

基于临近空间飞行器的区域自组网优化部署算法

朱志良^① 叶宁^② 刘军^② 高畅^②

^①(东北大学软件学院 沈阳 110004)

^②(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘要: 该文针对基于临近空间飞行器的新型区域自组织网络, 提出一种优化部署方案。采用线性递减权值粒子群算法, 对于临近空间飞行器节点, 一个粒子代表所有飞行器节点坐标集合, 以最大化网络覆盖空间的联合通信覆盖率为目标, 进行节点的优化部署。对于地面骨干节点, 一个粒子代表一个网络分区内骨干节点坐标, 以最多覆盖节点数和最小平均跳数为目标, 进行初始化。网络运行过程中根据任务区域内数据业务分布情况, 以趋近数据量多、业务优先级高的区域为目标, 动态调整更新地面骨干节点位置。仿真结果表明, 所提方案能为上层协议的运行提供良好基础, 使网络分组投递率、延迟和开销等性能得到改善。

关键词: 自组网; 临近空间飞行器; 网络部署; 粒子群优化算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0915-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00729

Deployment Optimization Algorithm for Regional MANET Containing Near Space Vehicles as a Part

Zhu Zhi-liang^① Ye Ning^② Liu Jun^② Gao Chang^②

^①(Institute of Software, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

^②(Institute of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Regional MANET which contains near space vehicles as a part is a new kind of Ad hoc network. This paper proposed a deployment scheme for such network based on Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. For nodes which are near space vehicles, their deployment aims at maximizing joint communication covered space of the network. One particle represents a set of positions of them and optimized deployment positions for near space vehicles can be obtained with iterative method. For controllable backbone nodes on earth surface, their deployment is executed within each groups which they belong and thus one particle represents position of one backbone node. During network initial stage, the deployment aims at maximizing the number of common nodes covered by backbone nodes and minimizing average hops from common nodes to backbone nodes. During network running stage, positions of backbone nodes are dynamically adjusted to best serve their groups. The dynamic deployment mechanism ensures backbone nodes are closest to the most heavily loaded nodes, or to the nodes that generate packets of the highest priority. Simulation results show that the proposed deployment scheme can provides better operation basis for upper layer protocols in terms of network performance metrics such as throughput, latency and control overhead.

Key words: MANET; Near space vehicles; Network deployment; Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm

1 引言

自组织网络是一种移动通信和计算机网络相结合的网络, 具有无中心、自组织、多跳路由、分布控制、节点移动等特点, 可以被快速地部署和重新配置来满足特定应用的需要, 拓宽了移动通信的应

用领域, 具有广阔的发展前景。

随着无线通信的迅速发展, 自组织网络的外延在逐步扩大。在地面, Ad hoc 网络和传感器网络已在办公、抢险、抗灾、救援、探险、军事等方面得到广泛应用; 在空中, 由飞机、飞艇等航空器作为节点的航空自组网也成为研究的热点。近年来, 临近空间(指距地面约 20-100 km 的区域)的研究日益引起重视, 临近空间飞行器与其他飞行器相比, 具有生存能力强、滞空工作时间长、侦察视野广阔、

2010-07-12 收到, 2010-10-08 改回

国家自然科学基金(60939002)和中央高校基础科研费(404008)资助课题

*通信作者: 朱志良 zzl@mail.neu.edu.cn

效费比高、预警功能强、可作通信中继平台等优势,对于情报收集、侦察监视、通信保障等具有重要的价值,可以增强高时效要求的紧急任务执行能力,具有全天候工作能力及显著的区域性应用优势^[1,2]。

将部署在不同空间区域、执行不同任务的通信设备进行整合,组成一个由海洋、陆地、空中到临近空间的天空地一体化“混成网络”,按照资源的最大有效综合利用原则,通过通信链路的互通互联,构成智能化体系,形成基于临近空间飞行器的区域自组网,其网络模型如图1所示。

虽然网络拓扑具有动态性,但节点的运动并不是完全无规律可循,例如,临近空间的系留式气球等节点仅在小区域内缓慢运动,同一编队的节点相对运动较小。因此,在组网过程中可以通过合理划分时间片等方法进行简化,一个时间片内拓扑相对稳定的节点组成骨干网,如图1中实线连接的子网,骨干网在网络运行中发挥更大的作用,而其他动态节点,多数情况仅作为接入节点,例如在路由过程中通常不作为路径上的转发节点。

因此整个网络性能受骨干网影响较大,对其进行优化部署具有重要意义。

与传统的无线网络相比,基于临近空间飞行器的区域自组网在成网方式、通信模式和资源能力等方面具有不同的特点,如它的网络结构具有显著的分级特征,组成复杂,网内节点功能迥异;网络中既包括水平方向的通信也包括垂直方向的通信;存在远距离传输链路,通信时延较长,时延抖动大;含有编队移动的节点等等。现有应用于蜂窝移动通信网络和平面无线自组织网络的部署算法大都对节点的分布根据网络的特点做了相应假设,且部署的目标往往特定于网络某一方面的应用,因此不适合直接用于基于临近空间飞行器的区域自组网部署^[3]。

现有移动通信网络中的优化部署策略^[4-6]包括:不降低信噪比的前提下,最小化发射功率;提

高带宽的利用率,以加强对媒体业务的支持;以及在保证覆盖率的同时,降低成本。现有自组织网络中的优化部署策略包括:通过控制传感器节点的密度和位置来保证对被监视区域的较优覆盖^[7,8];通过控制簇头节点的位置实现较小耗能和(或)较高效率的数据传输^[9,10];通过簇规模的调整实现以较小代价和较高精度对目标进行跟踪定位^[11,12]等等。

本文围绕基于临近空间飞行器的区域自组网的特点,提出一种基于线性递减权值粒子群优化算法^[13,14]的网络优化部署方案:对临近空间飞行器节点和地面骨干节点的位置进行初始优化,在网络运行当中,初始的最优位置可能变得无效,这要取决于网络的状态和各种扩展性的因素,因此动态调整是网络运行中必要的节点部署策略。

2 基于临近空间飞行器的区域自组网优化部署算法

临近空间飞行器节点的主要任务是空间监视和数据中继,广阔的覆盖性、经济的系统成本是部署时主要考虑的因素;地面骨干节点的主要任务是网络分区内部数据采集处理和网络分区之间数据交互,可靠的数据传输、更小的通信延时和更低的通信开销是部署时主要考虑的因素。网络优化部署结构图如图2所示,可以看出,网络的优化部署是一个多目标优化问题。

粒子群优化算法(PSO)是解决多目标优化问题的算法之一,它的优势在于简单容易实现,没有大量参数的调节,同时该算法具有记忆功能,所有粒子都保存较优解的信息,能以较快的速度收敛到全局最优解。

设计部署算法的基本思想是:对于临近空间飞行器节点,一个粒子代表所有飞行器节点坐标集合,以最大化网络覆盖空间和最小部署成本为粒子迭代的策略,计算临近空间飞行器节点的优化部署

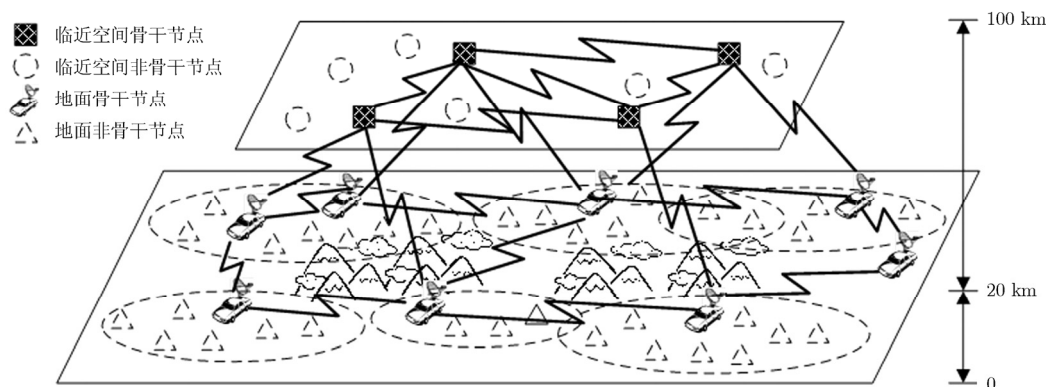


图1 基于临近空间飞行器的区域自组网模型

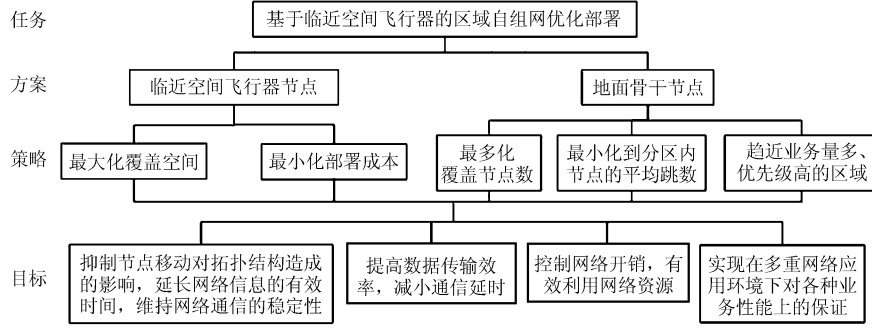


图 2 基于临近空间飞行器的区域自组网优化部署结构图

位置；对于地面骨干节点，一个粒子代表一个网络分区内骨干节点坐标，在每个分区内独立部署，网络运行前以最多覆盖节点数和最小平均跳数为粒子迭代更新策略，计算出初始优化部署位置，网络运行过程中根据任务区域内数据业务分布情况，以趋近业务量多、优先级高的区域为目标动态调整地面骨干节点位置。部署方案以维持网络通信稳定性，延长网络信息有效时间，削弱节点移动对通信稳定性的影响，提高数据传输效率，减小通信延时，控制网络开销，有效利用网络资源为目标，实现多重网络应用环境下对各种业务传输服务性能方面的有效保证。

2.1 临近空间飞行器节点部署

2.1.1 临近空间飞行器节点部署的目标函数 定义临近空间飞行器节点部署的目标函数如式(1)所示。

$$E_s(\text{粒子 } PS_i) = \frac{\text{临近空间飞行器节点联合通信覆盖空间}}{\text{网络目标部署空间}} \quad (1)$$

部署时根据所能承受的部署开销预设临近空间飞行器节点数量，目标函数值越大，对应的适应值越好，空间通信覆盖率越大。经过迭代得到满足条件的最优坐标集合。

设目标区域为一个 3 维空间，用 x_size 表示目标区域的长度， y_size 表示目标区域的宽度， z_size 表示目标区域的高度， V 表示目标区域的总体积，则 $V = x_size \times y_size \times z_size$ 。设临近空间飞行器节点的通信半径为 R ，设连通模型为布尔模型 $\alpha_{i,j} = \begin{cases} 0, & i, j \text{ 不连通} \\ 1, & i, j \text{ 连通} \end{cases}$ ，且节点间独立。首先将目标区域划

分为 $Nc = a \times b \times c$ 个单元格，用 Δv 表示一个单元格的体积，则有 $\Delta v = \frac{V}{Nc} = \frac{x_size \times y_size \times z_size}{a \times b \times c}$ ，

其中单元格 (x_m, y_n, z_k) 被临近空间飞行器节点 i 覆盖的概率 $(m=1,2,\dots,a; n=1,2,\dots,b; k=1,2,\dots,c)$ ：

$$P\{R_i\} = P_c(x_m, y_n, z_k, i) = \begin{cases} 1 & \text{单元格中心距节点距离} \leq R \\ 0 & \text{单元格中心距节点距离} > R \end{cases}$$

由于节点间彼此独立，可以得到被节点 i 或节点 j 覆盖的概率 $P\{R_i \cup R_j\} = 1 - P\{\bar{R}_i \cap \bar{R}_j\} = 1 - P\{\bar{R}_i\}P\{\bar{R}_j\}$ ，则单元格 (x_m, y_n, z_k) 被节点集合覆盖的概率如式(2)。

$$p\left\{\bigcup_{i=1}^N R_i\right\} = 1 - p\left\{\bigcap_{i=1}^N \bar{R}_i\right\} = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P_c(x_m, y_n, z_k, i)] \quad (2)$$

其中 $i=\{1,2,\dots,N\}$ ， N 表示预部署的临近空间飞行器节点个数，则目标函数的适应值由式(3)获得。

$$E_s(\text{粒子 } PS_i) = \frac{\text{临近空间飞行器节点联合通信覆盖空间}}{\text{网络目标部署空间}} = \frac{\sum_{m=1}^a \sum_{n=1}^b \sum_{k=1}^c p\left\{\bigcup_{i=1}^N R_i\right\} \Delta v}{V} \quad (3)$$

2.1.2 临近空间飞行器节点部署算法 部署临近空间飞行器节点时，一个粒子就是一种规划策略，部署的具体步骤如下：

(1)在给定的部署空间中，随机初始化 m 个粒子 $PS_i, i=1,2,\dots,m$ ，即随机生成 m 组临近空间飞行器节点位置序列： $(L_1^1, L_2^1, \dots, L_N^1), (L_1^2, L_2^2, \dots, L_n^2), \dots, (L_1^m, L_2^m, \dots, L_n^m)$ ，其中 n 表示节点数， $L_j^i = (x_j^i, y_j^i, z_j^i)$ ， $z_j^i \geq 20 \text{ km}$ ， $i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$ ，每组节点都能构成连通图即每个节点通信范围内至少有一个邻居节点；同时，随机生成 m 组粒子移动速度序列： $(V_1^1, V_2^1, \dots, V_N^1), (V_1^2, V_2^2, \dots, V_n^2), \dots, (V_1^m, V_2^m, \dots, V_n^m)$ ，每个粒子的 $pbest^i$ 坐标设置为其当前位置。

(2)粒子性能的优劣程度取决于目标函数所确定的适应值，每个粒子都有一个由目标函数决定的适应值，根据式(3)计算每个粒子的适应值 $E_s(PS_i)$ ，同时根据目标函数计算其相应的个体极值 $E(pbest^i)$

(覆盖率), $i=1,2,\dots,m$ 。全局极值即最大的个体极值, 其对应的粒子的当前位置记为 $gbest$ 。

(3) 对每个粒子, 将其适应值与个体极值 $E_S(pbest^i)$ 进行比较, 如果较优, 则更新当前个体极值和 $pbest^i$ 。

(4) 对每个粒子, 将其适应值与全局极值 $E_S(gbest)$ 进行比较, 如果较优, 则更新当前全局极值和 $gbest$ 。

(5) 每个粒子按照计算出来的适应值函数值来更新所代表的规划策略中飞行器节点的坐标序列。更新的过程中, 粒子根据式(4)和式(5), 更新自身的位置和飞行速度, 采用惯性递减权值(Linearly Decreasing Weight, LDW)策略^[14]来提高PSO算法的寻优能力。

$$V_i = \omega \times V_i + c_1 \times \text{rand}() \times (pbest_i - L_i) + c_2 \times \text{rand}() \times (gbest - L_i) \quad (4)$$

$$L_i = L_i + V_i \quad (5)$$

其中式(4)中第1部分称为记忆项, 表示上次速度大小和方向的影响; 第2部分称为自身认知项, 是从当前位置指向粒子自身最好位置的一个矢量, 表示粒子的动作来源于自己经验的部分; 公式的第3部分称为群体认知项, 是一个从当前点指向种群最好点的矢量, 反映了粒子间的协同合作和知识共享。 $\text{rand}()$ 是均匀分布在(0,1)之间的随机数, c_1 和 c_2 是两个学习因子, 一般取2, 分别代表将每个粒子推向 $pbest_i$ 和 $gbest$ 位置的统计加速项的权值。 ω 非负, 称为惯性因子, ω 的引入使PSO算法性能有了很大提高, 算法在开始时探索较大的区域, 较快地定位代表临近空间飞行器节点集合的粒子最优解的大致位置, 随着 ω 逐渐减小, 粒子速度减慢, 开始精细的局部搜索, 可以加快收敛速度, 从而提高算法的性能。

$\omega = \omega(k)$, $\omega(k)$ 由式(6)得到

$$\omega(k) = \frac{(\omega_{ini} - \omega_{end})(T_{max} - k)}{T_{max}} + \omega_{end} \quad (6)$$

其中 T_{max} 为最大进化代数, 设计中取 $T_{max}=1000$; ω_{ini} 为初始惯性权值, 取 $\omega_{ini}=0.9$; ω_{end} 为进化至最大代数时的惯性权值, 取 $\omega_{end}=0.4$, ω 从0.9到0.4以 $(\omega_{ini} - \omega_{end})/T_{max} = 1/2000$ 为线性系数随着迭代次数而递减。

(6)达到停止准则, 停止更新迭代, 其中, 迭代终止条件根据具体问题一般选为最大迭代次数 T_{max} 或(和)微粒群迄今为止搜索到的最优位置满足预定最小适应阈值; 同时输出最优解, 记录下的全局极值点的一组位置即为临近空间骨干节点的最优分布规划图。否则, 转到第(2)步, 继续迭代。

2.2 地面骨干节点部署

2.2.1 静态配置 网络初始化阶段在各任务区域内静态部署地面骨干节点位置, 地面骨干节点包括配备良好硬件设施, 能够与临近空间飞行器直接进行通信的节点, 还包括现有各类网络中的簇首节点、网关节点等拓扑中的关键节点。目标函数和子目标函数分别如式(7)–式(9)所示, 其中 p 和 q 为加权系数可根据具体应用分配不同的值。适应值函数值越大, 对应的适应值越好, 通信覆盖率越大, 信息有效时间越长, 通信效率越高, 经过迭代最终得到满足条件的一个任务区域内地面骨干节点的最优位置坐标。

$$E_L(PS_i) = pE_{L1}(PS_i) + qE_{L2}(PS_i) \quad (7)$$

$$E_{L1} = \frac{\text{骨干节点覆盖节点数}}{\text{任务区域内节点总数}} \quad (8)$$

$$E_{L2} = \frac{\text{区域内节点到骨干节点平均跳数}}{\text{预设跳数上限}} \quad (9)$$

与临近空间飞行器节点部署不同, 部署地面骨干节点时, 每个粒子 PS_i 代表一个地面骨干节点的部署策略, 粒子的位置即为地面骨干节点地理位置坐标, 部署步骤如下:

(1)在给定的任务区域 k 中, 随机初始化 m 个粒子 PS_i , $i=1,2,\dots,m$, 即随机生成 m 个区域 k 内地面部分骨干节点位置序列: $L_k^1, L_k^2, \dots, L_k^m$, $L_k^i = (x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, $i=1,2,\dots,m$, k 用来标识一个地面部分骨干节点所管辖的任务区域; 同时, 随机生成 m 组粒子移动速度序列: $V_k^1, V_k^2, \dots, V_k^m$, 每个粒子的 $pbest^i$ 坐标设置为其当前位置, 同时根据目标函数计算其相应的个体极值 $E_L(pbest^i)$ (覆盖率); 全局极值即最大的个体极值, 其对应的粒子的当前位置记为 $gbest$ 。

(2)地面骨干节点采集所辖任务分区内非骨干节点可达信息和跳数信息, 根据式(7)计算每个粒子的适应值 $E_L(i)$, $i=1,2,\dots,m$ 。

(3)对每个粒子, 将其适应值与个体极值 $E_L(pbest^i)$ 进行比较, 如果较优, 则更新当前个体极值和 $pbest^i$ 。

(4)对每个粒子, 将其适应值与全局极值 $E_L(gbest)$ 进行比较, 如果较优, 则更新当前全局极值和 $gbest$ 。

(5)根据式(4)和式(5), 更新每个粒子的位置和飞行速度。每个粒子按照计算出来的目标函数值来更新所代表的规划策略中地面部分骨干节点的地理位置坐标。

(6)达到停止准则, 停止更新迭代; 同时输出最优解, 记录下的全局极值点的位置即为一个地面部

分骨干节点的最优坐标。否则, 转到第(2)步, 继续迭代。

2.2.2 动态调整 网络运行过程中拓扑变化会引起网络中负载的重新分配, 失衡的负载可能导致网络瓶颈, 此时需要对网络进行调整, 调整方案包括信息收集、最优位置计算和骨干节点移动3个阶段:

(1)信息收集 地面部分骨干节点周期性地收集任务区域内节点的信息, 信息包括: 任务区域内节点坐标(用来计算距离骨干节点的跳数); 任务区域内节点需要借助骨干节点发送的数据分组数; 每个节点产生数据的优先级。

(2)最优位置计算 仍然采用基于惯性递减权值的 PSO 算法计算地面部分骨干节点的最优部署位置。为了提高所在网络任务分区内外的数据传输性能, 需要地面骨干节点趋近业务负载较重的节点, 并趋近数据业务优先级高的节点。当网络分区内各节点产生的数据量和分组优先级不同时, 骨干节点移动到多数产生大量数据的节点和多数所产生的分组优先级较高的节点一跳或短距离可达的位置范围内, 可以实现资源的优化利用。

设一个网络任务分区内有 n 个非骨干节点, 目标函数如式(10)。

$$E_{LD}(PS_i) = \min \sum_{j=1}^n f(\tau_j, \rho_j) |P(v_j, B_i)| \quad (10)$$

其中 ρ_j 表示网络分区内节点 v_j 产生的需要通过骨干节点转发的业务量。 τ_j 表示区域内节点 v_j 产生的需要通过骨干节点转发的数据的优先级别, $\tau_j=1,2,3$, 即将节点产生数据优先级分为3个等级——1级: 不紧急, 可以稍缓处理, 级别最低; 2级: 一般紧急, 正常处理; 3级: 十分紧急, 需要马上转发, 级别最高。 $f(\tau_i, \rho_i)$ 是与 ρ_i 和 τ_j 有关的函数, 本文定义 $f(\tau_i, \rho_i) = \alpha\tau_i + \beta\rho_i$, 其中 α 和 β 是业务量和优先级的系数, 可根据具体应用场景和用户需求进行设定。 $|P(v_j, B_i)|$ ——节点 v_j 距离骨干节点 B_i 的跳数, 可以通过网络分区内非骨干节点坐标或可达关系信息计算获得。目的坐标位置范围的迭代计算步骤与静态配置类似, 不赘述。

(3)骨干节点移动 在骨干节点移动阶段, 骨干节点将以最合理方式向最优位置移动, 本文暂不讨论如何控制骨干节点移动到计算出的目的位置范围内, 移动控制时可以使用文献[15]中所提出的方法。

3 仿真分析

利用 NS2 网络模拟软件, 将所提出的网络优化部署算法与其他几种部署方法进行对比, 其中, 中心部署方案是指将骨干节点均匀部署在区域的中心

位置。考察了空间联合通信覆盖率、分组投递率、控制开销、平均传输延时和平均传输跳数等性能指标随节点数和网络负载增加的变化情况。

(1)仿真参数设置 110 个节点随机均匀分布在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的空间范围内, 地面网络形成 3 个网络任务分区, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

仿真参数	仿真参数数值、类型
传输数据类型	CBR
数据载荷	512 byte
发包速率	10 packets/s
节点传输范围	50 km
路由协议	AODV
MAC 协议	802.11
仿真时间	300 s
仿真次数	10

(2)仿真结果分析 从图 3(a)可以看出使用本文提出的临近空间飞行器节点部署策略在相同节点数目下, 覆盖率是使用随机部署策略时的 1.4-1.5 倍。空间覆盖率越大, 表明网络拓扑对于移动节点运动的适应性越强。临近空间飞行器节点形成较大的通信覆盖范围能够延长信息有效时间, 提高数据传输对网络拓扑变化的容忍程度, 从而保证网络通信具有较高的稳定性和可靠性。

分组投递率反映了网络处理、传输数据的能力, 是网络可靠性的重要性能指标, 图 3(b)为不同部署方案下网络分组投递率随发包速率变化的情况。可以看出当网络负载增加时, 采用基于 PSO 算法的动静联合部署方案可以使网络的分组投递率始终保持在较高的水平, 在 100% 左右; 随机部署和静态部署方案分组投递率相差不大, 中心部署方案下网络的分组投递率最差, 由于拥塞、丢包等原因投递率下降到 60% 左右。由于骨干节点的动静联合部署能使骨干节点更趋近属于业务量多和优先级高的区域, 从而使大部分分组能够直接传递给骨干节点得到及时转发, 提高了网络吞吐率。

控制开销定义为传送的控制分组的总数目与数据分组总数目的比值, 即传输一个数据分组所需传输的控制分组数量, 用以衡量协议的可扩展性以及低带宽或拥塞情况下的网络性能和能耗效率。图 3(c)为不同部署方案下网络控制开销随发包速率变化的情况。可以看出当网络负载增加时, 4 种部署方案中静态部署和中心部署方案下网络控制开销较小; 动静联合部署方案下控制开销稍有增加但不

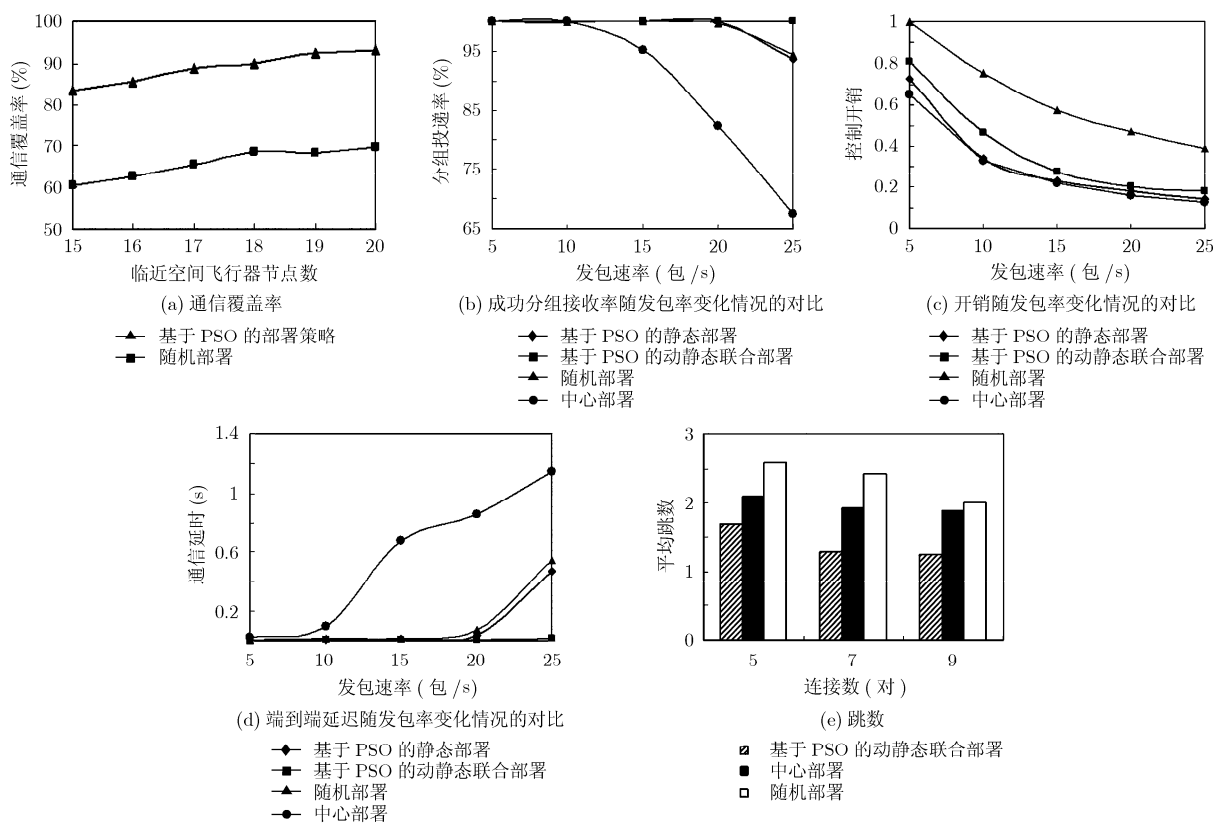


图3 仿真结果

明显, 主要由于骨干节点位置动态调整时可能会引起路由重新选择; 随机部署方案下控制开销较高。

图3(d)为4种部署方案下网络通信延时随节点发包速率的变化情况。可以看到随网络负载的增加, 动静联合部署方案下网络通信延时始终较小; 随机部署和静态部署相差不大, 均高于动静联合部署方案; 中心部署方案下网络通信延时较大。图3(e)为3种部署方案下分区内非骨干节点到骨干节点平均跳数随通信的源-目的节点对数量而变化的情况, 跳数越小通信延时越小。可以看出随网络负载增加时, 动静联合部署方案下节点平均通信跳数小于随机部署和中心部署方案。这是由于动静联合部署方案考虑了数据业务量分布情况对骨干节点的位置进行动态调整, 从而使提高了数据转发效率, 保证了高优先级的数据分组投递的及时性。

4 结论

基于临近空间飞行器的区域自组网是有别于传统通信网络的新型自组织网络, 对于网络部署和规划存在很多待解决的问题。论文对现有网络部署和规划策略进行研究, 针对基于临近空间飞行器的区域自组网特点, 提出一种网络部署策略, 围绕网络的应用需求, 根据网络中临近空间飞行器节点和地

面骨干节点功能上的不同, 利用粒子群优化算法分别实现优化部署。临近空间飞行器节点的部署可由地面控制中心实现, 地面骨干节点可分布式实现动静联合部署方案。通过仿真分析证明了本文所提出的部署方案能为网络构造良好合理的拓扑结构, 为上层协议的运行提供重要保障, 增强网络通信的稳定性、有效性和可靠性, 有助于提高网络的整体性能。在今后的工作中将进一步考虑链路和节点失效的情况, 重构网络拓扑, 赋予网络自我修复和快速自愈的能力。

参考文献

- [1] Bourdarie M and Xapsos S. The near-earth space radiation environment [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(4): 1810-1832.
- [2] Zheng Bo, Ren Qing-hua, and Liu Yun-jiang, *et al.* Characteristic and simulation of the simulation of the near space communication channel [C]. *IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications*, Hangzhou, August 14-17, 2007: 769-773.
- [3] Milner S D, Llorca J, and Davis C C. Autonomous reconfiguration and control in directional mobile Ad hoc networks [J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2009,

- 9(2): 10–26.
- [4] Mollanejad A, Khanli L M, and Zeynali M. DBSR: dynamic base station repositioning using genetic algorithm in wireless sensor network [C]. Second International Conference on Computer Engineering and Applications (ICCEA), Bali Island, March 19–21, 2010: 521–525.
- [5] Ferro A, Giugno R, Pigola M M G, and Pulvirenti A. Distributed clustering and closest-match motion planning algorithms for wireless Ad hoc networks with movable base stations. <http://ferrolab.dmi.unict.it/downloads/medhoc2006.pdf>. 2008.5.
- [6] Marbukh V and Sayrafian P K. Mobile sensor networks self-organization for system utility maximization: work in progress [C]. Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications, Cannes, La Bocca, August 23–29, 2009: 416–419.
- [7] Younis M and Akkaya K. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: a survey [J]. *Ad hoc Networks*, 2008, 6(4): 621–655.
- [8] Luo Hao, Liu Zhong, and Xue Feng. A deployment strategy for target surveillance sensor networks based on acoustic energy measurements [C]. 2nd International Conference on Future Computer and communication, Wuhan, China, May 21–24, 2010: 686–690.
- [9] Akkaya K, Younis M, and Bangad M. Sink repositioning for enhanced performance in wireless sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2005, 49(4): 512–534.
- [10] Youssef W and Younis M. Intelligent gateways placement for reduced data latency in wireless sensor networks [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC'07), Glasgow, Scotland, June 24–28, 2007: 3805–3810.
- [11] Xu K, Hassanein H, Takahara G, and Wang Q. Relay node deployment strategies in heterogeneous wireless sensor networks: multiple-hop communication case [C]. 2nd IEEE Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks (SECON'05), Santa Clara, CA, September 26–29, 2005: 575–585.
- [12] Ahmed M, Krishnamurthy S, Katz R, and Dao S. Trajectory control of mobile gateways for range extension in Ad hoc networks [J]. *Computer Networks*, 2002, 39(6): 809–825.
- [13] Kennedy J. Stereotyping: improving particle swarm performance with cluster analysis [C]. The Congress on Evolutionary Computing, La Jolla, Canada, July 16–19, 2000, 2: 1507–1512.
- [14] Gao Ying, Hu Xiao, Liu Hui-liang, and Feng Yuan-yong. Multiobjective estimation of distribution algorithm combined with PSO for RFID network optimization [C]. 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, China, March 13–14, 2010: 736–739.
- [15] Zhao Jing and Zeng Jian-chao. A virtual centripetal force-based coverage enhancing algorithm for wireless multimedia sensor networks [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2010, 10(8): 1328–1334.
- 朱志良: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机网络与通信安全技术、非线性系统、混沌分型与复杂性理论、数字信号与数字图像处理等。
- 叶宁: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为空间信息网拓扑重构技术。
- 刘军: 男, 1969年生, 副教授, 研究方向为空间信息网组网关键技术。