 在较理想的信道状态中, 采用高阶调制, 保证利用率, 在较差的信道条件下采用低阶调制, 保证可靠性。由此实现在不同信道状态下, 应用不同的调制解调模式以保持最佳的吞吐量与误码率性能^[3~5]。

本文自适应调制解调器采用正交振幅调制技术(Quadrature Amplitude Modulation, QAM), 其具有较高的频谱效率和更强的抗噪声能力, 在有线电视网络高速数据传输和卫星通信等领域得到了广泛应用^[6~7]。

1 调制解调架构与信号模型

1.1 自适应调制解调器实现架构

自适应调制解调器应用的通信链路模型如图 1 所

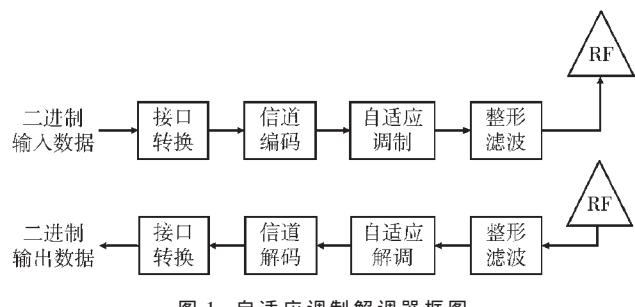


图 1 自适应调制解调器框图

嵌入式技术

Embedded Technology

示。由介质访问控制(Media Access Control, MAC)层输入的二进制数据经过合适的接口转换后进入信道编码模块, 利用相应的信道编码方式对输入的二进制信号进行信道编码, 经过编码后的数据进入到自适应调制模块, 自适应调制模块根据当前时刻信令指令对输入数据进行某种模式的QAM调制, 紧接着将对数据进行整型滤波, 经过整型滤波后的信号已是适应于带限信道中传输的低码间干扰信号, 此信号经过射频模块处理后传入空间, 至此完成发送链路的设计。接收链路是发送链路的逆过程, 射频模块接收到空间中的信号后经过整型滤波、自适应解调、信道解码、接口转换等一系列操作后还原为原MAC层发送的二进制输入数据。本自适应调制解调器可应用于正交频分多路复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)等多调制方式的复用技术中^[8-9]。

其中自适应调制如图2所示, 在调制模块中, 使能信号与信令指令控制信令译码器工作, 并输出BPSK-4096QAM选择信号, 控制调制器利用其中一种调制方式, 对输入的数据流进行相应的QAM映射, 输出I、Q信号与一个输出有效信号, 输出有效信号与I、Q信号同步使能, 标志调制器是否正在输出有效的I、Q信号。解调是调制的逆过程, 与调制模块相同的使能与信令信号输入信令译码器, 输出解调模式选择信号, 解调器将接收到的I、Q信号经过QAM解调输出二进制数据流, 与输出有效信号。

1.2 调制信号模型

所谓QAM, 是两路独立的数字基带信号对两个相互正交的同频载波进行抑制载波的双边带调制, 利用这种已调信号在同一带宽内频谱正交的性质来实现两路并行的数字信息传输^[10]。

QAM调制信号的一般表达式为:

$$S(t)=A_m \cos \omega_c t + B_m \sin \omega_c t \quad (0 \leq t \leq T_s)$$

式中, A_m 、 B_m 为相互正交载波的振幅, $m=1, 2, 3, 4, \dots, M$, M 为 A_m 、 B_m 的电平数, T_s 代表码元宽度。其中:

$$A_m = d_m A$$

$$B_m = e_m A$$

式中 A 表示固定振幅, d_m 、 e_m 分别是星座图上的I、Q坐标点信息。

MQAM调制器设计如图3所示。

图中, 输入的二进制序列经过串并转换, 输入到两电平转换模块, 经过两模块后分别得到相应的I、Q数据, 这一过程称为星座图映射。经过映射的数据与一对正交调制分量相乘, 求和后输出。这就是QAM调制的整个过程。在实际应用中, 一般会在混频之前加入一个上变频模块, 将数据搬移到中频, 再与载波

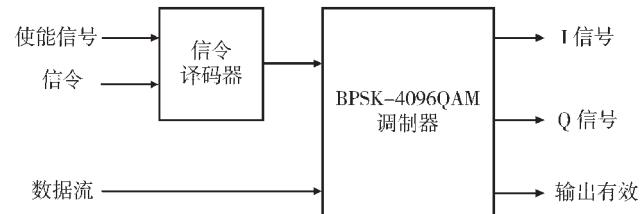


图2 自适应调制模块框图

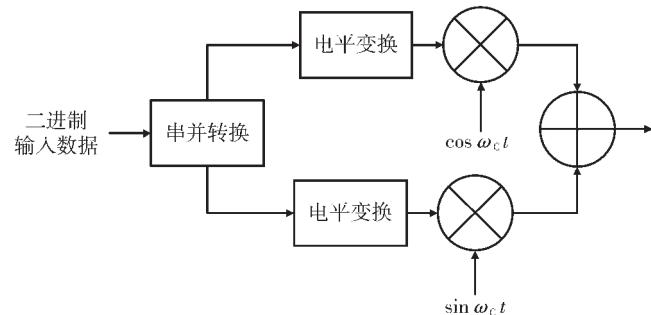


图3 MQAM调制器设计

混频。

1.3 信噪比门限算法

基于信噪比门限的自适应算法原理为保证系统误信率低于设定值下根据信噪比自适应地切换调制方式。图4为BPSK-4096QAM的信噪比与误信率曲线。图中表明, 在达到误信率预期的情况下, 调制方式可以随着信道情况的变化而改变, 从而提升系统总体性能。

据图4可计算得出自适应调制的信噪比切换门限值如表1所示。

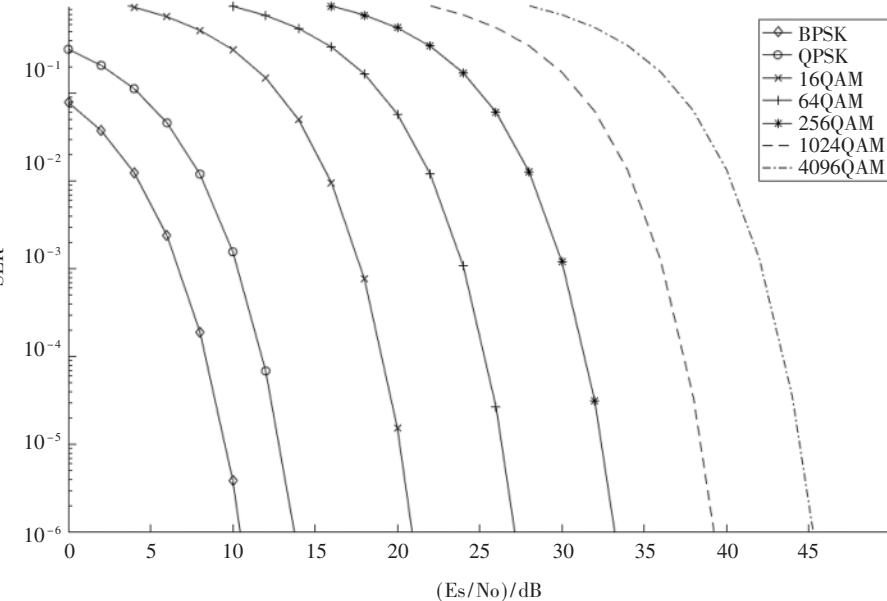


图4 AWGN信道下几种调制方式的信噪比与误信率曲线

2 基于system generator的设计实现

2.1 发射端自适应调制模块设计

发射端的自适应模块包括信令译码器与BPSK-

表 1 SNR 切换门限表 (dB)

SER	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
(Es/No)/dB	BPSK	8.39	9.58
	QPSK	11.80	12.90
	16QAM	19.15	20.17
	64QAM	25.38	26.41
	256QAM	31.45	32.48
	1024QAM	37.48	38.51
	4096QAM	43.51	44.54

4096QAM 调制解调器实现。

2.1.1 信令译码器的实现

信令译码器的实现如图 5 所示。输入信号由信令指令与一个使能信号构成。使能为低时, 封锁信令信号的接收, 系统输出状态零使能信号, 状态零被设置为保留状态, 亦可理解为无状态选择信号。当使能信号为高时, 系统接收输入的信令信号, 将其对应的映射方式选择信号使能。本模块输出各引脚分别连接 BPSK~4096QAM 映射的使能端口, 这意味着哪一个输出端口使能, 其对应调制方式的模块也将被使能。

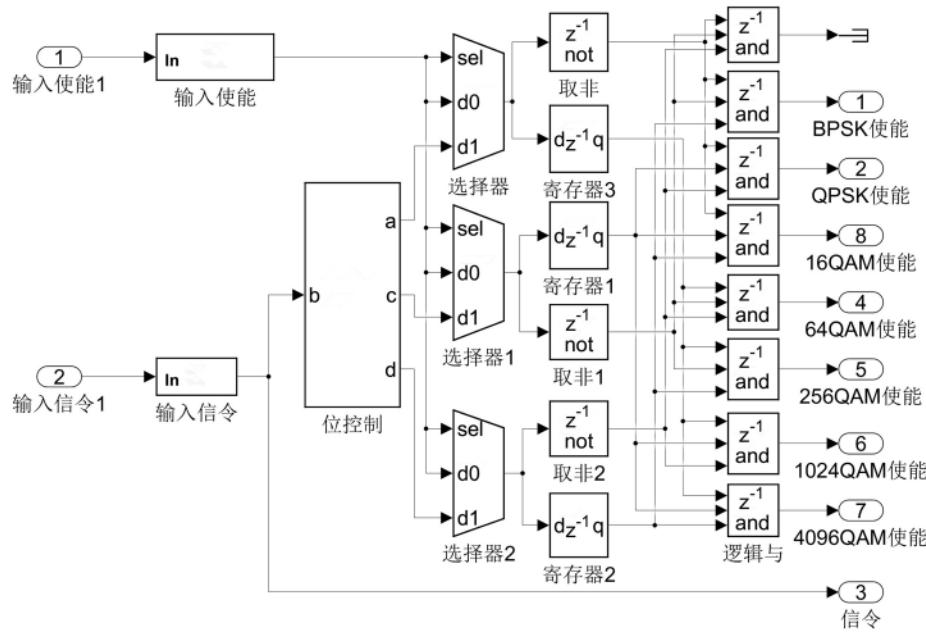


图 5 信令译码器的设计实现

信令与映射关系如表 2 所示。

表 2 信令与映射关系对应表

信令信号			对应状态	对应使能映射方式
S2	S1	S0		
0	0	0	0	/
0	0	1	1	BPSK
0	1	0	2	QPSK
0	1	1	3	16QAM
1	0	0	4	64QAM
1	0	1	5	256QAM
1	1	0	6	1024QAM
1	1	1	7	4096QAM

2.1.2 发射端模块设计实现

由于 QAM 各模式实现原理类似, 以 16QAM 为例, 发射端的调制设计如图 6 所示, 串行比特流数据通过 4 bit 串并变换模块, 产生十六进制数据, 然后以此数据为地址搜索对应的查找表信息。输出相应 I、Q 数据。其中输出有效信号的生成原理为: 若有非零数据输出, 则为高, 否则为低。能这样设计的原因在于映射数据中不存在零值。

设计中涉及 7 种 QAM 调制方式, 为了保证各调制方式有相同的平均功率, 每一种调制在其映射实现的过程中需加入归一化因子。各方式的归一化因子如表 3 所示。在本设计中, 直接将已经过归一化处理的 I、Q 值存入各自的 ROM 中, 在查找地址时, 直接输出经过归一化后的数据。

2.2 接收端自适应解调模块设计

接收端的自适应解调模块包含信令译码器与一个 BPSK~4096QAM 模式可选的解调器构成。

2.2.1 解映射算法设计

16QAM 星座图如图 7 所示。将其转换为二进制表示即可观察到 b_0, b_2 位竖向相同, b_1, b_3 位横向相

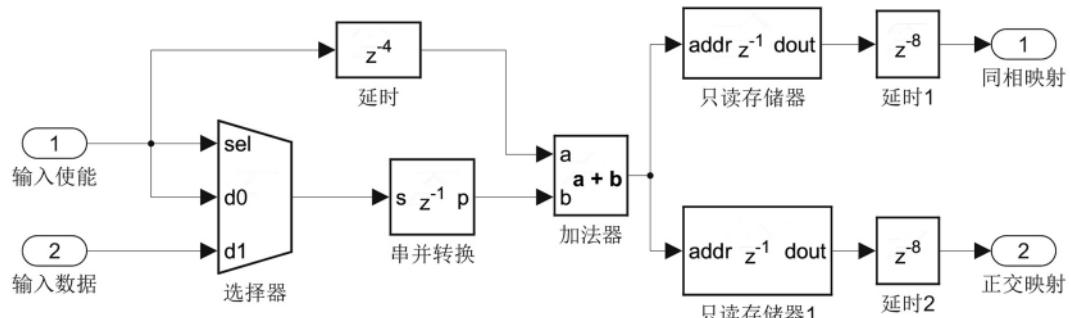
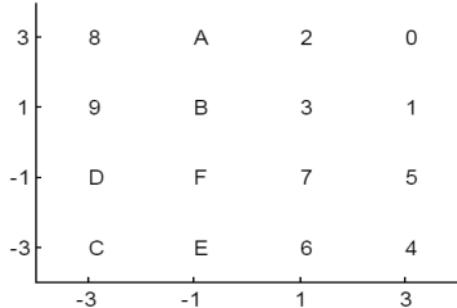


图 6 发射端 16QAM 调制实现

表 3 MQAM 归一化因子

调制方式	比特数量	归一化因子
BPSK	1	1
QPSK	2	$1/\sqrt{2}$
16QAM	4	$1/\sqrt{10}$
64QAM	6	$1/\sqrt{42}$
256QAM	8	$1/\sqrt{170}$
1 024QAM	10	$1/\sqrt{682}$
4 096QAM	12	$1/\sqrt{2730}$

图 7 16QAM 星座图($b_0b_1b_2b_3$)

同。图中的横、纵坐标分别是 I、Q 路信号。

更进一步可以发现如下关系：

$$b_0 = \begin{cases} 1, & I < 0 \\ 0, & I > 0 \end{cases}$$

$$b_2 = \begin{cases} 1, & |I| < \frac{2}{\sqrt{10}} \\ 0, & |I| > \frac{2}{\sqrt{10}} \end{cases}$$

其中 b_1, b_3 的取值关系分别对应 b_0, b_2 中将判决变量 I 替换为 Q。

实现 b_0, b_1, b_2, b_3 这几个并行数据的并串转换方法是利用选择器与计数器的配合使用。且计数器频率需是

输入数据频率的 4 倍。

2.2.2 接收端模块设计实现

接收端的 16QAM 解调设计如图 8 所示。解映射流程为：接收并按照上文所述的解映射算法计算出阈值大小，将数据与阈值进行比较；计算出各二进制比特，按照一定的顺序实现并串转换，串行输出比特流数据。使用多路选择器实现并串转换。

3 仿真结果分析

3.1 调制解调模块

图 9 显示的是信令译码器的仿真结果，输入的测试信令由 1 到 4 切换，每个信令持续 60 个时钟周期。图中左侧从上到下依次是模式选择信令、状态 1 到状态 3，右侧从上到下依次是状态 4 到状态 7。测试的输入使能在 22 时刻给予信令译码器使能信号，查表 2 可知在整个过程中随着信令的切换，顺序出现了自 BPSK-64QAM 各持续 60 个时钟周期的使能输出，其他状态均无使能输出。本模块的延迟为 2 个时钟周期。

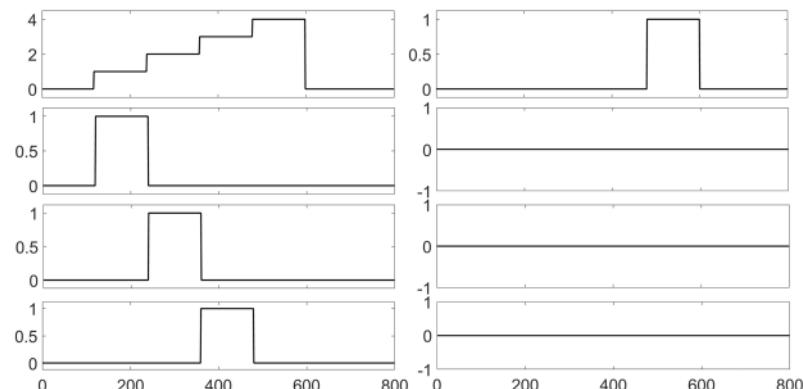


图 9 信令译码器检测波形图

图 10 实现了基于信令信息实时改变调制方式方案设计。图中左上角为模式选择信令，从下至右依次为

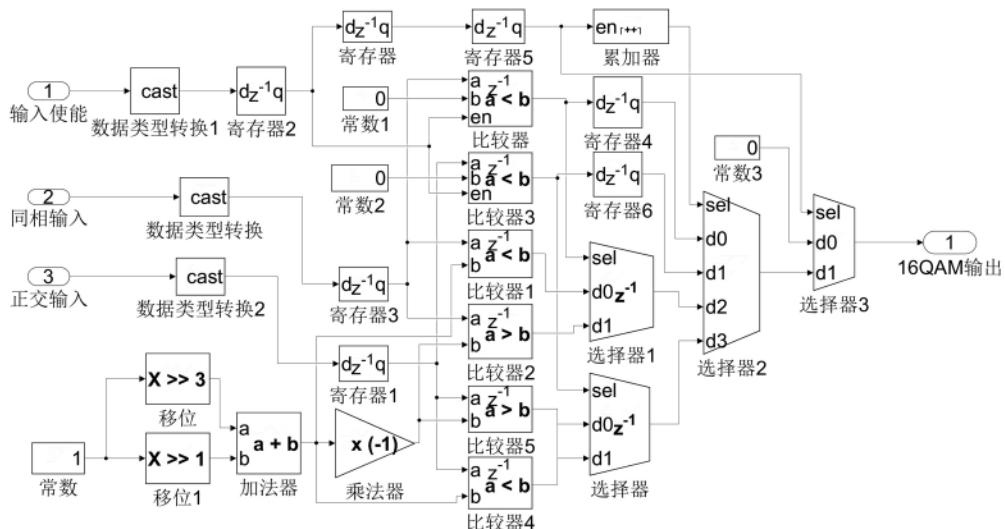


图 8 接收端 16QAM 解调实现

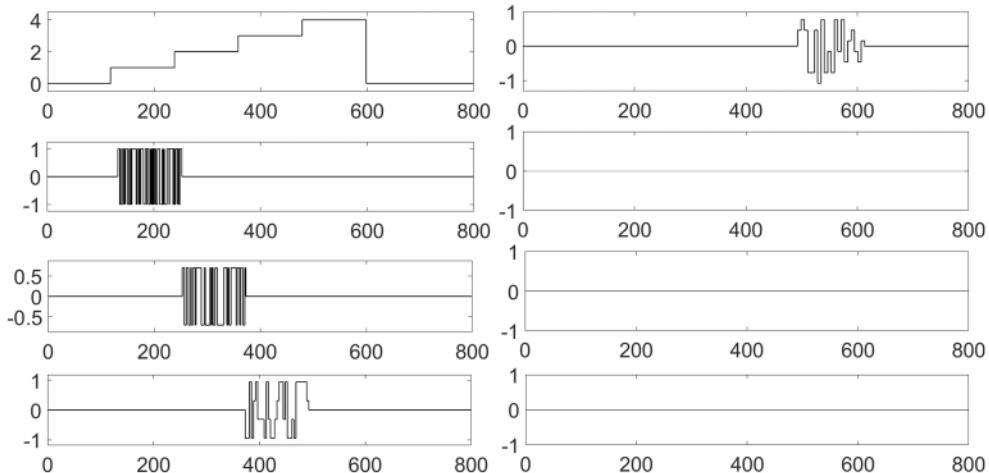


图 10 信令控制自适应调制波形图

BPSK 映射、QPSK 映射、16QAM 映射、64QAM 映射, 为对比明显皆取各映射方式的 I 路信号。最后为输入的比特流数据。图中表明, 设计可以根据信令信号相应地改变调制方式, 且切换调制方式时不存在内部延时。对比输入数据与各映射数据得出, 各段方式映射数据与输入数据吻合。

图 11 是整体模块的 Modelsim 仿真结果, 从上至下依次为时钟信号、调制解调信令、输入二进制数据、映射有效信号、映射(同相分量)映射、输出有效信号、解调输出数据。从图中可以看出映射模式受到信令的控制。在延迟 18 个时钟周期后, 模块解调出输入的数据。

3.2 自适应调制吞吐量

取传输速率等于 1 600 MS/s, SER 门限低于 10^{-5} 时, 应用自适应调制后系统的吞吐量如图 12 所示。在实际应用中, 信噪比一般在 0~35 dB 区间。由图可见, 在信噪比较低的情况下, 误信率较高, 吞吐量随着信噪比变化而波动。在达到最低误信率要求的信噪比切换门限时, 自适应系统自动切换调制方式, 系统吞吐量显著提高。由此可见, 基于信噪比门限的自适应调制算法可以在保证系统误信率的前提下, 尽可能地提升吞吐量与频谱利用率, 提升系统的总体性能。

4 结论

在毫米波通信中, 物体遮挡以及降雨等环境因素都

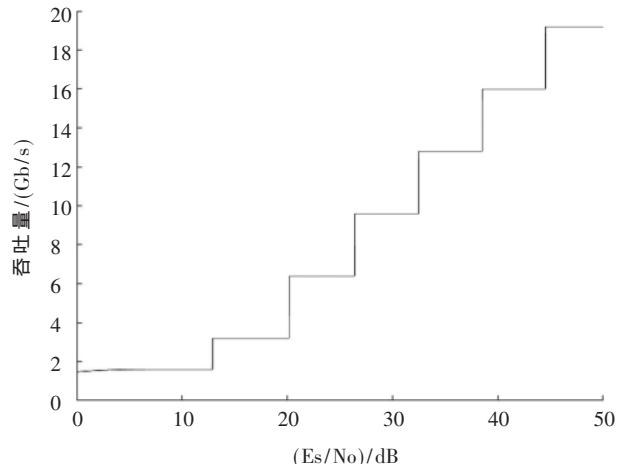


图 12 自适应调制吞吐量

会直接影响毫米波通信链路的性能。本文在 QAM 调制解调技术的基础上, 设计一款自适应调制解调器, 根据信道估计得到的信道状态信令参数, 控制调制解调器选择出一种适应于当前信道的调制模式, 以提升系统的传输性能。

参考文献

- [1] 崔娟娟, 刘文琦, 何潘金, 等. 5G 无线通信系统中毫米波 MIMO 天线技术研究综述[J]. 电子世界, 2019(16): 99~100.

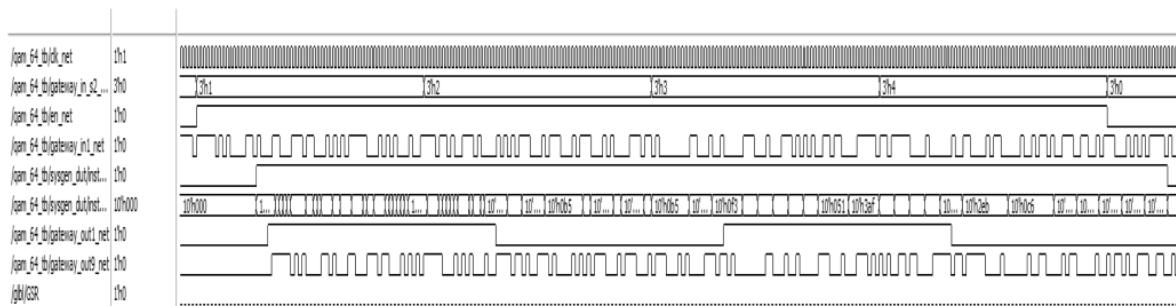


图 11 调制解调模块仿真波形图

(下转第 133 页)

雷达与导航 Radar and Navigation

参考文献

- [1] 陈伟民,李存龙.基于微波雷达的位移/距离测量技术[J].
电子测量与仪器学报,2015,29(9):1251–1265.
- [2] 岳文豹,杨录,张艳花.FMCW 雷达远程测距系统设计[J].
电子技术与应用,2012,40(4):73–75.
- [3] 张大彪,王艳菊.微波测速、测距系统的设计[J].仪表技术
与传感器,2004,35(4):11–15.
- [4] 程焰平.X 波段便携式战场侦察雷达收发系统低功耗设计[J].火控雷达技术,2010,39(2):75–78.
- [5] 余俊,吴晓朝,许一男,等.巴特沃斯滤波器在雷达目标
航迹处理中的应用[J].火力与指挥控制,2011,36(2):
129–131.
- [6] 桂静宜.二阶有源低通滤波电路的设计与分析[J].电子
科技,2010,23(10):15–17.
- [7] 康学福.滤波电路频率特性的仿真分析[J].国外电子测

量技术,2014,33(1):40–42.

- [8] 彭璐佳,张莉萍,黄勃,等.基于 STM32 的车载智能风扇
系统的设计与实现[J].传感器与微系统,2018,37(12):
81–83,87.
- [9] 孙金林,王国余,胡方圆.数字化智能声速测量系统设计[J].
传感器与微系统,2015(10):114–117.
- [10] 郭伟军,章国青,孙以泽.基于 STM32 和 PCL6045BL 的
经编机电子横移系统设计[J].电子技术应用,2018,44
(12):36–39.

(收稿日期:2020-06-19)

作者简介:

金远凡(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:嵌入
式系统设计。

秦会斌(1961-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方
向:新型电子器件及 ASIC 设计、现代传感器设计及应用。

(上接第 120 页)

- [2] 周勇.5G 无线通信网络物理层关键技术[J].数字通信世
界,2018(10):40,47.
- [3] CIANCA E , LUISE A D , RUGGIERI M , et al. Channel-
Adaptive techniques in wireless communications : an
overview[C].Wireless Communications and Mobile Computing,
2002,2(8):799–813.
- [4] 雷花.自适应编码调制技术在卫星通信中的应用[D].北
京:北京理工大学,2016.
- [5] 王琦.基于 5G 典型频段与场景的毫米波信道传播特性研
究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [6] 吴凤辉.高阶 QAM 解调中的同步算法研究[D].哈尔滨:
哈尔滨工业大学,2016.
- [7] MUKHTAR H , EL-TARHUNI M . An adaptive hierarchical
QAM scheme for enhanced bandwidth and power utilization[J].
IEEE Transactions on Communications,2012,60(8):2275–

2284.

- [8] 李真,王伟华,周文安,等.基于 OFDM 的自适应传输技
术[J].无线通信技术,2004,30(1):34–35.
- [9] 周子铨.超高速无线局域网中的自适应传输技术及干扰
解决方案研究[D].南京:东南大学,2014.
- [10] WANG Y , LIU W , JIN M , et al. FQAM/FPSK modulation
for spatial modulation systems[C].2016 International Con-
ference on Information and Communication Technology
Convergence(ICTC),2016.

(收稿日期:2020-06-15)

作者简介:

张健(1978-),男,博士/研究员,主要研究方向:毫米波
集成电路及无线通信系统设计。

高泽峰(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:毫米
波高速通信。

吴倩文(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向:毫米
波集成电路及其应用。

(上接第 128 页)

- [19] GUPTA R , BERA J N , MITRA M . Development of an
embedded system and MATLAB-based GUI for online
acquisition and analysis of ECG signal[J]. Measurement,
2010,43(9):1119–1126.

(收稿日期:2020-06-29)

作者简介:

李昊宇(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:电路
与系统、智能硬件。

张荣芬(1977-),女,博士,教授,主要研究方向:电路与
系统、机器视觉及大数据智能技术。

刘宇红(1963-),男,硕士,教授,主要研究方向:电路与
系统、智能硬件、大数据分析。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所