

# 卫星物联网场景下基于节点选择的协作波束成形技术研究

席博 洪涛\* 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

**摘要:** 针对卫星物联网(IoT)场景下信号长距离传输衰减大以及单个终端节点传输性能受限的问题, 该文提出一种基于节点选择的协作波束成形算法, 增强终端节点的传输能力。在实际终端位置信息存在误差的条件下, 推导出了协作波束成形平均方向图函数, 分析了不同系统参数对于协作波束成形平均方向图和瞬时方向图差异的影响。在此基础上, 根据卫星物联网链路传输性能需求, 提出一种区域分组优化的协作节点选择算法。仿真结果表明, 相比于传统的分布式协作波束成形节点选择算法, 该文提出的算法在实际的误差模型中旁瓣抑制和零陷生成方面具有更好的性能。

**关键词:** 卫星物联网; 协作波束成形; 节点选择; 随机天线阵

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2882-09

DOI: 10.11999/JEIT190707

## Research on the Collaborative Beamforming Technique Based on the Node Selection for Satellite Internet of Things

XI Bo HONG Tao ZHANG Gengxin

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The transmission performance of nodes in the satellite Internet of Things(IoT) is limited due to the long-distance transmission and the power-constrained terminal. A collaborative beamforming technique is proposed based on the node selection algorithm to improve the transmission performance of nodes. An average far-field beampattern for collaborative beamforming is derived by considering the location information error in practical scenario. Furthermore, the difference between average beampattern and instantaneous beampattern is analyzed by the system parameters. On this basis, a node selection algorithm is proposed based on region grouping not only to meet the requirement of satellite link, but also to suppress the sidelobe. Simulation results show better performance of the proposed algorithm compared with the traditional node selection algorithms in the actual error model.

**Key words:** Satellite Internet of Things (IoT); Collaborative beamforming; Node selection; Random array antenna

### 1 引言

物联网(Internet of Things, IoT)是5G无线网络应用中的主要方向之一, 海量布置造价低廉的物联网终端需要建设大量的地面基站构成通信网络。但是在地面建设基站受到地理环境的限制, 如海洋、沙漠等极端环境地区无法建设基站, 人烟稀少的偏远地区建设维护基站的成本昂贵, 发生自然灾

害时地面网络易遭到破坏等。因此, 地面物联网在上述的应用场景中表现出服务能力严重不足的问题。卫星通信系统由于其不受地理环境影响的全球覆盖能力成为5G地面网络的重要补充<sup>[1]</sup>。

近年来, 卫星物联网技术成为卫星通信研究领域的热点方向<sup>[2-5]</sup>。相比于数十千米量级覆盖范围的地面物联网, 低轨卫星星地距离也要达到600~1000 km, 长距离传输使得终端节点发射信号衰减大, 并且单个终端的功率以及发射天线增益受限, 导致节点的传输性能受到极大的限制<sup>[2]</sup>。分布式协作波束成形技术是增强单个功率受限终端传输能力的有效手段之一, 利用多个分布式终端节点以协作收发的方式增强单个节点的传输和接收能力在无线

收稿日期: 2019-09-16; 改回日期: 2020-04-27; 网络出版: 2020-05-28

\*通信作者: 洪涛 hongt@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(91738201, 61801445, 61971440)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91738201, 61801445, 61971440)

传感器网络中得到广泛的研究<sup>[6,7]</sup>。Ochiai等人在文献<sup>[8]</sup>中首次针对2维无线传感器网络场景提出了一种分布式协作波束成形技术，通过无线传感器节点位置信息服从的概率密度函数，推导分析阵元相对位置信息不确定条件下，多个节点协作波束成形的平均方向图函数。从概率意义上探索分布式节点协作波束成形的技术性能。在此基础上，Ahmed等人<sup>[9]</sup>对比分析了传感器节点分布服从理想均匀分布和高斯分布的协作波束成形性能。但上述的研究都是在小区域(数个波长半径)内密集布置大量终端节点条件下，研究协作波束成形平均方向图函数性质来替代系统的瞬时方向图，如果稀疏布置终端节点会导致平均方向图函数在旁瓣区域大幅偏离系统的瞬时方向图，使得采用平均方向图分析系统旁瓣性能的方法失效。针对协作波束成形技术中旁瓣性能优化的研究主要分为3大类算法：第1类算法中所有节点都参与协作过程，通过控制每个协作节点的加权幅度和相位来优化方向图的旁瓣性能，如Jayaprakasam等人在文献<sup>[10]</sup>中研究了基于多目标精英算法同时优化方向图的方向性和旁瓣峰值电平；第2类算法中所有节点加权值固定不变，系统通过控制选择参与协作的节点来优化方向图旁瓣的性能，如Ahmed等人在文献<sup>[11]</sup>中提出了一种随机节点选择的方法，通过迭代更新选择节点来满足非期望方向干扰抑制性能的要求。Chen等人在文献<sup>[12]</sup>中提出了一种离散的交叉熵算法来降低文献<sup>[11]</sup>中算法复杂度指数增长的问题；第3类算法结合上述的两类算法同时采用节点选择和加权值优化控制方向图旁瓣的性能，如Sun等人分别在文献<sup>[13-15]</sup>中结合虚拟直线阵、圆环阵的选择算法和生物类的权值搜索算法优化旁瓣性能和节点能量消耗。但上述优化方向图旁瓣的文献中，都是在协作节点之间的相对位置关系精确已知的条件下，进行节点的选择、节点权系数的设计，并没有体现无线传感器网络节点之间相对位置信息的不确定性<sup>[16]</sup>。

与上述场景相比，本文考虑的节点位置信息模型主要有两方面改进：(1)系统可以利用物联网中带GPS功能的锚节点结合节点定位算法获得节点的位置信息<sup>[17]</sup>，但由于GPS和网络定位算法自身存在的误差，网络获得节点之间的相对位置关系并不是精确的<sup>[18,19]</sup>。(2)网络无需在很小的区域范围内密集布置大量节点，更接近于实际的物联网节点位置分布。本文就是在这一误差模型下推导出协作波束成形平均方向图函数，并在此基础上，根据卫星物联网链路的性能需求设计了一种区域分组的协作节点选择算法。仿真结果表明，相比于传统的虚拟

直线阵和圆环阵节点选择算法，本文提出的算法在考虑节点相对位置存在误差的条件下，旁瓣抑制和零陷生成方面具有更好的性能。

## 2 节点位置误差条件下协作波束成形技术

### 2.1 系统模型

图1给出了本文卫星物联网场景下协作波束成形技术示意图，节点随机分布在如图所示坐标系的 $XOY$ 平面区域内，第 $k$ 个节点的位置信息表示为 $P_k(r_k, \phi_k)$ ，其中 $r_k$ 表示节点到坐标系原点的距离， $\phi_k \in [0, 2\pi)$ 表示节点在 $XOY$ 平面内的方位角。由于GPS和定位算法自身不可避免的误差，第 $k$ 个节点的实际位置是在以 $P_k(r_k, \phi_k)$ 为圆心、 $B$ 为半径的圆内随机分布，用 $P'_k(r'_k, \phi'_k)$ 来表示。期望接入的物联网卫星由星历可换算成坐标系中的 $P_0(A, \theta_0, \phi_0)$ 。为了比较本文算法的性能，系统作与先前研究文献相同的假设<sup>[6-19]</sup>：

(1) 分布式随机分布的节点使用相同的各向同性天线，系统协作方向图函数符合方向图乘积定理，本文中采用阵因子替代阵列的方向图函数；

(2) 分布式随机分布的节点到卫星的距离远大于地面协作节点之间的距离，这样不同节点到卫星的电磁信号路径衰减近似相同；

(3) 卫星链路以直射信道为主，只考虑加性高斯白噪声信道，没有多径效应；

(4) 协作节点在频率、相位和时间上同步，不同的同步方式详见文献<sup>[6]</sup>，本文的研究重点在误差模型下协作方向图函数的推导和节点选择算法。

### 2.2 协作波束成形平均方向图函数

根据图1所示的系统模型，第 $k$ 个节点对应的导向矢量可以表示为

$$\mathbf{A}_k(\theta, \phi) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r'_k [\sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi'_k) - \sin \theta \cos(\phi - \phi'_k)]} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_k \sin \theta \cos(\phi - \phi_k)} \quad (1)$$

为了便于对节点实际位置进行分析和讨论，进行如式(2)的变量代换

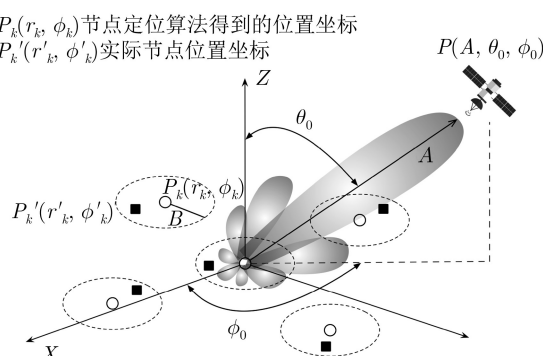


图1 卫星物联网场景下协作波束成形技术示意图

$$\rho_0 = \frac{1}{\sqrt{(\sin \theta \cos \phi - \sin \theta_0 \cos \phi_0)^2 + (\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_0 \sin \phi_0)^2}} \quad (2a)$$

$$\cos \delta = \rho_0^{-1} (\sin \theta \cos \phi - \sin \theta_0 \cos \phi_0) \quad (2b)$$

$$\sin \delta = \rho_0^{-1} (\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_0 \sin \phi_0) \quad (2c)$$

则第 $k$ 个节点的导向矢量可以转化为

$$\mathbf{A}_k(\theta, \phi) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r'_k \rho_0 \cos(\phi'_k - \delta)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_k \sin \theta \cos(\phi - \phi_k)} \quad (3)$$

分别令

$$\tilde{B} = \frac{B}{\lambda}, \tilde{r}'_k = \frac{r'_k}{B}, L_k = \frac{r_k}{\lambda} \quad (4a)$$

$$Q(\theta, \phi) = 2\pi \tilde{B} \rho_0 \quad (4b)$$

$$I_k = \tilde{r}'_k \cdot \cos(\phi'_k - \delta), -1 \leq I_k \leq 1 \quad (4c)$$

其中,  $\tilde{B}$ ,  $L_k$ 分别表示节点位置信息误差范围 $B$ 和第 $k$ 个节点到坐标系中心距离 $r_k$ 对波长的归一化, 将式(4a)–式(4c)代入式(3), 可以得到

$$\mathbf{A}_k(\theta, \phi) = e^{jI_k \cdot Q(\theta, \phi)} \cdot e^{j2\pi L_k \sin \theta \cos(\phi - \phi_k)} \quad (5)$$

为了得到在定位误差模型下节点对应的导向矢量统计平均值, 本文在2维坐标系中引入变量 $U_k$  ( $-1 \leq U_k \leq 1$ ), 满足 $U_k^2 + I_k^2 \leq 1$ 。不失一般性, 设第 $k$ 个节点 $P'_k(r'_k, \phi'_k)$ 在半径为 $B$ 的圆内服从均匀分布, 则节点坐标的概率密度函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} f_{r'}(r) &= \frac{2r}{B^2}, & 0 < r < B \\ f_{\phi'}(\phi) &= \frac{1}{2\pi}, & 0 \leq \phi < 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则变量 $U_k$ 和 $I_k$ 的联合概率密度函数 $f_{I,U}$ 为

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} f_{I,U} \cdot r dr d\phi = 1 \rightarrow f_{I,U} = \frac{1}{\pi} \quad (7)$$

变量 $I_k$ 的概率密度函数 $f_I(I)$ 可表示为

$$f_I(I) = \int_{-\sqrt{1-I^2}}^{\sqrt{1-I^2}} -f_{I,U} dU = \frac{2}{\pi} \sqrt{1-I^2}, -1 \leq I \leq 1 \quad (8)$$

则组阵中第 $k$ 个节点的平均导向矢量可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{A}}_k(\theta, \phi) &= \int_{-1}^1 \mathbf{A}_k(\theta, \phi) \cdot f_I dI \\ &= 2\text{jinc}(Q(\theta, \phi)) \cdot e^{j2\pi L_k \sin \theta \cos(\phi - \phi_k)} \quad (9) \end{aligned}$$

其中,  $\text{jinc}(x) = j_1(x)/x$ ,  $j_1(x)$ 为第1类1阶贝塞尔函数。 $w_k \in C, k = 1, 2, \dots, N$ 是第 $k$ 个节点的权重,  $C$ 表示复数域。根据式(9), 在期望卫星处形成最大增益主瓣, 等幅加权可以表示为

$$w_k = e^{-j2\pi L_k \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_k)}, k = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

不失一般性, 假设期望卫星接收位置俯仰角为 $\theta_0 = 30^\circ$ , 方位角 $\phi_0 = 0^\circ$ , 以俯仰角平面 $\theta = 30^\circ$ 观察方向图, 可得 $Q(\theta, \phi) = 2\pi \tilde{B} \sqrt{1/2 - 1/2 \cdot \cos(\phi)}$ , 则天线阵的平均方向图函数可以写为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{av}}(\phi) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{\mathbf{A}}_k(\theta, \phi) \cdot w_k \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 2\text{jinc}(\alpha(\phi)) \cdot e^{j\pi L_k [\cos(\phi - \phi_k) - \cos(\phi_k)]} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\alpha(\phi) = 2\pi \tilde{B} \sqrt{1/2 - 1/2 \cdot \cos(\phi)}$ ,  $w_k = e^{-j\pi L_k \cos(\phi_k)}$ , 则对应的平均功率方向图函数可表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{av}}(\phi) &= |\mathbf{F}_{\text{av}}(\phi)|^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=1}^N 2\text{jinc}(\alpha(\phi)) \cdot e^{j\pi L_k [\cos(\phi - \phi_k) - \cos(\phi_k)]} \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

### 2.3 平均方向图与瞬时方向图之间的关系及其参数影响

2.2节中推导了在系统节点位置信息误差模型下协作波束成形的平均方向图函数, 本小节中将给出协作波束成形平均功率方向图和瞬时功率方向图之间的关系, 用来更好地说明实际方向图的性能。由式(5)和式(9), 瞬时功率方向图和平均功率方向图之间的差异可以表示为

$$\begin{aligned} m(\phi) &= \left| |F(\phi)|^2 - |\mathbf{F}_{\text{av}}(\phi)|^2 \right| \\ &= \frac{1}{N^2} \left| \left| \sum_{k=1}^N \mathbf{A}_k(\phi) \cdot w_k \right|^2 - \left| \sum_{k=1}^N \bar{\mathbf{A}}_k(\phi) \cdot w_k \right|^2 \right| \end{aligned} \quad (13)$$

定义互补累积函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF), 从概率意义上统计两者的差异

$$C_{m(\phi)}(z) = P(m(\phi) > z) = 1 - P(m(\phi) \leq z) \quad (14)$$

系统协作波束成形平均方向图与节点的初始位置密切相关, 对于不同初始位置节点分布条件下, 组阵方向图的旁瓣抑制性能是衡量节点选择算法的重要指标<sup>[11]</sup>, 为了衡量节点选择算法对方向图旁瓣抑制的效果, 定义CCDF为: 平均功率方向图在旁瓣区域峰值超过阈值功率 $P_0$ 的概率为

$$\begin{aligned} C_{P(\phi)}(P_0) &= P(P(\phi) > P_0) \\ &= P\left(10 \lg \left( \frac{P_{\text{av}}(\phi_{\text{SL}})}{P_{\text{av}}(\phi_{\text{ML}})} \right) > P_0\right) \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $\phi_{\text{SL}}$ 表示方向图旁瓣角度范围;  $\phi_{\text{ML}}$ 表示主瓣

角度。需要注意区分的是式(14)中定义CCDF用于统计某一次初始节点位置信息确定的情况下，由于节点位置信息的误差引起的平均方向图与瞬时方向图差异；而式(15)中定义CCDF用于衡量节点选择算法对于多次初始节点位置信息的方向图旁瓣抑制性能。

### 3 节点选择算法

#### 3.1 卫星物联网链路计算

本节通过卫星物联网链路计算，根据物联网业务的性能需求，得到满足通信链路的最少参与协作的节点数目。卫星接收信号的功率可以表示为

$$P_R[\text{dBW}] = \text{EIRP}_{\text{CB}}[\text{dBW}] + G_R[\text{dBi}] - L_f[\text{dB}] \quad (16)$$

若采用R-S编码，假设编码增益为CG = 5 dB，则式(16)可以被改写为

$$\text{EIRP}_{\text{CB}}[\text{dBW}] = P_R[\text{dBW}] - G_R[\text{dBi}] - \text{CG}[\text{dB}] + L_f[\text{dB}] \quad (17)$$

其中， $\text{EIRP}_{\text{CB}}$ 表示无线传感器网络的等效全向辐射功率， $G_R$ 表示卫星接收增益， $L_f$ 表示自由空间传播损耗。若采用QPSK调制，通信误码率可以表示为 $Q(\sqrt{2E_b/N_0})$ ，则接收信号功率可以表示为

$$\begin{aligned} P_R[\text{dBW}] &= \left[ \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{th}} \cdot R_b \cdot kT \right] [\text{dBW}] \\ &= \left[ \frac{1}{2} [Q^{-1}(\text{BER}_{\text{th}})] \cdot R_b \cdot kT \right] [\text{dBW}] \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $k$ 为玻尔兹曼常量， $T$ 表示卫星的等效噪声温度。协作波束成形的等效全向辐射功率可以表示为

$$\text{EIRP}_{\text{CB}} = G_{\text{CB}} \cdot P_{\text{tot}} \quad (19)$$

$G_{\text{CB}}$ 表示协作波束成形增益， $P_{\text{tot}}$ 表示所有发射节点的总功率。假定所有节点等功率发送信号，故在 $N$ 个节点在进行波束成形时最大可以产生 $N$ 倍的幅度增益 $[G_{\text{CB}}]_{\text{max}} = N$ ；总功率 $P_{\text{tot}}$ 即所有发射节点的功率之和为 $N \cdot P_s$ 。故 $\text{EIRP}_{\text{CB}}$ 可以改写为节点个数 $N$ 的函数

$$\text{EIRP}_{\text{CB}}(N) = N \cdot NP_s = N^2 \cdot P_s \quad (20)$$

根据式(17)–式(20)，可以通过定义不同的误码率阈值，计算对应满足链路所需的节点个数，避免了过多的节点加入到协作过程造成系统功率的浪费。节点个数可由式(21)给出

$$N_{\text{th}} = \arg \left\{ \text{EIRP}_{\text{CB}}(N) = N^2 P_s = \text{EIRP}_{\text{CB,th}} \right\} \quad (21)$$

#### 3.2 区域分组优化的节点选择算法

为了衡量节点选择算法的性能，定义式(22)和式(23)两个适应度函数

$$f_1 = \text{Fit}_{\text{SSL}} = 20 \lg \left| \frac{\max |F_{\text{av}}(\phi_{\text{SL}})|}{F_{\text{av}}(\phi_{\text{ML}})} \right| \quad (22)$$

$$f_2 = \text{Fit}_{\text{NULL}} = 20 \lg \left| \frac{F_{\text{av}}(\phi_k)}{F_{\text{av}}(\phi_{\text{ML}})} \right| \quad (23)$$

其中， $f_1$ 表示方向图的旁瓣峰值功率， $f_2$ 表示非期望方向的零陷功率值， $\phi_k$ 表示零陷角度。通过式(10)中等幅加权公式，可以使得方向图在期望方向上获得最大增益。但选择不同节点参与协作过程会导致方向图的旁瓣随之变化。如何在整个网络中选择合适的节点参与协作传输是一个复杂的非线性优化问题。文献[13–15]根据均匀阵列能够得到较好旁瓣的经验，分别提出了基于虚拟直线阵和圆环阵的节点选择算法，如图2(a)、图2(b)所示。但在实际误差模型下，这种基于虚拟阵列的选择算法最终的优化解集往往被限制在某个区域内，原因是在前人提出的场景中，网络中的节点被密集布置在某一区域内，参与协作节点往往可以形成逼近理想虚拟直线阵列或圆环阵列的拓扑结构。在实际情况下，当节点稀疏分布时，用这种策略进行节点选择，所得到的活动节点并不能很好地形成我们期望的组阵结构，并且选择结果往往被限制在某几个固定的节点中。所以针对节点位置信息误差模型，本文提出了一种新的区域分组策略的节点选择：

根据图2(c)所示的模型，第1步，将源节点覆盖的区域均匀划分为 $(2M)$ 个子区域： $A_1, A_2, \dots$ ,

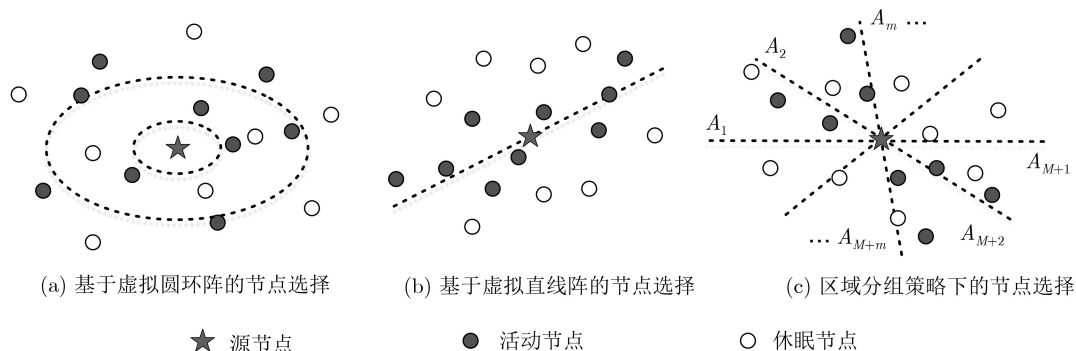


图2 节点选择模型示意图

$A_m, m = 1, 2, \dots, 2M$ , 分别对应 $\phi A_1, \phi A_2, \dots, \phi A_m, m = 1, 2, \dots, 2M$ 表示每个子区域的角度范围; 第2步, 设定种群初始区域的个数 $k$ , 则产生 $\{A_1 \sim A_k, A_{M+1} \sim A_{M+k}\}, \{A_2 \sim A_{k+1}, A_{M+2} \sim A_{M+k+1}\}, \dots, \{A_m \sim A_{m+k-1}, A_{M+m} \sim A_{M+m+k-1}\}, m = 1, 2, \dots, M, M$ 对区域; 第3步, 根据4.1节链路计算求得的节点数 $N$ , 分别从 $[A_m \sim A_{m+k-1}]$ 和 $[A_{M+m} \sim A_{M+m+k-1}]$ 中随机取 $[N/2]$ 或 $(N+1)/2$ 个节点, 使得种群均匀分布在关于源节点中心对称的子区域中; 第4步, 不断重复第3步, 根据适应度函数 $\text{Fit}_{\text{SSL}}$ 来评价区域的优劣; 第5步, 得到最优区域分组 $\{A_{\text{best}} \sim A_{\text{best}+k-1}, A_{M+\text{best}} \sim A_{M+\text{best}+k-1}\}$ ; 第6步, 在最优分组中随机产生初始种群, 与一种多目标的精英遗传算法相结合来选择最优协作节点组合。表1给出了区域分组节点选择算法的伪代码。

根据上述步骤, 对节点进行分组操作需要循环遍历可能参与协作的所有节点 $S$ 和 $M$ 对分组区域, 设定迭代次数为 $E$ , 则整个分组算法的时间复杂度可以表示为 $O(M \times (S + E))$ 。在虚拟直线阵和圆环阵的节点选择中同样需要遍历所有节点 $S$ 和虚拟阵中的理想节点 $I$ , 时间复杂度可以表示为 $O(S \times I)$ 。

可以看到, 分组策略和传统的节点选择算法在计算复杂度上都是 $O(n^2)$ 级, 并无本质上的复杂度提升。

## 4 数值仿真及其结果分析

### 4.1 链路计算

表2给出了本节中仿真的参数设置, 图3给出了满足LEO卫星链路需求所需节点数随着通信误码率的变化曲线。可以看到随着BER阈值的降低, 所需要的节点数也随之增加。编码处理可以大大减小通信所需的节点数, 是改善通信质量的重要手段。面对不同的通信需求, 以通信误码率阈值 $10^{-3}$ 和 $10^{-6}$ 为例, 可以得到所需的节点数为10和15。以此为条件, 我们进行节点选择优化。

### 4.2 节点初始位置信息固定条件下仿真性能分析

本节中, 初始产生64个节点, 在此初始网络中分别选择10和15个节点进行协作波束成形以达到通信的误码率在 $10^{-3}$ 和 $10^{-6}$ 时的卫星链路的增益阈值。同时还要对方向图的旁瓣做以下限制: (1)降低方向图的旁瓣峰值电平(Peak SideLobe Level, PSL); (2)在非期望方向形成零陷, 降低通信的干扰。

表1 区域分组节点选择算法

---

Listm=[]:存放 $[A_m \sim A_{m+k-1}]$ 中节点集合; Listm'=[]:存放 $[A_{M+m} \sim A_{M+m+k-1}]$ 中节点集合;  
ListC=[]:存放 $[A_m \sim A_{m+k-1}]$ 中用于协作传输节点集合; ListC'=[]:存放 $[A_{M+m} \sim A_{M+m+k-1}]$ 中用于协作传输节点集合;  
ListF=[]:存放代价函数值的集合; 初始随机产生 $S$ 个节点:  $P_s(r_s, \phi_s), s = 1, 2, \dots, S$ ;  
 $S$ : 源节点覆盖节点数;  $M$ : 分组对数;  $N$ : 协作波束成形节点数;  $E$ : 迭代次数;

```

For s=1 to S do
  For m=1 to M do
    If  $\phi_s \in [\phi A_m \sim \phi A_{m+k-1}]$  then
      Listm=Listm+ $P_s$ ;
    End
    If  $\phi_s \in [\phi A_{M+m} \sim \phi A_{M+m+k-1}]$  then
      Listm'=Listm'+ $P_s$ ;
    End
  End
End
For e=1 to E do
  For m=1 to M do
    从Listm中随机选择 $[N/2]$ 或 $(N+1)/2$ 个节点放入ListC中;
    从Listm'中随机选择 $[N/2]$ 或 $(N+1)/2$ 个节点放入ListC'中;
    根据ListC和ListC'中的节点计算代价函数 $f_m$ ;
  End
  ListF=ListF +  $f_m$ ;
End
Find(min(ListF(average))) $\rightarrow\{A_{\text{best}} \sim A_{\text{best}+k-1}, A_{M+\text{best}} \sim A_{M+\text{best}+k-1}\}$ 。

```

---

表2 仿真参数设计表

参数	值
卫星轨道高度	$d=600$ km
卫星天线增益	$G_R=25$ dBi
卫星品质因数	$G/T=5$ dBK <sup>-1</sup>
空间传播损耗	$L_f=168.7$ dB
频率	2.6 GHz
节点天线增益(全向天线)	$G_s=0$ dBi
节点发射功率	$P_s=10$ dBm
调制方式	QPSK
信息速率	$R_b=2048$ kbps
无线传感器网络范围	$500 \times 500$ m <sup>2</sup>
网络节点总数	300
源节点覆盖范围	$R=100$ m, 约60个左右
定位误差	$B=1$ m, (约10个波长)
期望/非期望方向	$(600$ km, $30^\circ,0^\circ$ )/ $(600$ km, $30^\circ,1^\circ$ )

图4给出了基于区域分组优化算法与基于虚拟直线阵和圆环阵的优化算法性能对比结果：在选择

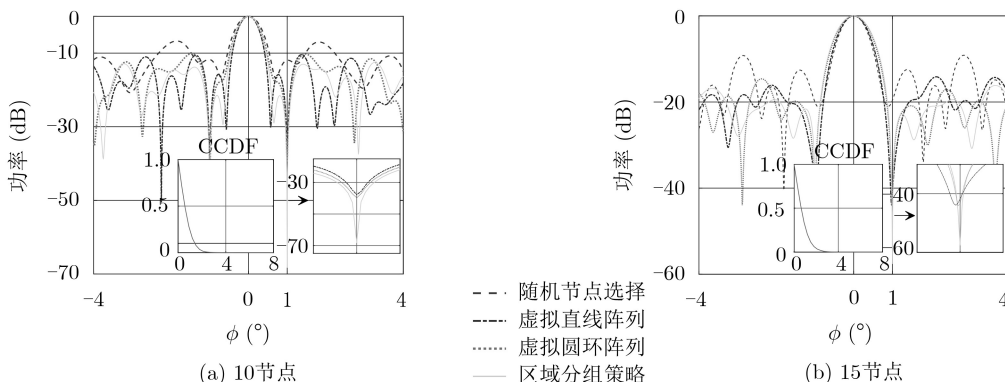


图4 基于区域分组策略与基于虚拟阵列优化方向图对比

图5给出了不同参数时 $C_{m(\phi)}(z)$ 随门限功率 $z$ 的变化曲线，在节点数目 $N = 10$ ，归一化误差半径 $\tilde{B} = 10$ ，取不同的期望方向角度偏离值，方位角越接近期望方向， $C_{m(\phi)}(z)$ 的值越小，在偏离角度 $0.5^\circ$ 的方位抖动3 dB的概率已经小于1%。这说明方位角越接近期望方向，平均功率方向图越接近瞬时功率方向图；在 $N = 10$ ，方位角度 $\phi = 1^\circ$ 的条件下，取不同的归一化节点误差范围，节点GPS定位越精确，平均功率方向图越接近瞬时功率方向图；取不同的节点数目进行波束成形，随着节点数目增加， $C_{m(\phi)}(z)$ 的值越来越小，平均功率方向图同样越逼近瞬时功率方向图。

图6给出了3种选择策略得到的组阵节点的平均方向图和随机产生的某一瞬时方向图进行对比，直观地看出分组策略产生的平均方向图更能逼近瞬时方向图的特性，具有更好的抗随机性。

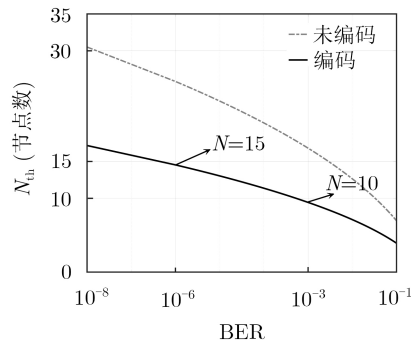


图3 节点值随误码率变化曲线

10节点时，基于虚拟直线阵选择节点的PSLL达到 $-10.43$  dB，零陷降到 $-37.74$  dB；基于虚拟圆环阵的选择节点的PSLL达到 $-10.29$  dB，零陷降到 $-39.62$  dB；区域分组策略的节点选择PSLL达到 $-12.51$  dB且零陷降到 $-68.23$  dB。在非期望方向，可以产生比基于虚拟阵列的方向图多30 dB左右的零陷，同时还能得到更好的PSLL。在选择15节点时，区域分组优化算法同样能得到更好的PSLL和更低的零陷，仍具有更好的性能。

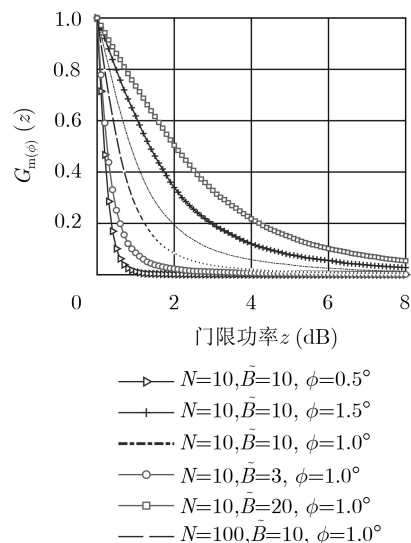


图5 不同参数时 $C_{m(\phi)}(z)$ 随门限功率 $z$ 的变化曲线

图7给出了 $\tilde{B} = 10$ ,  $\phi = 1^\circ$ 时选择10个节点和15个节点时, 基于虚拟阵列和区域分组策略的CCDF曲线对比情况。可以看到区域分组选择的节点形成的方向图要比基于虚拟阵列选择节点形成的方向图更加接近瞬时方向图。甚至是随机选择的节点仍比基于虚拟阵列选出的节点有更好的性能。

### 4.3 节点位置信息多次随机产生条件下仿真性能分析

本节中通过多次初始化节点位置信息, 统计不同节点选择算法对于不同节点位置信息的旁瓣抑制性能。图8中直观地给出了某次初始化节点下, 随着进

化代数变化不同算法的收敛情况对比, 分组策略节点选择方向图旁瓣峰值可达到 $-14.7$  dB, 要远低于虚拟直线阵和圆环阵选择的 $-11.13$  dB和 $-12.21$  dB; 在零陷的优化时, 分组策略可以达到 $-67.36$  dB, 同样要远低于虚拟直线阵、圆环阵的 $-50.65$  dB和 $-49.67$  dB。

根据式(15), 图9给出了在选择10节点, 15节点时不同算法的 $C_{P(\phi)}(P_0)$ 比较。可以看到, 在实际误差模型下, 使用区域分组策略进行节点选择所得到的方向图具有更好的PSLL。

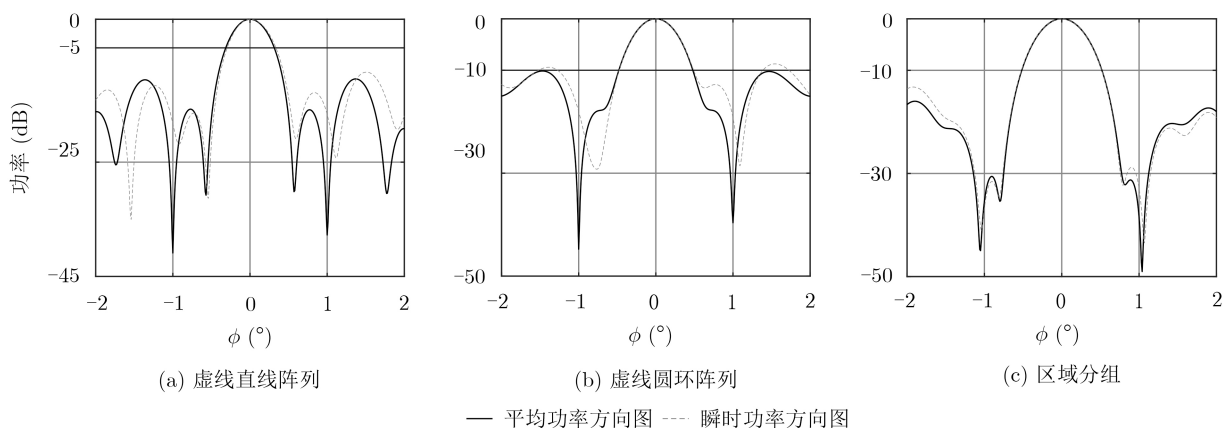


图6 节点选择平均功率方向图和瞬时功率方向图对比

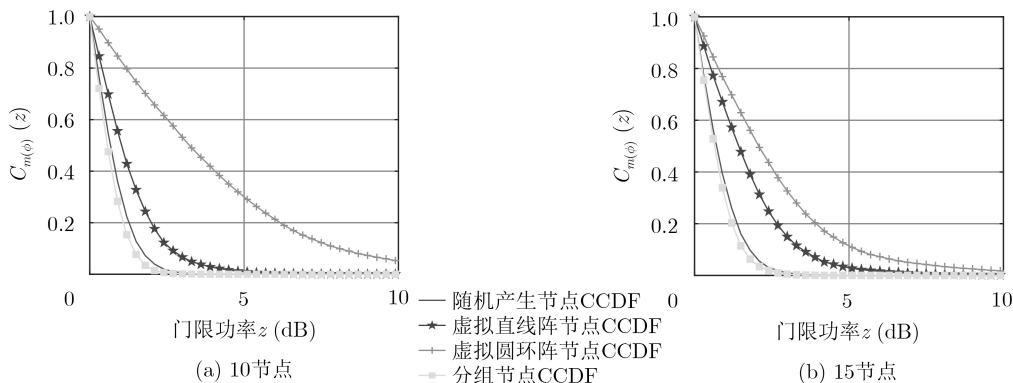


图7 区域分组与虚拟阵选择节点的 $C_{m(\phi)}(z)$ 对比

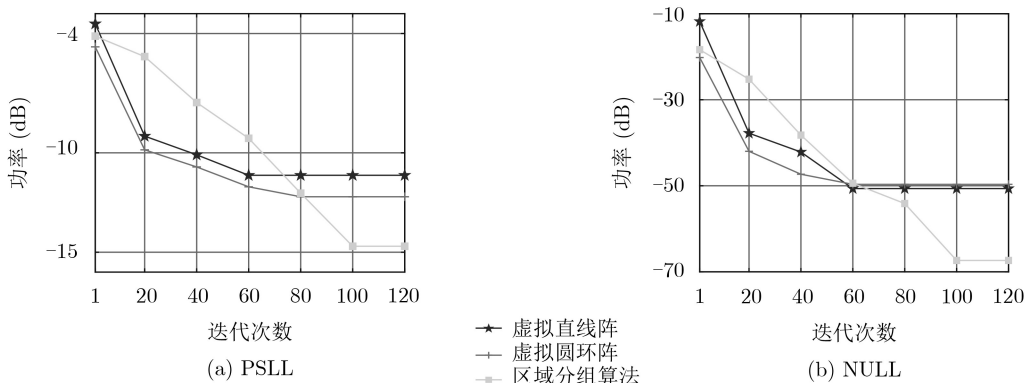


图8 分组策略算法与基于虚拟阵列算法的收敛性能对比

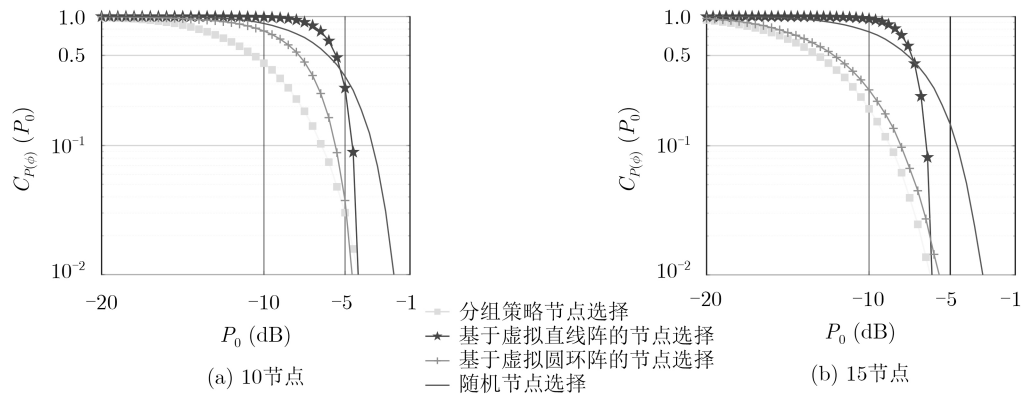


图9 区域分组与虚拟阵节点选择算法的PSLL性能对比

## 5 结束语

本文针对卫星物联网中地面终端节点收发能力受限这一问题，根据终端节点的相对位置特点推导出该场景下的协作波束成形平均方向图函数，分析了节点位置信息不精确条件下平均方向图和瞬时方向图之间的关系及关键参数的影响。在此基础上，根据卫星链路的传输性能需求，设计了一种基于区域分组策略的节点选择算法。仿真结果表明，在建立的电磁收发任务需求场景中，相比于基于虚拟阵列的节点选择算法，本文提出的算法能得到性能更好的方向图函数。需要进一步研究的内容包括：针对长数据包传输业务，地面终端与低轨卫星间的相对移动和卫星切换的研究；协作传输过程中节点的功耗，整个网络生存周期的分析以及由节点位置信息不精确而产生误差的系统鲁棒性能分析。

### 参考文献

- [1] CIONI S, DE GAUDENZI R, DEL RIO HERRERO O, *et al.* On the satellite role in the era of 5G massive machine type communications[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 54–61. doi: [10.1109/MNET.2018.1800024](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800024).
- [2] QU Zhicheng, ZHANG Gengxin, CAO Haotong, *et al.* LEO satellite constellation for internet of things[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 18391–18401. doi: [10.1109/Access.2017.2735988](https://doi.org/10.1109/Access.2017.2735988).
- [3] XIA Tingting, WANG M M, and YOU Xiaohu. Satellite Machine-type communication for maritime Internet of Things: An interference perspective[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 76404–76415. doi: [10.1109/Access.2019.2919253](https://doi.org/10.1109/Access.2019.2919253).
- [4] DE SANCTIS M, CIANCA E, ARANITI G, *et al.* Satellite communications supporting internet of remote things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(1): 113–123. doi: [10.1109/JIOT.2015.2487046](https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2487046).
- [5] CHIEN W C, LAI C F, HOSSAIN M S, *et al.* Heterogeneous space and terrestrial integrated networks for IoT: Architecture and challenges[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 15–21. doi: [10.1109/MNET.2018.1800182](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800182).
- [6] MUDUMBAI R, BROWN III D R, MADHOW U, *et al.* Distributed transmit beamforming: Challenges and recent progress[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2): 102–110. doi: [10.1109/MCOM.2009.4785387](https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4785387).
- [7] JAYAPRAKASAM S, RAHIM S K A, and LEOW C Y. Distributed and collaborative beamforming in wireless sensor networks: Classifications, trends, and research directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2092–2116. doi: [10.1109/COMST.2017.2720690](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2720690).
- [8] OCHIAI H, MITRAN P, POOR H V, *et al.* Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(11): 4110–4124. doi: [10.1109/tsp.2005.857028](https://doi.org/10.1109/tsp.2005.857028).
- [9] AHMED M F A and VOROBYOV S A. Collaborative beamforming for wireless sensor networks with gaussian distributed sensor nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 638–643. doi: [10.1109/TWC.2009.071339](https://doi.org/10.1109/TWC.2009.071339).
- [10] JAYAPRAKASAM S, ABDUL RAHIM S K, LEOW C Y, *et al.* Multiobjective beampattern optimization in collaborative beamforming via NSGA-II with selective distance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(5): 2348–2357. doi: [10.1109/tap.2017.2684187](https://doi.org/10.1109/tap.2017.2684187).
- [11] AHMED M F A and VOROBYOV S A. Sidelobe control in collaborative beamforming via node selection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(12): 6168–6180. doi: [10.1109/tsp.2010.2077631](https://doi.org/10.1109/tsp.2010.2077631).
- [12] CHEN J C, WEN Chaokai, and WONG K K. An efficient sensor-node selection algorithm for sidelobe control in collaborative beamforming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 5984–5994. doi: [10.1109/TVT.2015.2478898](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2478898).
- [13] SUN Geng, LIU Yanheng, WANG Aimin, *et al.* Sidelobe control by node selection algorithm based on virtual linear array for collaborative beamforming in WSNs[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 90(3): 1443–1462. doi: [10.1007/s11277-016-3403-9](https://doi.org/10.1007/s11277-016-3403-9).

- [14] SUN Geng, LIU Yanheng, ZHANG Jing, *et al.* Node selection optimization for collaborative beamforming in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 37: 389–403. doi: [10.1016/j.adhoc.2015.08.031](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.08.031).
- [15] SUN Geng, LIU Yanheng, LIANG Shuang, *et al.* A sidelobe and energy optimization array node selection algorithm for collaborative beamforming in wireless sensor networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 2515–2530. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2783969](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783969).
- [16] 蒋俊正, 李杨剑, 赵海兵, 等. 一种大规模传感器网络节点分布式定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(12): 3022–3028. doi: [10.11999/JEIT181101](https://doi.org/10.11999/JEIT181101).
- JIANG Junzheng, LI Yangjian, ZHAO Haibing, *et al.* A distributed node localization algorithm for large scale sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 3022–3028. doi: [10.11999/JEIT181101](https://doi.org/10.11999/JEIT181101).
- [17] 汪晗, 成昂轩, 王坤, 等. 无线传感器网络分布式迭代定位误差控制算法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(1): 72–78. doi: [10.11999/JEIT170344](https://doi.org/10.11999/JEIT170344).
- WANG Han, CHENG Angxuan, WANG Kun, *et al.* Error control algorithm of distributed localization in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 72–78. doi: [10.11999/JEIT170344](https://doi.org/10.11999/JEIT170344).
- [18] KIM Y, LEE B, SO H, *et al.* Localization technique considering position uncertainty of reference nodes in wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1324–1332. doi: [10.1109/JSEN.2017.2782805](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2782805).
- [19] STOLERU R, STANKOVIC J A, and SON S H. On composability of localization protocols for wireless sensor networks[J]. *IEEE Network*, 2008, 22(4): 21–25. doi: [10.1109/MNET.2008.4579767](https://doi.org/10.1109/MNET.2008.4579767).
- 席 博: 男, 1996年生, 硕博连读生, 研究方向为卫星通信.
- 洪 涛: 男, 1982年生, 讲师, 研究方向为多天线收发系统、卫星通信.
- 张更新: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络等.

责任编辑: 马秀强