



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102664840 B

(45) 授权公告日 2015. 03. 11

(21) 申请号 201210126307. 7

(22) 申请日 2012. 04. 26

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学

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

(72) 发明人 乔钢 马璐 马雪飞 孙宗鑫

周锋 刘淞佐 王晶

(51) Int. Cl.

H04L 25/02(2006. 01)

H04L 25/03(2006. 01)

H04L 27/26(2006. 01)

审查员 刘畅

权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

基于循环前缀的水声正交频分复用多普勒估计方法

(57) 摘要

本发明提供的是一种基于循环前缀的水声正交频分复用多普勒估计方法。(1) 正交频分复用水声通信系统的帧头部分包含线性调频信号和单频信号,数据符号部分均添加循环前缀;(2) 对接收的单频信号进行 FFT 测频估计,与发送频率比较,得到多普勒频偏因子的初步估计,作为下一步基于循环前缀的多普勒估计的初值;(3) 利用每个正交频分复用符号固有的循环前缀,与其拷贝部分在不同的窗长度和窗起始位置下进行相关二维搜索,估计出每个符号的多普勒频偏因子。本发明克服了多普勒引起的同步不准及循环前缀相关性减弱的问题,实现了 OFDM 符号的细同步与多普勒因子估计。并且在循环前缀长度一定的情况下,通过对 OFDM 符号(包括循环前缀部分)进行过采样处理,提高多普勒频偏因子估计精度。

帧头 LFM 信号粗同步

▼  
CW 信号多普勒因子初步估计

▼  
基于循环前缀的多普勒因子估计

1. 一种基于循环前缀的水声正交频分复用多普勒估计方法,其特征是:

(1)、帧头单频信号多普勒频偏因子初步估计

两个移动通信平台相对运动速度为  $v$ 、水中声速为  $c$ 、多普勒频偏因子  $a = v/c$ ,对接收的单频信号进行 FFT 变换后估计出频率  $f_r$ ,再与发送的单频信号频率  $f_t$  进行比较,得到多普勒频偏因子的初始估计值  $\hat{a}_0$ ,

$$\hat{a}_0 = f_r / f_t - 1 \quad ;$$

(2)、基于循环前缀的多普勒频偏因子估计

系统采样率为  $f_s$ 、OFDM 符号采样点数为  $N$ 、信道最大多径时延为  $\tau_{\max}$ 、OFDM 符号的循环前缀采样点数为  $L_{cp}$  且  $\tau_{\max} f_s < L_{cp} < N$ ,添加循环前缀后的 OFDM 符号表示为,

$$\tilde{s}(n) = \begin{cases} s(N - L_{cp} + n), & 0 \leq n \leq L_{cp} - 1 \\ s(n - L_{cp}), & L_{cp} \leq n \leq N + L_{cp} - 1 \end{cases}$$

且满足,

$$\tilde{s}(n) = \tilde{s}(n + N), 0 \leq n \leq L_{cp} - 1$$

上述关系对于经过时变、多径扩展信道的接收信号仍然成立,即有:

$$\tilde{r}(n) = \tilde{r}(n + \left\lfloor \frac{N}{1+a} \right\rfloor), 0 \leq n \leq \left\lfloor \frac{L_{cp}}{1+a} \right\rfloor - 1$$

多普勒因子搜索步长为  $\Delta = 1/N$ ,利用帧头部分的单频信号多普勒估计结果,作为多普勒因子搜索初值  $\hat{a}_0$ ,并利用帧头部分的 LFM 信号重新同步得到窗起始位置的搜索初值  $K_0$ ,具体步骤如下:

A 初始化多普勒因子  $\hat{a}_0$ 、窗起始位置  $K_0$ ;

B 循环前缀的起始位置,

$$j = K_0 - Q, \dots, K_0 - 1, K_0, K_0 + 1, \dots, K_0 + Q$$

多普勒因子搜索值,

$$a_i \in \{\hat{a}_0 - P\Delta, \dots, \hat{a}_0 - \Delta, \hat{a}_0, \hat{a}_0 + \Delta, \dots, \hat{a}_0 + P\Delta\}, i = 1, 2, \dots, 2P + 1$$

根据多普勒因子计算出相应的窗长度,即:循环前缀及其拷贝部分的采样点数为:

$$L_{cpi} = \left\lfloor \frac{L_{cp}}{1+a_i} \right\rfloor, \text{两者间隔的采样点数为: } N_i = \left\lfloor \frac{N}{1+a_i} \right\rfloor;$$

C 计算循环前缀与其拷贝部分的相关函数值,

$$\varphi_{i,j} = \sum_{k=j}^{j+N_i} \tilde{r}^*(k) \tilde{r}(k + N_i)$$

其中 \* 表示共轭运算,将上式转化为递归形式求解,

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{i,j-1} + \tilde{r}^*(j + L_{cpi}) \tilde{r}(j + L_{cpi} + N_i) - \tilde{r}^*(j) \tilde{r}(j + N_i);$$

D 计算出所有的相关函数值  $\varphi_{i,j}$  后,求出每个多普勒因子对应的最大相关函数值,

$$V_i = \max_j(\varphi_{i,j}), i = 1, 2, \dots, 2P + 1$$

从  $\{V_i\}$  中选取最大值对应的多普勒因子即为所求，

$$p = \arg \max_i (V_i), \hat{a} = a_p$$

最佳窗起始位置为，

$$q = \arg \max_j (\varphi_{p,j})。$$

## 基于循环前缀的水声正交频分复用多普勒估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种水声移动通信方法。具体涉及一种宽带信号多普勒频偏因子估计方法。

### 背景技术

[0002] 由于水中声速较低,导致宽带水声信号不同频率的多普勒频偏相差较大,因此不能简单的对接收信号进行一致多普勒频偏补偿。此外,水声信道多径时延大、背景噪声级高,也会对多普勒估计造成影响。因此,研究一种适合于水声信道的多普勒估计算法是十分必要的。

[0003] 公开文献Byung-Chul Kim and I-Tai Lu.Parameter Study of OFDM Underwater Communications System[C]//in Proc.OCEANS 2000MTS.Providence, USA,2000 : 1251-1255 中,利用 OFDM 符号中的循环前缀与其拷贝部分的互相关特性估计多普勒因子,然而在实际应用时存在以下两个问题:一是该算法是在假设符号同步准确的前提下,截取循环前缀与其后信号进行滑动相关,但是由于受到多普勒影响,符号同步常常不准,因此不能准确的截取循环前缀信号;二是该算法仅考虑循环前缀与其拷贝部分的间隔(即 OFDM 符号采样点数)受多普勒影响的变化,未考虑循环前缀本身长度的变化,致使相关性能下降。

[0004] 与本发明相关的公开文献包括:

[0005] [1]Byung-Chul Kim and I-Tai Lu.Parameter Study of OFDM Underwater Communications System[C]//in Proc.OCEANS 2000MTS.Providence, USA,2000 : 1251-1255 ;

[0006] [2]Sean F.Mason, Christian R.Berger, Shengli Zhou and Peter Willett. Detection, Synchronization, and Doppler Scale Estimation with Multicarrier Waveforms in Underwater Acoustic Communication[J].Journal on selected areas in communications,2008,26(9) :1638-1649。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种能够实现正交频分复用(OFDM)符号的细同步与多普勒因子估计的基于循环前缀的水声正交频分复用多普勒估计方法。

[0008] 本发明的目的是这样实现的:

[0009] (1) 正交频分复用水声通信系统的帧头部分包含线性调频信号和单频信号,数据符号部分均添加循环前缀;

[0010] (2) 对接收的单频信号进行 FFT 测频估计,与发送频率比较,得到多普勒频偏因子的初步估计,作为下一步基于循环前缀的多普勒估计的初值;

[0011] (3) 利用每个正交频分复用符号固有的循环前缀,与其拷贝部分在不同的窗长度和窗起始位置下进行相关二维搜索,估计出每个符号的多普勒频偏因子。

[0012] 在循环前缀长度一定的情况下,通过对包括循环前缀部分的正交频分复用符号进

行过采样处理。当系统循环前缀长度一定的情况下,可以通过对接收的 OFDM 符号进行过采样处理来提高算法估计精度。基于循环前缀的多普勒频偏因子估计算法的估计精度与相关运算的窗长度有关,即与 OFDM 符号采样点数有关。若对接收的 OFDM 信号进行 N 倍的过采样,则多普勒因子估计精度能相应的提高 N 倍。

[0013] 本发明提出了利用每个 OFDM 符号固有的循环前缀,与其拷贝部分在不同的窗长度和窗起始位置下进行相关二维搜索的算法,克服了多普勒引起的同步不准及循环前缀相关性减弱的问题,实现了 OFDM 符号的细同步与多普勒因子估计。

[0014] 本发明的要点主要包括:

[0015] (1) 设计帧头包含线性调频 (LFM) 信号、单频 (CW) 信号, OFDM 数据符号添加循环前缀的帧结构。

[0016] (2) 利用帧头发送的单频信号对多普勒频偏因子进行初步估计。

[0017] (3) 利用循环前缀对每个 OFDM 符号进行多普勒频偏因子估计。

[0018] 本发明的主要优点是:首先利用帧头接收的单频信号得到多普勒频偏因子的初步估计,作为下一步估计的初值;然后利用每个 OFDM 符号固有的循环前缀,与其拷贝部分在不同的窗长度和窗起始位置下进行相关二维搜索的算法,克服了多普勒引起的同步不准及循环前缀相关性减弱的问题,实现了 OFDM 符号的细同步与多普勒因子估计。并且在循环前缀长度一定的情况下,通过对 OFDM 符号(包括循环前缀部分)进行过采样处理,提高多普勒频偏因子估计精度。

## 附图说明

[0019] 图 1 OFDM 水声通信系统帧结构。

[0020] 图 2 基于循环前缀的水声 OFDM 多普勒估计实现流程图。

## 具体实施方式

[0021] 下面结合附图对本发明作进一步说明。

[0022] 1、帧头单频信号多普勒频偏因子初步估计

[0023] 设两个移动通信平台相对运动速度为  $v$ , 水中声速为  $c$ , 则多普勒频偏因子  $a = v/c$ 。接收的单频信号受到多普勒影响会产生多普勒频移,对接收的单频信号进行 FFT 变换后,可以估计出频率  $f_r$ 。再与发送的单频信号频率  $f_t$  进行比较,得到多普勒频偏因子的初始估计值  $\hat{a}_0$ ,

$$[0024] \quad \hat{a}_0 = f_r / f_t - 1 \quad (1)$$

[0025] 为了防止因信道频率选择性衰落引起的接收单频信号功率损失问题,可以在时域叠加两个单频信号测频,降低估计误差。

[0026] 2、基于循环前缀的多普勒频偏因子估计方法

[0027] 设系统采样率为  $f_s$ , OFDM 符号采样点数为  $N$ , 信道最大多径时延为  $\tau_{\max}$ , OFDM 符号的循环前缀采样点数为  $L_{cp}$  ( $\tau_{\max} f_s < L_{cp} < N$ ), 则添加循环前缀后的 OFDM 符号可表示为,

$$[0028] \quad \tilde{s}(n) = \begin{cases} s(N - L_{cp} + n), & 0 \leq n \leq L_{cp} - 1 \\ s(n - L_{cp}), & L_{cp} \leq n \leq N + L_{cp} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

[0029] 且满足,

[0030]  $\tilde{s}(n) = \tilde{s}(n + N), 0 \leq n \leq L_{cp} - 1$  (3)

[0031] 上述关系对于经过时变、多径扩展信道的接收信号仍然成立<sup>[2]</sup>, 即有:

[0032]  $\tilde{r}(n) = \tilde{r}(n + \left\lfloor \frac{N}{1+a} \right\rfloor), 0 \leq n \leq \left\lfloor \frac{L_{cp}}{1+a} \right\rfloor - 1$  (4)

[0033] 上式说明: 当窗函数的起始点及长度选取适当时, 截取到的信号循环前缀及其拷贝部分仍具有良好的互相关特性。本发明提出的基于循环前缀的多普勒因子估计就是基于该原理, 在不同的窗长度和窗起始位置下进行相关二维搜索, 从而实现了 OFDM 符号的细同步与多普勒因子估计。

[0034] 显然, 该算法的估计精度与相关运算的窗长度有关, 即多普勒因子搜索步长为  $\Delta = 1/N$ 。本发明利用帧头部分的单频信号多普勒估计结果, 作为该算法的多普勒因子搜索初值  $\hat{a}_0$ 。并利用帧头部分的 LFM 信号重新同步得到窗起始位置的搜索初值  $K_0$ 。现将该算法具体步骤归纳如下:

[0035] (1) 初始化多普勒因子  $\hat{a}_0$ 、窗起始位置  $K_0$ ;

[0036] (2) 循环前缀的起始位置 (窗起始位置),

[0037]  $j = K_0 - Q, \dots, K_0 - 1, K_0, K_0 + 0, \dots, K_0 + Q$  (5) 多普勒因子搜索值,

[0038]  $a_i \in \{\hat{a}_0 - P\Delta, \dots, \hat{a}_0 - \Delta, \hat{a}_0, \hat{a}_0 + \Delta, \dots, \hat{a}_0 + P\Delta\}, i = 1, 2, \dots, 2P + 1$  (6)

[0039] 则可根据多普勒因子计算出相应的窗长度, 即: 循环前缀及其拷贝部分的采样点

数为:  $L_{cpi} = \left\lfloor \frac{L_{cp}}{1+a_i} \right\rfloor$ , 两者间隔的采样点数为:  $N_i = \left\lfloor \frac{N}{1+a_i} \right\rfloor$ ;

[0040] (3) 计算循环前缀与其拷贝部分的相关函数值,

[0041]

$$\varphi_{i,j} = \sum_{k=j}^{j+N_i} \tilde{r}^*(k) \tilde{r}(k + N_i) \quad (7)$$

[0042] 其中 \* 表示共轭运算。为了减少计算量, 可以将上式转化为递归形式求解,

[0043]

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{i,j-1} + \tilde{r}^*(j + L_{cpi}) \tilde{r}(j + L_{cpi} + N_i) - \tilde{r}^*(j) \tilde{r}(j + N_i) \quad (8)$$

[0044] (4) 计算出所有的相关函数值  $\varphi_{i,j}$  后, 求出每个多普勒因子对应的最大相关函数值,

[0045]

$$V_i = \max_j(\varphi_{i,j}), i = 1, 2, \dots, 2P + 1 \quad (9)$$

[0046] 从  $\{V_i\}$  中选取最大值对应的多普勒因子即为所求,

[0047]  $p = \arg \max_i(V_i), \hat{a} = a_p$  (10)

[0048] 最佳窗起始位置为,

[0049]

$$q = \arg \max_j(\varphi_{p,j}) \quad (11)$$

[0050] 以上即为基于循环前缀的水声 OFDM 多普勒估计方法, 实现流程图如图 2 所示。

[0051] 3、基于循环前缀的多普勒因子估计范围

[0052] 基于循环前缀的多普勒因子估计是利用帧头部分的多普勒估计结果作为多普勒因子搜索初值 $\hat{a}_0$ ,然后在 $\hat{a}_0$ 两侧一定范围内搜索。由式(6)可知,估计范围直接由搜索范围决定,即搜索步长 $\Delta$ 不变的情况下,P值越大,估计范围越大;同时计算量也随之增加,影响算法的实时性。故在实际应用时应合理选择P值大小。

#### [0053] 4、基于循环前缀的多普勒因子估计精度

[0054] 该算法通过对循环前缀及其拷贝部分进行相关运算进行多普勒因子估计,循环前缀的模糊度函数性能优劣直接影响算法估计精度。当系统带宽一定的情况下,可以通过增加循环前缀的长度来降低多普勒因子估计误差。

[0055] 当系统循环前缀长度一定的情况下,还可以通过对接收的OFDM符号进行过采样处理来提高算法估计精度。由以上分析,该算法的估计精度与相关运算的窗长度有关,即多普勒因子估计精度为 $\Delta = 1/N$ ,其中N为OFDM符号采样点数。对于水声OFDM符号,N通常为 $10^4 \sim 10^5$ 量级,则多普勒因子估计精度为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级。若对接收的OFDM信号进行8~16倍的过采样,则多普勒因子估计精度能达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级,提高系统的抗多普勒性能。

LFM	保护间隔	CW	保护间隔	循环前缀	OFDM符号	循环前缀	OFDM符号	...
-----	------	----	------	------	--------	------	--------	-----

图 1

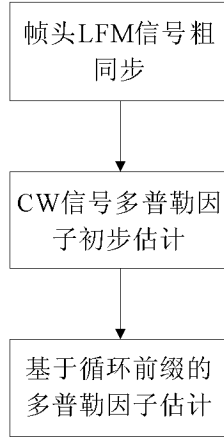


图 2