

引用格式: 孙力, 邹德财, 韩涛. 基于卡尔曼滤波的 Ad Hoc 网络节点间时间同步算法研究[J]. 时间频率学报, 2020, 43(4): 279-287.

# 基于卡尔曼滤波的 Ad Hoc 网络节点间 时间同步算法研究

孙力<sup>1,2,3</sup>, 邹德财<sup>1,2,4</sup>, 韩涛<sup>5</sup>

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048;
5. 西安理工大学 理学院, 西安 713300)

**摘要:** 本文建立了 Ad Hoc 网络节点的时钟模型, 设计了适用于网络节点时钟模型的 Kalman 滤波算法, 利用时差噪声的分形特征估计 Kalman 滤波的协方差矩阵, 并对时钟噪声序列特征进行分析。仿真结果表明, 该算法不仅提高了滤波算法效率, 同时能明显降低网络节点间的时钟偏差, 实现了 Ad Hoc 网络节点间的高精度时间同步, 同步精度优于 25 ns。

**关键词:** Ad Hoc; 网络节点; 分形特性; Kalman 滤波

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-04-0279-09

## Study on time synchronization algorithm of Ad Hoc networks based on Kalman filter

SUN Li<sup>1,2,3</sup>, ZOU De-cai<sup>1,2,4</sup>, HAN Tao<sup>5</sup>

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China;
5. Faculty of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 713300, China)

**Abstract:** In this study, the clock model of the Ad Hoc network node is established, the Kalman filter algorithm which suitable for the network node clock model is designed, the covariance matrix of the Kalman filter is estimated using the fractal characteristics of the time difference noise, and the characteristics of the clock noise sequence are analyzed. The simulation results shown that the filtering algorithm not only can improve the efficiency, but also can significantly reduce the clock deviation between network nodes, and achieves high-precision time synchronization between Ad Hoc network nodes. The accuracy of synchronization is better than 25 ns.

**Key words:** Ad Hoc; network node; fractal characteristics; Kalman filter

# 0 引言

近年来,无线通信技术取得了快速发展,传统的无线移动通信网络已不能满足某些特殊场合,如军事、救灾抢险等对自主定位的需求。在这一背景下,Ad Hoc 网络<sup>[1]</sup>应运而生,在网络部署方面比较灵活,可以在一些没有通信基础设施的地区自由组网。Ad Hoc 网络所有节点都可以随意进入或退出,各节点之间的地位和功能是平等的<sup>[2]</sup>。但由于缺少标准时钟为网络中的节点提供时间参考,各个网络节点时钟不同步,其时间差异很有可能导致整个网络架构不能正常运行,自主定位功能无法实现。因此,网络节点间的时间同步是整个网络系统有效运行的重要保证。

Ad Hoc 网络架构如图 1 所示。Ad Hoc 网络不依赖基础网络设施的建立,避免了基础设施网络的故障影响到整个网络系统通信的问题,它是一个没有中心的网络节点,所有的网络节点都是平等的,没有优先级之分。在网络系统结构中,采用分布式的组网特征,网络节点之间自由组网,具有自主对等的特性,具有良好的抗毁性和健壮性。

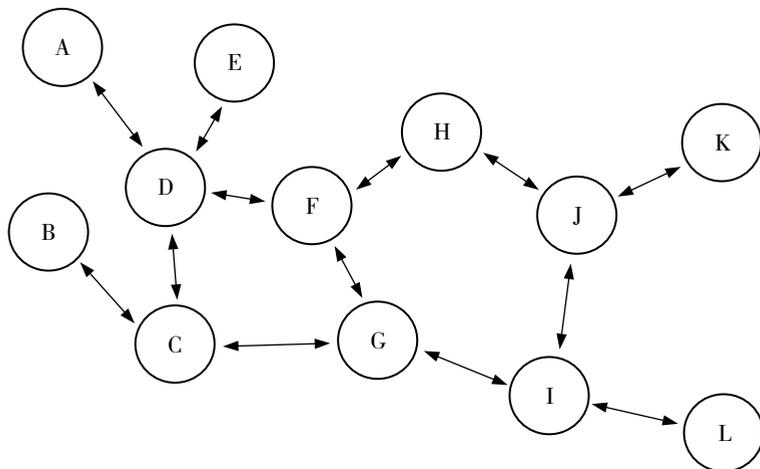


图 1 Ad Hoc 网络架构图

# 1 Ad Hoc 网络时间同步算法

当前,许多学者在无线自组织网络时间同步方面开展了研究并提出了各种算法。在这些不同的网络节点时间同步算法中,S. Ganeriwal 等人<sup>[3]</sup>提出的传感器网络定时同步算法(TPSN)、J. Elson 等专家<sup>[4-5]</sup>提出的参考广播同步算法(RBS)、B. Kesy 等人<sup>[6]</sup>提出的防洪时间同步算法(FTSP)和 Pings 等人提出的延时测量时间同步算法(DMTS)<sup>[7]</sup>是比较典型的几个方法。传统网络节点时间同步算法的特点如表 1 所示。

表 1 网络时间同步算法

算法	优点	缺点	适用场景
RBS	无发送和访问延迟	同步分组传输量大	商业硬件设备
DMTS	能耗小	同步精度最低	网络同步精度要求低
TPSN	无发送和访问延迟	只适用于静态拓扑网络	网络同步精度要求较高
FTSP	动态性好	精度在 RBS 和 TPSN 之间	动态网络结构

在 Ad Hoc 网络中节点具有多跳的特征。据此 FTSP 算法采用层级的网络结构, 这种网络结构在大规模的网络节点下是比较适用的, 多个接收者与根节点发送的广播信息进行同步。对于网络结构的动态变化以及一些网络节点的异常情况, FTSP 算法的容错性都是比较好的。在时间同步的过程中利用线性回归的方式不断精确地计算偏移量, 补偿了网络节点的时间偏差, 从而获得更高的同步精度。对比之下, FTSP 算法更适合 Ad Hoc 网络节点间的时间同步。

## 2 Ad Hoc 网络时钟模型

假设某 Ad Hoc 网络在其服务区域内随机分布  $N$  个节点, 每个节点  $m_i$  都配有一个晶体振荡器提供本地时间参考。这些节点通过某种特定的同胚映射形成具有特定拓扑结构的分布式无线网络。其拓扑结构可以利用无向连通图  $G=(V, E)$  进行描述。其中  $V=\{m_1, m_2, \dots, m_N\}$  是这个无向连通图的顶点集合, 表示该无线网络内的网络节点;  $E$  是该连通图边的集合。该网络内的邻节点是指一对可以相互收发信息的节点  $(m_i, m_j)$ , 如果  $(m_i, m_j) \in E$ , 即  $(m_i, m_j)$  为图  $G$  的一条边, 则  $(m_j, m_i) \in E$ 。若一个节点  $m_i \in V$  的邻节点, 表述为

$$S(m_i) = \{m_j \in V \mid (m_i, m_j) \in E\}。 \quad (1)$$

节点  $m_i$  的度  $d_i$  定义为

$$d_i = |S(m_i)|。 \quad (2)$$

则对于这个无向连通图  $G$  的各节点度序列定义为向量:

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T。 \quad (3)$$

符号  $a_{ij}$  表示节点  $m_i$  和  $m_j$  之间的边数。若  $m_i$  与  $m_j$  互为邻节点, 则  $a_{ij}=1$ ; 否则,  $a_{ij}=0$ 。那么, 无向连通图  $G$  内各个节点之间的连通情况可用邻接矩阵  $\mathbf{A}$  表示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{M1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} = (a_{ij})_{N \times N}。 \quad (4)$$

Ad Hoc 网络中, 每个节点  $m_i$  都拥有用于维持、记录本地时间所需的晶体振荡器。其自由运行的输出可表示成

$$S_i(t) = \cos \Phi_i(t), \quad (5)$$

式 (5) 中

$$\Phi_i(t) = \Phi_i(0) + \frac{2\pi}{T_i} t + \zeta(t), \quad (6)$$

式 (5) 和 (6) 中,  $\Phi_i(t)$  表示瞬时相位,  $T_i$  表示自由振荡周期,  $T_i = T_0 + \Delta T_i$ ,  $T_0$  为真实的振荡器周期,  $\Delta T_i$  为随机周期偏差,  $\Phi_i(0)$  为初始相位,  $\zeta(t)$  为随机相位噪声。

晶体振荡器的时间刻度可用  $t_i(n)$  表示, 即离散的相位序列, 它满足:

$$\Phi_i(t_i(n)) = n \cdot 2\pi, \quad n = 1, 2, \dots。 \quad (7)$$

那么, 离散的时钟模型可以表示为

$$t_i(n) = t_i(0) + nT_i + v(t), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

式(8)中,  $t_i(0)$ 为初始相位,  $T_i$ 为振荡周期,  $v(t)$ 为离散随机噪声。习惯上常用幂律谱模型描述其随机性分量<sup>[8]</sup>, 并把噪声项  $v(t)$ 认为是几种(常见的观点是5种<sup>[9]</sup>或7种<sup>[10]</sup>)非平稳过程的叠加, 分别利用其能量谱噪声来描述<sup>[11]</sup>, 把总噪声看成是这几种噪声的线性叠加<sup>[9, 11-12]</sup>。在描述晶振噪声的模型中, 幂律谱模型是最著名的模型之一, 它表达原子钟噪声的傅里叶频谱为

$$s(f) \propto f^{-\beta}, \quad (9)$$

式(9)中,  $\beta$ 是噪声过程的傅里叶频谱指数, 亦称功率谱维数, 它与分形维数间的关系为<sup>[13-14]</sup>

$$D = 2 - H = \frac{5 - \beta}{2}, \quad (10)$$

式(10)中,  $H$ 是 Hurst 指数,  $D$ 为分形维数。网络节点时钟噪声幂律谱模型中的傅里叶频谱指数  $\beta$ 实际上是一种分形维数, 即功率谱维。这说明, 可以利用分形方法对网络节点时钟噪声进行分析和研究。

### 3 Ad Hoc 网络时钟模型的 Kalman 滤波方法

Kalman 滤波广泛应用于导航、传感器数据融合、雷达系统以及导弹追踪等。近来更被应用于人脸识别、图像分割等计算机图像的处理。它也是一种经常用来描述网络节点时钟差的方法, 可以用来描述节点时钟的噪声状态。预测与更新是在使用卡尔曼滤波进行的两个过程<sup>[15]</sup>。首先想要对当前时刻的状态做出估计, 就需要使用上一时刻的状态对它进行预测估计, 这个就是预测过程。然后想要优化预测操作中预测的这个估计值, 那就需要当前时刻的观测状态量来对其进行优化, 这个就是更新过程。整个卡尔曼滤波过程即: 先预测, 做出先验估计。之后计算卡尔曼增益, 再得到估计值, 这个后验估计值就与真值更为接近<sup>[16]</sup>。

假设在 Ad Hoc 网络中, 两个节点的频率是相同的。这个假设与整个网络架构的实际情况是不相符的, 但是通过时钟模型的 Kalman 滤波方法可以改进频率不同的情况。则基于上述的假设条件, 网络节点间时差的 Kalman 滤波的数学表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{\Delta b}_{12} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ \Delta b_{12} \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_b \\ 0 \\ \omega_d \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式(11)中,  $b$ 表示节点的时间偏差,  $d$ 表示节点时钟的漂移率,  $\omega_b$ 表示节点钟差的噪声,  $\omega_d$ 表示节点时钟漂移率的噪声。

状态转移矩阵和噪声的协方差矩阵分别表示为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} q_b \Delta t + q_d \frac{\Delta t^3}{3} & 0 & q_d \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ q_d \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & q_d \Delta t \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式(12)中,  $q_b$ 和  $q_d$ 分别表示节点时钟的谱密度和漂移率的谱密度, 第  $k-1$ 个状态与第  $k$ 个状态之间

的时间间隔用  $\Delta t$  来表示，那么式 (11) 可表示为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ \Delta b_{12} \\ d \end{bmatrix}, \quad (13)$$

将式 (13) 两端对时间  $t$  求导数得到：

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_1 \\ \dot{b}_2 \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_b \\ \omega_d \end{bmatrix}, \quad (14)$$

则：

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} q_b \Delta t + q_d \frac{\Delta t^3}{3} & q_b \Delta t + q_d \frac{\Delta t^3}{3} & q_d \frac{\Delta t^2}{2} \\ q_b \Delta t + q_d \frac{\Delta t^3}{3} & q_b \Delta t + q_d \frac{\Delta t^3}{3} & q_d \frac{\Delta t^2}{2} \\ q_d \frac{\Delta t^2}{2} & q_d \frac{\Delta t^2}{2} & q_d \Delta t \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由上述可以知道，对方差矩阵的估计、节点时钟谱密度的估计以及时钟漂移率谱密度的估计是使用 Kalman 滤波算法处理节点时钟偏差的关键，可以参考系统时钟噪声序列特征对这些数值进行估计。

### 3.1 时钟噪声序列特征分析

对时钟噪声序列进行特征分析，可以使得节点时钟模型能够通过数学方法更准确的描述，是建立更精确的时钟模型、提高网络间时间同步精度和效率的前提。

#### 3.1.1 时差序列获取

为了更加准确地利用数学方法描述节点时钟模型，必须对其数据特征进行描述。为此，本文基于中国科学院国家授时中心的 1 PPS 时间基准对 3 个网络节点晶振的时间求取时差序列，分析其噪声特性。由式 (8) 可知，对这 3 个观测量进行线性拟合，其拟合残差描述了它们各自的噪声情况。残差序列的数字特征如表 2 所示。

表 2 节点时钟偏差残差序列数字特征

单位：s

晶振	均值	中位数	最小值	最大值	标准差	均方根误差
#1	$-8.62 \times 10^{-21}$	$5.22 \times 10^{-9}$	$-2.39 \times 10^{-5}$	$1.92 \times 10^{-5}$	$5.61 \times 10^{-6}$	$5.59 \times 10^{-6}$
#2	$-1.51 \times 10^{-19}$	$1.04 \times 10^{-7}$	$-1.43 \times 10^{-5}$	$1.74 \times 10^{-5}$	$4.54 \times 10^{-6}$	$4.53 \times 10^{-6}$
#3	$-2.87 \times 10^{-20}$	$2.07 \times 10^{-7}$	$-2.30 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-5}$	$5.12 \times 10^{-6}$	$5.10 \times 10^{-6}$

#### 3.1.2 噪声序列的非正态性

对噪声序列的分析是建立更精确的时钟模型的前提，是提高网络间时间同步精度和效率的必要前提。从它们的频数直方图 (图 2) 中很难看出它们是否服从正态分布。

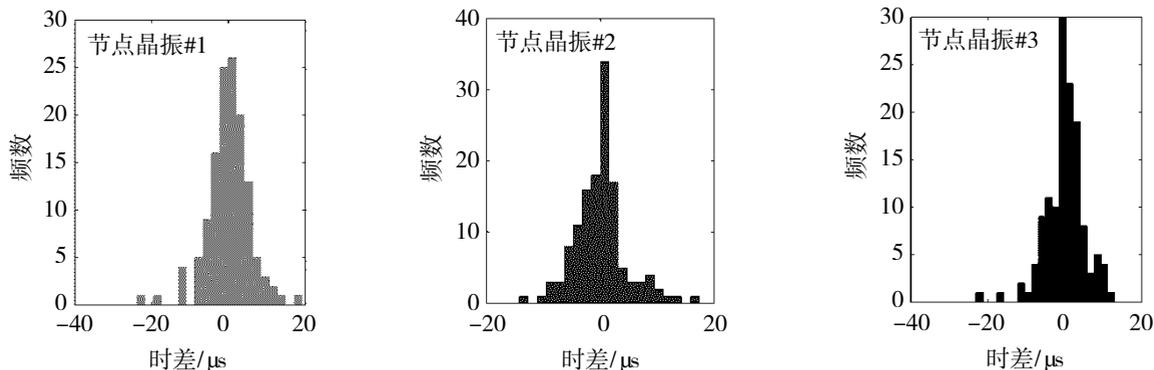


图 2 3 个网络节点晶振时差序列频数统计直方图

本节将通过雅各-贝拉检验 (Jarque-Bera) 来验证本文所采用的网络节点时钟数据是否具有符合正态分布的偏度和峰度的拟合优度的检验。

构造 JB 统计量<sup>[13]</sup>:

$$J_B = \frac{n-k+1}{6} \left( S^2 + \frac{1}{4}(C-3)^2 \right), \quad (16)$$

式 (16) 中,  $n$  是观测数 (或自由度);  $S$  是样本偏度,  $C$  是样本峰度,  $k$  是回归序列长度:

$$S = \frac{\hat{\mu}_3}{\hat{\sigma}^3} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}}, \quad (17)$$

$$C = \frac{\hat{\mu}_4}{\hat{\sigma}^4} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2}, \quad (18)$$

式 (17) 和 (18) 中,  $\hat{\mu}_3$  是三阶中心矩的估计值,  $\hat{\mu}_4$  是四阶中心矩的估计值,  $\bar{x}$  和  $\hat{\sigma}^2$  分别是样本均值和二阶中心矩 (即方差) 的估计值。当 JB 统计量近似服从自由度为 2 的卡方分布时, 则表明样本数据来自具有正态分布的总体, 故若要验证数据是否服从正态分布, 可以使用该统计量来检验。因为正态分布的偏度为 0, 峰度为 3, 所以原假设  $H_0$  的偏度为 0, 峰度为 3。由 JB 统计量的定义可以知道, 任何对于原假设的偏离都会使得 JB 统计量增加。

本文的 3 个网络时间节点时差噪声序列的 JB 统计结果如表 3 所示。其中  $h$  是判断该检验是否接受原假设的值, 当  $h=0$  时, 认为数据服从正态分布, 接收原假设; 当  $h=1$  时, 则拒绝原假设, 认为数据不服从正态分布。 $p$ , JBSTAT 和 CV 分别指检验的概率  $p$  值、检验统计量的值和判断是否拒绝原假设的关键值。由于各个残差序列的 JB 统计结果均在显著性水平 0.05 时拒绝正态分布假设, 因此, 网络节点时钟的噪声是非正态的, 需要进一步讨论和分析。

表 3 节点时钟偏差残差 JB 统计量检验结果 (显著性水平  $\alpha = 0.05$ )

晶振	$h$	$p$	JBSTAT	CV
#1	1	<0.001	59.809 0	5.548 0
#2	1	<0.001	30.641 9	5.548 0
#3	1	<0.001	61.628 5	5.548 0

### 3.2 时差噪声的分形特征

赫斯特指数<sup>[14]</sup>  $H$  常用来衡量一个时间序列是否具有长期记忆性或短期记忆性。当  $0.5 < H < 1$  时，时间序列具有长期记忆性、长期正相关性。当  $0 < H < 0.5$  时，时间序列呈现出数值的高低交错现象，并且在一段时间内持续这种趋势。如果  $H = 0.5$ ，那么时间序列是不相关的。

重标极差分析法<sup>[17]</sup> (rescaled range analysis, R/S) 是一种用于计算 Hurst 指数来刻画时间序列结构特征的非参数统计方法。对于时间序列  $\{x_i\}$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ), R/S 分析法的计算步骤如下<sup>[18]</sup>:

① 计算均值  $m$ :

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (19)$$

② 计算平均离差序列  $Y$  (即残差序列):

$$Y_t = X_t - m, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

③ 计算累积离差序列  $Z$ :

$$Z_t = \sum_{i=1}^t Y_i, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

④ 计算极差  $R$ :

$$R_t = \max(Z_1, Z_2, \dots, Z_t) - \min(Z_1, Z_2, \dots, Z_t), \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

⑤ 计算标准差  $S$ :

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (X_i - m)^2}, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

⑥ 计算重标极差序列 (R/S):

$$(R/S)_t = \frac{R_t}{S_t}, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

Hurst 发现 R/S 与时间序列之间满足幂律分布, 即:

$$(R/S)_t = c \cdot t^H \quad (25)$$

式 (25) 中,  $c$  为常数,  $H$  记为 Hurst 指数。对式 (25) 两端取对数, 可以得到:

$$\log(R/S)_t = \log(c \cdot t^H) = \log c + H \log t \quad (26)$$

之后对  $t$  与  $(R/S)_t$  进行线性拟合, 拟合函数的斜率就是 Hurst 指数  $H$ 。R/S 分析法的优点可以根据求出的指数值, 从整体上判断时间序列在未来的大体走势, 说明时间序列的相关性程度。本节所用的网络节点时间偏差噪声的 Hurst 指数计算结果如图 3 所示。

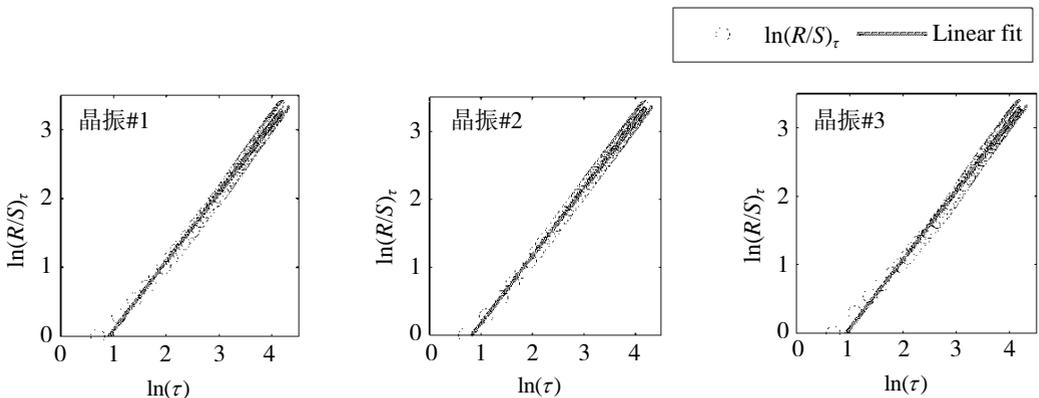


图3 网络节点时钟偏差的 R/S 分析结果

其中, 3 个网络节点时钟晶振噪声的 Hurst 指数线性拟合表达式为

$$\begin{cases} \log(R/S)_t = 0.9986 \log t - 0.9093, & \text{for node No.1} \\ \log(R/S)_t = 0.9923 \log t - 0.8144, & \text{for node No.2,} \\ \log(R/S)_t = 0.9920 \log t - 0.9399, & \text{for node No.3} \end{cases} \quad (27)$$

式(27)的计算结果表明, 3 个网络节点时钟晶振噪声序列的 Hurst 指数均大于 0.5, 具有分形特性, 是分形序列。

由式(10)可知, 这 3 个噪声序列的傅里叶频谱指数分别为: 2.984 0、2.997 2 和 2.984 6。将这些计算结果代入式(15), 即可对 Kalman 滤波的协方差矩阵进行估计。

通过上述分析, 得到了网络节点时钟模型、Kalman 滤波算法以及分形特征参数。其中, 分形特性可以用来估计 Kalman 滤波的协方差矩阵, 从而提高滤波算法效率。

## 4 仿真分析

本文通过软件 Matlab 来进行移动自组织网络的时间同步算法的仿真验证, 网络节点时钟的本振频率为 10 MHz, 仿真时间为 180 s, 同步周期设置为 1 s<sup>[9]</sup>。通过仿真可以得到卡尔曼滤波前的时钟偏差情况, 其结果如图 4 所示。

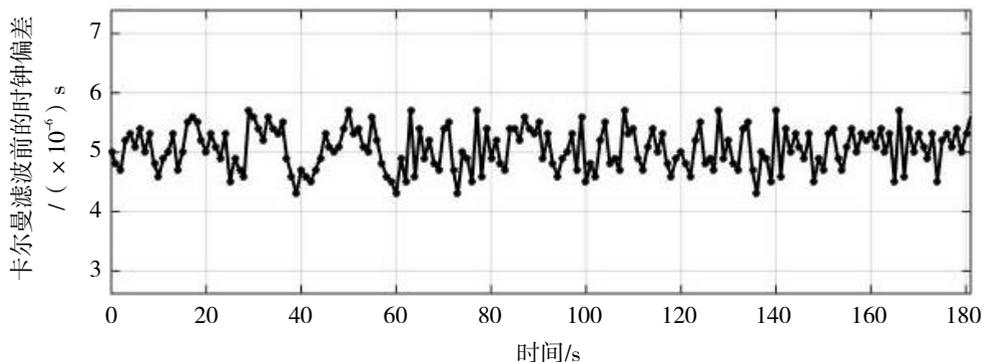


图 4 卡尔曼滤波前的时钟偏差

从图 4 可以看到卡尔曼滤波前的时钟偏差是随机抖动的, 通过分析可知, 时钟偏差的均值和方差分别为  $5.0514 \times 10^{-6}$  s 和  $1.2296 \times 10^{-13}$  s。卡尔曼滤波后的时钟偏差情况, 其结果如图 5 所示。

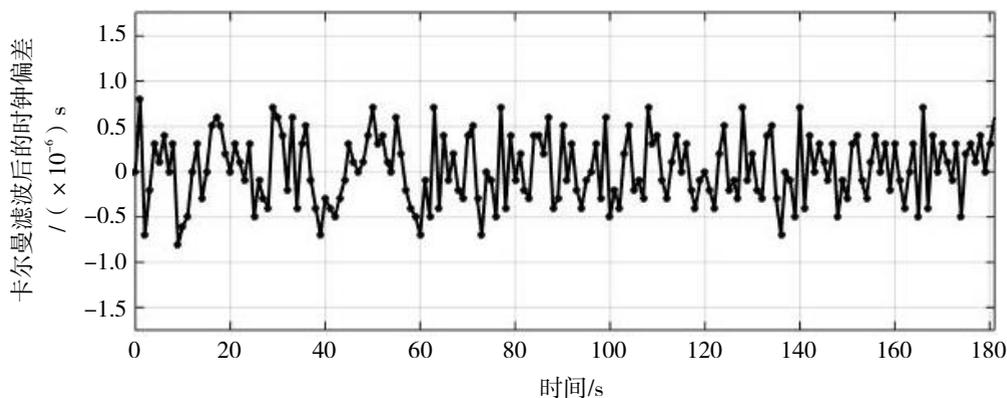


图 5 卡尔曼滤波后的时钟偏差

从图 5 可以看到卡尔曼滤波后的时钟偏差也是随机的, 对仿真数据进行分析可知, 时钟偏差的均值和方差分别为  $2.3757 \times 10^{-8}$  s 和  $1.3638 \times 10^{-13}$  s。

通过仿真分析与计算,可以看出使用卡尔曼滤波使得节点的时钟偏差得到了明显的改善,对时钟系统状态模型进行调整,使得节点间实现时间同步。

## 5 结语

本文对建立的 Ad Hoc 网络的节点时钟模型进行了数学描述,利用分形方法对网络节点时钟噪声进行分析和研究。为了对节点时钟的噪声状态进行描述,采用 Kalman 滤波方法对时钟噪声序列特征进行分析,其中包括了时差序列获取和噪声序列的非正态性分析。基于分形特征分析结果,估计 Kalman 滤波的协方差矩阵,从而提高了滤波算法效率。通过 Matlab 对文中的基于 Kalman 滤波算法对 Ad Hoc 网络节点间同步精度进行仿真,结果表明该算法能明显降低网络节点间的时钟偏差,基于该模型实现了 Ad Hoc 网络节点间的高精度时间同步,同步精度优于 25 ns。

## 参考文献:

- [1] ZHENG S R, WANG H T, ZHAO Z F, et al. Ad Hoc networks technology[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2005.
- [2] 杨海东, 邓勇. Ad Hoc 网络时间同步技术研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(21): 5447-5450.
- [3] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C] // SenSys'03: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York: ACM, 2003: 138-149.
- [4] 李文锋, 王汝传, 孙力娟. 基于 RBS 的无线传感器网络时间同步算法[J]. 通信学报, 2008, 29(6): 82-86.
- [5] 叶玲, 李太华, 代学武. 无线传感器网络环境下基于卡尔曼滤波的 PTP 协议[J]. 智能系统学报, 2012, 7(6): 518-524.
- [6] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(1): 147-163.
- [7] CHEN L, LENEUTRE J. Toward secure and scalable time synchronization in Ad Hoc networks[M]. Elsevier Science Publishers B: Computer Communications, 2007.
- [8] 宋晓雪. 无线自组织网络时间同步技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [9] 袁海波, 武福平, 董绍武. 原子钟信号主要噪声类别的判定与分析[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 187-191.
- [10] 郭海荣, 郭树人, 焦文海, 等. 原子钟时域频率稳定性计算方法[J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(2): 47-52.
- [11] 张敏. 原子钟噪声类型和频率稳定度估计的自由度分析与探讨[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2008.
- [12] 陈伊卿. 无线传感器网络时间同步算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [13] HUANG G, ZOMAYA A Y, DELICATO F C. An accurate on-demand time synchronization protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel & Distributed Computing, 2012, 72(10): 1332-1346.
- [14] MAKARAVA N, HOLSCHNEIDER M. Estimation of the Hurst exponent from noisy data: a Bayesian approach[J]. The European Physical Journal B, 2012, 85(8): 272-471.
- [15] 顾仁财, 刘飞. 自适应 Kalman 滤波的战术数据链自主时间同步算法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(2): 76-79.
- [16] 庄晓燕, 王厚军. 基于卡尔曼滤波器的 IEEE 1588 时钟同步算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(9): 747-751.
- [17] SARANN L, CATHERINE C, AURORE D. Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review[J]. Biotechnology Agronomy Society & Environment, 2013, 17(2): 392-406.
- [18] HASAN M K, SAEED R A, HASHIM A H A, et al. Femtocell network time synchronization protocols and schemes[J]. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2012, 4(23): 5136-5143.
- [19] 胡爱华, 邓中亮, 张耀. 基于改进 TPSN 和卡尔曼滤波的时间同步算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(13): 5-9.