



移动通信使能其他行业碳减排的定量评估: 指标、方法和案例

张四海^{1,2*}, 崔婵¹, 孙宏宇¹, 曾勇梅³, 朱江³, 朱近康¹

1. 中国科学技术大学中国科学院无线光电通信重点实验室, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学微电子学院, 合肥 230026

3. 华为技术有限公司, 上海 201206

* 通信作者. E-mail: shzhang@ustc.edu.cn

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-12-22; 接受日期: 2024-01-25; 网络出版日期: 2024-04-11

科技部重点研发项目 (批准号: 2022YFB2902304) 和 华为技术有限公司无线研究创新项目 (批准号: FA2019051101) 资助

摘要 随着新一代信息通信技术 (information and communication technologies, ICT) 的高速发展以及新基建的部署, 移动通信系统的能耗和碳排放出现较快增长的趋势. ICT 行业在自身节能减排之外, 使能其他行业节能减排, 可有效降低其他行业的碳排放, 是未来理论研究行业应用的重要领域. 本文基于 ICT 使能碳减排评估框架, 提出两个定量衡量使能效果的指标, 使能减碳比 (enable carbon reduction ratio, ECRR) 和使能低碳系数 (enable carbon reduction coefficient, ECRC) 以及相应的定量分析方法, 用于评估被使能企业的实际碳减排效果. 本文研究可保护数据隐私的多方数据共享, 基于安全多方计算 (secure multi-party computation, SMPC) 框架, 提出保护各方数据隐私的使能碳减排评估方法. 本文通过实际案例, 完成数据采集、分析验证, 对所提指标和方法论证其有效性和实用性.

关键词 ICT 使能, 碳减排量化评估, 隐私保护, 全生命周期碳足迹, 使能低碳系数

1 引言

过度碳排放是导致地球气候变化的重要因素, 对环境、社会和经济具有严重负面影响. 当今社会普遍认识到, 需要通过减少碳排放, 减缓气候变化的速度. 联合国宽带数字发展委员会于 2012 年 4 月 2 日指出, 信息通信技术 (information and communication technologies, ICT) 的持续发展有望大幅减少温室气体 (如二氧化碳) 的排放, 为人类应对气候变暖作出重要贡献^[1]. 目前很多国家纷纷引入无线通信和物联网技术, 实现工厂的数字化、低碳化管理, 提高运营效率, 推动节能减排, 降低能耗, 减少碳排放.

引用格式: 张四海, 崔婵, 孙宏宇, 等. 移动通信使能其他行业碳减排的定量评估: 指标、方法和案例. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 777-787, doi: 10.1360/SSI-2023-0295

Zhang S H, Cui C, Sun H Y, et al. Quantitative evaluation of carbon reduction enabled by mobile communication in other industries: indicators, methods, and cases (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 777-787, doi: 10.1360/SSI-2023-0295

在众多行业中, ICT 行业的碳排放占据较大比例. 根据中国国家统计局能源数据, 采用政府间气候变化专门委员会 (intergovernmental panel on climate change, IPCC) 清单分析法计算 ICT 行业的直接碳排放, 2012~2017 年中国 ICT 行业碳排放总量从 8225 万吨增长至 13761 万吨, 涨幅为 61%, 是所有行业之最^[2]. 2019 年移动通信业的温室气体排放量占全球总量的 0.48%^[3,4], 因此, 如何解决 ICT 行业的碳排放问题成为严峻挑战, 其中, 移动通信行业的碳排放更是巨大难题. 移动通信行业的能耗问题已经引起国内外研究的高度关注. 早在 2009 年, 中国科学技术大学朱近康教授就提出绿色通信的概念, 率先倡导研究移动通信领域的能效问题. 目前国内外团队对如何提升移动通信的能量效率已完成了大量的理论和应用研究, 取得了众多实际成果. 但是, 目前随着全球数字化转型的加速、算力需求的增长和 5G 更广泛的应用, 移动通信行业的能耗预计会继续增加, 这给移动通信行业提出了严峻挑战, 众多研究团队也在持续开展研究. 与直接降低移动通信系统的能耗不同, 另一个视角是, 移动通信技术可通过使能其他行业助其减少碳排放量 20% 左右^[5]. 因此, 虽然移动通信行业或 ICT 行业的能耗可能将持续增加, 但是通过移动通信使能其他行业可以有效降低其他行业的碳排放, 这对于降低全社会总碳排放同样具有重要意义, 对于完成双碳目标同样具有重要价值. 本文研究期望推动移动通信行业乃至 ICT 行业积极开展使能其他行业节能减排的理论和应用工作.

欧盟提出 60% 的全球减排长期目标以及至少减排 40% 的自身贡献目标^[6], 具体手段包括采用低碳交通、提升能源利用效率等. 2021 年美国重新加入《巴黎协定》, 设定了 2030 年温室气体较 2005 年减排 50%~52%、2050 年达到“零碳排放”的碳减排目标^[7]. 其中, 美国无线通信和互联网协会 (CTIA) 认为 5G 将成为最环保的网络技术, 可助力美国完成碳减排目标, 并预测 2021~2025 年, 5G 技术的部署将为美国创造多达 30 万个新的绿色工作岗位^[7]. 目前我国积极推进碳达峰碳中和, 在国际碳约束不断加强的背景下提速低碳发展规划. 2023 年 4 月, 中华人民共和国国家发展和改革委员会等多部门联合印发《碳达峰碳中和标准体系建设指南》, 对如何进行碳核算核查、碳信息披露、化石能源清洁低碳利用、生产和服务过程减排、碳捕集利用与封存、碳排放交易等相关标准做出了说明^[8]. 目前 ICT 已在使能其他行业的绿色低碳发展方面发挥了重要作用. 2018 年, 全球在移动通信技术的影响下大约减少了 21.35 亿吨二氧化碳排放^[9], 而移动通信自身的碳排放量仅为 2.2 亿吨, 占全球排放总量的 0.4%^[9], 在使能技术的影响下, 减少的二氧化碳排放量几乎是通信自身排放量的 10 倍. 2018 年, 移动通信技术在全球范围内减少了 14.4 亿兆瓦时的电力和天然气, 以及 5210 亿升燃料^[9]. 这些电力和天然气可供美国 7000 多万户家庭使用一整年, 或英国 3250 万辆登记在册的乘用车使用 19 年^[9]. 使能低碳技术有望在未来 10 年颠覆经济的各个方面, 借助政策支持和投资, 数字化低碳可成为低碳发展的关键驱动力.

目前 ICT 使能工作较多侧重于研究各行业自身的节能减排技术^[10,11], 评估时偏重评估各行业自身的碳排放^[12,13], 很少有将 ICT 和各行业自身碳排放进行整体评估, 导致 ICT 使能其他行业碳减排缺乏相对完整的评价指标和实现方法. 本文因此提出移动通信使能其他行业碳减排的定量评估方法, 具体研究内容包括提出评价指标、设计评价方法和实现验证案例. 首先, 在现有节能减排评估指标与量化评估框架基础上, 提出一个统一的使能量化评估框架, 并设计了两个能够反映使能低碳效果的量化指标. 其次, 将安全多方计算应用于定量分析框架中, 提出保护数据隐私的 ICT 使能碳减排评估方法, 使企业、运营商和设备商在不泄露各自隐私数据的基础上实现使能碳减排评估. 最后, 与某移动运营商合作, 分析其基于某企业的 ICT 使能节能增效解决方案, 收集相关能耗数据, 完成所提指标的量化评估, 论证了研究工作的有效性.

2 相关工作

目前 ICT 使能其他行业碳减排相关工作主要集中在 ICT 使能各行业节能和评估技术.

ICT 使能各行业的节能技术. 文献 [14] 使用 ICT 使能智能交通实现节能减排, 利用神经网络和统计建模技术, 有效预测公交车到达站点时间; 文献 [15] 提出一个集成多源物流信息的云物流服务平台, 设计一种面向绿色物流的智能包装服务建模与配送任务动态优化方法, 节约物流配送的资源 and 成本; 文献 [16] 提出一个环境足迹评估系统, 通过建立环境影响数据库, 将实体的财务信息与环境影响数据库进行比较, 以产生该实体的初始碳足迹评估, 并对碳足迹评估进行迭代持续评估. 对企业和用户的碳排放进行评估时, 企业和用户的数据隐私保护问题至关重要, 目前 ICT 使能其他行业也有所关注; 文献 [17] 针对智慧城市在为居民带来便利的同时所涉及的隐私安全方面的问题进行总结和展望, 但是缺少对企业的隐私问题的研究.

ICT 使能各行业碳减排评估. 部分文献使用 ICT 构建系统评估各行业的能耗. 文献 [18] 针对园林绿化, 基于大数据算法在园区中建立了低碳智慧管理系统; 文献 [19] 提出了一个用于测量电力系统中碳排放的系统, 包括发电碳表、网络碳表、消费碳表以及中心服务器, 中心服务器获取数据并根据数据测量碳排放, 再将测量结果发送到相应的碳表; 文献 [20] 以潮流追踪技术和碳足迹概念为基础, 通过微观碳排放分析计算, 实现电力系统内碳排放的计量由发电侧向负荷侧的转换碳排放. 目前 ICT 使能各行业节能减排的各种评估方法种类繁多, 但相对缺少统一标准, 且大多只考虑使能后行业自身的减碳量, 并未考虑无线通信部分增加的额外碳排放, 导致评估效果不够完整.

3 ICT 使能的碳减排量化评估

本节介绍 ICT 使能碳减排评估框架, 提出 ICT 使能低碳定量分析指标, 并给出具体计算方法.

3.1 使能碳减排量化评估框架

图 1 为《面向 5G-A/6G 无线通信系统节能减排关键技术愿景白皮书》^[21] 中提出的无线使能碳减排评估框架, 对无线通信系统使能其他行业节能减排的效果评估提供了参考. 该框架涉及三方, 企业、设备商和运营商, 其中, 设备商为企业提供必要的硬件和软件, 运营商为企业提供信息服务, 二者联合向企业提供使能服务, 进一步降低企业的碳排. 从该框架可以看出, 移动通信使能碳减排过程中的数据交换可视为由企业、运营商、设备商三方交换数据的过程. 其中, 企业提供自身使能前后的碳排放, 设备商提供使能过程所使用设备的全生命周期碳排放, 而运营商提供其使能企业导致的额外碳排放量. 因此, 使能碳减排过程的净减排量的具体表达如下:

$$C_{r,ne} = C_{r,e} - C_f - C_R, \quad (1)$$

其中, $C_{r,e}$ 表示企业使能的碳排放减少量; C_f 表示新增设备的全生命周期碳排放量, 包括 ICT 设备和技术的生产、组装、运输、使用、维护和报废的碳排放量; C_R 表示反弹碳排放量, 即由于 ICT 设备和技术的引入而产生反弹效应的额外碳排放量.

上述框架为使能碳减排评估提供了流程参考, 但式 (1) 还不能详细反映使能低碳的潜力与使能效果, 同时缺乏数据方面的指导与约束. 本文在 3.2 小节设计了可量化评估衡量使能效果的使能低碳定量分析指标, 并提出相应的定量分析方法.

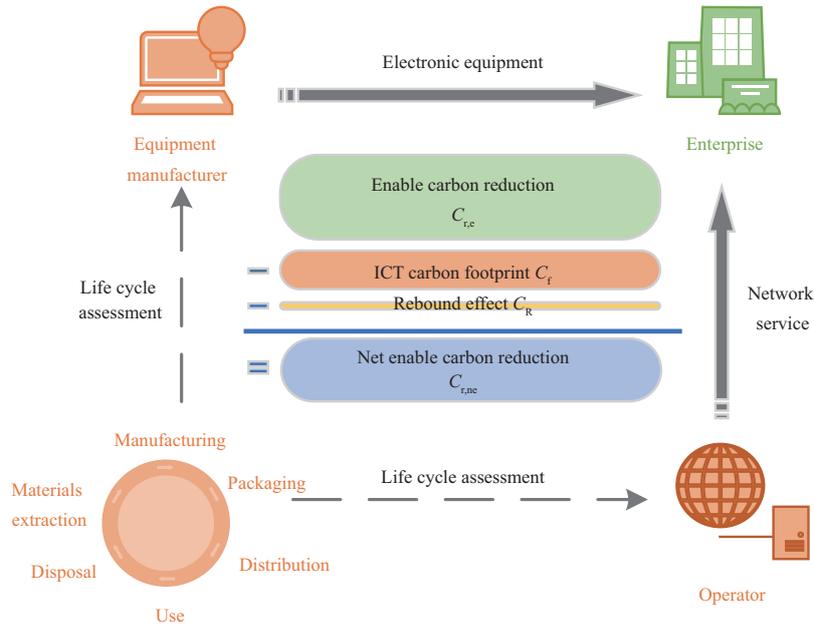


图 1 ICT 使能的碳减排评估框架

Figure 1 Framework for valuing carbon emission reduction through ICT enablement

3.2 使能低碳的定量指标

目前 ICT 行业领域的常用评价指标更关注 ICT 技术在使能效果与 ICT 自身碳排放之间的比率 [22], 其具体公式如下:

$$\epsilon = \frac{C - C_e}{C_{ICT}}, \quad (2)$$

其中, C 表示企业使能前的总碳排放量, 即来源于原生产过程的总碳排放量; C_e 表示企业使能后的总碳排放量, 即来源于原生产过程和使能过程的碳排放量; C_{ICT} 表示使能过程中 ICT 技术产生的碳排放量.

可以看出, 该评价指标可清晰反映出企业减碳效果与 ICT 碳排放之间的比例关系, 可近似衡量无线网络或通信运营商的使能碳减排贡献. 但不足是, 该指标反映的是碳减排比例, 而非企业实际的使能碳减排效果或者是企业潜在的使能碳减排潜力. 因为不同行业甚至同一行业内不同企业的绝对能耗和绝对碳排放量差异很大, 该相对评价指标并不能完全反映出移动通信使能碳减排对于行业整体碳排放所能起到的实际绝对碳减排效果. 因此, 本文提出可表征 ICT 使能对总碳减排影响的指标来量化评价效果, 对企业或被使能方具有更直接的指导意义.

首先, 第 1 个指标是使能减碳比 (enable carbon reduction ratio) ζ , 目的是衡量企业的使能总减碳量, 即更关注被使能侧的低碳效果, 适用于评估使能前后企业自身减碳效果的场景, 具体表达式为

$$\zeta = \frac{C - C_e}{C}, \quad (3)$$

可以看出, ζ 的取值范围为 (0, 1), ζ 值越接近于 1, 企业的使能减碳效果越强.

其次, 第 2 个指标是使能碳减排系数 (enable carbon reduction coefficient) η . η 考虑了企业的总碳排放量和使能过程中所产生的碳排放, 能够反映使能降低的碳排放量相对于包含使能过程消耗的碳排

放量在内的总碳排放量所占的比例,适用于评估企业利用无线通信或 ICT 的低碳能力,具体表达式为

$$\eta = \frac{C - C_e}{C + C_{em} + C_{op} + C_R}, \quad (4)$$

其中, C_{em} (embedded carbon emission) 表示使能所需新设备除运行阶段外的全生命周期碳排,包括设备生产、组装、运输、维护、报废环节的内置碳排放量,该部分碳排放由设备商提供; C_{op} 表示运行碳排,为运营商向企业提供网络使能服务环境的碳排放量,该部分碳排放量由运营商提供; C_R 表示反弹碳排放. 显然, η 的取值范围为 $(0, 1)$, η 值越接近于 1, 企业使用 ICT 进行低碳的能力越强. 使能低碳系数更直观的意义是, 可用来评估企业利用无线通信或 ICT 进行低碳的能力. 例如, 某些企业或行业由于其行业特点或企业信息化水平, 在利用无线通信进行节能减排时的减碳量会比较大, 而另外一些企业或行业可能相对较小¹⁾.

3.3 使能碳减排指标的定量计算过程

本小节介绍在 3.1 小节的使能低碳框架下如何计算 3.2 小节提出的两个定量指标 ζ 和 η .

假设有企业 A、设备商 B 和运营商 C. 设备商 B 向企业 A 提供设备, 运营商 C 向企业 A 提供信息服务. B 和 C 向 A 提供服务, 支持 A 的正常运行. 为了减少三者的碳排放总量, C 进一步使能 A. 在开始时间 D_0 天时, 三者工作在状态 1 (使能前), 在时间 D_N 天后, 其工作在状态 2 (使能后)²⁾.

企业 A: 计算企业使能前后的减碳量. A 记录企业自身第 i 天的第 j 小时的实际能耗值, 即使能前的能耗记为 E^{ij} (energy consumption without enablement) (单位: 焦耳), $i \in \{D_0, D_1, D_2, \dots, D_{N-1}\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$, 使能后的能耗记为 E_e^{ij} (energy consumption with enablement), $i \in \{D_N, D_{N+1}, D_{N+2}, \dots\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$.

A 利用 $D_0 \sim D_{N-1}$ 天的历史数据 E^{ij} , $i \in \{D_0, D_1, D_2, \dots, D_{N-1}\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$, 估计 D_N 天之后使能前的能耗值 \hat{E}^{ij} , $i \in \{D_N, D_{N+1}, D_{N+2}, \dots\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$.

因此, 首先通过

$$E_r^{ij} = \hat{E}^{ij} - E_e^{ij} \quad (5)$$

可以计算出使能前后的能耗的减少量 E_r^{ij} , $i \in \{D_N, D_{N+1}, D_{N+2}, \dots\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$, 接着利用碳排放因子法得到 E_r^{ij} 对应的使能前后的碳排放减少量 $C_{r,e}^{ij}$ (单位: kgCO_2).

设备商 B: 计算新增使能设备的全生命周期碳排放量. 记 ICT 设备和技术生产、组装、运输、使用、维护、报废环节的碳排放为 $A := \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6\}$ (单位: kgCO_2), ICT 设备的使用寿命为 T 小时. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_6$ 是 ICT 设备和技术生产、组装、运输、维护、报废环节的碳排放环节造成的碳排放固定值; α_4 是 ICT 设备使用环节的碳排放, 包含在企业内, 此处不再重复计算.

则引入 ICT 设备导致的单位时间的内置碳排放为 C_{em} (单位: kgCO_2) (类似地, 单位时间可以选择每小时或每天, 本文假定为每小时), 可计算如下:

$$C_{em}^{ij} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_5 + \alpha_6}{T}. \quad (6)$$

1) 公式中的计量单位均为 kgCO_2 , 也可统一为其他单位, 比如, 焦耳.

2) 此处特别说明, 我们按照时间的刻度来计算, 可以选择计算每小时的使能系数, 也可以计算每一天的使能系数, 此计算方法适用于任何时间刻度, 但相应地所使用的数据时间刻度要对齐, 比如当选择计算每小时的使能系数时, 引入 ICT 设备导致的单位时间的碳排放要平均到每小时. 这里时间刻度我们选择以每小时为例来计算. 同时时间刻度的大小会影响评估, 因为时间刻度越小, 比如 1 s, 对传输数据的带宽等要求越高, 但计算方法本身, 适用于任意时间刻度.

运营商 C: 计算运营商向企业提供使能服务导致运营商的额外碳排放量. 对无线使能来说, 额外碳排放量主要来源于数据中心、网络设备和基站, 其中基站与企业直接传输信息, 可具体分析基站的碳排放, 而数据中心和网络设备所提供的服务涉及范围较广, 因此本文暂未考虑. 基站的业务负荷率记为 α (无单位), 是某一时刻基站传输的信息与网络容量之比. 基站的实测功耗记为 F (单位: W), 业务负荷率会影响基站的实测功耗. 假设运营商具有以下数据: α^{ij} , β^{ij} 和 $F(\alpha)$, $i \in \{D_N, D_{N+1}, D_{N+2}, \dots\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$. 其中 α^{ij} 表示该基站在第 i 天第 j 时的业务负荷率, β^{ij} 表示该基站在第 i 天第 j 时向企业传输的流量占基站负载的比例, $F(\alpha)$ 表示该基站随业务负荷率变化的实测功耗. 则通过 α^{ij} 和 $F(\alpha)$ 即可得到该基站在第 i 天第 j 时的功耗:

$$F^{ij} = F(\alpha^{ij}). \quad (7)$$

则第 i 天第 j 时传输信息所消耗的基站总能量值计算为

$$E_{\text{ICT}}^{ij} = 3600 \times \beta^{ij} \times F^{ij}. \quad (8)$$

接着利用碳排放因子法得到 E_{ICT}^{ij} 对应的 ICT 运行碳排放值 C_{op}^{ij} (单位: kgCO_2).

综上所述, 第 i 天第 j 时的净减碳量可计算为

$$C_{\text{r,ne}}^{ij} = C_{\text{r,e}}^{ij} - C_{\text{f}}^{ij} = C_{\text{r,e}}^{ij} - C_{\text{op}}^{ij} - C_{\text{em}}^{ij}, \quad (9)$$

其中, $C_{\text{r,e}}^{ij}$ 表示企业在单位时间内使能的碳排放减少值, C_{f}^{ij} 表示设备单位时间内的全生命周期碳排放量, C_{op}^{ij} 表示设备单位时间内的运行碳排放量, C_{em}^{ij} 表示引入 ICT 设备导致的单位时间的内置碳排放量.

第 i 天第 j 时的使能低碳系数可计算为

$$\eta^{ij} = \frac{C_{\text{r,e}}^{ij}}{C^{ij} + C_{\text{op}}^{ij} + C_{\text{em}}^{ij}}. \quad (10)$$

4 基于安全多方计算的使能碳减排评估隐私保护方法

国内外数据协作的普遍现状是, 各个数据拥有方独立且完整地拥有各自的业务数据, 不愿意向合作方直接开放或共享数据. 对于许多企业来说, 其能耗相关的数据十分重要, 通常不愿向外公开或共享. ICT 使能碳减排中的设备商、运营商和企业的运营数据, 包括碳排放数据是各方的重要核心数据, 更加需要保护, 不可泄露. 但使能节能减排评估的基本要求是, 综合利用各方节能减排数据才能完成减排效果量化评估. 因此, 研究其中的数据隐私保护技术, 建立数据隐私保护标准, 是使能节能减排量化评估能否实用化、产业化的关键和前提.

在本文所提 ICT 使能碳减排过程中, 三者需要进行数据交换, 但直接交换原始碳排放数据会导致其数据隐私难以保护, 因此我们提出了一种隐私保护方法来保证使能碳减排评估过程中各方的数据隐私安全.

安全多方计算 (secure multi-party computation, SMPC) 的参与各方通常分为诚实和恶意两类. 诚实方正确地遵循协议, 不偏离指令, 而恶意方可能试图破坏协议, 获得对其他方输入或输出的未经授权访问. 半诚实模型是密码学和 SMPC 中使用的一种威胁模型, 它假设参与计算的各方正确地遵循协议, 但在计算期间试图推断有关其他各方输入或输出的附加信息. 这也被称为诚实但好奇的模式. 事

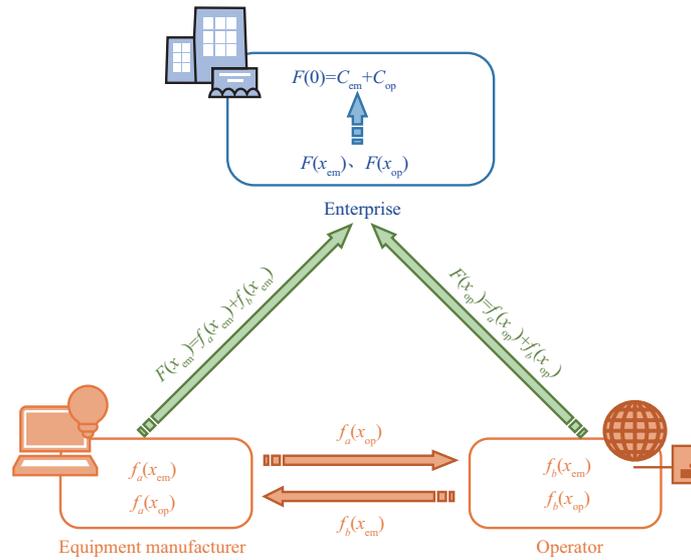


图 2 无第三方评估机构的使能碳减排评估框架

Figure 2 Enabling carbon reduction assessment framework without third-party assessment agency

实上, 大多数协议和实现实际隐私保护应用的协议主要集中在半诚实模型^[23,24]. 本文同样假定企业 A、设备商 B 和运营商 C 都是半诚实方, 其中, 设备商拥有数据 C_{em} , 运营商拥有数据 C_{op} , 企业拥有数据 C 和 C_e , 使用 SMPC 在三方不共享各自隐私数据的具体值情况下, 共同利用该隐私数据进行使能碳减排计算.

本文研究使能碳减排量化评估过程中隐私保护的主要目标是, 确保参与三方的真实数据不泄露, 同时计算两个指标 η 和 ζ . 本文所提无第三方评估机构的使能低碳评估场景中, 企业需要获得 $C_{em} + C_{op}$ 的值, 由企业结合自身拥有的 $C - C_e$ 来计算 ζ 和 η , 其中 ζ 可由企业自身数据计算. 在此过程中, 设备商、运营商和企业无需泄露 C_{em} , C_{op} , C 和 C_e 的原始值.

本文借鉴 SMPC 中秘密共享技术^[25] 的思想, 提出无第三方评估机构的使能碳减排评估框架, 如图 2 所示, 将秘密进行适当拆分, 由不同的参与者管理, 单个参与者无法恢复秘密, 只有若干个参与者利用加法同态的性质协同才可恢复秘密. 在无第三方评估机构的使能低碳评估场景中, 设备商的“秘密”为 C_{em} , 运营商的“秘密”为 C_{op} , 两者都将秘密拆为两部分, 共享一部分, 即设备商与运营商都为秘密拥有者和参与者, 两者协同将数据上传至企业, 企业利用同态加密的性质解出 $C_{em} + C_{op}$.

具体来说, 评估框架包括一个函数 $F(x) = f_a(x) + f_b(x)$ 和 x 的两个取值 x_{em} 和 x_{op} ($x_{em} \neq 0$, $x_{op} \neq 0$ 且 $x_{em} \neq x_{op}$), 其中 $f_a(x)$ 由设备商构建, $f_a(x) = C_{em} + a_1x$, 设备商为保护 C_{em} 数据不泄露, 需自行设置 a_1 ($a_1 \neq 0$) 并保密; 同理 $f_b(x)$ 由运营商构建, $f_b(x) = C_{op} + b_1x$, 自行设置 b_1 ($b_1 \neq 0$) 并保密. 为使企业获得 $C_{em} + C_{op}$ 的值, 设备商计算 $f_a(x_{em})$ 和 $f_a(x_{op})$, 运营商计算 $f_b(x_{em})$ 和 $f_b(x_{op})$; 两者数据分享后满足一方可计算 $F(x_{em})$, 另一方可计算 $F(x_{op})$ 即可. 本文以设备商将 $f_a(x_{op})$ 分享给运营商, 运营商将 $f_b(x_{em})$ 分享给设备商为例说明, 同理设备商将 $f_a(x_{em})$ 分享给运营商, 运营商将 $f_b(x_{op})$ 分享给设备商亦可. 显然设备商可计算 $F(x_{em}) = f_a(x_{em}) + f_b(x_{em})$ 并上传给企业, 运营商可计算 $F(x_{op}) = f_a(x_{op}) + f_b(x_{op})$ 并上传给企业, 企业则可通过 $F(x_{em})$ 和 $F(x_{op})$ 求解式 (11) 获得

表 1 某企业使能前后一个月的消耗量

Table 1 Consumption before and after the enablement of a certain enterprise for one month

	Gas consumption ($N \cdot m^3$)	Power consumption ($kW \cdot h$)
Before the digital transformation	19000	27000
After the digital transformation	17000	27000
Difference value	2000	0

$C_{em} + C_{op}$ 的值.

$$\begin{cases} F(x_{em}) = (C_{em} + C_{op}) + (a_1 + b_1)x_{em}, \\ F(x_{op}) = (C_{em} + C_{op}) + (a_1 + b_1)x_{op}. \end{cases} \quad (11)$$

评估过程分为 4 步, 初始化、分享、上传和求解.

第 1 步: 初始化. 评估框架确定 x_{em} 和 x_{op} 的值以及 $F(x_{em})$ 由设备商计算, $F(x_{op})$ 由运营商计算, 并将前述信息下发至企业、设备商和运营商, 设备商确定 a_1 的值, 运营商确定 b_1 的值.

第 2 步: 分享. 设备商计算 $f_a(x_{em})$ 和 $f_a(x_{op})$, 运营商计算 $f_b(x_{em})$ 和 $f_b(x_{op})$; 设备商将 $f_a(x_{op})$ 分享给运营商, 运营商将 $f_b(x_{em})$ 分享给设备商.

第 3 步: 上传. 设备商计算 $F(x_{em}) = f_a(x_{em}) + f_b(x_{em})$ 并上传企业, 运营商计算 $F(x_{op}) = f_a(x_{op}) + f_b(x_{op})$ 并上传企业.

第 4 步: 求解. 企业通过式 (11) 解出 $F(0) = (C_{em} + C_{op})$, 则可通过 $F(0)$ 计算出净减碳量 $C_{r,ne}$ 和使能低碳系数 η :

$$C_{r,ne} = C - C_e - F(0), \quad (12)$$

$$\eta = \frac{C - C_e}{C + F(0)}. \quad (13)$$

5 移动通信使能碳减排评估的案例

本节介绍所提指标和评估方法的应用案例, 其中, 企业的用能需求为天然气、电、蒸汽等, 通过基础数据数字化升级、重点设备关键运行参数监控和重点耗能设备节能优化或改造实现使能碳减排; 运营商为企业提供使能碳减排服务, 构建能源数字化管理平台, 能耗数据分析和优化, 实现使能低碳增效.

5.1 数据情况

案例中相关能耗数据包括使能前企业能耗 (燃气消耗量、耗电量)、使能后企业能耗 (燃气消耗量、耗电量、增加的设备、数据传输能耗、占用云服务器的能耗) 和运营商能耗 (服务器能耗、数据传输能耗). 使能前企业能耗只包括企业的燃气消耗量和耗电量, 但为获得使能服务, 企业需增加设备 (设备成本费), 设备将原始数据传输至能源数字化平台 (数据传输能耗), 能源数字化平台利用服务器的计算和存储资源分析和监测数据 (服务器能耗), 平台向企业的设备传输信息 (数据传输能耗).

下面分别介绍这些数据, 表 1 为该企业使能前后一个月的燃气消耗量和耗电量数据, 使能前后燃气的消耗量减少 $2000 N \cdot m^3$, 耗电量几乎不变³⁾. 具体实施时未获得每日的燃气消耗量和耗电量的原

3) $N \cdot m^3$ 表示零摄氏度时一个标准大气压下的气体体积.

始数据,改造后的耗电量也未增加新增传感器的耗电量⁴⁾.则使能前后该企业一个月的燃气消耗减少量导致的碳排放量 $C_{r,e}$ 为⁵⁾

$$C_{r,e} = 2000 \text{ N} \cdot \text{m}^3 \times 2.1650 \text{ kgCO}_2/\text{N} \cdot \text{m}^3 = 4330 \text{ kgCO}_2. \quad (14)$$

运营商向企业提供 ICT 服务导致的能耗主要有服务器能耗和数据传输能耗.云资源计算机房⁶⁾的耗电涉及多个部分,具体收集了计算节点、管理节点、存储节点、灾备节点的额定功率.机房按照 1:3 比例超分计算资源⁷⁾,扣除部分管理资源,共计划分的虚拟化资源为 3360 个虚拟核,可计算出该企业使用的 16 核对应的耗电量.以某园区为例,共计建设 12 台计算节点,单节点的电源功率为 1200 W.此外机房的空调能耗与服务器运行能耗相当,因此服务器总能耗为服务器运行能耗的两倍.

数据传输能耗由两部分构成,基站能耗和用户平面功能 (user plane function, UPF) 能耗.该运营商提供了基站中主要耗能设备有源天线单元 (active antenna unit, AAU) 和射频拉远单元 (radio remote unit, RRU) 的功率数据.UPF 能耗则通过估计获得⁸⁾.企业车间的传感器等设备收集生产过程中的燃气消耗、耗电、温湿度、气体浓度等数据,通过数据网关发送到云平台,计算燃烧效率、电能指标等,因此数据传输能耗主要来源于传感器设备的数据传输.该企业使用了 5 张 5G 流量卡进行数据传输,每月流量约 5 MB,因此,按照流量计算能耗,数据传输能耗非常少,可以忽略.

因此,运营商的单月碳排放量 C_{op} 计算如下⁹⁾:

$$C_{op} = \frac{1.2 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 30 \times 16 \times 2}{3360} \times 0.5810 \text{ kgCO}_2/\text{kW} \cdot \text{h} = 4.78 \text{ kgCO}_2. \quad (15)$$

5.2 使能低碳效果

由式 (2),目前 ICT 行业领域常用的使能系数为

$$\epsilon = \frac{4330 \text{ kgCO}_2}{4.78 \text{ kgCO}_2} = 905.86. \quad (16)$$

由式 (3),运营商使能企业的使能减碳比为

$$\zeta = \frac{4330 \text{ kgCO}_2}{4330 \text{ kgCO}_2 \div 2 \times 19} = 10.53\%. \quad (17)$$

由式 (4),运营商使能企业的使能低碳系数为

$$\eta = \frac{4330 \text{ kgCO}_2}{4330 \text{ kgCO}_2 \div 2 \times 19 + 4.78 \text{ kgCO}_2} = 0.1053. \quad (18)$$

η 考虑了企业的总碳排放量和使能过程中所产生的碳排放,衡量了使能过程所带来的碳排放增加,其直观意义是,评估企业利用无线通信或 ICT 进行低碳的能力.使能减碳比 ζ 则不考虑使能所带来的碳排放增加部分,更加注重使能带来的企业的总低碳量.本文案例中,使能低碳效果, $\eta = 0.1053$ 和

4) 该耗电量较少,对低碳效果量化评估的影响不大,将来可进一步精确计量,实现准确计算.

5) 天然气的折二氧化碳系数为 $2.1650 \text{ kgCO}_2/\text{N} \cdot \text{m}^3$,数据来源于《中国能源统计年鉴 2022》.

6) 该云平台仅面向本地政企客户,资源量不大,并不能完全代表行业平均水平或最低水平.

7) 因该企业日常对计算资源利用率不高,1 份计算资源可供 3 家企业同时使用.

8) 目前城市部署 UPF 规格为 10 Gbps,可承载的用户数为 20000,总吞吐量共计 10 Gbps,总额定功率为 2020 W.将企业作为其中一个用户可计算其平均能耗.

9) $0.5810 \text{ kgCO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}$ 为电网排放因子,数据来源于《关于做好 2022 年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》.

$\zeta = 10.53\%$ 的值相同, 原因是, 在 C_{em} (新增设备的内置碳排放) 和 C_R (反弹碳排放) 涉及范围较广从而目前暂不考虑的基础上, 近似计算得到的企业使用 ICT 服务所导致的碳排放量相对于企业总体的碳排放量而言较小, 后续研究将会看出二者差异. 另一方面, $\eta = 0.1053$ 对应企业使用 ICT 使能低碳的能力是较强还是较弱, 目前还不能给出确定回答, 后续将与更多案例进行比较分析.

6 总结

本文聚焦移动通信使能其他行业碳减排定量评估, 完成指标、方法、案例的完整研究. 首先, 在现有的节能减排评估指标与量化评估框架基础上, 考虑到 ICT 使能其他行业对于框架的要求, 提出使能碳减排量化评估框架, 并设计了两个反映使能低碳效果的指标, 其中使能低碳系数描述使能其他行业的节能减排能力, 使能减碳比则描述使能低碳的减碳量相对于使能前的碳排量的比例. 这当中的难点是, 界定碳排放的覆盖范围和精确细分碳排放的使用主体. 其次, 提出保护数据隐私的使能碳减排分布式评估方法, 将 SMPC 应用于定量分析框架中, 实现企业、运营商和设备商在不共享各自隐私数据的基础上计算使能低碳系数和使能减碳比. 在此基础上, 完成案例验证. 本文工作对移动通信乃至 ICT 使能碳减排评估工作进行了较为深入的研究, 对后续应用示范开展提供了有益思考.

后续研究可重点关注面向使能碳减排的基础理论和关键技术, 处理碳减排评估可靠数据, 解决移动通信上下游产业孤立问题, 提供系统性的实现框架和集成化的行业标准. 同时, 国内外对于无线通信系统使能其他行业碳减排可关注无线通信系统使能碳减排的相关标准法律建设, 提高使能碳减排管理在实践中的可操作性. 在能耗数据度量上, 要加强对人力成本减少带来的碳减排的估计或计算; 在运营商、设备商、企业三方主体的碳减排数据管理上, 需要提高数据采集密度和种类, 实现更加精准的度量和评估能耗.

致谢 感谢安徽电信宣城分公司的案例合作研究.

参考文献

- 1 The Broadband Commission. The broadband bridge: linking ICT with climate action for a low-carbon economy. 2012. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000219820>
- 2 China Academy of Information and Communications Technology. White paper on digital carbon neutrality. 2021 [中国信息通信研究院. 数字碳中和白皮书. 2021] http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202112/t20211220_394303.htm
- 3 GreenIT.fr. The environmental footprint of the digital world. 2019. <https://www.greenit.fr/environmental-footprint-of-the-digital-world/>
- 4 International Energy Agency. Digitalization and energy. 2017. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
- 5 China Communications Standards Association. White paper on green and low-carbon development of information and communication industry. 2022 [中国通信标准化协会. 信息通信业绿色低碳发展白皮书. 2022]
- 6 European Economic and Social Committee. The Paris protocol-a blueprint for tackling global climate change beyond 2020. 2015. https://www.eesc.europa.eu/sites/default/files/resources/docs/15_362-ppaper_changement-clim_en.pdf
- 7 Accenture. 5G connectivity. 2022. <https://www.ctia.org/news/5g-connectivity-a-key-enabling-technology-to-meet-america-climate-change-goals>
- 8 国家标准委, 国家发展改革委, 工业和信息化部, 等. 碳达峰碳中和标准体系建设指南. 2023. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/22/content_5752658.htm
- 9 GSMA. The enablement effect. 2019. <https://www.gsma.com/convening-for-good/enablement-effect>
- 10 Zhou T R, Chen Q X, Zhu W T, et al. A comprehensive low-carbon benefits assessment model for power systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2012. 1-5
- 11 Na W, Zhao Z C. The comprehensive evaluation method of low-carbon campus based on analytic hierarchy process and weights of entropy. Environ Dev Sustain, 2021, 23: 9308-9319

- 12 Tan M, Peng Y, Ma R, et al. Influence of 5G technology on the peak of China's carbon emission. *China Environ Sci*, 2021, 41: 1447–1454 [谭萌, 彭艺, 马戎, 等. 5G 对中国碳排放峰值的影响研究. *中国环境科学*, 2021, 41: 1447–1454]
- 13 Su X Y, Jia Z H, Zhou Z Y, et al. Digital twin-empowered communication network resource management for low-carbon smart park. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, 2022. 2942–2947
- 14 Sharad S, Sivakumar P B, Narayanan V A. The smart bus for a smart city—a real-time implementation. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems*, 2016. 1–6
- 15 张映锋, 刘思超, 张驰, 等. 面向绿色物流的智能包装服务建模与配送任务动态优化方法. 中国专利, CN107133705A, 2017-09-05
- 16 Reich-Weiser C, Brooks B C, Erickson C, et al. System and method for assessing environmental footprint. US Patent, 20110178938A1, 2011-07-21
- 17 Rizi M H P, Seno S A H. A systematic review of technologies and solutions to improve security and privacy protection of citizens in the smart city. *Internet Things*, 2022, 20: 100584–100616
- 18 李晓华. 一种基于大数据算法的园林绿化低碳智慧管理系统及方法. 中国专利, 114580835A, 2022-06-03
- 19 Tsinghua University. System for measuring carbon emission in power system. EP Patent, 3291165A1, 2018-07-03
- 20 张红斌, 郭玥, 吴志力, 等. 一种智能配电网低碳效益评估方法. 中国专利, 105375472B1, 2019-04-05
- 21 无线通信系统节能减排研究组. 面向 5G-A/6G 无线通信系统节能减排关键技术愿景白皮书. 2022. <http://wirelessbigdata.ustc.edu.cn/home/#!/wbd2022/whitepaper>
- 22 Huawei. Green Development 2030. 2022 [华为. 绿色发展 2030. 2022] <https://www.huawei.com/cn/giv/green-development-2030>
- 23 Barni M, Failla P, Kolesnikov V, et al. Secure evaluation of private linear branching programs with medical applications. In: *Proceedings of the 14th European Conference on Research in Computer Security*, 2009. 424–439
- 24 Osadchy M, Pinkas B, Jarrous A, et al. SCiFI—a system for secure face identification. In: *Proceedings of IEEE Symposium on Security and Privacy*, 2010. 239–254
- 25 Shamir A. How to share a secret. *Commun Acn*, 1979, 22: 612–613

Quantitative evaluation of carbon reduction enabled by mobile communication in other industries: indicators, methods, and cases

Sihai ZHANG^{1,2*}, Chan CUI¹, Hongyu SUN¹, Yongmei ZENG³, Jiang ZHU³ & Jinkang ZHU¹

1. CAS Key Laboratory of Wireless-Optical Communications, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. School of Microelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Huawei Tech. Co. Ltd., Shanghai 201206, China

* Corresponding author. E-mail: shzhang@ustc.edu.cn

Abstract With the rapid development of the new generation of information and communication technologies and the deployment of new infrastructure, the energy consumption and carbon emissions of wireless communication have shown a rapid growth trend. The ICT industry, in addition to its own energy conservation and emission reduction, enables other industries to save energy and emission reduction, which can effectively reduce the carbon emissions of other industries, and is an important field for future theoretical research and industrial application. Based on the assessment framework of ICT enablement carbon reduction, this paper proposes two metrics to quantitatively measure the effect of enablement: enable carbon reduction ratio, enable carbon reduction coefficient, and the corresponding quantitative analysis method, which are used to evaluate the actual carbon reduction effect of the enabled enterprise. This paper studies multi-party data sharing that can protect data privacy. Based on the secure multi-party computation framework, we propose an enabling carbon reduction assessment method to protect data privacy of all parties. Through practical cases, this paper completes data collection, analysis, and verification, and demonstrates the effectiveness and practicability of the proposed metrics and methods.

Keywords ICT enablement, quantitative evaluation of carbon reduction, privacy protection, life cycle assessment of carbon reduction, enable carbon reduction coefficient