

文章编号: 1001-3806(2013)02-0251-05

紫外光无线传感器网络节能的研究与仿真

柯熙政 陈锦妮

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了减少无线传感器网络节点的能量消耗,采用紫外光作为无线传感器网络的信息载体,研究了紫外光传感器节点的能量模型。理论分析了单跳节能和多跳节能,得出了计算最优跳数的数学表达式,并对单跳通信、多跳通信和最优跳通信的平均能量消耗进行了计算机仿真,仿真结果与理论分析一致;对于多跳通信带来的能量消耗不均匀的问题,利用移动 sink 节点来解决,通过仿真对比了 sink 节点不同移动速率对网络平均能量消耗、丢包率和端到端时延的影响。结果表明,借助移动 sink 节点可以降低网络的平均能量消耗,但要根据场景选择合适的移动速率。

关键词: 光通信;紫外光通信;无线传感器网络;多跳通信;能量效率

中图分类号: TP929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.028

Research of energy-saving wireless sensor network based on UV light

KE Xi-zheng, CHEN Jin-ni

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to decrease the energy consumption of wireless sensor network nodes, ultraviolet was utilized as the signal carrier of wireless sensor network. Firstly, the energy consumption of single hop and multiple hops were studied based on the energy model of UV light sensor nodes, then the mathematical expression for calculating optimum hops was obtained. The average energy consumption of single hop communication, multiple hop communication and optimum communication were simulated, and the simulation results were consistent with theoretical analysis. Mobile sink node can resolve the uneven energy consumption problem resulting from multiple hop communication. The influence of network average energy consumption, loss packet ratio, and delay under different mobile velocity of sink node was simulated and analyzed. The simulation results indicate that the different mobile velocity of sink node have different influence on the network's performance, and that mobile sink node can decrease network average energy consumption by selecting suitable mobile velocity according to different scenes.

Key words: optical communication; ultraviolet communication; wireless sensor network; multiple hop communication; energy efficiency

引言

传感器网络是由大量体积小、价格便宜、电池供电、具有无线通信和监测能力的传感器节点组成。这些节点被高密度部署在监测区域,以达到监测物理世界的目的。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)在环境监测、军事、国土安全、交通管制、森林防火、目标定位等方面具有广泛的应用前景^[1]。由于传感器节点大多被部署在无人照看或者敌方区域,单个或者多个通信链路间传输的信息就会被攻击者窃听,从而分析出敏感数据或通过 WSN 中传输的信息包、流

量分析出节点的位置、作用等^[2],这样就无法保证传感器所采集数据的机密性和可靠性,感知保密任务的 WSN 网络的安全性将得不到保证。

为了保证传感信息的机密性和可靠性,有许多安全路由协议已经被提出,如无线传感器网络的入侵容忍路由机制协议(intrusion-tolerant routing in wireless sensor networks, INSENS)^[3]、已知位置的可信传感网络路由协议(trust routing for location-aware sensor networks, TRANS)等。这些安全路由协议主要采用链路层加密和认证、多路径路由、身份认证和认证广播等机制来抵御外部伪造的路由信息^[4],但是这两种安全机制的系统开销比较大,不利于传感器节点节省能量。ESCHENAUER 和 GLIGOR 提出的基本的随机密钥预分方案^[5]以及 CHEN, PERRING 提出的 Q 复合方案是一类基于密钥池的预配置方案^[6]。此类密钥管理方案虽然非常简单,但是节点被捕获后,容易泄露整个网络的密钥,安全性不高。多项池密钥方案^[7]和对称密

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2007F12);西安市科技计划资助项目(CXY1012(2))

作者简介:柯熙政(1962-),男,教授,博导,研究方向为大气激光通信及信号处理。

E-mail: xzke@263.net

收稿日期:2012-05-18;收到修改稿日期:2012-08-16

钥建立方案^[8]虽然能够有效地抵御节点被捕获,但是计算开销太大,也不利于节点能量的节省。可以看出,以上这些算法不能有效地节省节点的能量,这样会使仅靠电池供电的无线传感器节点的能量消耗得很快。当网络中一定数量的传感器节点的能量消耗殆尽时,整个 WSN 就无法工作了。

为了节省节点的能量,延长整个网络的生命期,选择紫外光作为 WSN 的信息载体。因为紫外光通信不仅具有发射功率小、频带宽、传输速率高、体积小等优点,而且与射频通信等无线通信方式相比,具有更好的区域保密性,使得通信不易被拦截和侦听,提高了信息传输的保密性^[9]。除此之外,利用紫外光无线通信一定的方向性,使 WSN 网络的路由过程有选择性地转发数据包,可以降低网络中节点的无用能量消耗,延长整个网络生命期。作者首先建立了紫外光 WSN 网络中节点的能量消耗模型,然后讨论了在什么情况使用单跳通信更节能,什么情况下采用多跳通信更节能,并求出了多跳通信时的最优跳数,最后讨论了移动 sink 节点以不同速率移动时对 WSN 的平均能量消耗、丢包率和端到端时延的影响。

1 紫外传感器网络能量消耗分析

1.1 无线传感器网络的能量消耗分布

无线传感器网络节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块^[10]。典型的传感器节点能量消耗分布如图 1 所示。从图 1 可以看出,应提高通信模块的能量使用率来延长 WSN 网络的生命期^[11]。

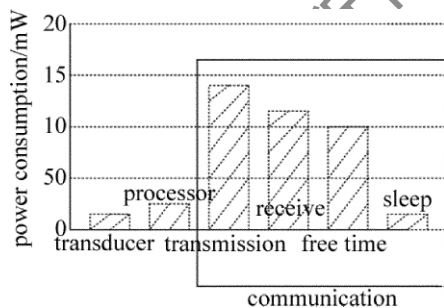


Fig. 1 Energy consumption distribution of sensor node

传感器节点通信模块的能量消耗主要是发送、接收、空闲和睡眠过程,其中发送消耗的能量是最大的。紫外光在视距通信时发送所消耗的能量与传输距离的平方成正比,所以要尽量减少发送的距离,增加发送次数达到节能的目的。利用紫外光进行组网可以实现多跳通信,这样可以节省节点的能量,但是跳数越多中间节点的路由负荷和物理层负荷就会增加,反而会消耗更多的能量,所以要寻找一个最优的跳数使网络中各节点的能量消耗达到最小。多跳通信方式中存在另一

个问题,WSN 中的节点能量消耗不均匀,靠近 sink 节点的节点能量消耗快,当能量耗尽时,WSN 网络的通信性能和覆盖范围就不能得到保证。因此,有人提出可以使用移动节点来提高 WSN 网络的性能^[12]。本文中假定所有传感节点在空闲和睡眠时消耗的能量是相同的,从发送和接收方面进行节能分析。

1.2 能量消耗模型

节点 i 与节点 j 之间传输数据的能量消耗定义如下:

$$E_t(i, j) = \alpha \cdot f_{ij} \quad (1)$$

$$E_r(j, i) = \beta \cdot f_{ij} \quad (2)$$

式中 $E_t(i, j)$ 表示第 i 个节点以速率 f_{ij} 发送数据到节点 j 单位时间内消耗的能量; $E_r(j, i)$ 表示第 j 个节点以速率 f_{ij} 在单位时间内接收数据时所消耗的能量; α 表示节点 i 发送 1bit 所消耗的总能量, β 表示节点 j 接收 1bit 所消耗的能量。 α 定义为:

$$\alpha = \begin{cases} a + b \cdot d_{ij}^2 & (d_{\min} \leq d_{ij} \leq d_{\max}) \\ a + b & (0 \leq d_{ij} \leq d_{\min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的距离, d_{\max} 表示节点 i 所能传输的最大距离, d_{\min} 表示节点 i 所传输的最小距离, a 表示节点发送 1bit 所消耗的能量, b 表示 1bit 数据传送单位距离所消耗的能量。本文中假定节点 i 发送 1bit 所消耗的能量等于节点 j 接收 1bit 所消耗的能量,即 $\alpha = \beta$, $b \cdot d_{ij}^2$ 表示传输 1bit 在路径上的能量消耗。 α 和 β 的单位为 nJ/bit, b 的单位为 $(\text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1}) / \text{m}^2$ 。

1.3 能量消耗分析

假设信源节点和 sink 节点间的距离固定为 d_{\max} , 且节点间每跳距离相等并表示为 d_{\min} , 可以求出源节点和 sink 节点间的跳数使全网能量消耗最少。图 2 为 1 维线性网络模型, 假设 $d_{\max} = kd_{\min}$, 其中 k 为跳数, 分以下两种情况讨论最优跳数。

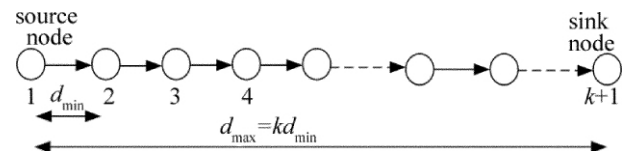


Fig. 2 1-D linear network model

(1) 源节点 1 直接将数据传送到 sink 节点 $k+1$ 。单跳传输情况下, 传输 1bit 所消耗的能量为:

$$E_{s, \text{hop}} = E_t(1, k+1) + E_r(k+1, 1) = 2a + b(kd_{\min})^2 \quad (4)$$

多跳传输情况下, 传输 1bit 所消耗的能量为:

$$E_{m, \text{hop}} = \sum_{i=1}^k E_t(i, i+1) + \sum_{j=2}^{k+1} E_r(j, j-1) = 2ka + bkd_{\min}^2 \quad (5)$$

当 $E_{s, \text{hop}} \leq E_{m, \text{hop}}$ 时, 采用单跳最节省能量, 此时有 $k \leq$

$2a/(bd_{\min}^2)$ 。

(2) 源节点 1 通过 k 跳 d_{\min} 距离将数据传送到 sink 节点 $k+1$ 。当 $k \geq 2a/(bd_{\min}^2)$ 时,存在最优跳数 N 使 E_{m_hop} 最小。设源节点到 sink 节点的距离为 R ,那么 $d_{i,j+1} = R/N$,将其带入(2)式得到 $E_{m_hop} = 2aN + bR^2/N$,可以求出使 E_{m_hop} 最小的最优跳数 $N_{opt} = R\sqrt{\frac{b}{2a}}$ 。从 $N_{opt} = R\sqrt{\frac{b}{2a}}$ 可以看出,两节点间的最优距离 $d_{opt} = \sqrt{\frac{2a}{b}}$,可以看出最优距离仅与参量 a 和 b 有关。对于已知的网络,这两个常数是可知的。

2 仿真分析

2.1 不同跳数的平均能量消耗分析

紫外传感器节点模型如图 3 所示。每个节点各有一套收发装备,发射装备上有 6 个“日盲”波段的 LED^[13-14],每个 LED 的覆盖的区域为扇形,扇形的张角为 60° 。在拓扑发现时采用紫外光全向通信,6 个 LED 同时工作,节点 S 的两个邻居节点 B 和 C 都可以被覆盖到。当 S 节点和 D 节点之间进行数据传输时采用紫外光定向通信,S 节点只让覆盖 C 节点的 1 号管子工作,同样,节点 C 仅让覆盖 D 节点的 1 号管子工作,这样能减小节点的无用能量消耗。

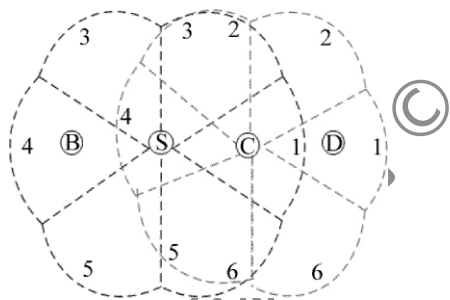


Fig. 3 UV sensor node model

仿真环境如图 4 所示,在 $600m \times 600m$ 的区域内配置 11 个节点,每个节点的初始化能量均为 $10J$ 。节点 1 为 source 节点,节点 11 为 sink 节点, $d_{max} = 550m$, $d_{min} = 55m$,即最多可以通过 10 跳 d_{min} 距离将数据由源节点中继到 sink 节点。取 $a = 50nJ/bit$, $b = 8.2pJ \cdot bit^{-1}/m^2$,根据上面分析所得最优跳数为 $N_{opt} =$

$$R\sqrt{\frac{b}{2a}} = 5。$$

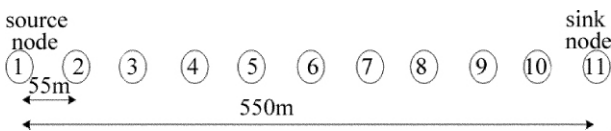


Fig. 4 11 node linear distribution topological diagram

作者对单跳通信、多跳通信和最优跳通信进行了计算机仿真(如图 5 所示),对比分析了 3 种通信方式的能

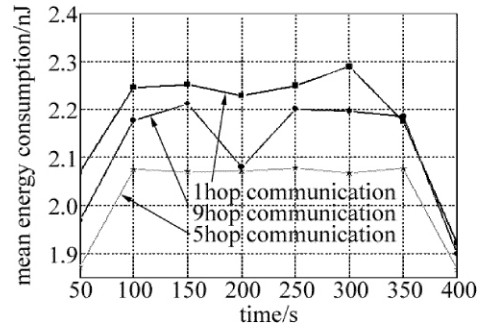


Fig. 5 Comparison among mean energy consumption 1 hop communication, 9 hop communication and 5 hop communication

量消耗。从图 5 可以看出 5 跳通信要比 1 跳通信和 9 跳通信都节省能量,与第 1.3 节中分析的结果一致。

2.2 sink 节点不同移动速率的平均能量消耗、丢包率和时延分析

为了了解不同移动速率对网络性能的影响,采用 sink 节点不同移动速率通过能量消耗模型对平均能量消耗、丢包率和端到端的时延进行了仿真比较。紫外传感器节点的模型和仿真场景与第 2.1 节中的相同,仿真时采用了紫外光全向通信和定向通信相结合的方式。兴趣扩散时每个节点的 6 个 LED 同时工作,采用紫外光全向通信,这样可以保证在网络拓扑改变的情况下,网络中的每个节点都清楚自己的邻居节点,为数据的回传建立梯度。而数据由源节点向 sink 节点中继时采用紫外光定向通信,只有覆盖了转发节点的 LED 管才工作,其它 LED 管处于睡眠状态,这样也可以减少节点能量消耗。

sink 节点从 2s 时开始向最优跳数处直线移动,移动速率分别为 $0m/s, 10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s, 50m/s, 60m/s, 70m/s$ 。从图 6 可以看出,随着移动速率的增加,能量消耗并没有逐渐减少,而在移动速率为 $50m/s$ 时,整个网络的平均能量消耗达到最小。这是因为单跳距离为 $55m$,sink 节点以不同的速率向最优跳数处移动时也要向邻居节点广播兴趣包,以 $50m/s$ 运动时 sink 节点到所有邻居节点的平均距离要小于其它移动速率。由于发送数据所需要的能量与距离的平方是成正比的,所以距离越小消耗的能量就越少。

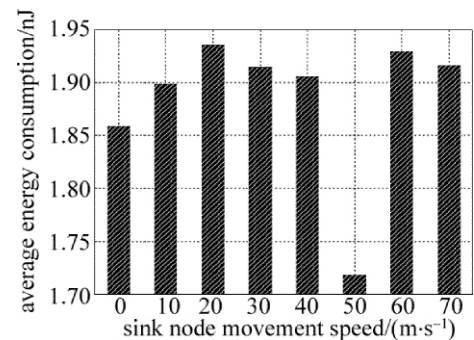


Fig. 6 Comparison among average energy consumption of sink node with different movement speed

所以 sink 节点以 50m/s 移动时整个网络的平均能量消耗是最小的。

图 7 是 sink 节点不同移动速率的丢包率对比,在 3s ~ 6s 之间丢包率随着移动速率的增加逐渐增加,当网络拓扑稳定后移动速率为 50m/s 的丢包率比其它情况都要大,这是由于 50m/s 运动时, sink 节点到所有邻居节点的平均距离要小于其它移动速率,丢包主要发生在数据由源节点向 sink 节点回传的过程中,数据回传的路径是依据兴趣扩散时所建立的梯度,可是 sink 节点的移动有可能使得梯度中存在的路径不可达,所以节点会不停地丢包,直到 sink 节点再次广播兴趣,网络中的节点重新更新自己的邻居节点,建立新的梯度后丢包率才会下降。不同的移动速率新梯度的建立时间也是不一样的,从图 7 也可以明显看到这一点。

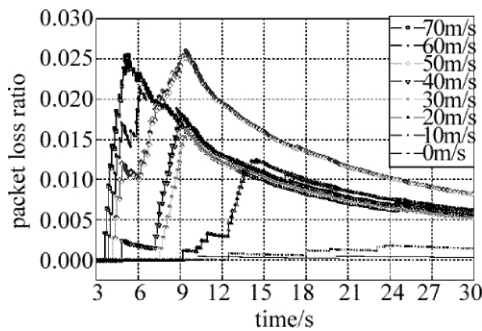


Fig. 7 Comparison of packet loss ratio of sink node with different movement speed

图 8 ~ 图 13 是 sink 节点移动速率为 50m/s 与移动速率分别为 0m/s, 10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s, 60m/s 时的端到端时延对比。从图 8 中可以看出,当 sink 节点开始移动后,移动速率为 50m/s 要比 sink 节点不移动时的时延要小。这是因为 sink 节点移动会使源节点到 sink 节点的跳数变少,而为了避免广播碰撞,每一跳在 MAC 层都会有随机时延,那么经过的跳数越少,总的随机时延就会越小,端到端的时延就越小。从图 9 到图 13 可以看出,当网络拓扑变化时, sink 节点以 50m/s 的速率移动时的端到端时延比移动速率为 0m/s, 10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s 都要小,而

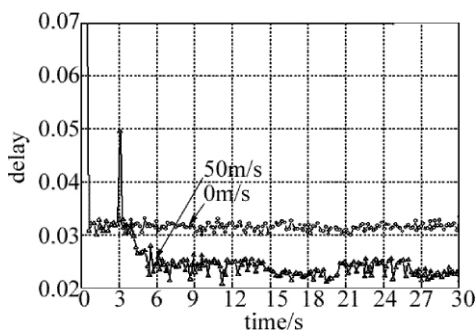


Fig. 8 Comparison between delay with 0m/s movement speed and 50m/s movement speed

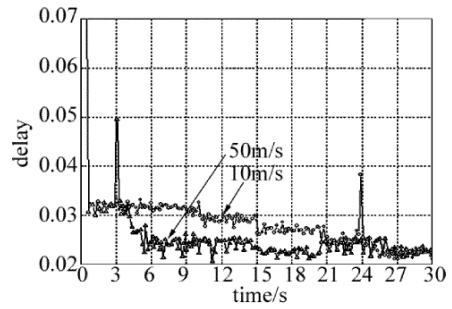


Fig. 9 Comparison between delay with 10m/s movements speed and 5m/s movement speed

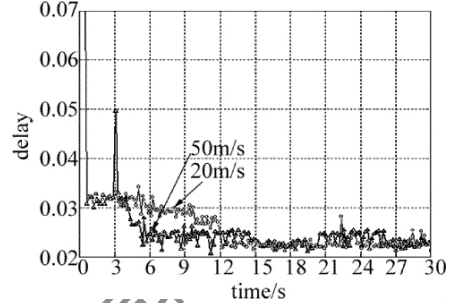


Fig. 10 Comparison between delay with 20m/s movement speed and 50m/s movement speed

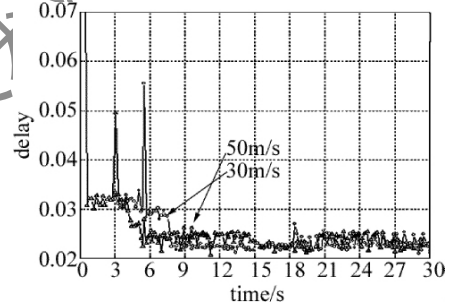


Fig. 11 Comparison between delay with 30m/s movement speed and 50m/s movement speed

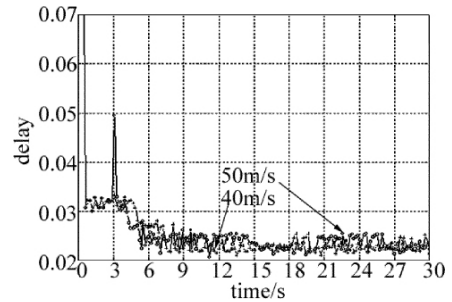


Fig. 12 Comparison between delay with 40m/s movement speed and 50m/s movement speed

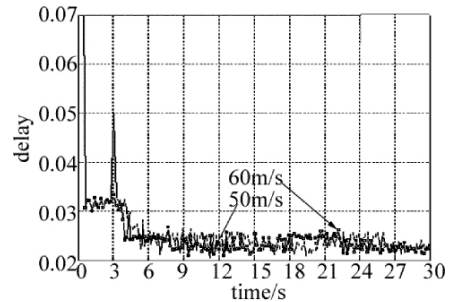


Fig. 13 Comparison between delay with 60m/s movement speed and 50m/s movement speed

比 60m/s 的时延要大,当拓扑稳定后,端到端时延大致相同。这是因为当 sink 节点以不同速率移动时,速率大, sink 节点距离源节点的距离就越小,跳数也就越少,那么端到端的时延就越小。当拓扑稳定后,源节点到 sink 节点的跳数也就固定了,所以端到端时延不会有大的变化。

3 结束语

分析了紫外无线传感器节点的能量模型,在此基础上讨论了单跳节能和多跳节能,并计算出了多跳通信的最优跳数,然后对单跳通信、多跳通信和最优跳通信的能量消耗进行了计算机仿真,仿真结果表明,最优跳通信所消耗的能量比单跳通信和多跳通信都要小。为了解决网络中节点能量消耗的不均匀性,采用移动 sink 节点来提高网络的性能。对 sink 节点不同移动速率下的能量消耗、丢包率和端到端时延进行了仿真比较,结果表明:借助移动 sink 节点可以降低网络的平均能量消耗,但要根据场景选择合适的移动速率;在网络拓扑不稳定时,丢包率随着 sink 节点移动速率的增加逐渐增加,而端到端时延比 sink 节点不移动的情况都要小。本文中的仿真结果是基于线性拓扑的,对于随机分布的拓扑,移动 sink 节点对网络性能的影响以及怎样降低网络的丢包率有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] PEI Q Q, SHEN Y L, MA J F. Survey of wireless sensor network security techniques[J]. Journal on Communications 2007, 28(8): 113-122.
- [2] ZENG Zh F, QIU H M, ZHU L H. Risk analysis and security countermeasure about wireless sensor network[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(1): 104-143.
- [3] DENG J, HAN R, MISHRA S. INSENS: intrusion-tolerant routing in wireless sensor network[C]//International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing. In the Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS 2003). Providence, Rhode Island, USA: IEEE Computer Society, 2003, 5: 1-16.
- [4] TANACHAIWIWAT S, DAVE P, BHINDWALE R, *et al.* Secure locations: routing on trust and isolating compromised sensors in location-aware sensor networks[C]//Proceedings of The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003). Los Angeles, California, USA: Association for Computing Machinery, 2003: 1-4.
- [5] ESCHENAUER L, GLIGOR V D. A key-management scheme for distributed sensor network[C]//Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communication Security. Washington DC, USA: Association for Computing Machinery 2002: 41-47.
- [6] CHEN H, PERRING A, SONG D. Random key predistribution scheme for sensor networks[C]//Proceedings of IEEE Security and Privacy. Berkeley, CA, USA: IEEE Press 2003: 197-213.
- [7] DU W, DENG J, HAN Y S, *et al.* A Pairwise key predistribution scheme for wireless sensor network[C]//Proceedings of the 9th ACM Conference Security. Washington DC, USA: Association for Computing Machinery 2003: 1-10.
- [8] LIU D, NING P. Location-based pairwise key establishments for static sensor network[C]//The 9th ACM(Association for Computing Machinery) Conference on Computer and Communication Security. Washington DC, USA: Association for Computing Machineng, 2003: 72-82.
- [9] MENG Q L. Research on key technologies for wireless optical networks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 1-5 (in Chinese).
- [10] ESTRIN D. Wireless sensor networks tutorial part IV: sensor network protocols[C]//Proceedings of the 8th ACM Mobicom. Atlanta, Georgia, USA: Association for Computing Machinery 2002: 1-120.
- [11] YU H P, WU Ch X, GUO M. Energy efficiency analysis of mobile sinks wireless sensor network[J]. Computer Engineering, 2009, 35(13): 127-129.
- [12] SOMASUNDARA A A, KANSAL A, JEA D, *et al.* Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(8): 958-973.
- [13] REILLY D M, MORIARTY D T, JOHN A. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks[J]. Proceedings of SPIE 2004, 5611: 244-254.
- [14] SHAW G A, SIEGEL A M, MODEL J. Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links[J]. Proceedings of SPIE 2006, 6231: 244-254.