一项适用于第五代移动通信网络中设备到设备通信的高效基于博弈论的功率控制算法

Abdu Saif[1], Kamarul Ariffin bin Noordin[1*], Kaharudin Dimyati[1*], Nor Shahida Mohd Shah[2], Yousef Ali Al-Gumaei[3], Qazwan Abdullah[2] 和 Kamal Ali Alezabi[4]

[1]马来亚大学工程学院电气工程系，马来西亚吉隆坡 50603。[2]马来西亚敦胡先翁大学工程技术学院，马来西亚柔佛州麻坡武吉巴西 84500。[3]North Umbria University计算机与信息科学系，英国泰恩-威尔郡泰恩河畔纽卡斯尔，[4]UCSI大学计算机科学与数字创新研究所，马来西亚吉隆坡蕉赖 56000。

*通讯作者：电子邮件：kamarul@um.edu.my，kaharudin@um.edu.my

摘要

设备到设备（D2D）通信是第五代移动通信网络的一项使能技术，可为无线网络通信提供邻近服务（ProSe）。本文提出一种基于纳什均衡和博弈论的功率控制算法，以消除蜂窝用户设备与D2D链路之间的干扰，从而在无线通信中实现可靠连接并最大限度地降低功耗。本文将D2D功率控制建模为非合作博弈。每台设备均可独立选择并发射功率，以最大化（或最小化）用户效用。该算法旨在通过建立与网络资源的连接，引导用户设备收敛至纳什均衡。所提出的带有定价因子的算法用于控制功耗，并降低设备到设备通信的整体干扰。

所提出的算法根据平均功耗的能效、D2D通信数量以及迭代次数进行评估。此外，该算法的纳什均衡收敛速度相对较快。通过调整剩余成本系数和剩余能量因子，该算法可确保用户设备达到所需的服务质量（QoS）。仿真结果表明，与[11]中的算法相比，功率控制使功耗显著降低，降幅约为20%。

关键词：D2D通信、博弈论、功率控制、效用函数、第五代移动通信。

1 引言

随ith 着对高速、高效数据传输需求的不断增长，频谱资源受限成为满足这一需求所面临的挑战。因此，设备到设备（D2D）通信是应对资源限制的一种有前景的解决方案，它能提高网络频谱利用效率，并通过集中式和分布式通信在设备之间建立链路。在无线D2D通信中，源节点和目的节点的功耗仍是实现节能且可靠连接性的一项挑战。

基于[1-4] 博弈论方法的功率控制算法采用分布式方式，每个设备通过非合作方案，从功率传输策略中选择自身的发射功率。设备到设备通信的功率控制算法对于降低功耗、节约无线网络通信中的能源至关重要。

效用函数是设备到设备和蜂窝系统功率控制分配需要考虑的因素之一。然而，各种效用函数中，干扰服务的数量和单位价格以及干扰功率构成了一个问题 [5]。不过，斯塔克尔伯格功率控制算法能够增强设备到设备通信底层的物理层安全性，并设计出一种尽可能降低干扰的技术。因此，该算法利用斯塔克尔伯格博弈论证明纳什均衡唯一解的存在性[6]。现有无线通信研究已将功率控制算法确立为研究人员关注的热点。通过消除干扰实现功率控制，对于节约能源、降低功耗发挥着关键作用。上行通信中保障服务质量 所需的先决条件是采用带定价因子的功率控制。功率控制可细分为两个部分，即优化问题和非合作分布式博弈[7]。

非合作博弈和效用函数将提高设备到设备通信的网络能量寿命和连接性。此外，定价因子用于调节设备到设备通信之间的功耗，同时基于成本函数和价格因子扩大覆盖范围。对于 [8] 中上行传输工作的每个设备，非合作博弈的收敛性已通过纳什均衡（NE）点得到证明。

在此背景下，通过基于剩余能量因子调整纳什均衡的残余收敛，获得了更优的均衡解。随后，可通过非合作博弈方案获得并评估功率控制，其依据是功耗和能效 [9]。功率控制问题的分布式求解需要一种算法，使每个终端独立利用其传输过程选择功率水平，以最大化用户设备的效用。因此，设计了一种效用函数来解决功率控制问题，并消除设备到设备链路与蜂窝用户设备之间的干扰，以满足服务质量要求[10]。

通过对非合作功率控制进行博弈论分析，提升了系统在设备到设备通信中的容量和能效 [11]。
因此，功率控制问题被表述为下行链路和上行通信中的非合作博弈效用函数。下行链路对信干噪比进行解码，而上行链路对吞吐量性能进行解码 [12]。

纳什均衡已成为证明功率控制非合作博弈存在唯一解的重要技术。非合作功率根据均衡点的选择机制进行选择。迭代效用函数能够在用户设备的可行集内生成使用户效用最大化的最优分割比[13]。

源节点与目的节点之间 D2D 的节能性和网络能量寿命链路对于无线通信中的高效连接性是不可或缺的。此外，能量收集（EH）是一种应对无线网络功耗的基础技术 [14]。

功率控制策略被认为是提升无线网络吞吐量性能的可行方法，其基础是降低用户设备的功耗并消除与其他用户设备之间的干扰。然而，用户设备效用随定价因子变化，其作用是通过以分布式方式调整功率来收取单位价格。 因此，网络会调整并确定单位价格，使所有用户设备在建立连接期间支付的单个设备支付额总和所产生的收益最大化 [15]。

根据 Long Yu 的研究，已有研究证明，斯塔克尔伯格均衡（SE）下用户设备的平均效用低于纳什均衡（NE），因为干扰器可以利用功率控制优势来提升用户效用，从而降低用户设备的效用 [16]。

1.1 贡献

本文旨在基于博弈论，为设备到设备通信中的功率控制开发并推导一种新的效用函数。该功率控制算法应用于D2D通信的上行链路，以实现高度可靠的连接性，同时将功耗降至最低。为此，本文针对每台设备设置了约束条件，在可用功耗最低的情况下确保信干噪比达到最低可接受水平，从而最大化用户设备的效用函数。因此，如果功率传输失败，则会再次重传，以建立设备到设备链路（发射端/接收端）的连接性。本文的贡献如下：

- 本文提出了一种功率控制算法，通过满足信干噪比阈值目标，最大限度地减少用户设备之间的干扰，从而实现高效的系统通信。
- 所提出的算法通过调整剩余能量因子来解决信干噪比问题，并实现有保证的服务质量目标：降低功耗，从而减少能耗。

- 所提出的带定价机制的效用函数有望延长设备到设备通信的电池续航时间，从而提升系统性能。

2 系统模型

图 1展示了无线网络中包含单小区基站（BS）和用户设备的系统模型。这些用户设备包括蜂窝用户（UE_1, UE_2）和设备到设备通信设备（$D2D_{Tx}$-$D2D_{Rx}$），它们使用授权频谱和非授权频谱与基站通信。基于采用定价机制的非合作博弈论，提出了功率控制策略，以消除D2D链路与蜂窝系统之间的干扰。因此，p_i^d 表示第i个用户设备（UE和D2D）的功率传输，而 h_i^d 表示第 i 个用户设备到基站的衰减。设备到设备通信扩大了基站覆盖范围内的连接性，以提升系统容量和无线通信效率。蜂窝用户设备通过下行和上行信道直接连接到基站，并通过干扰链路影响设备到设备通信用户设备。本研究聚焦于功率控制场景中的下行/上行通信，该场景承载着与基站相连的用户设备的数据和功能。

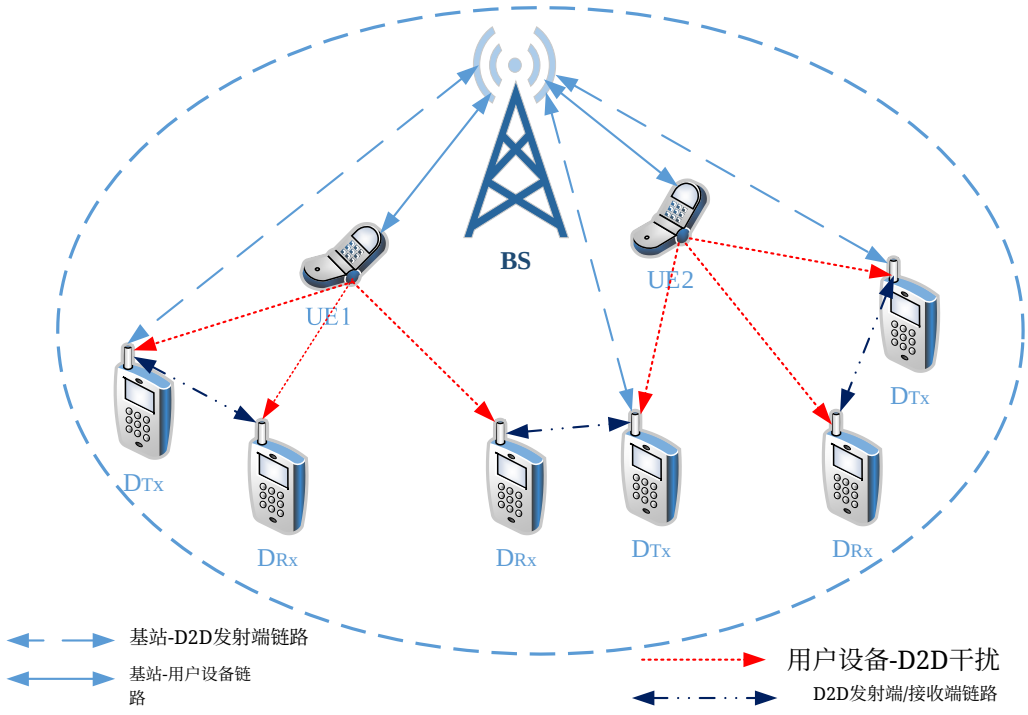


图 1. 系统模型架构

因此，开发功率控制算法的目的是确保每个用户设备（UE、设备到设备）的信干噪比 γ_i^d 保持在阈值以上，具体适用于以下表示的每个 i^{th} 用户设备：

$$\gamma_i^d \geq \Gamma_i^d \qquad (1)$$

其中

γ_i^d ： 表示 i^{th} 用户设备的信干噪比。
Γ_i^d ： 表示i^{th} 用户设备的阈值目标。
在此背景下，i th个用户设备的干扰表示为功率p_i^d 的函数，如下方程所示：

$$I\left(p_i^d\right) = \sum_{i=1}^{N} p_i^d \qquad (2)$$

其中，
N： 指用户设备数量。
根据博弈论，需要考虑三个要素：参与者、策略和效用函数。参与者代表用户设备（设备到设备链路和蜂窝用户）；策略代表传输功率 p_i^d ；效用函数U_i 代表参与者（用户设备）做出决策后通过博弈获得的收益。

2.1 效用函数与纳什均衡

关于用户设备效用函数的设计，已有多种方案。然而，基于物理输出开发用户设

所构建的非合作博弈描述了用于功率控制的算法，旨在开发新的用户设备效用迭

我们假设 i^{th} 用户设备的效用函数为 $U_i(p_i^{*d}, \gamma_i^d(p_i^{*d}))$。在此背景下，每个用户的传

$$U_i\left(p_i^{*d}, \gamma_i^d\left(p_i^{*d}\right)\right) \le U_i\left(p_i^d, \gamma_i^d\left(p_1^{*d}, p_2^{*d}, \ldots\ldots, p_{i-1}^{*d}, p_{i+1}^{*d}, \ldots\ldots, p_i^{*d}\right)\right) \forall \ p_i^d \quad (3)$$

The proposed algorithm aims to adjust the user device's power transmission that se-
满足信干噪比阈值并降低用户设备的功耗。此外，根据[5]，假定效用函数呈凸形且取非负值，以确保存在非负最小值。因此，所提出的新效用函数是一种针对不同成本系数取值（α）来改善功耗的策略。由此，所提出的效用函数表示为：

$$\mathrm{U_i} = \left(\frac{\Gamma_{\mathrm{i}}^{\mathrm{d}}}{\alpha\Gamma_{\mathrm{i}}^{\mathrm{d}}+1} - \gamma_{\mathrm{i}}^{\mathrm{d}}\right)^2 \qquad (4)$$

其中，α： 成本系数γ_i^d： i^{th}
用户设备的信干噪比。

信干噪比的一般公式为：

$$\frac{\gamma_i^d}{p_i^d} = \frac{h_i^d}{I_i^d} \Rightarrow \gamma_i^d = \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d} \quad (5)$$

其中，I_i^d 是用户设备之间的 interference to

所提出的功率控制算法旨在最大化所有数据系统设备导出的效用函数。设备到设备_（发射端/接收端）将调整其发射功率（p_i^d），以针对每个i^{th}用户设备最大化其效用函数U_i（p_i^d）。因此，当U_i（p_i^d）相对于$p_i^d = 0$的导数为零，即$\frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} = 0$时，效用函数达到最大值。由此，根据方程（4）和（5），效用函数可改写为：

$$U_i = \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\,\Gamma_i^d + 1} - \frac{p_i^d\, h_i^d}{I_i^d}\right)^2 \quad (6)$$

将方程（6）中的效用函数对功率 d 求导并令其等于零，即可得到实现最低能耗的功 partial derivatives of the

$$\frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} = \frac{-2\left(\frac{\Gamma_i^d}{a\Gamma_i^d + 1} - \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d}\right)}{I_i^d} \quad (7)$$

由此，i^{th} 用户设备满足信干噪比目标并使其效用最大化的必要条件得以满足。当用户设备的信干噪比等于目标阈值时，设备到设备效用函数达到其最优（最小）值。保证设备到设备$_s$ 服务质量的适用方法是均衡功率控制方法，即所有设备到设备$_s$ 均达到相同的目标信干噪比。其目的是优先保障设备到设备$_s$ 的服务质量，确保所有设备到设备$_s$均达到信干噪比目标。然而，要获得高于目标值的信噪比，设备到设备通信只需在传输时使用较低功率。这样既能节省电池能量、延长网络能量寿命，又能最大限度地减少跨层干扰。为通过功率控制博弈降低功耗、满足设备到设备通信所需的信干噪比，同时减轻设备到设备网络中的总干扰，可采用该收益效用函数。因此，时间步（$k+1$）th 时i^{th} 用户设备的发射功率可表示如下（附录 1）：

$$p_i^{k+1} = \left(\frac{\Gamma_i^d}{a\Gamma_i^d + 1}\right)\frac{p_i^k}{\gamma_i^k} \quad (8)$$

方程 (8) 进一步简化为 $\frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} = 0$ 和 $p_i^d > 0$，其中 $p^{(k+1)}$ 是第 k^{th} 个时刻的 i^{th} 设备到设备链路的传输功率。随后，每条设备到设备链路都会测量当前的目标信干噪比（γ_i^k），并尝试在下一步 [8]达到目标。

2.2 带定价因子的效用函数

功率定价函数旨在基于非合作博弈，通过采用较低的传输功率来帮助设备到设备通信。当采用高功率传输时，设备会产生较高的成本并采取这一策略。因此，定价足以降低最近的设备到设备通信$_s$, 其采用低功率传输来建立设备链路。图2 展示了i^{th} 采用和不采用定价时用户设备效用与传输功率之间的关系，以及

能效非合作功率控制博弈的函数作用。与仅考虑效用（不采用定价）的情况相比，用户设备在效用定价中采用较低的功率 P_2 。在此情况下，每个用户设备以分布式方式调整其功率传输，以最大化其效用价格。作为对纳什均衡的估计，结果平衡了所有用户设备的通信功率，从而在用户设备的功率传输之间实现平衡。此外，假设定价函数能够影响方程（4）中的效用函数。在这种情况下，必须求导，以获得包含定价项因子的迭代功率控制算法。该算法包含用于功率传输传播的定价函数。随后，用户设备调整功率水平，以最大化净效用（效用定价）。

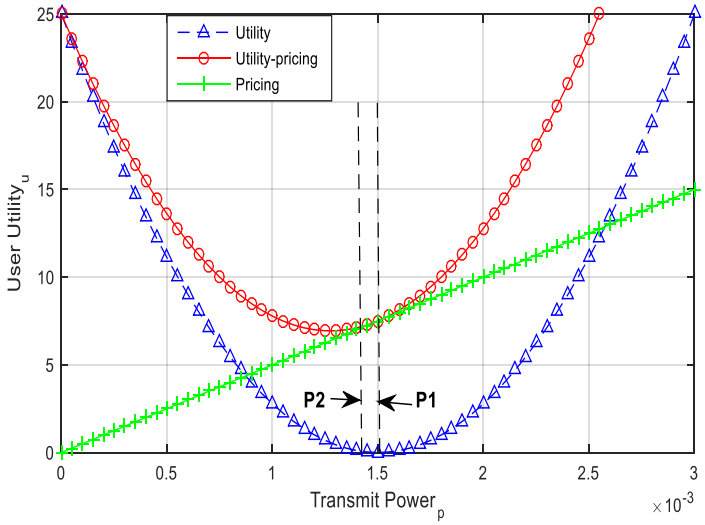


图2。功率定价函数对能效非合作功率控制博弈的影响。

Fr从方程（4）中，负定价函数 $-c_i p_i^d$ 被添加到效用函数中，其公式如下：

$$U_i = \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha \Gamma_i^d + 1} - \frac{p_i^d h_i}{I_i^d} \right)^2 - c_i p_i^d \qquad (9)$$

其中

c_i：定价因子。

因此，对方程（9）中的功率求偏导数后，即可得到带定价的功率控制，以实现最优值策略。然后，带定价因子的新的功率控制迭代可重写如下，见附录（2）：

$$p_i^{k+1} = \left(\frac{(ac\Gamma_i^d + 2\Gamma_i^d \frac{\gamma_i^k}{p_i^k} + c)}{2(a\Gamma_i^d + 1)} \right) \left(\frac{p_i^k}{\gamma_i^k} \right)^2 \qquad (10)$$

$$p^{k+1} = \frac{h_i^k p_i^k \Gamma_i^d}{\gamma_i^k (\alpha \Gamma_i^d + 1)} - \frac{c_i^d}{2} \qquad (11)$$

其中，
$p^{(k+1)}$：i^{th} 用户设备在（$k+1$）th 时间步的发射功率；以及γ_i^k ：i^{th} 用户设备在k^{th} 某一时间步的信干噪比。

在所提出的功率控制算法中，带定价的效用函数旨在降低设备到设备$_s$ 的功耗。其优势如下：

- 延长设备到设备$_s$设备的电池使用寿命。
- 降低可能危害蜂窝用户和设备到设备$_s$用户的总体干扰，适用于带内和带外网络。

- 保证设备到设备通信的服务质量。
- 降低设备到设备$_s$自组织网络中的干扰，从而提高设备接纳控制的通过率。

上行链路功率控制面临的挑战包括：受电池限制，用户设备的功率传输能力有限；移动设备的计算能力较低；以及近远效应。对此，本文提出定价因子和效用函数的作用，以求得功率迭代。

此外，在所提出的算法中，针对低覆盖范围双层网络的设备到设备通信采用上行链路博弈方法，可使所有用户设备在满足信干噪比约束的同时达到较低的功率水平。

然而，要处理跨层干扰，需要采用高效的定价技术。所提出的功率控制算法使用不动点迭代法，但其收敛速度较慢。另一方面，一些研究者提出，为了实现效益最大化，应在效用函数中加入定价因子，以使用户能够自利地获取收益；同时，该效用函数必须是半凹的。理想点将在实验参数范围内选取，例如最大功率和最小功率，并视其他用户设备的行为而定[16]。

3 收敛

新算法将证明，在所提出的功率控制函数的迭代过程中，唯一纳什均衡值能够收敛。唯一纳什均衡值的存在性已得到验证。

这表明，如果 $p^{(k+1)} = f(p)$，则算法存在一个不动点，且函数 $f()$ 满足以下三个条件：

1. $f(p_i^d) > 0,$ shows positivity.
2. $p_i^d > \tilde{p_i}^d \Rightarrow f(p_i^d) > f(\tilde{p_i}^d)$ shows monotonicity.
3. $f(\alpha p_i^d) < \alpha f(p_i^d)$ shows scalability.

然后，已验证该算法收敛于唯一不动点。因此，要证明方程 (8) 收敛，必须满足以下条件：

3.1 正性：$f(p_i^d) > 0$

根据方程 (8)，可以验证 $f(p_i^d) > 0$，该条件在以下情况下成立：

$$f(p_i) > 0 \Rightarrow \frac{p_i^k}{\gamma_i^k}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) > 0$$

$$Then, \quad \frac{p_i^k}{\gamma_i^k} > 0 \Rightarrow p_i^k > 0 \quad and \quad \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) > 0 \Rightarrow \Gamma_i^d > 0 \quad (12)$$

3.2 单调性 $p^{(k+1)} = f(p^k)$

根据方程 (8)，在这种情况下，如果 $p > \bar{p} \Rightarrow f(\bar{p}) > f(p)$，则一阶偏导数设定如下：

$$\frac{\partial f(p_i^d)}{\partial(p_i^d)} = \frac{\Gamma_i^d}{\gamma_i^d(\alpha\Gamma_i^d + 1)} \quad (13)$$

为验证单调性，使方程 (13) 为正的传导条件为 $\frac{\partial f_{(p_i^d)}}{\partial p_i^d} > 0$。为了使功率传输 p^d具有快速响应函数，这一点至关重要；因此：

$$\text{In the case of } p > \bar{p} \Rightarrow f(\bar{p}) > f(p)$$

$$\frac{p_i^d}{\gamma_i^d}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) > \frac{1}{\gamma_i^d}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) \Rightarrow p_i^d > 1 \quad (14)$$

既然已证明 $0 < \alpha < 1$ 为正，则功耗小于信干噪比阈值目标，这意味着迭代功率函数具有正性和单调性。

3.3 可扩展性：$f(\alpha p) < \alpha f(p)$，$\forall \alpha > 1$

在最终收敛阶段，可以根据方程（8）验证可扩展性条件，得到如下结果。

$$\frac{\alpha p_i^d}{\gamma_i^d}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) < \alpha\left(\frac{p_i^d}{\gamma_i^d}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right)\right) \Rightarrow \frac{\alpha p_i^d}{\gamma_i^d}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) < \left(\frac{\alpha p_i^d}{\gamma_i^d}\left(\frac{\alpha\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right)\right)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) < \left(\left(\frac{\alpha\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right)\right) \Rightarrow \alpha\Gamma_i^{2d} + 1 < \alpha^2\Gamma_i^{2d} + \alpha\Gamma_i^d$$

$$\Rightarrow \alpha^2\Gamma_i^{2d} + \alpha\Gamma_i^d - \alpha\Gamma_i^{2d} < 1 \Rightarrow \alpha\Gamma^2(\alpha - 1) + \alpha\Gamma_i^d < 1$$

$$\Rightarrow \alpha\Gamma_i^d(\Gamma_i^d(a - 1) + 1) < 1 \Rightarrow \alpha\Gamma_i^d < \frac{1}{(\Gamma_i^d(a - 1) + 1)}$$

$$\Rightarrow \alpha > \frac{1}{\Gamma_i^d(\Gamma_i^d(a - 1) + 1)} \Rightarrow \alpha < 1 \quad (15)$$

因此控制满足收敛性，并得到证明均衡点的唯一的算法 owe

3.4 纳什均衡存在性

已证明纳什算法代数方程的解唯一。随后，验证了所提出的功率控制方程算法存在唯一解。可利用隐函数证明方程 (8) 中功率迭代函数的解唯一。此外，$-c_i p_i^d$ 被添加到函数中，以平衡功率函数并实现$f(p_i^d) = 0$。然后，基于隐函数定理，根据方程 (3) 和 (8) 建立函数，其中$f_i(p_i,\ p_n,\ \mathrm{h}i,\ \mathrm{h}n,\ \alpha_i,\ \alpha_n)$。

$$f_i(p_i^d) = -p_i^d + \frac{p_i^d}{\gamma_i^d}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) \Rightarrow f_i(p_i^d) = -p_i^d + \frac{1}{\sum_{i=n+1}^{N} p_n h_n}\left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1}\right) = 0$$

Where i =1, 2,.....N (16)

根据隐函数定理，若存在唯一的纳什均衡解，则在其存在点处，雅可比矩阵 $\frac{\partial F_i}{\partial p_i}$ 必须非奇异，如下矩阵所示：

$$\frac{\partial F_i(p_i,p_n,h_i,h_n,a_i,a_n)}{\partial p_i} = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial p_1}\frac{\partial F_1}{\partial P_2}\cdots\cdots\cdots\frac{\partial F_1}{\partial P_N} \\ \frac{\partial F_2}{\partial P_1}\frac{\partial F_2}{\partial P_2}\cdots\cdots\cdots\frac{\partial F_2}{\partial P_N} \\ . \\ \frac{\partial F_i}{\partial P_1}\frac{\partial F_i}{\partial p_2}\cdots\cdots\cdots\frac{\partial F_i}{\partial P_N} \end{vmatrix} \Rightarrow \frac{\partial F_i}{\partial p_i} = \begin{vmatrix} A_{11}B_{12}\cdots\cdots\cdots B_{1N} \\ 0A_{22}\cdots\cdots\cdots\cdots B_{2N} \\ . \\ 00\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots A_{iN} \end{vmatrix}, \quad (17)$$

其中，

$$A_i = -1 - \frac{\Gamma_i^d}{p_i^2 h(\alpha\Gamma+1)} \quad , \quad B_i = -\frac{\Gamma_i^d h}{(p_{i1}h+p_{i2}h)^2(\alpha\Gamma_i^d+1)}$$

如上所述，矩阵主对角线以下的元素均为零。方程（16）表明，雅可比矩阵是三角矩阵。对角元素决定了三角矩阵的取值。因此，该矩阵是一个非奇异矩阵。由此，功率控制迭代算法的收敛性以及功率控制迭代函数唯一解的存在性均得到了证明。

表 1. 仿真参数

符号	参数名称	数值
p_i^d	用户设备传输功率	8mW
Γ_i^d	阈值目标	5
N	用户设备数量	20
α	成本系数	(0.0,0.01,0.5)
σ	噪声功率	50-15
P_{max}	基站最大发射功率	100 毫瓦
t	迭代次数	90, 20
c	定价因子	5100

4 结果与讨论。

本节展示用于说明所提方案性能的仿真结果。结果从平均功耗的能效、设备到设备通信数量以及迭代次数等方面进行评估。假设包括蜂窝用户设备和设备到设备通信设备在内的用户设备随机分布于基站覆盖范围内。

仿真结果 如图 3、图 4和图 5所示。这些图是根据迭代变化的影响以及设备到设备$_s$通信的平均功率计算得出的。

通过设置 $\alpha = [0, 0.02]$ 和设备数量 N = 20，对算法进行了测试。迭代范围为 0 至 90，平均功率范围为 10^{-10} (w) 至 10^{-7} (w)。如图 3 所示，随着 $\alpha = 0$，设备到设备数量和迭代次数分别从 0 增至 16、从 10 增至 50。然而，当 α =0 时，设备到设备数量从 16 增至最高值 18，迭代次数从 50 增至 90。相反，当 α=0.02 时，设备到设备数量从 16 增至 18，而迭代次数从 90 降至 55。因此，对于介于 $0 < \alpha < 1$ 之间的任意 α 值，迭代次数下降得越多，设备到设备数量达到最大值就越显著。因此，该结果证明了基于成本系数 α 的功率控制算法在提升设备到设备$_s$ 通信方面的有效性。

此外，图 4展示了在 $\alpha = 0$, $\alpha = 0.02$ 时，不同设备到设备对通信数量下的平均功率表现。当成本系数为 α =0 时，设备到设备通信数量从 2 增至 20，平均功率从 10^{-10} 增至 10^{-7}(w)。然而，当成本系数为 $\alpha = 0.02$ 时，设备到设备通信数量从 2 增至 20，平均功率从 10^{-7} 降至 10^{-8} (w)。因此，在成本系数 $0 < \alpha < 1$ 的取值范围内，系统以更低功耗支持更多设备到设备连接的能力有所提升。由此可见，所提出的功率控制算法在成本系数取不同值（α）时，能够显著降低功耗和迭代次数，并增加设备到设备通信。因此，所提出的算法实现了设备到设备网络中的功率控制，以满足信干噪比的目标值。

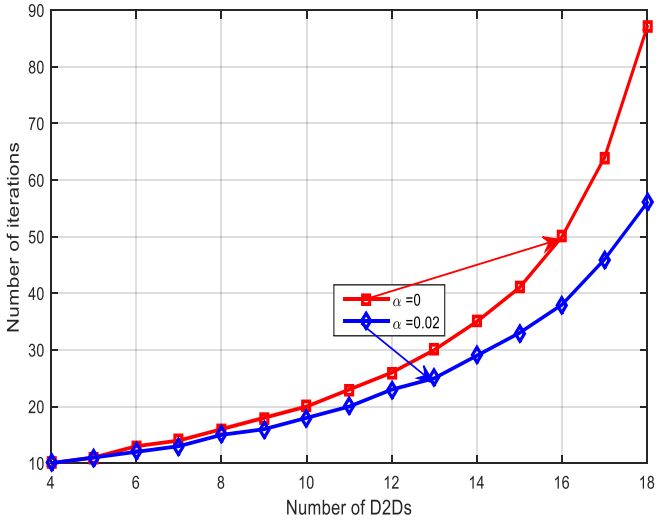


图 3。设备到设备通信数量与迭代次数的关系

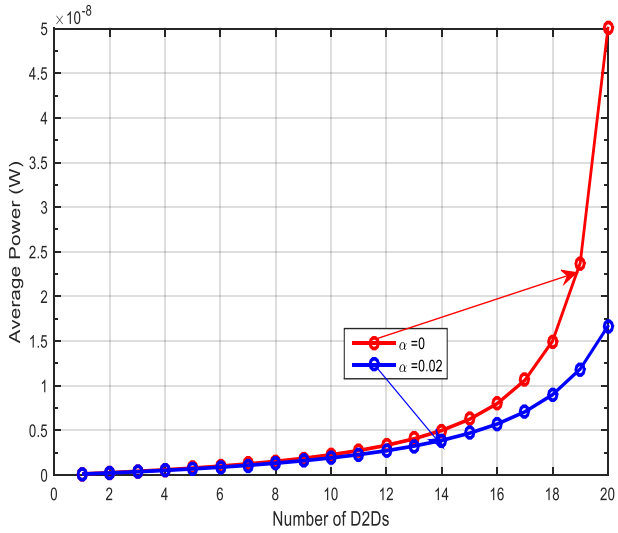


图 4。设备到设备通信数量与平均功率的关系

4.1 功耗

本节介绍所提出的功率控制算法中的功耗和收敛率。结果表明，在满足信干噪比阈值的同时，可以以较低的功耗实现更高的收敛水平。因此，设备到设备通信的首要目标是满足信干噪比阈值，从而实现可靠且可持续的连接性，并改善覆盖质量。因此，在这种情况下，需要重点考虑满足信干噪比阈值所需的功耗。在这方面，所提出的功率控制算法证明，在 $0 < \alpha < 1$ 取不同值时可以节省能耗。此外，所提出的功率控制方法在与更多设备到设备通信进行通信时功耗更低，同时满足服务质量要求和网络系统的数据速率要求。

图 5展示了定价因子为 c =0 和 c = 5100时，平均信干比随迭代次数的变化情况。在 $c = 0$ 条件下，信干噪比和迭代次数分别从 0 增至 20 和从 0 增至 5。然而，在 $c = 0$ 条件下，迭代次数从 1 增至最大值 20，信干噪比则从 0 增至 5。相反，在 c= 5100 条件下，迭代次数从 1 增至最大值 20 时，信干噪比从 4.9 降至 4.6。

因此，对于 $0 < c < 5100$ 之间的任意定价因子（c），信干噪比会因 c 的变化而下降，迭代次数达到最大值。该结果证明，功率控制算法的定价因子能够通过降低设备到设备。通信中的干扰来最小化信干噪比。其目标是最大化可接受的平均信干噪比，并最小化有效误差概率。与相关研究相比，该功率控制算法取得了可接受的信干噪比。不过，迭代次数会以不同方式收敛。

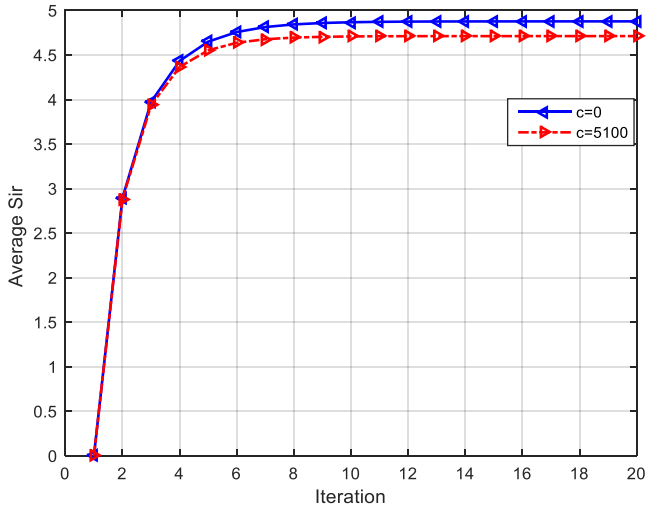


图 5。平均信干噪比与迭代次数的关系

各算法得到的平均传输功率对比曲线如图 6，所示。该图表明，当定价因子的平均功耗为 c = 0 和 c = 5100时，该算法相较于这两种情况均有显著降低。这反映了设备到设备通信或蜂窝系统中测得的干扰量。在此背景下，所提出的算法最有利于最大化频谱共享，并确保蜂窝用户和设备到设备网络的服务质量。

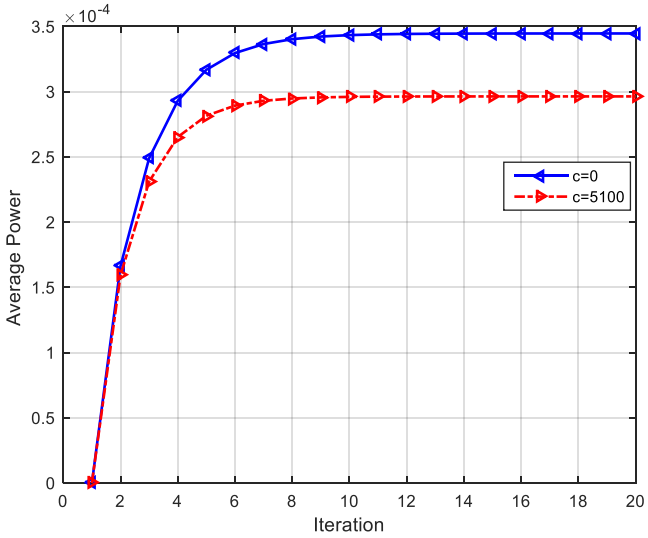


图 6。平均功率随迭代次数的变化

图 7. 展示了所提出的功率控制算法的平均功耗，并根据用户设备的平均功耗和迭代次数，将其与 [11] 中介绍的其他相关研究进行了比较。从图中可以明显看出，在平均功耗与迭代次数的关系方面，所提出的算法优于其他算法。例如，所提出的功率控制算法的平均功率随迭代次数从 0 增加至 0.2 mW。然而，其他算法的数值则从 0 分别上升至 (0.25,0.3,0.37,0.25)，对应于 [11] 算法、双曲算法、二范数算法和 CDPC算法。

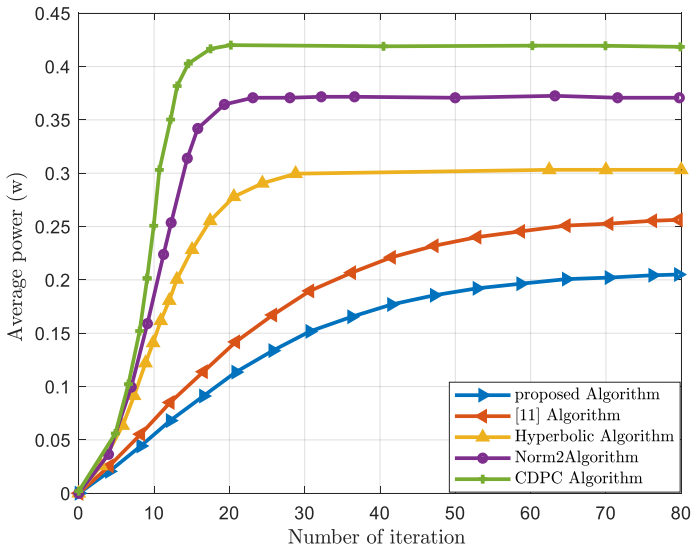


图 7. 所提出的功率控制算法与 [11]

对于表2，所提出的方法在较多迭代次数下表现出较慢的收敛率和较低的功耗。因此，这表明平均功耗与收敛率之间的权衡至关重要。

表2。 收敛性比较汇总

算法	平均功率（W）	迭代次数
CDPC算法	0.43	20
Norm2算法	0.37	25
双曲算法	0.3	30
参考文献 [11] 算法	0.25	60
所提出的算法	0.2	62

5 结论

本文提出了一种新算法，该算法基于功率控制和博弈论，通过新开发的效用函数推导得出。由此构建的系统能够支持更多设备到设备通信，同时降低功耗。所提出的功率控制算法考虑了成本系数和定价函数因子。仿真结果表明，该算法能够缓解信干噪比问题，并在设备到设备$_s$通信之间建立复杂度较低的链路。

此外，所提出的算法证明了纳什均衡，并满足唯一纳什点解。仿真结果表明，在成本系数α取不同值且处于$0 < \alpha < 1$范围内时，所提出的算法能够显著降低功耗并增加设备到设备$_s$的数量。此外，与其他算法相比，所提出的算法在迭代次数较多时收敛率较低，功耗也更低。

附录

附录（1）

根据方程（4），第一个 d 推导 U_i on p_i^d 计算如下：

$$U_i = \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d+1} - \gamma_i^d\right)^2, Where\ \gamma_i^d = \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d} \Rightarrow U_i = \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d+1} - \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d}\right)^2$$

The first derivative for equation

$$\frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} = \frac{-2\left(\frac{\Gamma_i^d}{a\Gamma_i^d + 1} - \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d}\right)}{I_i^d}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{-2\left(\frac{\Gamma_i^{\mathrm{d}}}{a\Gamma_i^{\mathrm{d}} + 1} - \frac{p_i^{\mathrm{d}} h_i^{\mathrm{d}}}{I_i^{\mathrm{d}}}\right)}{I_i^{\mathrm{d}}} = 0 \quad \text{then} \left(\frac{\Gamma_i^{\mathrm{d}}}{a\Gamma_i^{\mathrm{d}} + 1} - \frac{p_i^{\mathrm{d}} h_i^{\mathrm{d}}}{I_i^{\mathrm{d}}}\right) = 0 \Rightarrow \frac{p_i^{\mathrm{d}} h_i^{\mathrm{d}}}{I_i^{\mathrm{d}}} = \frac{\Gamma_i^{\mathrm{d}}}{a\Gamma_i^{\mathrm{d}} + 1}$$

$$p_i^{\mathrm{d}} = \left(\frac{\Gamma_i^{\mathrm{d}}}{a\Gamma_i^{\mathrm{d}} + 1}\right)\frac{I_i^{\mathrm{d}}}{h_i^{\mathrm{d}}}, \quad \because \quad \frac{I_i^{\mathrm{d}}}{h_i^{\mathrm{d}}} = \frac{p_i^{\mathrm{d}}}{\gamma_i^{\mathrm{d}}}$$

$$\text{then,} \quad p_i^{\mathrm{d}} = \left(\frac{\Gamma_i^{\mathrm{d}}}{a\Gamma_i^{\mathrm{d}} + 1}\right)\frac{p_i^{\mathrm{d}}}{\gamma_i^{\mathrm{d}}}$$

因此，第 i 个用户设备在时间步 $(k + 1)^{th}$ 的发射功率可表示如下：

$$p_i^{k+1} = \left(\frac{\Gamma_i^{\mathrm{d}}}{a\Gamma_i^{\mathrm{d}} + 1}\right)\frac{p_i^{k}}{\gamma_i^{k}} \qquad (18)$$

附录 (2)

根据方程 (4)，在加入定价因子 $c_i p_i^d$ 的情况下，U_i 对 p_i^d 的一阶导数计算如下：

$$U_i = \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1} - \gamma_i^d\right)^2 - c_i p_i^d \ , Where \ \gamma_i^d = \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d}$$

将负定价函数 $-c_i p_i^d$ 加入效用函数：

$$\Rightarrow U_i = \left(\frac{\Gamma_i^d}{\alpha\Gamma_i^d + 1} - \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d}\right)^2 - c_i p_i^d$$

方程 (11) 的一阶导数，

$$For \ \ \frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} \Rightarrow \frac{\partial U_i}{\partial p_i^d} = \frac{-2\left(\frac{\Gamma_i^d}{a\Gamma_i^d + 1} - \frac{p_i^d h_i^d}{I_i^d}\right)h_i^d}{I_i^d} - c$$

$$\Rightarrow p = \left(\frac{(ac\Gamma_i^d + 2h_i^d\Gamma_i^d + cI_i^d)I}{2(a\Gamma_i^d + 1)(h_i^d)^2}\right)$$

$$p_i^d = \left(\frac{(ac\Gamma_i^d + 2\Gamma_i^d\frac{\gamma_i^d}{p_i^d} + c)(I_i^d)^2}{2(a\Gamma_i^d + 1)(h_i^d)^2}\right)$$

$$p_i^{k+1} = \left(\frac{(ac\Gamma_i^d + 2\Gamma_i^d \frac{\gamma_i^k}{p_i^k} + c)}{2(a\Gamma_i^d + 1)} \right) \left(\frac{p_i^k}{\gamma_i^k} \right)^2$$

对于 $(k+1)^{th}$ 迭代，采用定价因子的新的功率控制迭代：

$$p_i^{k+1} = \left(\frac{(ac\Gamma_i^d + 2\Gamma_i^d \frac{\gamma_i^k}{p_i^k} + c)}{2(a\Gamma_i^d + 1)} \right) \left(\frac{p_i^k}{\gamma_i^k} \right)^2 \quad (19)$$

致谢

本研究获得马来亚大学英国工程与自然科学研究委员会 DARE 项目资助，项目编号为 EP/P028764/1（UM IF035A-2017年 和 UM IF035-2017年）；同时获得马来西亚敦胡先翁大学马来西亚高等教育部基础研究资助计划资助，项目编号为 FRGS/1/2018/TK04/UTHM/02/14。

6 参考文献

1. Khazali A, Sobhi-Givi S, Kalbkhani H, Shayesteh MG：异构网络中D2D通信的能量频谱高效资源分配与功率控制。《无线网络》2020, 26:253-267 文章（CrossRef 链接）。2. Xia X, Kang G：基于粒子群优化的功率控制算法，用于蜂窝网络下行覆盖中的无线信息与能量同传辅助D2D通信。《数学与系统工程》2020, 790:012006 文章（CrossRef 链接）。3. Najeh S, Bouallegue A：D2D通信中基于博弈论的分布式与集中式模式选择和功率控制。《物理通信》2020, 38:100962 文章（CrossRef 链接）。4. Li J, Zhang X, Feng Y, Li K-C：一种基于加权效率干扰感知的资源分配机制，用于D2D底层通信 2019, 19 3194。 《传感器》： 。 文章（CrossRef 链接）。5. Koskie S, Gajic Z：用于第三代移动通信无线 CDMA 网络中基于信干比的功率控制的纳什博弈算法。《*IEEE/ACM* 网络汇刊》2005, 13:1017-1026 文章（CrossRef 链接）。6. He W, Zhang W, Bai W, Cai Y, Guan X, Qu J：通过基于斯塔克尔伯格博弈的功率控制，提高底层D2D通信的物理层安全性。 载于 *2016* 年国际计算机、信息与电信系统会议（*CITS*）。IEEE；2016：1-5 文章（CrossRef 链接）。7. Shi C, Wang F, Sellathurai M, Zhou J：频谱共享环境下分布式多雷达架构的非合作博弈论功率分配策略。《*IEEE* 开放获取》2018, 6:17787-17800 文章（CrossRef 链接）。8. Bambos N：迈向无线通信中的功率敏感型网络架构：概念、问题与设计方面。《*IEEE* 个人通信》1998, 5:50-59 文章（CrossRef 链接）。

9. Hossain E, Niyato D, Han Z：认知无线电网络中的动态频谱接入与管理。剑桥大学出版社；2009 文章（CrossRef 链接）。10. Gunnarsson F, Gustafsson F：通用移动通信系统中功率控制的控制理论方面。《控制工程实践》2003, 11:1113-1125 文章（CrossRef 链接）。11. Yousef Ali MA-G：无线环境中基于效用的非合作功率控制博弈/Yousef Ali Mohammed Al-Gumaei。马来亚大学，2017 文章（CrossRef 链接）。12. Goudarzi F, Asgari H：车载自组织网络的非合作信标功率控制。*IEEE*智能交通系统汇刊2018, 20:777-782 文章（CrossRef 链接）。13. 面向可持续灾后应急通信系统的高效能量收集与最优聚类技术文章（CrossRef 链接）。14. Mukhlif F, Noordin KAB, AL-Gumaei YA, AL-Rassas AS：面向高效第五代移动通信网络的能量收集。载于*2018*年智能计算与电子企业国际会议（*ICSCEE*）。IEEE；2018：1-5 文章（CrossRef 链接）。15. Del Re E, Piunti P, Pucci R, Ronga L：认知网络资源分配的节能技术。《绿色工程杂志》2012, 2:329-346 文章（CrossRef 链接）。16. Yu L, Wu Q, Xu Y, Ding G, Jia L：多用户抗干扰通信的功率控制博弈。《无线网络》2019, 25:2365-2374 文章（CrossRef 链接）。17. Ali Y, Al-Gumaei M：无线环境中基于效用的非合作功率控制博弈。马来亚大学，2017 文章（CrossRef 链接）。18. Al-Gumaei YA, Aslam N, Al-Samman AM, Al-Hadhrami T, Noordin K, Fazea Y：不同系统条件下D2D底层网络中的非合作功率控制博弈。《电子学》2019, 8:1113 文章（CrossRef 链接）。19. Mukhlif F, Noordin KAB, Abdulghafoor OB, Izam TFTMN：基于博弈与效用定价理论的认知无线电网络绿色通信。《公共科学图书馆·综合》2020, 150235953 :e文章（CrossRef 链接）。



Abdu Saif于2017年获得马来西亚吉隆坡马来亚大学项目管理理学硕士学位，并于2005年获得也门IBB大学电子通信工学学士学位。他在电信公司拥有九年以上的行业经验。目前，他正在马来西亚吉隆坡马来亚大学工程学院攻读电气工程博士学位（主修无线通信）。他的研究兴趣包括无线网络、无人机三维覆盖、博弈论、飞行物联网、应急管理系统，以及面向B5G的公共安全通信。



Kamarul Ariffin Noordin于1998年和2001年分别获得马来西亚吉隆坡马来亚大学的荣誉工学学士和工学硕士学位，并于2009年在英国兰卡斯特大学获得通信系统博士学位。他是马来西亚吉隆坡马来亚大学电气工程系副教授。他的研究兴趣主要包括无线网络中的资源分配，

认知、无线电网络、设备到设备通信、网络建模和性能分析。



Kaharudin Dimyati于1992年获得马来亚大学电气工程学士学位。随后，他于1993年前往英国威尔士大学斯旺西分校攻读通信系统博士学位，并于1996年获得博士学位。目前，他是马来西亚吉隆坡马来亚大学电气工程系教授。他的研究兴趣主要包括无线通信、光通信和编码理论。截至目前，他已指导20名博士生和33名研究型硕士生顺利完成学业。他已发表超过100篇论文，刊载于知名期刊。他是英国 IET、美国 IEEE、日本 IEICE 和马来西亚 IEM 的会员。



Nor Shahida Mohd Shah分别于2000年、2003年和2012年获得东京工业大学工程学学士学位、马来亚大学理学硕士学位和大阪大学博士学位。自2004年起，她任职于马来西亚敦胡先翁大学。她的研究兴趣包括光纤器件、光通信、天线与传播以及无线通信。



Yousef A. Al-Gumaei于2003年获得也门IBB大学电气电子与电信工程学士学位。2010年和2017年，他分别获得马来西亚马来亚大学（UM）电气电子与电信工程工程科学硕士学位和博士学位。2017年7月至2019年7月，他在马来西亚麦地那国际大学（MEDIU）电气与电子工程系担任助理教授。目前，他是英国泰恩河畔纽卡斯尔诺森比亚大学工程与环境学院的访问研究员。2003年至2007年，他曾担任电信工程师，任职于也门公共电信公司（PTC）电信话务与交换部门。2010年，他受聘为IBB大学电气电子系讲师。他的研究兴趣包括无线网络中的资源分配、博弈论、物联网和第五代移动通信。



Qazwan Abdullah出生于也门塔伊兹，2013年获马来西亚敦胡先翁大学（UTHM）电气与电子工得电气与电子工程硕士学位。目前，他是博士生，研究方向包括控制系统、无线技术和天线滤波

+



Kamal Ali Alezabi博士，副教授是马来西亚UCSI大学计算机科学与数字信息研究所的高级讲师，目前担任UCSI大学研究与研究生学习主任。他于2017年在马来西亚博特拉大学（UPM）计算机与通信系统工程系获得博士学位。Kamal博士担任新兴技术与智能系统国际会议（ICETIS 2021）的程序委员会和科学委员会委员，以及计算、通信与电子新兴技术国际会议（ETCCE 2020）的程序主席委员会委员。他还是UTM行业评审专家组成员。