

蜂窝物联网中短包域能量效率最大化波束成形优化与设计

李世党^① 魏明生^{*①} 赵娟^② 刘加跃^① 唐守锋^③

^①(江苏师范大学物理与电子工程学院 徐州 221116)

^②(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210042)

^③(中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116)

摘要: 为了满足未来蜂窝物联网(IoT)中超高可靠和超低时延的要求, 该文提出一种适用于多小区多用户超高可靠极低时延网络短包域公平性能量效率最大化算法。首先, 以最小用户传输速率、每个发射机最大功率等约束为限制, 构建了一个关于波束成形矢量的非线性分式规划资源配置模型。随后, 采用变量代换、连续凸近似等技术, 将原始非凸优化问题转化为标准的凸问题, 进而提出一种短包域迭代能量效率最优化方法进行求解。最后, 数值仿真结果验证了所提算法在短包域具有良好的能量效率性能。

关键词: 蜂窝物联网; 超可靠; 低时延; 公平性能量效率; 短包域

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)09-3075-08

DOI: 10.11999/JEIT220390

Optimization and Design of Beamforming for Cellular Internet-of-Things with Energy Efficiency Maximization in Short Packet Domain

LI Shidang^① WEI Mingsheng^① ZHAO Juan^② LIU Jiayue^① TANG Shoufeng^③

^①(School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

^②(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210042, China)

^③(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to meet the requirements of ultra-high reliability and ultra-low latency in future cellular Internet-of-Things (IoT), an algorithm for such networks, which ensures the fairness-aware energy efficiency maximization in short packet domain, is developed. Firstly, a nonlinear fractional programming resource allocation model, which optimize the beamforming vector, is constructed with several constraints such as minimum user transmission rate and maximum power of per transmitter. Subsequently, the original non-convex optimization problem is transformed into a standard convex problem by exploiting the variable substitution and continuous convex approximation. Furthermore, an iterative energy efficiency optimization algorithm is developed in short packet regime. Finally, the numerical simulation results verify that the proposed algorithm has good energy efficiency performance in the short packet domain.

Key words: Cellular Internet of Things (IoT); Ultra-high reliability; Ultra-low latency; Fairness-aware energy efficiency; Short packet domain

1 引言

在对延迟性能和可靠性有严格要求的物联网设

备爆炸性增长的推动下, 超高可靠和超低时延通信 (ultra-Reliability and Low Latency Communication, uRLLC) 已成为第5代通信系统和未来通信系统中不可分割的部分。特别地, 智能工厂和远程手术对可靠性的要求达到 $10^{-9} \sim 10^{-8}$, 端到端时延不超过1 ms^[1]; 智能电网、智慧交通系统等对可靠性和时延要求要低一些, 不过也要分别达到 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 和1 ~ 100 ms^[2]。蜂窝物联网中, 网络设备主要发送超低时延超高可靠性的控制和感知等短包数据, 数据包长度通常在几个或者几十字节, 故而采

收稿日期: 2022-04-02; 改回日期: 2022-07-25; 网络出版: 2022-07-31

*通信作者: 魏明生 weims@jsnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62171119), 国家重点研发计划(2017YFF0205500), 徐州市重点研发项目(KC20027, KC18079)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62171119), The National Key R&D Program of China (2017YFF0205500), The Key Research and Development Plan of Xuzhou (KC20027, KC18079)

用短包通信技术^[3-5]。与此同时,巨量的物联网设备接入到网络中,不可避免地会产生大量的能源消耗,因此,如何在保证可靠性和低时延下提升网络的资源利用效率成为一个重要的问题。

传统的多用户协同通信是基于经典的香农容量展开的,一般假定对于无限长的传输数据块长度具有任意低的解码错误概率。然而,在有限数据长度的蜂窝物联网中,信源以低于传输通道最大可实现速率传输数据,则必然可以找到一种方案使得相应的解码误差概率任意小。因此,传统的香农容量不能很好地描述短包通信的可靠性与传输速率,致使传统的无限包长通信无线传输方案不再适用于短包通信系统^[6,7]。幸运的是,文献[8]给出了短包域数据传输速率与数据包和解码误差概率的闭合表达式,为后续研究短包域通信提供了坚实理论导引。相较于长包通信系统,短包域通信系统可达信息速率与解码误差概率的表达式更为复杂。因此,短包域通信系统的资源分配问题更加难以求解。

近年来,如何设计更加适用于短包通信系统的资源管控方案吸引了学术界和工业界的广泛关注^[9-16]。针对有限码长下多用户下行通信系统,文献[9]通过对系统带宽、功率的联合优化以最大化系统的归一化吞吐量。文献[10]考虑传输时延、发射机功率等约束,给出了一种短包域用户速率最大化的资源配置算法。考虑高速移动场景,文献[11]提出了一种适用于uRLLC的动态信道配置方案。进一步,文献[12]针对中继协作短包通信场景,考虑误差解码概率和时延约束,提出了一种速率最大化的优化方案,结果表明可以有效改善中继辅助通信的性能。文献[13]研究了认知多用户通信网络中短包数据传输的问题,提出了一种认知系统吞吐量最大化算法。然而,上述文献没有涉及能量效率最大化的问题,因此,文献[14]考虑现实的时延和可靠性约束,通过联合优化带宽、功率控制和天线配置,提出了一种能量效率最大化的传输方案。针对认知无人机辅助的uRLLC网络,文献[15]推导了系统吞吐量的解析表示式,进而通过优化路径轨迹、带宽、功率等设计了一种能量效率最大化算法。文献[16]考虑每个用户的解码误差概率和发射总功率约束,研究了高信噪比区域下行多输入单输出多用户网络的短包传输问题,提出了一种和能量效率最大化的优化方案。但是,上述工作只是考虑简单的短包域单小区多用户场景且没有考虑能量效率的公平性,其中所有的节点都只有1根天线。目前,蜂窝物联网中大多包含多个小区且每个发射机都有多根天线,此时小区的干扰更加多样且难以管控,而现有的研究缺

乏针对这种uRLLC超密集网络的能量效率最大化传输方案。

基于此,本文考虑短包域多小区广播干扰信道下行网络,其中每个小区的发射机配置单天线。在用户传输速率和每个发射机功率等约束下,构建了所有小区中最小能量效率最大化的优化问题。由于短包域速率表达式的复杂性以及目标函数的分式形式,难以直接获取该问题的解。为了解决该非凸问题,采用变量替换和连续凸近似等技术,提出一种短包域公平性能量效率最大化算法,并且证明了本算法的收敛性。仿真实验表明,所提算法具有较快的收敛速度和能量效率性能。

2 系统模型与问题建模

本文研究多小区uRLLC下行广播干扰信道,不失一般性,小区数目为 K ,第 j 个小区中的发射机有 M_j 根天线,并且同时服务 N_j 个用户,其中所有的用户都配置单根天线。为了方便阐述, $\{j,k\}$ 表示第 j 个发射机服务的用户 k ,其中 $k \in \{1,2,\dots,N_j\}$, $j \in \{1,2,\dots,K\}$ 。此时,用户 $\{j,k\}$ 接收到的信号可以表示为

$$y_{j,k} = \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k} s_{j,k} + \sum_{i=1, i \neq k}^{N_j} \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,i} s_{j,i} + \sum_{i=1, i \neq j}^K \sum_{n=1}^{N_i} \mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{w}_{i,n} s_{i,n} + n_{j,k} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{h}_{i,j,k} \in \mathbb{C}^{M_i \times 1}$ 表示从发射机 i 到用户 $\{j,k\}$ 的信道冲击响应矢量, $s_{j,k}$ 表示发送给用户 $\{j,k\}$ 的信号,而 $\mathbf{w}_{j,k} \in \mathbb{C}^{M_j \times 1}$ 是相应的波束成形向量, $n_{j,k}$ 表示用户 $\{j,k\}$ 的加性高斯噪声,其中均值是0,方差是 $\sigma_{j,k}^2$ 。因此,用户 $\{j,k\}$ 的信干噪比 $\text{SINR}_{j,k}$ 可以表示为

$$\text{SINR}_{j,k} = \frac{|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^{N_j} |\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,i}|^2 + \sum_{i=1, i \neq j}^K \sum_{n=1}^{N_i} |\mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{w}_{i,n}|^2 + \sigma_{j,k}^2} \quad (2)$$

为了降低传输时延,物联网数据传输采用短包发送,致使无限数据包长的香农容量公式不再适用。因此,本文采用文献[6]中提出的短包域速率定义,则用户 $\{j,k\}$ 的短包域传输速率为

$$R_{j,k}(\mathbf{w}) \approx \ln(1 + \text{SINR}_{j,k}(\mathbf{w})) - \sqrt{\frac{V_{j,k}(\mathbf{w})}{L}} Q^{-1}(\rho^c) \quad (3)$$

其中, \mathbf{w} 表示所有波束成形矢量的集合, L 表示配

置给每一个用户的数据包长度， ρ^c 为用户的解码错误概率， $Q^{-1}(\cdot)$ 为标准 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 函数的逆函数。 $V_{j,k}(\mathbf{w}) = 1 - (1 + \text{SINR}_{j,k}(\mathbf{w}))^{-2}$ 描述了传输通道的色散特性。本文采用的能量效率为加权和速率与消耗总功率的比值，则第 j 个小区的能量效率定义为

$$f_j(\mathbf{w}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_j} \varpi_{j,k} R_{j,k}}{\frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^{N_j} \|\mathbf{w}_{j,k}\|^2 + M_j P_c + P_0} \quad (4)$$

其中， μ 为功率缩放参数， P_c 表示单根发射天线功率消耗，主要包括模数转换单元、频率矫正单元等， P_0 表示每一个小区消耗的功率。为了获得加权和速率与总功耗的折中，考虑在每个用户速率约束和发射机最大允许发射功率等约束下，以期通过优化波束成形矢量，使得所有小区中最小的短包域能量效率最大化，具体的优化问题可以建模为

$$\left. \begin{array}{l} \max_{\mathbf{w}} \min_{\forall j \in \{1,2,\dots,K\}} f_j(\mathbf{w}) \\ \text{s.t. C1: } R_{j,k} \geq R_{j,k}^{\min} \\ \text{C2: } \sum_{k=1}^{N_j} \|\mathbf{w}_{j,k}\|^2 \leq P_j^{\max}, \forall j, k \end{array} \right\} \quad (5)$$

其中，C1为用户 $\{j,k\}$ 的传输速率约束，主要描述限制用户 $\{j,k\}$ 传输速率的下限；约束条件C2为发射机 j 的总功率约束，用于限制小区 j 的实际功率的上限。显而易见，优化问题式(5)的目标函数的非线性和约束条件C1的非凸性，使得优化问题式(5)为非凸优化问题，无法直接采用标准凸优化理论进行求解。为了求解该问题，下一节利用变量代换、连续凸近似等方法将原始优化问题转化为等价的凸问题。

3 短包域能量效率最大化波束成形优化算法

本节利用变量替换以及连续凸近似技术，将非凸优化问题式(5)转换为标准的凸优化问题。具体而言，为了使得原始优化问题式(5)中分式形式的目标函数更易处理，引入新的优化变量 t ， $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]$ 和 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_K]$ ，则问题式(5)可等价转换为

$$\left. \begin{array}{l} \max_{\mathbf{w}, t, \mathbf{x}, \mathbf{y}} t \\ \text{s.t. C1, C2, C3: } \frac{x_j^2}{y_j} \geq t, \text{ C4: } \sum_{k=1}^{N_j} \varpi_{j,k} R_{j,k} \geq x_j^2 \\ \text{C5: } \frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^{N_j} \|\mathbf{w}_{j,k}\|^2 + M_j P_c + P_0 \leq y_j \end{array} \right\} \quad (6)$$

令 $(\mathbf{w}^{(n)}, t^{(n)}, \mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{y}^{(n)})$ 表示问题式(6)在第 $n-1$ 次迭代得到的可行解。为了将非凸约束C3转换为凸约束，需要C3左侧进行泰勒级数展开^[13]，则 $\frac{x_j^2}{y_j} \geq \frac{2x_j^{(n)}x_j}{y_j} - \left(\frac{x_j^{(n)}}{y_j^{(n)}}\right)^2 y_j \triangleq g_j^{(n)}(x_j, y_j)$ 。接下来，重点处理用户 $\{j,k\}$ 传输速率的非线性，换句话说，需要找到 $F_{j,k}(\mathbf{w}) \triangleq \ln(1 + \text{SINR}_{j,k}(\mathbf{w}))$ 凹下界和 $G_{j,k}(\mathbf{w}) \triangleq \sqrt{V_{j,k}(\mathbf{w})}$ 的凸上界。为了获得 $F_{j,k}(\mathbf{w})$ 的凹下界，引入优化参量 $\mathbf{v}_j = [v_{j,1}, v_{j,2}, \dots, v_{j,N_j}]$ ，则

$$F_{j,k}(\mathbf{w}) \geq F_{j,k}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j) \triangleq \ln(1 + \text{SINR}_{j,k}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j)) \quad (7)$$

不等式(7)成立的限制条件为

$$|\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k}| \geq v_{j,k}^2 \quad (8)$$

其中， $\gamma_{j,k}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j) \triangleq \frac{v_{j,k}^2}{\chi_{j,k}(\mathbf{w})}$ ， $\chi_{j,k}(\mathbf{w}) \triangleq \sum_{i=1, i \neq k}^{N_j} |\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,i}|^2 + \sum_{i=1, i \neq j}^K \sum_{n=1}^{N_i} |\mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{w}_{i,n}|^2 + \sigma_{j,k}^2$ 。利用文献[16]中的不等式： $\ln(1 + x^2/y) \geq \ln\left(1 + \frac{\bar{x}^2}{\bar{y}}\right) - \frac{\bar{x}^2}{\bar{y}} + \frac{2\bar{x}x}{\bar{y}} - \frac{\bar{x}^2(y + x^2)}{\bar{y}(\bar{y} + \bar{x}^2)}$ ，其中 $\forall x \geq 0, y > 0, \bar{y} > 0$ ，则

$$\begin{aligned} F_{j,k}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j) &\geq F_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \mathbf{v}_j^{(n)}) - \gamma_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \mathbf{v}_j^{(n)}) \\ &\quad + 2 \frac{v_{j,k}^{(n)} v_{j,k}}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)})} \\ &\quad - \frac{(v_{j,k}^{(n)})^2}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) \left(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + (v_{j,k}^{(n)})^2\right)} \\ &\quad \cdot \left(\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + (v_{j,k})^2\right) \triangleq F_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j) \end{aligned} \quad (9)$$

显而易见，近似函数 $F_{j,k}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j)$ 是变量 \mathbf{w} 和 \mathbf{v}_j 的凹函数，并且满足

$$F_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \mathbf{v}_j^{(n)}) = F_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}^{(n)}, \mathbf{v}_j^{(n)}) \quad (10)$$

进一步，约束式(8)的左侧是关于优化变量 \mathbf{w} 的2次凸函数，采用泰勒级数展开，可以得到

$$\begin{aligned} |\mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k}|^2 &\geq 2\Re \left\{ \left(\mathbf{w}_{j,k}^{(n)}\right)^H \mathbf{h}_{j,j,k} \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k} \right\} \\ &\quad - \left| \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k}^{(n)} \right|^2 \triangleq \Theta_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}_{j,k}) \end{aligned} \quad (11)$$

为了获得 $G_{j,k}(\mathbf{w})$ 的凸上界，引入新的变量 $\zeta_{j,k}$ ，则 $G_{j,k}(\mathbf{w}) \geq G_{j,k}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}) \triangleq \sqrt{1 - (1 + \gamma_{j,k}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}))^{-2}}$ (12)

式(12)成立的限制条件是

$$\left| \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k} \right|^2 \leq \zeta_{j,k} \quad (13)$$

其中, $\gamma_{j,k}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}) \triangleq \frac{\zeta_{j,k}}{\chi_{j,k}(\mathbf{w})}$ 。利用文献[16]中的结论, 则

$$\begin{aligned} G_{j,k}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}) &\leq \frac{G_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)})}{2} + \frac{G_{j,k}^2(\mathbf{w}, \zeta_{j,k})}{2G_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)})} \\ &= a_{j,k} - b_{j,k} \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k})^2} \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $a_{j,k} \triangleq \frac{G_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)})}{2} + \frac{1}{2G_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)})}$,

$b_{j,k} \triangleq \frac{1}{2G_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)})}$ 。进一步, 可以得到

$$\begin{aligned} \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k})^2} &\geq \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}} \\ &\cdot \left(\frac{2}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)}} - \frac{\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^2} \right) \\ &= \frac{2}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)}} \cdot \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}} \\ &\quad - \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^2} \end{aligned} \quad (15)$$

附加的约束条件为

$$\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k} \leq 2 \left(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)} \right) \quad (16)$$

采用与式(9)类似的方法, 则 $\frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}}$ 可以近似为

$$\begin{aligned} \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}} &\geq \frac{2\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)})}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)}} \chi_{j,k}(\mathbf{w}) \\ &\quad - \frac{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}))^2}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^2} \\ &\quad \cdot (\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}) \\ &\geq \frac{2\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)})}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)}} Z_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}) \\ &\quad - \frac{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}))^2}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^2} \\ &\quad \cdot (\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}) \end{aligned} \quad (17)$$

不等式(17)成立的限制条件为

$$\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k} \leq 2Z_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}) \frac{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)}}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)})} \quad (18)$$

其中, $Z_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w})$ 表示 $\chi_{j,k}(\mathbf{w})$ 围绕可行点 $\mathbf{w}^{(n)}$ 的泰勒级数展开式, 具体表示为

$$\begin{aligned} Z_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}) &\triangleq \sum_{i=1, i \neq k}^{N_j} \left\{ 2\Re \left\{ \left(\mathbf{w}_{j,i}^{(n)} \right)^H \mathbf{h}_{j,j,k} \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,i} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \left| \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,i}^{(n)} \right|^2 \right\} \\ &\quad + \sum_{i=1, i \neq j}^K \sum_{m=1}^{N_i} \left\{ 2\Re \left\{ \left(\mathbf{w}_{i,m}^{(n)} \right)^H \mathbf{h}_{i,j,k} \mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{w}_{i,m} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \left| \mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{w}_{i,m}^{(n)} \right|^2 \right\} + \sigma_{j,k}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

将式(15)和式(17)代入不等式(14)中, 则

$$\begin{aligned} G_{j,k}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}) &\leq a_{j,k} - b_{j,k} \left(\frac{4\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)})}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^2} \right. \\ &\quad \cdot Z_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}) - \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w}^{(n)})}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^3} (\chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k}) \\ &\quad \left. - \frac{\chi_{j,k}^2(\mathbf{w})}{(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)})^2} \right) \triangleq \Xi_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}) \end{aligned} \quad (20)$$

显然, $\Xi_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k})$ 是关于变量 \mathbf{w} 和 $\zeta_{j,k}$ 的凸函数, 并且满足: $G_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)}) = \Xi_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)})$ 。通过上面的连续凸逼近之后, 用户 $\{j, k\}$ 的传输速率 $R_{j,k}(\mathbf{w})$ 的凹近似表达式可重构为

$$\begin{aligned} R_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j, \zeta_{j,k}) &= F_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j) \\ &\quad - \Xi_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \zeta_{j,k}) \frac{Q^{-1}(\rho^c)}{\sqrt{L}} \end{aligned} \quad (21)$$

将式(7)、式(11)、式(13)、式(18)、式(20)和式(21)回代到问题式(6), 可以得到下面新的优化问题:

$$\begin{aligned} \text{P1: } &\max_{\mathbf{w}, \mathbf{t}, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{v}_j, \zeta_{j,k}} t \\ \text{s.t. } &\text{C1}' : R_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j, \zeta_{j,k}) \geq R_{j,k}^{\min} \\ &\text{C3}' : g_j^{(n)}(x_j, y_j) \geq t \text{C2, C5,} \\ &\text{C4}' : \sum_{k=1}^{N_j} \varpi_{j,k} R_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}, \mathbf{v}_j, \zeta_{j,k}) \geq x_j^2 \\ &\text{C6} : \Theta_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}_{j,k}) \geq v_{j,k}^2, \text{C7} : \left| \mathbf{h}_{j,j,k}^H \mathbf{w}_{j,k} \right|^2 \leq \zeta_{j,k} \\ &\text{C8} : \chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k} \leq 2 \left(\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)} \right) \\ &\text{C9} : \chi_{j,k}(\mathbf{w}) + \zeta_{j,k} \leq 2Z_{j,k}^{(n)}(\mathbf{w}) \frac{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)}) + \zeta_{j,k}^{(n)}}{\chi_{j,k}(\mathbf{w}^{(n)})} \end{aligned} \quad (22)$$

可以明显看出, 优化问题P1是标准的凸优化问

题, 故可以采用求解器CVX直接求解。得到优化问题P1的解后, 进一步更新全部的优化变量, 作为算法下一次迭代的初始值, 直到问题P1的代价函数值达到稳定值。本文提出的短包域能量效率最大化波束成形算法概述为所提算法如表1所示。

由于考虑问题的代价函数在已知的约束条件下有界, 所以所提算法的收敛性是可以保证的, 并且考虑问题的代价函数在迭代过程中是单调非降的。基于此, 下面给出了所提算法收敛性的定理。

定理1 所提算法经过有限次迭代后收敛到KKT最优值。

证明 定义 $o(t) = t - R_{j,k} / \left(\frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^{N_j} \|\mathbf{w}_{j,k}\|^2 + M_j P_c + P_0 \right)$ 。由问题式(6)可知, 给定任意 (\bar{x}_j, \bar{y}_j) , 则

$$\bar{o}(t, x_j, \bar{x}_j, y_j, \bar{y}_j) = t - \left(\frac{2\bar{x}_j x_j}{\bar{y}_j} - \left(\frac{\bar{x}_j}{\bar{y}_j} \right)^2 y_j \right) \quad (23)$$

如果所提算法最终的收敛值为KKT最优值, 则需符合如式(24)的条件

$$\begin{aligned} \bar{C}1: & o(t) \leq \bar{o}(t, x_j, \bar{x}_j, y_j, \bar{y}_j) \\ \bar{C}2: & o(t^{(n)}) = \bar{o}(t^{(n)}, x_j^{(n)}, \bar{x}_j^{(n+1)}, y_j^{(n)}, \bar{y}_j^{(n+1)}) \\ \bar{C}3: & \frac{\partial o(t^{(n)}, y_j^{(n)})}{\partial t^{(n)}} = \frac{\partial \bar{o}(t^{(n)}, x_j^{(n)}, \bar{x}_j^{(n+1)}, y_j^{(n)}, \bar{y}_j^{(n+1)})}{\partial t^{(n)}} \\ \bar{C}4: & \frac{\partial o(t^{(n)}, y_j^{(n)})}{\partial y_j^{(n)}} = \frac{\partial \bar{o}(t^{(n)}, x_j^{(n)}, \bar{x}_j^{(n+1)}, y_j^{(n)}, \bar{y}_j^{(n+1)})}{\partial y_j^{(n)}} \end{aligned} \quad (24)$$

表1 短包域能量效率最大化算法(算法1)

- (1) 令 $n = 0$, 设置满足功率约束的初始波束矢量 $\mathbf{w}^{(n)}$, 算法的最大迭代次数为 N_{\max} 。
- (2) 通过约束C3', C4, C5, 式(8)和式(13), 计算得到和 $\{x_j^{(n)}, y_j^{(n)}, \mathbf{v}_j^{(n)}, \zeta_{j,k}^{(n)}\}$ 。
- (3) 开始循环:
- (4) 依据 $\mathbf{w}^{(n)}, x_j^{(n)}, y_j^{(n)}, \mathbf{v}_j^{(n)}$ 和 $\zeta_{j,k}^{(n)}$, 通过求解P1, 输出相应的解 $t^*, \mathbf{w}^*, x_j^*, y_j^*, \mathbf{v}_j^*$ 和 $\zeta_{j,k}^*$ 。
- (5) 更新 $\mathbf{w}^{(n+1)} = \mathbf{w}^*, x_j^{(n+1)} = x_j^*, y_j^{(n+1)} = y_j^*, \mathbf{v}_j^{(n+1)} = \mathbf{v}_j^*, \zeta_{j,k}^{(n+1)} = \zeta_{j,k}^*$ 。
- (6) 更新P1的代价函数值: $t^{(n+1)} = t^*$ 。
- (7) 若 $|t^{(n+1)} - t^{(n)}| < \xi$ 或 $n > N_{\max}$, 其中 ξ 表示预置的任意小的数, 则跳出循环并输出最终的解; 否则, $n = n + 1, \mathbf{w}^{(n)} = \mathbf{w}^*, x_j^{(n)} = x_j^*, y_j^{(n)} = y_j^*, \mathbf{v}_j^{(n)} = \mathbf{v}_j^*, \zeta_{j,k}^{(n)} = \zeta_{j,k}^*, t^{(n)} = t^*$, 回到第(3)步。

由问题式(5)和式(6)易知

$$\frac{R_{j,k}}{y_j} \geq \frac{x_j^2}{y_j} \geq \frac{2\bar{x}_j x_j}{\bar{y}_j} - \left(\frac{\bar{x}_j}{\bar{y}_j} \right)^2 y_j \quad (25)$$

因此, $o(t)$ 与 $\bar{o}(t, x_j, \bar{x}_j, y_j, \bar{y}_j)$ 满足 $\bar{C}1$ 。显然, $o(t)$ 与 $\bar{o}(t, x_j, \bar{x}_j, y_j, \bar{y}_j)$ 也满足 $\bar{C}2$ 。进一步分别求 $o(t)$ 与 $\bar{o}(t, x_j, \bar{x}_j, y_j, \bar{y}_j)$ 相应于 $t^{(n)}$ 和 $y_j^{(n)}$ 的1阶偏导, 则

$$\begin{aligned} \frac{\partial o(t^{(n)}, y_j^{(n)})}{\partial t^{(n)}} &= \frac{\partial \bar{o}(t^{(n)}, x_j^{(n)}, \bar{x}_j^{(n+1)}, y_j^{(n)}, \bar{y}_j^{(n+1)})}{\partial t^{(n)}} \\ &= 1, \\ \frac{\partial o(t^{(n)}, y_j^{(n)})}{\partial y_j^{(n)}} &= \frac{R_{j,k}(y_j^{(n)})}{(y_j^{(n)})^2}, \\ \frac{\partial \bar{o}(t^{(n)}, x_j^{(n)}, \bar{x}_j^{(n+1)}, y_j^{(n)}, \bar{y}_j^{(n+1)})}{\partial y_j^{(n)}} &= \left(\frac{\bar{x}_j}{\bar{y}_j} \right)^2 \end{aligned} \quad (26)$$

由于 $(\bar{x}_j^{(n+1)})^2 = (x_j^{(n)})^2$ 和 $\bar{y}_j^{(n+1)} = y_j^{(n)}$, 则 $o(t)$ 与 $\bar{o}(t, x_j, \bar{x}_j, y_j, \bar{y}_j)$ 满足 $\bar{C}3$ 和 $\bar{C}4$ 。证毕

4 仿真结果与分析

本节将通过几组数值实验评估所提算法的有效性。考虑由 $K = 3$ 构成的蜂窝物联网场景, 每一个小区中的发射机配置相同的天线数目, $M_j = N_t$, $\forall j$, 每个发射机同时服务4个用户。小区半径为300 m, 每个小区的用户与该小区的发射机的距离至少为200 m。发射机 i 与用户 (j, k) 间的信道 $\mathbf{h}_{i,j,k} \triangleq \sqrt{\eta_{i,j,k}} \mathbf{h}_{i,j,k}^w$, 其中 $\eta_{i,j,k} = -35.3 - 10\alpha \lg(d_{i,j,k})$, $\alpha = 3.76$ 表示路径衰减指数, $\mathbf{h}_{i,j,k}^w$ 是服从瑞利分布的归一化信道增益。每个用户的噪声功率 σ^2 和解码错误概率 ρ^c 分别设置为 -110 dBm 和 10^{-5} 。如无特别声明, $P_c = 30$ dBm, $P_0 = 40$ dBm, $N_t = 8$, 最大发射功率 $P_j^{\max} = P_{\max} = 45$ dBm, $R_{j,k}^{\min} = R = 1$ bit/(Hz), $L = 1000$ bit, $N_{\max} = 20$ 。

图1给出了在不同 P_c 下的能量效率收敛曲线, 其中每个用户的速率阈值为1 bit/(Hz·s)。由图1可

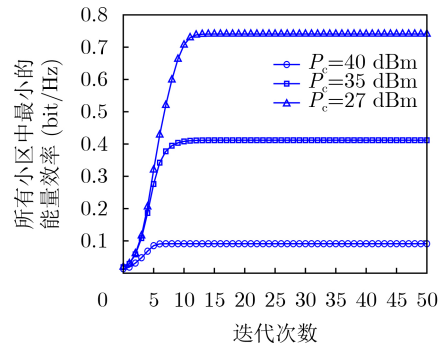


图1 所有用户中最小能量效率收敛曲线

以很容易观察出,所提迭代算法经过10次左右就可以达到稳定值。同时,随着 P_c 的增加,所提算法的能量效率性能减小,原因是随着 P_c 的增大,系统的整体功率消耗会相应增加,导致所有小区中最小能量效率性能变差。

图2展示了在1000次随机信道产生下不同优化算法的能量效率和传输速率性能与基站最大功率约束值之间的变化关系。由图2(a)可以明显观察出,当基站最大发射功率处于30~40 dBm区间时,所提算法和短包域传输速率最大化算法的能量效率性能相同,揭示了在该区间范围,满功率发射是最好的能量效率传输策略,其中传统的长包域能量效率最大化算法因其无穷长数据包长的假定获得了最好的能量效率性能,故长包域能量效率最大化算法的能量效率性能是所提算法的能量效率性能上界;当基站的最大发射功率大于40 dBm时,所提的短包域能量效率最大化算法和长包域能量效率最大化算法的能量效率性能趋于饱和,而短包域传输速率最大化算法和长包域传输速率最大化算法的所有小区中最小的能量效率性能却在下降,背后的原因是所有小区中最小传输速率最大化需要更多的功率消耗。从图2(b)可以看出,所提算法的传输速率性能先增加随后趋于平稳,原因是所提算法为了实现短包域能量效率最大化的目标而减少发射功率,其中长包域传输速率最大化算法的传输速率性能为短包域传输速率最大化的传输速率性能上界。最后,还可以观察出,随着解码误差概率 ρ^c 的减小,所提算法的能量效率和传输速率性能降低,这是因为短包域系统可靠性性能指标的提升是以牺牲能量效率和传输速率性能作为代价的。

图3展示了几种算法所有小区中最小的能量效率与发射机配置天线数目之间的变化关系。由图3可以明显观察出,随着发射天线数目的增加,几种不同算法的能量效率性能也相应提升,这是因为增加发射机的天线数目可以增加额外的空间分集增益。与传统的长包域传输信息速率最大化算法和短包域传输信息速率最大化算法相比,所提算法能够获得更好的能量效率性能。

图4给出了数据包长和解码误差概率对所有小区中最小能量效率的影响。由图4可以观察到,长包域能量效率最大化算法和长包域速率最大化算法分别给出了所提短包域能量效率最大化算法和短包域和速率最大化算法的能量效率性能上界。另外,所提算法随着数据包长的增加,能量效率也相应增加,最后能量效率性能趋向于稳定。尤其是,当 $L=100$ 增加到 $L=1000$ 时,所提算法的所有小区中最小能量效率从0.146 bit/(Hz·J)提高到0.167 bits/(Hz·J),大约获得了14.38%的性能提升。主要原因在于,当解码误差概率一定时,信息传输速率跟随着数据包长度 L 的变大而增加,进而可以提升所有小区中最小能量效率性能。另外,随着解码误差概率的变大,所提算法的能量效率也变大,原因是当解码误差概率变得更大时,网络在进行资源配置时的自由度更大,有利于能量效率的增加。

5 结论

本文研究了未来蜂窝物联网中的短包域资源配置问题。在满足每个用户传输速率和每个发射机功率约束下,构建了一个波束成形高度耦合的公平性能量效率最大化资源配置问题。为了解决该非凸问

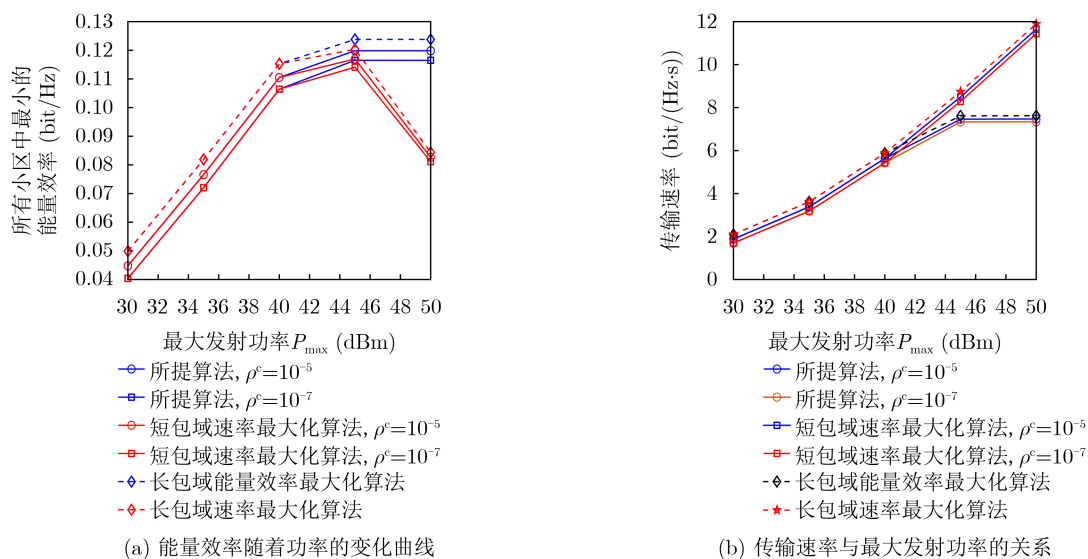


图2 不同算法的性能与最大发射功率的关系

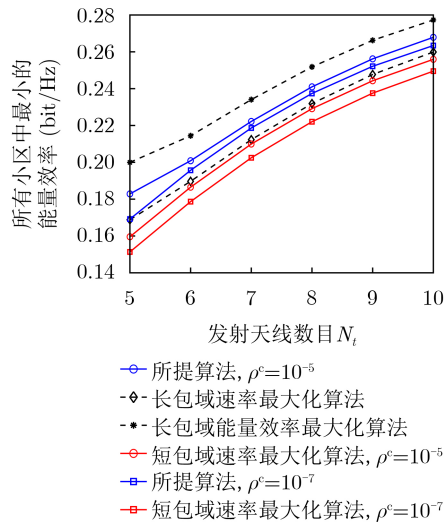


图3 不同算法的能效性能与发射天线的关系

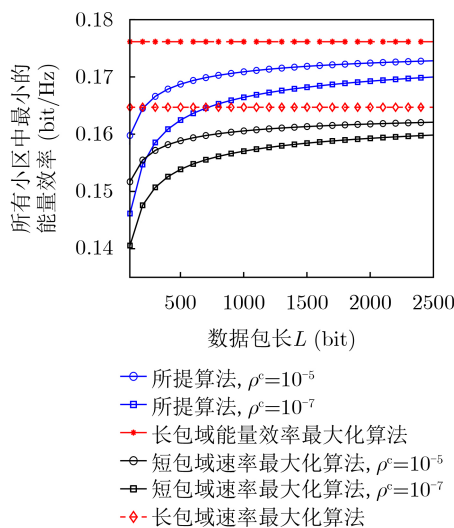


图4 不同算法的能量效率与数据包长的关系

题，采用变量替换与连续凸近似方法将原始分式结构的问题转换为标准的凸问题。随后，证明了所提算法的收敛性。仿真实验表明，相比于传统的短包域和速率最大化算法，所提算法具有更好的能量效率。

参考文献

- [1] 丰雷, 谢坤宜, 朱亮, 等. 面向电网业务质量保障的5G高可靠低时延通信资源调度方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12): 3418–3426. doi: [10.11999/JEIT210509](https://doi.org/10.11999/JEIT210509).
FENG Lei, XIE Kunyi, ZHU Liang, *et al.* 5G ultra-reliable and low latency communication resource scheduling for power business quality assurance[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(12): 3418–3426. doi: [10.11999/JEIT210509](https://doi.org/10.11999/JEIT210509).
- [2] FENG Chen and WANG Huiming. Secure short-packet communications at the physical layer for 5G and beyond[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2021, 5(3): 96–102. doi: [10.1109/MCOMSTD.121.2100028](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.121.2100028).
- [3] 许方敏, 伍丽娇, 王翔, 等. 5G上行链路中基于预测的紧急资源分配方法研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 611–619. doi: [10.11999/JEIT201050](https://doi.org/10.11999/JEIT201050).
XU Fangmin, WU Lijiao, WANG Xiang, *et al.* Research on prediction based emergency resource allocation in 5G uplink[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(2): 611–619. doi: [10.11999/JEIT201050](https://doi.org/10.11999/JEIT201050).
- [4] ZHANG Qianqian, LIANG P P, HUANG Yudi, *et al.* Label-assisted transmission for short packet communications: A machine learning approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8846–8859. doi: [10.1109/TVT.2018.2851619](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2851619).
- [5] SINGH K, BISWAS S, KU Menglin, *et al.* Transceiver design and power control for full-duplex ultra-reliable low-latency communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 1392–1406. doi: [10.1109/TWC.2021.3103861](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3103861).
- [6] 胡锦涛, 吴林梅, 束锋, 等. 无人机中继协助的有限码长隐蔽通信[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 1006–1013. doi: [10.11999/JEIT211372](https://doi.org/10.11999/JEIT211372).
HU Jinsong, WU Linmei, SHU Feng, *et al.* UAV-relay assisted covert communication with finite block-length[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 1006–1013. doi: [10.11999/JEIT211372](https://doi.org/10.11999/JEIT211372).
- [7] SHIRVANIMOGHADDAM M, MOHAMMADI M S, ABBAS R, *et al.* Short block-length codes for ultra-reliable low latency communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(2): 130–137. doi: [10.1109/MCOM.2018.1800181](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800181).
- [8] POLYANSKIY Y, POOR H V, and VERDU S. Channel coding rate in the finite blocklength regime[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(5): 2307–2359. doi: [10.1109/TIT.2010.2043769](https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2043769).
- [9] HU Yulin, OZMEN M, and GURSOY M C. Optimal power allocation for QoS-constrained downlink multi-user networks in the finite blocklength regime[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(9): 5827–5840. doi: [10.1109/TWC.2018.2850302](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2850302).
- [10] NASIR A A, TUAN H D, NGUYEN H H, *et al.* Resource allocation and beamforming design in the short blocklength regime for URLLC[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(2): 1321–1335. doi: [10.1109/TWC.2020.3032729](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3032729).
- [11] KHALIFA N B, ANGILELLA V, ASSAAD M, *et al.* Low-complexity channel allocation scheme for URLLC traffic[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1):

- 194–206. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3022008](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3022008).
- [12] MAKKI B, SVENSSON T, and ZORZI M. Finite block-length analysis of spectrum sharing networks using rate adaptation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(8): 2823–2835. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2449842](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2449842).
- [13] CAI Yeming, JIANG Xu, LIU Mingqian, *et al.* Resource allocation for URLLC-oriented two-way UAV relaying[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3): 3344–3349. doi: [10.1109/TVT.2022.3143174](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3143174).
- [14] SUN Chengjian, SHE Changyang, YANG Chenyang, *et al.* Optimizing resource allocation in the short blocklength regime for ultra-reliable and low-latency communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 402–415. doi: [10.1109/TWC.2018.2880907](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2880907).
- [15] SABUJ S R, AHMED A, CHO Y, *et al.* Cognitive UAV-aided URLLC and mMTC services: Analyzing energy efficiency and latency[J]. *IEEE ACCESS*, 2021, 9: 5011–5027. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3048436](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048436).
- [16] SINGH K, KU Menglin, and FLANAGAN M F. Energy-efficient precoder design for downlink multi-user MISO networks with finite blocklength codes[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(1): 160–173. doi: [10.1109/TGCN.2020.3045687](https://doi.org/10.1109/TGCN.2020.3045687).
- 李世党: 男, 讲师, 研究方向为干扰管理、通感算一体化、可重构智能表面等。
- 魏明生: 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为传感器与检测技术。
- 赵 娟: 女, 博士生, 研究方向为边缘智能、信能同传、收发机设计。
- 刘加跃: 男, 硕士生, 研究方向为资源分配、干扰对齐。
- 唐守锋: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为矿下物联网通信、智能检测技术。

责任编辑: 余 蓉