

脉冲耦合振荡器实现传感器网络时间同步

凌 祥, 姜永华

(海军航空工程学院, 烟台 264001)

摘 要: 研究利用全局脉冲耦合振荡器实现分布式无线传感器网络的时间同步。建立了无延时、无脉冲积累的脉冲耦合振荡器网络的相位模型,对其动力学方程定点的稳定性作了分析。提出了噪声背景下的耦合脉冲检测方法和脉冲振荡器之间相位差的估计算法,用于从采样数据中快速提取网络中脉冲振荡器的相位信息,仿真验证了该方法可实现网络中所有振荡器同步发射。采用脉冲耦合振荡器模型,对雷达导引头组成的传感器网络可能实现的协同探测进行了分析。

关键词: 脉冲耦合; 振荡器; 传感器; 网络; 同步

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)03-1168-06

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.055

0 引言

自然界中存在着很多脉冲同步现象,如大量萤火虫同时发光、夏天蝉的群鸣等现象,在生物振荡器中也有很多互相耦合同步的例子,如在中央神经系统中发现了被同步的神经激发活性,从生物物理细节抽象来看,神经系统就是一类用脉冲相互作用表征的耦合振荡器^[1]。

目前根据上述现象提出的脉冲耦合振荡器模型主要应用于人工神经网络,在图像处理、图像目标识别、图像理解、强时变信号处理等领域具有非常广泛的应用前景^[2]。

近年来,利用脉冲耦合振荡器实现无线传感器网络的同步引起了许多学者的关注。时间同步在分布式传感器数据融合和通信等领域具有重要作用,传统时间同步技术的数据交换量和计算量都很大。Mirolos 等人对脉冲耦合生物振荡器的同步进行了研究^[3,4],Y.W.Hong 和 A.Scaglione 提出利用脉冲耦合振荡器在 UWB 网络中实现分布式时间同步^[5],并研究了耦合脉冲的检测方法,但对振荡器耦合后同步的实现方法未作深入研究。

本文根据传感器网络的分布特点研究了全局耦合振荡器网络模型,建立了相位方程,对方程定点的稳定性作了分析。针对脉冲振荡器互相耦合后如何

实现同步这一问题,提出了脉冲振荡器之间相位差提取算法,可用于耦合信号采样数据的处理。通过仿真表明全局耦合振荡器网络模型能够实现传感器网络的同步。

本文还对导弹弹上传感器-雷达导引头所组成的传感器网络实现时间同步的可能性进行了分析。通常在导弹齐射后,导引头之间的互相耦合信号被作为同频异步干扰而消除了,如果能够利用耦合振荡器网络模型实现导引头的时间同步,就有可能实现导引头的协同探测和导弹的协同攻击,提高导引头的作用距离和抗干扰能力。

1 全局耦合脉冲振荡器网络模型

可以将雷达看成是一个脉冲振荡器,它能周期性地产生脉冲信号,其模型为^{[3][6]}:

$$\frac{dx}{dt} = S_0 - \gamma x, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

其中 x 表示脉冲振荡器的状态,当 $x = 1$ 时,振荡器发射脉冲信号并且 x 跳回到状态 0。经计算可得,由该方程表示的振荡器的周期 T 为

$$T = \ln[S_0/\gamma] / \gamma \quad (2)$$

为分析方便引入相位 $\varphi \in [0,1]$,令 $\varphi = t/T$,且满足当 $\varphi = 0$ 时,振荡器的状态 $x = 0$,而当相位 $\varphi = 1$ 时,振荡器达到发射脉冲的门限 $x = 1$ 。因此根据

上述条件,可以得到脉冲振荡器状态 x 和相位 φ 之间的关系:

$$x = C(1 - e^{-r\varphi}) \quad (3)$$

其中 $C = 1/(1 - e^{-r})$, 上述关系式所代表的脉冲振荡器模型如图 1 所示。

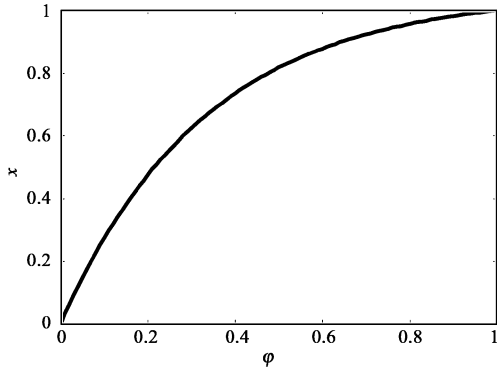


图 1 脉冲振荡器模型

Fig.1 The model of pulse oscillator

1.1 脉冲注入耦合振荡器

考虑脉冲振荡器在外部注入脉冲信号影响下, 相位 φ 的变化情况。假设当 $\varphi = \varphi_1$ 时注入一个脉冲信号, 强度为 a , 那么该脉冲会使振荡器的状态和相位发生一个跃变, 可能将相位进行抬升, 也可能将其拉低。特别是当 φ 很接近 1, 如果该注入信号将相位 φ 抬升到 1, 则振荡器立即发射一个脉冲。

外部注入脉冲对振荡器相位的影响可以从图 2 中看出, 某一时刻 t_1 (归一化后就是相位 φ_1) 的状态 x_1 叠加上 a 后得到一个新的状态 x_2 , 该状态对应的相位为 φ_2 。 φ_2 和 φ_1 之间的差就是外部注入信号 a 对振荡器相位产生的影响, 记为 $g(\varphi_1)$, 称之为相位跃迁函数。

$$\varphi_2 = r^{-1} \ln \frac{C}{Ce^{-r\varphi_1} - a} \quad (4)$$

$$g(\varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1 = r^{-1} \ln \frac{C}{C - ae^{r\varphi_1}} \quad (5)$$

根据相位的定义, $g(\varphi)$ 也必须限制在 $[0, 1]$ 范围内, 如图 3 所示, 当 $a > 0$ 时, 曲线都具有一个明显的折点 A , 它表示从该时刻 φ_A 开始, 注入脉冲 a 将使状态瞬间达到 1, 振荡器发射脉冲信号^[7]。

1.2 全局耦合脉冲振荡器网络相位方程

当每个脉冲振荡器与网络中其余脉冲振荡器都有耦合关系时, 称之为全局耦合。这种分布式的全局耦合脉冲振荡器在相互作用过程中, 逐渐达到一

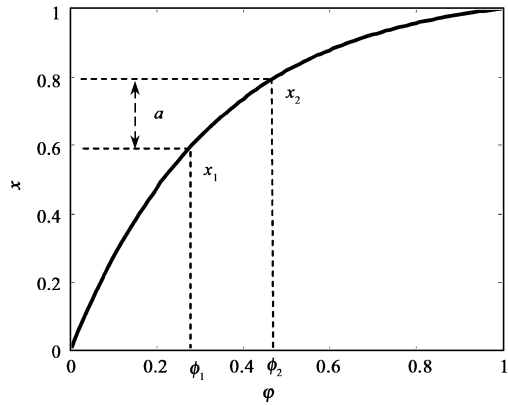


图 2 注入脉冲对振荡器相位影响

Fig.2 Pulse injection effects the phase of oscillator

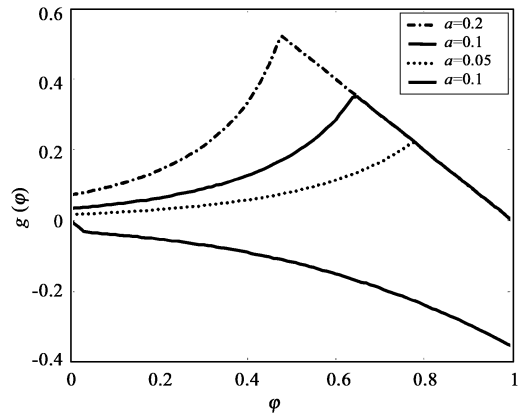


图 3 相位跃迁函数 $g(\varphi)$ 曲线图

Fig.3 Graph of phase transition function $g(\varphi)$

个共同的相位, 所有的振荡器同时发射脉冲, 根据文献[5]振荡器网络的“同步”可如下定义: 当且仅当存在 $q^* \in N$, 对于 $\forall q, q' > q^*$, 有

$$[t_k^{(q)} + d_{ik}/c] - [t_{k'}^{(q')} + d_{i'k'}/c] \approx lT, l \in N \quad (6)$$

对于任意的 i, k , 和 k' 均满足上式。其中 $t_k^{(q)}$ 代表 k 个振荡器第 q 次发射脉冲的时刻, d_{ik} 表示第 i 个和第 k 个振荡器之间的距离, c 代表光速。

当导弹齐射时, 每枚导弹之间的距离较近, 导引头之间的耦合可以忽略信号传输带来的延时, 发射能量瞬时耦合到相邻的导引头中, 且耦合能量较大, 可以满足单个脉冲线性检波时检测概率对信噪比的要求。因此本文对讨论的脉冲振荡器网络作如下假设:

(1) 振荡器接收到的耦合脉冲信号只能对本周期的振荡器状态产生作用, 即对耦合来的信号不作积累。

(2) 振荡器之间距离较近,耦合信号传输产生的延时远小于发射信号的重复周期,因此可以忽略延时 d_{ik}/c 带来的影响。

假设网络中各有 N 个脉冲振荡器,发射脉冲的重复频率为 T ,图 4 是网络中两个脉冲振荡器的状态图,它们的初始相位是不一致的,我们每隔时间 T 对脉冲振荡器的状态进行一次采样,得到 $x_i(nT)$,该状态对应的相位为 $\varphi_i(nT)$,简记为 $\varphi_i(n)$ 。

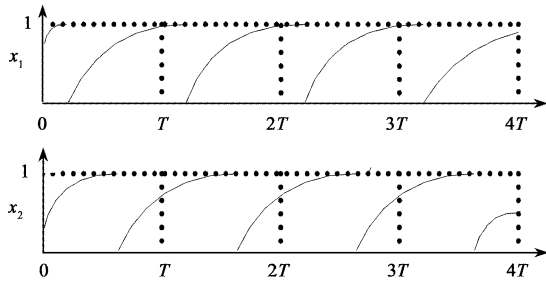


图 4 网络中脉冲振荡器的状态

Fig.4 The state of pulse oscillators in network

如果振荡器之间没有耦合,那么前后两次采样

$$\begin{aligned} \varphi_i(n) &\approx \varphi_i(n-1) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N a_{ki} [g(1) - g'(1^-)(\varphi_k(n-1) - \varphi_i(n-1))] \\ &= \varphi_i(n-1) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N a_{ki} [\varphi_k(n-1) - \varphi_i(n-1)] \end{aligned} \tag{8}$$

用矩阵来表示方程,令 $\boldsymbol{\phi}(n) = [\varphi_1(n), \dots, \varphi_N(n)]^T$, 则(8)可改写为

$$\boldsymbol{\phi}(n) = \mathbf{A}\boldsymbol{\phi}(n-1) \tag{9}$$

其中 \mathbf{A} 为对称矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{k=2}^N a_{k1} & a_{21} & \cdots & a_{N1} \\ a_{12} & 1 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 2}}^N a_{k2} & \cdots & a_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1N} & a_{2N} & \cdots & 1 - \sum_{k=1}^{N-1} a_{kN} \end{bmatrix}$$

设 $\bar{\boldsymbol{\phi}}$ 为方程(9)的定点,为了分析其稳定性,考虑在定点与其邻近的另一点 $\boldsymbol{\phi}_n$ 的距离在迭代过程中的变化。

$$\|\boldsymbol{\delta}_n\| = \|\boldsymbol{\phi}_n - \bar{\boldsymbol{\phi}}\|$$

经过一次迭代后,此距离变为

$$\|\boldsymbol{\delta}_{n+1}\| = \|\boldsymbol{\phi}_{n+1} - \bar{\boldsymbol{\phi}}\| = \|\mathbf{J}(\bar{\boldsymbol{\phi}}) \cdot \boldsymbol{\delta}_n\|$$

得到的相位值 $\varphi_i(n)$ 和 $\varphi_i(n+1)$ 就应该是相同的,由于耦合作用会使脉冲振荡器的相位发生跃变,利用式(5),网络离散动力学方程可表示如下:

$$\begin{aligned} \varphi_i(n) &= \varphi_i(n-1) + \\ &\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N a_{ki} g \cdot [1 - \varphi_k(n-1) + \varphi_i(n-1)] \\ 1 \leq i \leq N, \quad 0 \leq \varphi_i \leq 1 \end{aligned} \tag{7}$$

其中 a_{ki} 表示第 k 个振荡器发射信号耦合到第 i 个振荡器的能量,当每个振荡器的辐射能量均相同时,可认为 $a_{ki} = a_{ik}$ 。

当网络稳定时,方程应满足 $\varphi_i(n) = \varphi_i(n-1)$, 则对任意的 k, i , 此时可得到

$$\varphi_k(n-1) = \varphi_i(n-1)$$

说明网络中任意两个脉冲振荡器的相位达到了一致,满足式(6)对网络同步的定义。

1.3 定点稳定性分析

考虑网络接近同步时的情况,改写(7)得到

$\mathbf{J}(\bar{\boldsymbol{\phi}})$ 是方程(9)所代表的映射在定点 $\bar{\boldsymbol{\phi}}$ 处的雅可比矩阵,且 $\mathbf{J}(\bar{\boldsymbol{\phi}}) = \mathbf{A}$ 。当定点稳定时, $\|\boldsymbol{\delta}_{n+1}\| < \|\boldsymbol{\delta}_n\|$, 要求 \mathbf{A} 的特征值小于 1。

令 $\mathbf{B} = \mathbf{A} - \mathbf{I}$, 根据霍尔维茨定理,很容易证明 \mathbf{B} 是半负定的,只有一个孤立的特征值为 0。这说明 \mathbf{A} 的特征值小于 1,满足定点稳定性要求。

2 脉冲检测和相位差估计算法

由文献[5],当脉冲振荡器之间互相进行耦合时,每个振荡器的状态可以表示为

$$\frac{dx_i}{dt} = S_0 - \gamma x_i + S_i(t)$$

$S_i(t)$ 表示第 i 个振荡器接收到的耦合信号,可表示为

$$S_i(t) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N a_{ki} \delta(t - t_k) \quad (10)$$

$\delta(t)$ 为冲击函数, t_k 代表第 k 个脉冲振荡器的发射时间。对上述脉冲信号在高斯白噪声背景下的检测可以参考二元通信系统的最佳接收机模型,如图 5 所示。

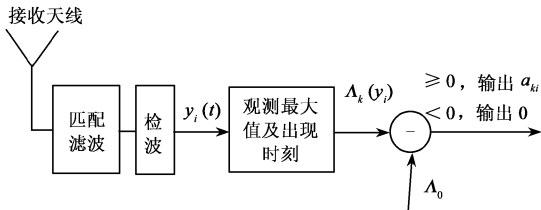


图 5 脉冲振荡器接收信号检测模型

Fig.5 Detection model of received signal in pulse oscillator

对检波后得到的接收信号 $y_i(t)$ 作如下两个假设:

$$\begin{aligned} H_0: y_i(t) &= \sigma_i(t) \\ H_1: y_i(t) &= S_i(t) + \sigma_i(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$\sigma_i(t)$ 为第 i 个接收通道的高斯白噪声。根据图 5,对接收信号进行能量检测,观察极大值 $\Lambda_k(y_i)$ 及其出现时刻,经与门限 Λ_0 进行比较后,对两个假设进行判断,如果 $\Lambda_k(y_i) \geq \Lambda_0$,表明有耦合脉冲到达,将其能量 a_{ki} 输出。门限 Λ_0 的选取可根据某种虚警概率来决定。

下面讨论该模型的具体算法,以便能和方程(8)结合起来实现递推。在 nT 和 $(n+1)T$ 时间段内,噪声背景下第 i 个脉冲振荡器的实际接收信号为:

$$z_i(t) = S_i(t) + \sigma_i(t) \quad (nT \leq t \leq (n+1)T) \quad (12)$$

令 $\Delta\varphi_{ki}(n)$ 表示在 nT 和 $(n+1)T$ 时间段内第 i 个振荡器和第 k 个振荡器由于发射时间不同而带来的相位差,

$$\Delta\varphi_{ki}(n) = (t_k(n) - t_i(n))/T = \varphi_k(n) - \varphi_i(n) \quad (13)$$

根据方程(8)可知第 i 个振荡器经过一个周期

的耦合作用,其相位变化为

$$\epsilon_i(n) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N a_{ki} \Delta\varphi_{ki}(n) \quad (14)$$

脉冲检测算法的主要目标就是根据实际接收信号 $z_i(t)$,对 $\epsilon_i(n)$ 进行最佳估计,这是一个多参量同时估计问题,记未知参量矢量为

$$\boldsymbol{\beta} = [a_{1i}, \dots, a_{ki}, \dots, a_{Ni}, \Delta\varphi_{1i}, \dots, \Delta\varphi_{ki}, \dots, \Delta\varphi_{Ni}] \quad (k \neq i)$$

参量矢量 $\boldsymbol{\beta}$ 的极大似然估计是方程组的解:

$$\int_{nT}^{(n+1)T} [z(t) - S_i(t, \boldsymbol{\beta})] \frac{\partial S_i(t, \boldsymbol{\beta})}{\partial \beta_j} dt = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, 2N - 2) \quad (15)$$

方程(15)的求解过于复杂,我们采用一种近似的方法来估计 $\epsilon_i(n)$ 。振荡器实际发射信号波形不可能是标准的冲击函数,设 $p(t)$ 为实际发射波形,那么第 i 个振荡器在 nT 和 $(n+1)T$ 时间段内收到的耦合信号可重新表示为:

$$\begin{aligned} f_i(t) &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N a_{ki} p(t - \Delta\varphi_{ki}T + nT) \\ &\quad (nT \leq t \leq (n+1)T) \end{aligned} \quad (16)$$

而噪声背景下的实际接收信号可由下式表示,其波形如图 6 所示,

$$\begin{aligned} \tilde{z}_i(t) &= f_i(t) + \sigma_i(t) \\ &\quad (nT \leq t \leq (n+1)T) \end{aligned} \quad (17)$$

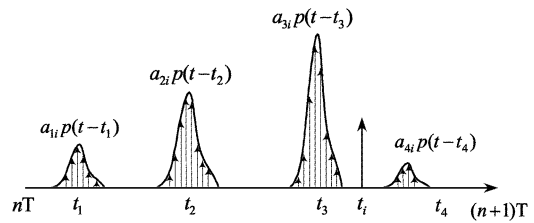


图 6 振荡器实际接收信号

Fig.6 Actual received signals in oscillators

而相应的 $\tilde{\epsilon}_i(n)$ 可看成是无穷多个冲击脉冲信号共同作用而形成的,可表示为

$$\tilde{\epsilon}_i(n) \approx \lambda \int_{nT}^{(n+1)T} f_i(t) \frac{(t - t_i(n))}{T} dt \quad (18)$$

$t_i(n)$ 表示第 i 个振荡器在第 n 个周期内的发射时间,该参数对第 i 个振荡器自身而言是已知的。 λ 为比例系数,其范围为(0,1)。这样一来问题就变成了利用 $\tilde{z}_i(t)$ 对 $f_i(t)$ 进行最佳估计,而 $f_i(t)$ 的极大似然估计就是 $\tilde{z}_i(t)$ 。考虑离散的情况,设对 $\tilde{z}_i(t)$ 采样周期为 T_s , T 时间内采样次数 $M =$

T/T_s , 则 $\tilde{\varepsilon}_i(n)$ 的估计值 $\hat{\varepsilon}_i(n)$ 可表示为^[8]

$$\hat{\varepsilon}_i(n) = \frac{\lambda}{T} \sum_{j=1}^M \tilde{z}_i(n, j)(Tj - t_i) \quad (19)$$

上式可直接与方程(8)结合起来实现递推, 该振荡器相位差估计算法的框图, 如图 7 所示。

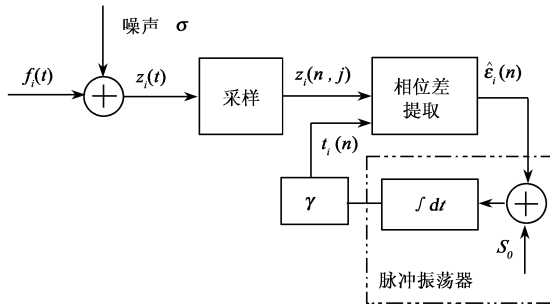


图 7 相位差估计算法

Fig.7 Phase error estimate algorithm

3 数值仿真

根据本文提出的算法对全局耦合脉冲振荡器的同步进行仿真, 设网络中的脉冲振荡器个数 $N = 4$,

发射脉冲的重复频率为 $T = 1$, 采样周期为 $T_s = 0.01$ 。令振荡器之间的耦合能量矩阵为 \mathbf{a} ,

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.05 & 0.08 \\ 0.1 & 0 & 0.1 & 0.7 \\ 0.05 & 0.1 & 0 & 0.1 \\ 0.08 & 0.7 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

比例系数 λ 设为接收信号幅度总和的倒数,

$$\lambda = \frac{1}{\int_{nT}^{(n+1)T} f_i(t) dt} \quad (20)$$

检波放大后的信号信噪比设为 5dB 和 20dB, 仿真后发现耦合振荡器相位逐渐趋于一致, 如图 8 所示, 在信噪比较低的情况下, 相位会有波动, 增大 λ 可以使相位趋于稳定, 因此 λ 通常可按实际情况取一合适的常数。图 9 是四个振荡器发射时间演变图, 在 $[0, T]$ 周期内, 四个振荡器的发射时间各不相同, 当在 $[9T, 10T]$ 周期内, 它们的发射时间已经达到一致了。

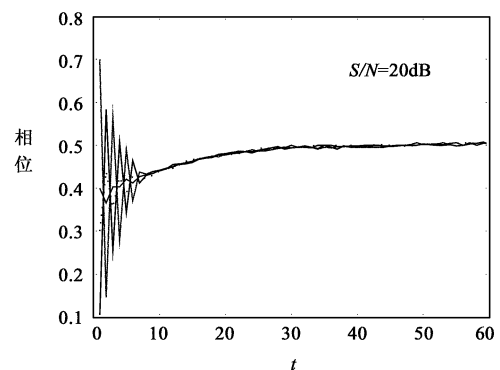
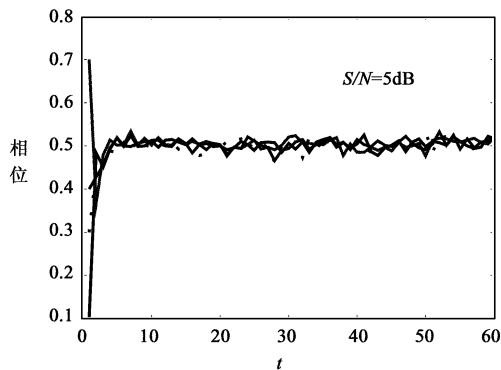


图 8 不同信噪比情况下, 脉冲耦合振荡器相位逐渐趋于一致

Fig.8 Phases of pulse-coupled oscillators converge at a same value under different S/N

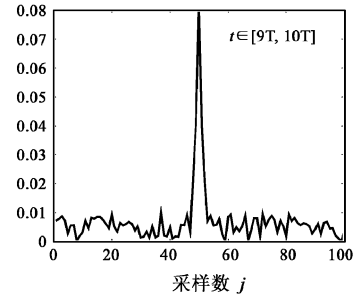
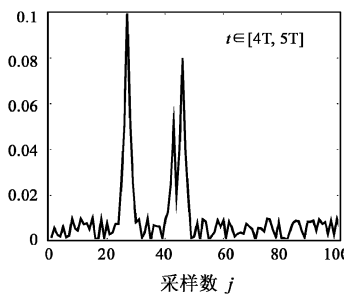
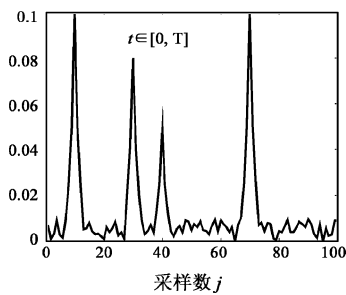


图 9 四个脉冲振荡器逐渐达到同步, 在每个周期的同一时刻发射

Fig.9 Four oscillators synchronize and fire at same time

4 结论

通过本文的研究表明,利用全局耦合脉冲振荡器模型,采用最佳脉冲检测和相位差估计算法,可实现传感器网络时间同步。

多个弹上雷达导引头可以看作是全局耦合脉冲振荡器所组成的传感器网络,当网络中所有雷达都同步时,导引头同时发射探测脉冲,使导弹协同攻击成为可能。

本文讨论的是全局耦合脉冲振荡器网络,如果采用星形耦合方式,只有一个振荡器发射脉冲,而其它振荡器只接收不发射,这样也可以实现同步^[9],这种耦合方式能使网络中的绝大部分传感器处于电磁“静默”状态,却同样能实现对目标的探测,因此可提高抗干扰能力和导弹的突防能力。

参考文献:

- [1] 方锦清. 非线性系统中混沌控制方法、同步原理及其应用前景(二)[J]. 物理学进展, 1996, 16(2): 138 - 159. [FANG Jing-qing. Chaos control method and synchronization with its application in nonlinear systems II [J]. Progress in Physics, 1996, 16(2): 138 - 159 (in Chinese).]
- [2] 张军英. 一种改进型脉冲耦合神经网络及其图像分割[J]. 电子学报, 2004, 32(7): 1223 - 1226. [ZHANG Jun-ying. Image segmentation based on a modified pulse-coupled neural network[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2004, 32(7): 1223 - 1226 (in Chinese).]
- [3] Mirollo R E, Strogatz S H. Synchronization of pulse coupled biological oscillators[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1990, 50(6): 645 - 1662.
- [4] Hu A S, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2725 - 2748.
- [5] Hong Y W, Scaglione A. Time synchronization and reach-back communications with pulse-coupled oscillators for UWB wireless AD HOC networks[C]. IEEE Unference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003: 190 - 194
- [6] Eugene M, Izhikevich. Weakly pulse-coupled oscillators, FM interactions, synchronization, and oscillatory associative memory[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 508 - 526.
- [7] Pranay Goel, Bard Ermentrout. Synchrony, stability, and firing patterns in pulse-coupled oscillators[J]. Physica D, 2002, 163: 191 - 216.
- [8] O. Simeone, U. Spagnolini. Distributed time synchronization in wireless sensor networks with coupled discrete-time oscillators[J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2007, ID 57054: 1 - 13.
- [9] BAI Yan-chun, CHEN Tian-ping. Synchronization of pulse-coupled star-networks[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2007, 46(2): 148 - 155.

作者简介:凌祥(1979-),男,博士研究生,讲师,研究方向为精确制导技术,非线性有源天线技术。
通信地址:山东烟台海军航空工程学院 401 教研室(264001)
E-mail:lingx107@sohu.com

Time Synchronization in Sensor Network with Pulse-coupled Oscillator

LING Xiang, JIANG Yong-hua

(Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: Globally pulse-coupled oscillator was investigated as an alternative to achieve timing synchronization of distributed wireless sensor networks. A phase model of pulse-coupled oscillator network without propagation delay and pulse accumulation was studied, and the stability of dynamic fixed point was analyzed. A algorithm was presented to detect the coupled pulses and emulate there phase errors, extracting the phase information from sampled data of received signal. The simulation result verified its feasibility. In particular, it is shown that synchronization of the sensor network of Radar seeker may lead to cooperative detection.

Key words: Pulse-coupled; Oscillator; Sensor; Net work; Synchronization