



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106788782 B

(45) 授权公告日 2021.05.07

(21) 申请号 201611105988.3

H04L 1/18 (2006.01)

(22) 申请日 2016.12.06

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 101729566 A, 2010.06.09

申请公布号 CN 106788782 A

CN 104348562 A, 2015.02.11

CN 102244568 A, 2011.11.16

(43) 申请公布日 2017.05.31

US 2014010196 A1, 2014.01.09

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学

尹艳玲. 水声通信网络多载波通信与跨层设计.《哈尔滨工程大学博士学位论文》.2016, 第79-100页.

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

尹艳玲. 水声通信网络多载波通信与跨层设计.《哈尔滨工程大学博士学位论文》.2016, 第79-100页.

(72) 发明人 乔钢 尹艳玲 刘松佐 孙宗鑫

周锋 聂东虎 马璐

Yanling Yin等. A Modified CSMA/CA Protocol for OFDM Underwater Networks: Cross Layer Design.《WUWNet'15, Washington, D.C. USA》.2015, 第1-8页.

(74) 专利代理机构 北京睿智保诚专利代理事务所(普通合伙) 11732

代理人 周新楣

审查员 张新宇

(51) Int. Cl.

H04B 13/02 (2006.01)

H04L 1/00 (2006.01)

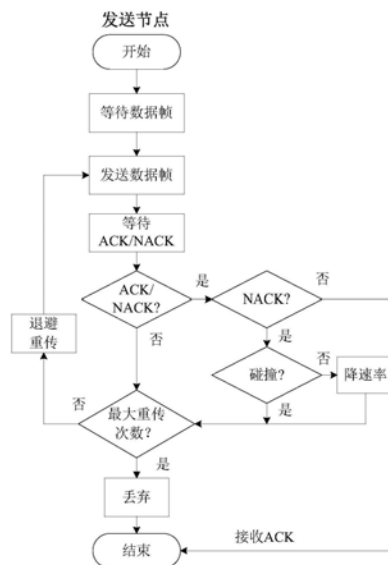
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

水声通信网络OFDM链路物理层与MAC层跨层通信方法

(57) 摘要

本发明提供的是一种水声通信网络OFDM链路物理层与MAC层跨层通信方法。本发明以合理分配信道资源、提高网络吞吐量为目的,通过物理层和MAC层跨层数据交互的方法,对网络性能进行优化。物理层根据水声信道环境自适应调整调制阶数、编码速率和频率分集阶数,实现不同速率的数据传输,以适应快速时变的水声信道,MAC层采用改进的CSMA/CA协议,提高数据包重传成功概率,减小数据传输时延,通过物理层和MAC层之间的跨层设计,解决水声信道快速时变和长传输时延等因素引起的丢包率高和传输效率低的问题,从而提高水声通信网络吞吐量和系统的频谱效率。



1. 一种水声通信网络OFDM链路物理层与MAC层跨层通信方法,其特征是:

步骤1:网络节点采用虚拟载波侦听的方式检测信道是否忙碌,通过侦听数据帧代替RTS/CTS握手过程避免碰撞,如果节点检测到数据帧,判断本节点是否是目的节点,如果本节点非目的节点,则根据数据帧帧头中的所传数据帧占用信道时间设置该节点的网络分配矢量即NAV,保持静默避免冲突,信道空闲后,节点随机退避;

步骤2:如果目的节点成功解调数据帧,则目的节点回复ACK信号,同时物理层估计信道信息有效信噪比即ESNR,并将ESNR通过ACK信号反馈给发送节点;

步骤3:如果目的节点解调数据帧失败,并且检测到解调失败是由冲突引起的,此时目的节点广播NACK控制帧,定义此时的NACK为类型I,记为NACK1;

步骤4:如果目的节点解调数据帧失败,并且检测到解调失败是由信道环境恶劣引起的,此时目的节点广播NACK控制帧,定义此时的NACK为类型II,记为NACK2,NACK2中包含重传数据帧所占用信道时间 $T_{busy}$ 和信道信息导频信噪比即PSNR;

步骤5:如果目的节点检测数据帧失败,则目的节点不作任何反应,对于发送节点来说,ACK等待超时;

步骤6:如果发送节点接收到ACK信号,表示上一个数据帧成功发送,则节点进行随机退避,并准备发送下一个数据帧,下一帧数据调制参数由反馈的ESNR决定;

步骤7:如果发送节点接收到NACK1信号或者ACK等待超时,此时发送节点进行随机退避,退避时间结束后,发送节点以与前一帧相同的调制参数重复发送该数据帧,当重传次数大于所设置的最大重传次数时,丢弃该数据帧;

步骤8:如果发送节点接收到NACK2信号,则该发送节点根据反馈的PSNR进行降速率对数据帧立刻重传,其他子节点侦听到NACK2后,根据NACK2中的 $T_{busy}$ 设置NAV向量,保持静默避免冲突;

所述网络节点采用虚拟载波侦听的方式检测信道是否忙碌具体包括:首先设计一种物理层协议数据单元即PPDU帧结构,PPDU包括前导码、帧头和有效载荷三部分,其中帧头包括了当前数据帧成功传输所占用的信道时间,表示为

$$T_{busy} = T_{data} + T_{ACK} + 2T_{delay} + T_{process}$$

其中, $T_{data}$ 表示数据帧长度、 $T_{ACK}$ 表示ACK帧长度、 $T_{delay}$ 表示源节点和目的节点之间的传播时延, $T_{process}$ 表示信号处理所占用的时间,当其他节点检测到该数据帧并成功解调帧头获得该时间信息后,节点设置NAV向量并保持沉默,避免碰撞,其中传播时延在网络初始化时通过节点之间互相传递短消息的方式测量获得,并在每次成功传输数据帧后对时延值进行更新;

如果目的节点成功解调数据帧,则目的节点回复ACK信号具体包括:当目的节点成功解调数据帧后,估计信道计算有效信噪比ESNR,ESNR计算方法如下:

$$ESNR = \frac{E_{k \in S_D} \left[ \left| \hat{H}[k] s[k] \right|^2 \right]}{E_{k \in S_D} \left[ \left| z[k] - \hat{H}[k] s[k] \right|^2 \right]}$$

其中,  $s[k]$  为频域第  $k$  个载波发送的数据,  $z[k]$  为频域第  $k$  个子载波接收的数据,  $\hat{h}[k]$  为第  $k$  个载波估计的信道频率响应,  $S_p$  表示数据载波的位置索引的集合, 由于数据已经成功解调, 所以此时  $s[k]$  是已知的, ESNR 采用均衡后的数据代替导频描述接收信号强度, 噪声项中包含了环境噪声、信道估计误差和多普勒补偿残余误差引起的载波间干扰, ESNR 用于评估信道状态, 当数据解调成功后, 将 ESNR 通过 ACK 信号反馈给源节点, 为下一个数据帧调制参数的选择提供依据; 如果目的节点解调数据帧失败, 并且检测到解调失败是由冲突引起的, 此时目的节点广播 NACK1 控制帧, 具体包括: 目的节点根据数据帧解调失败原因, 反馈不同的控制信息, 当解调失败由冲突引起的, 此时为了避免下次各个节点重发再次引起冲突, 目的节点广播一个 NACK1 控制帧告知所有节点, 表明上一帧数据发生了冲突。

2. 根据权利要求 1 所述的水声通信网络 OFDM 链路物理层与 MAC 层跨层通信方法, 其特征是: 如果目的节点解调数据帧失败, 并且检测到解调失败是由信道环境恶劣引起的, 此时目的节点广播 NACK2 控制帧, 具体包括: 目的节点根据数据帧解调失败原因, 反馈不同的控制信息, 当解调失败由信道环境恶劣引起时, 节点广播 NACK2 信号, 该信号中包含了重传数据帧所占用的信道时间  $T_{\text{busy}}$ , 当其他节点接收到 NACK2 信号后, 得知在未来的  $T_{\text{busy}}$  时间内, 信道将被占用, 从而保持静默, 而原发送节点立即降低速率重新发送上一帧数据, 同时 NACK2 中包含了导频信噪比 PSNR, 该信息用于帮助发送节点重发数据帧选择合适的调制参数, PSNR 计算方法如下:

$$PSNR = \frac{E_{k \in S_p} \left\{ |z[k]|^2 \right\} - E_{k \in S_N} \left\{ |z[k]|^2 \right\}}{E_{k \in S_N} \left\{ |z[k]|^2 \right\}}$$

其中,  $z[k]$  为接收的频域第  $k$  个子载波的数据,  $S_p$  和  $S_N$  分别为导频载波和空载波的位置索引的集合。

3. 根据权利要求 1 所述的水声通信网络 OFDM 链路物理层与 MAC 层跨层通信方法, 其特征是所述下一帧数据调制参数由反馈的 ESNR 决定具体包括: 物理层采用 OFDM 调制方式, 通过联合调整调制阶数、编码速率和频率分集阶数, 实现不同速率的数据传输, 通过三个参数的组合选择出几组调制参数作为数据帧调制参数, 根据设定的误码率或者误包率门限, 得到每组参数对应的 ESNR 区间, 源节点根据反馈的 ESNR 确定下一帧数据所选用的调制参数。

4. 根据权利要求 1 所述的水声通信网络 OFDM 链路物理层与 MAC 层跨层通信方法, 其特征是所述根据反馈的 PSNR 进行降速率对数据帧立刻重传具体包括: 当数据解调错误时, 采用 PSNR 作为信道性能评估准则, PSNR 反应了当前信道状况, 发送节点根据反馈的 PSNR 知道当前信道状况, 从而选择适应当前信道状态的调制参数, 对数据进行降速率重传。

## 水声通信网络OFDM链路物理层与MAC层跨层通信方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种水声无线传感器网络,具体地说是一种水声通信网络OFDM链路物理层与MAC层跨层通信方法。

### 背景技术

[0002] 地球70%的表面被海洋覆盖,浩瀚的海洋蕴藏着巨大的资源。在全球陆地资源日趋紧张和环境不断恶化的今天,世界各国纷纷将目光转向海洋,开发海洋资源、发展海洋经济成为各个海洋国家的重要规划方向。水声通信网络是获取海洋环境参数的有效手段,在海洋环境监测、海洋资源开发、自然灾害预警、港口及近岸的检测等方面都有十分重要的作用。对于某些水声网络,对网络的吞吐量、传输效率、传播时延等要求比较高,因此研究高效的水声无线传感器网络具有重要的研究意义。

[0003] 然而,水声信道与陆上无线电信道相比,具有带宽有限、与数据帧长度可比拟的传播时延以及快速时变等特点,导致水声无线传感器网络丢包率高、传输时延长、能量消耗大、网络吞吐量低等问题。为了解决该问题,除了分别优化网络各层协议外,跨层协议设计为优化水声网络性能提供了一种有效的方法。

[0004] 本发明主要研究基于物理层和MAC层的跨层协议设计,与本发明相关的公开报道包括:参考文献1(P.Xie and J.-H.Cui.R-MAC:An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks[C].International Conf.on Wireless Algorithm, Systems,and Applications(WASA 2007).Chicago,Illinois,USA,2007,pp:187-198.)提出了一种传输功率可控的RMAC协议(RMAC-PC),通过MAC层和物理层的跨层设计来改善RMAC协议的能源效率。文献2(J.M.Jornet,M.Stojanovic,and M.Zorzi.On Joint Frequency and Power Allocation in a Cross-Layer Protocol for Underwater Acoustic Networks[C].IEEE J.Oceanic.Engineering.2010,Vol.35,No.4,pp:936-947.)针对三维多跳网络,提出了一种联合优化物理层、MAC层和网络层的跨层协议设计方法来提高信道频带利用率,根据网络节点密度调整发射信号功率、中心频率和带宽,从而降低每比特的能量消耗。在上述文献中,没有考虑到水声信道快速时变对物理层和MAC层之间的影响以及二层之间的紧密联系。

### 发明内容

[0005] 本发明目的在于提供一种能够减小复杂的水声信道引起的高丢包率和长传输时延问题,提高网络吞吐量和系统频谱效率的水声通信网络OFDM链路物理层与MAC层跨层通信方法。

[0006] 本发明的目的是这样实现的:

[0007] 步骤1:网络节点采用虚拟载波侦听的方式检测信道是否忙碌,通过侦听数据帧代替RTS/CTS握手过程避免碰撞,如果节点检测到数据帧,判断本节点是否是目的节点,如果本节点非目的节点,则根据数据帧帧头中的所传数据帧占用信道时间设置该节点的网络分

配矢量即NAV,保持静默避免冲突,信道空闲后,节点随机退避;

[0008] 步骤2:如果目的节点成功解调数据帧,则节点回复ACK信号,同时物理层估计信道信息有效信噪比即ESNR,并将ESNR通过ACK信号反馈给发送节点;

[0009] 步骤3:如果目的节点解调数据帧失败,并且检测到解调失败是由冲突引起的,此时目的节点广播NACK控制帧,定义此时的NACK为类型I,记为NACK1;

[0010] 步骤4:如果目的节点解调数据帧失败,并且检测到解调失败是由信道环境恶劣引起的,此时目的节点回复NACK控制帧,定义此时的NACK为类型II,记为NACK2,NACK2中包含重传数据帧所占用信道时间 $T_{\text{busy}}$ 和信道信息导频信噪比即PSNR;

[0011] 步骤5:如果目的节点检测数据帧失败,则节点不作任何反应,对于发送节点来说,ACK等待超时;

[0012] 步骤6:如果发送节点接收到ACK信号,表示上一个数据帧成功发送,则节点进行随机退避,并准备发送下一个数据帧,下一帧数据调制参数由反馈的ESNR决定;

[0013] 步骤7:如果发送节点接收到NACK1信号或者ACK等待超时,此时节点进行随机退避,退避时间结束后,节点与以前一帧相同的调制参数重复发送该数据帧,当重传次数大于所设置的最大重传次数时,丢弃该数据帧;

[0014] 步骤8:如果发送节点接收到NACK2信号,则该节点根据反馈的PSNR进行降速率对数据帧立刻重传,其他子节点侦听到NACK2后,根据NACK2中的 $T_{\text{busy}}$ 设置NAV向量,保持静默避免冲突。

[0015] 本发明还可以包括:

[0016] 1、所述网络节点采用虚拟载波侦听的方式检测信道是否忙碌具体包括:首先设计一种物理层协议数据单元即PPDU帧结构,PPDU包括前导码、帧头和有效载荷三部分,其中帧头包括了当前数据帧成功传输所占用的信道时间,表示为

$$[0017] \quad T_{\text{busy}} = T_{\text{data}} + T_{\text{ACK}} + 2T_{\text{delay}} + T_{\text{process}}$$

[0018] 其中, $T_{\text{data}}$ 表示数据帧长度、 $T_{\text{ACK}}$ 表示ACK帧长度、 $T_{\text{delay}}$ 表示源节点和目的节点之间的传播时延, $T_{\text{process}}$ 表示信号处理所占用的时间,当其他节点检测到该数据帧并成功解调帧头获得该时间信息后,节点设置NAV向量并保持沉默,避免碰撞,其中传播时延在网络初始化时通过节点之间互相传递短消息的方式测量获得,并在每次成功传输数据帧后对时延值进行更新。

[0019] 2、所述如果目的节点成功解调数据帧,则节点回复ACK信号具体包括:当目的节点成功解调数据帧后,估计信道计算有效信噪比ESNR,ESNR计算方法如下:

$$[0020] \quad \text{ESNR} = \frac{E_{k \in S_D} \left[ \left| \hat{H}[k] s[k] \right|^2 \right]}{E_{k \in S_D} \left[ \left| z[k] - \hat{H}[k] s[k] \right|^2 \right]}$$

[0021] 其中, $s[k]$ 为频域第k个载波发送的数据, $z[k]$ 为频域第k个子载波接收的数据, $\hat{H}[k]$ 为第k个载波估计的信道频率响应, $S_D$ 表示数据载波的位置索引的集合,由于数据已经成功解调,所以此时 $s[k]$ 是已知的,ESNR采用均衡后的数据代替导频描述接收信号强度,噪声项中包含了环境噪声、信道估计误差和多普勒补偿残余误差引起的载波间干扰,ESNR用于评估信道状态,当数据解调成功后,将ESNR通过ACK信号反馈给源节点,为下一个数据帧

调制参数的选择提供依据。

[0022] 3、所述如果目的节点解调数据帧失败，并且检测到解调失败是由冲突引起的，此时目的节点广播NACK1控制帧，具体包括：目的节点根据数据帧解调失败原因，反馈不同的控制信息，当解调失败由冲突引起的，此时为了避免下次各个节点重发再次引起冲突，目的节点广播一个NACK1控制帧告知所有节点，表明上一帧数据发生了冲突。

[0023] 4、所述如果目的节点解调数据帧失败，并且检测到解调失败是由信道环境恶劣引起的，此时目的节点广播NACK2控制帧，具体包括：目的节点根据数据帧解调失败原因，反馈不同的控制信息，当解调失败由信道环境恶劣引起时，节点广播NACK2信号，该信号中包含了重传数据帧所占用的信道时间 $T_{\text{busy}}$ ，当其他节点接收到NACK2信号后，得知在未来的 $T_{\text{busy}}$ 时间内，信道将被占用，从而保持静默，而原发送节点立即降低速率重新发送上一帧数据，同时NACK2中包含了导频信噪比PSNR，该信息用于帮助发送节点重发数据帧选择合适的调制参数，PSNR计算方法如下：

$$[0024] \quad PSNR = \frac{E_{k \in S_p} \{ |z[k]|^2 \} - E_{k \in S_N} \{ |z[k]|^2 \}}{E_{k \in S_N} \{ |z[k]|^2 \}}$$

[0025] 其中， $z[k]$ 为接收的频域第 $k$ 个子载波的数据， $S_p$ 和 $S_N$ 分别为导频载波和空载波的位置索引的集合。

[0026] 5、所述下一帧数据调制参数由反馈的ESNR决定具体包括：物理层采用OFDM调制方式，通过联合调整调制阶数、编码速率和频率分集阶数，实现不同速率的数据传输，通过三个参数的组合选择出几组调制参数作为数据帧调制参数，根据设定的误码率或者误包率门限，得到每组参数对应的ESNR区间，源节点根据反馈的ESNR确定下一帧数据所选用的调制参数。

[0027] 6、所述根据反馈的PSNR进行降速率对数据帧立刻重传具体包括：当数据解调错误时，采用PSNR作为信道性能评估准则，PSNR反应了当前信道状况，源节点根据反馈的PSNR知道当前信道状况，从而选择适应当前信道状态的调制参数，对数据进行降速率重传。

[0028] 本发明通过物理层和MAC层的信息交互与共享，自适应调整数据传输和介质接入方案，从而达到优化网络性能的目的。

[0029] 本发明事务水声通信网络跨层协议设计方法，能够减小复杂的水声信道引起的高丢包率和长传输时延问题，从而有效的提高网络吞吐量和系统的频谱效率。

[0030] 本发明具有的有益效果：

[0031] 该跨层协议主要实现物理层和MAC层之间的数据交互和共享，根据水声信道情况，自适应调整数据传输速率和自动请求重传机制，当水声信道情况良好时，采用高速率的OFDM调制方式和改进的CSMA/CA协议，实现高速率的数据传输；当时水声信道情况变差时，采用降低速率的方法提高数据传输成功概率；当水声信道恶劣至无法通信时，采用退避的方法等待重传；当数据包丢失时，可以智能的区分数据包丢失原因，并根据不同的原因进行相应的重传或者退避处理。通过物理层和MAC层的跨层设计，在不同的信道情况下，可以最大限度的利用信道资源，解决传统的采用固定速率传输时高信噪比下无法充分利用信道、低信噪比下吞吐量急速下降的问题。

## 附图说明

- [0032] 图1为不同传输模式的误包率性能  
 [0033] 图2为利用ACK作为反馈链路示意图；  
 [0034] 图3为PPDU数据帧结构；  
 [0035] 图4为改进的CSMA/CA协议基本流程图；  
 [0036] 图5a为跨层设计发射节点流程图；图5b为跨层设计接收节点流程图。

## 具体实施方式

[0037] 下面举例详细说明OFDM链路物理层和MAC层跨层设计方法及其有益效果。  
 [0038] 物理层和MAC层跨层设计,要求物理层能够根据信道情况,自适应调制发送参数才,从而实现不同速率的数据传输,在这个过程中,涉及调制参数的选择、反馈链路和信道评估准则等,首先对OFDM自适应调制编码及相关技术进行阐述。

[0039] (1) OFDM自适应调制编码技术

[0040] A. 调制参数选择

[0041] 自适应调制编码的核心思想是:在保证不牺牲系统稳健性能或误包率不变的前提下,根据无线信道环境变化,自适应的调整发射参数改变通信速率,最大限度的利用信道,实现网络的吞吐量最大化。自适应调整发射参数的一种选择就是选择不同参数组合的调制方案,选择的不同组参数具有不同的通信速率,从而适应不同环境的变化,下面给出本方案的调制参数选择方案。

[0042] 调制方式主要考虑BPSK、QPSK和8PSK调制,即调制阶数分别为2、3、4,编码采用卷积编码,编码速率分别为1/2、1/3、1/4,频率分集阶数分别为1,2,3,频率分集数为1即表示无分集。调制参数的选择即从这三组参数中选出几种组合方式构成候选的调制参数组,节点会根据反馈的信道信息,合理的选择即将传输的数据包的调制参数。对于三个参数,有多种组合,但是有两个或者以上的组合具有相同的或者相近的数据传输速率,因此,文中主要通过两种准则选取参数:一是当不同参数的组合具有相同的数据传输速率时,选择误码/包率性能最好的;二是当不同参数的组合具有相近的误码/包率性能时,选择数据传输速率最大的。

[0043] 表1 OFDM自适应调制编码方案选取的传输模式和具体参数

模式	调制方式	分集数	编码速率	数据速率(kbps)
1	BPSK	3	1/2	0.658
2	QPSK	3	1/2	1.317
[0044] 3	QPSK	1	1/4	1.984
4	QPSK	1	1/3	2.645
5	QPSK	1	1/2	3.967
6	8PSK	1	1/2	5.950

[0045] 根据参数选取准则,共选取了6组参数作为OFDM自适应调制编码的候选参数,分别定义为模式1~6,具体选取的参数如表1所示,信号频率范围为4kHz~8kHz,数据传输速率

范围为0.685kbps~5.950kbps。不同传输模式的误包率曲线如1所示。

#### [0046] B. 反馈链路

[0047] 反馈链路的主要作用是将目的节点获取的信道信息传递给源节点,源节点根据反馈的信道信息自适应调整发射端调制参数,从而适应信道环境。反馈链路要解决的两个问题是:一是如何反馈信息,二是反馈什么信息。本发明中,目的节点主要将估计的性能评价参数有效信噪比(ESRN)反馈给源节点。

[0048] 本发明设计的MAC层协议不包含RTS/CTS控制帧,且同时采用ACK和NACK两种控制帧,所以目的节点估计的信道信息通过ACK/NACK信号反馈给源节点,如图2所示,目的节点根据数据帧获取信道信息,然后将此信息通过ACK/NACK反馈给源节点,源节点根据反馈的信道参数确定下一个数据帧的调制参数。

#### [0049] C. 信道评估准则

[0050] 自适应调制编码技术主要包含两方面的内容,一方面是信道信息的获取,通过信道估计等技术准确的获取当前信道信息,以某种信道指示方式或者性能评估准则准确和有效的反应信道的情况;一方面是调制参数的自适应选择,根据获取的信道环境信息,自适应的调整发射参数以适应信道的变化。上面已经给出了调制参数的选择方案,那么节点如何根据信道信息选择对应的调制参数,即信道评估准则的选取问题。在确定了性能评估准则之后,假设在保证不高于某误包率的情况下,根据不同调制参数的误码性能,可以确定对应误包率门限下的性能评估准则,比如接收信噪比,从而可以确定不同调制参数对应的信道评估区间,根据反馈的信道参数即可以确定下一个数据包选择的调制参数。

[0051] 目前常用的性能评估准则有输入信噪比(Input SNR, ISNR)、导频信噪比(Pilot SNR, PSNR)和有效信噪比(Effective SNR, ESNR)等, ISNR即接收机接收的信号功率与噪声功率的比,可以表示为

$$[0052] \quad ISNR = \frac{E\{|y[n]|^2\} - E\{|v[n]|^2\}}{E\{|v[n]|^2\}} \quad (1)$$

[0053] 其中,  $y[n]$  和  $v[n]$  分别表示时域接收的含噪信号与无信号时的噪声。ISNR只是从粗略的描述了信号和噪声的关系,而无法全面的准确的描述水声信道对OFDM符号的影响,包括多普勒引起的ICI等,且当信噪比较小小时,该方法估计的误差比较大。

[0054] PSNR利用频域的导频数据和空载波数据估计信道对OFDM符号的干扰,导频数据描述信号的强度,空载波数据描述噪声和干扰的大小,导频信噪比可以表示为

$$[0055] \quad PSNR = \frac{E_{k \in S_p} \{|z[k]|^2\} - E_{k \in S_N} \{|z[k]|^2\}}{E_{k \in S_N} \{|z[k]|^2\}} \quad (2)$$

[0056] 其中,  $z[k]$  为接收的频域第  $k$  个子载波的数据,  $S_p$  和  $S_N$  分别为导频载波和空载波的位置索引的集合, PSNR在考虑噪声干扰的同时,还考虑了由于多普勒引起的载波间干扰。不存在多普勒或者完全移除多普勒时,其他载波的旁瓣干扰在空载波处为零点,因此空载波只包含噪声项,当存在残留多普勒时,其他载波的干扰在空载波处不为零。所以, PSNR可以同时反映噪声和残留多普勒的影响,但是PSNR是在均衡前计算得到的,没有考虑多途的影



响,因此仍然无法全面描述信道信息。

[0057] ESNR利用成功解调后的数据估计信噪比。设发射的和接收第k个子载波数据分别为s[k]和z[k], $\hat{H}[k]$ 为估计的第k个子载波的信道频率响应,则有

$$[0058] \quad z[k] = \hat{H}[k]s[k] + v[k] \quad (3)$$

[0059] 其中,v[k]不仅包含了环境噪声和残留载波间干扰,同时还包含了信道估计误差带来的干扰,ESNR可以表示为

$$[0060] \quad ESNR = \frac{E_{k \in S_D} \left[ \left| \hat{H}[k]s[k] \right|^2 \right]}{E_{k \in S_D} \left[ \left| z[k] - \hat{H}[k]s[k] \right|^2 \right]} \quad (4)$$

[0061] 其中, $S_D$ 表示数据载波的位置索引的集合,由于数据已经成功解调,所以此时s[k]是已知的。与PSNR不同,ESNR采用均衡后的数据代替导频描述接收信号强度,噪声项中包含了环境噪声、信道估计残余误差和多普勒补偿残余误差引起的载波间干扰,因而更为全面的描述了信道环境信息,评估不同的信道环境,具有很好的一致性。但是该算法的前提是需要成功解调数据,获取发送的数据信息,当发送数据解调失败时,ESNR将比实际的值要小。

[0062] (2)改进的CSMA/CA协议

[0063] CSMA/CA协议通过交换RTS和CTS控制帧进行信道预约,从而有效的避免了数据帧冲突,提高了网络吞吐量。对于陆上无线网络来说,传播时延非常小,远小于数据帧的长度,可以忽略。但是对于水声无线网络,传播时延非常长,可以和数据帧长度相比拟,虽然通过握手过程可以有效减少碰撞,但是交换RTS和CTS过程占用信道时间很长,降低了信道利用率。因此本发明提出了一种改进的CSMA/CA协议,该协议不采用RTS/CTS握手信号进行信道预约,而是采用虚拟侦听的方法,侦听其他节点的数据帧判断信道是否忙碌,并且增加了两种NACK控制帧,用于通知源节点数据帧解调失败原因,该设计主要为后面的PHY/MAC跨层设计做服务。

[0064] CSMA/CA协议通过交换RTS/CTS控制帧预约信道,其他子节点通过控制帧信号可以知道当前数据帧传输占用的信道时间,但是提出的改进的CSMA/CA协议,不采用握手信号预约信道,而是通过侦听数据帧判断信道是否忙碌,同时也采用了虚拟载波侦听的方法侦听信道。在介绍具体协议之前,先介绍提出的物理层协议数据单元(PPDU,PLCP Protocol Data Unit)的帧结构,也即实际传输的物理层信号的数据帧结构。

[0065] PPDU数据帧主要由前导码(Preamble)、帧头(Header)和有效载荷(Payload)三部分组成,如图3所示,前导码主要用于唤醒接收设备,使其与接收信号同步,文中选用LFM信号作为前导码。前导码结束后,就是帧头(PLCP Header),帧头中包含物理层调制参数,如传输的数据长度、调制编码方式等,接收机将按照这些参数选择解码方式以及决定何时结束数据接收。该帧头中还包含了发送节点地址、接收节点地址以及传输该数据帧占用的信道时间长度,即往返时间。该帧头类似于一个短的RTS请求帧,当节点侦听到该数据帧并获取帧头中的信息后,判断该数据帧是否属于本节点,如果本节点是目的节点,则继续解调后面的有效载荷,否则,则停止解调后面的有效载荷,并根据帧头中的往返时间设置该节点的NAV值,同时保持静默。最后一部分是有效载荷或者帧主体,该部分采用OFDM调制,具体长度

根据传输数据长度可变,且调制参数根据信道环境自适应调整。

[0066] 提出的改进的CSMA/CA协议基本流程图如图4所示,当节点有数据要发送时,首先判断信道是否空闲,而信道是否空闲主要通过判断节点本身的NAV是否为零,如果为零则表示信道空闲,否则表示忙碌。若信道空闲,且节点的竞争窗口为零,则发送数据帧,若其他子节点侦听到该数据帧,则根据帧头中的往返时间设置节点的NAV向量,并保持静默。若在此期间节点有数据发送,则延迟发送,当NAV为零时,该节点进行退避,当信道空闲时,退避计数器逐渐减小,当信道忙碌时,则冻结该计数器,直至计数器值为零时,开始发送数据帧。如果数据包正确解调,则目的节点回复ACK确认数据包正确传输。当两个或者以上的节点同时发送数据帧且发送时间间隔小于对方可侦听到的时间间隔,则在接收端发生碰撞,造成数据帧解调失败,此时接收节点可以检测出数据帧冲突,同时广播一个NACK帧信号(定义为NACK1),通知发送节点该数据帧传输失败,且传输失败是由于碰撞引起的。当信道中只有一个数据帧传输,但是由于信道环境恶劣导致数据帧传输失败时,接收节点同样的回复一个NACK帧信号(定义为NACK2),通知发送节点数据帧传输失败是由于信道环境恶劣引起的。

[0067] (3) 物理层/MAC层跨层设计

[0068] 考虑集中式网络拓扑结构,网络由一个主节点和若干个子节点组成。物理层(PHY)主要采用OFDM自适应调制编码技术,MAC层协议采用改进的CSMA/CA协议,PHY/MAC跨层设计主要思想是:PHY将估计的信道信息传递给MAC层,并当数据帧传输失败时检测失败原因,MAC层根据信道信息选择合适的物理层传输参数,并根据数据帧传输失败原因设计相应的退避/ARQ机制,增加数据帧重传成功概率,并减小传输时延,从而提高网络吞吐量。

[0069] 跨层设计发射节点和接收节点流程图如图5所示,首先,介绍接收节点接收数据帧的过程。接收节点持续检测前导码,判断是否接收到数据帧,主要采用拷贝相关的方法检测前导码,检测到前导码后,接收节点解调帧头并获取有效载荷解调参数和数据帧的长度,并继续进行解调,同时,接收节点保持检测前导码。发送节点发射数据帧后,对于接收节点的状态可以分为以下四种情况:

[0070] 1. 检测到数据帧并且正确解调,回复ACK确认帧,同时估计信道信息ESNR,将此信息通过ACK信号反馈给发送节点;

[0071] 2. 检测到数据帧,但是解调数据帧失败,并且检测解调失败原因是由冲突引起的,此时广播NACK控制帧,定义此时的NACK为类型I,记为NACK1。

[0072] 3. 检测到数据帧,但是解调数据帧失败,并且数据帧解调失败原因是由信道环境恶劣引起的,比如信噪比低、多途和多普勒干扰严重等,此时回复NACK信号,定义此时的NACK为类型II,记为NACK2,NACK2信号中同时包括PSNR用于指示重传时的调制参数。

[0073] 4. 未检测到数据帧,检测失败原因包括突发噪声或干扰导致前导码检测失败、数据帧冲突导致检测失败等,此时接收节点不做任何回应,对于发送节点,则ACK等待超时。

[0074] 对于发送节点,当发送数据帧之后,等待回复的ACK/NACK信号,同样地,发送节点的状态可以分为以下三种情况:

[0075] 1. 接收到ACK信号,表示上一个数据帧成功发送,则节点进行随机退避,并准备发送下一个数据帧,下一帧数据调制参数由反馈的ESNR决定。

[0076] 2. 接收到NACK1信号或者ACK等待超时,此时节点进行随机退避,然后以与上一帧相同的调制参数重复发送该帧数据,当重传次数大于3时,丢弃该数据帧。

[0077] 3. 接收到NACK2信号,表示数据帧丢失是由于信道环境恶劣引起的,此时若节点退避并以原速率重传数据帧,重传成功概率低,且退避会造成传输时延增加,降低了信道的利用率。因此,若数据帧丢失是信道引起的,则节点根据反馈的信道信息,降低速率立刻重新传输该帧数据,可以提高重传成功概率,并减小传输时延,其他节点侦听到NACK2信号后保持静默。

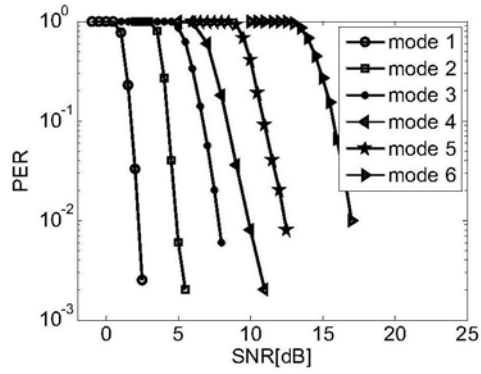


图1

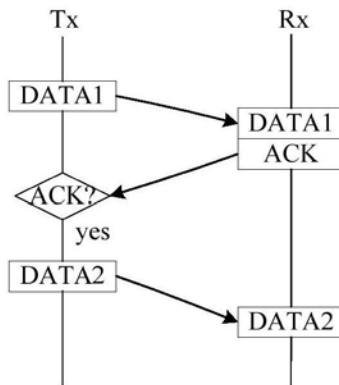


图2

前导码(Preamble) LFM	帧头(Header) 正交多载波M元CSK	有效载荷(Payload) OFDM
唤醒设备 数据帧同步	包括物理层解调参数及发送和接收节点地址、数据帧往返时间等	长度可变, 可选速率: 0.66, 1.32, 1.98, 2.65, 3.97, 5.95kbps

图3

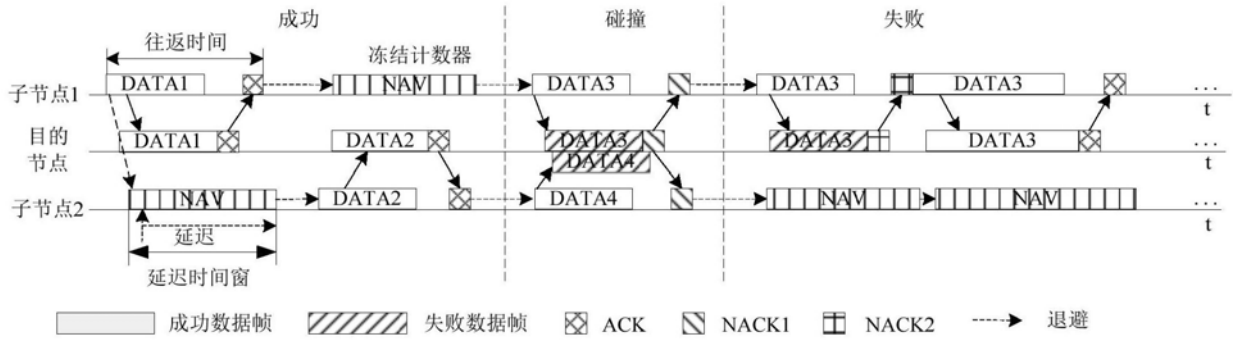


图4

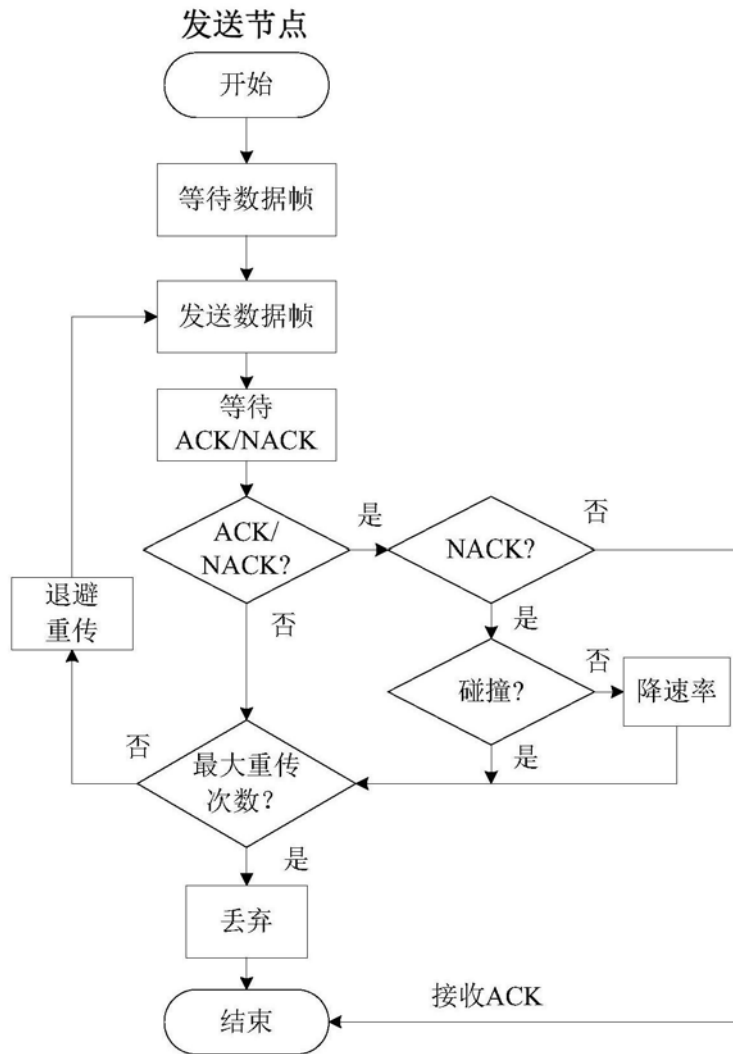


图5a

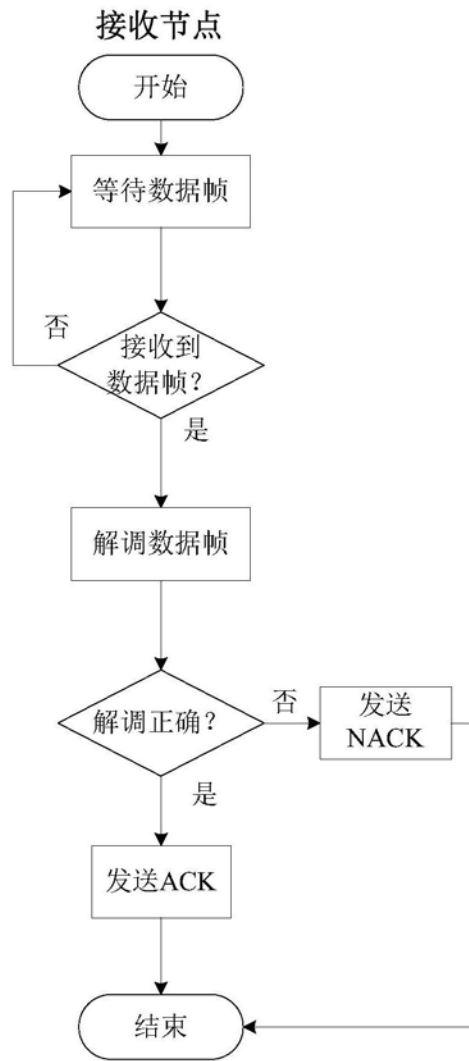


图5b