

兼容多种 WiFi 协议的数字射频前端设计

白栎旸¹, 王维², 徐圣楠³

(1.南京睿赫电子有限公司, 江苏南京 210018; 2.中国船舶集团有限公司第八研究院, 江苏南京 211100;
3.南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

摘要: 介绍了一种可用于集成电路实现的 WiFi 数字射频前端架构, 兼容 802.11a/b/g/n/ac/ax 协议, 可工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 信道下。配合模拟接收电路和解调器, 实现了不同 WiFi 信号类型的自动增益锁定、报文类型区分、频谱搬移和重采样、邻道干扰抑制等功能。

关键词: WiFi; 5G; 射频前端; 自动增益控制; 空闲信道评估

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211334

中文引用格式: 白栎旸, 王维, 徐圣楠. 兼容多种 WiFi 协议的数字射频前端设计 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 101–106.

英文引用格式: Bai Liyang, Wang Wei, Xu Shengnan. Digital RF front end compatible with various WiFi protocols[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(10): 101–106.

Digital RF front end compatible with various WiFi protocols

Bai Liyang¹, Wang Wei², Xu Shengnan³

(1. Nanjing Ruihe Electronics Co., Ltd., Nanjing 210018, China;

2. No.8 Institute of China State Shipbuilding Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

3. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper introduces a WiFi digital RF front-end architecture which can be used for ASIC. It is compatible with 802.11b/a/g/n/ac/ax protocol in 2.4 GHz and 5 GHz channels. Combined with analog receiving circuit, ADC and demodulator, the functions of signal type differentiation, power locking of different types of signals, filtering and resampling of signals with different bandwidth are realized.

Key words: WiFi; 5G; RIU; AGC; CCA

0 引言

数字射频前端, 又称数字射频接口单元(Radio Interface Unit, RIU), 是 WiFi 接收模块的重要组成部分, 它不仅负责指导前端模拟电路对接收信号进行放大, 还会对接收信号进行前期处理, 包括将接收信号按照不同的带宽进行滤波, 去除直流分量, 进行空闲信道评估(Clear Channel Assessment, CCA) 等。由于 20 年间 WiFi 系统的广泛应用, 各类 WiFi 协议设备尚在应用当中并未淘汰, 在设计中也必须考虑新旧协议的兼容性。

与 WiFi RIU 设计有关的研究多集中于产业领域, 因而报道和论文较少。本文就此问题进行了详细论述, 具体介绍了一种可兼容现有全部 WiFi 协议的 RIU 架构。全文分为 3 部分, 第 1 部分介绍 RIU 的位置、硬件架构、功能和处理流程, 第 2 部分使用本设计对正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和直接序列扩频/补码键控(Direct Sequence Spread Spectrum

and Complementary Code Keying, DSSS/CCK)两种类型的信号进行了自动增益控制和类型识别的仿真, 第 3 部分对本文的工作进行了总结。

1 系统架构

1.1 RIU 在 WiFi 电路中的位置

RIU 在 WiFi 接收电路中处于模数转换器(Analog/Digital Converter, ADC)和基带解调器之间, 如图 1 所示。该模块的主要作用有 2 个, 其一是对于模拟接收部件进行配置, 使其以合适的增益对接收信号进行放大, 称为自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC); 其二是将 ADC 信号按照解调器的需要进行重新采样。

1.2 硬件架构

RIU 设计的基本架构如图 2 所示。它可以分为数据通路和控制通路。数据通路, 即模拟接收信号经过 ADC 采样、基带频谱搬移、数字滤波、下采样后, 转化为多种不同带宽的信号, 供 OFDM 或 DSSS/CCK 解调器选择使

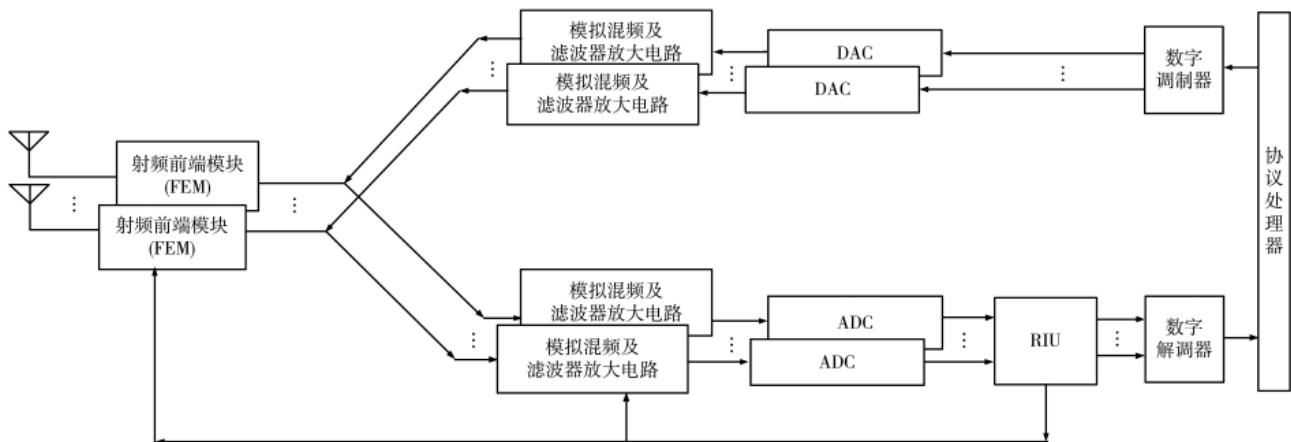


图 1 RIU 在 WiFi 接收电路中的位置

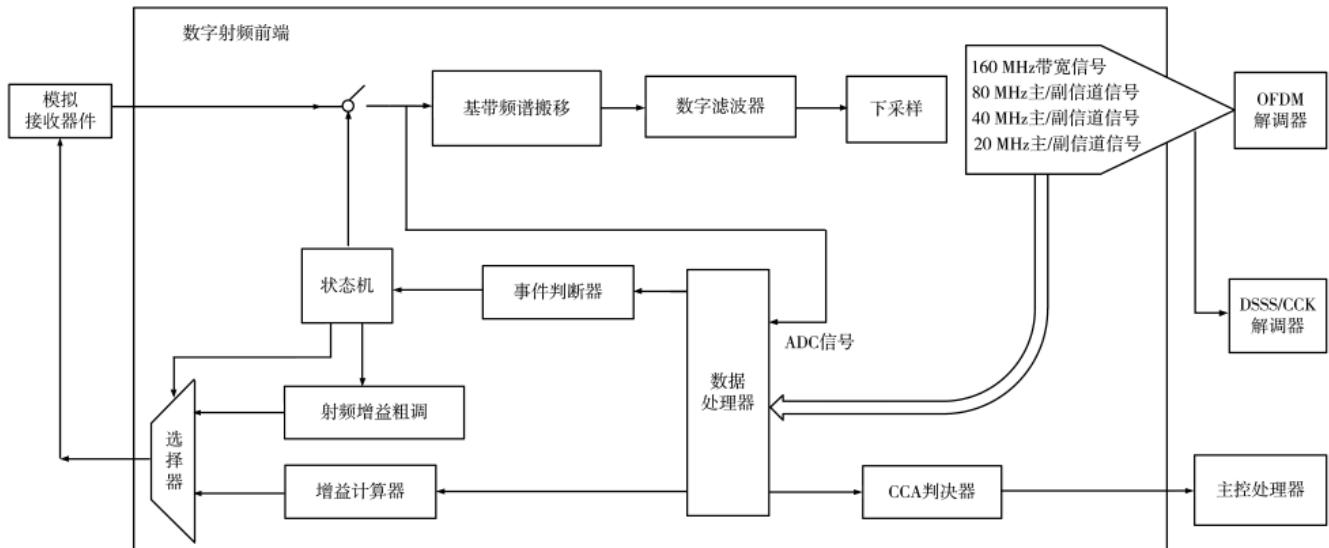


图 2 RIU 的基本架构

用。控制通路是将数据通路的信息反馈到数据处理器,最终实现状态机的跳转,并向模拟器件提供增益配置。状态机决定了配置模拟增益、开/关数据通路、开关解调器等操作的顺序和时机。

1.3 状态机

RIU 内部状态机如图 3 所示。在芯片上电后, 数据和控制通路以及解调器都处于关闭状态。状态机对模拟放大器设置一个初始增益后, 打开数据和控制通路。接收信号经数据通路后, 进入控制通路的数据处理器计算数字信号功率, 若功率达到触发条件, 即可进行 AGC 调节及信号识别。触发条件分为饱和与发现两种类型。前者是功率超过饱和门限后的触发, 后者是功率的绝对值或相对变化量满足一定条件导致触发。饱和后需要状态机进行一系列循环增益粗调才能将信号稳定在非饱和状态, 而发现则无须进行增益粗调, 直接进入精调。精调是按照 ADC 的目标功率对模拟增益进行精细化计算和调整。精调后将信号与 OFDM 前导和 DSSS/CCK 前导进行相关。

若与 OFDM 相关，则打开 OFDM 解调器，它将持续解析信号内容，并上报数字射频前端是否发现 SIG 字段，若未发现，说明信号消失，回到初始态等待再次触发。若发现是绿野模式信号(Green Field, GF)的 HT-SIG (High Throughput Signal Field) 字段，说明为 WiFi4 的 GF 信号，它将通知 RIU 按照 SIG 字段定义的等待时间等待其结束。若是 L-SIG(Legacy Signal Field)，说明是兼容性的 802.11a/g/n/ac/ax 信号，需要进一步等待 HT-SIG。解调器会根据不同协议报文在 SIG 字段的相位旋转情况区分 802.11a/g/n/ac^[1]。若为 802.11a/g 报文，则会按照 L-SIG 规定时间进行等待；若为 WiFi4 或 5 的报文，则会根据 HT-STF(High Throughput Short Training Field) 字段或 VHT-STF(Very High Throughput Short Training Field) 字段对功率进行重新锁定，并将按照规定的信号结束时间对增益进行保持。对于 WiFi4，结束时间依据 HT-SIG 字段获得^[2]，对于 WiFi5，结束时间依据 L-SIG 字段规定的字节和速率反推获得^[3]。若解调器发现有两个重复的 L-SIG 字段被发送，则判断为 WiFi6 信号^[4]，并指示数字

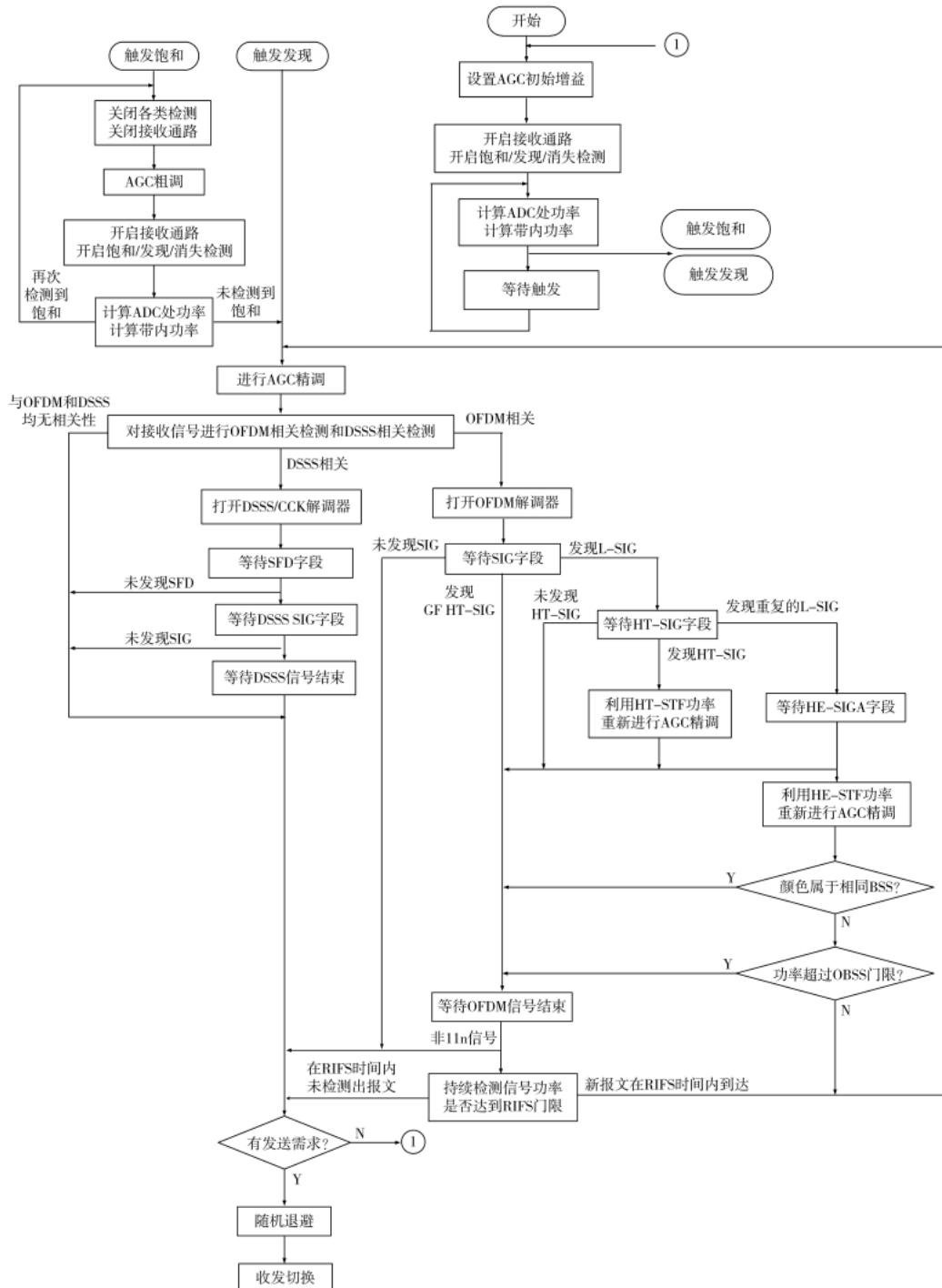


图 3 RIU 内部状态机示意图

前端将等待 HE-STF(High Efficiency Short Training Field)字段,然后对功率进行重新锁定。锁定后的 WiFi6 不会简单地等待报文结束,而是从解调器处调用 HE-SIGA(High Efficiency Signal A)字段中的颜色信息^[5],区分该报文是否为本设备所处的基本网络(Basic Service Set, BSS),若是,说明报文来自网内成员,则继续接收信号,否则,说明来自邻近网络干扰,则将根据设定的重叠网络(Overlapping Basic Service Set, OBSS)功率门限,决定是否

结束接收。若为 WiFi4,还应考虑协议规定的 RIFS(Reduced Inter-Frame Space)情况^[6],即,以 2 μs 间隔连续发包的情况。状态机会在前一个报文结束的 2 μs 后打开数据和控制通路,测量 20 MHz 带内功率是否在前一个报文功率的±10 dBm 以内,若是,则说明为 RIFS 情况,不会初始化增益,而是直接进行 AGC 精调。

若与 DSSS 相关,则开启 802.11b 解调器,解调器会将报文字段信息反馈到 RIU,如是否收到 SFD(Start Frame

Delimiter)、SIG 字段等^[7]，若等待相应时间后，这些前导字段未收到，会导致状态机的初始化。由于 DSSS/CCK 信号不支持 5G 频段，当用户设定为 5G 频段时，遇到 DSSS/CCK 相关事件后，可直接回到 AGC 初始过程。

在报文解调过程中，若功率突然降低到消失门限以下，状态机将关闭解调器和数据/控制通路，初始化 AGC。

1.4 数据通路

数据通路由基带搬移、数字滤波、下采样三个模块组成。基带搬移的目的是将信号从基带边缘移至中心，原因是 WiFi 信号并非固定带宽，可能出现 20/40/80/160 MHz 等不同带宽信号，而模拟低通滤波器需要支持最大带宽 160 MHz，因而小于此带宽的信号会分布在通带中心频点两侧^[8]。系统将按照用户设置的主信道编号对其进行搬移。数字滤波器将接收信号按照不同带宽进行滤波。最终将信号降至与带宽相同的频率。

数据通路为同时输出 20~160 MHz 的主/副信道信号，采用分级滤波方式，如图 4 所示。之所以需要产生多种带宽信号，是因为接收机无法预知信号带宽，需要解调器解出 HT-SIG、VHT-SIGA(Very High Throughput Signal Field A)或 HE-SIGA 中的带宽信息。

解析的信息中，有 20 MHz 副信道信息，有助于解调

器进行信号带宽的初始识别，该识别主要针对 WiFi4 GF 信号。由于 802.11a/g, WiFi4~6 的兼容格式都包含一段公共前导，允许接收机对其进行识别，接收机只需要使用 20 MHz 采样即可获得这些前导信息。但 WiFi4 GF 信号不兼容其他报文格式^[9]，如图 5 所示，其带宽有 20/40 MHz 两种。若使用 40 MHz 带宽，接收机使用 20 MHz

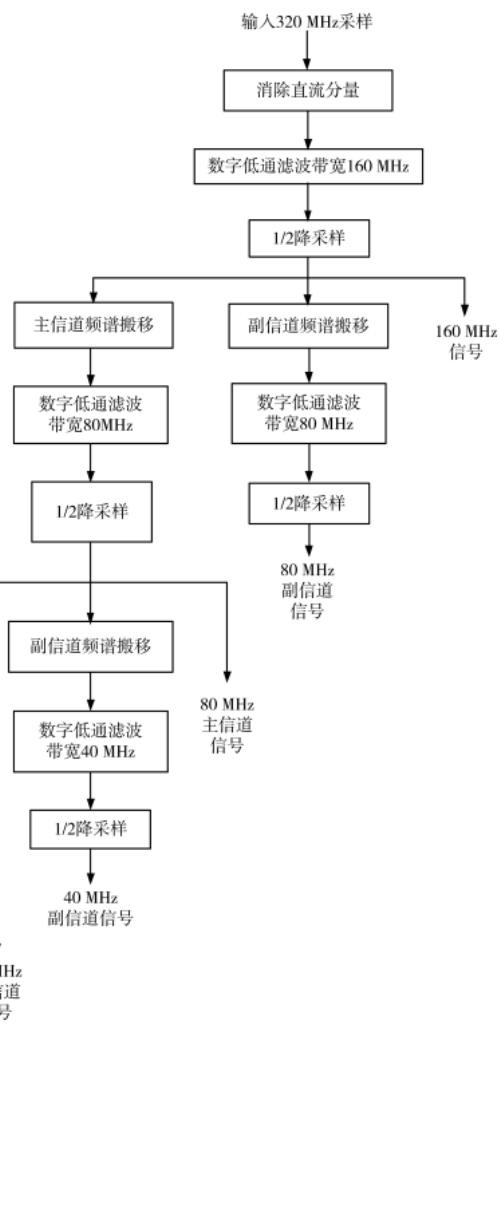


图 4 数据通路中不同带宽信号的产生

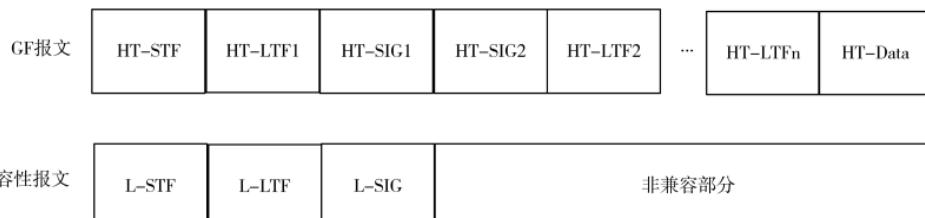


图 5 GF 报文与兼容性报文对照

采样无法获取信息。因而要求接收机必须在报文开始的STF(Short Training Field)阶段就尽早获知其带宽，并按带宽采样解析。由于GF信号最多只有40 MHz^[10]，因而只需要使用20 MHz主/副通道信号，而其他带宽的副通道信号将用于CCA的识别，不输出到解调器。

1.5 控制通路

控制通路由数据处理器、事件判断器、射频增益计算器、CCA判决器组成。

数据处理器基于数据通路输出，计算ADC信号功率和滤波后信号功率(包括各带宽下的主/副信道功率)。

事件判断器基于ADC信号功率及滤波后信号功率，来判断功率是否溢出、是否发现信号、信号是否消失、接收信号是否与OFDM或DSSS/CCK信号相关，最终输出各类判断信号，称为“事件”。状态机的运转便是以事件和解调器的反馈为依据的。信号的饱和、发现、消失以ADC信号功率门限作为衡量标准。饱和门限应设为解调器最优设计性能的上限。发现事件有2种判决方式，一种是绝对功率门限，另一种是相对功率增强门限。两者都以20 MHz主信道信号功率为基础。相对门限为未达到最优功率的信号提供了被发现的机会，当间隔4 μs的两个采样点，其功率提升了数倍，达到相对门限时，亦将触发发现事件，因而即使功率接近接收灵敏度的弱信号，仍可被发现并解析。消失事件将在20 MHz主信道功率低于灵敏度门限时被触发，它会导致状态机初始化。信号与OFDM、DSSS/CCK的相关性判断，均使用自相关、互相关双重衡量标准。根据两种信号的不同特征，自相关分别采用0.8 μs和1 μs的延迟积分窗口^[11]，需要注意的是DSSS不具备严格的周期性^[12]，因而其自相关结果不会像OFDM前导一样形成平台，只会形成一系列尖峰，通过测量这些尖峰的高度，决定相关与否。

射频增益计算器用于计算并配置模拟接收器件的放大增益，是AGC环的重要组成部分，可分为粗调和精调。粗调的目的是找到一个合适的增益范围，保证信号不会饱和。精调的目的是根据ADC的目标功率，精准锁定增益。通常，WiFi接收机的接收功率范围是-90~10 dBm^[13]，需要用迭代尝试的策略来确定合适的增益。在此范围内确定4个放大增益挡，分别针对空口功率为-70/-40/-10/5 dBm的信号，对应远/中/近/超近距离的情况。根据ADC的目标功率，可以确定这4种情况的粗调增益。当接收机启动或完成了一次接收后，需要将其初始化到远距离增益挡。开启接收，后若发现饱和，则按4个挡位逐步降低增益。粗调后或发现事件后，若不再发生饱和，则进入精调，此阶段将具体计算模拟电路提供的最佳增益，以及数字电路上用于弥补滤波损失所需的乘性系数。模拟电路精调增益的计算过程为 $\rho' = T_a - C_a + \rho$ ，其中， ρ 为上次设置的模拟电路增益， T_a 为ADC信号目标功率， C_a 为数据处理器计算得到的当前

ADC信号功率。

数字电路乘性补偿系数的计算过程为 $\theta = T_d - C_d - (\rho' - \rho)$ ，其中， T_d 为滤波后信号目标功率， C_d 为数据处理器计算得到的当前滤波后信号功率。滤波后信号功率均以20 MHz主信道信号为对象， θ 亦为20 MHz带宽下的数字乘性系数，用于40 MHz和80 MHz时须在 θ 基础上分别增加3 dB和6 dB。

CCA判决器用于告知主控处理器信道是否空闲，若空闲且主控有发射需求，则会进入随机退避继而命令发射机发送调制信号。CCA的判断包括功率判断和信号类型判断两种。协议中对CCA的判断标准已有明确规定^[14]，但在具体实现方面，本架构做了如下改进：协议中仅规定了接收不同类型的信号，其功率未达到某门限时，可以允许RIU在尚未完成接收的情况下发送数据。这一规定的前提是已确认该信号的接收对象不是本机。因此，本系统在实现上，对于未能识别的信号(噪声及干扰)，将按照规定的20 MHz带宽内-62 dBm门限^[15]进行退避，但对于可识别的信号，则须等待报文解析到可获知其接收对象的程度才进一步判断其功率是否符合CCA标准。信号的功率是以4 μs为窗长，使用划窗累积法连续计算的，其计算值由于使用环境的原因可能出现波动，若在门限附近波动则会导致CCA的频繁变化。因此，仅使用协议中的单一门限是不够的。为CCA设置回差，即，声明信道忙时，以协议标准为门限，而判断信道由忙转闲的标准则是在标准门限基础上降低3 dB，如此可以避免CCA的频繁波动。

2 性能验证

2.1 OFDM信号的检测验证

图6为WiFi5 OFDM信号的功率锁定过程。图中虚线为功率调节过程，报文开始时为强增益，触发饱和后下调增益，在VHT-STF字段的中间(50 μs位置)会重新检测功率并微调增益，当报文结束后，增益解锁，恢复到初始的强增益。图中“*”囊括区域为功率锁定区域，亦为OFDM解调器的使能时段。从报文开始到功率锁定耗

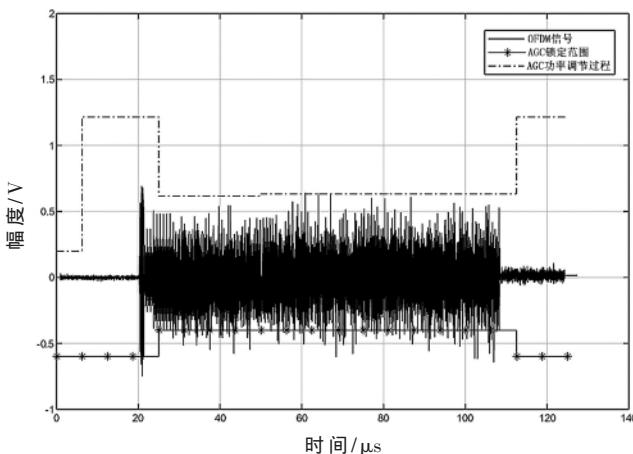


图6 WiFi5 OFDM信号AGC过程

时 $4.8 \mu s$, 仍在 L-STF 字段内, 剩余 $3.2 \mu s$ 目的是给解调器以同步和粗频偏估计的时间。

2.2 DSSS/CCK 信号的检测验证

图 7 为 DSSS/CCK 信号的功率锁定过程。图中虚线为其功率调节过程, 当初始化时, 增益最强, 收到信号后触发饱和, 经过降低粗调功率和精调后稳定接收至报文结束, 继而将增益复位。图中“*”囊括区域为功率锁定区域, 亦为 802.11b 解调器使能的时段。该报文锁定位置在 DSSS 同步头开始后的 $23 \mu s$ 处, 即使 DSSS 使用短帧头, 尚有 $33 \mu s$ 剩余同步头可供解调器完成同步。

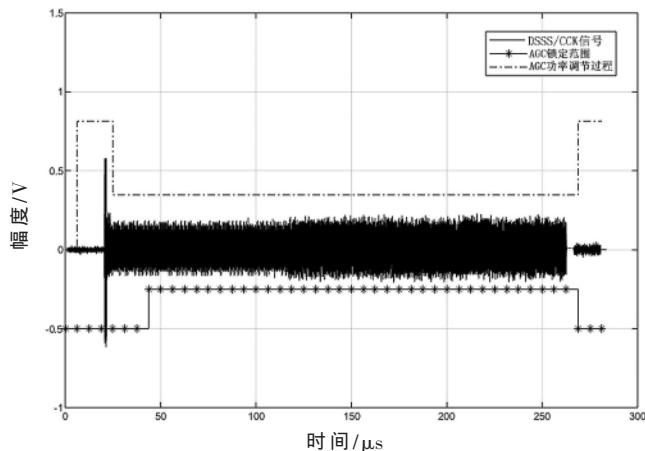


图 7 DSSS/CCK 信号 AGC 过程

3 结论

本文设计了一种向下兼容现有多种 WiFi 协议的 RIU 设计架构。该架构通过状态机控制内部数据和控制通路, 可完成对模拟射频接收器件的自动增益控制、报文类型识别、标识信道忙闲, 以及对信号进行不同带宽下的信号搬移、滤波和重采样等工作。可识别 2.4 GHz 和 5 GHz 射频信道下的 802.11a/b/g/n/ac/ax 信号, 以及特殊的 WiFi4 GF 信号和 RIFS 连续重传机制。对于新一代 WiFi6 集成电路的研制, 具有一定参考和应用价值。

参考文献

- [1] PERAHIA E, STACEY R. Next generation wireless LANs: 802.11n and 802.11ac[M]. Cambridge University Press. 2013.
- [2] GRAZIA C A. A performance model for Wi-Fi frame aggregation considering throughput and latency[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(7): 1577–1580, DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2995590.
- [3] GAST M S. 802.11ac: a survival guide[M]. O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [4] KHOROV E, KIRYANOV A, LYAKHOV A, et al. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 197–216, DOI: 10.1109/COMST.2018.2871099.
- [5] CHEN Q, ZHU Y H. Scheduling channel access based on target wake time mechanism in 802.11ax WLANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(3): 1529–1543, DOI: 10.1109/TWC.2020.3034173.
- [6] MANSOUR K, JABRI I, EZZEDINE T. Revisiting the IEEE 802.11n A-MPDU retransmission scheme[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(6): 1097–1100, DOI: 10.1109/LCOMM.2019.2911834.
- [7] LI X P, ISMAIL M. Multi-standard CMOS wireless receivers: analysis and design[M]. Springer, 2002.
- [8] SALIBA D, IMAD R, HOUCKE S. WiFi channel selection based on load criteria[C]//2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications(WPMC), Bali, Indonesia, 2017: 332–336, DOI: 10.1109/WPMC.2017.8301833.
- [9] GAST M. 802.11n: a survival guide[J]. Journal of Hospice & Palliative Nursing, 2012, 4(4): 206–207.
- [10] LIU J, YAO M, QIU Z. Enhanced two-level frame aggregation with optimized aggregation level for IEEE 802.11n WLANs[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2254–2257, DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2495108.
- [11] 史治国, 洪少华. 基于 XILINX FPGA 的 OFDM 通信系统基带设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
- [12] MIKULKA J, HANUS S. CCK and Barker coding implementation in IEEE 802.11b standard[C]//2007 17th International Conference Radioelektronika, Brno, Czech Republic, 2007, DOI: 10.1109/RADIOELEK.2007.371484.
- [13] OIKONOMOPOULOS-ZACHOS C, STAVROU E, BAG-GEN R, et al. A MIMO antenna array with shaped beam in waveguide technology for WiFi base stations[C]//2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications(iWAT), Athens, Greece, 2017, DOI: 10.1109/IWAT.2017.7915351.
- [14] Draft standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks—specific requirements—part 11: Wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications amendment[S]. IEEE Standard P802.11ax. IEEE, 2019.
- [15] PUWANESHWARI M, SIDEK O. Wideband analog front-end for multi-standard software defined radio receiver[C]// Proceedings 15th IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, 2004.

(收稿日期: 2021-01-26)

作者简介:

白栎旸(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: WiFi、无线充电。

王维(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 信号与信息处理、仪器设备自动化测试、雷达组件系统测试。

徐圣楠(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线电能传输。



扫码下载电子文档

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