

## WSNs 中基于占空比间隔优化的延迟约束路由算法

杨雅颂<sup>1</sup>, 胡杰<sup>2</sup>

(1. 福州职业技术学院 文化创意系, 福州 350108; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 针对 WSNs 中现有路由算法存在的各种不足, 提出了一种基于占空比间隔优化的延迟约束路由算法; 具体来说, 在提出的算法中, 首先, 将端到端延迟分布估计为占空比间隔和潜在转发器数量的函数, 在给定的网络模型和参数下, 其分布可以近似地估计; 然后, 选择满足延迟约束成功率要求的占空比间隔最大值, 每个节点独立地调度其休眠和唤醒时间, 发送端节点将数据包转发给潜在转发器中最先唤醒的节点, 从而确保数据包以要求的概率即 DCSR 到达接收器, 同时最大化占空比间隔; 仿真实验结果表明, 提出的路由算法不仅能够满足要求的 DCSR, 并在 ETE 延迟、数据包交付率和实际得到的 DCSR 方面都优于现有的先进算法。

**关键词:** 无线传感器网络; 传感器组; 路由算法; 端到端延迟; 占空比间隔优化; 概率; 包交付率

## Delay-constrained Routing Algorithm Based on Duty Cycle Interval Optimization in WSNs

YANG Yasong<sup>1</sup>, HU Jie<sup>2</sup>

(1. Department of Culture and Creativity, Fuzhou Vocational and Technical College, Fuzhou 350108, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of existing routing algorithms in wireless sensor networks (WSNs), a delay-constrained routing algorithm based on duty cycle interval optimization is proposed. Specifically, in the proposed algorithm, firstly, the end-to-end (ETE) delay distribution is estimated as the function of duty cycle interval and the number of potential forwarders, and its distribution can be approximately estimated under the given network model and parameters. Then, the maximum duty cycle interval is selected to meet the delay-constrained success ratio (DCSR) requirement. Each node independently schedules its sleep and wake up time, and the sending end node forwards the data packet to the node that is first woke up in the potential forwarder. This ensures that the data packet arrives at the receiver with the required probability, namely DCSR, and maximizes the duty cycle interval. The simulation results show that the proposed routing algorithm can not only meet the requirements of the DCSR, but also outperform the existing advanced algorithms in terms of the ETE delay, packet delivery rate and DCSR obtained in practice.

**Keywords:** WSNs; sensor group; routing algorithm; ETE delay; duty cycle interval optimization; probability; packet delivery ratio

## 0 引言

无线传感器网络 (WSNs, wireless sensor networks) 在诸如军事侦查、工业、农业和各种环境监测领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 因此将大量传感器测得的数据如何路由给汇聚节点或数据接收器是一个广泛关注的问题; 占空比 (工作循环) 是一种有效解决方案, 即节点在休眠和活跃状态之间周期性地切换。然而, 休眠调度会导致高时延, 因为节点必须等待下一跳激活, 而不是立即传输数据。在一些应用中, 规定数据包要在一定的时间内到达接收器, 如重要事件的检测 (如森林火灾检测) 必须在特定的延迟限制内报告给汇聚节点。因此, 在实际应用中, 为了快速响应重要事件, 特别需要一种延迟约束的路由算法来调度与转发数据包。

为了解决端到端 (ETE, end-to-end) 包延迟问题, 有很多关于路由的算法<sup>[4-6]</sup>。但是, 这些算法需要全局信息 (如网络中所有的 1-跳延迟和通信链路), 从而导致消息复杂度, 或者节点间的高时间同步成本。此外, 在传感器节点部署之前, 这些算法不能估计给定网络参数的 ETE 延迟分布情况。也就是说, 既不能预测数据包到达数据收集器的时间, 也不能预测在特定时间内到达的数据包比例。

在占空比 WSNs 中, 有同步调度和异步调度两种。在同步协议中, 节点间相互协作, 并发地打开和关闭无线电<sup>[7-9]</sup>; 在异步协议中<sup>[10-11]</sup>, 每个节点独立地选择自己的休眠调度, 发送方和接收方不需要同时唤醒。为了保证数据包传输, 节点间交换调度信息或定期广播信标消息; 由于异步调度比同步调度简单得多, 故本文算法采用异步调度。

针对占空比 WSNs 中 ETE 延迟的路由算法也有研究。

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-10。

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20200805)。

作者简介: 杨雅颂 (1981-), 男, 硕士, 实验师。

引用格式: 杨雅颂, 胡杰. WSNs 中基于占空比间隔优化的延迟约束路由算法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 330-337.

在这些算法中, 节点基于 1-跳延迟 (即节点在候选集节点中选择具有较低 1-跳延迟的下一跳) 作出路由转发判决。文献 [12] 提出了随机异步唤醒 (RAW, random asynchronous wakeup) 算法, 其中每个节点随机选择自己的调度, 维护一个路由转发候选集 (FCS, forwarding candidate set)。为了转发数据包, 节点会在 FCS 的所有活跃节点中选择离接收器最近的节点。如果 FCS 中没有活跃节点, 则该节点将等待 FCS 中最近的节点醒来; 在文献 [13] 提出的链路传输混合聚类 (LTHC, link transmit hybrid clustering) 算法中, 节点首先构建根在接收器处的最短路径树。为了转发数据, 如果一个节点的父节点唤醒之前的等待时间小于给定的阈值, 则该节点将数据包发送给其父节点。否则, 将数据包发送给离接收器更近的邻居节点中唤醒时间最早的节点。为了获得相邻节点的唤醒时间, 所有节点采用相同的伪随机数生成算法, 但种子值不同。采用本地种子, 每个节点最初生成其活跃时间。当一个节点唤醒时, 广播其本地种子  $s_n$  和一个随机数  $S_n$ 。通过接收  $s_n$  和  $S_n$ , 节点可以预测其相邻节点的下一个活跃时间; 这两种协议仅尝试减小 ETE 延迟, 而不能满足给定的延迟约束。此外, 还需要很多的信息交换。如在 RAW 算法中, 每当节点打开无线电时, 节点需要交换信标消息, 信标消息包括节点 ID、时钟、时间表、寿命和位置。在 LTHC 算法中, 传感器节点在唤醒时要广播节点 ID、本地种子和新生成的随机数  $S_n$ 。而本文算法只需要节点广播节点 ID 和组编号。

也有一些满足给定延迟约束的路由算法。由于节点的低占空比唤醒会造成极大的 ETE 数据时延, 文献 [14] 针对这个问题提出了一种基于 Quorum 的异步自适应低占空比路由算法。算法首先为每个节点根据网络负载选择自身的 Quorum 类型, 并利用 Quorum 特性来计算邻居节点的重叠时隙个数。然后根据链路质量进一步计算出 1-跳范围内邻居节点间的成功转发预期值, 并在即将唤醒的节点中选择更可靠的节点转发数据; 文献 [15] 提出了一种局部转发算法。在这种算法中, 当一个节点真正转发一个数据包时, 它只尝试满足 ETE 延迟的期望均值, 而不考虑方差。因此, 无法获得所需的 DCSR; 文献 [16] 提出了一种占空比无线传感器网络最小期望延迟路由方法, 以解决在占空比无线传感器网络中所有节点到汇节点的最小期望延迟路由问题。最小期望延迟路由方法包括初始化和路由更新, 初始化是对所有传感器节点路由表和时隙竞争表的内容赋初值。根据网络的层次结构, 路由更新由第 0 层逐层进行, 通过层间路由更新信息的交互实现路由更新, 节点依据网络最小期望延迟时间原则选择下一跳节点。该方法综合考虑了无线传感器网络节点休眠调度, 无线链路质量, 节点竞争程度, 具有更大的报文投递率和更小的报文汇聚完成时间; 文献 [17] 提出了一种新的算法, 通过计算不同传输模式下的时延和传输成功率选出最佳传输方式, 在满足延时要求的情况下节省能量。结果表明, 相对于其他算法, 这种算法能更好地节省能量和降低时延; 文献 [18] 提出

了一种新的路由算法 LLR (low latency routing), 该算法先根据节点到汇聚节点的跳数进行分层, 每一个节点均计算其到父节点的时延以及父节点到汇聚节点的时延, 从而寻找一条到达汇聚节点的最低时延的传输路径。

针对 WSNs 中现有路由算法存在的各种不足, 本文提出了一种基于占空比间隔优化的延迟约束路由算法。算法能确保数据包以要求的概率即延迟约束成功率 (DCSR, delay-constrained success ratio) 到达接收器, 同时最大化占空比间隔。具体来说, 在提出的算法中, 首先将 ETE 延迟分布估计为占空比间隔和潜在转发器数量 ( $m$ ) 的函数, 在给定的网络模型和参数, 其分布也可以近似地估计。然后选择满足 DCSR 要求的占空比间隔最大值, 每个节点独立地调度其休眠和唤醒时间, 发送端节点将数据包转发给潜在转发器中最先唤醒的节点。算法不需要传感器之间的时间同步。此外, 它还能使操作员在实际部署之前估计 ETE 延迟, 并执行资源规划 (如设置传感器节点数量); 为了验证所提出的算法, 在不同的场景下进行了仿真。仿真结果表明, DASF 能够获得所需的 DCSR, 并在 ETE 延迟和 DCSR 方面优于现有算法。

## 1 问题定义及网络模型

### 1.1 问题定义

令随机变量  $Z$  表示 ETE 延迟, 则  $Z$  可视为从源到接收器的路径上的 1-跳延迟的总和。令  $\mathbf{Y}$  为向量, 其中每个元素为从源到接收器路径上的 1-跳延迟。如果  $h$  表示跳数, 则  $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_h\}$ , 其中:  $Y_q$  为第  $q$  跳的 1-跳延迟 ( $1 \leq q \leq h$ ), 因此,  $Z$  可以表示为  $Y_q$  的函数:

$$Z = \sum_{q=1}^h Y_q \quad (1)$$

如果在 WSNs 中应用占空比, 则 1-跳延迟会受到休眠调度 (占空比间隔和活跃时间) 和网络参数的影响。这时,  $Y_q$  可以表示为占空比间隔  $T$  和其他参数的函数:

$$Y_q = f(T, \phi_q) \quad (2)$$

式中,  $\phi_q$  表示网络参数的集合, 如相邻节点数、总面积和通信范围等。

这样, 本文的优化问题可以表述为: 在给定网络参数和在给定的成功率  $p_s$  下, 一个数据包应当在延迟界限  $\xi$  内到达接收器的 ETE 延迟约束下, 占空比间隔  $T$  最大化, 即:

$$\begin{cases} \text{maximize} & T \\ \text{s. t.} & P(Z < \xi) \geq p_s \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $p_s$  为要求的 (即规定的) DCSR。

### 1.2 网络模型

假设传感器随机均匀部署在接收器周围、半径为  $l$  的圆形区域内, 每个节点通过定位技术知道自己的位置<sup>[19]</sup>。分别用  $N$  和  $R$  表示节点总数和传感器节点的传输范围。根据节点与接收器之间的距离, 将节点分成多个组, 用  $c$  表示一个组的宽度。节点 A 根据  $d_A$  (节点 A 与接收器的距离) 获取其组号。图 1 所示为整个区域中的节点部署。如果  $0 \leq d_A \leq R$  或节点 A 能直接向接收器发送数据包, 则节点 A 属于

组 1。如果  $d_A$  满足式 (4)，则节点 A 属于组  $j$ ：

$$R + c(j - 2) < d_A \leq R + c(j - 1) \quad (4)$$

式中， $0 \leq d_A \leq l$ 。用  $k$  表示总组数，则：

$$k = \left\lfloor \frac{l - R}{c} \right\rfloor + 1 \quad (5)$$

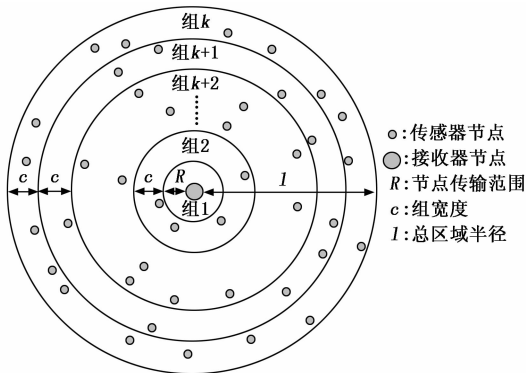


图 1 本文 WSNs 中的节点部署

分别用  $T$  和  $T_a$  表示占空比间隔和活跃周期。传感器节点独立选择随机唤醒时间，并保持  $T_a$  的活跃时间，在占空比间隔的其余时间关掉无线电。每当节点打开无线电，它们就广播信标消息，信标消息只包括节点 ID 和组号。节点间不需要时间同步。

## 2 提出的路由算法

为了求解式 (3) 的优化问题，需要得到一个数据包在 WSNs 中的 ETE 延迟分布函数。由于 ETE 延迟是 1-跳延迟的总和，因此可以估计 1-跳延迟分布。在节点密集网络中，每个节点有相似的相邻节点数，1-跳延迟随机变量可以认为具有相同的分布函数。因此，为了近似 ETE 延迟分布，对长路径应用中心极限定理，即 ETE 延迟用一个正态分布函数近似，这样，ETE 延迟的均值和方差分别为 1-跳延迟的均值和方差的总和。

下面首先描述提出的延迟约束路由算法，然后利用占空比间隔和网络参数来近似 ETE 延迟分布。随后进一步表明，在给定的网络参数下，可以调整占空比间隔来满足期望 DCSR 的延迟界限。

### 2.1 基于组的转发

首先，考虑组  $j$  中的节点 A，假设它有  $m$  个潜在转发器，其组 ID 小于节点 A 的 ID。发射器选择  $m$  个潜在转发器中第一个活跃节点。假设节点 A 有 3 个潜在转发器（如节点 B、C 和 D），且节点 A 有一个数据包要在时刻  $t_0$  发送到接收器。在接收到信标消息时，节点 A 知道这个消息的发送方是活跃的。如果节点 A 在 3 个候选节点中首先接收到 C 广播的信标消息，则节点 A 将选择节点 C 作为下一个转发器。

令随机变量  $M$  表示组  $j$  中一个节点的潜在转发器数量，由于 1-跳延迟和 ETE 延迟依赖于  $M$  的值，因此需要估计  $M$  的分布，然后基于路由转发算法，得到 1-跳延迟和

ETE 延迟的分布。

### 2.2 M 的分布

为了估计 ETE 延迟的分布，在给定的网络参数和发送方位置的情况下，估计随机变量  $M$  的分布。定义节点密度  $\rho = N/S$ ， $N$  为 WSNs 中的节点总数， $S$  为总面积大小。如图 2 所示，令随机变量  $X$  表示发送方（组  $j$ ）和组  $j-1$  的边界之间的距离， $X$  在  $0 \leq X \leq c$  上具有均匀分布。 $S_j$  为转发区域，下一跳必须部署在该区域，换句话说， $S_j$  为发送方的通信区域和半径为  $R_{j-1} = R + c(j-2)$  的组  $j-1$  的圆形区域之间的交叉部分。 $S_j$  是依赖于变量  $X$  和节点的组 ID 的随机变量。图 2 中的虚线区域即为转发器区域  $S_j$ 。

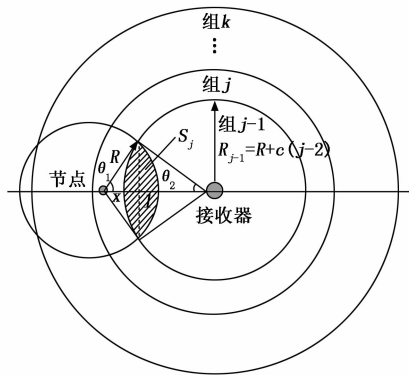


图 2 交叉区域

在确定区域  $A_0$  中的节点数  $n_0$  服从泊松分布<sup>[20]</sup>，可以表示为：

$$P(n_0) = \frac{(\rho A_0)^{n_0}}{n_0!} e^{-\rho A_0} \quad (6)$$

因此，交叉区域  $S_j$  中得到  $m$  个节点的概率为：

$$P_j(M = m) = P_j(m) = \frac{\rho S_j e^{-\rho S_j}}{m!} \quad (7)$$

令  $S_{j,1}$  表示半径为  $R$ 、圆心角为  $2\theta_1$  的节点的通信范围的扇区， $S_{j,2}$  表示半径为  $R_{j-1}$ 、圆心角为  $2\theta_2$  的组  $j-1$  的圆的扇区， $S_{j,3}$  表示对角线  $a$  和  $(x + R_{j-1})$  的风筝区域。根据图 2， $S_j$  计算如下：

$$S_j = S_{j,1} + S_{j,2} + S_{j,3} = \int_{-\theta_1}^{\theta_1} \int_0^R r dr d\theta + \int_{-\theta_2}^{\theta_2} \int_0^{R_{j-1}} r dr d\theta - a(x + R_{j-1}) \quad (8)$$

式中，

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{R^2 + (x + R_{j-1})^2 - R_{j-1}^2}{2R(x + R_{j-1})}\right) \quad (8a)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{R_{j-1}^2 + (x + R_{j-1})^2 - R^2}{2R_{j-1}(x + R_{j-1})}\right) \quad (8b)$$

$$a = 2R \sin \theta_1 \quad (8c)$$

为了比较不同组 ID 值的相交区域，可以重画相交区域如图 3 所示。保持组  $j$  的圆的位置不变，当组 ID  $j_0$  大于  $j$  时，组  $j_0$  的圆从节点到接收器的方向平移  $c(j_0 - j)$ ，当组 ID  $j_0$  小于  $j$  时，组  $j_0$  的圆从接收器到节点的方向平移  $c(j - j_0)$ 。全部  $S_j$  相交于到节点距离为  $x$  的点。由图 3 可以看出，对于相同的  $x$  值， $S_j$  在节点的通信范围和组  $j$  的圆之

间的相交区域在  $S_{j+1}$  的相交区域的内部和  $S_{j-1}$  的相交区域的外部, 即  $S_{j+1} > S_j > S_{j-1}$ 。

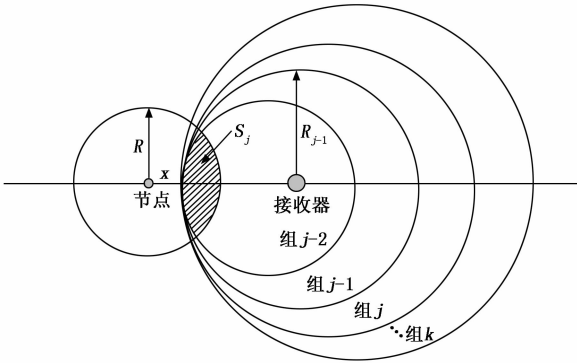


图 3 不同组相交区域

式 (7) 定义了某个  $X$  值的  $P_j(m)$ 。因此, 根据贝叶斯定理, 组  $j$  中一个节点有  $m$  个潜在转发器的概率为:

$$P_j(m) = \int_0^c \frac{(\rho S_j)^m}{m!} e^{-\rho S_j} \times P(X = x) dx = \frac{1}{c} \int_0^c \frac{(\rho S_j)^m}{m!} e^{-\rho S_j} dx \quad (9)$$

式 (8) 中的  $S_j$  为  $x$ 、组 ID  $j$  和其他网络参数的函数。由式 (9) 可知,  $P_j(m)$  与节点密度、相交区域  $S_j$  和组宽度有关。

### 2.3 1-跳延迟分布

本节得出任意组  $j$  ( $2 \leq j \leq k$ ) 中节点  $A$  的 1-跳延迟分布的估计。节点  $A$  在  $m$  ( $1 \leq m < N$ ) 个潜在转发器中选择下一跳。设随机变量  $D_i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 表示第  $i$  个节点在  $m$  个潜在转发器中的唤醒时间, 由于传感器节点是随机独立选择唤醒时间的, 因此  $D_i$  是独立相同的变量。 $D_i$  的分布函数为  $F_{D_i}(d_i) = P(D_i \leq d_i) = d_i/T$ , 如果  $0 \leq d_i \leq T$ 。由于  $Y_j$  表示组  $j$  的数据包的 1-跳延迟, 故  $Y_j$  定义为  $Y_j = \min(D_1, D_2, \dots, D_m)$ 。令  $P(Y_j < y_j | m)$  表示给定  $m$  的 1-跳延迟小于  $y_j$  的概率, 即如果节点有  $m$  个潜在转发器, 则存在至少一个  $D_i < y_j$  的概率。则对于给定的  $m, y_j$  的分布函数  $F(y_j | m)$  为:

$$F(y_j | m) = p(Y_j \leq y_j | m) = 1 - P(\text{全部 } D_i > y_j) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - F_{D_i}(d_i)) |_{d_i=y_j} = 1 - (1 - y_j/T)^m \quad (10)$$

根据贝叶斯定理可以得到分布函数  $F(y_j)$  为:

$$F(y_j) = \sum_{m=0}^{N-1} P_j(m) F(y_j | m) = \sum_{m=0}^{N-1} P_j(m) [1 - (1 - y_j/T)^m] \quad (11)$$

式中,  $P_j(m)$  由式 (9) 计算, 为组  $j$  中节点  $A$  有  $m$  个潜在转发器的概率。由式 (11), 可计算概率密度分布  $f(y_j)$  如下:

$$f(y_j) = \frac{dF(y_j)}{dy_j} = \sum_{m=1}^{N-1} p_j(m) \frac{m}{T} (1 - \frac{y_j}{T})^{m-1} \quad (12)$$

由于每个节点在占空比间隔周期内随机选择活跃时间, 因此 1-跳延迟应小于占空比间隔或  $0 \leq Y_j \leq T$ 。1-跳延迟  $Y_j$  的均值  $\mu_j$  和方差  $\sigma_j^2$  分别为:

$$\mu_j = \int_0^T y_j f(y_j) dy_j =$$

$$\int_0^T y_j \left( \sum_{m=1}^{N-1} P_j(m) \frac{m}{T} (1 - \frac{y_j}{T})^{m-1} \right) dy_j = \sum_{m=1}^{N-1} P_j(m) \frac{T}{m+1} = \alpha_j T \quad (13)$$

$$\alpha_j^2 = \int_0^T (y_j - \mu_j)^2 f(y_j) dy_j = \int_0^T y_j^2 f(y_j) dy_j - \mu_j^2 = \sum_{m=1}^{N-1} P_j(m) \frac{2T^2}{(m+1)(m+2)} - \mu_j^2 = \beta_j T^2 - \alpha_j^2 T^2 \quad (14)$$

式中,

$$\alpha_j = \sum_{m=1}^{N-1} P_j(m) \frac{1}{m+1} \quad (14a)$$

$$\beta_j = \sum_{m=1}^{N-1} P_j(m) \frac{2}{(m+1)(m+2)} \quad (14b)$$

然后, 由式 (13) 和 (14) 可以得到给定网络参数下, 1-跳延迟  $Y_j$  的均值和方差为占空比间隔的函数。

### 2.4 E2E 延迟分布

本节计算 ETE 延迟分布。令随机变量  $Z$  表示组  $k$  中节点的 ETE 延迟。由于数据包转发到组 ID 比发送方 ID 小的  $m$  个潜在转发器中的第一个活跃节点, 在最坏情况下, ETE 延迟可以近似为  $k-1$  个 1-跳延迟的和:

$$Z = Y_k + Y_{k-1} + \dots + Y_2 \quad (15)$$

式中,  $Y_j$  是组  $j$  中节点的 1-跳延迟。注意,  $Y_1$  为零, 因为接收器节点总是活跃的。3.2 节已经表证明对于相同的  $x$  值,  $S_2 < S_3 < \dots < S_k$ 。由于  $Y_2 > Y_3 > \dots > Y_k$ , 则  $Z < Z'$  且  $Z' = (k-1) Y_2$ 。如果  $Z'$  满足延迟要求, 则 E2E 延迟  $Z$  也满足。令  $\mu_j$  和  $\sigma_j^2$  分别为 1-跳延迟  $Y_j$  的均值和方差,  $\mu$  和  $\sigma^2$  分别为  $Z'$  的均值和方差, 则  $\mu = (k-1) \mu_2$ ,  $\sigma^2 = (k-1) \sigma_2^2$ ,  $\mu_2$  和  $\sigma_2^2$  分别由式 (13) 和式 (14) 计算; 因此, 如果  $k$  的值足够大, 则由中心极限定理可知, 分布函数  $F(z')$  趋近于有相同均值和方差的正态分布:

$$F(z') \approx G\left(\frac{z' - \mu}{\sigma}\right) = G\left(\frac{z' - (k-1)\mu_2}{\sqrt{(k-1)\sigma_2^2}}\right) \quad (16)$$

则  $Z'$  的概率密度函数  $f(z')$  为:

$$f(z') \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(z'-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi(k-1)\sigma_2^2}} e^{-\frac{(z'-(k-1)\mu_2)^2}{2(k-1)\sigma_2^2}} \quad (17)$$

由式 (17) 可知,  $f(z')$  依赖于发送节点的组 ID、 $\mu_2$  和  $\sigma_2^2$ 。如前节所述, 1-跳延迟的均值和方差依赖于占空比间隔, 因此,  $Z'$  的分布函数依赖于占空比间隔  $T$ 。这意味着通过调节占空比间隔  $T$ , 可以在给定 DCSR 的延迟界限下保证 ETE 延迟。如果随机变量:

$$Z_0 = \frac{Z' - \mu}{\sigma} = \frac{Z' - (k-1)\alpha_2 T}{\sqrt{(k-1)(\beta_2 - \alpha_2^2) T^2}} \quad (18)$$

则  $Z'$  有标准的正态分布。

现在, 用  $Z'$  代替延迟界限  $\xi$ , 为了在给定概率下满足延迟要求, 则占空比间隔应为:

$$T \leq \frac{\xi}{(k-1)\alpha_2 + \sqrt{(k-1)(\beta_2 - \alpha_2^2)}Z_0} \quad (19)$$

式中,  $Z_0$  从标准正态累积分布函数表和给定概率得到,  $Z_0$  代表要求的 DCSR  $p_s$ 。令

$$T_{\max} = \frac{\xi}{(k-1)\alpha_2 + \sqrt{(k-1)(\beta_2 - \alpha_2^2)}Z_0} \quad (20)$$

表示的最大占空比间隔, 它满足给定的延迟要求, 即在延迟界限  $\xi$  内至少  $p_s\%$  的数据包转发到接收器。从式 (19) 可以看到,  $T_{\max}$  应当是延迟界限、节点密度和要求的 DCSR 的函数。

### 3 算法性能研究

本节采用网络仿真器 NS2 来验证提出的路由算法。

仿真系统参数设置如下。传感器节点随机均匀部署在一个半径为 300 m 的圆形区域内, 接收器位于区域中心, 组总数目设为  $k=7$ , 源节点数为 4, 事件速率默认值为 0.5 packet/s。传感器节点随机生成自己的数据。表 1 所示为仿真中的系统参数, 表 2 所示为参数值范围及其默认值。节点密度值是指在区域上的节点数。仿真中, 随机选取组  $T$  中的节点作为源节点。

表 1 仿真设置

名称	值
总的圆形区域半径/m	300
节点的传输范围/m	75
组宽度/m	37.5
数据包大小/byte	46
信标消息大小/byte	6
占空比/%	6
仿真时间/s	3 000

表 2 网络参数

参数名	取值范围	默认值
要求的 DCSR/%	[80 85 90 95 97]	95
延迟界限/s	[10 20 30 40 50]	20
节点密度	[3 4 6 8 10 12]	8
事件速率/(packets/s)	[0.1 0.5 1 1.5 2 2.5 3]	0.5
源节点数量	[1 2 4 8 12 16 20]	4

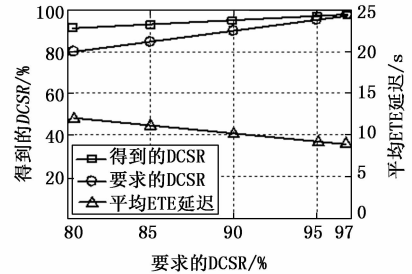
首先从数据包交付率 (PDR, packet delivery ratio)、平均 ETE 延迟和 DCSR 三个方面评价本文算法的性能, 然后对本文算法与 RAW 算法<sup>[12]</sup>和 LTHC 算法<sup>[13]</sup>的性能进行比较。

#### 3.1 本文算法的适应性验证

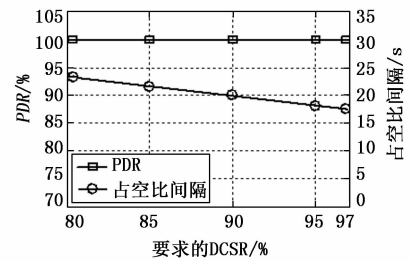
##### 3.1.1 要求的 DCSR 变化对算法的影响

图 4 所示为要求的 DCSR  $p_s$  对算法的影响, 要求的 DCSR 变化范围为 80%~97%。图 4 (a) 为不同要求的 DCSR 对得到的实际 DCSR 以及平均 ETE 延迟的影响。结果表明, 所要求的 DCSR 能够得到满足, 实际得到的 DCSR 高于所要求的 DCSR。这是因为占空比间隔是在传输跳数为 6 且随机变量  $S_i$  集为同分布的最坏情况下计算得到的。此

外, 可以看到, 当所要求的 DCSR 增大时, 实际得到的 DCSR 与所要求的 DCSR 之间的差距有变小的趋势; 此外, 从图 4 (b) 可见, 随着所要求的 DCSR 的增大, 得到的占空比间隔减小。这意味着节点会更频繁地唤醒, 换句话说, 数据包倾向于更早地转发, 占空比间隔的减小导致平均 ETE 延迟的减小。例如, 当所要求的 DCSR 从 80%到 97%变化时, 占空比间隔从 23.29 s 逐渐下降到 17.49 s, 平均 ETE 延迟从 12.01 s 逐渐下降到 9.14 s; 图 4 (b) 还表明, 可以获得较高的 PDR, 在要求的 DCSR 范围内可以达到约 100%; 这表明, 占空比间隔在 ETE 延迟中起着关键作用。因此, 提出的算法把包延迟估计为占空比间隔的函数是合理的。



(a) 对得到的实际DCSR和平均ETE延迟的影响

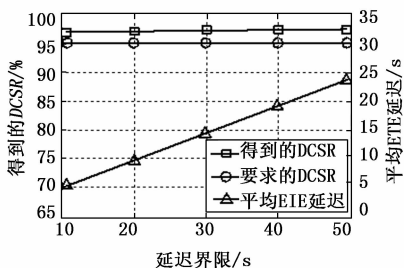


(b) 对PDR和占空比间隔的影响

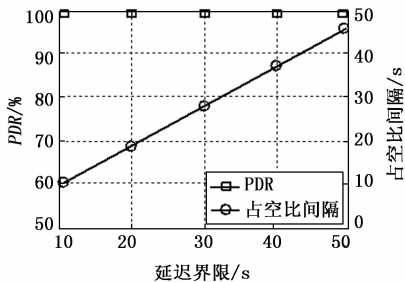
图 4 所需 DCSR 变化的影响

##### 3.1.2 延迟界限变化对算法的影响

为了检验延迟界限变化对算法的影响, 保持其他参数为默认值, 让延迟界限  $\xi$  的值在 10~50 s 之间变化, 要求的 DCSR  $p_s$  设置为 95%, 即至少要求 95% 的数据包在延迟界限内要到达接收器。如图 5 (a) 所示, 对于不同的延迟界限 (值, 算法始终满足所要求的 DCSR (95%), 而且实际得到的 DCSR 与所要求的 DCSR 之间的差异总是相近的。例如, 大约 97% 的数据包可以在不同的延迟界限值转发到接收器。原因是算法保持所要求的 DCSR 在不同的延迟界限值上不变。为了保持  $DCSR p_s = (\xi - \mu) / \sigma$  不变, 应当改变  $Z'$  的平均  $\mu$  和方差  $\sigma$ 。由于  $\mu$  和  $\sigma$  是占空比间隔  $T$  的函数, 算法调节  $T$  的值, 使得  $p_s$  保持不变; 图 5 (b) 表明, 当延迟界限  $\xi$  增大时, 得到的占空比间隔趋于增大。因此, 节点唤醒频率降低, 导致更长的 ETE 延迟。如延迟界限为 10~50 s 时, 得到的占空比间隔从 9.2 s 线性增加到 46.2 s, 得到的平均 ETE 延迟从 4.9 s 逐渐增大到 23.8 s, 如图 5 (a) 所示; 图 5 (b) 还表明, 在 PDR 方面, 算法可以获得较高的 PDR, 对于不同的延迟界限值接近 100%。



(a) 对实际得到的DCSR和平均ETE延迟的影响



(b) 对PDR和占空比间隔的影响

图 5 延迟界限变化的影响

### 3.2 与其他算法的性能比较

本节考虑在不同的节点密度、事件速率和源节点数量情况下,对本文算法、LTHC 和 RAW 算法的网络性能进行比较。

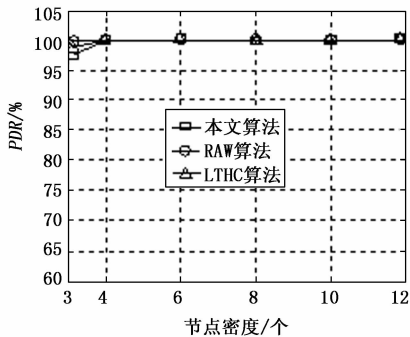
#### 3.2.1 节点密度的影响

为了测试节点密度对于不同算法的网络性能影响,节点密度从 3~12 个不等,而保持其他参数为默认值。当节点密度为 {3、4、6、8、10、12} 时,由式 (17) 计算得到的占空比间隔值为 {8.72、10.36、14.23、18.51、22.97、27.51} s。

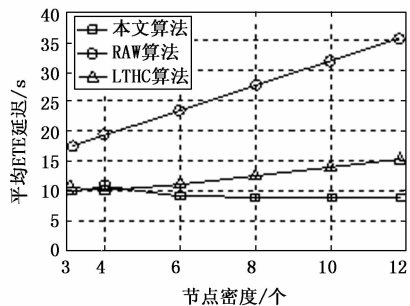
从图 6 (a) 可见,在不同的节点密度值,三种算法的数据包交付率都较高;从图 6 (b) 可见,本文算法的平均 ETE 延迟变化不大,而 RAW 算法的不断增大。因为对于 RAW 算法,当一个节点转发一个数据包时,如果在转发候选集中没有活跃节点,发送方将等待,直到候选节点中离接收器最近的节点唤醒。因此,平均 ETE 延迟随占空比间隔的增大而增大;从图 6 (b) 还可看到,本文算法和 LTHC 算法有相对一致的平均 ETE 延迟。但在大多数情况下,本文算法获得了最低的平均 ETE 延迟;如图 6 (c) 可见,只有本文算法能够满足延迟要求。LTHC 算法可以保证延迟界限,直到节点密度为 8。当节点密度大于 8 时,LTHC 算法的性能在要求之下。如当节点密度为 10 时,对于本文算法,20 s 内 98.0% 的数据包能到达接收器,而在 LTHC 和 RAW 算法分别为 90.5% 和 21.7%。

#### 3.2.2 事件速率的影响

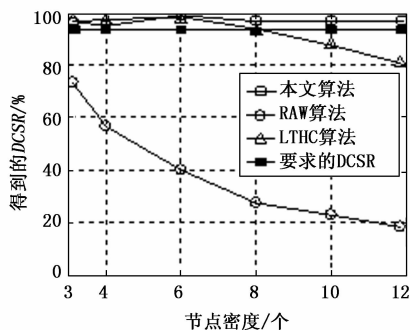
比较 3 种算法在 0.1~2 packet/s 不同事件速率值下的网络性能。从图 7 (a) 可见,随着事件速率的增大,PDR 有减小的趋势。但 LTHC 算法的下降幅度最大,其次是本文算法和 RAW 算法。因为与 LTHC 算法和本文算法相比,



(a) 对PDR的影响



(b) 对平均ETE延迟的影响



(c) 对得到的DCSR的影响

图 6 节点密度的影响

RAW 算法的跳数趋于最小。如当事件速率为 2 packet/s 时,对于 RAW 算法,有 99.58% 的数据包可以成功交付到接收器,而对于本文算法和 LTHC 算法,分别为 98.34% 和 96.85%。尽管本文算法的 PDR 略低于 RAW 算法,但在 WSNs 的大多数场景中仍然可以接受。

在延迟方面,从图 7 (b) 可见,3 种算法的平均 ETE 延迟值保持相对一致。原因是平均 ETE 延迟更多依赖于节点密度而不是事件速率。但本文算法在 3 种算法中仍获得最低的平均 ETE 延迟。如当事件速率为 1.5 packet/s 时,本文算法的数据包转发到接收器的平均时间为 9.8 s,而在 LTHC 和 RAW 算法分别为 12.2 s 和 27.4 s。

图 7 (c) 所示为满足平均 ETE 延迟约束 20 s 和所要求的 DCSR 为 95% 的约束条件下的数据包的比例。可见,本文算法和 LTHC 算法可以满足所要求 DCSR,而 RAW 算法不能满足。但本文算法得到的 DCSR 比 LTHC 算法的要高。如当事件速率为 1.0 packet/s 时,本文算法有 96.9% 的数

据包可以在延迟约束内成功到达接收器，而 LTHC 和 RAW 算法分别为 95.5% 和 27.3%。

本文算法不仅满足了要求的延迟，而且与现有算法相比，还可以获得更低的延迟。此外，本文算法可以在不同的网络参数下实现较高的 PDR。

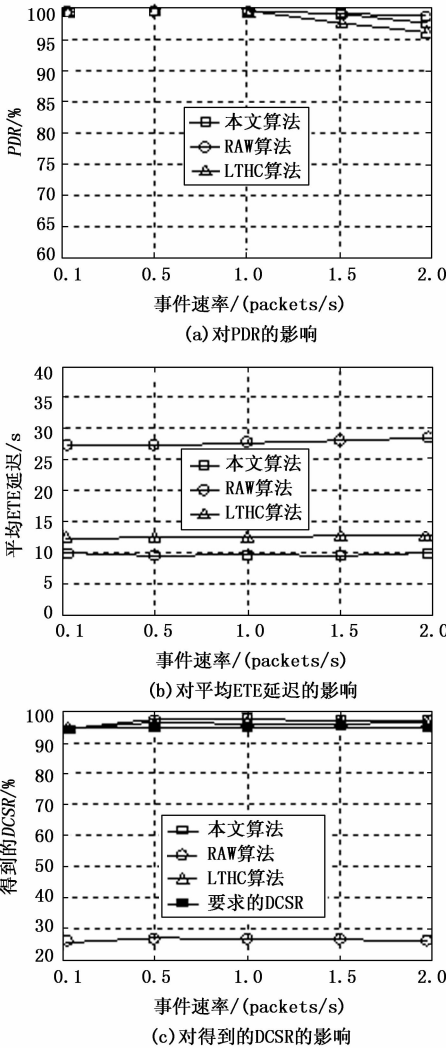


图 7 事件速率的影响

### 3.2.3 源节点数量的影响

从图 8 (a) 可以看出，当源节点数量增加时，PDR 有降低的趋势，但 LTHC 算法下降最大。如当源节点数为 16 时，LTHC、本文算法和 RAW 算法的 PDR 分别为 96.6%、98.0% 和 99.3%。

在平均 ETE 时延方面，从图 8 (b) 可见，3 种算法保持比较平缓，但本文算法的延迟最低。这是由于占空比间隔而不是源节点的数量在平均 ETE 延迟中起了重要作用。因此，不同的源节点数量仍能使数据包延迟保持相对一致。

此外，从图 8 (c) 可以看出，本文算法和 LTHC 算法可以满足要求的 DCSR，而 RAW 算法不能满足。在所有情况下，本文算法都得到了最高的 DCSR。如当有 8 个源节点时，20 s 内能将 96.9% 的数据包发送到接收器，而 LTHC 和 RAW 算法分别为 95.5% 和 27.2%。

根据这些结果，可以得到结论：在给定的 DCSR 下，

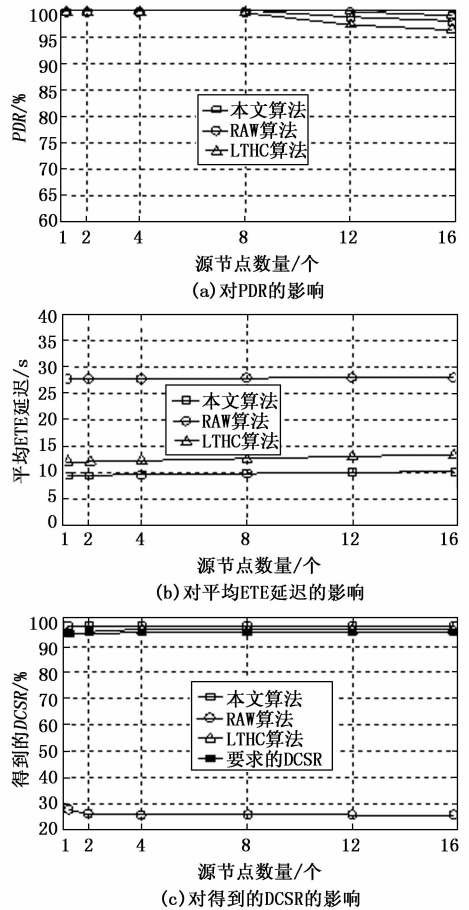


图 8 源节点数的影响

## 4 结束语

许多 WSNs 应用都要求低能耗和特定的包延迟，如森林火灾检测和入侵者目标探测；本文研究了在占空比 WSNs 中的最大化占空比间隔优化问题，使得数据包在一个给定的成功概率的延迟约束内路由到接收器。此外，本文的算法根据本地信息进行路由转发决策，不需要节点间的时间同步；为了使占空比间隔的值最大化，计算了 ETE 延迟的分布，它是占空比间隔和其他网络参数（如节点数量、总面积、节点的通信范围等）的函数。因此，可以通过调整占空比间隔来满足给定的延迟要求；此外，提出的算法还允许操作员预测一个 WSNs 中某个区域的节点总数；仿真结果表明，本文提出的路由算法可以根据各种需求变化调整占空比间隔，以满足所要求的 DCSR。与其他算法相比，本文算法可以获得更高的 PDR 和更低的平均 ETE 延迟。

### 参考文献:

[1] 潘建民, 董必龙, 吕志博. 无线传感器网络技术的军事应用 [J]. 数字通信世界, 2017 (9): 165.

- [2] 赵继春, 孙素芬, 郭建鑫, 等. 基于无线传感器网络的设施农业环境智能监测系统的设计 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41 (4): 146-151.
- [3] 蒋丹, 董欣. 无线传感器网络在环境监测系统中的研究与应用 [J]. 环境与发展, 2018, 30 (3): 166, 168.
- [4] CHEN Q, GAO H, CAI Z P, et al. Distributed low-latency data aggregation for duty-cycle wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26 (5): 2347-2360.
- [5] 秦丹. 确定网络中的多约束双路径路由算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [6] 赖晓翰, 文昊翔, 陈隆道. 潮间带无线传感器网络路由算法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2018, 52 (12): 2414-2422.
- [7] KIM J, LEE J W. Energy adaptive MAC for wireless sensor networks with RF energy transfer: algorithm, analysis, and implementation [J]. Telecommunication Systems, 2017, 64 (2): 293-307.
- [8] 纪鹏菲, 李振波, 张铮, 等. 基于同步调度的低占空比无线传感器网络 MAC 协议 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (1): 27-29.
- [9] 赵春华, 邓蕾, 汤宝平, 等. 基于信标同步触发的机械振动 WSNs 传输休眠时序调度方法 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (22): 98-103.
- [10] ZHANG X M, TAO L, YAN F, et al. Shortest-latency opportunistic routing in asynchronous wireless sensor networks with independent duty-cycling [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19 (3): 711-723.
- [11] 吴戈, 纪鹏菲, 张铮, 等. 基于异步调度的低延时无线传感器网络 MAC 协议 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (上接第 329 页)
- [8] 顾鑫, 王海涛, 汪凌峰, 等. 基于不确定性度量的多特征融合跟踪 [J]. 自动化学报, 2011, 37 (5): 550-559.
- [9] ARULAMPALAM S, MASKELL S, GORDON N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50 (2): 174-188.
- [10] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1977, 39 (1): 1-38.
- [11] 茆诗松, 王静龙, 濮晓龙. 高等数理统计 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 赵康, 王正勇, 何小海, 等. 基于改进粒子滤波的视觉目标跟踪 [J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2019, 56 (5): 875-882.
- [13] DOUCET A, GODSILL S J, ANDRIEU C. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering [J]. Statistics and Computing, 2000, 10 (3): 197-208.
- [14] JULIER S, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proceeding IEEE, 2004, 92 (3): 401-422.
- (6): 19-22.
- [12] DAI J H, DEGTYAREV D, GAO J Y, et al. Design and implementation of RAP-a randomized asynchronous protocol for data aggregation in wireless sensor networks [C] //2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Big Island, HI, USA, 2020: 980-986.
- [13] PUCUO C, QI A Q. Topology control algorithm for wireless sensor networks based on link forwarding [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 322 (5): 2038-2043.
- [14] 张长森, 胡宇鹏, 陈鹏鹏. 基于 Quorum 的低占空比 WSNs 最优延迟可靠路由算法 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33 (11): 79-83.
- [15] CHO H S, SO J M. Oppo-Flood: an energy-efficient data dissemination protocol for asynchronous duty-cycled wireless sensor networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2019 (1): 1-19.
- [16] 沈中, 张鹏, 杨璐璐. 占空比无线传感器网络最小期望延迟路由方法 [P]. 中国: CN201410766764. 2018-05-25.
- [17] 徐震, 杨蕾, 周龙. 低占空比无线传感网络中端到端的时延路由协议设计 [J]. 武汉轻工大学学报, 2016, 35 (4): 73-77.
- [18] 李林, 徐震, 陈良银, 等. 低占空比 WSN 中一种低时延路由协议 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33 (11): 74-78.
- [19] 熊志利, 瞿少成. 无线传感器网络节点的自定位技术研究 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (z1): 319-321.
- [20] 叶礼邦, 郭新海, 齐伟伟, 等. 基于节点度约束的无线通信网拓扑模型 [J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39 (5): 37-40.
- [15] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filter [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2009, 54 (6): 1254-1269.
- [16] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, et al. High-speed tracking with Kernelized correlation filters [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37 (3) 583-596.
- [17] DANELLJAN M, HAGER G, KHAN F S, et al. Accurate scale estimation for robust visual tracking [C] //British Machine Vision Conference, Nottingham, 2014. Leeds: BMVA, 2014: 1-11.
- [18] GALOOGAHI H K, FAGG A, LUCEY S. Learning background-aware correlation filters for visual tracking [C] //International Conference on Computer Vision, 2017: 1144-1152.
- [19] LI Y, ZHU J. A scale adaptive Kernel correlation filter tracker with feature integration [C] //European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2014: 254-265.
- [20] BERTINETTOL, VALMADRE J, GOLODETS, et al. Staple: complementary learners for real-time tracking [C] //IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016: 1401-1409.