Journal of Computer Applications
计算机应用,2014,34(7):1947 - 1950,1982
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2014-07-10
http://www.joca.cn

文章编号:1001-9081(2014)07-1947-04
doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.07.1947

基于可变长时隙机制的水下传感器网络 MAC 协议

田志辉[1],金志刚[1*],王　颖[1,2]
(1.天津大学 电子信息工程学院,天津 300072;　2.61660 部队,北京 100089)
(*通信作者电子邮箱 zgjin@tju.edu.cn)

摘　要:通过研究水声通信的特点,分析水下物体的运动特性,提出了一种基于可变长时隙机制的水下传感器网络 MAC 协议。新协议中,传感器节点会周期性获取邻居节点的位置信息,并根据节点间相互距离的变化自适应地调整信道预约时隙长度,当节点由于运动引起网络区域收缩,节点之间距离变小时,预约时隙长度变小,反之,时隙长度增大。可变长时隙机制,提高了信道时隙资源的利用率。仿真结果表明,动态环境下新协议相对现有的协议在有效网络吞吐量性能上提升 15% 左右。

关键词:介质访问控制协议;水下无线传感器网络;时隙;运动预测;有效网络吞吐量
中图分类号: TP393　　**文献标志码**:A

Variable-length slot based MAC for underwater wireless sensor networks

TIAN Zhihui[1], JIN Zhigang[1*], WANG Ying[1,2]
(1. *School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*;
2. *Unit* 61660, *Beijing* 100089, *China*)

Abstract: A motion model of underwater sensor node was analyzed, and a new Medium Access Control (MAC) protocol of underwater mobile sensor networks based on variable-length slots: VS FAMA was proposed. In VS FAMA, the length of time-slot would be adaptive adjusted according to sensor location that measured periodically, which was positively correlated to the distance between nodes. New protocol made better use of the time-slot resource in underwater sensor networks. NS-2 simulation results show that VS FAMA can get about 15% higher network goodput under the circumstance of motion.

Key words: Medium Access Control (MAC) protocol; Underwater Wireless Sensor Network (UWSN); time-slot; motion prediction; goodput

0　引言

水下传感器网络(Underwater Wireless Sensor Network, UWSN)已经成为现有的一种理想的探索和观察海洋的工具,在以下方面都有很大的应用:海洋学数据收集、污染监测、水底探索、灾难避免、救助导航、军事战略观察应用、矿产资源勘探、地震监测、海底输油管道泄漏监测、水下建筑物的辅助,以及生态监测等[1-3]。但是,海洋环境的特性给传感器网络的构建带来了很多困难,比如:功耗问题、长且可变的传输时延、有限的可用带宽、高误比特率等,同时,由于受到洋流及海浪的作用,整个 UWSN 网络始终处于运动状态[4],因此,现有的较完善的应用于陆地无线网络的介质访问控制(Medium Access Control,MAC)协议都不适用于水下网络,必须针对 UWSN 的通信需求设计新的协议。

水下 MAC 协议的主要目的就是为了解决数据包冲突问题,同时需要考虑能量效率、低信道接入延迟和节点间公平性[5]。当前,适合 UWSN 的许多新的 MAC 协议已经提出,总体来说可以分为两类:无竞争协议和基于竞争的协议[6-7]。无竞争协议如频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)等协议分别受限于带宽和编码问题,未能成为水下网络 MAC 协议的主流。基于竞争的协议分为随机多址协议和基于信道预约类协议,前者协议结构简单,实现方便,但数据包冲突概率随着节点业务量的增加呈指数增长,不适用于突发数据场景;后者基于信道预约类协议,如 R-MAC[8] 协议,冲突避免机制复杂,网络延迟大,水下网络的动态特点引起的节点位置不确定性影响其预约的精确度,使得 R-MAC 在长传输时延的网络中吞吐量性能表现欠佳;又如 Slotted FAMA[9] 协议,分时隙预约发送机制,以最大传输距离作为划分时隙的依据,很好地解决了节点通信隐藏终端[10]等问题,但是最大的时隙长度将导致大量的空闲信道资源,因此 Slotted FAMA 协议的信道利用率低,网络吞吐量相对较低,同时也没考虑节点位置动态变化的情况。

本文主要考虑水下传感器网络节点运动对 MAC 协议设计的影响,通过对水下物体运动特性的研究设计节点运动预测算法,将获取的节点位置信息用于 MAC 协议的设计,提出了一种基于可变长时隙机制的水下传感器网络 MAC 协议,保留了现有基于预约类协议的避免冲突的优点,新协议应用运动预测,以节点间的位置信息作为时隙长度的依据,自适应地调整时隙长度,改善网络通信性能。实验仿真表明,新协议能

收稿日期:2014-01-15;**修回日期**:2014-02-28。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61162003);青海省科技计划项目(2012-ZR-2989);海南省应用技术研究与开发专项(ZDXM2014086)。
作者简介:田志辉(1990 -),男,湖南永州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络;　金志刚(1972 -),男,上海人,教授、博士生导师,主要研究方向:无线网络、网络安全;　王颖(1977 -),女,河北张家口人,博士,主要研究方向:网络安全。

提高网络的通信效率,比现有的 Slotted FAMA 协议在吞吐量性能上提高了 15% 左右。

1 水下物体的运动模型和预测算法

水下环境的多变复杂给网络节点位置信息的获取和通信协议的设计带来了很大的挑战。水下自然环境的流动性使得水中物体一直处于动态条件下,因此要想设计出符合水下动态网络的通信协议,就不可避免地需要首先对水下环境及水下物体的运动模型进行分析。

1.1 浮体运动理论

水下节点的运动主要受海浪的影响,海浪可以看成是重力波,水质点的运动具有往返震荡运动规律。采用线性波理论对重力波进行分析,忽略边界条件下的非线性因素,将海浪运动[11]简化为规则行进波,其特征参数:

$$\eta = \frac{h}{2}\cos(kx - \omega t) \tag{1}$$

其中:水波高 h,波数 $k = 2\pi/\lambda$,波长 $\lambda = gT/2\pi$,周期 T,波频率 $\omega = 2\pi/T$。

为了简化分析,设定海浪的行进方向为 x 轴方向,且真实环境情况更接近于 N 个速度矢量的叠加,那么根据水质点的运动速度矢量求解方式,经过大量简化,得到海浪运动的速度矢量表达式:

$$\boldsymbol{V} = \left(\sum_{i=1}^{N} a_i \cos(k_i x - \omega t) \quad 0 \quad \sum_{i=1}^{M} b_i \sin(k_i z - \omega t) \right)^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

可以看出,真实环境下的复杂波浪运动可以看成是由 $N(M)$ 个简单规则波合成的。

水中物体的运动是由于受波浪运动引起的,由式(2)波浪方程可以看出,水质点的运动并不是随机运动,而是有周期的,同理,水中物体的运动也是周期性的,根据式(2)可以得出水下物体的运动速度矢量表达式为:

$$\boldsymbol{V}_M = \left(\sum_{i=1}^{N} c_i \cos(k_i x - \omega t) \quad 0 \quad \sum_{i=1}^{M} d_i \sin(k_i z - \omega t) \right)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

同样,也可以看出水下物体的运动方程是由 $N(M)$ 个正弦波叠加而成的。在真实的场景中,水下传感器节点是系于水面浮标下,其在垂直方向(z 轴)上的位置变动的影响可以忽略不计,因此,对式(3)进一步简化,可得水下传感器节点的运动方程,如式(4),其中 a、b、c、d、ω_a、ω_b、ω_c、ω_d 等环境参数值均与具体场景相关。

$$\boldsymbol{V}_M = \begin{pmatrix} a \cdot \cos(\omega_a t) + b \cdot \cos(\omega_b t) + c \cdot \cos(\omega_c t) + d \cdot \cos(\omega_d t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

1.2 线性预测算法

由上面所述运动方程可以看出,水下传感器节点的运动具有半周期性特点,也就是说节点的位置是可以预测的。通过分析节点的运动模型,考虑使用自回归(Auto Regressive, AR)模型预测,通过节点当前速度和过去运动速度对节点未来的运动速度进行预测。首先将时间划分为多个预测单元,长度可以设为 T,而水下物体的运动具有半周期性规律,这里假设在相邻的预测单元中,物体的运动方式基本保持不变,即 AR 模型的系数不变,可以得到:

$$\boldsymbol{V}(n) = \sum_{i=1}^{m} a_i \boldsymbol{V}(n - i) \tag{5}$$

$$d_t = \int_{t_0}^{t_0+T} V(t)\,\mathrm{d}t + d_0 \tag{6}$$

其中:$\boldsymbol{V}(n)$ 是第 n 个预测单元的速度矢量,a_i 是预测系数,可以由 Levison-Durbin 递推算法求得。由式(5)可以看出节点当前速度是其前 m 个速度的线性组合,这也是称之为线性预测算法的原因。从而,在速度已知的前提下,对其积分可求得节点间的距离关系,如式(6)所示。

2 基于可变长时隙机制的 MAC 协议

可变长时隙实时捕获多址接入(Variable-length Slots based Floor Acquisition Multiple Access, VS FAMA)协议采取基于信道预约的机制进行节点通信,主要是在避免冲突的前提下,利用同一区域内节点位置信息,周期性改变预约机制的时隙长度,减少节点的不可靠接入,提高网络性能。同时,应用节点运动预测与定位相结合的方式,保证了节点位置的精确性,并且减小节点频繁定位所需能耗。VS FAMA 的实现可以分为三个阶段:广播测距阶段、周期预测更新时隙阶段和预约发送阶段。

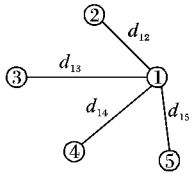

图 1 节点间的距离

2.1 广播测距阶段

协议执行的第一步就是获取区域内节点的位置信息。由于 VS FAMA 协议是基于节点间的时间同步而设计的,所以,节点间的相互距离可以使用到达时间[12](Time Of Arrival, TOA,即在时间同步的基础上,根据信号的传播时间和已知的传播速度来计算节点间的距离)方法测得。如图 1 所示,节点 1 可计算出与其他节点之间的距离,得到距离向量 $\boldsymbol{D}_1 = (0, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{15})$,并广播出去,这样每个节点都记录了所有节点的距离值,得到距离矩阵:

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & d_{24} & d_{25} \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} & d_{35} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 & d_{45} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

其中 d_{ij} 是节点 i 测得的与节点 j 之间的距离值,距离矩阵 $\boldsymbol{D}$ 将用于决定协议执行的时隙长度。

2.2 周期预测更新时隙阶段

由于自然环境的影响,水下节点的位置一直处于变动状态,因此节点之间的距离值需要周期性的更新,若测距周期短,则会造成大量的通信消耗以及带宽负担。充分利用运动

预测,可以减少因获取位置信息而引起的通信消耗,同时获得高的测距精度。

节点在得知距离矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的基础上,就可以通过式(8) 计算得到时隙长度 T_{slot},时隙长度由最大传输距离、清除发送报文(Clear To Send, CTS)的发送时间和保护间隔决定:

$$T_{slot} = f(predict(\boldsymbol{D}), \max(d_{ij})) + t_{cts} + t_d \tag{8}$$

其中:t_{cts} 为 CTS 包的发送时间,t_d 为保护时间,d_{ij} 是矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中的距离值。函数 $f(\cdot)$ 包含三个过程,首先应用式(5)和式(6)周期性地预测节点间距离的变动,然后求取矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中的最大值,再结合已知的信号传播速度求得区域内最大传输时延。

计算所得 T_{slot} 值则是协议预约发送阶段的时隙长度。此外,为了避免预测误差的累积,节点在一段时间(远大于预测周期)后将再次进行定位,以得到节点间的精确距离。

2.3　预约发送阶段

VS FAMA 协议采用分时隙发送数据,进行冲突避免,解决隐藏终端问题。协议使用 RTS、CTS、DATA、ACK 四类报文进行通信,所有数据包的发送都必须在时隙的起始时刻,时隙长度为预测阶段获取的 T_{slot} 值,时隙长度保证了 RTS/CTS 包可以被区域内的所有节点收到,并对其进行周期性的更新,预约发送过程如图 2 所示。

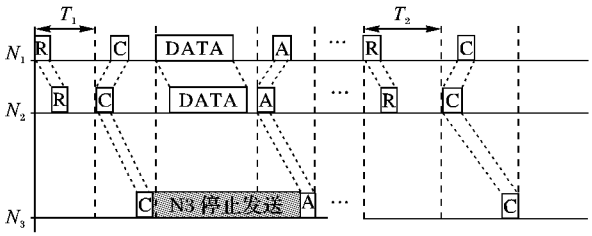

图 2　协议的执行过程

其中 R、C、A 分别代表 RTS、CTS、ACK 报文,T_1 表示时隙长度,从图 2 中可以看出,经过一段时间后,节点的运动性引起了节点 N_3 与 N_1 之间的距离变大,时隙长度相应更新为 T_2。

1)请求发送报文(Request To Send,RTS)。

当一个节点有数据需要发送时,首先需要通过发送 RTS 包进行预约,包格式如图 3 所示,其中 Data packet length 表示节点所需发送数据的报文长度。节点在发送 RTS 包之前,先监听信道,若信道繁忙或判定发生冲突时,则主动进行退避,退避时间为随机个时隙长度。

Packet type	Packet length	Sender ID	Receiver ID	Data packet length

图 3　RTS 包格式

2)清除发送报文(Clear To Send,CTS)。

当节点接收到其他节点的请求报文 RTS 时,则会在下一个时隙的起始时刻发送 CTS 包,告知所有邻居节点,自身已经准备好接受来自发送节点的数据包,其他节点自行退避相应个时隙长度的时间。包格式如图 4 所示,其中 Data slot 表示数据包传输所需占用的时隙个数。

Packet type	Packet length	Sender ID	Receiver ID	Data slot

图 4　CTS 包格式

3)数据报文(DATA)。

源节点接收到目的节点的 CTS 包,表示自身预约信道成功,并在下一时隙起始时刻发送 DATA;节点采用突发传输机制,即发送节点在预约获得信道后,将缓存中的所有数据一次性发送出去。

4)确认报文(Acknowledge packet,ACK)。

目的节点接收完数据包后,会在下一时隙起始时刻发送成功接收确认报文 ACK。

3　实验与仿真

3.1　网络场景及仿真环境

本文研究的水下传感器网络布局为分区域结构,如图 5 所示,相同区域内节点互为邻居节点,文中主要考虑的是区域内部节点间的相互通信。

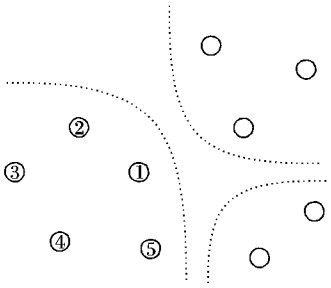

图 5　分区域网络结构

水下物体的运动模型设置,结合第 1 章中对节点运动模型的分析,仿真实验节点的运动模型如式(9),节点的运动由四个规则正弦波组成,周期分别可设为 60 s、30 s、20 s、10 s。参数 A、B、C、D 表示节点运动可达到的最大速度,参照文献[11],根据近海环境中的实测速度,最大速度不超过 2 m/s。

$$\boldsymbol{V}_{MODEM} = \begin{pmatrix} A\cos(\omega_a t) + B\cos(\omega_b t) + C\cos(\omega_c t) + D\cos(\omega_d t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{9}$$

VS FAMA 协议仿真实验在 Aqua-Sim[13] 水声网络仿真平台进行,针对点对点通信和多点网络两种拓扑结构分别进行了实验,对比协议为水下传感器网络已广泛应用的基于时隙划分机制的 Slotted FAMA 协议,将有效网络吞吐量(Goodput,单位:b/s)作为衡量协议性能的重要指标,计算方法如式(10)所示:

$$\text{有效吞吐量(Goodput)} = \frac{\text{正确接收的 DATA 数据包长度之和}}{\text{仿真时间}} \tag{10}$$

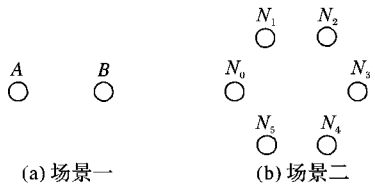

图 6　网络拓扑图

3.2　点对点通信

点对点通信,仿真时间为 10 000 s,比较了两种协议在不同发包率条件下的吞吐量表现,结果如图 7 所示。

业务量,亦即数据率,从图 7 中可以看出,在业务量较低的初始阶段,两种协议的吞吐量性能差异不大,是因为在业务量较低时,数据流量小,对于两个协议来说,网络吞吐量都没有达到饱和,VS FAMA 协议的基于节点位置而周期性改变时

隙长度的优点并不突出。但随着业务量的增大,VS FAMA 协议能通过自适应调整时隙长度发送更多的数据包,VS FAMA 协议的吞吐量性能表现逐渐优于 Slotted FAMA 协议,前者的吞吐量性能相对后者提高了 20% 左右。随着业务量的继续增长,吞吐量变化越来越小,由于是点对点通信的理想环境,两种协议最终都能达到各自吞吐量性能的理论上限值。

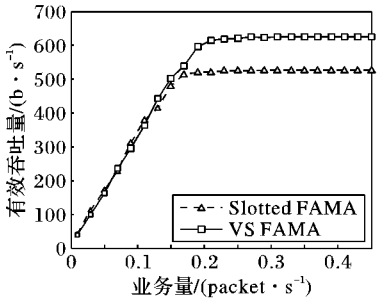

图 7 点对点通信两种协议的吞吐量对比

3.3 多节点网络

如图 6 所示场景二,网络中多节点相互通信,节点之间随机收发信息,仿真时间也为 10 000 s,两种协议的吞吐量性能对比如图 8 所示。

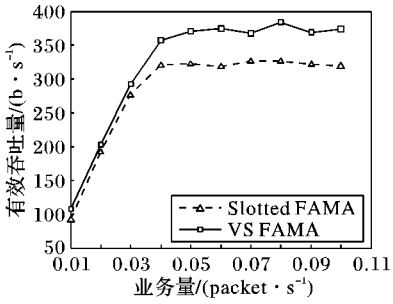

图 8 多节点网络两种协议的吞吐量对比

从图 8 中可以看出:在业务量较低的初始阶段,两种协议的吞吐量性能差异不大;随着业务量的不断增大,VS FAMA 协议吞吐量逐渐高于 Slotted FAMA 协议;最终两种协议的吞吐量将一定值左右波动,不会再出现较大变化,前者的网络吞吐量相对后者提高了 15% 左右。

对比图 7,可以发现,图 8 中两种协议的吞吐量性能随着业务量而改变的总体趋势和点对点通信差不多,但多节点网络的吞吐量性能明显降低,这主要是由于多节点收发网络中,节点之间数据发送的碰撞概率增大,同时,节点发送预约数据包之前和碰撞发生后都会进行随机退避;而点对点通信是一种无冲突的理想网络环境,多节点网络环境更接近于真实应用场景,因此前者的吞吐量性能表现较好。

为什么新协议的网络吞吐量性能会优于现有的协议呢?我们再来看看二者的网络平均时延(单位 s)对比,如图 9 所示,网络平均时延由式(11)给出。

$$\text{平均时延} = \frac{\text{DATA 数据正确接收与其生成时间差之和}}{\text{正确接收 DATA 数据包个数}} \tag{11}$$

从图 9 中可以看出,平均时延随着业务量的增加有不断增大的趋势,原因很简单,随着业务量的增加,发送端生成的数据包更多,越来越多的数据包都在缓存区排队等候发送,时延也会越来越大。另外,在业务量较低时,数据流量小,两种协议的平均时延相差很小,这也是数据率较低的初始阶段,两种协议的吞吐量性能差异不大的原因;随着业务量的增加,两种协议的平均时延差异逐渐明显,VS FAMA 协议数据发送的平均时延明显小于 Slotted FAMA 协议。新协议在网络吞吐量性能上较现有的协议有了改善,主要是因为新协议预约时隙长度根据节点间的距离进行自适应地调整,发送数据包的时延相对减小。

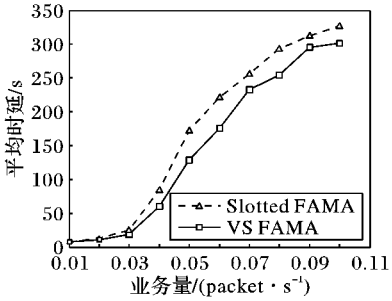

图 9 两种协议平均时延对比

VS FAMA 协议以节点之间的实际距离作为时隙长度的依据,更适用于动态网络。当节点由于运动引起网络区域收缩,区域内部节点之间距离变小时,预约时隙变短,反之,时隙相应增大,在保留了 Slotted FAMA 协议冲突避免优点的基础上,充分利用了时隙资源,提高了信道的利用率,改善了网络的吞吐量性能。

4 结语

随着人类对海洋的探索不断深入,水下传感器网络逐渐成为了一大研究热点。本文主要从水下传感器网络所处动态自然环境考虑,分析了水下物体的运动特性和运动预测算法,并在此基础上,设计了时隙长度自适应改变的 VS FAMA 协议。新协议应用运动预测算法与定位相结合的方式获取节点位置信息,保证了节点位置的精确性,并且保留了水下传感器网络基于预约类协议的优点。仿真结果表明,新协议在动态自然环境中比现有的 MAC 协议有更好的网络吞吐量性能。

本文研究的水下节点的运动模型主要考虑了自然环境的影响,随着海洋应用的不断扩展,水下自主航行器、水下机器人等的应用将越来越广泛,自主运动的加入将使得水下节点的运动模型更加复杂;另外,本文中协议的设计中只考虑网络区域内部的节点通信,需要进一步考虑大型网络中区域间的通信。

参考文献:

[1] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370(1958): 158 - 175.

[2] PARTAN J, KUROSE J, LEVINE B N. A survey of practical issues in underwater networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2007, 11(4): 23 - 33.

[3] CUI J H, KONG J, GERLA M, *et al.* The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications[J]. IEEE Network, 2006, 20(3): 12 - 18.

[4] YANG Z, CAI S, YAO N, *et al.* The node movement models based on Lagrange motion for 3-D underwater acoustic sensor network[M]. Heidelberg: Springer, 2012: 685 - 693. (下转第 1982 页)

时,系统的性能增益将提高近 2 dB 左右。进一步地,在实际多载频调制系统设计中即可以根据不同的应用场景选择合适的原型滤波器以提高系统的适用性。

4 结语

本文提出了一种时域改进方法设计 DFT 调制滤波器组,并将其应用于多载频调制系统中。该方法放弃了传统设计方法中选择综合原型滤波器为分析原型滤波器的时域反转形式,而采用滤波器组的时域完全重建条件矩阵方程求解综合滤波器组。与传统设计方法相比,该设计方法可以根据需要选用不同的原型滤波器,提高了原型滤波器的设计自由度。可以根据实际的应用需求,选择满足设计指标要求的原型滤波器,提高了适用性。仿真结果表明利用本文方法设计的 DFT 调制滤波器组多载频调制系统比传统的 DFT 调制滤波器组多载频调制系统有更小的重建误差和更佳的 SER 性能。

参考文献:

[1] YIN C, LUO T, YUE G. Multi-carrier broadband wireless communications technology[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004(尹长川,罗涛,乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004.)

[2] HUA H. Research of key technologies in generalized multi-carrier mobile communication system[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (滑瀚. 广义多载波移动通信系统中若干关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2006.)

[3] TAO R, ZHANG H, WANG Y. Multirate digital signal processing theory and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 78 – 80. (陶然,张惠云,王越. 多抽样率数字信号处理理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007: 78 – 80.)

[4] HU G. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 219 – 222. (胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004: 219 – 222.)

[5] ZHANG Z J, YANG Y. Efficient iterative design of modified DFT filter banks[J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 846 – 847.

[6] JIANG J, ZHOU F, SHUI P. Design of DFT modulated filter banks via linearizing iterative approach[J]. Journal of Circuits and Systems, 2012, 17(1): 71 – 74. (蒋俊正,周芳,水鹏朗. 基于线性迭代的 DFT 调制滤波器组的设计算法[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(1): 71 – 74.)

[7] FRANCOIS D B, BENOINT C. Design of prototype filters for perfect reconstruction DFT filter bank transceivers[J]. Signal Processing, 2009, 89(1): 87 – 98.

[8] WU C Z, TEO K L. Design of discrete Fourier transform modulated filter bank with sharp transition band[J]. IET Signal Processing, 2011, 5(4): 433 – 440.

[9] VIHOLAINEN A, IHALAINEN T, STITZ T H, *et al.* Prototype filter design for filter bank based multicarrier transmission[C]// EUSIPCO 2009: Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference. New York: Curran Associates, Inc, 2009: 1359 – 1363.

[10] RAFI S M, KUMAR A, SINGH G K. An improved particle swarm optimization method for multirate filter bank design[J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350(4): 757 – 769.

[11] NAYEBI K, BARNWELL III T P, SMITH M J T. Time-domain filter bank analysis: a new design theory[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(6): 1412 – 1429.

[12] ZHUANG L, JI X, SHAO K, *et al.* Joint use of time-domain and windowed method for design of modulated DFT filter banks[J]. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(5): 91 – 96.

[13] CAMPBELL S L, MEYER C D. Generalized inverses of linear transformations[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.

[14] WANG G Y, SHAO K, ZHUANG L, Time-varying modulation systems[J]. IET Communications, 2012, 6(18): 3075 – 3083.

[15] WANG G Y, SHAO K, ZHUANG L, Time-varying multicarrier and single-carrier modulation system[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(1): 1 – 12.

[16] FLIEGE N J. Multirate digital signal processing[M]. New York: Wiley, 1994.

(上接第 1950 页)

[5] SHAH G A. A survey on medium access control in underwater acoustic sensor networks [C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1178 – 1183.

[6] KESHTGARY M. Comparative performance evaluation of MAC layer protocols for underwater wireless sensor networks[J]. Modern Applied Science, 2012, 6(3): 65 – 72.

[7] LIN W, CHENG E, YUAN F. EHM: a novel efficient protocol based handshaking mechanism for underwater acoustic sensor networks[J]. Wireless Networks, 2013, 19(6): 1051 – 1061.

[8] XIE P, CUI J H. R-MAC: an energy-efficient MAC protocol for underwater sensor networks [C]// Proceedings of the 2007 International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications. Piscataway: IEEE, 2007: 187 – 198.

[9] MOLINS M, STOJANOVIC M. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks[C]// OCEANS 2006: Asia Pacific. Piscataway: IEEE, 2007: 1 – 7.

[10] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72 – 83.

[11] WEN S, YU Z. Ocean waves theory and calculate principle[M]. Beijing: Science Press, 1984. (文圣常,余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社, 1984.)

[12] SUN L. Wireless sensor network [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (孙利民. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.)

[13] XIE P, ZHOU Z, PENG Z, *et al.* Aqua-Sim: an NS-2 based simulator for underwater sensor networks[C]// OCEANS 2009: MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. Piscataway: IEEE, 2009: 1 – 7.