

# 天空地多层异构融合网络性能分析及切换协议优化

周赫<sup>1</sup>, 高晓铮<sup>2</sup>, 丁旭辉<sup>3</sup>, 李建国<sup>3</sup>, 李宗凌<sup>1</sup>, 杨凯<sup>2</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 3. 北京理工大学网络空间安全学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对多层异构融合网络 (Multi-layer heterogeneous integrated network, MLHetINet) 切换复杂的问题, 提出通过凝视波束及干扰消除算法获取切换分析的有效数据, 简化波束对准及捕获过程, 扩展空基网络覆盖范围, 进而降低跨层切换的复杂度。首先, 针对地面终端和空中基站间的相对高速运动特性, 提出空基凝视多波束形成算法, 自适应地调整天线相位和权值, 在目标方向生成主瓣并对干扰源进行零陷实现空域隔离, 简化切换分析的复杂度。然后针对空地信道的复杂性, 提出了基于列范数分组排序的多阶干扰消除算法, 进一步提高目标信号的检测精度, 提高切换分析的准确性。最后, 依靠凝视波束技术和干扰消除算法, 针对空天地三维多层异构融合网络中的切换事件设计了独立的切换协议, 显著降低了网络资源的消耗。仿真结果表明, 相较于传统地面网络和天地融合网络, 所提波束赋形辅助的天空地多层异构融合网络中的用户信息速率有显著提升。

**关键词:** 多层异构融合网络; 移动切换分析; 波束赋形; 干扰消除; 切换协议优化

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

## Performance Analysis and Handover Protocol Optimization for Space-Air-Ground Multi-layer Heterogeneous Integrated Networks

ZHOU He<sup>1</sup>, GAO Xiaozheng<sup>2</sup>, DING Xuhui<sup>3</sup>, LI Jianguo<sup>3</sup>, LI Zongling<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Cyberspace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To address the complex handover problem in multi-layer heterogeneous integrated networks (MLHetINet), this paper develops a staring beam and interference cancellation algorithm to get valid data for handover analysis, simplifies the beam alignment and acquisition process, expands the coverage of the air-based network, and reduces the complexity of cross-layer handover. Firstly, aiming at the relatively high-speed movement between the ground terminal and the air base station, this paper develops a dynamic staring multi-beam forming algorithm to adaptively adjust the antenna phase and weight, and generates the main lobe in the target direction and the zero-trap for the interference source to achieve airspace isolation, thus simplifying the complexity of handover analysis. Then, considering the complexity of the air-ground channel, a multi-order interference cancellation algorithm based on column norm grouping sorting is proposed to further improve the detection accuracy of the target signal and the accuracy of handover analysis. Finally, based on the staring beam and interference cancellation algorithm, an independent handover protocol is designed for handover events in the space-air-ground three-dimensional MLHetINet, which signifi-

cantly reduces the consumption of network resources. Through simulation, it is verified that the user information rate in the three-dimensional MLHetINet is significantly improved compared with that in the traditional ground network and space-ground integrated network.

**Key words:** multi-layer heterogeneous integrated network (MLHetINet); mobile handover analysis; beam-forming; interference cancellation; handover protocol optimization

## 引言

随着无线通信技术的快速发展,多层异构融合网络(Multi-layer heterogeneous integrated network, MLHetINet)已成为下一代移动通信系统的研究热点。相较于传统的无线网络,MLHetINet拥有高容量<sup>[1-3]</sup>、广覆盖<sup>[4]</sup>和灵活接入<sup>[5]</sup>等优势,但同时具有节点位置部署复杂、移动切换频繁及网络性能分析困难等问题。由此可见,针对MLHetINet进行节点位置管理、切换策略优化和网络性能分析至关重要<sup>[6-8]</sup>。

在解决地面终端和空中基站间的相对高速运动问题方面,动态凝视多波束形成算法提供了一个有效的解决方案<sup>[9]</sup>。通过自适应调整天线相位和权值,该算法能够在目标方向生成主瓣并对干扰源进行零陷,实现空域隔离。这有助于简化切换分析的复杂度,以及提高通信链路的稳定性<sup>[10]</sup>。凝视波束技术可以实现对特定用户或小区的持续覆盖,直到用户发起切换或移出当前波束覆盖范围。在空基平台部署该技术可以提升通信时长,减小系统开销。特别是在需要提供连续通信的高精度信息实时反馈场景中,凝视波束可以实现对终端的定向跟踪。通过空基网络的链路动态构建,可以实现跨小区的无缝连接,减少固定切换边界导致的频繁切换,提升链路稳定性,降低移动管理的复杂度。

此外,考虑到高空无人平台(High altitude platform, HAP)、无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)网络和卫星网络各自的特点,可以将它们联合考虑,以实现更优的网络设计。一方面,空基网络作为地面网络的补充,可以提供灵活部署的移动基站服务<sup>[11-12]</sup>。另一方面,空基网络具有比卫星网络更低的传输时延和更高的部署灵活性,更适用于需要提供动态服务的特定用户。天空地MLHetINet的结构复杂,5G切换协议中的多址接入及多次握手流程并不适用于拥有较长时延的空基和天基系统。而现有的空间数据系统咨询委员会(Consultative committee for space data system, CCSDS)和数字视频广播(Digital video broadcasting, DVB)两大卫星通信协议标准中,针对天空地跨层切换的协议流程需要进一步优化。因此,本文在切换预测的基础上,提出卫星波束赋形算法和空地链路干扰消除算法,优化MLHetINet切换协议流程,最终简化切换流程中的随机接入过程,降低切换分析复杂度。

## 1 系统模型

本文考虑由地基网络、空基网络和天基网络组成的天空地MLHetINet系统,如图1所示。具体而言,地基网络包括地面用户、宏基站(Macro base station, MBS)和微基站(Small base station, SBS),MBS和SBS服从泊松点过程分布,覆盖地面网络,提供高速通信需求。每个用户终端具备数据生成的能力。

空基网络包括无人机和高空无人平台,在地面宏

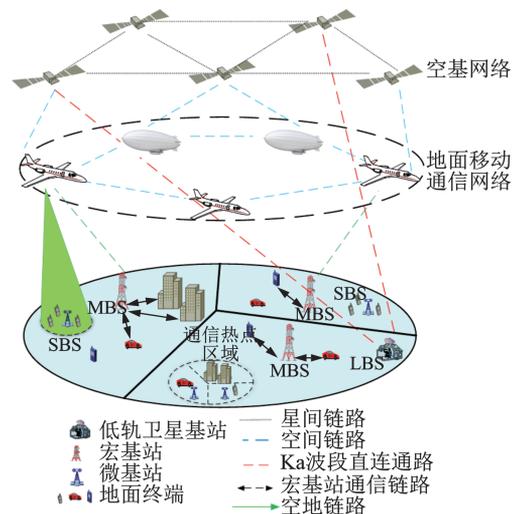


图1 天空地MLHetINet系统模型

Fig.1 System model of space-air-ground MLHetINet

蜂窝无法覆盖的偏远地区,为用户提供灵活的通信服务,保证对延迟和吞吐量敏感的物联网应用的服务质量。天基网络由低轨(Low earth orbit, LEO)卫星群组成,低轨卫星基站(LEO-based base station, LBS)通过星地链路,为用户提供特殊通信服务,保障通信链路的稳定性<sup>[13-14]</sup>。

## 2 空基凝视多波束形成算法

在空基无人飞行平台中,无人飞行器与地面之间的相对运动特性使得波束控制过程较为复杂。数字自适应波束形成算法与阵列天线的结合可以实现无人机天线自适应地调整相位和权值,在目标方向生成主瓣并对干扰源进行零陷实现空域隔离。该方法可以消除来自非目标方向的干扰,适用于信号环境多变的空地信道中。然而,由于无人飞行器的移动特性,目标波束和干扰零陷在更新后如何保证与预设角度的对齐成为亟待解决的问题。

本文设计了一种基于卡尔曼滤波的波束形成算法,该算法可以通过对目标用户进行波达角估计,实现对特定用户或小区的持续覆盖,直到用户发起切换或移出当前波束覆盖范围。在空基平台部署该算法,可以在提高通信质量的同时,提升通信时间、减小系统开销。

最小均方(Least mean square, LMS)算法利用瞬时采样数据估计信号的协方差矩阵,但这样会放大梯度噪声,使得迭代步长不是最优值,导致出现收敛速度较慢、收敛后的残留误差较大等问题。相比之下,卡尔曼滤波融合了观测数据与估计数据,通过对误差进行闭环管理,能够在长时间观测时保持稳定的误差。基于此,本节提出基于卡尔曼滤波的可变步长最小均方(Variable step least mean square, VSLMS)凝视波束形成算法。具体而言,通过利用卡尔曼滤波算法对LMS的收敛步长进行估计,使得迭代步长可以进行自适应调整,从而加快收敛速度,提高对信号的跟踪性能。VSLMS算法的迭代公式可以表示为

$$\mathbf{W}_N(k+1) = \mathbf{W}_N(k) + m(k)\boldsymbol{\mu}(k)\mathbf{X}(k)\mathbf{e}_N^*(k) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{W}_N(k)$ 为待求解的权值向量; $N$ 为天线阵元数量; $m(k)$ 为步长调整因子; $\boldsymbol{\mu}(k)$ 为步长向量; $\mathbf{X}(k)$ 为原始输入矩阵; $\mathbf{e}_N^*(k)$ 为期望信号和输出的误差矩阵。

根据卡尔曼滤波算法<sup>[15]</sup>,系统变量 $\mathbf{X}(k)$ 可以看作最终需要的加权向量 $\mathbf{W}_N(k)$ ,且在迭代收敛后满足 $\mathbf{W}_N(k+1) = \mathbf{W}_N(k)$ 。由于无法直接观察到阵列权值的变化,只能观测到天线阵列的输出 $\mathbf{y}(k)$ ,采样时刻天线阵输出为

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{X}^H(k)\boldsymbol{w}(k) \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{w}(k)$ 为表征 $\mathbf{y}(k)$ 的权值向量。

步长 $\boldsymbol{\mu}(k)$ 的更新方程为

$$\boldsymbol{\mu}(k) = \frac{\mathbf{P}(k|k-1)}{\mathbf{x}^H(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{x}(k) + r} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P}(k|k-1)$ 为后验估计误差的协方差矩阵; $\mathbf{x}(k)$ 为原始信号输入; $r$ 为常数。 $\mathbf{P}$ 的更新方程为

$$\mathbf{P}(k+1|k) = (\mathbf{I} - \boldsymbol{\mu}(k)\mathbf{X}(k)\mathbf{x}^H(k))\mathbf{P}(k|k-1) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

在上述多波束生成算法中,需要提前设置初始值,通过不断迭代获取天线阵元幅度和相位的最优值。然而,天空地MLHetINet的空间飞行器和地面移动终端的相对快速移动,使得无法对目标信号进行有效跟踪和捕获,且多次迭代会占用飞行器有限的计算资源。因此,本文提出基于最小方差无失真响应(Minimum variance distortionless response, MVDR)的VSLMS凝视波束形成方法。该方法不需要进行多次迭代,仅利用约束条件便可直接获得阵列天线的权值。具体而言,首先通过MVDR准则获取

阵列天线的权值,保证目标方向的稳定传输和干扰方向的零陷,然后结合 VSLMS 算法对获得的信号进行更新求解。

MVDR 的目标是最小化输出的噪声方差,即在保证期望方向的信号进行无损耗传输的同时,使得总输出功率最小。当期望方向信号的单位增益使总功率最小时,可知干扰和噪声的输出功率最小。考虑对样本信号的协方差矩阵添加一定的比重,在协方差矩阵中引入全向干扰源,减弱在生成多波束时算法对其他目标方向信号的抑制能力。则生成  $N$  个目标波束、 $M$  个干扰零陷多波束生成算法的 MVDR 准则可以表示为

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}^H (\mathbf{R} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha}(\theta_i) = 1 & 1 \leq i \leq N \\ \mathbf{w}^H \boldsymbol{\alpha}(\vartheta_j) = 0 & 1 \leq j \leq M \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{w}$  为多波束权值向量,为针对目标函数的期望输出;  $\mathbf{R}$  为天线阵列的相关矩阵;  $\theta_i$  为第  $i$  个目标波束的方向;  $\vartheta_j$  为第  $j$  个干扰波束的方向;  $\boldsymbol{\alpha}(\theta)$  为阵列天线在方向  $\theta$  的响应。两个约束分别表示针对目标波束方向进行放大,以及针对干扰方向进行零陷。因为优化函数存在连续的优化变量且包含等式约束,本文考虑使用拉格朗日分解方法求解原问题,通过将原优化函数简化为无约束的优化问题进行求解。通过采用拉格朗日乘子法,对式(5)进行展开可得

$$J(\mathbf{w}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} + \sum_{i=1}^N \lambda_i (\mathbf{w}_i^H \boldsymbol{\alpha}(\theta_i) - 1) + \sum_{j=1}^M \beta_j \mathbf{w}_j^H \boldsymbol{\alpha}(\vartheta_j) \quad (6)$$

式中  $\boldsymbol{\lambda}$  和  $\boldsymbol{\beta}$  为拉格朗日乘子。对式(6)中的  $\mathbf{w}$  进行求导,并代入约束条件,可以得到多波束的权值矩阵表达式为

$$\mathbf{W} = (\mathbf{R} + \mu \mathbf{I}) \mathbf{C} \left( \mathbf{C}^H (\mathbf{R} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{C} \right)^{-1} \mathbf{f} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{C}$  为所需方向与干扰方向导向矢量形成的导向约束矩阵;  $\mathbf{f}$  为增益向量。

### 3 空地链路干扰消除算法

在天空地 MLHetINet 中,空基网络作为重要的承接层,需要连接地面基站和天基卫星,相比于卫星和空中基站间存在的稳定通信链路,空地信道面临更为复杂的通信环境。因此亟需设计适用空地信道的干扰消除算法,以降低空地信号的误码率,提升切换判定的准确性。

传统的串行干扰消除 (Successive interference cancellation, SIC) 算法通过对接收信号进行逐级干扰消除和反馈,可以得到更好的表现形式。然而, SIC 通常按照发射天线的顺序进行干扰消除,当最强的干扰位于检测顺序靠后时,逐级干扰消除的效果将十分有限。当波束覆盖的小区数量增多时,处于不同波束覆盖范围内的用户的发射信号,将经历不同的链路衰减以及干扰,最终导致接收端的信号功率差异。在这种情况下,如何进行信号检测和快速干扰消除至关重要。为此,本文设计了针对排序优化的干扰消除算法,以应对大规模网络中存在的多类型干扰,从而提高切换判决的准确性。

在 MLHetINet 通信系统中,地面第  $i$  个用户终端发射的信号分量在接收信号中所占的比重与信道矩阵对应的列范数成正比。如果根据列范数大小来排序,列范数越大检测优先级越高,这样只需计算有限次列范数便可实现顺序干扰消除。基于列范数排序的干扰消除算法 N\_OSIC 流程如图 2 所示,具体步骤如下:

(1) 令  $i = 1$ , 并定义初始信道矩阵  $\mathbf{H}_{(i)} = \mathbf{H}$ 。

(2) 检测第  $i$  个发送符号,采用最小均方误差 (Minimum mean square error, MMSE) 检测算法得到滤波伪逆矩阵为

$$\mathbf{G}_{\text{MMSE}}^{(i)} = \left( \mathbf{H}_{(i)}^H \mathbf{H}_{(i)} + \frac{\delta_n^2}{\delta_s^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}_{(i)}^H \quad (8)$$

式中: $\delta_n^2$ 为接收端的噪声方差; $\delta_s^2$ 为发送符号的平均功率。

(3) 计算滤波矩阵 $\mathbf{G}_{\text{MMSE}}^{(i)}$ 各列的范数并排序,选取范数值最大的一列记为 $\mathbf{w}_i$ ,计算第 $i$ 个用户发送信息的估计值 $\hat{x}_i = Q(\mathbf{w}_i \mathbf{y}_i)$ ,其中 $Q(\cdot)$ 表示硬判决。

(4) 消除已检信号对未检测信号造成的干扰,得到 $\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i - \mathbf{H}_{(i)} \hat{x}_i$ ,将 $\mathbf{H}_{(i)}$ 的第 $i^*$ 列置零并从矩阵 $\mathbf{H}_{(i)}$ 中剔除后得到 $\mathbf{H}_{(i+1)}$ ,应当注意 $\mathbf{H}_{(i+1)}$ 比 $\mathbf{H}_{(i)}$ 的列维度小1。

(5) 重复步骤(2~4),直至检出全部信号。

当系统中用户数量过多时, $N_{\text{OSIC}}$ 算法的计算复杂度不容忽视。为了提高检测效率,本文在 $N_{\text{OSIC}}$ 算法分组的概念中引入多阶检测,在解码过程中混合并行和串行检测,以获得更好的误码率表现性能。由于多波束天线的指向性,两个较远波束之间的干扰很小,在接收端接收到来自这两个波束的干扰将十分有限。考虑天空地MLHetINet通信系统中的 $K$ 个波束和波束范围覆盖区域内的 $K$ 个终端,波束 $i$ 的接收信号可表示为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{(i)} \mathbf{x} + \mathbf{n}_i \quad (9)$$

式中 $\mathbf{n}_i$ 为噪声。

当波束间相隔距离较远时,处于不同波束内的用户相互之间的干扰也很小,此时可以考虑将非目标用户对目标用户的干扰视为噪声,以简化接收端的运算复杂度。基于该思想,将点波束按检测顺序进行分组,通过人为的物理分组使组与组之间的干扰相对较小。考虑3组点波束,其中第2组点波束的空间位置介于另外两组之间。此时,第2组中的用户会对第1组和第3组中的用户造成相对更强的干扰,所以在仿真中,本文首先对处于中心波束服务区内的用户进行干扰消除,通过原始信号对第2组信号进行判决。然后通过第2组的硬判决得到的信号以及原始信号对第1组和第3组进行干扰消除,得到除去第2组信号干扰的第1组和第3组信号估计值。接下来,再利用消除了干扰的第1组和第3组信号以及原始信号重新对第2组信号进行判决,并依此类推。通过原始接收信号得到第2组信号的估计值 $\bar{x}_2 = Q(\bar{\mathbf{Q}}_2 \mathbf{H}^H \mathbf{y}) = Q(\bar{\mathbf{G}}_2 \mathbf{y})$ ,其中 $\bar{\mathbf{Q}}_2$ 为第2组信号在信道矩阵中的列构成的矩阵, $\bar{\mathbf{G}}_2$ 为对应的滤波矩阵,按照列范数排序的方式消除第 $i$ 组用户对其他用户的干扰,得到更新之后的信号 $\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i - [\bar{\mathbf{Q}}_2]_i \bar{x}_i$ 。更新方式同上,依次消去选中的列。得到 $\bar{x}_2$ 的估计值后,便可从第3组和第1组的接收信号中消除由第2组信号带来的干扰并进行更新

$$\bar{\mathbf{y}}_1 = \mathbf{y}_1 - \mathbf{H}_{12} \bar{x}_2 = \mathbf{H}_{11} \mathbf{x}_1 + \Delta \mathbf{y}_1 + \mathbf{n}_1 \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{y}}_3 = \mathbf{y}_3 - \mathbf{H}_{32} \bar{x}_2 = \mathbf{H}_{31} \mathbf{x}_1 + \Delta \mathbf{y}_3 + \mathbf{n}_3 \quad (11)$$

式中: $\mathbf{H}_{12}$ 为第二组用户到第一组接收端的信道矩阵; $\Delta \mathbf{y}_1$ 为第3组信号对第1组信号的干扰; $\Delta \mathbf{y}_3$ 为第1组信号对第3组信号的干扰。

分组串行干扰消除算法通过对多个用户依照相隔的距离进行分组,将整个波束覆盖区划分为多个具有一定空间隔离度的检测组,并依托线性检测方法消除干扰。将波束覆盖区内的用户分为 $N$ 组,从第1组开始进行串行干扰消除,逐渐地减小组内未检测信号受到的干扰,最后通过消除了 $\bar{x}_2$ 的信号干扰

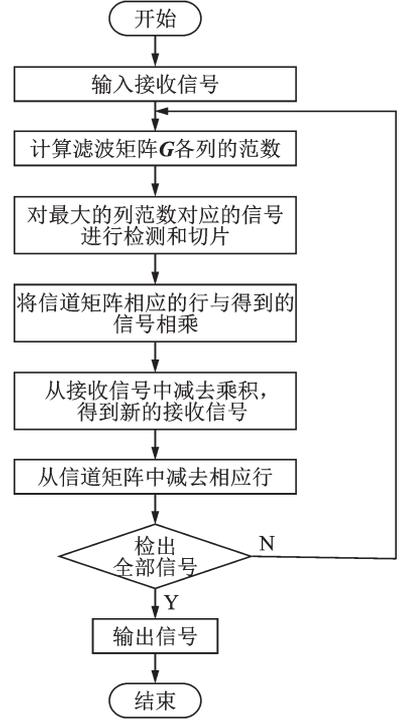


图2 基于列范数排序的干扰消除算法流程图

Fig.2 Flowchart of interference elimination algorithm based on column norm sorting

的第1组和第3组接收信号  $\bar{y}_1$  和  $\bar{y}_3$ , 可以通过进行组内列范数排序的串行干扰消除算法分别对  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_3$  进行估计, 有

$$\bar{x}_1 = Q(\bar{Q}_1 H_1^H \bar{y}_1) = Q(\bar{G}_1 \bar{y}_1) \quad (12)$$

$$\bar{x}_3 = Q(\bar{Q}_3 H_3^H \bar{y}_3) = Q(\bar{G}_3 \bar{y}_3) \quad (13)$$

式中:  $\bar{Q}_i (i=1, 3)$  为第  $i$  组信号在信道矩阵中的列构成的矩阵;  $\bar{G}_i (i=1, 3)$  为第  $i$  组信号的滤波矩阵。通过引入多阶检测, 利用第一阶段检测出的第3组和第1组的发送数据的估计值以及原始接收数据, 对第2组的用户发送数据估计值进行二阶段检测, 并对两次估计的用户数据进行更新可得

$$\bar{y}_2 = y_2 - H_1 \bar{x}_1 - H_3 \bar{x}_3 \quad (14)$$

$$\bar{x}_2 = Q(\bar{Q}_2 H_2^H \bar{y}_2) = Q(\bar{g}_2 \bar{y}_2) \quad (15)$$

式中:  $\bar{Q}_2 = (H_2^H H_2 + (\delta_n^2 / \delta_s^2) I)^{-1}$ ;  $\bar{g}_2$  为第2组信号的二次滤波矩阵。

接下来利用更新后得到的第二阶段  $\bar{x}_2$  以及第一阶段的  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_3$ , 再次对第3组和第1组的接收信号进行干扰消除得到

$$\bar{y}_1 = y_1 - H_{12} \bar{x}_2 - H_{13} \bar{x}_3 \quad (16)$$

$$\bar{y}_3 = y_3 - H_{32} \bar{x}_2 - H_{31} \bar{x}_3 \quad (17)$$

再次利用  $\bar{y}_1$  和  $\bar{y}_3$  分别对该组的传输数据进行检测估计, 更新  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_3$ , 得到二阶检测信号  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_3$ 。此时, 所有的传输符号都完成了二阶检测。通过将基于列范数的串行干扰消除检测算法 (N\_MMSE\_GOSIC) 进行分组并分阶段处理, 基于列范数的多阶分组串行干扰消除检测算法 (MS\_N\_MMSE\_GOSIC) 的具体步骤如图3所示。

通过对 MS\_N\_MMSE\_GOSIC 进行干扰消除性能仿真, 本文得到了经过多阶检测以及分组处理之后的基于列范数排序的串行干扰消除算法的误码率图, 通过与前文所提的干扰消除算法进行比较, 验证了所提算法的有效性, 仿真结果如图4所示。

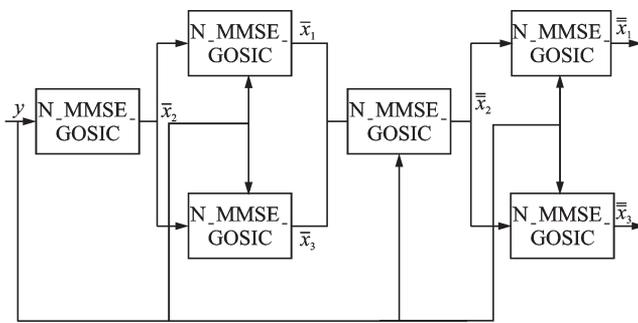


图3 MS\_N\_MMSE\_GOSIC算法流程图

Fig.3 Flowchart of MS\_N\_MMSE\_GOSIC algorithm

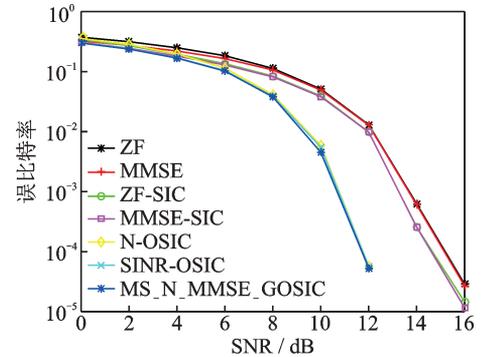


图4 MS\_N\_MMSE\_GOSIC算法误码率仿真图

Fig.4 Bit error rate of MS\_N\_MMSE\_GOSIC algorithm

#### 4 基于凝视波束和干扰消除算法的切换协议优化设计

地面网络的切换协议已经经过多年的发展, 而针对天基网络的 CCSDS 和 DVB 两大通信协议标准中, 涉及到天空地跨层切换的协议流程需要进一步优化<sup>[16]</sup>。5G 协议拥有的随机接入过程会增加切换时延和信令开销, 在空基和天基网络中并不适用。基于此, 考虑通过第2节和第3节所提出的波束赋形技术及空基干扰消除算法对 5G 协议进行简化, 提出针对星间切换、波束间切换、以及跨层切换设计简

化的切换协议。

在天空地 MLHetINet 中,地面网络的切换由宏基站进行切换判决控制,涉及天基和空基平台则由 LEO 卫星进行统一切换判决。星间链路和 UAV/HAP 到卫星间的信道多为莱斯信道,多径分量可以忽略不计,因此通过参考信号的信号强度均值进行切换判决是切实可行的。而卫星的位置及移动轨迹又是可预知的,因此涉及 LEO 卫星的切换过程,地面用户可依托参考信号强度值及星历提前发起切换请求。通过在空基平台部署第 2 节所提的基于 VSLMS 和 MVDR 准则的凝视波束赋形算法,可以实现特定区域的定向覆盖,同时实现对于目标方向的零陷,以降低来自其他小区的干扰;而通过在空基平台部署第 3 节所提的 MS\_N\_MMSE\_GOSIC 干扰消除算法,可以实现针对波束间切换更为精确的预测,通过多阶和分组检测减少波束间干扰,使得空中基站针对大规模用户切换场景实现精确判决;最终减少非必要的多址接入的过程,进而简化传统 5G 切换协议,降低资源消耗。

基于 5G NR 的协议如文献[15]所示,在天空地 MLHetINet 中,针对星地链路的切换,卫星轨道和地面基站的相对位置变化趋势是可提前预知的,因此用户可通过储存的星历提前发起切换请求,进而提前调整天线的振元和幅值以进行波束对准过程,简化切换协议;针对空基平台和地面站间的切换,用户可通过凝视波束实现目标跟踪,进而可以在切换流程中简化随机接入过程;为避免因空地信道复杂导致的切换判决不准确,本文通过在空基平台部署干扰消除算法以提高空地切换的准确性。本节以 5G NR 切换协议为基础,通过结合 VSLMS\_MVDR 凝视波束形成算法和 MS\_N\_MMSE\_GOSIC 干扰消除算法,提出了基于天空地 MLHetINet 简化的同层及跨层切换协议优化流程,具体步骤如图 5~8 所示。

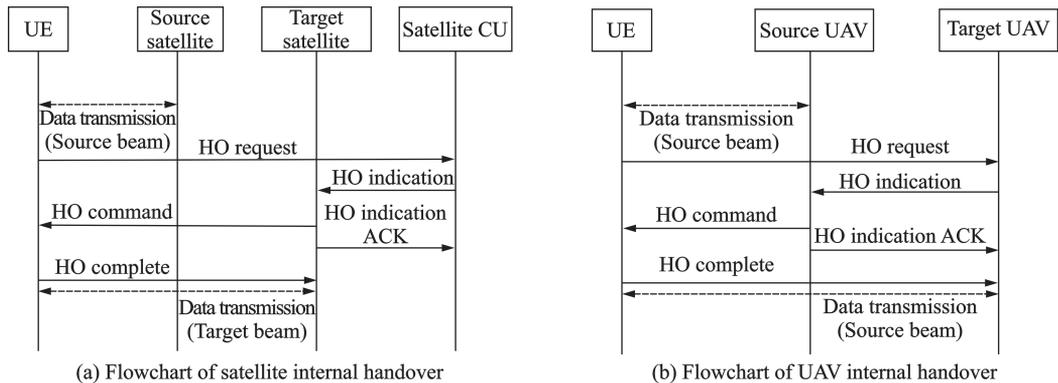


图 5 同层切换协议流程

Fig.5 Intra-layer handover protocol process

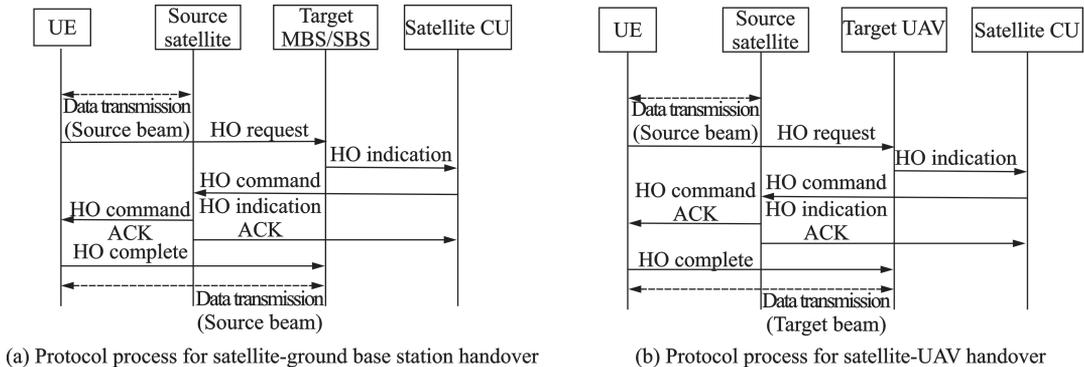


图 6 卫星端跨层切换协议流程

Fig.6 Inter-layer handover protocol process of satellite side

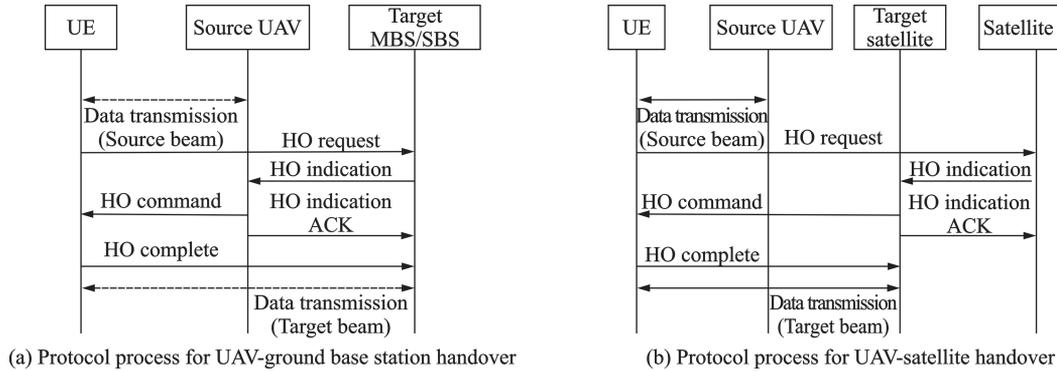


图7 无人机端跨层切换协议流程

Fig.7 Inter-layer handover protocol process of UAV side

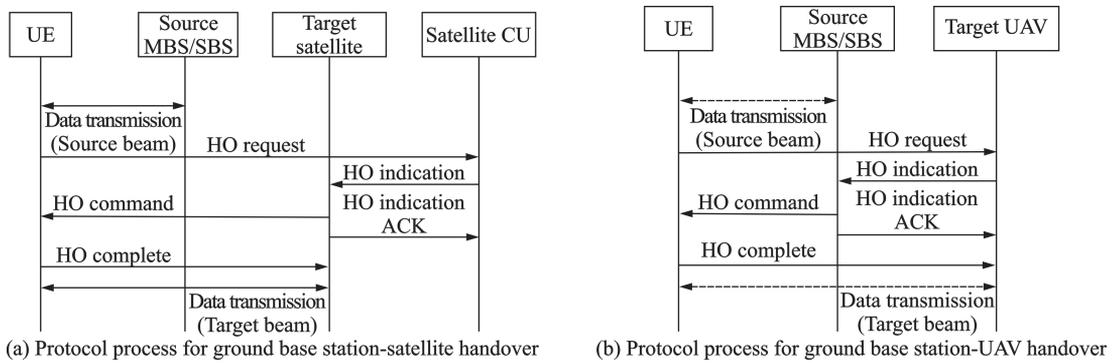


图8 地面端跨层切换协议流程

Fig.8 Inter-layer handover protocol process of ground base station side

图9展示了不同模型下的信令开销对比,与5G NR系统中的切换协议对比可知,本文提出的简化切换协议,通过动态凝视波束算法的辅助,可节省约50%的信令开销。

### 5 数值仿真和实验

仿真中MBS和SBS服从泊松点过程分布,覆盖地面网络,提供高速通信需求,其中基站的分布密度及MBS和SBS发射功率分别设置为 $\lambda_s=10\lambda_M$ ,  $P_M=46$  dBm,  $P_S=30$  dBm。每个用户的数据生成速率为3 000 b/s,地面通信链路的噪声密度为 $-174$  dBm/Hz,C波段和Ka波段的带宽分别为20 MHz和400 MHz。每个MBS和SBS的回程容量分别为150 Mb/s和20 Mb/s,其余仿真参数与文献[16]一致。仿真采用 $8 \times 8$ 的阵列天线,阵元间距为 $\lambda/2$ ,假设用户位置的方位角和俯仰角为 $(-50^\circ, -20^\circ)$ 、 $(0^\circ, 0^\circ)$ 以及 $30^\circ, 40^\circ$ ,而干扰方向为 $(-60^\circ, 20^\circ)$ ,采样点数为512,空基凝视波束仿真结果如图10所示。

其中,图10(a)为多波束方向图及干扰零陷的二维平面展示,可见在目标方向,即俯仰角为 $-20^\circ, 0^\circ, 40^\circ$ 时,生成的波束增益取最大值,而在干扰方向,即俯仰角为 $-60^\circ$ 时波束增益取极小值。图10(b)为多波

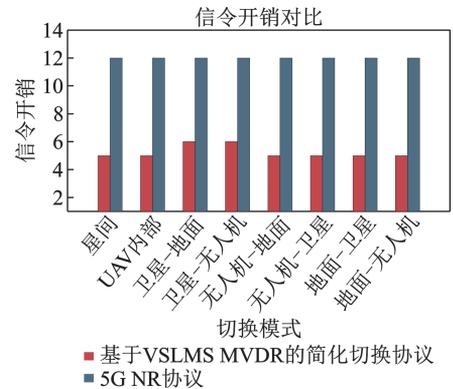


图9 信令开销对比

Fig.9 Comparisons of signaling overhead

束方向图在方位角和俯仰角的三维展示,其中颜色越亮,代表增益值越高。图10(c)为进行归一化展示的方向图展示效果。图10(d)为多波束方向图的二维俯视图,高亮区域表示波束增益高,可观测到该算法在目标方向的波束增益最高。

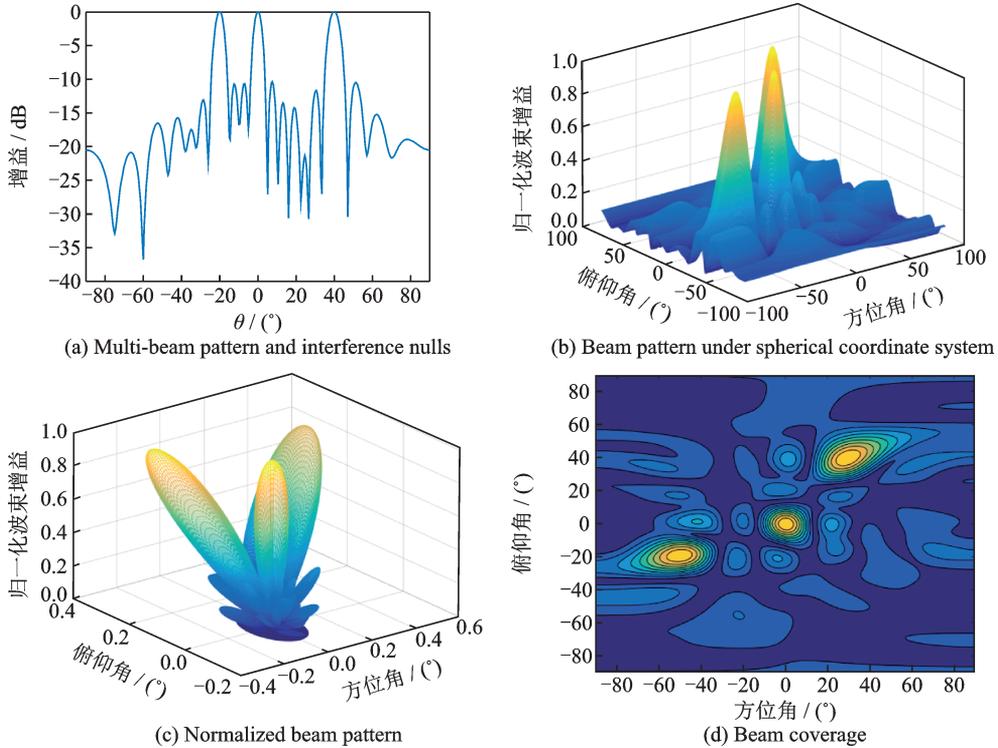


图10 凝视波束方向图及覆盖范围示意图

Fig.10 Illustrations of staring beam pattern and coverage region

图11展示了在不同的设计方案下所有用户的信息速率和随用户分布密度变化的趋势,在提出的4种模型中对用户信息速率进行了比对。从仿真结果可以看出,用户信息速率随着用户密度的增加而增加,本文提出的天空地MLHetINet方案与其他方案相比具有最高的用户信息速率。在天空地MLHetINet中,由于用户和各种基站之间的灵活匹配,总信息速率高于传统地面网络和天地非融合网络。这表明多类型基站(SBS、MBS、LBS和UAV)的互联互通可以显著提高网络性能。此外,相比天地MLHetINet,因为有了无人机网络的辅助,本文提出的天空地MLHetINet可以带来更高用户信息速率,这是因为空基平台部署的凝视波束可以持续为地面用户提供覆盖,避免了多次切换带来的容量损失。

图12展示了在不同的设计方案下切换率随SBS基站分布密度变化的趋势。相比传统地面网络和天地非融合网络,本文所提出的天空地MLHetINet具有更低的切换概率。通过空基平台生成的动态凝视波束,使得地面移动终端在与无人机的切换过程中,拥有更长的服务时间,进而减少切换概率。处在偏远地区的基站,可以选择通过无人机中继或者通过卫星构建通信链路。相比天地MLHetINet,由于考虑了空基网络,天空地MLHetINet网络中的移动基站数目增多,终端在进行链路建立时可供选择的基站数目相应增加。空基网络中的移动基站相比卫星网络,可为终端提供更为灵活的链路选择方案,同时相比于卫星固定的切换间隔,部署了凝视波束的无人机可以提供更长的通信时间,进而减少切换事件的发生。

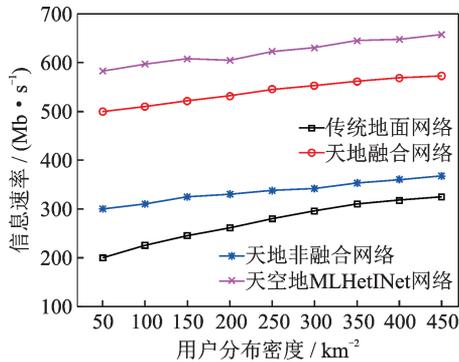


图 11 不同网络架构下的用户速率

Fig.11 User rates under different network architectures

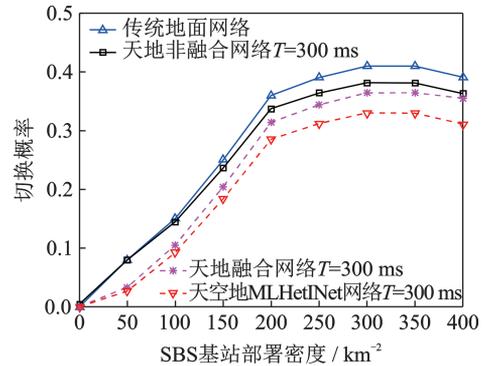


图 12 天空地 MLHetINet 网络的切换概率

Fig.12 Handover probability of space-air-ground ML-HetINet

## 6 结束语

本文首先针对地面终端和空中基站间的相对高速运动问题,提出通过动态凝视多波束形成算法,自适应地调整天线相位和权值,在目标方向生成主瓣并对干扰源进行零陷实现空域隔离,简化切换分析的复杂度。然后针对空地信道的复杂性,提出了基于列范数分组排序的多阶干扰消除算法,进一步提高目标信号的检测精度,提升切换分析的准确性。然后依托凝视波束技术及干扰消除算法,提出了针对天空地 MLHetINet 的简化切换协议,并给出所提协议信令消耗与 5G NR 协议的对比。通过仿真验证了所提的天空地 MLHetINet 的用户信息速率相比传统地面网络和天地 MLHetINet 有大幅度的提升,这是因为空基网络可以为地面用户提供更为灵活的切换选择,通过位置可灵活部署的空中基站,实现更为稳定的链路构建,进而提高系统容量。天空地 MLHetINet 的切换率亦有小幅度的下降,这是因为在空基网络中存在中继功能和凝视波束,通过该方案可以实现远距离传输,相比天地 MLHetINet 中只能依靠卫星进行通信的偏远区域用户,天空地 MLHetINet 中的空基网络可以为其构建稳定的通信链路,减少非必要切换。

### 参考文献:

- [1] FANG F, CHENG J, DING Z. Joint energy efficient subchannel and power optimization for a downlink NOMA heterogeneous network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 68(2): 1351-1364.
- [2] SINGH K D, SOOD S K. QoS-aware optical fog-assisted cyber-physical system in the 5G ready heterogeneous network[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 116(4): 3331-3350.
- [3] PARK C, KIM D, ZHU Q, et al. Task-guided pair embedding in heterogeneous network[C]//*Proceedings of the 28th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*. [S.l.]: ACM, 2019: 489-498.
- [4] LATVA-AHO M, LEPPÄNEN K, CLAZZER F, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[M]. *Outrun*, Finland: University of Oulu, 2020.
- [5] YAN L, HAN C, DING Q. Hybrid beamforming architectures of terahertz communications[C]//*Proceedings of the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Paris, France: IEEE, 2019: 1-2.
- [6] KONG L, HAN S, YANG C. Wideband hybrid precoder for massive MIMO systems[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*. [S.l.]: IEEE, 2015: 305-309.
- [7] CHEN Q, KUANG Z, ZHAO L. Multiuser computation offloading and resource allocation for cloud-edge heterogeneous network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(5): 3799-3811.
- [8] LI Z, HU Y, ZHU D, et al. ESMD-Flow: An intelligent flow forwarding scheme with endogenous security based on mimic

- defense in space-air-ground integrated network[J]. China Communications, 2022, 19(1): 40-51.
- [9] ZHAO R, YANG L T, LIU D, et al. A tensor-based truthful incentive mechanism for blockchain-enabled space-air-ground integrated vehicular crowdsensing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 2853-2862.
- [10] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术:探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.  
SHEN Xuemin, CHENG Nan, ZHOU Haibo, et al. Space-air-ground integrated networks: Review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [11] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 1-6.  
TIAN Kaibo, YANG Zhen, ZHANG Nan. Prospects for the air-space-ground integrated network technology[J]. ZTE Communications, 2021, 27(5): 1-6.
- [12] 徐晖, 孙韶辉. 面向6G的天地一体化信息网络架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 2-9.  
XU Hui, SUN Shaohui. Research on network architecture for the space-integrated-ground information network in 6G[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 2-9.
- [13] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks[M]. France: 3GPP Sophia-Antipolis, 2018.
- [14] 徐玉奇. 卫星移动通信系统多波束形成技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.  
XU Yuqi. Research on multi-beamforming technology of satellite mobile communication systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [15] 李伊陶. 基于LEO-MSS的多层扩展网络场景下的资源分配和切换优化[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.  
LI Yitao. Resource allocation and handover optimization based on extensible multi-layer LEO-MSS[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [16] ZHOU H, ZHOU H B, LI J G, et al. Heterogeneous ultradense networks with traffic hotspots: A unified handover analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10 (10): 8825-8838.

## 作者简介:

周赫(1994-),男,工程师,研究方向:空天地网络、卫星通信、无线传输策略设计,E-mail:willzhou2023@163.com。



高晓铮(1992-),通信作者,男,副教授,博士生导师,研究方向:空天地网络、通信网络性能分析、无线传输策略设计,E-mail:gaoxiaozheng@bit.edu.cn。



丁旭辉(1991-),男,预聘助理教授,硕士生导师,研究方向:卫星通信、迭代接收、抗干扰通信,E-mail:dingxuhui@bit.edu.cn。



李建国(1993-),男,预聘助理教授,硕士生导师,研究方向:太赫兹通信、卫星通信、宽带信号处理,E-mail:jianguoli@bit.edu.cn。

李宗凌(1985-),男,研究员,研究方向:卫星通信、高性能计算、星载操作系统,E-mail:3120205427@bit.edu.cn。



杨凯(1983-),男,教授,博士生导师,研究方向:空天通信与网络、无线通信信号处理,E-mail:yangkai@bit.edu.cn。

(编辑:张黄群)