



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110943793 B

(45) 授权公告日 2020. 11. 27

(21) 申请号 201811114413.7

(22) 申请日 2018.09.25

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110943793 A

(43) 申请公布日 2020.03.31

(73) 专利权人 北京大学
地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号

(72) 发明人 王韬 李志伟 刘君

(74) 专利代理机构 北京万象新悦知识产权代理
有限公司 11360

代理人 黄凤茹

(51) Int. Cl.

H04B 17/382 (2015.01)

(56) 对比文件

CN 106973387 A, 2017.07.21

CN 102970054 A, 2013.03.13

CN 102158294 A, 2011.08.17

CN 104821849 A, 2015.08.05

US 2017318595 A1, 2017.11.02

审查员 马晓晓

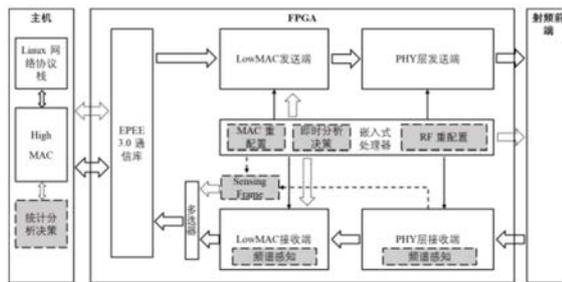
权利要求书3页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于协同感知的动态频谱接入方法与系统

(57) 摘要

本发明提供一种基于协同感知的动态频谱接入方法与系统,动态频谱接入系统是面向动态频谱接入优化的基于FPGA的SDR平台;包括:计算机主机、FPGA和射频前端,能够与商用网卡实时通信;还包括在计算机主机和FPGA上优化的认知无线电模块;所述认知无线电模块包括频谱感知信息提取模块、协同频谱分析和频谱决策模块和上位机和FPGA相配合分析决策模块。本发明能够获取到更加丰富的无线网络底层频谱感知信息,并可以根据这些感知信息进行更加准确的分析,得出详细的信道状况和干扰信道的原因,能够兼顾低延迟和准确性,更加即时准确地捕获频谱空洞,并加以利用,进而做出相应的决策。



1. 一种基于协同感知的动态频谱接入系统,所述动态频谱接入系统是面向动态频谱接入优化的基于FPGA的SDR平台;包括:计算机主机、FPGA和射频前端,能够与商用网卡实时通信;还包括在计算机主机和FPGA上优化的认知无线电模块;以所述计算机主机作为上位机,所述认知无线电模块包括频谱感知信息提取模块、协同频谱分析和频谱决策模块以及上位机和FPGA相配合分析决策模块;

FPGA中设置PHY层频谱感知接口和MAC层辅助感知信息接口,用于实现认知无线电模块所需的低延迟频谱感知、分析和决策,并在嵌入式处理器e-Proc中进行频谱分析、即时决策,重配置通信参数;嵌入式处理器e-Proc在FPGA中实现;

在计算机主机中设置获取频谱感知信息和重配置底层通信参数的接口,获取到更加丰富的感知信息,并进行更加准确详细的统计分析,做出最终决策,重配置通信参数。

2. 如权利要求1所述基于协同感知的动态频谱接入系统,其特征是,连接上位机和FPGA的方式包括USB方式。

3. 如权利要求1所述基于协同感知的动态频谱接入系统,其特征是,认知无线电模块中的频谱感知信息提取模块,用于从无线网络底层获取反映信道状况的各种参数,并进行处理;认知无线电模块中的协同频谱分析和频谱决策模块,用于综合各种频谱感知信息,对信道进行评估;认知无线电模块中的上位机和FPGA相配合分析决策模块,用于结合基于e-Proc的即时分析决策和基于上位机的统计分析决策,实现兼顾低延迟和准确性的分析决策。

4. 如权利要求1所述基于协同感知的动态频谱接入系统,其特征是,所述系统实现802.11a/g协议。

5. 一种基于协同感知的动态频谱接入方法,通过获取丰富的频谱感知信息,进行更准确的动态频谱接入,实现更准确的分析决策;包括频谱感知信息提取过程和动态频谱接入过程;

1) 所述频谱感知信息提取包括:设计实现面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层、计算与获取频谱感知信息、汇总传输频谱感知信息;实现从无线网络底层获取各种频谱感知信息,进行处理得到能够反映信道状况的各种参数;

具体执行如下步骤:

A1. 设计实现面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层;

A11. PHY层设计与实现:PHY层包括射频前端与PHY层接口、PHY层接收端、PHY层频谱感知模块;

在射频前端与PHY层接口处,将基带信号复制为三路,第一路送入PHY层解码流水线的同步模块;第二路送入FFT模块,进一步进行能量计算;第三路送入基带数据打包模块,进行数据打包,上传至计算机主机;上述三路数据流分别简称为解码数据流、能量数据流和基带数据流;通过解码数据流获取大部分频谱感知信息,通过能量数据流获取能量值,通过基带数据流获取基带数据;

A12. 设计实现MAC层,主要涉及Low MAC部分;包括如下步骤:

A121. 由一个嵌入式处理器e-Proc和多个IP核组成Low MAC;将嵌入式处理器e-Proc和多个IP核连接到一条总线AXI bus上,实现IP核与e-Proc之间的通信;在e-Proc中实现分析和决策算法;IP核包括MAC层IP核、感知IP核、接口IP核;

A122. 将e-Proc与FPGA芯片一起封装,实现低延迟通信;

A123. 在e-Proc中实现即时分析决策模块与Low MAC,支持基于e-Proc的即时分析决策和基于计算机主机的统计分析决策;

即时分析决策是:e-Proc在相应接口IP核获取MAC层和PHY层感知信息,经过简单的分析和决策算法后,e-Proc将重配置参数信息发送给对应的接口IP核,以改变相关通信参数;

基于计算机主机的统计分析决策是:在计算机主机中使用MAC层和PHY层感知信息进行协同感知分析;由计算机主机将决策信息通过计算机主机接口IP核传递给low MAC,并进一步完成参数重配置;

A2. 计算与获取频谱感知信息,包括如下步骤:

A21. 计算与获取PHY层频谱感知信息,包括能量值、SNR;

A22. 计算与获取MAC层频谱感知信息,包括平均回退时间和信道占用率;

A3. 频谱感知信息的汇总传输,包括如下步骤:

A31. 将信息进行组合,整体上传至计算机主机;包括下行的参数重配置信息和上行的频谱感知信息;

A32. 输出感知信息帧;感知信息帧包括:MAC层感知信息、PHY层感知信息和/或基带数据;将输出的感知信息帧与low MAC RX输出的通信数据帧统一接入多选器模块,根据先后顺序,择一上传至计算机主机;

2) 以所述计算机主机作为上位机,所述动态频谱接入过程包括:协同频谱分析和频谱决策过程、上位机与FPGA相配合的分析决策过程;

B1) 通过所述协同频谱分析和频谱决策过程,利用多种频谱感知信息,对信道进行更加详细准确的评估;

B2) 通过所述上位机和FPGA相配合的分析决策过程,利用基于e-Proc的即时分析决策和基于上位机的统计分析决策,进行兼顾低延迟和准确性的分析决策,获得频谱重构策略;即时分析决策延迟低,能够充分利用频谱空洞;统计分析决策准确性高,能精确地重构通信参数;

通过上述步骤,实现基于协同感知的动态频谱接入。

6. 如权利要求5所述的基于协同感知的动态频谱接入方法,其特征是,步骤B1)所述协同频谱分析和频谱决策过程,具体协同步骤1)中所述的多种频谱感知信息进行综合分析,得出信道状况,给出频谱重构决策策略;包括:

一是利用多种频谱感知信息对信道状况进行准确分析;

二是判断步骤1)中所述的多种信道状况是否同时存在;

三是根据当前信道状况做出频谱决策。

7. 如权利要求5所述的基于协同感知的动态频谱接入方法,其特征是,步骤B2)所述上位机与FPGA相配合的分析决策过程具体是:从硬件构成上将嵌入式处理器e-Proc与计算机主机相配合,即将即时分析决策和统计分析决策相配合;即时分析决策依靠FPGA中的e-Proc实现,进行简单分析,通过分析能量值、信噪比和CRC校验错误率,以低延迟对发送增益和调制方式进行修改,从而改善通信效果;统计分析决策在上位机中实现,处理性能更好,综合更多的频谱感知信息进行分析,重配置所有通信参数,且统计分析决策的重配置优先级高。

8. 如权利要求5所述的基于协同感知的动态频谱接入方法,其特征是,步骤A11中,具体地,解码数据流进入PHY层解码,并通过MAC层完成数据处理,在不存在错误的情况下上传至计算机主机;通过解码数据流的解码,在PHY层中获取到各种信道信息;

能量数据流进入FFT模块,将信号由时域转换为频域,从而得到每个子载波的信息,计算出能量,从而更细节地分析信道状况,利用频宽更窄的频谱空洞;

基带数据流则将未经处理的基带数据直接上传至计算机主机,便于在计算机主机进行更复杂详细的处理。

9. 如权利要求5所述的基于协同感知的动态频谱接入方法,其特征是,步骤A11中,模块间使用低耦合连接方式,包括异步FIFO方式或非阻塞交互方式。

10. 如权利要求5所述的基于协同感知的动态频谱接入方法,其特征是,PHY层频谱感知信息的计算方法为:

通过计算基带采样波形获得信道能量值;将得到的信道能量值与预设的阈值相比较,得出当前信道状态;当有信道能量值大于预设的阈值时,则信道中有信号在传输;

通过观测一段时间内的信道能量值,判断这段时间内是否存在信道能量值超出预设的阈值,从而判断当前信道是否被占用;和/或,通过能量值计算得到信道使用率评估当前频段的拥挤状况;

通过计算PHY层整体SNR及时域和频域上的SNR分布,获得信道的时变特性和频率特性;具体通过式2计算得到SNR:

$$SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{N}{\sum_{n=0}^{N-1} \left((r_i(n) - s_i(n))^2 + (r_q(n) - s_q(n))^2 \right)} \right) \quad \text{式2}$$

式2中,SNR为信噪比;(s_i, s_q)表示原始信号星座点位置;(r_i, r_q)为接收到的星座点位置;两个星座点之间的距离为信道噪声;N为计算的连续星座点的数目。

一种基于协同感知的动态频谱接入方法与系统

技术领域

[0001] 本发明属于无线通信技术领域,涉及无线接入技术,尤其涉及一种基于协同感知的动态频谱接入方法与系统。

背景技术

[0002] 从1997年发布的802.11b修正案,到如今已经商用的802.11ac协议,无线物理层的理论吞吐率也由最初的2Mbps提升到了6.9Gbps。然而,在不断提升的通信性能背后,无线频谱资源的使用,也从802.11a的20MHz频宽,提高到802.11ac的80MHz,甚至160MHz频宽。频谱资源是有限的,而能够用于WiFi通信的频谱资源更是紧缺的,这种依靠提高频宽的方式提升网络通信速率的方式是存在极限的。如何在现有条件下,提升通信效率,优化通信体验也成为了研究者关注的一个话题。

[0003] 在实际的无线通信环境中,通信质量和通信速率受到多种因素的影响,如噪声水平,多径效应,信道扰动等。为了在一定程度上减小各种因素对通信的影响,有人提出了动态频谱接入的概念,用于在现有频谱资源下,提升信道利用率,缓解“无频可用”的问题。动态频谱接入系统需要无线设备具备了解自身通信状况、感知信道环境的能力,并能够根据以上信息进行分析,做出合理决策,重构自身通信参数,从而优化通信状况。

[0004] 动态频谱接入是认知无线电中的一个概念,而认知无线电可以认为是软件无线电(SDR,Software Defined Radio)的一个子类,在研究和开发中有诸多共同点,因此常使用如GNU Radio等SDR平台来进行动态频谱接入。但传统的SDR平台有很多局限性,难以满足动态频谱接入的需求。这些局限性包括:

[0005] (1) 很难实时获取无线网络底层信息,部分SDR平台无法实时获取;

[0006] (2) 能够修改的底层通信参数有限。

[0007] 此外,商用网卡虽然也能够获取部分无线网络底层信息,但在认知无线电中,其功能性和灵活性均无法与SDR平台相比。

发明内容

[0008] 为了克服上述现有技术的不足,本发明提供一种基于协同感知的动态频谱接入方法与系统,在无线网络的媒体接入控制子层和物理层中获取多种频谱感知信息,并实现基于这些频谱感知信息的协同分析和决策。

[0009] 为了便于说明,以下是本文对术语的约定:

[0010] MAC层:无线网络中数据链路层的媒体接入控制子层;

[0011] PHY层:无线网络中的物理层;

[0012] Low MAC:是指MAC层中时序要求较高,与PHY层紧密相连的部分;

[0013] FIFO:FPGA中使用随机存取存储器实现的先入先出硬件电路模块;

[0014] FFT:Fast Fourier Transformation,快速傅里叶变换;

[0015] 上行:FPGA向上位机方向;

- [0016] 下行:上位机向FPGA方向;
- [0017] AP:Access Point,无线接入点;
- [0018] SDR:Software Defined Radio,软件无线电;
- [0019] FPGA:Field-Programmable Gate Array,现场可编程门阵列;
- [0020] e-Proc:Embedded Processor,嵌入式处理器,本发明中e-Proc在FPGA中实现;
- [0021] CSI:Channel State Information,信道状态信息;
- [0022] SNR:Signal-to-Noise Ratio,信噪比;
- [0023] RSSI:Received Signal Strength Indicator,接收信号强度指示;
- [0024] IP核:Intellectual Property core,是一段可移植的具有特定电路功能的硬件描述语言程序;
- [0025] 频谱空洞:频谱中的某段频率范围,这段频率未被其他设备使用,或者虽然被使用,但在当前区域中功率很低或使用频率很低。
- [0026] 本发明的原理是:通过获取到丰富的频谱感知信息,实现更准确的动态频谱接入和更准确地分析决策。在无线网络MAC层和PHY层中增加频谱感知、频谱分析和频谱决策、频谱重构功能模块。频谱感知模块在PHY层获取信道能量值、CSI等信息,在MAC层获取回退时间等信息,频谱分析和频谱决策模块则是在MAC层中根据各种频谱感知信息,进行综合分析,并给出能够优化通信状况的通信参数重配置方案,频谱重构模块用于将上述决策进行施行,重配置通信参数。
- [0027] 本发明的技术方案是:
- [0028] 一种基于协同感知的动态频谱接入系统,是一种面向动态频谱接入优化的基于现场可编程门阵列(FPGA)的软件无线电(SDR)平台,包括计算机主机、FPGA和射频前端,实现802.11a/g协议,并能够与商用网卡实时通信;还包括在计算机主机和FPGA上优化的认知无线电模块;在FPGA中,设置PHY层频谱感知接口和MAC层辅助感知信息接口,用于实现认知无线电模块所需的低延迟频谱感知、分析和决策,并能够在嵌入式处理器e-Proc中进行频谱分析,做出即时决策,重配置通信参数;在计算机主机中,提供了可以获取频谱感知信息和重配置底层通信参数的接口。本发明通过获取到丰富的频谱感知信息,从而实现更准确的动态频谱接入。基于本发明技术方案,可以根据获取的感知信息进行进一步的统计分析,并做出最终决策,重配置通信参数;
- [0029] 具体实施时,以计算机主机作为上位机,以USB连接上位机和FPGA;也可以采用网线、PCIe等连接。
- [0030] 嵌入式处理器e-Proc在FPGA中实现;
- [0031] 基于协同感知与分析决策的动态频谱接入系统在计算机主机和FPGA上优化的认知无线电模块包括频谱感知信息提取模块、协同频谱分析和频谱决策模块、上位机和FPGA相配合的分析决策模块;其中:
- [0032] 频谱感知信息提取模块,用于在无线网络底层中获取到各种能够反映信道状况的各种参数,并进行相应处理;
- [0033] 协同频谱分析和频谱决策模块,用于综合各种频谱感知信息,对信道进行更加详细准确的评估;
- [0034] 上位机和FPGA相配合的分析决策模块,采用结合基于e-Proc的即时分析决策和基

于上位机的统计分析决策的方法,兼顾低延迟和准确性。

[0035] 本发明还提供一种基于协同感知的动态频谱接入方法,通过获取到丰富的频谱感知信息,实现更准确的动态频谱接入和更准确地分析决策;包括频谱感知信息提取过程和动态频谱接入过程;

[0036] 频谱感知信息提取,是指在无线网络底层中获取到各种频谱感知信息,能够反映信道状况的各种参数,并进行相应处理。频谱感知信息提取过程,包括面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层设计实现、频谱感知信息计算与获取、频谱感知信息的汇总传输;

[0037] 动态频谱接入过程是利用多种频谱感知信息对信道状况进行更加详细地分析,并利用基于e-Proc的即时分析决策和基于上位机的统计分析决策,做出频谱重构策略;包括协同频谱分析和频谱决策过程、上位机与FPGA相配合的分析决策过程。

[0038] 所述协同频谱分析和频谱决策,是指综合各种频谱感知信息,对信道进行更加详细准确的评估。所述上位机和FPGA相配合的分析决策是指基于e-Proc的即时分析决策和基于上位机的统计分析决策,即时分析决策延迟很低,能够充分利用频谱空洞,统计分析决策准确性很高,能够更精确地重构通信参数,两种分析决策方法的结合,能够兼顾低延迟和准确性。

[0039] A) 频谱感知信息提取过程;执行如下步骤:

[0040] A1. 设计实现面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层;

[0041] A11. PHY层设计与实现:PHY层包括射频前端与PHY层接口、PHY层接收端、PHY层频谱感知模块;数据从射频前端与PHY层接口,流向PHY层接收端和PHY层频谱感知模块。因此,PHY层接收端和PHY层感知模块是并列的,此两者跟射频前端与PHY层接口是串行的。

[0042] 在射频前端与PHY层接口处,将基带信号复制为三路,第一路送入PHY层解码流水线的同步模块(即PHY层接收端);第二路送入FFT模块,进一步进行能量计算;第三路送入基带数据打包模块,进行数据打包,上传主机;第二路和第三路即PHY层频谱感知模块;附图2是描述了这三路的模块。这三个模块也是附图1中的PHY层接收端和虚线框内的频谱感知模块。上述三路数据流分别简称为“解码数据流”、“能量数据流”和“基带数据流”。通过解码数据流获取大部分频谱感知信息,从能量数据流里获取能量值,从基带数据流里获取基带数据。

[0043] “解码数据流”正常进入PHY层解码,并通过MAC层完成数据处理,在不存在错误的情况下上传主机。通过这一路数据的解码,也能够PHY层中获取到各种信道信息,如CSI, SNR等。

[0044] “能量数据流”进入FFT模块,将信号由时域转换为频域,从而得到每个子载波的信息,计算出能量,通过这种方式能够更细节地分析信道状况,利用频宽更窄的频谱空洞。

[0045] “基带数据流”则是未经处理的基带数据,直接上传主机,便于在主机端进行更复杂详细的处理。对于这一路数据,在不需要时,将在多路器模块直接丢弃,只有在收到主机命令时,才上传主机。具体来说,使用计算机与FPGA间的寄存器接口,在主机端通过写入寄存器来控制FPGA的行为,寄存器中包含使能信号和持续时间。当多路器模块收到使能信号时,读取持续时间信息,结合计时器模块提供的毫秒计时器的信号计时,在计时窗口外的数据全部丢弃,从而实现这两路数据的可控上传。

[0046] PHY层接收端的作用一是完成数据解码,进行通信;二是可以获取一些信道状态;

PHY层接收端的“解码数据流”有很多中间处理结果可以指示当前的无线信道状态,如SNR, CSI,频率偏移等,其中一些可以在PHY层解码模块直接获得,例如频率偏移。其他需要从PHY层的流水线中提取一些信息,执行一些数据计算以获取相应的感知信息,如通过星座映射点分析得到的SNR。PHY层解码模块用来对解码数据流的数据进行解码。

[0047] 设计PHY层频谱感知模块结构,模块间尽量使用低耦合的连接,包括使用异步FIFO和非阻塞交互两种方式。

[0048] A12. MAC层设计与实现,主要涉及Low MAC部分;包括如下步骤:

[0049] A121. 由一个嵌入式处理器e-Proc和多个IP核组成Low MAC。

[0050] 具体实施时,嵌入式处理器采用Xilinx公司提供的MicroBlaze实现,IP核则在FPGA硬件逻辑中实现,它们都连接到一条总线AXI bus上,从而实现IP核与e-Proc之间的通信,各IP核之间也存在数据路径,可以进行延迟更低、吞吐率更高的通信。

[0051] A122. 将e-Proc与FPGA芯片封装在一起,实现低延迟通信;

[0052] 将e-Proc与FPGA芯片封装在一起,从而能够实现低延迟通信,适合在其中实现简单的实时处理算法。本发明在e-Proc中实现了Low MAC的状态机,并在面向认知无线电的设计中,在e-Proc中实现了简单的分析和决策算法。Low MAC中,AXI总线上挂载了多种IP核,进行数据处理加速,弥补嵌入式处理器的性能缺陷。这些IP核可包括MAC层IP核、感知IP核、接口IP核。

[0053] A123. 在嵌入式处理器e-Proc中实现即时分析决策模块与Low MAC,支持基于e-Proc的即时分析决策和基于主机端的统计分析决策;

[0054] 即时决策:e-Proc在相应接口IP核获取MAC层和PHY层感知信息,经过简单的分析和决策算法后,e-Proc将重配置参数信息发送给对应的接口IP核,以改变相关通信参数。

[0055] 统计决策:在主机中使用MAC层和PHY层感知信息进行协同感知分析;具体地,感知IP核在收集MAC层感知信息并执行简单的处理后,提交给主机接口IP核,将这些信息传递给主机。由主机进行更加详细的分析和决策,将决策信息通过主机接口IP核传递给low MAC,并进一步完成参数重配置。

[0056] A2. 计算与获取频谱感知信息,包括如下步骤:

[0057] A21. PHY层频谱感知信息的计算与获取,包括能量值、SNR;

[0058] A22. MAC层频谱感知信息计算与获取,包括平均回退时间和信道占用率;

[0059] A3. 频谱感知信息的汇总传输,包括如下步骤:

[0060] 设计SeningFrame模块,将信息进行组合,整体上传至主机;包括下行的参数重配置信息和上行的频谱感知信息;其中,嵌入式处理器与SeningFrame模块的接口为AXI总线,两者间通过寄存器交互,SeningFrame模块将AXI总线提供的各个寄存器,PHY层感知信息,信道能量信息和基带数据,按照约定好的次序进行组合,形成一个完整的帧。完成以上处理后,SeningFrame模块输出的感知信息帧与low MAC RX输出的通信数据帧统一接入多选择器模块,根据到来的先后顺序,择一上传主机。感知信息帧包括:MAC层感知信息、PHY层感知信息和/或基带数据。

[0061] 动态频谱接入过程包括协同频谱分析和频谱决策过程、上位机与FPGA相配合的分析决策过程,具体如下:

[0062] B) 协同频谱分析和频谱决策过程

[0063] 所述频谱分析和频谱决策是指协同A)中所述的多种频谱感知信息,进行综合分析,得出信道状况,给出频谱重构决策策略。共包括三部分,一是利用多种频谱感知信息对信道状况进行准确分析,二是判断A)中所述的多种信道状况是否同时存在,三是根据当前信道状况做出频谱决策。包括如下步骤:

[0064] B1.利用多种频谱感知信息对信道状况进行准确分析。由于本发明能够获取多种频谱感知信息,因此能够综合利用多种信息对信道状况进行更加准确的分析。如在判断A)中所述信道噪声大的信道状况时,可以以时域信号信噪比为主,以平均重传次数和循环冗余校验错误率为辅,来进行判断。在判断信道使用率高或信道中通信设备多时,既可以通过能量值计算的信道占用率来判断,也可以通过平均回退时间来判断。

[0065] B2.判断多种信道状况是否同时存在。在实际的通信环境中,可能同时存在A)中所述的多种信道状况,因此我们通过A)中所述参数,分别对各种信道状况进行判断,最后综合得出是否同时存在多种信道状况以及存在哪几种信道状况。

[0066] B3.根据当前信道状况做出频谱决策。完成B1和B2中的各种分析后,能够获知准确的信道情况,进而进行频谱决策。例如,若信道背景噪声大,则可以通过使用更强健的调制方式和增加发送增益来改善通信效果,若信道存在频率选择性衰落现象或信道占用率高,则可以考虑更换到空闲频率。

[0067] C)上位机与FPGA相配合的分析决策过程

[0068] 上位机与FPGA相配合的分析决策过程将即时分析决策和统计分析决策相配合,即时分析决策依靠FPGA中的e-Proc实现,具备低延迟的优势,但e-Proc的处理性能有限,只能进行较为简单的分析。统计分析决策在上位机中实现,上位机处理性能更好,能够综合更多的频谱感知信息进行分析,但也由于上位机与FPGA间通信的延迟较高,使得分析决策的时效性不如即时分析决策。

[0069] 所述即时分析决策与统计分析决策,从硬件构成上来说,即嵌入式处理器e-Proc与计算机主机相配合。两者配合中,即时分析决策只能重配置部分通信参数,而统计分析决策能够重配置所有通信参数,且统计分析决策的重配置优先级更高。在本发明中,即时分析决策主要通过分析能量值、信噪比和CRC校验错误率,以很低的延迟对发送增益和调制方式进行修改,从而改善通信效果。在进行即时分析决策的同时,也会向计算机主机上传感知信息帧,统计分析决策则在获取到如附图7所示感知信息帧后,结合图中所有频谱感知信息进行分析决策。举例来说,如果判定当前信道设备过多、噪声过大,不适合通信,则对中心频率进行修改;如果判定CSI波动幅度较大,则减小帧长度、使用更强健的调制方式。

[0070] 本发明中的两种决策,一种低延迟,另一种更准确,两种决策配合,能够更好地根据当前信道状况,做出通信参数重配置的决策,优化通信状况。

[0071] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0072] 相对于现有技术,本发明能够获取到更加丰富的无线网络底层频谱感知信息,并可以根据这些感知信息进行更加准确的分析,得出详细的信道状况和干扰信道的原因,进而做出相应的决策。上位机与FPGA相配合的分析决策方式则能够兼顾低延迟和准确性,更加即时准确地捕获频谱空洞,并加以利用。

附图说明

- [0073] 图1是本发明实施例提供的动态频谱接入系统的结构框图。
- [0074] 图2是本发明实施例中基带数据接口的数据流示意图。
- [0075] 图3是本发明实施例中PHY层结构框图。
- [0076] 图4是本发明实施例中PHY层频谱感知的流程框图。
- [0077] 图5是low MAC的结构框图。
- [0078] 图6是本发明实施例中认知信息传输结构设计
- [0079] 图7是本发明实施例中感知信息帧的结构。
- [0080] 图8是本发明实施例中搭建AP时的动态接入过程的流程框图。
- [0081] 图9是本发明实施例中协同感知策略的流程框图。

具体实施方式

[0082] 下面结合附图,通过实施例进一步描述本发明,但不以任何方式限制本发明的范围。

[0083] 本发明提供一种基于协同感知与分析决策的动态频谱接入方法与系统,在无线网络的媒体接入控制子层和物理层中获取多种频谱感知信息,并基于这些频谱感知信息进行协同分析和决策。以下通过实施例描述本发明的具体实施方式。

[0084] 本实施例基于文献(Tao Wang,Guangyu Sun,Jiahua Chen,Jian Gong,Haoyang Wu,Xiaoguang Li,Songwu Lu,and Jason Cong,"GRT:a Reconfigurable SDR Platform with High Performance and Usability,"ACM SIGARCH Computer Architecture News (CAN),Volume 42 Issue 4,September 2014,pp.51-56.)记载的SDR平台GRT系统,进行面向认知无线电的二次开发和优化,以计算机主机作为上位机,以USB连接上位机和FPGA。GRT系统是一款基于FPGA的SDR平台,主要由计算机主机,FPGA和射频部分组成,实现了802.11a/g协议,并能够与商用网卡实时通信。

[0085] 我们设计了如图1所示的系统结构,在GRT系统的基础上,针对认知无线电应用进行了优化,虚线框灰色底色的模块是认知无线电模块,其余部分为GRT原有结构。这些优化集中在计算机主机和FPGA上,在FPGA中,针对认知无线电所需的低延迟频谱感知、分析和决策,提供PHY层频谱感知接口和MAC层辅助感知信息接口,并能够在嵌入式处理器中进行频谱分析,做出即时决策,重配置通信参数;在主机中,也可以根据感知信息进行进一步的统计分析,并做出最终决策,重配置通信参数。

[0086] 在系统结构中,e-Proc可以做出即时分析决策,计算机主机端可以作出统计分析决策,其中主机端统计决策优先级高于嵌入式处理器即时分析决策的优先级,两者相互配合,兼顾了低延迟和准确性。实际工作过程中,当e-Proc发现通信状况不佳时,会对几种较为简单的频谱感知信息进行分析,如果分析认为可以通过在low MAC修改通信参数优化通信效果,例如使用更强健的调制方式,则进行即时决策并重配置通信参数。若如此做后效果不佳或者分析认为无法在e-Proc完成分析决策,则将感知信息提交给主机,主机端进行更加准确、详细地频谱分析,并做出最终决策。

[0087] 本发明包括频谱感知信息提取,动态频谱接入过程两部分。所述频谱感知信息提取,包括面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层设计实现,频谱感知信息计算与获取,以

及频谱感知信息的汇总传输。所述动态频谱接入过程,是指利用多种频谱感知信息对信道状况进行更加详细地分析,并利用基于e-Proc的即时分析决策和基于上位机的统计分析决策,做出频谱重构策略。

[0088] A) 频谱感知信息提取。所述频谱感知信息提取,包括面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层设计实现,频谱感知信息计算与获取,以及频谱感知信息的汇总传输。

[0089] A1. 面向认知无线电的无线网络MAC层和PHY层设计实现

[0090] A11. PHY层设计与实现

[0091] 如图2所示,在射频前端与PHY层接口处,我们将基带信号复制为三路,第一路送入PHY层解码流水线的同步模块(同步模块是PHY层解码模块中收到数据的模块),第二路送入FFT模块,进一步进行能量计算,第三路送入基带数据打包模块,在这里进行数据打包,上传主机,为了便于表达,我们将三路数据流分别简称为“解码数据流”,“能量数据流”和“基带数据流”。

[0092] “解码数据流”正常进入PHY层解码,并通过MAC层完成数据处理,在不存在错误的情况下上传主机。通过这一路数据的解码,我们也能够在PHY层中获取到各种信道信息,如CSI,SNR等。

[0093] “能量数据流”进入FFT模块,将信号由时域转换为频域,从而得到每个子载波的信息,计算出能量,通过这种方式能够更细节地分析信道状况,利用频宽更窄的频谱空洞。

[0094] “基带数据流”则是未经处理的基带数据,直接上传主机,便于在主机端进行更复杂详细的处理。对于这一路数据,考虑到数据量很大,同时并非时刻需要,因此这一路数据在不需要时,将在多选器模块直接丢弃,只有在收到主机命令式时,才上传主机。具体来说,使用计算机与FPGA间的寄存器接口,在主机端通过写入寄存器来控制FPGA的行为,寄存器中包含使能信号和持续时间。当多选器模块收到使能信号时,读取持续时间信息,结合计时器模块提供的毫秒计时器的信号计时,在计时窗口外的数据全部丢弃,从而实现这两路数据的可控上传。

[0095] PHY层接收端的“解码数据流”有很多中间处理结果可以指示当前的无线信道状态,如SNR,CSI,频率偏移等。如图3所示,其中一些可以在PHY层解码模块直接获得,例如频率偏移。其他需要从PHY层的流水线中提取一些信息,执行一些数据计算以获取相应的感知信息,如通过星座映射点分析得到的SNR。

[0096] 如图4所示,是PHY层频谱感知模块结构,为了不影响PHY层解码流水线的处理性能,我们在模块间尽量使用低耦合的连接。包括使用异步FIFO和非阻塞交互两种方式。异步FIFO是指模块间使用异步FIFO连接,异步FIFO不只能够作为缓冲区缓存数据,进行流控,防止数据溢出,还能够实现时钟域转换,从而为FIFO两端的模块配置不同的时钟频率。因此感知模块能够使用更高速的时钟,而不影响PHY层正常工作。

[0097] 非阻塞交互是指感知模块不会阻塞数据流动,即所有从PHY层解码流水线获取的数据全部实时流动,每出现一个数据即取走或抛弃一个数据,而不会出现类似FIFO满溢出的情况而导致PHY层模块暂停工作,影响PHY层处理性能。在本实施例的实现过程中,虽然我们实现了计算机与FPGA间的高速数据传输,但为了以防万一,我们依然在PHY层中进行了非阻塞式设计。在这种设计中,如果出现感知模块FIFO内的数据没有及时取走的情况,则将所有新到来的数据做丢弃处理。不过考虑到这种设计可能会出现感知数据丢失的情况,而我

们却无法获知丢失情况。为了解决这个问题,我们对丢弃的数据数量进行计数,便于用户做代码调试,也可以在有需要的情况下将计数信息上传主机。

[0098] A12.MAC层设计与实现。MAC层设计和实现主要涉及low MAC部分。

[0099] Low MAC的实现结构如图5所示。Low MAC由一个嵌入式处理器和多个IP核组成。嵌入式处理器采用Xilinx公司提供的MicroBlaze实现,IP核则在FPGA硬件逻辑中实现,它们都连接到一条总线AXI bus上,从而实现IP核与e-Proc之间的通信,各IP核之间也存在数据路径,可以进行延迟更低、吞吐率更高的通信。

[0100] e-Proc与FPGA芯片封装在一起,从而能够实现低延迟通信,适合在其中实现简单的实时处理算法。我们在e-Proc中实现了low MAC的状态机,并在面向认知无线电的设计中,在e-Proc中实现了简单的分析和决策算法。如图5所示是low MAC的设计图,AXI总线上挂载了多种IP核,进行数据处理加速,弥补嵌入式处理器的性能缺陷。这些IP核可以分为三类,其中MAC层IP核实现了low MAC的基本功能,如随机回退,循环冗余校验等。感知IP核用于认知无线电,收集MAC层频谱感知信息并进行初步处理。接口IP核用于处理MAC与其他部分之间的通信,包括PHY层、主机和射频前端。

[0101] MAC层IP核包括Timer,Backoff,Data_Pump等,这些IP核实现了MAC层的基本功能。感知IP核负责感知信息收集和初步处理,例如,Channel_Occupation_Rate IP核通过AXI总线寄存器接口获取来自MicroBlaze当前数据帧的调制方式、数据码率和帧长度信息,从而计算该帧在空气中的持续时间。

[0102] 本实施例支持基于e-Proc的即时分析决策和基于主机端的统计分析决策,其中即时分析决策功能与low MAC一起实现在嵌入式处理器中。对于即时分析决策,认知无线电平台需要进行低延迟感知,快速获取信道信息,即时做出决策,重配置通信参数,以充分利用频谱资源。统计决策需要来自PHY和MAC层的更多统计信息,以便主机端可以通过统计分析和综合判断来确定最优通信参数。

[0103] 即时决策。在此策略中,e-Proc在相应接口IP核获取MAC层和PHY层感知信息,经过简单的分析和决策算法后,e-Proc将重配置参数信息发送给对应的接口IP核,以改变相关通信参数。这种决策方式能够根据信道状况即时决策,最大程度地利用频谱资源,实现更高的通信吞吐率,但这种方式只能处理一些简单情形,能够修改的通信参数也有限。

[0104] 统计决策。我们在主机中使用MAC层和PHY层感知信息进行协同感知分析。这要求感知IP核在收集MAC层感知信息并执行简单的处理后,提交给主机接口IP核,将这些信息传递给主机。由主机进行更加详细的分析和决策,将决策信息通过主机接口IP核传递给low MAC,并进一步完成参数重配置。这种决策方式更准确、更有效,但所需时间较长,延迟较高。

[0105] A2. 频谱感知信息计算与获取

[0106] A21.PHY层频谱感知信息计算与获取

[0107] 以能量值为例,来简单介绍PHY层中感知算法的实现。能量值是一种常见且简单的频谱感知参数,不需要事先获知主用户信号的信息(如调制方式),是一种非相干检测方式。能量值通过计算基带采样波形获得,通过与预先设定的阈值相比较,得出当前信道状态。如果有能量值大于预设的阈值,则认为此时信道中有信号在传输。能量值由E(dB)表示,如式1所示,在这个等式中, $Y[n]$ 表示基带采样值,我们对每个点进行平方并一起累加连续的N个值。

$$[0108] \quad E = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y[n]^2 \right) \quad \text{式1}$$

[0109] 式1中,E为能量值,单位为dB;Y[n]表示基带采样值;N表示取N个连续的采样点;

[0110] 在PHY层实现过程中,我们通过两种方式来展现信道能量情况,一种是一段时间内的信道能量,另一种是通过能量值计算的信道使用率。信道能量值即为上式结果,我们通过观测一段时间(如100us)内的信道能量值,判断这段时间内是否存在能量值超出阈值的情况,在排除突发噪声的影响后,判断当前信道是否被占用。信道使用率则是在更长的一段时间(如10ms)内,通过计算信道能量超出阈值的时间占总时间的比值,得出信道使用率,从而评估当前频段的拥挤状况。

[0111] SNR是认知无线电系统中另一种常见的感知信息,它反映了当前信道的通信质量。信噪比越高,表示信道状况越好,信噪比低则表示信道中存在较大的噪声。接收端信号的星座映射点可以直观地表示信噪比,星座点越聚集表示信噪比越高,越离散表示信噪比越低。

[0112] 在发射机中,每个星座数据应映射到一个固定位置。设原始信号星座点位置为 (s_i, s_q) 。受噪声影响,接收器中的星座点将偏离原来的固定位置,设接收到的星座点位置为 (r_i, r_q) ,两个星座点之间的距离为信道噪声。根据连续N个星座点的统计计算,并进行能量归一化后,SNR的计算如式2所示。

$$[0113] \quad SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{N}{\sum_{n=0}^{N-1} \left((r_i(n) - s_i(n))^2 + (r_q(n) - s_q(n))^2 \right)} \right) \quad \text{式2}$$

[0114] 式2中,SNR表示信噪比;N表示N个连续的采样点; $r_i(n)$ 和 $s_i(n)$ 表示第n个原始信号星座点坐标, $r_q(n)$ 和 $s_q(n)$ 表示对应的第n个接收到的星座点坐标。

[0115] 在PHY层实现中,我们不仅计算了整体SNR,还计算了时域和频域上的SNR分布,能够分别反映信道的时变特性和频率特性。如果信噪比在时域内剧烈变化,可能意味着信道状态随时间快速变化,我们在这种情况下可以通过减小帧长度保证数据通信。如果在频域的某些子载波的SNR值较低,则意味着这些子载波中的噪声较大,可以通过增加发送端增益或更改频段来改善通信效果。

[0116] A22.MAC层频谱感知信息计算与获取

[0117] 我们以平均回退时间和信道占用率为例来说明MAC层感知信息的计算与提取。平均回退时间表示一帧开始在空口传输前的平均等待时间。如果平均回退时间很短,则可以认为该信道空闲。如果平均回退时间高于某个阈值,则可以认为信道忙碌,此时可以考虑更改频段。回退时间的获取相对简单,不需要额外的感知IP核,当MAC层获取数据帧时,如图5所示,MicroBlaze从计时器IP核(Timer)获取一个开始时间,Backoff IP核通知帧开始发送后,MicroBlaze从相同的计时器IP核获取一个结束时间,回退时间即为结束时间与开始时间的相减结果。通过统计一段时间内的回退时间,计算得出平均回退时间。

[0118] 信道占用率,通过在一段时间内做统计分析,可以获知有效数据帧对信道的占用情况。这里获取的信道占用率与PHY层获取的信道使用率略有不同,PHY层以能量值判断信道使用情况,所有超出阈值的能量波动均认为是信道被使用。而MAC层则只计算了PHY层解

码后CRC校验通过的数据帧传输时间占整个信道持续时间的比例。上述两个参数配合使用可以估计出当前信道情况,如果两个值接近则传输成功率较高,如果两个值相差较大,则表明大量数据帧传输失败,信道状况较差。

[0119] A3. 频谱感知信息的汇总传输

[0120] 在认知无线电场景下,除了正常的的数据流交互外,需要额外的认知信息交互,这些信息包括两部分,一是下行的参数重配置信息和上行的频谱感知信息。这些信息由图6所示的SeningFrame模块将以上信息进行组合,整体上传至主机。

[0121] 其中,嵌入式处理器与SeningFrame模块的接口为AXI总线,两者间通过寄存器交互,SeningFrame模块将AXI总线提供的各个寄存器,PHY层感知信息,信道能量信息和基带数据,按照约定好的次序进行组合,形成一个完整的帧。完成以上处理后,SeningFrame模块输出的感知信息帧与low MAC RX输出的通信数据帧统一接入多选器模块,根据到来的先后顺序,择一上传主机。

[0122] 如图7所示是感知信息帧的结构,帧内容共分为三部分:

[0123] (1) MAC层感知信息

[0124] 共16bytes,包括平均回退时间(Ave backoff time),信道使用率(Channel occu rate)等,同时预留未来可能存在的扩展位置。

[0125] (2) PHY层感知信息

[0126] 共456bytes,包括CSI波动情况(CSI variance),信噪比(SNR)等,同时预留未来可能存在的扩展位置。其中Energy value是时域信号能量值,Subcarrier energy则是将基带数据做64点FFT后获取的子载波能量值。

[0127] (3) 基带数据(可选)

[0128] 共2048bytes,SensingFrame模块根据配置信息,选择是否上传基带数据,若不上传,该感知信息帧共长472bytes;若上传,则在最后添加固定长度的基带数据,组装后帧长为2520bytes。

[0129] 本发明能够获取丰富的感知信息,这些频谱感知信息来源与MAC层和PHY层。在无线通信中,MAC层和PHY层可以通过接收到的信号,推断出信道状况,能够推断出信道状况的信息就称为频谱感知信息。在本发明中,频谱感知信息分为两种,一种是PHY层的直接感知信息,另一种是MAC层的间接(辅助)感知信息。PHY层的直接感知信息包括:

[0130] (1) 信道能量值,包括时域信号能量值和频域信号能量值

[0131] (2) 解星座模块的星座映射情况及信噪比

[0132] (3) CSI等能够反映信道状况的参数

[0133] 其中,能量值能够直观反映信道占用情况,直观反映当前信道是否正在被使用,以及使用密度;星座映射情况能够反映噪声水平,计算信噪比;CSI等信息能够反映系统存在的干扰情况,举例来说,如果通过CSI信息判断出当前通信质量差,是由于周边物体移动引起的信道扰动,则更改频段对通信质量的改善很有限。

[0134] MAC层的间接感知信息包括:

[0135] (1) 循环冗余校验错误率

[0136] (2) 信道占用率

[0137] (3) 平均重传次数

[0138] (4) 平均回退时间

[0139] 上述信息中,均能够在一定程度上反映当前信道的好坏,调制方式越弱、误帧率越高、重传次数越多表明信道情况越差;平均回退时间越长,表明信道的使用密度越高。

[0140] 在本发明中,我们使用以上感知信息,对信道状况进行详细分析,可得出包括但不限于以下几种信道状况:

[0141] (1) 信道背景噪声大。信道中的背景噪声会叠加在调制信号上,当PHY层接收端对信号进行译码时,这些噪声会导致信号译码出现错误,进而导致传输失败。在PHY层技术中,常使用卷积编码、星座映射等技术,在数据信号中添加冗余信息,以避免随机噪声对数据译码的影响。在本发明中,我们主要通过计算时域信号的信噪比来判断背景噪声情况,并使用平均重传次数和循环冗余校验错误率来辅助判断。

[0142] (2) 频率选择性衰落。有些信道对不同带宽内不同频率的传输性能不同,有些频率上传输效果好,有些频率上存在衰落,进而造成信号失真而影响PHY层接收端译码。在本发明中,我们主要通过计算频域信号的信噪比和频域信号的能量值来判断频率选择性衰落情况,并使用平均重传次数和循环冗余校验错误率来辅助判断。

[0143] (3) 存在移动物体扰动信道。当两台通信设备相对移动时,相对于接收设备来说,会使得空气中传输的信号波形产生变形,即多普勒效应。当通信设备附近存在其他设备运动时,由于多径效应与物体运动的叠加影响,会使得接收设备接收到的信号出现失真。这两种情况均是物体移动对信道的扰动,均会对CSI产生影响,因此我们可以通过CSI来判断是否存在移动物体扰动信道。

[0144] 信道使用率高。当信道的信噪比较高,CSI值也表现良好时,我们怀疑当前信道的使用率高,即有其他设备在一直占用信道发送信号,这时候会使得当前设备不断进行随机回退,进而影响通信效果。我们可以使用时域信号能量值来对调制信号和噪声的比例进行统计计算,得出信道使用率信息,也可以通过平均回退时间对信道使用率进行间接判断。

[0145] B) 动态频谱接入过程

[0146] 本实施例结合协同频谱分析和频谱感知,以及上位机与FPGA相配合的分析决策方式,设计并实现了一套动态频谱接入系统。目的是在WiFi通信环境中,提供更好的频率和频宽选择方案,并在通信过程中,实时感知当前频段信道环境,通过e-Proc中的即时分析感知,重配置通信参数,保持通信的稳定性和可靠性。

[0147] 我们针对当前WiFi环境提供了一个动态频谱接入案例,用于展示本发明在WiFi通信中保持通信稳定性的应用。这个案例共分为两部分,即无线接入点(AP, Access Point)部分和基站部分(Station)。

[0148] B1. 动态频谱接入过程

[0149] 以AP为例,原有的AP搭建过程是在初始时即确定了中心频率,带宽等参数,如果选择的频段信道状况不佳,则会导致通信效果变差。在使用本实施例搭建的AP时,如图8所示,会在搭建AP初始时进行频谱感知和分析过程,对限定的频率范围内的各个频段进行感知后,确定信道情况,分析得出各个频段的信道占用率、噪声水平等信息,依据这些信息给出合理的频段建议,使得AP能够选择一条尽量空闲频段进行搭建。这样就避免了本文背景介绍中所提到的频段重叠问题。

[0150] 在完成AP搭建后,嵌入式处理器会不断分析MAC层和PHY层的部分感知信息,当发

现当前信道存在问题,影响到通信稳定性时,进行进一步分析,寻找信道存在的问题,如背景噪声加强、信道扰动剧烈等,随后给出即时决策方案,该方案较为简单,仅能作出诸如使用更强健调制方式、增加发送端增益等重配置指令。但由于这种即时决策延迟极低,能够更准确地把握信道状况,保持通信不间断,提升通信稳定性。

[0151] 当基于嵌入式处理器的即时分析决策无法确定信道变差的原因,或者作出决策后通信效果没有变好,则通知主机进行统计分析决策。主机端会收集更丰富的频谱感知信息,进行详细分析和决策,重配置通信参数。若使用最强健调制方式、最大发送端增益、最短帧长度等最强健、最宽松的参数后依然无法稳定通信,则考虑更换频段。

[0152] 当本实施例作为Station时,动态接入过程与作为AP时类似,其主要通过嵌入式处理器的即时分析决策,保持通信稳定性,在无法解决问题时,通知主机端进行分析决策,在主机端决策依然无效时,建议用户更改接入的AP,选用其他接入点。

[0153] 使用上述方案,增强了无线通信设备的智能性,使其能够即时优化底层通信参数,保持通信稳定性,并能够给予用户合理的连接建议。

[0154] B2. 感知策略

[0155] 所述感知策略包括即时分析决策和统计分析决策。对于即时分析决策,本实施例需要快速捕获频谱空洞,迅速改变中心频率和带宽,以更有效地使用当前频谱资源。统计分析决策需要来自PHY和MAC层的更多统计信息,主机通过统计分析和综合判断来改变传输参数。利用PHY层和MAC层感知信息,我们可以进一步计算当前的信道状态,包括信道噪声水平,信道占用率和信道稳定性。如果周围环境噪声较大,嵌入式处理器应快速修改通信参数(如调制方式,发送增益等)。通过这种方式,本实施例实现了实时的决策过程。如果通信状态仍未达到所需级别,则将感知信息上传到主机,主机对各种信息进行详细分析并采用最佳参数重新配置方案。

[0156] 图9是上述策略的一个简单例子,描述了B1中动态接入过程的部分流程。在这个例子中,我们使用信道噪声水平和信道占用率作为基本信息。通过SNR和平均重传次数能够判断噪声是否大,如果噪声较大,嵌入式处理器将做出即时决策,使用更强健的调制方式,并提高发送增益。如果噪声较小,但通信状态仍然不好,我们继续将MAC层的平均回退时间发送给主机。我们在主机中进行分析,以确定通信状态不佳是否是由于频带中的设备数量多或信道占用率高造成的。如果信道占用率高,则需要改变中心频率和带宽以优化通信状态。而如果此时不存在足够带宽的频谱空洞,则可以根据当前通信速率需求,减小频宽,以使用窄频谱空洞。

[0157] 在上述流程中,嵌入式处理器能够自主修改调制方式和发送端增益,而中心频率和频宽的修改则只能够由主机作出决策后修改。这种嵌入式处理器即时分析决策与主机端统计分析决策的方式,增强了动态频谱接入过程的灵活性。

[0158] 需要注意的是,公布实施例的目的在于帮助进一步理解本发明,但是本领域的技术人员可以理解:在不脱离本发明及所附权利要求的精神和范围内,各种替换和修改都是可能的。因此,本发明不应局限于实施例所公开的内容,本发明要求保护的范围以权利要求书界定的范围为准。

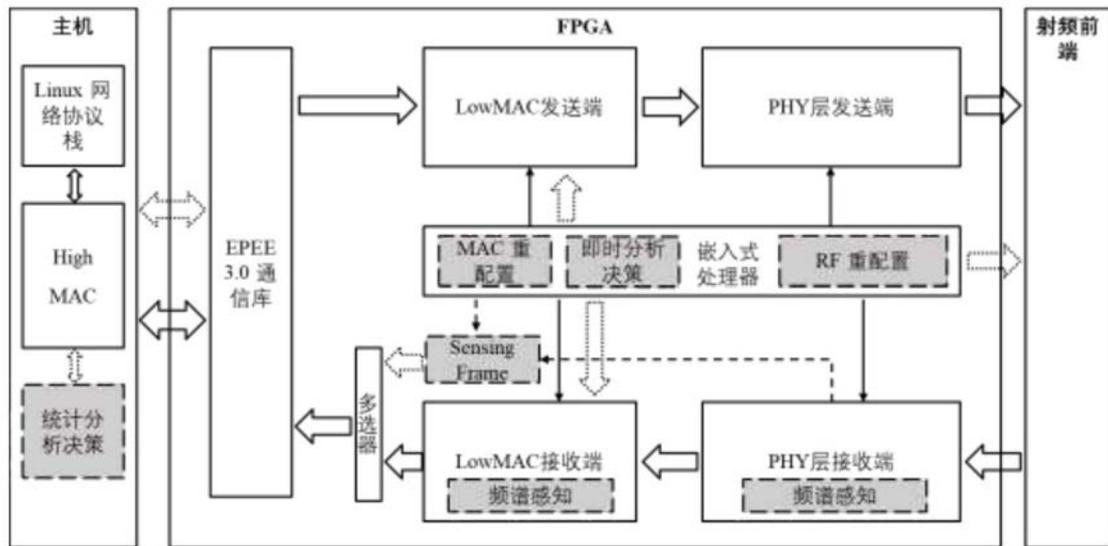


图1

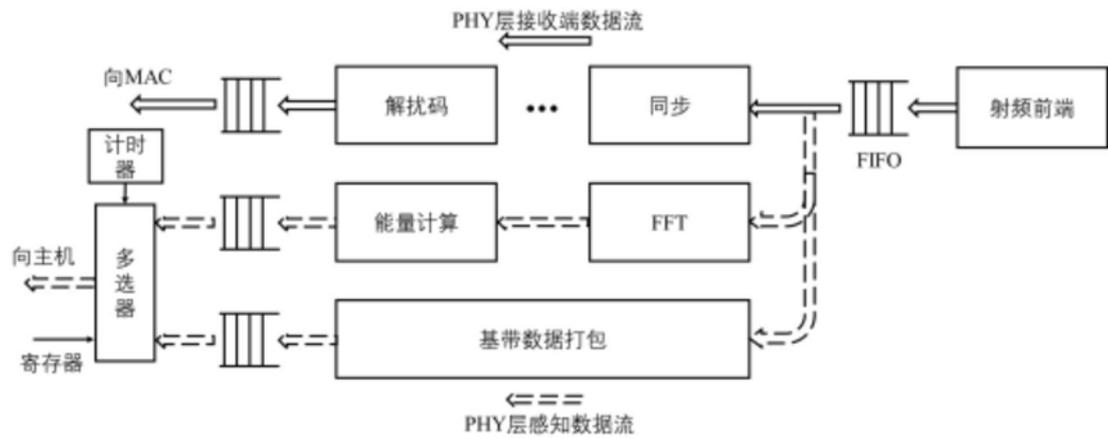


图2

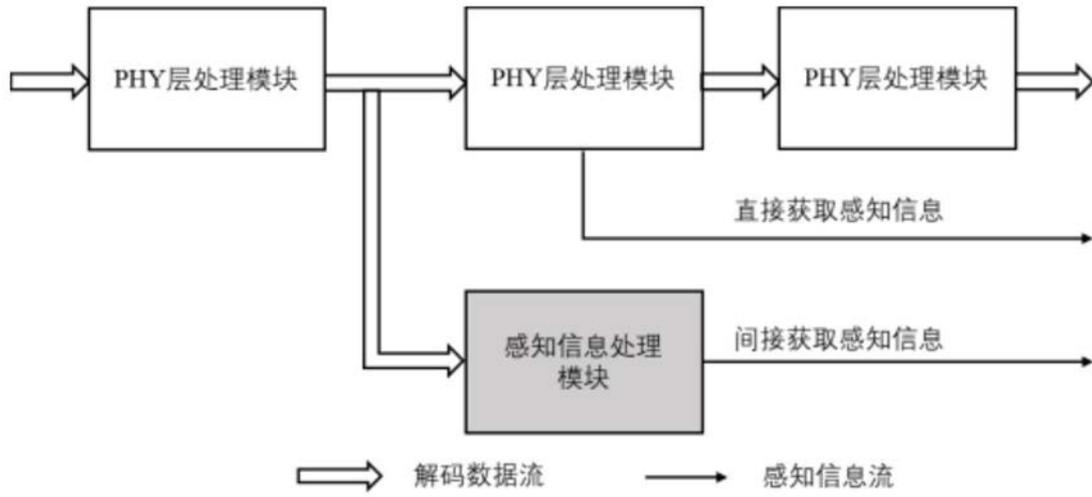


图3

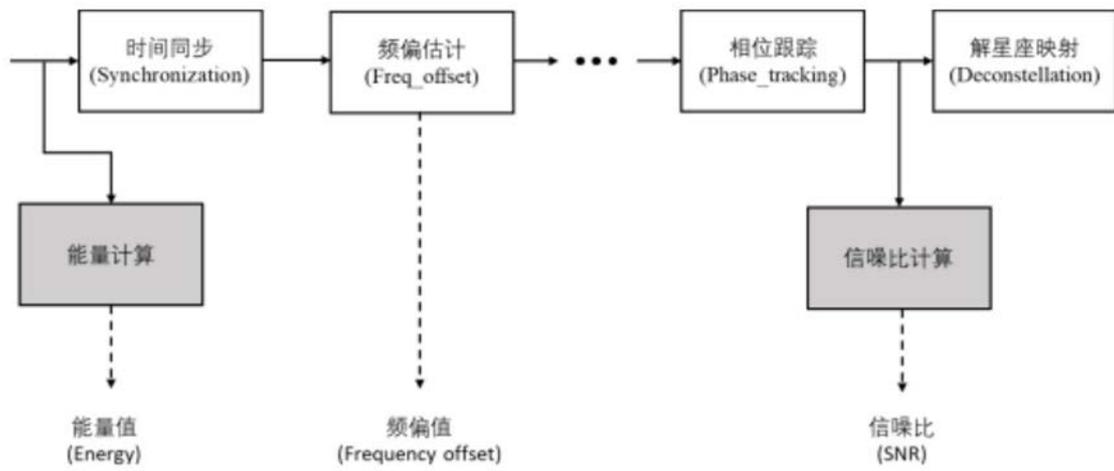


图4

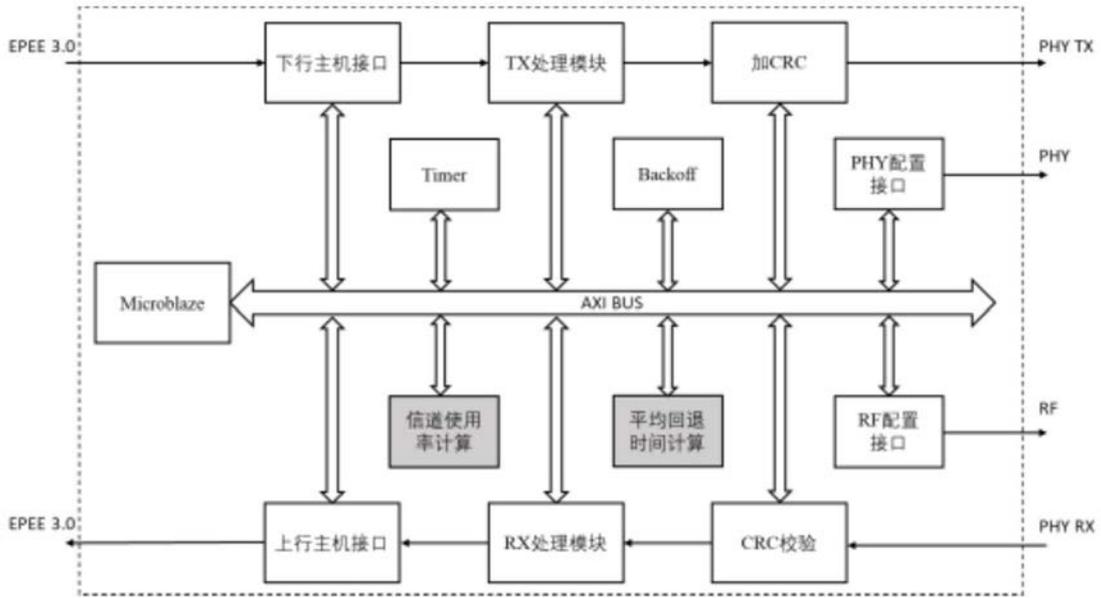


图5

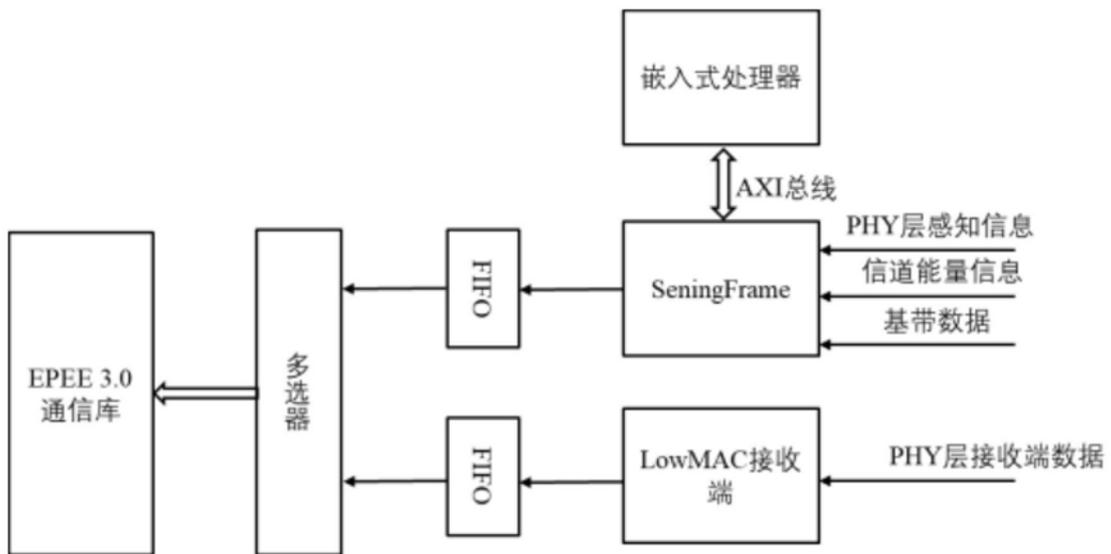


图6

63-56	55-48	47-40	39-32	31-24	23-16	15-8	7-0
平均随机回退时间	信道占用率	设备数量	平均重传次数	CRC校验错误率	MAC层预留		
MAC层预留							
CSI波动幅度				信道能量信息			
信噪比				频率偏移			
子载波能量值(52*8字节)							
子载波能量值(52*8字节)				PHY层预留			
PHY层预留							
PHY层预留							
可选(基带数据, 2048字节)							

图7

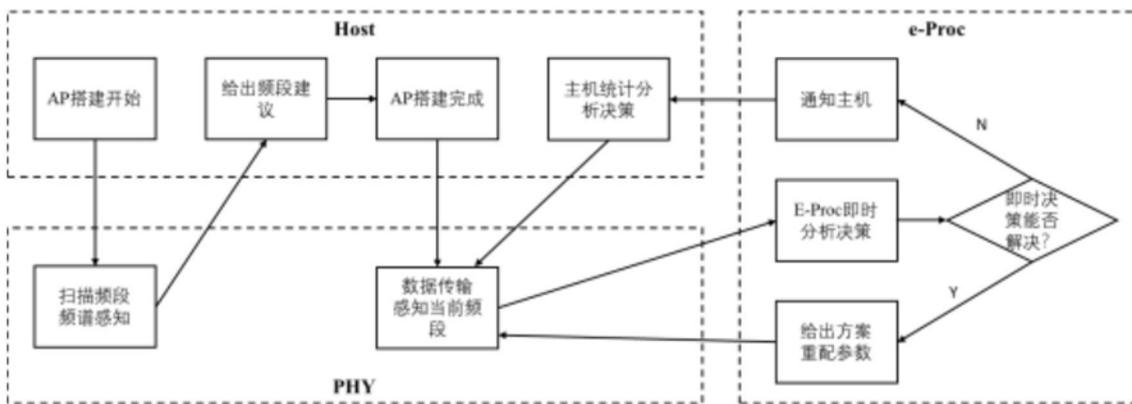


图8

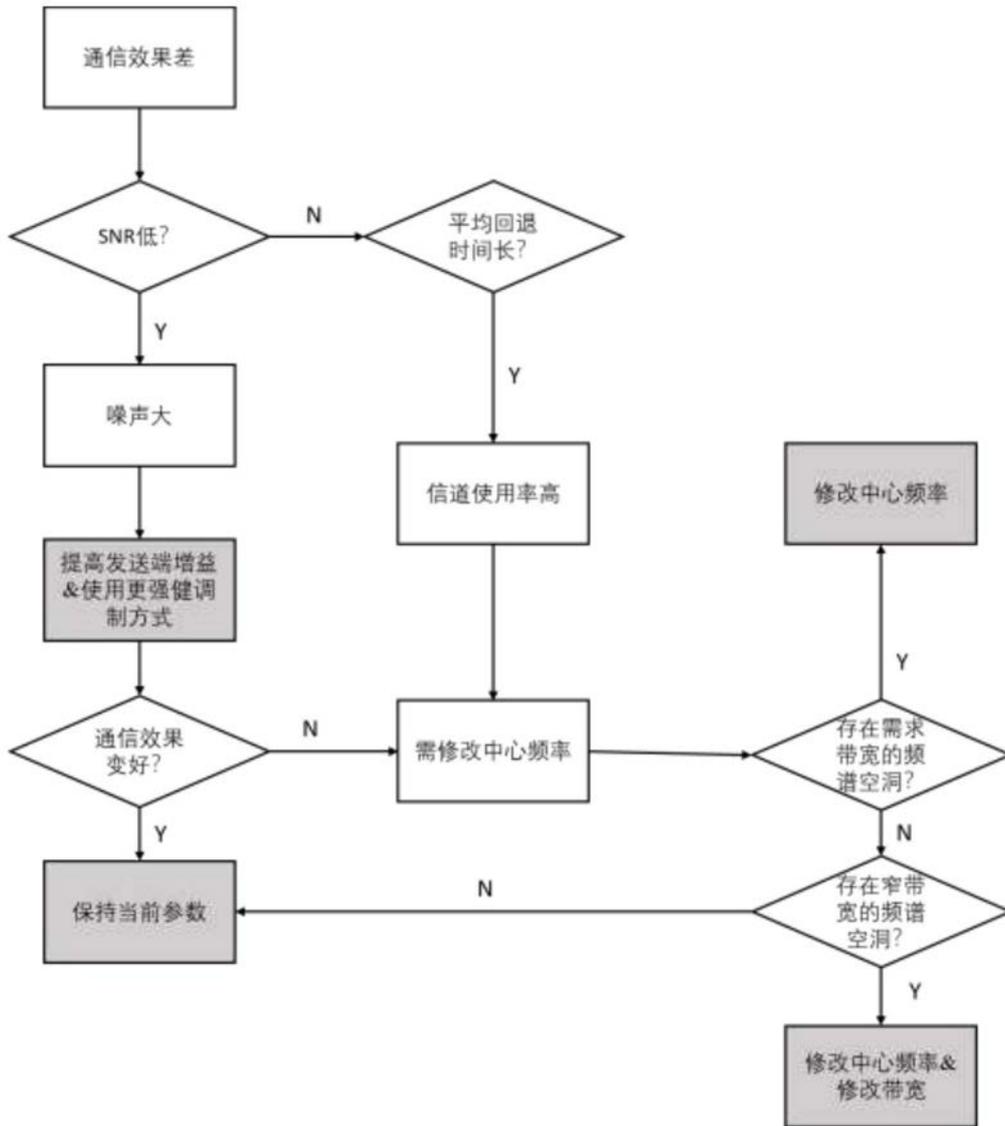


图9