



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107623647 A

(43)申请公布日 2018.01.23

(21)申请号 201710694666.5

(22)申请日 2017.08.15

(71)申请人 西安空间无线电技术研究所  
地址 710100 陕西省西安市长安区西街150号

(72)发明人 孟向阳 董超 翟继强 李加洪 李雄飞

(74)专利代理机构 中国航天科技专利中心  
11009

代理人 陈鹏

(51)Int.Cl.

H04L 25/02(2006.01)

H04L 27/26(2006.01)

H04L 27/00(2006.01)

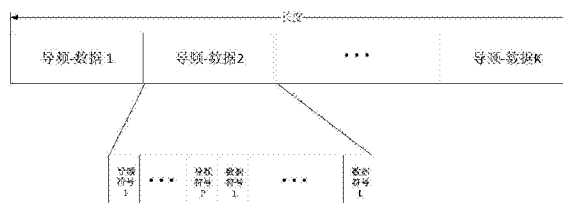
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种基于离散导频辅助的载波同步方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于离散导频辅助的载波同步方法。该方法要求输入信号具有非连续、等间隔分布的离散导频点的结构特点,方法实施步骤为:(1)从采集的数据符号中抽取导频符号;(2)根据抽取的导频符号获取载波频偏变化率,并根据所述载波频偏变化率对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏变化率补偿;(3)根据频偏变化率补偿后的导频符号获取载波频偏,并根据所述载波频偏对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏补偿;(4)将所述频偏补偿后的导频符号进行相干累加,得到载波初始相位;(5)通过载波初始相位对进行频偏补偿后的各数据符号进行相位校正,完成载波同步。



1. 一种基于离散导频辅助的载波同步方法,其特征在于,包括:

(1) 从采集的数据符号中抽取导频符号;

(2) 根据抽取的导频符号获取载波频偏变化率,并根据所述载波频偏变化率对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏变化率补偿;

(3) 根据频偏变化率补偿后的导频符号获取载波频偏,并根据所述载波频偏对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏补偿;

(4) 将所述频偏补偿后的导频符号进行相干累加,得到载波初始相位;

(5) 通过载波初始相位对进行频偏补偿后的各数据符号进行相位校正,完成载波同步。

2. 根据权利要求1所述的基于离散导频辅助的载波同步方法,其特征在于,所述数据符号的长度为N,其中, $N=K \times (P+L)$ ,K表示将长度为N的数据符号均匀化分为K段,L为每一段数据符号中包含的数据符号个数,P为每一段数据符号中导频符号的个数。

3. 根据权利要求2所述的一种基于离散导频辅助的载波同步方法,其特征在于,所述步骤(2)中获取载波频偏变化率的方法为:

将每一段数据符号中的P个导频符号进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ ;

将所述K个累加结果划分为两组,并将两组累加结果进行共轭相乘得到自相关函数序列 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_1^*, p_{\frac{K}{2}+2} p_2^*, \dots, p_K p_{\frac{K}{2}}^*}{2}$ ,其中,第一组累加结果为 $p_1 p_2, \dots, p_{\frac{K}{2}}$ ,第二组累加结果为 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_{\frac{K}{2}+2}, \dots, p_K}{2}$ ;

对所述自相关函数序列 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_1^*, p_{\frac{K}{2}+2} p_2^*, \dots, p_K p_{\frac{K}{2}}^*}{2}$ 进行FFT运算,得到所述自相关函数序列对应的FFT谱线,其中,FFT运算的采样率 $f_s = \frac{R_s}{(P+L)}$ ,其中 $R_s$ 表示数据符号速率;

从所述FFT谱线中获取峰值谱线以及与所述峰值谱线前后相邻两根谱线分别对应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,并且根据公式 $\delta = -\text{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$ 计算峰值位置的修正项 $\delta$ ,其中, $\text{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部;

根据公式 $f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$ 计算修正后的载波频偏,其中, $f_d$ 为修正后的载波频偏, $k_{\text{peak}}$ 为修正后的峰值谱线频率, $k_{\text{peak}} = k + \delta$ , $k$ 为修正前的峰值谱线频率;

根据公式 $f_d' = \frac{f_d R_s}{K}$ 计算载波频偏变化率,其中, $f_d'$ 为偏变化率。

4. 根据权利要求2或3所述的一种基于离散导频辅助的载波同步方法,其特征在于,所述步骤(3)中获取载波频偏的方法为:

将进行频偏变化率补偿后的每一段数据符号中的P个导频符号进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ ;

对累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ 进行FFT运算,得到所述自相关函数序列对应的FFT谱线;

从所述FFT谱线中获取峰值谱线以及与所述峰值谱线前后相邻两根谱线分别对应的

FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ , 并且根据公式  $\delta = -\text{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$  计算峰值位置的修正项 $\delta$ , 其中,  $\text{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部;

根据公式  $f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$  计算修正后的载波频偏, 其中,  $f_d$ 为修正后的载波频偏,  $k_{\text{peak}}$ 为修正后的峰值谱线频率,  $k_{\text{peak}} = k + \delta$ ,  $k$ 为修正前的峰值谱线频率。

5. 根据权利要求1所述的一种基于离散导频辅助的载波同步方法, 其特征在于, 所述步骤(4)中获取载波初始相位的方法为:

根据公式  $e^{j\theta_0} = \frac{S'_p}{S_{p,0}}$  进行计算, 其中,  $e^{j\theta_0}$ 为初始相位,  $S_{p,0}$ 为导频符号的初始值,  $S'_p$ 为频偏补偿后的导频符号进行相干累加后的结果。

6. 根据权利要求5所述的一种低信噪比大动态下的基于离散导频辅助的载波同步方法, 其特征在于, 所述步骤(5)中通过载波初始相位对进行频偏补偿后的各数据符号进行相位校正, 完成载波同步的方法为:

将进行频偏补偿后的各数据符号与所述初始相位 $e^{j\theta_0}$ 的倒数进行相乘运算。

## 一种基于离散导频辅助的载波同步方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及猝发通信技术领域,特别涉及一种基于离散导频辅助的载波同步方法。

### 背景技术

[0002] 在TDMA网络系统中,数据帧的长短决定了组网节点数目上限,进而决定着通信网络的容量。为保证网络具有较大容量并且兼顾数据帧的传输效率,帧长设计通常为10ms级别,并且在一些特殊应用领域如深远海通信,出于保密的需要,通信方式多选择猝发通信体制。由于数据帧持续时间较短,故在信噪比较低,多普勒动态较大场景下,传统的闭环跟踪方式受限于环路入锁时间,并不适用,因此基于导频辅助的开环跟踪方式是猝发通信的重要应用方向。

[0003] 目前,在进行导频辅助的短时数据帧同步算法时,导频符号非连续、均匀分布在整个信号帧内,基于此通信格式,首先估计出导频符号的相位值,然后利用插值的方法,插出相邻导频符号之间的所有数据符号值,然而如果导频符号相位估计错误,则数据符号的相位也都校正错误,造成载波同步误差较大的问题。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提供一种基于离散导频辅助的载波同步方法,利用导频符号进行频偏变化率估计,并对数据符号进行频偏变化率剥离,然后对频偏变化率剥离后的数据符号进行载波频偏估计,并对数据符号进行载波频偏剥离,最后进行初始相位校正,完成载波同步。可以解决现有载波同步误差较大,无法适用于大频率动态应用场景下的载波同步。

[0005] 本发明的上述目的是通过如下技术方案予以实现:

[0006] 一种基于离散导频辅助的载波同步方法,包括:

[0007] (1) 从采集的数据符号中抽取导频符号;

[0008] (2) 根据抽取的导频符号获取载波频偏变化率,并根据所述载波频偏变化率对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏变化率补偿;

[0009] (3) 根据频偏变化率补偿后的导频符号获取载波频偏,并根据所述载波频偏对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏补偿;

[0010] (4) 将所述频偏补偿后的导频符号进行相干累加,得到载波初始相位;

[0011] (5) 通过载波初始相位对进行频偏补偿后的各数据符号进行相位校正,完成载波同步。

[0012] 进一步地,所述数据符号的长度为 $N$ ,其中, $N=K \times (P+L)$ , $K$ 表示将长度为 $N$ 的数据符号均匀化分为 $K$ 段, $L$ 为每一段数据符号中包含的数据符号个数, $P$ 为每一段数据符号中导频符号的个数。

[0013] 进一步地,所述步骤(2)中获取载波频偏变化率的方法为:

[0014] 将每一段数据符号中的P个导频符号进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ ;

[0015] 将所述K个累加结果划分为两组,并将两组累加结果进行共轭相乘得到自相关函数数序列 $P_{\frac{K}{2}+1}P_1^*, P_{\frac{K}{2}+2}P_2^*, \dots, P_K P_{\frac{K}{2}}^*$ ,其中,第一组累加结果为 $P_1 P_2^*, \dots, P_{\frac{K}{2}} P_{\frac{K}{2}}^*$ ,第二组累加结果为 $P_{\frac{K}{2}+1} P_{\frac{K}{2}+2}^*, \dots, P_K P_K^*$ ;

[0016] 对所述自相关函数数序列 $P_{\frac{K}{2}+1}P_1^*, P_{\frac{K}{2}+2}P_2^*, \dots, P_K P_{\frac{K}{2}}^*$ 进行FFT运算,得到所述自相关函数数序列对应的FFT谱线,其中,FFT运算的采样率 $f_s = \frac{R_s}{(P+L)}$ ,其中 $R_s$ 表示数据符号速率;

[0017] 从所述FFT谱线中获取峰值谱线以及与所述峰值谱线前后相邻两根谱线分别对应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,并且根据公式 $\delta = -\text{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$ 计算峰值位置的修正项 $\delta$ ,其中, $\text{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部;

[0018] 根据公式 $f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$ 计算修正后的载波频偏,其中, $f_d$ 为修正后的载波频偏, $k_{\text{peak}}$ 为修正后的峰值谱线频率, $k_{\text{peak}} = k + \delta$ , $k$ 为修正前的峰值谱线频率;

[0019] 根据公式 $f_d' = \frac{f_d R_s}{K}$ 计算载波频偏变化率,其中, $f_d'$ 为偏变化率。

[0020] 进一步地,所述步骤(3)中获取载波频偏的方法为:

[0021] 将进行频偏变化率补偿后的每一段数据符号中的P个导频符号进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ ;

[0022] 对累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ 进行FFT运算,得到所述自相关函数数序列对应的FFT谱线;

[0023] 从所述FFT谱线中获取峰值谱线以及与所述峰值谱线前后相邻两根谱线分别对应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,并且根据公式 $\delta = -\text{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$ 计算峰值位置的修正项 $\delta$ ,其中, $\text{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部;

[0024] 根据公式 $f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$ 计算修正后的载波频偏,其中, $f_d$ 为修正后的载波频偏, $k_{\text{peak}}$ 为修正后的峰值谱线频率, $k_{\text{peak}} = k + \delta$ , $k$ 为修正前的峰值谱线频率。

[0025] 进一步地,所述步骤(4)中获取载波初始相位的方法为:

[0026] 根据公式 $e^{j\theta_0} = \frac{S'_{p,0}}{S_{p,0}}$ 进行计算,其中, $e^{j\theta_0}$ 为初始相位, $S_{p,0}$ 为导频符号的初始值, $S'_{p,0}$ 为频偏补偿后的导频符号进行相干累加后的结果。

[0027] 进一步地,所述步骤(5)中通过载波初始相位对进行频偏补偿后的各数据符号进行相位校正,完成载波同步的方法为:

[0028] 将进行频偏补偿后的各数据符号与所述初始相位 $e^{j\theta_0}$ 的倒数进行相乘运算。

[0029] 本发明与现有技术相比具有如下有益效果:

[0030] (1) 本发明提供的基于离散导频辅助的载波同步方法,在估计多普勒频率变化率和多普勒频偏时,均采用Jacobsen估计算法而非传统的FFT估计算法,即获取到FFT谱线后,对峰值谱线频率进行修正,并采用修正后的峰值谱线频率获取载波频偏变化率和载波频偏,从而可以保证该同步方法在低信噪比条件下,通过极小的FFT运算规模获得比传统FFT运算方案更高的估计精度,从而获得更理想的载波同步效果。

[0031] (2) 本发明在频偏变化率估计、频偏估计以及最终的载波初始相位校正上,均采用相干处理方式,利用多个导频符号的相干累加提升判决信噪比,降低了错误判决概率,从而保证本发明提供的方法可以工作于低信噪比条件下。

[0032] (3) 本发明提供的基于离散导频辅助的载波同步方法,首先利用导频符号进行多普勒频偏变化率估计,在多普勒频偏变化率补偿之后,再进行多普勒频偏估计。从而可以保证本发明提供的方法可以应用在更大的多普勒动态条件下,进而可以适用于大频率动态应用场景下的载波同步。

## 附图说明

[0033] 图1为本发明的离散导频辅助的信号格式;

[0034] 图2为本发明的信号处理流程图。

## 具体实施方式

[0035] 下面结合附图2本发明的实现过程进行进一步详细阐述:

[0036] (1) 从采集的数据符号中抽取导频符号。

[0037] 对于本发明,要求输入的数据符号具有非连续、等间隔导频符号分布的特点,即每隔L个数据符号,有P个导频符号,信号结构可以如图1所示。则采集的数据符号符号长度 $N=K \times (P+L)$ ,其中K表示将长度为N的数据符号均匀化分为K段,K的取值应满足累计导频符号

信噪比的要求,通常需要满足 $\left[ \frac{E_p}{N_0} \right]_{dB} + 10 \times \log_{10}(KP) \geq 12dB$ ,其中, $\left[ \frac{E_p}{N_0} \right]_{dB}$ 表示用dB表示的

单个导频符号信噪比。并且预置输入信号已经完成粗同步,残余的多普勒频偏在导频图案频率估计的范围内。

[0038] (2) 根据抽取的导频符号获取载波频偏变化率,并根据所述载波频偏变化率对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏变化率补偿。

[0039] 本发明中的频偏变化率估计方法采用延迟自相关FFT算法,算法原理描述如下:

[0040] 设基带接收信号为:

$$[0041] \quad s(t) = e^{j2\pi(f_d t + \frac{1}{2} f'_d t^2)}$$

[0042] 其中, $f_d$ 为载波频偏, $f'_d$ 为载波频偏变化率,则信号自相关函数为:

$$[0043] \quad \begin{aligned} R(\tau) &= s(t+\tau)s^*(t) \\ &= e^{j2\pi(f_d t + \frac{1}{2} f'_d (t+\tau)^2)} e^{-j2\pi(f_d t + \frac{1}{2} f'_d t^2)} \\ &= e^{j2\pi(f_d \tau + \frac{1}{2} f'_d \tau^2)} \end{aligned}$$

[0044] 其中,  $(\cdot)^*$ 表示 $(\cdot)$ 共轭函数。由此可见自相关函数实际上为频率为 $f'_d\tau$ 的单载波信号,因此频偏变化率估计的问题实际为频偏估计的问题。

[0045] 本发明的频偏估计算法采用Jacobsen估计算法,具体为:

[0046] a、将每一段数据符号中的P个导频符号进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ 。

[0047] b、将所述K个累加结果划分为两组,并将两组累加结果进行共轭相乘得到自相关函数序列 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_1^*}{2}, \frac{p_{\frac{K}{2}+2} p_2^*}{2}, \dots, \frac{p_K p_{\frac{K}{2}}^*}{2}$ ,其中,第一组累加结果为 $\frac{p_1 p_2}{2}, \dots, \frac{p_{\frac{K}{2}}}{2}$ ,第二组累加结果为 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1}}{2}, \frac{p_{\frac{K}{2}+2}}{2}, \dots, p_K$ 。

[0048] c、对所述自相关函数序列 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_1^*}{2}, \frac{p_{\frac{K}{2}+2} p_2^*}{2}, \dots, \frac{p_K p_{\frac{K}{2}}^*}{2}$ 进行FFT运算,得到所述自相关函数序列对应的FFT谱线。

[0049] 其中,FFT在工程实现中可采用FPGA自带的IP核,进行FFT运算的点的个数为2的整数幂,如果 $\frac{K}{2}$ 不满足2的整数幂,可以通过补0的方式进行序列延长。此时,FFT运算的采样率

$f_s = \frac{R_s}{(P+L)}$ ,其中 $R_s$ 表示数据符号速率。

[0050] d、从所述FFT谱线中获取峰值谱线以及与所述峰值谱线前后相邻两根谱线分别对应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,并且根据公式 $\delta = -\text{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$ 计算峰值位置的修正项 $\delta$ ,其中, $\text{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部。

[0051] e、根据公式 $f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$ 计算修正后的载波频偏,其中, $f_d$ 为修正后的载波频偏, $k_{\text{peak}}$ 为修正后的峰值谱线频率, $k_{\text{peak}} = k + \delta$ , $k$ 为修正前的峰值谱线频率。

[0052] f、根据公式 $f'_d = \frac{f_d R_s}{K}$ 计算载波频偏变化率,其中, $f'_d$ 为偏变化率。

[0053] 对于本发明,此处进行频偏变化率估计,是为了解决大多普勒频偏变化率条件下,频偏无法直接估计的问题,同时,此处采用Jacobsen估计算法进行频率估计,进而计算出频偏变化率,是因为Jacobsen估计算法较传统的FFT算法相比,具有更小的FFT规模,并且在相同信噪比条件下,获得更高的估计精度。

[0054] (3) 根据频偏变化率补偿后的导频符号获取载波频偏,并根据所述载波频偏对包含有所述导频符号的数据符号进行频偏补偿。

[0055] 本发明中载波频偏算法采用Jacobsen估计算法,具体步骤为:

[0056] a、将进行频偏变化率补偿后的每一段数据符号中的P个导频符号进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ 。

[0057] b、对累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K$ 进行FFT运算,得到所述自相关函数序列对应的FFT谱线。

[0058] c、从所述FFT谱线中获取峰值谱线以及与所述峰值谱线前后相邻两根谱线分别对

应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,并且根据公式 $\delta = -\text{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$ 计算峰值位置的修正项 $\delta$ ,其中, $\text{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部。

[0059] d、根据公式 $f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$ 计算修正后的载波频偏,其中, $f_d$ 为修正后的载波频偏, $k_{\text{peak}}$ 为修正后的峰值谱线频率, $k_{\text{peak}} = k + \delta$ , $k$ 为修正前的峰值谱线频率。

[0060] (4) 将所述频偏补偿后的导频符号进行相干累加,得到载波初始相位。

[0061] 具体地,根据公式 $e^{j\theta_0} = \frac{S'_p}{S_{p,0}}$ 进行计算,其中, $e^{j\theta_0}$ 为初始相位, $S_{p,0}$ 为导频符号的初始值,通常 $S_{p,0} = 1 + j$ , $S'_p$ 为频偏补偿后的导频符号进行相干累加后的结果。其中, $S'_p = \sum_{j=1}^{PK} S'_{p,j}$ , $S'_{p,j}$ 第 $j$ 个导频符号, $PK$ 为存储的 $N$ 个接收信号中,导频符号的总个数。

[0062] (5) 通过载波初始相位对进行频偏补偿后的各数据符号进行相位校正,完成载波同步。

[0063] 具体地,将进行频偏补偿后的各数据符号与所述初始相位 $e^{j\theta_0}$ 的倒数进行相乘运算。然后进行后面的解调译码等操作。

[0064] 实施例

[0065] 假设接收信号具有图1所示结构,其中导频符号初始值为 $s_0 = 1 + j$ ,业务数据符号采用QPSK调制方式,则接收信号可用下式描述:

$$[0066] \quad s'(n) = s_n e^{j2\pi(f_d n T_s + \frac{1}{2} f'_d (n T_s)^2)} \quad (\text{式1})$$

[0067] 其中, $f_d$ 为捕获之后残余的多普勒频偏, $f'_d$ 为多普勒频偏变化率, $T_s$ 为符号周期, $s_n = I_n + jQ_n$ 为发送的第 $n$ 个数据符号, $n = 1, 2, \dots, N$ 。特别地,对于导频符号, $s_n = 1 + j$ 。

[0068] 按照步骤(1)提取数据符号中的所有导频符号,得到序列集合 $\{s'_{1,1}, s'_{2,1}, \dots, s'_{P,1}, s'_{1,2}, s'_{2,2}, \dots, s'_{P,K}\}$ 。

[0069] 按照步骤(2)利用抽取的导频符号,通过Jacobsen估计算法计算出载波频偏变化率:

[0070] a、将抽取出来的导频符号按照 $P$ 个为一组进行相干累加,得到 $K$ 个累加结果 $p_1,$

$p_2, \dots, p_K$ ,其中 $p_m = \sum_{i=1}^P s'_{i,m}$ , $m = 1, 2, \dots, K$ 。一般情况下,残余多普勒在连续 $P$ 个导频符号内累计

相位忽略不计,则 $p_m = e^{j2\pi(f_d m T'_s + \frac{1}{2} f'_d (m T'_s)^2)}$ ,其中, $T'_s = (P+L) T_s$ 表示导频累加后样点序列 $p_1,$

$p_2, \dots, p_K$ 的周期。为方便讨论,省略 $T'_s$ ,于是 $p_m = e^{j2\pi(f_d m^2 + \frac{1}{2} f'_d m^2)}$ , $m = 1, 2, \dots, K$ 。

[0071] b、将 $K$ 个样点划分为两组,第一组为 $p_1, p_2, \dots, p_{\frac{K}{2}}$ ,第二组为: $p_{\frac{K}{2}+1}, p_{\frac{K}{2}+2}, \dots, p_K$ ,对应共轭相乘,得到自相关函数序列 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_1^*}{2}, \frac{p_{\frac{K}{2}+2} p_2^*}{2}, \dots, \frac{p_K p_{\frac{K}{2}}^*}{2}$ 。

[0072] c、对 $\frac{p_{\frac{K}{2}+1} p_1^*}{2}, \frac{p_{\frac{K}{2}+2} p_2^*}{2}, \dots, \frac{p_K p_{\frac{K}{2}}^*}{2}$ 做 $N_{\text{FFT}}$ 点的FFT运算。FFT采用FPGA自带的IP核, $N_{\text{FFT}}$ 为2



的整数幂,如果 $\frac{K}{2}$ 不满足2的整数幂,可以通过补0的方式进行序列延长。

[0073] d、找出FFT的峰值谱线k其前后相邻两根谱线k-1,k+1所对应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,然后按照下式得到峰值位置的修正项 $\delta$ , $\delta$ 可以为正数或者负数。

$$[0074] \quad \delta = -\operatorname{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$$

[0075] 其中, $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部。

[0076] e、修正后的峰值谱线 $k_{\text{peak}}$ 及其对应的估计频偏分别为下式所示:

$$[0077] \quad k_{\text{peak}} = k + \delta$$

$$[0078] \quad f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$$

[0079] f、根据 $f_d$ 计算出频偏变化率的估计值为 $f_d' = \frac{f_d R_s}{K}$ 。

[0080] 此时,对式1的数据符号进行频偏变化率补偿,补偿后的接收符号序列为

$$[0081] \quad s''(n) = s_n e^{j(2\pi f_d n T_s + \theta_0)} \quad (\text{式2})$$

[0082] 其中, $\theta_0$ 为补偿后的初始相位。

[0083] 按照步骤(3),利用经频偏变化率补偿后的导频符号,通过Jacobsen估计算法计算出载波频偏,具体地:

[0084] A、将经频偏变化率补偿后的导频符号按照P个为一组进行相干累加,得到K个累加结果 $p_1, p_2, \dots, p_K, p_m = e^{j2\pi(f_d m + \theta_0)}$ , $m=1, 2, \dots, K$ 。

[0085] B、对 $p_1, p_2, \dots, p_K$ 做 $N_{\text{FFT}}$ 点的FFT运算。FFT在工程实现中可采用FPGA自带的IP核, $N_{\text{FFT}}$ 为2的整数幂,如果 $\frac{K}{2}$ 不满足2的整数幂,可以通过补0的方式进行序列延长。

[0086] C、获取FFT的峰值谱线k其前后相邻两根谱线k-1,k+1所对应的FFT变换值 $X_k, X_{k-1}, X_{k+1}$ ,然后按照下式得到峰值位置的修正项 $\delta$ , $\delta$ 可以为正数或者负数。

$$[0087] \quad \delta = -\operatorname{Re} \left[ \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{2X_k - X_{k-1} - X_{k+1}} \right]$$

[0088] 其中, $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示对 $[\cdot]$ 取实部。

[0089] D、修正后的峰值谱线 $k_{\text{peak}}$ 及其对应的估计频偏分别为下式所示。

$$[0090] \quad k_{\text{peak}} = k + \delta$$

$$[0091] \quad f_d = \frac{k_{\text{peak}} f_s}{N_{\text{FFT}}}$$

[0092] 此时,对式2的数据符号进行频偏补偿,补偿后的接收符号序列为

$$[0093] \quad s^m(n) = s_n e^{j\theta_0} \quad (\text{式3})$$

[0094] 按照步骤(4),将频偏变化率和频偏都补偿过的导频符号抽取出来,进行相干累加

得到  $S_p' = \sum_{j=1}^{PK} e^{j\theta_0}$ , 然后跟导频符号的真实值进行比较, 得到初始相位  $e^{j\theta_0} = \frac{S_p'}{S_{p,0}}$ ,  $s_{p,0} = 1+j$ 。

[0095] 按照步骤(5), 对式3数据符号进行初始相位校正, 补偿后的接收符号序列为

[0096]  $s'''(n) = s_n$  (式4)

[0097]  $s'''(n)$  进行解调、译码等操作。

[0098] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员的公知技术。

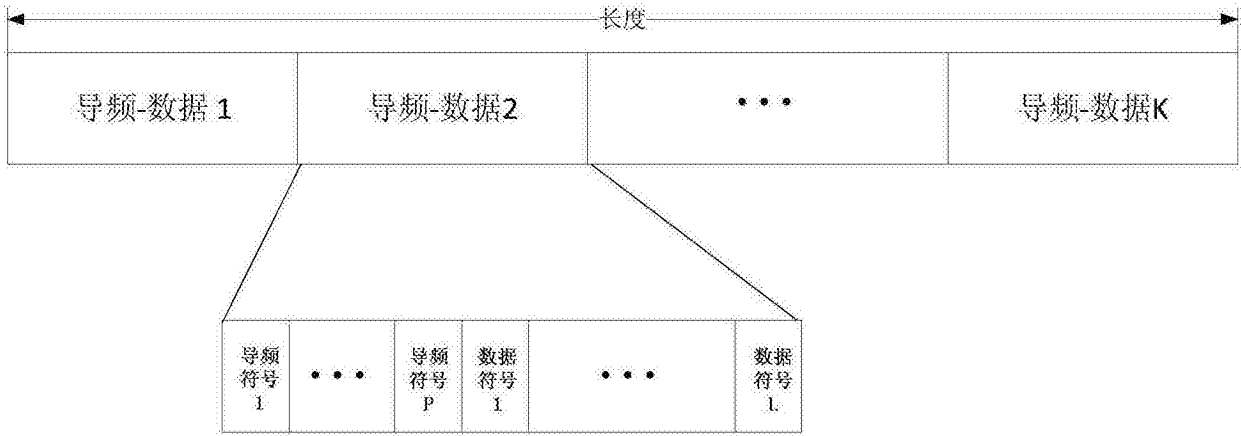


图1

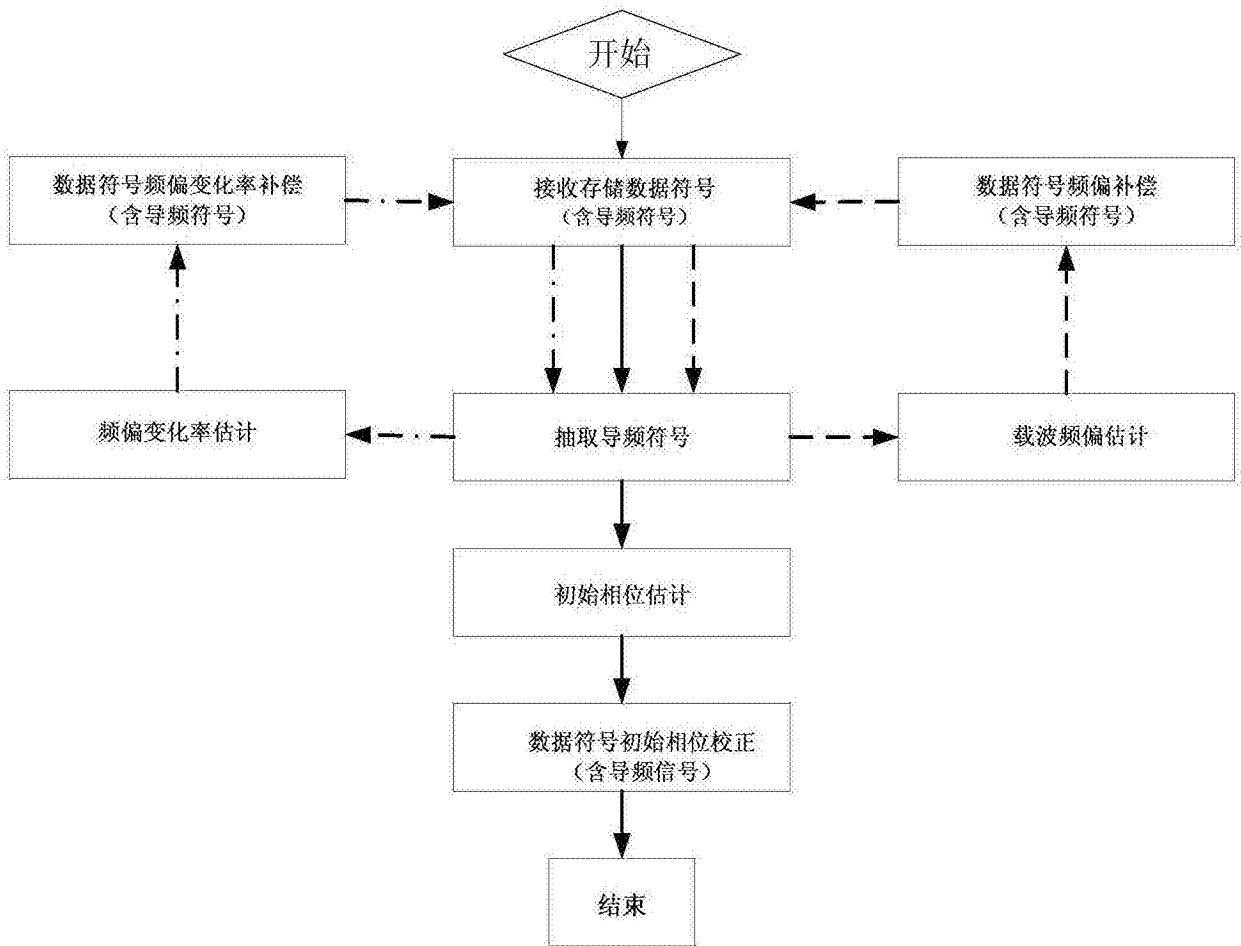


图2