

文章编号: 2095-4980(2023)01-0058-07

## 一种 SUTN 网络中用户接入信道的调度算法

林 洋, 陈华予, 宋国平

(吉林广播电视大学 吉林省远程教育技术科技创新中心, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 针对多用户的卫星-无人机-地面通信网络(SUTN)的用户接入信道问题, 提出基于遍历容量的调度算法(ECSA)。卫星通过空间光通信(FSO)向无人机(UAV)传输数据; UAV采用无线通信射频(RF)链路向用户传输数据。ECSA算法通过推导无人机端和用户端的信噪比, 再推导出信噪比的概率密度函数, 然后依据概率密度函数计算用户的遍历容量; 最后, 依据公平原则, 并结合用户的遍历容量, 计算用户的目标函数, 将具有最大的目标函数值的用户优先接入信道。仿真结果表明, 相比于轮流调度算法, 提出的ECSA算法有效提高了系统容量。

**关键词:** 卫星-无人机-地面通信网络; 无人机; 空间光通信; 遍历容量; 多用户调度

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020318

## A scheduling algorithm for user access channel for Satellite-Unmanned Aerial Vehicle-Terrestrial Network

LIN Yang, CHEN Huayu, SONG Guoping

(Jilin Distance Education Technology Innovation Center, Jilin Radio and Television University, Changchun Jilin 130022, China)

**Abstract:** The Ergodic Capacity-based Scheduling Algorithm(ECSA) is proposed to solve the problem of user access to the Satellite-Unmanned Aerial Vehicle(UAV)-Terrestrial Network(SUTN). Satellites transmit data to UAV via Free Space Optical(FSO). The UAV transmits data to the user via a wireless communication Radio Frequency(RF) link. ECSA algorithm firstly derives the Signal-to-Noise Ratios(SNRs) of UAV terminal and the client, then derives the Probability Density Function(PDF) of SNRs, and then calculate the user's Ergodic Capacity(EC) on the basis of probability density function. In the end, it calculate the objective function of the user based on the principles of fairness, combining with the EC of the user. The user with the greatest objective function value will access the channel. Simulation results show that compared with the rotational scheduling algorithm, the proposed ECSA algorithm can effectively improve the system capacity.

**Keywords:** Satellite-UAV-Terrestrial Network; Unmanned Aerial Vehicle; Free Space Optical; Ergodic Capacity; multiuser scheduling

卫星通信覆盖范围宽, 能够独立于环境<sup>[1]</sup>, 已成为为偏远用户和灾难区域用户提供通信的有效技术。同时, 基于无人机(UAV)的飞行基地的空中通信受到学术界和工业界的广泛关注<sup>[2]</sup>。UAV易部署, 覆盖范围宽, 在大型的突发事件中能够发挥重要作用。为了满足通信时延和可靠性要求, 将卫星与UAV相结合, 形成卫星-UAV-地面通信网络(SUTN)<sup>[3]</sup>。在SUTN中, 卫星先将数据传输至空中的UAVs, UAV再将数据转发至地面上的用户, 从而实现卫星与用户间的通信。SUTN网络已被欧盟ABSOLUTE项目采纳为紧急通信的通信架构<sup>[4]</sup>。

相比于射频(RF)无线通信, 空间光通信(FSO)具有带宽宽、易部署、高速率的特点<sup>[5]</sup>, FSO能够建立高速的点ToPoint通信链路。文献[6]将FSO与SUTN相结合, 提升了系统吞吐量; 文献[7]也提出基于FSO的SUTN的系统, 卫星与UAV间采用光通信, 用户与UAV间采用RF通信。

近期, 非对称的FSO/Rf传输受到关注。如, 文献[8]分析了基于放大-转发(Amplify-and-Forward, AF)协议的卫星-地面FSO协作网络的系统性能。该系统假定卫星RF链路服从低阴影-莱斯衰落, 地面FSO链路服从伽玛

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2020-11-26

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(YDZJ202202CXJD038)

分布；文献[9]也提出了类似的系统模型，但该系统只考虑单个用户，并没有考虑到多用户情况；文献[10]针对多用户的非对称的 FSO/RF 系统，分析了系统的误码率和信道遍历容量(EC)。尽管文献[10]考虑了多用户的非对称的 FSO/RF 系统，但其仍只采用了单一的 RF 传输。

针对信道接入问题，研究人员也提出了不同的研究方案。如，文献[11]提出基于无线通信多用户多址接入信道容量控制方法。该方法旨在提高系统容量，使信道容量总和最大化；文献[12]分析了信道资源分配问题模型，并建立以容量最大化为优化目标。然而，上述研究工作只是无线网络，并非针对多用户的 SUTN 系统。为此，针对多用户的 SUTN，本文提出基于遍历容量的调度算法(Ergodic Capacity-based Scheduling Algorithm, ECSA)。ESCA 算法利用用户的遍历容量，并结合公平原则，安排用户接入信道的顺序，进而提升系统的容量。

### 1 系统模型

考虑如图 1 所示的卫星-UAV-地面网络。UAV 盘旋于空中，接收来自卫星的消息，再转发至地面上的用户。UAV 离地面的高度为  $H$ 。假定在 UAV 的覆盖范围内有  $K$  个用户，令  $u_i$  表示第  $i$  个用户，且  $i = 1, 2, \dots, K$ 。

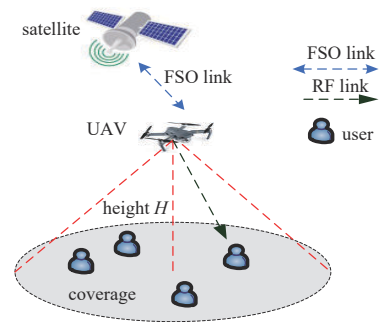


Fig.1 System model  
图1 网络模型

卫星与 UAV 间通信采用 FSO 通信。FSO 通信被誉为高速点到点通信的有效技术，具有带宽宽、速率高的特点<sup>[13]</sup>。UAV 与用户间采用无线 RF 通信。

#### 1.1 卫星与 UAV 间通信模型

假定卫星以功率  $P_s$  发射光信号  $x_s(t)$ ，如图 2 所示。光信号  $x_s(t)$  经 FSO 链传输至 UAV。UAV 接收光信号  $x_s(t)$  后，先进行光-电转换，再向用户传输。令  $y_u(t)$  表示 UAV 向用户传输的信号，其定义为：

$$y_u(t) = \eta \sqrt{P_s} \tilde{h}_s \zeta x_s(t) + n_u(t) \tag{1}$$

式中： $\eta$  为光-电转换效率； $\zeta$  为 FSO 链路的信道衰落系数； $n_u(t)$  为均值为零、方差为  $\sigma_u^2$  的高斯白噪声<sup>[9]</sup>； $\tilde{h}_s$  为 FSO 链路信道增益，计算公式为：

$$\tilde{h}_s = \frac{1}{2} (G_t + G_r - \rho_{\text{fst}} - \rho_{\text{atm}} - L_{\text{len}} - M) \tag{2}$$

式中： $G_t, G_r$  分别为传输增益、接收增益； $\rho_{\text{fst}}, \rho_{\text{atm}}$  分别为自由空间损耗、大气层损耗； $L_{\text{len}}$  为光镜片损耗； $M$  为系统容限。

因此，可利用式(3)计算 FSO 链路的瞬时信噪比(SNR)：

$$\gamma_u = \frac{P_s \eta^2 \tilde{h}_s^2 \zeta^2}{\sigma_u^2} = \tilde{\gamma}_u \zeta^2 \tag{3}$$

式中  $\tilde{\gamma}_u = \frac{P_s \eta^2 \tilde{h}_s^2}{\sigma_u^2}$  为平均 SNR。

#### 1.2 UAV 与用户间通信模型

UAV 端采用选择性的解码转发(Decode-and-Forward, DF)策略。具体地，如果  $\gamma_u$  大于预定阈值  $\Delta_{\text{th}}$ ，UAV 就能够顺利解码电信号  $y_u(t)$ 。解码后，UAV 再将解码后的信号进行重编码  $x_u(t)$ ，并传输至用户，如图 2 所示。

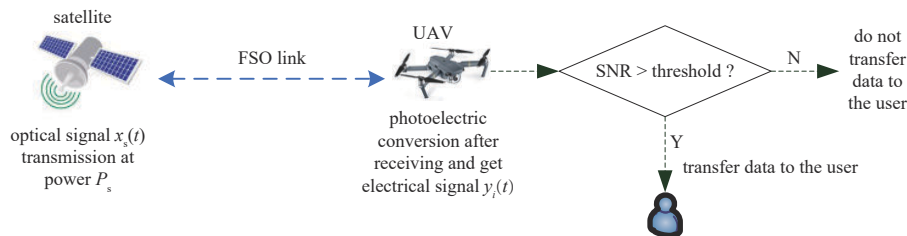


Fig.2 Communication between satellite and UAV  
图2 卫星与 UAV 间通信

若  $\gamma_u$  小于预定阈值  $\Delta_{th}$ , 则 UAV 无法顺利解码。在这种情况下, UAV 不进行任何处理。因此, 用户不能从 UAV 接收到任何信号。为此, 引用二值冲激函数  $\delta(\gamma_u)$ 。若  $\gamma_u$  大于  $\Delta_{th}$ ,  $\delta(\gamma_u)=1$ ; 反之,  $\delta(\gamma_u)=0$ 。

多天线技术是提高信道容量和传输可靠性<sup>[4]</sup>的有效策略。因此, 假定 UAV 配备了  $N$  架天线。每个用户对应一架天线。RF 链路采用传输波束形成(Beamforming, BF)策略。

令  $y_i(t)$  表示用户  $u_i$  端所接收的信号:

$$y_i(t) = \delta(\gamma_u) \sqrt{P_u} \mathbf{h}_i \mathbf{w}_i^H x_u(t) + n_i(t) \quad (4)$$

式中:  $P_u$  表示 UAV 的发射功率;  $\mathbf{w}_i$  表示 BF 的权值矩阵。  $n_i(t)$  表示用户  $u_i$  端的均值为零、方差为  $\sigma_i^2 = \kappa BT$  的高斯白噪声, 其中  $\kappa = 1.38 \times 10^{-23}$  为玻兹曼常量,  $B$  为噪声带宽,  $T$  为噪声热度。

因此, 用户  $u_i$  端的瞬时 SNR:

$$\gamma_i = \delta(\gamma_u) \frac{P_u}{\sigma_i^2} |\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i|^2 = \delta(\gamma_u) \tilde{\gamma}_i \quad (5)$$

假定 RF 链路服从相关瑞利衰落<sup>[15]</sup>。考虑到路径损耗和信道衰减, 将 UAV 与用户  $u_i$  间的信道矢量定义为:

$$\mathbf{h}_i = \zeta_i \mathbf{g}_i = \frac{1}{2} \left( 20 \log \sqrt{R_i^2 + H^2} + 20 \log f + 92.4 \right) \mathbf{g}_i \quad (6)$$

式中:  $R_i$  表示用户  $u_i$  的通信半径;  $H$  表示 UAV 的高度;  $f$  表示载波频率;  $\zeta_i$  表示自由空间路径损耗。因此, 输出的  $\tilde{\gamma}_i$  可重新表述为:

$$\tilde{\gamma}_i = \hat{\gamma}_i |\mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_i|^2 \quad (7)$$

式中  $\hat{\gamma}_i = \frac{P_u}{\sigma_i^2} \zeta_i^2$ 。

参照文献[15-16], 相关瑞利信道衰落矢量可表述为:

$$\mathbf{g}_i = \mathbf{R}_i^{1/2} \tilde{\mathbf{g}}_i \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{R}_i = E[\mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H]$  为  $\mathbf{g}_i$  的协方差矩阵,  $E[\cdot]$  表示求期望函数;  $\tilde{\mathbf{g}}_i = [\tilde{g}_{i,1}, \tilde{g}_{i,2}, \dots, \tilde{g}_{i,N}]^T$ , 其中  $\tilde{g}_{i,j}$  为独立同分布的随机变量, 且  $j=1, 2, \dots, N$ 。

此外, UAV 端通过采用传输 BF 策略最大化 SNR。因此, 依据式(7), 将优化 BF 权重矢量  $\mathbf{w}_i$  形式化表述为:

$$\begin{cases} \max_{\mathbf{w}_i} |\mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_i|^2 \\ \text{s.t. } \|\mathbf{w}_i\| = 1 \end{cases} \quad (9)$$

由于 UAV 端只能获取到统计的信道状态信息(Channel State Information, CSI), 可通过最大化  $\mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_i$  的期望值, 实现对  $\mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_i$  的最大化:

$$E[\mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H \mathbf{w}_i] = \mathbf{w}_i^H E[\mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H] \mathbf{w}_i = \mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i \quad (10)$$

通过特征值分解, 计算  $\mathbf{R}_i$ :

$$\mathbf{R}_i = [\mathbf{a}_{i,1}, \mathbf{a}_{i,2}, \dots, \mathbf{a}_{i,N}] \text{diag}(\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots, \lambda_{i,N}) [\mathbf{a}_{i,1}, \mathbf{a}_{i,2}, \dots, \mathbf{a}_{i,N}]^H \quad (11)$$

式中:  $\lambda_{i,j}$  为特征值;  $\mathbf{a}_{i,j}$  为对应的特征矢量。依据瑞利熵定理<sup>[17]</sup>, 可得

$$\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i}{\mathbf{w}_i^H \mathbf{w}_i} \leq \lambda_{i,\max}(\mathbf{R}_i) = \lambda_{i,1} \quad (12)$$

当满足  $\mathbf{w}_i = \mathbf{a}_{i,\max}(\mathbf{R}_i) = \mathbf{a}_{i,1}$ , 式(12)就可取等号。

最终, 用户端  $u_i$  所获取的  $\gamma_i$  为:

$$\gamma_i = \delta(\gamma_u) \tilde{\gamma}_i |\mathbf{a}_{i,1}^H \mathbf{R}_i^{1/2} \tilde{\mathbf{g}}_i|^2 = \delta(\gamma_u) \tilde{\gamma}_i \lambda_{i,1} |\tilde{g}_{i,1}|^2 \quad (13)$$

## 2 遍历容量

本小节先分析 FSO 和 RF 链路的信道统计特性，再推导遍历容量的表达式。先推导 UAV 端的信噪比及用户端的信噪比的概率密度函数(PDF)，再依据 PDF 推导用户的遍历容量，如图 3 所示。

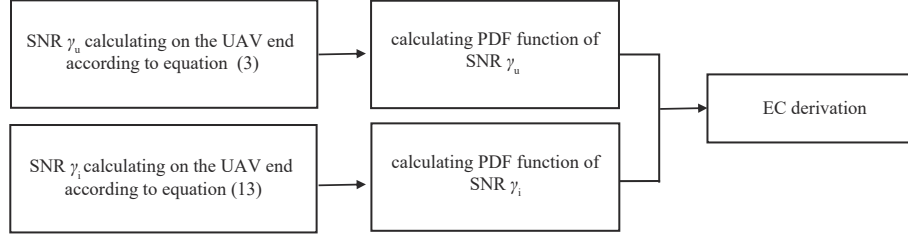


Fig.3 Flow of deriving traversal capacity  
图3 推导遍历容量的流程

ECSA 算法以最大化系统容量为调度准则，通过优化用户的遍历容量，使具有最大目标函数的用户优先接入信道，最终，提高了系统容量。

### 2.1 FSO 和 RF 链路的信道统计特性

假定 FSO 信道服从伽玛(Gamma)衰落分布。依据文献[8]， $\gamma_u = \tilde{\gamma}_u \zeta^2$  的 PDF 可表述为：

$$f_{\gamma_u}(x) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} x^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1}}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\tilde{\gamma}_u^{\frac{\alpha+\beta}{4}}} G_{0,2}^{2,0} \left[ \sqrt{\frac{x}{\tilde{\gamma}_u}} \middle| \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\alpha-\beta}{2} \right] \quad (14)$$

式中： $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$  和  $\Gamma(\cdot)$  分别表示 Meijer 的  $G$  函数和伽玛函数； $\alpha$  和  $\beta$  表示与大气湍流条件相关的参数。

对于 RF 链路，依据文献[14]， $\gamma_i = \tilde{\gamma}_i \lambda_{i,1} |\tilde{g}_{i,1}|^2$  的 PDF 为：

$$f_{\gamma_i}(x) = \frac{1}{\lambda_{i,1} \tilde{\gamma}_i} \exp\left(\frac{-x}{\tilde{\gamma}_i \lambda_{i,1}}\right) \quad (15)$$

### 2.2 遍历容量

将用户所获取的  $\gamma_i$  的瞬时互信息的期望定义为用户  $u_i$  的遍历容量 EC：

$$C_i = \frac{1}{2} E[\log_2(1 + \gamma_i)] \quad (16)$$

将式(5)代入式(16)可得：

$$C_i = \frac{1}{2} E[\log_2(1 + \delta(\gamma_u) \tilde{\gamma}_i)] = \Pr(\gamma_u \geq \Delta_{th}) \underbrace{\frac{1}{2} E[\log_2(1 + \tilde{\gamma}_i)]}_{\Xi_i} \quad (17)$$

式中： $\Pr(\gamma_u \geq \Delta_{th})$  表示发生  $\gamma_u \geq \Delta_{th}$  事件的概率，其定义为：

$$\Pr(\gamma_u \geq \Delta_{th}) = 1 - F_{\gamma_u}(\Delta_{th}) \quad (18)$$

式中： $F_{\gamma_u}(x)$  表示  $\gamma_u = \tilde{\gamma}_u \zeta^2$  的累加分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。将式(14)代入，并利用文献[18]的式(26)，经简单的计算后，可得：

$$F_{\gamma_u}(x) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} \left(\frac{x}{\tilde{\gamma}_u}\right)^{\frac{\alpha+\beta}{4}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[ \sqrt{\frac{x}{\tilde{\gamma}_u}} \middle| \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha+\beta}{2} \right] \quad (19)$$

此外，式(17)中的  $\Xi_i$  的定义如下：

$$\Xi_i = \frac{1}{2} E[\log_2(1 + \tilde{\gamma}_i)] = \frac{1}{2\ln 2} \int_0^{\infty} \ln(1+x) f_{\tilde{\gamma}_i}(x) dx \quad (20)$$

利用式(15), 并结合文献[19], 将  $\Xi_i$  重新表述为:

$$\Xi_i = \frac{1}{2 \ln 2 \lambda_{i,1} \tilde{\gamma}_i} G_{2,3}^{3,1} \left[ \frac{1}{\lambda_{i,1} \tilde{\gamma}_i} \middle| \begin{matrix} -1, 0 \\ 0, -1, -1 \end{matrix} \right] \quad (21)$$

最后, 将式(21)代入式(17), 并在  $F_{\tilde{\gamma}_i}(x)$  函数中取  $x = \Delta_{th}$  值, 可推导出 EC 表达式:

$$C_i = \frac{1}{2 \ln 2 \lambda_{i,1} \tilde{\gamma}_i} \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{\Delta_{th}}{\tilde{\gamma}_i} \right)^{\frac{\alpha+\beta}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left[ \alpha\beta \sqrt{\frac{\Delta_{th}}{\tilde{\gamma}_i}} \middle| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+\beta}{2} \\ \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha+\beta}{2} \end{matrix} \right] G_{2,3}^{3,1} \left[ \frac{1}{\lambda_{i,1} \tilde{\gamma}_i} \middle| \begin{matrix} -1, 0 \\ 0, -1, -1 \end{matrix} \right] \quad (22)$$

### 3 基于 EC 的公平联合调度

ECSA 算法遵照公平原则, 并依据用户的遍历容量择优接入信道。将接入信道时间划分为  $T_w$  个时间窗口, 且  $t = 1, 2, \dots, T_w$ 。先计算用户的效用函数。令  $\varphi_i(t)$  表示用户  $u_i$  的效用函数, 其定义为:

$$\varphi_i(t) = \left( 1 - \frac{1}{T_w} \right) \varphi_i(t-1) + \frac{1}{T_w} \lambda_{i,1} \quad (23)$$

然后, 依据用户的效用值构建负幂-指数函数  $\omega(\varphi_i(t))$ :

$$\omega(\varphi_i(t)) = (\varphi_i(t))^{-\rho} \quad (24)$$

最后, 结合  $\omega(\varphi_i(t))$  和用户的遍历容量  $C_i$ , 构建 ECSA 算法的目标函数:

$$i^* = \arg \max \omega(\varphi_i(t)) C_i \quad (25)$$

式中  $i^*$  表示在  $t$  时刻所选择接入信道的用户所对应的下标。

## 4 性能仿真

### 4.1 仿真环境

利用 Matlab 软件建立仿真平台。考虑如图 1 所示的网络模型, UAV 的高度为 1 km ( $H = 1$  km), 其在地面的覆盖区域的半径为 500 m。在此区域内均匀分布 15 个用户。UAV 端的光/电转换效率  $\eta = 0.5$ ;  $v = 3$ 。表 1 为 FSO 链路和 RF 链路的仿真参数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters		
simulation parameters		value
FSO link	optical signal reception bandwidth $B_o$ /GHz	30
	channel parameters $h_s^2$ /dB	-50.74
	atmospheric related parameters $\{\alpha, \beta\}$	{4, 1.9}
RF link	$f$ /GHz	2
	noise bandwidth $B$ /MHz	20
	noise heat $T$ /K	300

为了更好地分析 ECSA 算法的性能, 选择轮流调度 (Robin Scheduling, RS) 算法和随机调度 (Opportunistic Scheduling, OS) 算法。轮流调度算法是指用户依据顺序轮流接入信道; 随机调度算法是采用随机地选择用户接入信道。

### 4.2 传输功率对系统容量的影响

假定卫星与 UAV 的传输功率相同, 且传输功率在 -10 dBm~20 dBm 变化。图 4 给出系统容量随传输功率的变化情况。

从图 4 可知, 系统容量随传输功率的增加而上升, 这符合预期。传输功率的增加, 增加了信号功率, 当噪声功率不变时, 增加传输功率能够提升信噪比。相比于 RS 算法和 OS 算法, 提出的 ECSA 算法能够有效提升系统容量。其中 RS 算法的系统容量最低。原因在于: RS 算法未采用任何策略, 只是依据顺序, 轮流接入信道。

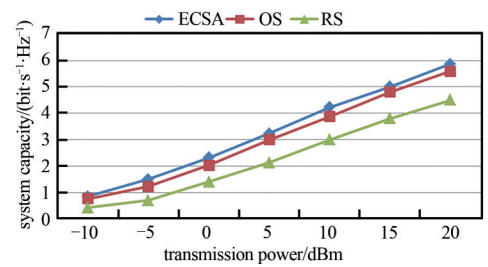


Fig.4 Influence of transmitted power on system capacity  
图 4 传输功率对系统容量的影响



### 4.3 接入信道的公平指数

维护用户接入信道的公平性也是衡量资源分配算法的重要性能。引用 Jain 的公平指数(Jain's Fair Index, JFI)估计算法,维护用户调配资源的公平性。依据文献[20],计算 JFI:

$$JFI(t) = \frac{\left(\sum_{i=1}^K x_i(t)\right)^2}{K \sum_{i=1}^K x_i^2(t)} \quad (26)$$

式中:  $x_i(t)$ 表示用户  $u_i$ 的累加特征值。JFI 在 0~1 之间变化, JFI 值越大,算法的公平性越好。

图 5 给出了用户数为 5、10、15 和 20 时,RS、OS 和 ECSA 算法的 JFI 性能,其中卫星和 UAV 的传输功率为 20 dBm。从图 5 可知,RS 算法的 JFI 最高,这符合预期。RS 算法采用轮流机制,使每个用户均有机会接入信道。

相反,OS 算法的 JFI 最低。原因在于:OS 算法未考虑信道状态,只是用户随机地接入信道,无法保证公平性。提出的 ECSA 算法的 JFI 值大于 OS 算法的 JFI 值,但小于 RS 算法的 JFI 值。尽管 ECSA 算法的 JFI 值低于 RS 算法的 JFI 值,但提高了系统容量(如图 4 所示),即 ECSA 算法在系统容量和公平性间达到了平衡。

### 4.4 用户的平均吞吐量性能

图 6 为平均用户吞吐量随传输功率的变化情况,从图 6 可知,相比于 OS 和 RS,提出的 ECSA 算法提高了平均用户吞吐量。并且随着传输功率的增加,ECSA 算法在平均用户吞吐量方面的优势越明显。

依据实验数据,对 ECSA 算法、OS 和 RS 算法的性能进行总结,如表 2 所示。ECSA 算法在吞吐量与公平指标间进行了折衷。尽管 RS 算法的公平性能较优,但其吞吐量性能差。

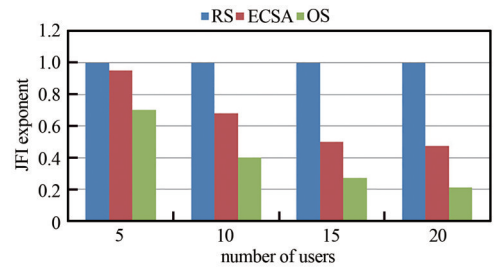


Fig.5 JFI index performance  
图 5 JFI 指数性能

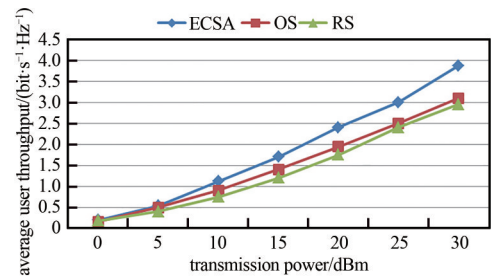


Fig.6 Average user throughput  
图 6 平均用户吞吐量

表 2 ECSA 算法、OS 和 RS 算法的性能对比

Table2 Performance comparison of ECSA, OS and RS algorithms

	OS	RS	ECSA
principle	user can access a random channel	channel accessing in turns	channel accessing according to traversal capacity optimal selecting
advantage	simple	fair indicator is excellent	considering both throughput and fairness
disadvantage	user channel state information is not in effect, performance is on average	user channel state information is not in effect, throughput is not guaranteed	fair indicator is poor

## 5 结论

用户接入信道的策略是卫星-无人机-地面通信网络 SUTN 必须解决的问题。SUTN 网络采用非对称的链路:卫星与 UAV 间采用 FSO 链路;UAV 与用户间采用 RF 链路。提出的 ECSA 算法推导了用户的 EC,再依据 EC 设置用户接入信道顺序。仿真结果表明,相比 OS 和 RS 算法,提出的 ECSA 算法有效提高了系统容量,但 ECSA 算法的 JFI 指数低于 RS 算法的 JFI 指数。后期,将进一步优化算法,使 ECSA 算法的 JFI 指数逼近于 RS 算法的 JFI 指数。

由于本文旨在提高系统容量,仅分析了 ECSA 算法的系统吞吐量和用户接入的公平指数,未对算法的其他性能进行分析,包括算法的复杂度、能量消耗。后期,将对 ECSA 算法的复杂度和能量消耗进行分析。

### 参考文献:

[1] 汤辉,邹钦羊,朱立冬,等. 卫星通信系统多优先级信道预留分配策略[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(5):765-770. (TANG Hui,ZOU Qinyang,ZHU Lidong,et al. Channel allocation strategy for multi-priority terminals in satellite communication systems[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(5):765-770.)

- [2] LIN Z, LIN M, HUANG Y, et al. Robust multi-objective beamforming for integrated satellite and high altitude platform network with imperfect channel state information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019,67(24):6384–6396.
- [3] LIU X, LIN M, HUANG Q. Performance analysis for multi-user integrated satellite and UAV cooperative networks[J]. Physical Communication, 2019(36):100762–100772.
- [4] GRACE D, JIANG T, ALLSOPP S. Integrated project ABSOLUTE—Aerial base stations with opportunistic links for unexpected & temporary events[J]. IEEE Communications Magazine, 2013,54(4):31–39.
- [5] 张韵, 王翔, 赵尚弘. 基于  $2 \times 2$  放大转发中继的混合 RF/FSO 系统性能分析[J]. 激光与红外, 2019,49(4):42–49. (ZHANG Yun, WANG Xiang, ZHAO Shanghong. Performance of  $2 \times 2$  AF relay-assisted RF/FSO communication system[J]. Laser & Infrared, 2019,49(4):42–49.)
- [6] LI M, HONG Y, ZENG C. Investigation on the UAV-to-satellite optical communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018,36(9):2128–2138.
- [7] AHMAD I, NGUYEN K D, LETZEPIS N. Performance analysis of high throughput satellite systems with optical feeder links[C]// IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM). Singapore:IEEE, 2017:1–7.
- [8] PETKOVIC M I, DJORDJEVIC G T, MARJANOVIC Z M. Analytical approach in evaluation of outage probability of DF based hybrid satellite-terrestrial FSO cooperative system[C]// The 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications(TELSIKS). Nis, Serbia:IEEE, 2017:326–329.
- [9] 宋财华, 祝向辉, 游菊芬, 等. 基于遗传算法的最大化公平性基站主动存储方案[J]. 通信技术, 2018,51(8):1863–1869. (SONG Gaihua, ZHU Xianghui, YOU Jufen, et al. Maximum fairness basestation active storage scheme based on genetic algorithm[J]. Communication Technology, 2018,51(8):1863–1869.)
- [10] ZEDINI E, SOURY H, ALOUINI M. On the performance analysis of dual-hop mixed FSO/RF systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016,15(5):3679–3689.
- [11] 熊斐, 李季. 无线通信多用户多址接入信道容量控制仿真[J]. 计算机仿真, 2020,37(9):149–151. (XIONG Fei, LI Ji. Simulation of capacity control of multi-user multiple access channel in wireless communication[J]. Computer Simulation, 2020,37(9):149–151.)
- [12] 王文籍, 黄亚男, 吴炜, 等. 无线带内全双工信道的多用户最优分配问题模型[J]. 电子与信息学报, 2018,40(3):721–727. (WANG Wennai, HUANG Yanan, WU Wei, et al. An optimal allocation model of wireless In-band Full-duplex Channel for Multiple Access[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018,40(3):721–727.)
- [13] 韩立强, 江红兵. 一种混合认知 RF 和 MIMO FSO 系统的中断概率分析[J]. 中国激光, 2018,45(4):239–246. (HAN Liqiang, JIANG Hongbing. Outage probability analysis of a mixed cognitive RF and MIMO FSO system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018,45(4):239–246.)
- [14] 侯卫民, 苏佳, 王静. 传感器网络中提高吞吐量的机会波束调度算法[J]. 电子科技大学学报, 2019,48(3):336–339. (HOU Weimin, SU Jia, WANG Jing. Opportunistic beamforming scheduling algorithm for improving the SNR and communication rate of wireless sensor networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019,48(3):336–339.)
- [15] 张刚, 许嘉平, 张天骐. 基于 Rayleigh 衰落信道下 MISO-MU-CSDCSK 通信系统性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018,40(11):185–193. (ZHANG Gang, XU Jiaping, ZHANG Tianqi. Performance analysis of MISO-MU-CSDCSK system over Rayleigh fading channel[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018,40(11):185–193.)
- [16] 周义明, 李英顺, 田小平. 基于瑞利多径衰落信道的信号包络频谱感知[J]. 电子与信息学报, 2020,42(5):1231–1236. (ZHOU Yiming, LI Yingshun, TIAN Xiaoping. Spectrum sensing based on signal envelope of Rayleigh multi-path fading channels[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020,42(5):1231–1236.)
- [17] ALEXANDR K, ANATOL P, DAMIEN C. Fundamentals of manipulator stiffness modeling using matrix structural analysis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019,133:365–394.
- [18] ABLINGER J, BLUMLEIN J, FREITAS D A. Iterated elliptic and hypergeometric integrals for Feynman diagrams[J]. Journal of Mathematical Physics, 2018,59(6):45–54.
- [19] WOLFRAM Research. Mathematica edition: version 8.0[Z]. Champaign, IL, USA: Wolfram-Research, Inc., 2010.

#### 作者简介:

林洋(1980-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为教育大数据与教育人工智能. email: linyang24@163.com.

陈华予(1972-), 女, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为教育人工智能.

宋国平(1968-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为现代远程教育技术.