

用于可穿戴 AR 设备的高速低延时无线 MAC 协议*

汪 健,丁福建,刘海波,刘文文,林庆毫,林 敏

(上海大学 通信与信息工程学院,上海 200444)

摘 要: 针对消费级 AR 眼镜与智能手机的无线通信场景需求,提出一种超高速、低功耗、低时延、短距离的定制化无线 MAC 协议。首先从应用场景的需求出发,对有效吞吐率、时延等指标进行定量分析,再通过指标进行协议的设计。与现有的 ECMA-398 协议相比,有效吞吐率标准从 71% 提高到 86%,通过引入数据优先级机制来减少延时,使得关键数据的最大帧传输延时相比同类的 ECMA-398 协议降低了一个量级(小于 1 ms);然后根据指标完成系统级模型的搭建与仿真、RTL 级的编码与验证;最后通过 FPGA 平台进行测试。仿真和测试结果表明,所设计的定制化 MAC 协议可以较好地满足场景需求。

关键词: AR; MAC 协议; 短距离无线; 有效吞吐率; 时延

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200156

中文引用格式: 汪健,丁福建,刘海波,等. 用于可穿戴 AR 设备的高速低延时无线 MAC 协议[J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 73-78.

英文引用格式: Wang Jian, Ding Fujian, Liu Haibo, et al. High-speed, low-latency wireless MAC protocol for wearable AR devices[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(10): 73-78.

High-speed, low-latency wireless MAC protocol for wearable AR devices

Wang Jian, Ding Fujian, Liu Haibo, Liu Wenwen, Lin Qinghao, Lin Min

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: For the application scenario of short-range, high speed wireless communication between consumer AR glasses terminal and smart phones, a customized wireless MAC protocol with ultra-high speed, low power, low latency characteristics is presented. Firstly, based on the requirements of the application scenario, quantitative analysis of specifications such as effective throughput and latency are presented, which is followed by detailed protocol design with the target of specifications above. Compared to the existing ECMA-398 protocol, the effective throughput standard increases from 71% to 86%. By introducing priority mechanism for various type of data transmission, the maximum frame transmission latency of critical data is reduced by an order of magnitude, which is less than 1 ms. This paper completed the construction and simulation of system-level models, RTL-level coding and verification according to the analysis above. Finally, the protocol was tested through the FPGA platform. Simulation and test results show that the customized MAC protocol designed in this paper can fulfill the requirement of the scenario much better.

Key words: AR; MAC protocol; short-range wireless; effective throughput; latency

0 引言

随着 5G 移动通信技术的发展和成熟, 增强移动宽带(Enhance Mobile Broadband, EMBB)成为了下一代移动互联网应用的核心技术。增强现实(Augmented Reality, AR)设备由于高速率、大流量、低延时的要求, 使其成为了 EMBB 技术中的核心应用。

智能手机作为移动互联网时代生态系统和技术发展最成熟最完善的移动计算设备, 如果能够在手机和 AR 眼镜间通过一种高速低功耗的无线连接技术实现连接, 将智能手机作为移动计算平台, 而 AR 眼镜被定义为提供内容显示和环境感知的衍生设备, 就可以使得 AR 眼

镜充分利用智能手机的生态和内容。例如用户可以用 AR 眼镜来看电影、玩 3D 游戏, 与亲友实现远距离第一视角的场景共享等。但目前并没有完全适合该应用场景的近距离的无线技术标准, 2.4 GHz 和 5 GHz WiFi 技术虽然成本较低, 应用很广, 但其在延时、抗干扰性、功耗等方面的内生技术缺陷, 使得该方案无法满足前述场景的核心技术需求。另一个新兴的无线技术 802.11ad 使用了 60 GHz 的超高频段, 功耗大幅度提升, 无法满足可穿戴设备对低功耗的严苛要求, 加上 60 GHz 无线电波在路径损耗和穿透损耗方面的弱点, 其传输性能极不稳定, 传输距离基本上在厘米的量级^[1]。此外, 还有一些定制化的适用于点对点传输的无线协议, 如 ECMA-398 等,

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2204500)

通信与网络 Communication and Network

由于其帧结构的设计效率较低导致有效吞吐率不足,以及缺乏数据优先级划分等设计缺陷,也难以满足上述场景对协议超高速和低延时的需求^[2]。

因此,本文从 AR 眼镜与智能手机通信的应用场景对各核心指标(有效吞吐率、延时)的要求出发,提出了一种点到点的超高速、低功耗、低延时无线传输 MAC 协议,从 MAC 层面为 AR 眼镜和手机端的无线交互通信提供高效可靠的协议机制设计。

1 理论分析

1.1 吞吐率

有效吞吐率是指单位时间内传输的有效信息量^[3]。为了评估现有以及本文所设计协议的传输性能,可通过式(1)进行理论最大有效吞吐率 V_D 的计算。

$$V_D = \frac{L_{MSDU}}{T_{DATA} + T_{SIFS} + T_{ACK}} \quad (1)$$

其中, L_{MSDU} 代表 MAC 帧中的帧体部分,即有效数据信息的长度; T_{DATA} 为帧总传输时长, T_{SIFS} 为确认帧等待间隔, T_{ACK} 为确认帧传输时长,一般为固定值。 S 为有效吞吐率标准, V_C 为物理层所提供的码片率,如式(2)所示。

$$S = \frac{V_D}{V_C} \times 100\% \quad (2)$$

T_{DATA} 与 L_{MSDU} 相关,可通过式(3)计算得出。

$$T_{DATA} = \frac{L_{MSDU} + L_M + L_P + L_{RS}}{V_C} \quad (3)$$

其中, L_M 为 MAC 层的帧开销, L_P 为物理层除去 RS 编码开销 L_{RS} 外的帧开销, L_{RS} 可由式(4)得出。

RS 编码一般用 $RS(n, k)$ 码表示, n 为编码后的码长, k 为信息长度, $n-k$ 为最小距离。利用式(4)可以求得 RS 编码带来的帧开销, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。

$$L_{RS} = \left\lceil \frac{L_{MSDU} + L_M}{k} \right\rceil \times (n - k) \quad (4)$$

ECMA-398 协议中最大信息长度为 8 192 B(65 536 chips),采用 RS(240, 226)码。当以最高速率进行数据传输时, L_M 为 368 chips, L_P 为 5 872 chips,可求得 L_{RS} 为 4 736 chips。码片率为 560 Mc/s,由式(2)可知 T_{DATA} 为 136 μ s。协议中等待间隔为 8 μ s,确认帧由于帧结构与传输速率固定,传输时长约为 21 μ s,计算可得协议最大吞吐率 V_D 为 397 Mb/s, S 为 71%。

本场景中,以 1080p@30fps 为例,每秒钟传输的数据量为 $1920 \times 1080 \times 24 \times 30$,即 1.4 Gbit。为了实现这一应用场景的近距离无线通信,要求其有效传输距离为 3~5 m。由于物理层提供的最大码片率为 2 Gc/s,考虑到未来可能会实现多用户通信,必须留有一定的余量。因此,最大有效吞吐率应不低于 1.7 Gb/s,即物理层码片率的 85%。由此可见,低速的 ECMA-398 难以在吞吐率层面满足场景需求。

为了使所设计的协议达到场景指标,在信道保持不变的时间间隔内,要尽可能使每个数据帧携带更多的数

据信息^[4]。同时,适当降低确认间隔可以提高吞吐率。考虑到确认等待期间节点会进行数据的准备和读取,确认间隔 T_{SIFS} 取 4 μ s。合并式(1)、式(3)、式(4)可反推 L_{MSDU} 的表达式,如式(5)所示。本文协议采用 RS(255, 239)码,码片率 V_C 为 2 Gc/s, L_M 为 448 chips, L_P 为 2 500 chips, T_{ACK} 为 1.4 μ s。若吞吐率 V_D 不低于 1.7 Gb/s,计算可知最大长度 L_{MSDU} 应不低于 16 094 B。为了便于后续设计工作,最大信息长度取 16 384 B,计算可得此时有效吞吐率为 1.71 Gb/s(S 为 86%),满足场景需求。

$$L_{MSDU} = \frac{V_D}{k \cdot V_C - V_D \cdot n} [n \cdot L_M + k \cdot L_P + k \cdot V_C \cdot (T_{SIFS} + T_{ACK})] \quad (5)$$

1.2 时延

时延作为 AR 场景的核心指标,对用户体验有着非常直接的影响。通过式(6)可以对协议的底层传输时延进行理论分析与预估。其中, T_S 为帧总传输时延, L_{PSDU} 代表 MAC 帧经过物理层编码等过程后的码片长,因此 T_S 包含了 MAC 帧传输时延在内。 $L_{Preamble}$ 为前导码长度, L_{PH} 为物理帧头长度。相较于帧传输时延来说,帧处理时延占比很小,此处分析可以忽略。

$$T_S = \frac{L_{PSDU} + L_{Preamble} + L_{PH}}{V_C} \quad (6)$$

研究表明,AR 这类需要高速视频流应用的延时必须控制在 20 ms 以内,人体才不会有晕眩反应。本场景中平均每个画面帧的生成时间在 16.7 ms 左右,整个通信系统的延时应不超过这个值。延时主要包括显示延时、计算延时、传输延时和传感器延时,其中显示延时为最主要因素,延时占比达 70%(12 ms),在扣除计算和传感器延时之后,传输延时长限不应超过 2 ms。而由重传和缺乏优先级划分带来的关键信息处理延时,也会严重影响用户体验^[5-6]。

例如,在实时互动的 3D 游戏场景中,节点 A 作为主机负责画面的生成与渲染,节点 B 作为 AR 眼镜终端负责画面显示和采集体感数据。A 的画面更新需要来自 B 的实时体感参数。如图 1 所示, P1、P2 为画面数据, Data 为体感数据,当 A 向 B 传输当前画面的视频数据时,若

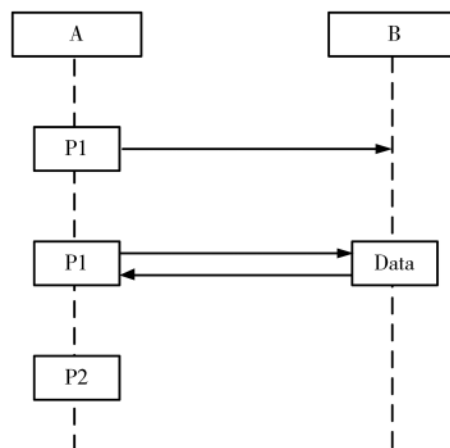


图 1 画面更新示意图

通信与网络 Communication and Network

B 无体感参数产生,则 A 会继续传输之前画面(即不进行画面更新);反之,必须及时将 B 获取的体感数据传回给 A。

这里可通过式(7)计算 MAC 帧的理论传输延时 T_M , L_{MPDU} 为 MAC 帧的码长。由于物理层与信道相连,通过对 T_s 的理论分析可初步表征出协议的时延性能,而 T_M 包含在 T_s 内(由帧结构可知占比较大),在一定程度上代表了 T_s ,可用于 MAC 层单独仿真验证时实际延时结果与理论值的比较,从而得出所设计协议的实际时延性能。

$$T_M = \frac{L_{MPDU}}{V_C} \quad (7)$$

ECMA-398 由于无优先级分类, B 必须等待 A 的当前画面传输完成。若此时出现重传,会导致前后画面间出现较大延时。以 8 192 B 的信息长度为例, MAC 帧经过物理层的编码、扩频等处理后, L_{PSDU} 最大为 1 130 304 chips, 物理帧头和前导码长度固定, 分别为 1 664 chips 和 4 208 chips, 码片率为 560 Mc/s, 由式(6)计算可得, T_s 为 2 028 μ s。当出现 3 次重传时, 加上重传等待间隔 15 μ s, 最大帧传输延时为 $2 \times 15 + 3 \times 2\,028$ (6.1 ms), 难以满足场景需求^[2]。

而本协议中由于存在优先级机制, 传感数据会被及时处理。以最大长度 16 384 B 为例, L_{PSDU} 约为 280 704 chips, 码片率为 2 Gc/s, 物理帧头和前导码长度为 2 420 chips 和 80 chips, 由式(6)可得最大 T_s 为 142 μ s。加上等待间隔 8 μ s, 3 次重传的传输延时约为 $3 \times 142 + 2 \times 8$, 即 0.44 ms。相较于 ECMA-398, 本协议不仅降低一个量级, 而且底层传输延时相对于画面帧总延时 2 ms 留有较多余量, 可以较好地满足场景需求。

另外, 如前面式(7)所述, 可用 T_M 代表 T_s 进行后续理论值与仿真值的比较。当待传输信息长度为 16 384 B 时, 可求得无重传时 T_M 为 66 μ s。若重传 3 次, 最大 T_M 约为 $3 \times 66 + 2 \times 8$, 即 214 μ s。

2 协议的设计与实现

2.1 帧结构

过多的数据信息会延长帧在信道中的传输时间, 由信道状况变化导致的传输出错的可能性也会变大^[7]。为

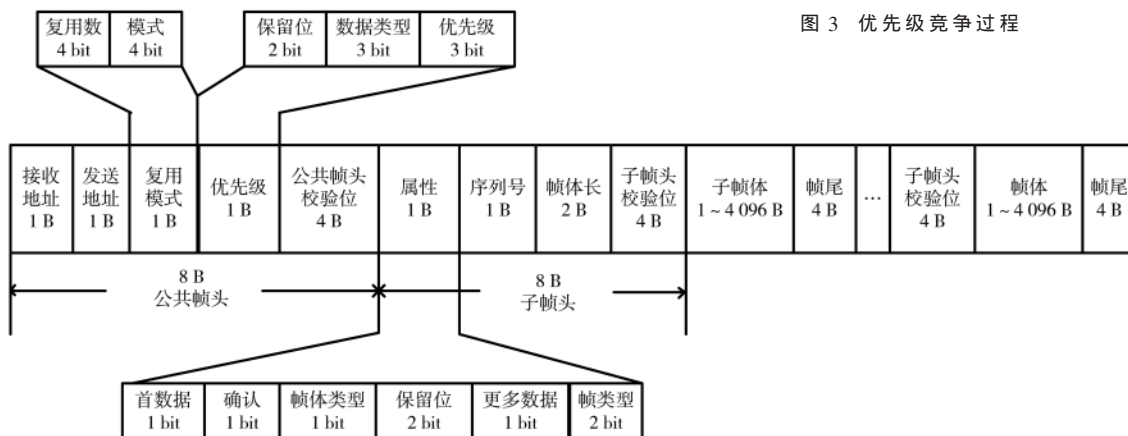


图2 帧结构

了降低传输出错带来的效率影响, 帧结构可采用复合帧的形式。虽然 ECMA-398 也采用了复合帧, 但其低速、低吞吐率的特性限制了场景应用。

如图 2 长数据帧结构所示, 本协议 MAC 帧分为公共帧头、子帧头、帧体、帧尾 4 部分, 帧头中包含了帧类型、优先级、序列号等信息, 用于接收方进行解析校验。数据帧体由多个子帧体构成, 每个子帧体会对应一个单独的子帧头和校验位。帧体中的数据信息会暂时存储在 MAC 层缓存区中, 它的长度直接影响到缓存模块的大小。为了节省成本和降低过多子帧头带来的帧开销, 最多存在 4 个子帧体, 即每个子帧体最大长度为 4 096 B。当每个子帧体在被接收和校验完成后就可以通知上层立即读取, 而不用等整个长数据帧传输完成, 这在一定程度上提高了传输效率。

2.2 系统模型

2.2.1 模型架构

通过 MATLAB 中的 Simulink 工具, 搭建一个协议的系统级模型, 进行系统层面的仿真验证^[8]。过程主要包括连接建立、数据互传、重传等。由于是点对点传输, 因此需要模拟出主从两个节点, 每个节点都包含 MAC 层、直连接口、用户层接口。

数据互传以优先级机制为基础, 在实际传输过程中, 从节点的数据发送权是通过与主节点进行优先级竞争而获得的, 竞争过程发生在主节点中。从节点会将待传输数据的优先级信息添加在确认帧的优先级字段中, 随后会立即开始空闲计时, 并通过信道空闲时长来判断竞争结果, 交互过程如图 3 所示。

图 4 为系统模型构造图, 左右两个模块分别为主从节点, 里面包含了与用户层交互所需的信号、状态机、发

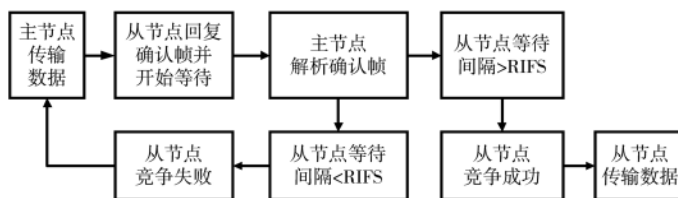


图3 优先级竞争过程

通信与网络 Communication and Network

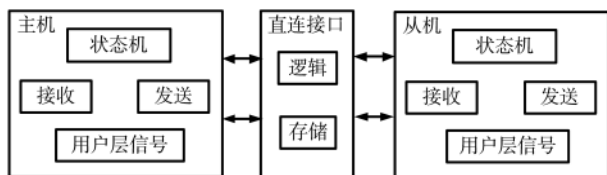


图4 系统模型

送和接收模块,这些模块用于控制信号生成及帧的发送和接收;中间模块为MAC层直连所形成的直连接口模块,供节点间进行数据传输。

2.2.2 模型仿真与分析

图5为模型的仿真数据,可在MATLAB工作区中查看。图5(a)为发送端,各列数据优先级分别为2、3、1(3为最高),图5(b)为接收端接收状况。实验中,发送端第一、三列数据由主节点发送,第二列由从节点发送。观察仿真结果可以发现,在主节点传输数据过程中,从节点通过优先级竞争将数据及时传输到主节点。另外,接收端第二列数据出现两次,也代表了重传过程的进行。

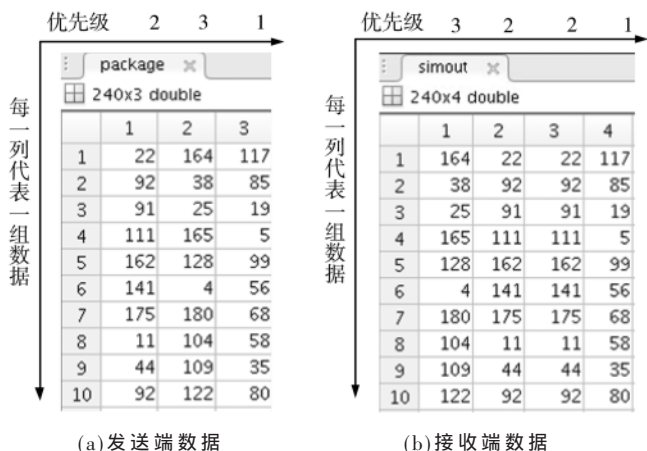


图5 模型仿真结果

2.3 RTL 级实现

2.3.1 方案设计

RTL 级的实现是以寄存器之间的传输为基础进行

描述,代码必须满足可综合的设计风格,以便于后期在实现该技术方案时的逻辑综合过程^[9]。由于目前是MAC层的单独验证,不涉及物理层及空中信道,因此共划分为主状态控制模块、发送模块、接收模块、数据缓存模块四部分,如图6所示。

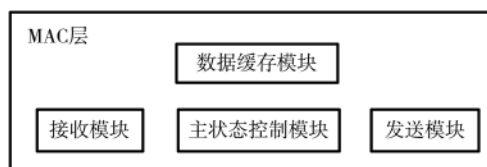


图6 模块划分

核心是主状态控制模块,负责整个协议过程的管理与维护。该模块根据用户层发来的请求信号或接收模块发来的帧数据信息,进行状态的跳转和计时等,再生成相应的信号给发送模块或用户层,进而控制整个通信过程。发送模块的主要功能是进行帧的组装与发送,接收模块为帧的接收与解析,并产生主状态控制模块可以识别的控制信号。数据缓存模块用于暂时存储MAC层与用户层交互的数据信息^[10]。

2.3.2 仿真结果与分析

MAC层时延是指从主节点发出发送请求开始,经过数据帧、确认帧传输,再到主节点收到信息传输成功的信号为止所历经的时间。为了衡量这一指标,需要通过MAC层的单独仿真来获取最短时延与最长时延,从而表征协议的相关性能。

以16384B(长帧)为例,时钟周期为16ns(码片率2Gb/s),传输位宽为32bit。当传输过程顺利,无重传情况发生时,最短延时约为68μs,如图7所示;而当传输环境恶劣,即连续传输出错3次时(超过3次会执行降速机制),最大延时约为211μs,如图8所示。

仿真结果表明,最大仿真延时约为211μs,相较于式(7)中的理论值 $T_M(214\mu s)$ 略有减小,总体延时指标满足场景需求且远小于ECMA-398协议理论值(6.1ms),验证了前文理论分析的正确性和定制化协议的优越性。

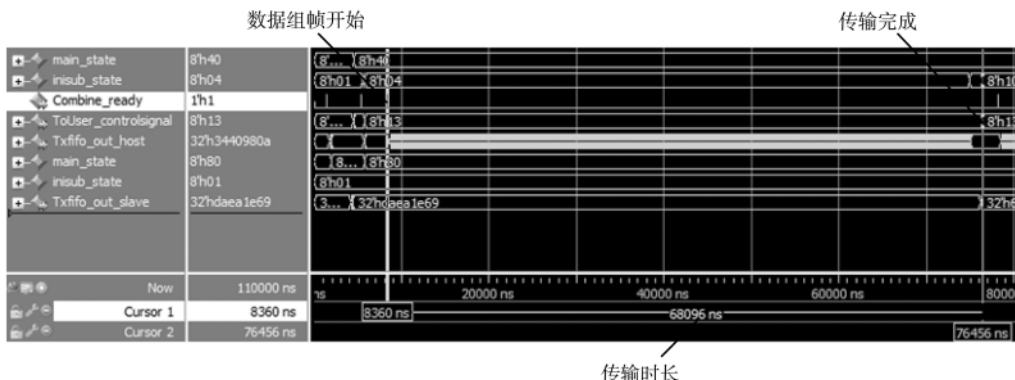


图7 最短延时



3.1 验证平台与流程

如图 9 所示, 首先将协议模块及两个 FIFO 模块(输入位宽为 64, 输出位宽为 32)作为 IP 下载到 FPGA 板中。然后通过板上的控制开关, 让主节点发起连接。同时, PC 端会将待传输的数据信息通过以太网输入到两个 FIFO 模块中。连接建立成功后, 可在板上观察到指示信号。随后主节点会开始读取 FIFO1 中的数据信息, 组成完整的数据帧发送到从节点, 从节点将其解读出来, 暂时存储在 FIFO3 中。同理, 从节点在优先级竞争成功后, 也会进行上述的传输过程。由于主从节点数据优先级不同, 通过数据抓包软件观察以太网口的数据传输情况, 从而对比收发是否一致, 来验证包括优先级机制在内的功能的正确性。



图 10(b)~(d)为 PC 端所接收到的部分数据,由结果可知,PC 端按顺序收到了 FIFO1 中的数据、FIFO2 中的

(a) 输入数据

(b)接收 1

(c)接收 2

(d)接收 3

图 10 测试结果

数据(有数据减一状况出现)、FIFO1 中数据。这说明优先级竞争机制成功触发,从节点在竞争成功后发出了高优先级的数据,随后主节点继续发送,等待下一次竞争的出现。以上测试结果很好地验证了协议 RTL 级设计的正确性。

4 结论

以 AR 眼镜为代表的 AR 设备与智能手机等移动端间短距离、超高速、低功耗、低时延无线通信技术是可穿戴式的 AR 产品的关键技术之一,具有广阔的应用前景。本文针对特定场景,通过指标探讨,对协议的帧结构、机制等进行了设计。与现有的 ECMA-398 协议相比,吞吐率标准从 71% 提高到 86%;通过引入数据优先级机制将最大帧传输延时降低了一个量级($<1\text{ ms}$),很好地增强了用户体验感。随后利用系统级模型完成了协议的功能性仿真,并用 RTL 代码对协议进行了具体实现。最后利用 FPGA 验证平台,在实际电路中对协议的逻辑设计进行了验证,实现了主从节点间的数据传输过程。

参考文献

- [1] IEEE Standards Association. IEEE 802.11ad, wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY)

通信与网络 Communication and Network

specifications[S].2012.

- [2] ECMA International. Standard ECMA-398, close proximity electric induction wireless communications[S].2011.
- [3] 吴湛击. 无线通信新协议与新算法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [4] 陈磊, 谈振辉. 基于优先级和休眠机制的无线体域网 MAC 协议的能效优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] SARANG S, DRIEBERG M, AWANG A. Muti-priority based QoS MAC protocol for wireless sensor network[C]. 2017 IEEE International Conference on System Engineering and Technology, Shah Alam, Malaysia, 2017.
- [6] IEEE Standards Association. IEEE 802.15.6. wireless body area network[S]. 2012.
- [7] KIM B S, Fang Yuguang, WONG T F. Rate-adaptive MAC protocol in high-rate personal area networks[C]. 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta,

GA, USA. 2004.

- [8] MathWorks. State flow user's guide[Z]. MATLAB & Simulink. R2013a, 2013.
- [9] 夏宇闻, 韩彬. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
- [10] 丁彬勇, 黄鲁, 白雪飞. 脉冲超宽带通信系统基带单元设计与芯片实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [11] 米联电子科技有限公司. XILINX ZYNQ 以太网通信篇——基于 MZ7X 系列开发板[Z]. 2018.

(收稿日期: 2020-03-03)

作者简介:

汪健(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向: 无线通信 MAC 层的设计与实现。

林敏(1974-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 无线通信芯片设计、微电子与固体电子学等, E-mail: mlin99@shu.edu.cn。

(上接第 60 页)

参考文献

- [1] 何嘉辉, 周鹏, 余晖俊, 等. 电磁驱动大尺寸 MEMS 扫描镜的研究[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 21-28.
- [2] 胡宗恺, 饶志宏. 高精度数字鉴相技术的 FPGA 实现[J]. 通信技术, 2010, 43(12): 177-179.
- [3] 许文浩, 屈乐乐, 殷文浩. 基于 FPGA 和 DDS 的频率步进信号源的设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2017(1): 147.
- [4] Gu Dawei, Yao Yao, Zhang Dengming, et al. Matlab/Simulink based modeling and simulation of fuzzy PI control for PMSM[J].

Procedia Computer Science, 2020: 166.

- [5] 陈媛媛, 刘有耀. FIR 滤波器的 FPGA 设计与实现[J]. 电子设计工程, 2017, 25(24): 65-69, 73.
- [6] 安书董, 李明, 王宛人, 等. 基于 FPGA 的低抖动时钟锁相环设计方法[J]. 航空计算技术, 2017, 47(6): 109-111.

(收稿日期: 2020-05-11)

作者简介:

董淑豪(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: MEMS 驱动电路。

吴东岷(1973-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: MEMS 光学成像系统等, E-mail: dmwu2008@sinano.ac.cn。

(上接第 63 页)

工艺设备可以选择以反射功率或者直流偏压值作为控制目标, 进行射频功率匹配调节。虽然负载形式和结构不同, 但自动匹配原理相似。

6 结论

通过研究和试验, 采用本文介绍的射频匹配分析方法, 对相关电路的设计改进, 可以为射频功率匹配设计提供指导, 对设备工艺参数的确定提供较大帮助。

在设备老化, 工作状态发生变化, 或者工艺条件比较极端的情况下, 通过增减旁路电容、补偿电感方法扩大设备匹配能力, 可以提高设备工艺适用性。

通过给不同工艺预置匹配电容位置, 可以提高阻抗匹配速度、精度和稳定性, 降低反射功率, 提高生产效率, 有利于提高产品的工艺性能和质量。

(上接第 72 页)

实现[J]. 航空计算技术, 2013, 43(4): 113-121.

(收稿日期: 2020-02-02)

参考文献

- [1] 张志. 射频电源自动阻抗匹配器的开发和实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [2] 卢慧. 射频阻抗自动匹配方法的研究与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [3] 郑珍, 王海, 周渭, 等. AD8302 型相位差测量系统的设计[J]. 电子科技, 2005(11): 48-52.

(收稿日期: 2020-05-31)

作者简介:

赵英伟(1971-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

张文雅(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

郝晓亮(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

作者简介:

马力科(1982-), 通信作者, 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 信号处理平台及嵌入式系统开发, E-mail: mcdona_cn@163.com。

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