联合上行和下行电磁场暴露：性能分析与设计见解

Lin Chen、Ahmed Elzanaty，*IEEE*高级会员，Mustafa A. Kishk，*IEEE*会员，Luca Chiaraviglio，*IEEE*高级会员，以及Mohamed-Slim Alouini，*IEEE*会士

arXiv:2302.04517v2 [eess.SP] 1 Mar 2023

摘要

在现有蜂窝基础设施中安装更多基站，是第五代蜂窝网络中提升网络容量和数据速率的重要手段。然而，相当一部分人担心，这种网络密集化会显著增加区域内人群受到的电场和磁场（电磁场）暴露。本文分别从接收功率密度和暴露指数的角度，分析基站和个人用户设备辐射所引起的下行链路、上行链路及下行与上行联合暴露。在分析中，我们考虑监管机构设定的电磁场限制，例如受限区域（如学校和医院）与基站之间的最小距离，以及最大允许暴露量。借助随机几何工具，我们推导并验证了覆盖概率和电磁场统计暴露量的数学表达式。通过调整基站密度、基站到受限区域的最小距离等系统参数，我们展示了降低人群电磁场暴露与提升网络覆盖性能之间的权衡。随后，我们构建优化问题，在确保电磁场暴露以较高概率符合标准法规限值的同时，使电磁场感知型蜂窝网络的性能最大化。例如，当基站密度低于 20 基站/km^2 时，基站产生的暴露量比最大允许水平低两个数量级。

Lin Chen 任职于香港中文大学（CUHK）信息工程系，地址为香港（电子邮箱：lin.chen@link.cuhk.edu.hk）。A. Elzanaty 任职于萨里大学通信系统研究所（ICS）的 5GIC & 6GIC，地址为英国吉尔福德 GU2 7XH（电子邮箱：a.elzanaty@surrey.ac.uk）。M. A. Kishk 任职于梅努斯大学电子工程系，地址为爱尔兰梅努斯 W23 F2H6（电子邮箱：mustafa.kishk@mu.ie）。L. Chiaraviglio 任职于罗马第二大学电子工程系，地址为意大利罗马 00133；同时任职于意大利国家电信大学联盟（CNIT），地址为意大利帕尔马（电子邮箱：luca.chiaraviglio@uniroma2.it）。M.-S. Alouini 任职于阿卜杜拉国王科技大学（KAUST）CEMSE学部，地址为沙特阿拉伯图瓦勒 23955-6900（电子邮箱：slim.alouini@kaust.edu.sa）。

索引词

电场和磁场暴露、随机几何、覆盖概率、泊松空洞过程、电磁场感知型蜂窝网络。

I. 引言

第五代蜂窝网络（第五代移动通信技术）的基本要求是低时延、高吞吐量和广覆盖。满足第五代移动通信技术关键性能指标（KPI）的一种可行方案是增加基站数量 [1]。新建的5G基站不可避免地成为额外的辐射源，使部分公众担忧自身暴露于电场和磁场（电磁场）的可能性会增加。近期，大规模部署基站对人体健康的影响引发了公众关注 [2]。目前尚不清楚未来是否会出现健康影响，因此亟需开展科学分析。

蜂窝网络中的电磁场暴露主要来自基站和用户设备（UE），分别与被动暴露和主动暴露有关。基站通过下行链路进行远距离高功率发射，使人体被动暴露于电磁场中。网络中所有基站产生的电磁场暴露通常以用户处的功率密度衡量，并且可以轻松换算为电场强度 [3]。然而，由于用户与个人移动设备距离很近，也应考虑发射功率较低的用户设备所产生的暴露，这种暴露可通过接收功率密度或比吸收率（SAR）量化 [4], [5]。事实上，与第五代移动通信技术（5G）射频（RF）通信相关的电磁场暴露被视为非电离辐射，其能量不足以使细胞电离 [6]。不过，非电离辐射可能会使受照组织产生加热效应，即热效应 [7], [8]。为确保热效应低于可接受的安全水平，各方制定了电磁场暴露指南，例如国际电信联盟（ITU） [9],、国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP） [4], 和美国联邦通信委员会（FCC） [10]制定的指南。各国都有自己的电磁场安全限值法规 [11]–[15], ，这些法规主要以以上监管指南为依据。除这些指南外，作为进一步的预防措施，一些国家还采取了更严格的条件，例如规定基站与学校、医院等受限区域之间的最小距离 [16]。除了广为人知的热效应之外，长期暴露于射频辐射（RFR）是否

可能产生非热效应并导致健康问题 [17], [18]，仍存在争议。因此，准确分析电磁场暴露对于设计电磁场感知蜂窝网络至关重要。

A. 相关工作

本小节讨论与电磁场暴露最相关的工作，可分为两类：（i）电磁场暴露评估和（ii）电磁场感知网络设计。

电磁场暴露评估。蜂窝网络中的电磁场暴露评估可从实验测量和分析两个角度进行。对于实验测量， [19], 测量了基站和用户设备引起的暴露，结果表明，个人移动设备产生的暴露不可忽视。考虑到第五代移动通信技术的赋能技术，如大规模多输入多输出（MIMO）、实时波束成形和高频频段，研究人员使用第五代移动通信技术智能手机测量5G网络中的暴露水平 [20]。 [21], 研究了5G网络中的电磁场分布。 [22] 的作者重点测量了下行链路暴露，并表明其远低于国际非电离辐射防护委员会的参考水平。显然，电磁场暴露的实验测量能够说明特定蜂窝网络中的射频辐射水平，但无法探究系统参数对蜂窝网络部署中电磁场暴露的影响。

关于电磁场暴露的解析评估， [23] 中的作者假设区域为六边形镶嵌区域，并考虑了基站的规则部署。 [24]利用随机几何，对不规则分布的基站进行了更贴近现实的建模。 [24] 中的作者将模型与比利时布鲁塞尔的暴露实验数据进行比较，优化了模型参数，并验证了所提模型的拟合效果。 [25], 利用随机几何工具，以用户处的统计接收功率监测多输入多输出系统中的下行链路暴露水平。上述解析建模能够在实际网络部署之前预测基站产生的下行电磁场暴露。然而，这些解析模型并未考虑移动设备产生的上行链路暴露，也未考虑电磁场限制，例如基站与受限区域之间的最小距离。因此，这些模型无法准确评估真实蜂窝网络中的总电磁场暴露。

电磁场感知网络设计。近年来，一些研究人员提出了新型蜂窝架构，以减少电磁场暴露或提高覆盖性能，同时限制暴露 [26]。可重构智能表面（RISs）最初在 [27] 中被提出，作为创建低电磁场区域的一种解决方案。在 [28], 中，RIS相位经过优化，以最小化用户的总上行链路暴露

量。另一方面， [29] 和 [30] 中的研究分别基于瞬时信道状态信息和统计信道状态信息，考虑了设计RIS相位以最小化最大暴露量（极小极大问题）。 [31] 中的作者采用概率整形，在确保目标吞吐量的同时最小化平均电磁场暴露。考虑到宏小区和小小区基站的共存，[32]研究了下行电磁场暴露和覆盖概率。值得注意的是，现有关于电磁场感知网络设计的研究主要致力于平均意义上缓解下行链路/上行链路电磁场暴露，并确保目标服务质量（QoS）。然而，尽管人们同时暴露于基站和用户设备产生的射频辐射 [33]，蜂窝网络设计却很少考虑总暴露量（包括下行链路和上行链路暴露）。此外，电磁场感知网络设计很少考虑对受限区域的监管；然而，这一监管对于评估电磁场暴露水平至关重要，因为基站与受限区域之间的最小距离能够显著降低受限区域内的暴露水平，并且该距离可由系统设计者或决策者选定。受限区域对网络性能的影响尚未得到研究。

B. 贡献

本文从统计学角度出发，提出了一个新颖的框架，用于分析基站和用户设备产生的电磁场暴露对第五代移动通信技术蜂窝网络规划的影响。具体而言，所提出的蜂窝网络模型考虑了监管机构制定的电磁场暴露限制，包括最大允许电磁场暴露值，以及受限区域周围的排斥区，例如医院和学校 [16]。在我们的模型中，主要研究了三种场景，包括下行链路（被动暴露）、上行链路（主动暴露）以及联合下行链路与上行链路（被动和主动暴露）射频辐射。然而，受限区域的引入、具有不同信道反演系数的用户设备最大发射功率限制，以及上行链路和下行链路的组合，带来了一些数学挑战。我们通过泊松空洞过程（PHP）等近似方法处理这些挑战，并通过蒙特卡洛仿真验证了这些近似方法的准确性。本文的主要贡献总结如下。

- 我们提出了一种随机几何模型，用于描述基站与受限区域之间的最小距离（R）。具体而言，受限区域会形成泊松孔过程分布的基站。这种

PHP近似可用于分析 R 对暴露和覆盖性能的影响。仿真已验证了该近似的准确性。

- 我们基于 Nakagami-m 衰落模型，以接收功率密度量化来自基站的下行链路暴露和来自个人用户设备的上行链路暴露，并分别分析下行链路和上行链路的覆盖概率。此外，考虑到人们同时受到基站和用户设备辐射的更实际场景，我们还对下行与上行联合暴露进行分析，并将其称为暴露指数。

- 我们评估蜂窝网络是否符合暴露指南。不同于基于均值的电磁场暴露测量方法，我们采用 Gil-Pelaez 定理给出暴露的累积分布函数 (CDF)。通过将电磁场水平的第95百分位数与美国联邦通信委员会规定的标准限值进行比较，我们确保电磁场暴露水平以较高概率符合指南。

- 我们设计系统参数，例如基站密度以及受限区域与基站之间的最小距离，以*(i)* 在下行链路电磁场暴露第95百分位数的约束下最大化覆盖性能，并*(ii)* 最小化下行与上行联合暴露。数值结果展示了系统参数对网络性能和暴露的影响，并表明针对最小总暴露量存在最优的系统参数取值。这些分析为未来网络的设计提供了参考，以满足服务质量和安全要求。

本文其余部分安排如下。第 II 节介绍系统模型。第 III 节给出统计电磁场的下行链路分析和基于信噪比的覆盖概率分析，其中包括系统参数的设计。第 IV 节介绍上行链路中类似的性能指标。第 V 节采用暴露指数，考察上行链路暴露和下行链路暴露对人群的总体影响。随后，第 VI 节展示并讨论仿真结果。最后，第 VII 节总结全文。

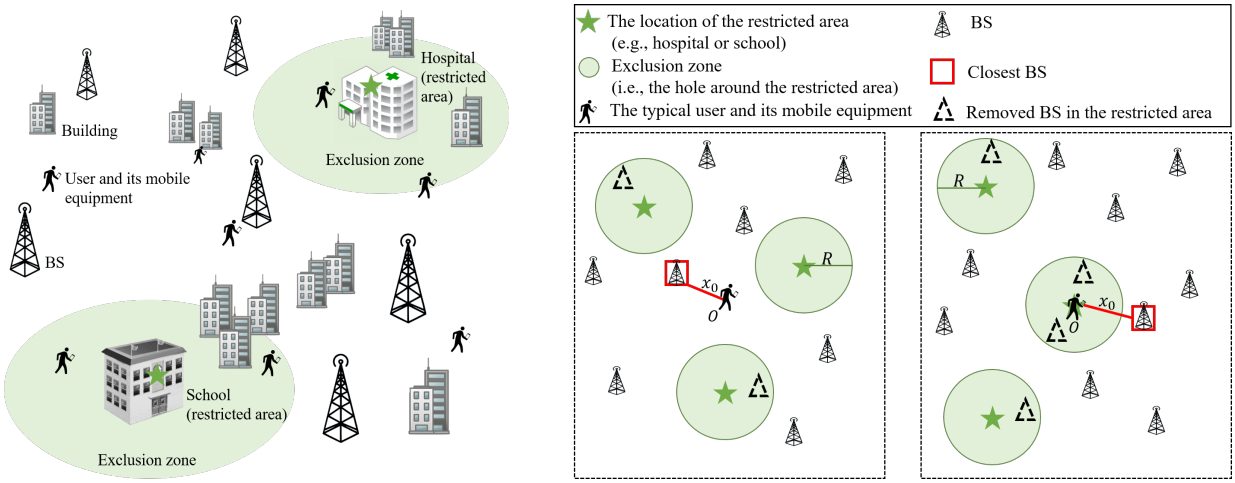
II. 系统模型

本节介绍所考虑的蜂窝网络系统，该系统具有电磁场部署约束及相应的基于随机几何的模型。

我们研究由配备全向天线的基站和用户设备组成的网络。事实上，在所提出的框架下，也可以处理定向天线的情况

表 I 符号表

符号	描述
Ψ_b	用于描述基站基准位置的泊松点过程（PPP）
Ψ_r	用于描述受限区域位置的 PPP
Ψ_B	用于描述受限区域影响下基站位置的泊松空洞过程（PHP）
λ_b; λ_r; λ_B	Ψ_b的密度； Ψ_r； Ψ_B
α; β	用于计算信噪比（SNR）的路径损耗指数的值；电磁场暴露
$p_{\max}$	上行链路中的最大发射功率
j	$j=\sqrt{-1}$ 是虚数单位
比吸收率$^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{DL}}$; 比吸收率	上行链路； 下行链路中的比吸收率



(a) (b)

图 1. 考虑受限区域的蜂窝网络。(a) 一般场景；(b) 几何表示（左：典型用户位于排除区外，右：典型用户位于排除区内）。

其基站密度按比例缩放，天线增益为 [34]。具体而言，基站的部署符合电磁场法规关于基站与受限区域（如学校和医院）之间最小距离的规定。如图 1(a) 所示，若干受限区域周围设有排斥区/空洞，电磁场法规不允许在其中部署基站 [16]。排斥区/空洞的半径记为 R，可视为基站与受限区域之间的最小距离。利用随机几何工具，通常假设基站和用户的位置分别服从两个相互独立的齐次泊松点过程 [35]。然而，考虑到受限区域周围的排斥区，我们提出用泊松空洞过程对基站位置建模。该泊松空洞过程由两个相互独立的泊松点过程生成：

1) 基准泊松点过程 $\Psi_b \equiv \{b_i\} \subset \mathbb{R}^2$，密度为 λ_b。

2) 用于描述受限区域位置的泊松点过程，这些位置代表排斥区（即空洞）的中心，$\Psi_r \equiv \{r_i\} \subset \mathbb{R}^2$，密度为 λ_r。

因此，基站的位置构成一个泊松空洞过程 Ψ_B，其形式化定义如下

$$\Psi_B = \left\{ b_i \in \Psi_b : b_i \notin \bigcup_{r_i \in \Psi_r} \mathcal{B}(r_i, R) \right\}, \tag{1}$$

其中，$\mathcal{B}(r_i, R)$ 是一个排斥区/空洞，即一个以 r_i 为圆心、半径为 R 的圆盘。Ψ_B 的密度可近似为

$$\lambda_B = \lambda_b \exp(-\lambda_r R^2). \tag{2}$$

图1(b)展示了泊松孔过程分布的基站的一种实现，这些基站以带有黑色实线边框的三角形标记。落入排斥区（即绿色圆圈）内的基站会被移除，并以虚线三角形表示。此外，每个基站在每个时频资源块中仅服务一个用户设备。基站与用户之间采用最近关联规则进行连接，即用户连接到距离最近的基站。不失一般性，我们分析位于网络原点 [36]的典型用户。由于受限区域的影响，典型用户的位置（在排斥区内/外）会影响其性能。因此，接下来我们分别分析位于两种不同位置的典型用户：排斥区外或区内，如图1(b)所示。

III. 电磁场感知下行暴露

本节将推导下行链路性能指标，以刻画电磁场暴露、覆盖概率以及基站与用户之间允许距离的统计特性。随后，我们将在电磁场暴露约束下建立优化问题，以最大化下行链路覆盖概率。

A. 性能指标：下行链路暴露与覆盖

下行电磁场暴露通过区域内所有基站产生的接收功率密度来量化。根据第 II 节讨论的系统模型，基站的输出功率为

$$p = P_t G_t, \tag{3}$$

其中， P_t 是基站的发射功率， G_t 是天线增益。根据弗里斯定律，典型用户接收到的来自水平距离为 x_i 的基站的功率为

$$P_{\mathrm{rec}}(x_i) = \frac{p\, G_u\, \eta\, H_i}{(x_i^2 + h^2)^{\beta/2}}, \tag{4}$$

其中， G_u 是用户的天线增益， $\eta = \left(\frac{c/f}{4\pi d_0}\right)^2$ 表示参考距离 $d_0 = 1$ 米处的路径损耗（频率为 f 、波速为 $c = 3 \times 10^8$ 米/秒）， h 是基站高度， β是路径损耗指数， H_i 是期望值为 1 的小尺度衰落增益，即 $\mathbb{E}\{H_i\} = 1$。更具体地说，我们采用广泛使用的 Nakagami-m 衰落模型（其形状参数为 m）来表征小尺度衰落。 H_i 的概率密度函数（PDF）为 [37]

$$f_{H_i}(\omega) = \frac{m^m \omega^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-m\omega}, \tag{5}$$

其中， $\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} \mathrm{d}t$ 是伽马函数 [38]。相应的接收功率密度可表示为

$$W(x_i) = \frac{P_{\mathrm{rec}}(x_i)}{A_e} = \frac{pH_i}{4\pi(x_i^2 + h^2)^{\beta/2}}, \tag{6}$$

其中， $A_e = \frac{(c/f)^2 G_u}{4\pi}$ 是典型用户的天线有效面积。由于与水平距离 x_i相比，基站高度可以忽略不计，因此为简便起见，本文其余部分将基站与典型用户之间的欧几里得距离近似为二者的水平距离。因此，对于位于原点的典型用户，下行电磁场暴露为

$$W^{\mathrm{DL}} = \sum_{i, b_i \in \Psi_B} \frac{pH_i}{4\pi x_i^\beta}. \tag{7}$$

对于此设置，我们的目标是确保 W^{DL} 以较高的概率 [39], [40]低于监管机构规定的最大值。具体而言，必须满足以下条件（称为下行电磁场约束）

$$\mathbb{P}(W^{\mathrm{DL}} \le W_{\max}) \ge \rho, \tag{8}$$

其中， $W_{\max}$ 是指南规定的最大功率密度。根据国际电信联盟 (ITU) [39] 的合规性评估规定， ρ 可选为 0。95。这与确定性方法不同，在确定性方法中， W^{DL} 不被视为随机变量 (r.v.)，且必须严格小于 $W_{\max}$，即 $\rho \equiv 1$ [41]。

根据 (4)，当典型用户与距离为 x_0 的最近基站关联时，

下行链路中的接收功率可表示为

$$P_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{DL}}(x_0)=\frac{p\eta H_0}{x_0^{\alpha}}, \tag{9}$$

其中忽略基站高度，假设 G_u 为 1， α 为路径损耗指数。下行链路中的瞬时信噪比如下所示

$$\mathrm{SNR}^{\mathrm{DL}}=\frac{P_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{DL}}(x_0)}{\sigma^2}=\frac{p\eta H_0}{x_0^{\alpha}\sigma^2}, \tag{10}$$

其中 σ^2 为噪声功率， H_0 为遵循式 (5) 的小尺度衰落。请注意，计算电磁场暴露和信噪比时，路径损耗指数分别用两种不同的符号表示，即 α 和 β，这样我们便可以通过设定 α 与 β之间的不同关系来分析最坏情况和典型情况。给定 λ_B的值，下行覆盖概率可定义如下，

$$\mathcal{P}_{\mathrm{cov}}^{\mathrm{DL}}(\lambda_B)=\mathbb{P}(\mathrm{SNR}^{\mathrm{DL}}>\tau), \tag{11}$$

其中 τ 为预定义阈值。

B. 性能分析

本小节将分几个步骤，从位于空洞外部或内部的典型用户的角度，推导第 III-A 节中正式定义的性能指标的数学表达式。例如，考虑到基站不会设置在排斥区内，位于限制区域中的典型用户与其最近基站之间的距离必须大于排斥区的半径。

1) 到最近基站的距离分布： 设 X_{out} 和 X_{in} 分别表示在用户位于空洞外部或内部条件下，典型用户到其最近基站的距离。下述引理给出了接触距离 X_{out} 和 X_{in} 的分布。

引理 1.典型用户与最近基站之间距离的概率密度函数表示为

$$f_{X_{\mathrm{out}}}(x)=2\pi\lambda_B x\exp\left(-\lambda_B\pi x^2\right), x\geq 0, \tag{12a}$$

$$f_{X_{\mathrm{in}}}(x)=\begin{cases}2\pi\lambda_B x\exp\left(-\lambda_B\pi(x^2-R^2)\right), & \text{if } x\geq R\\ 0, & \text{if } x<R,\end{cases} \tag{12b}$$

其中 $\lambda_B=\lambda_b\exp(-\lambda_r R^2)$，式 ***(12a)*** 适用于空洞外的用户，式 ***(12b)*** 适用于空洞内的用户。

证明。参见附录A。 □

2) 覆盖概率：信噪比高于预定义阈值的概率，即信噪比的互补累积分布函数（CCDF），用作描述蜂窝网络服务质量的指标。基于 X_{out} 和 X_{in}的距离分布，我们推导出相对于信噪比阈值 τ的下行覆盖概率表达式。

定理1. 由最近基站服务的典型用户的下行覆盖概率为

$$\mathcal{P}_{\text{cov}}^{\text{DL}} = \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(s^{\text{DL}}\sigma^2)^k}{k!} \exp\left(-s^{\text{DL}}\sigma^2\right) f_{X_v}(x_0)\,\mathrm{d}x_0,\ s^{\text{DL}} = \frac{m\tau}{p\eta x_0^{-\alpha}},\ v \in \{\text{in}, \text{out}\}, \tag{13}$$

其中 v 表示典型用户是否位于限制区域内。

证明. 参见附录B。 □

3) 电磁场约束：根据主管机构法规，电磁场暴露必须以较高概率（ρ）低于允许的最大值（$W_{\max}$）。式（8）可用下行功率密度的累积分布函数表示，即 $F_{W^{\text{DL}}}(w)$，写为

$$F_{W^{\text{DL}}}(W_{\max}) \geq \rho. \tag{14}$$

因此，电磁场约束可表示为

$$F_{W^{\text{DL}}}^{-1}(\rho) \leq W_{\max}, \tag{15}$$

其中，$F_{W^{\text{DL}}}^{-1}(\rho)$是$F_{W^{\text{下行链路}}}(w)$的反函数。

定理2。下行电磁场暴露的累积分布函数为

$$F_{W^{\text{DL}}}(w) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2j\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{t} \left[e^{-jtw}\mathcal{L}_{W^{\text{DL}}}(-jt) - e^{jtw}\mathcal{L}_{W^{\text{DL}}}(jt)\right] \mathrm{d}t, \tag{16}$$

其中 $\mathcal{L}_{W^{\text{DL}}}(s)$ 是下行电磁场暴露的拉普拉斯变换，且

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{W^{\text{DL}}}(s) &= \exp\left(-2\pi\lambda_B \int_{v(R)}^{\infty} \left[1 - \kappa^{\text{DL}}(x, s)\right] x\,\mathrm{d}x\right), \\ \kappa^{\text{DL}}(x, s) &= \left(\frac{m}{m + sp(4\pi)^{-1}x^{-\beta}}\right)^m, \end{aligned} \tag{17}$$

其中 R 是空洞的半径，λ_B 是泊松孔过程分布的基站的密度，若典型用户位于空洞之外，则 $v(R) = 0$，否则 $v(R) = R$。

证明。见附录 C。 □

4) 用户与基站之间的合规距离：基站与用户之间的距离应符合电磁场约束，即在服务基站位于典型用户的合规距离 处的条件下，

相应的条件电磁场暴露以较高概率 (ρ) 不应超过最大允许限值 ($W_{\max}$)。也就是说， x_c 满足以下条件电磁场约束,

$$F_{W^{\mathrm{DL}}|X_{\mathrm{out}}=x_c}(W_{\max}) \geq \rho, \tag{18}$$

其中， $F_{W^{\mathrm{DL}}|X_{\mathrm{out}}=x_c}(W_{\max})$ 表示在服务基站与用户之间的距离为 x_c 的条件下，下行电磁场暴露的累积分布函数。满足（18）的 x_c 的最小值记为 x_{com} ，其表示为

$$x_{\mathrm{com}} \triangleq \inf_{x\in\mathbb{R}} \left\{ x : F_{W^{\mathrm{DL}}|X_{\mathrm{out}}=x}(W_{\max}) \geq \rho \right\}. \tag{19}$$

不允许公众进入以基站为中心、半径为 x_{com} 的区域，因为区域内人员将承受高于安全阈值的下行电磁场暴露。

定理 3. 在服务基站与典型用户之间的距离为 x_0 的条件下，电磁场暴露的累积分布函数为

$$F_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(w) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2j\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{t} \left[e^{-jtw} \mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(-jt) - e^{jtw} \mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(jt) \right] \mathrm{d}t, \tag{20}$$

其中， $\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(s)$ 是条件电磁场暴露的拉普拉斯变换，并且

$$\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(s) = \kappa^{\mathrm{DL}}(x_0, s) \exp\left(-2\pi\lambda_B \int_{x_0}^{\infty} \left[1 - \kappa^{\mathrm{DL}}(x, s) \right] x \, \mathrm{d}x \right), \tag{21}$$

其中， λ_B 由（2）给出， $\kappa^{\mathrm{DL}}(\cdot)$ 由（17）给出。

证明。见附录 D。 □

将 $w = W_{\max}$ 和 ρ 设为国际电信联盟定义的常数后， $F_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(w)$是 x_0的函数。利用其反函数，我们可以求出用户与基站之间的最小合规距离 x_{com}。因此，合规距离为 $x_c \geq x_{\mathrm{com}}$。

C. 最优电磁场感知设计

我们尝试在确保始终满足下行电磁场约束的同时，最大化下行覆盖概率。该优化问题可正式定义如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{OP_1}: \underset{\lambda_B\in\mathbb{Z}_+}{\text{maximize}} \quad & \mathcal{P}_{\mathrm{cov}}^{\mathrm{DL}}(\lambda_B) \\ \text{subject to:} \quad & \mathbb{P}(W^{\mathrm{DL}} \leq W_{\max}) \geq \rho. \end{aligned} \tag{22}$$

直观而言，随着基站密度 λ_B 增加，网络的覆盖性能会更好，因为典型用户与其最近基站之间的距离会缩短，路径损耗也会

相应降低，从而提高下行信噪比。然而，电磁场暴露预计也会增加，这意味着可以通过逐步增大 λ_B 的值，直到 $F_{W^{\text{下行链路}}}^{-1}(\rho,\ \lambda_B^*)$ 达到 $W_{\max}$，来找到最优密度 λ_B^*（对应于特定的基站基准密度 λ_b^*）。根据 (2)，可以通过降低基站密度和空洞半径，或提高基准密度来增大 λ_B。

IV. 电磁场感知上行链路暴露

本节重点关注由单个移动设备引起的电磁场暴露。我们定义上行链路性能指标，并给出相应的分析。

A. 性能指标：上行链路暴露与覆盖

现在，我们分析第 II 节所述蜂窝网络的上行链路暴露。移动设备采用功率控制机制调节其发射功率，以补偿路径损耗；根据功率控制因子 ϵ，这种补偿可以是完全补偿，也可以是部分补偿，分别对应 $\epsilon = 1$ 和 $0 < \epsilon < 1$。移动设备的发射功率可定义为

$$P_{\text{tran}}^{\text{UL}}(x_0) = \begin{cases} p_u x_0^{\alpha\epsilon}, & x_0 < X_{\max} \\ p_{\max}, & \text{otherwise}, \end{cases} \epsilon \in (0,1], \tag{23}$$

其中，p_u 为常数，α 为路径损耗指数，x_0 为基站与其服务用户之间的距离，$p_{\max}$ 为移动设备的最大发射功率，且 $X_{\max} = (p_{\max}/p_u)^{1/\alpha\epsilon}$。令 u_0 表示用户与其个人移动设备之间的距离，并假设 u_0 位于移动设备发射天线的远场区域。[1] 假设基站与其关联用户或移动设备之间的距离相等，因为典型用户与其自身移动设备之间的距离远小于其与服务基站之间的距离，即 $u_0 << x_0$。与来自网络中所有基站的下行链路暴露不同，上行链路暴露主要来自用户的个人移动设备 [42], [43]。具体而言，移动设备的发射功率相当低，经过长距离传输后会显著衰减。因此，其他用户的移动设备对典型用户造成的暴露可以忽略不计。然而，由于典型用户与其自身移动设备之间距离很近，相应的暴露不容忽视。因此，典型用户的上行电磁场暴露可通过以下方式进行评估：

[1]如今，智能手机不再像过去那样贴在耳边当作普通电话使用，而是放在胸前，用于聊天、浏览社交媒体、观看视频或收听流媒体音频等。

典型用户的上行电磁场暴露可根据其移动设备（称为典型用户设备）的接收功率密度进行评估：

$$W^{\mathrm{UL}}(x_0)=\frac{P^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{tran}}(x_0)\Omega}{4\pi u_0^{\beta}}=\begin{cases}\frac{p_u x_0^{\alpha\epsilon}\Omega}{4\pi u_0^{\beta}}, & x_0<X_{\max}\\ \frac{p_{\max}\Omega}{4\pi u_0^{\beta}}, & \text{otherwise},\end{cases} \tag{24}$$

其中， x_0 是典型用户与其服务基站（称为标记基站）之间的距离，Ω服从式（5）中均值为1的 Nakagami-m 衰落。上行电磁场暴露还必须以较高概率ρ低于监管机构规定的最大允许值，即上行电磁场约束可表示为

$$\mathbb{P}(W^{\mathrm{UL}}\le W_{\max})\ge\rho. \tag{25}$$

典型用户设备的 接收功率（距离为 x_0 ）为 y

$$P^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{rec}}(x_0)=\frac{P^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{tran}}(x_0)\eta\Omega_0}{x_0^{\alpha}}=\begin{cases}p_u x_0^{\alpha(\epsilon-1)}\eta\Omega_0, & x_0<X_{\max}\\ \frac{p_{\max}\eta\Omega_0}{x_0^{\alpha}}, & \text{otherwise},\end{cases} \tag{26}$$

其中，Ω_0 为小尺度衰落，其分布与Ω相同， η 定义见式（4）。特别地，若 $\epsilon=1$，则为全功率控制情形；当 $x_0<X_{\max}$时，平均接收功率为常数。

上行链路中相应的瞬时信噪比可表示为

$$\mathrm{SNR}^{\mathrm{UL}}=\frac{P^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{rec}}(x_0)}{\sigma^2}, \tag{27}$$

可据此计算上行覆盖概率，如下所示

$$\mathcal{P}^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{cov}}(\lambda_B)=\mathbb{P}(\mathrm{SNR}^{\mathrm{UL}}>\tau), \tag{28}$$

其中， λ_B 在式 (2) 中给出， τ 为预定义阈值。

B. 性能分析

与下行链路情况类似，我们分别分析空洞内外典型用户的上行链路暴露，以及上行覆盖概率。引理 1 中典型用户与其最近基站之间距离的分布仍适用于以下分析。

1) 覆盖概率： 以下定理给出了功率控制机制下覆盖概率的表达式，该概率定义为上行信噪比的互补累积分布函数。

定理 4. 该　　空洞内或空洞外用户的上行覆盖概率为

$$\mathcal{P}_{\text{cov}}^{\text{UL}} = \int_0^{X_{\max}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(s_1^{\text{UL}}\sigma^2)^k}{k!} \exp\left(-s_1^{\text{UL}}\sigma^2\right) f_{X_v}(x_0)\mathrm{d}x_0 + \int_{X_{\max}}^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(s_2^{\text{UL}}\sigma^2)^k}{k!} \exp\left(-s_2^{\text{UL}}\sigma^2\right) f_{X_v}(x_0)\mathrm{d}x_0, \tag{29}$$

其中 $v \in \{\text{入，出}\}$, $s_1^{\text{UL}} = \frac{m\tau}{p_u x_0^{\alpha(\epsilon-1)}\eta}$, $s_2^{\text{UL}} = \frac{m\tau}{p_{\max}\eta x_0^{-\alpha}}$ 和 $f_{X_v}(x_0)$ 由式（*12*）给出。

证明。 与附录 C 中的方法类似。 □

2) 电磁场约束： 典型用户的上行电磁场暴露主要来自其自身的移动设备，且以较高概率应低于监管机构规定的最大允许值。与下行电磁场约束类似，可根据上行接收功率密度的拉普拉斯变换推导出式（25），该变换记为 $\mathcal{L}_{W^{\text{UL}}}$，即

$$\mathcal{L}_{W^{\text{UL}}}(s) = \int_0^{X_{\max}} \kappa_1^{\text{UL}}(x_0, s) f_{X_v}(x_0)\,\mathrm{d}x_0 + \int_{X_{\max}}^{\infty} \kappa_2^{\text{UL}}(s) f_{X_v}(x_0)\,\mathrm{d}x_0, \tag{30}$$

其中 u_0 是典型用户与其移动设备之间的距离， $f_{X_v}(x_0)$ 在引理 1 中定义, $m v \in \{\text{入，出}\}$, $\kappa_1^{\text{UL}}(x_0, s) = \left(m + s p_u x_0^{\alpha\epsilon}\right)^{m} (4\pi)^{-1} u_0^{-\beta}\Big)$, 以及 $\kappa_2^{\text{UL}}(s) \equiv \left(m + s p_{\max}\right)^{m} (4\pi)^{-1} u_0^{-\beta}\Big)$。

定理 5. 上行电磁场暴露的累积分布函数为

$$F_{W^{\text{UL}}}(w) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2j\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{t} \left[e^{-jtw}\mathcal{L}_{W^{\text{UL}}}(-jt) - e^{jtw}\mathcal{L}_{W^{\text{UL}}}(jt)\right] \mathrm{d}t. \tag{31}$$

因此，上行电磁场约束可以用 $F_{W^{\text{UL}}}(w)$ 的反函数来描述，即 $F_{W^{\text{UL}}}^{-1}(\rho) \leq W_{\max}$。

根据上述分析，我们注意到，在功率控制机制下，用户与其服务基站之间的距离越近，其用户设备的发射功率就越低。与我们在第 III-C 节中讨论的情况不同，在上行链路中，增加基站数量既有利于降低暴露，也有利于提高覆盖概率。因此，省略上行链路优化问题。

V. 下行与上行联合暴露

在大多数情况下，一个人会同时受到自身移动设备和基站产生的电磁场影响。本节将介绍一种称为暴露指数的指标，用于衡量第 II 节所讨论的蜂窝网络中的上行链路和下行链路暴露，随后进行性能分析并探讨最优的电磁场感知网络设计。

A. 性能指标：暴露指数

在 [44],中，介绍了一种用于量化人群电磁场暴露的指标。该指标同时考虑上行链路和下行电磁场暴露，也考虑用户特有的属性，例如年龄（成人或儿童）、使用方式（数据传输或语音通话）以及姿势（站立或坐着）。典型用户的总暴露量（称为暴露指数）可表示为上行链路暴露指数（$\mathrm{EI}^{\mathrm{UL}}$）与下行链路暴露指数（$\mathrm{EI}^{\mathrm{DL}}$）之和，即 [44]

$$\begin{aligned}\mathrm{EI}(x_0) &= \mathrm{EI}^{\mathrm{UL}}(x_0) + \mathrm{EI}^{\mathrm{DL}} = \mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}} P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0) + \mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}} W^{\mathrm{DL}} \\ &= \mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}} P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0) + \mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}} \sum_{i, b_i \in \Psi_B} \frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}} \quad [\mathrm{W/kg}]\,,\end{aligned} \tag{32}$$

其中， x_0 是典型用户与位于 b_0 的服务基站之间的距离， $P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}$ 是式（23）中定义的上行链路发射功率， W^{DL} 是式（7）中定义的下行链路接收功率密度，$\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}}$ 是上行链路中用户设备的发射功率为单位值时的参考感应比吸收率，$\mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}$ 是下行链路中用户设备处基站的接收功率密度为单位值时的参考感应比吸收率。更明确地说，$\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}}$ $\left(\mathrm{W\,kg}/\mathrm{W}\right)$ 已归一化为单位发射功率，$\mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}$ $\left(\mathrm{W\,kg}/\mathrm{W\,m^2}\right)$ 已归一化为单位功率密度。值得注意的是，参考比吸收率取决于前文提到的用户特定属性。

B. 性能分析

式（32）中的暴露指数可分为两部分，即一部分与位于 b_0 、距离为 x_0 的服务基站有关，另一部分来自其余基站，如下所示。

$$\mathrm{EI}(x_0) = \left(\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}} P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0) + \mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}} \frac{pH_0}{4\pi x_0^{\beta}}\right) + \mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}} \sum_{i, b_i \in \Psi_B \setminus \{b_0\}} \frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}. \tag{33}$$

以 x_0 为条件的暴露指数EI(x_0)的拉普拉斯变换为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{EI}|x_0}(s) = \exp(-s\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}} P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0))\kappa^{\mathrm{J}}(x_0, s) \exp\left(-2\pi\lambda_B \int_{x_0}^{\infty} [1 - \kappa^{\mathrm{J}}(x, s)]\, x\, \mathrm{d}x\right), \tag{34}$$

其中 $\kappa^{\mathrm{J}}(x_0, s) = \left(\frac{m}{m+s\,{}^{\mathrm{DL}}p\,\text{比吸收率}\,(4\pi)^{-1} x_0^{-\beta}}\right)^m$。

证明。(33) 中 EI(x_0) 的拉普拉斯变换为

$$\begin{aligned}
&\mathcal{L}_{\mathrm{EI}|x_0}(s) = \mathbb{E}_{\mathrm{EI}}\left[\exp(-s\mathrm{EI}(x_0))\right] \\
&= \mathbb{E}_{\mathrm{EI}}\left[\exp\left[-s\left(\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}}P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0) + \mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}\frac{pH_0}{4\pi x_0^{\beta}}\right) - s\left(\mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}\sum_{i,b_i\in\Psi_B\setminus\{b_0\}}\frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}\right)\right]\right] \\
&= \exp(-s\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}}P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0))\mathbb{E}_{H_0}\left[\exp\left(-s\mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}\frac{pH_0}{4\pi x_0^{\beta}}\right)\right]\times \\
&\quad \mathbb{E}_{\Psi_B,\{H_i\}}\left[\prod_{i,b_i\in\Psi_B\setminus\{b_0\}}\exp\left(-s\mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}\frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}\right)\right].
\end{aligned} \tag{35}$$

然后，按照附录 D 中的类似方法处理 (35)，即可得到 (34)。

□

根据引理 1 中 x_0 的距离分布，可以得到暴露指数的无条件拉普拉斯变换，表示为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{EI}}(s) = \int_0^{\infty}\mathcal{L}_{\mathrm{EI}|x_0}(s)f_{X_v}(x_0)\,\mathrm{d}x_0, \tag{36}$$

其中，$f_{X_v}(x_0)$由 (12) 给出。此外，$\mathrm{EI}^{\mathrm{UL}}$ 和 $\mathrm{EI}^{\mathrm{DL}}$ 的拉普拉斯变换可表示为

$$\mathcal{L}_{\mathrm{EI}^{\mathrm{UL}}}(s) = \mathbb{E}\left[\exp\left(\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}}P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0)\right)\right] = \int_0^{\infty}\exp\left(-s\mathrm{SAR}^{\mathrm{UL}}P_{\mathrm{tran}}^{\mathrm{UL}}(x_0)\right)f_{X_v}(x_0)\,\mathrm{d}x_0, \tag{37a}$$

$$\mathcal{L}_{\mathrm{EI}^{\mathrm{DL}}}(s) = \mathbb{E}\left[\exp\left(\mathrm{SAR}^{\mathrm{DL}}W^{\mathrm{DL}}\right)\right] = \exp\left(-2\pi\lambda_B\int_{v(g)}^{\infty}\left[1-\kappa^J(x,s)\right]x\,\mathrm{d}x\right), \tag{37b}$$

其中，(37a) 来源于 $\mathbb{E}[g(t)] = \int_0^{\infty} g(t)f_T(t)\mathrm{d}t$，$f_T(t)$ 是 t 的概率密度函数，而 (37b) 可通过采用与附录 C 类似的方法得到。根据 (46) 中的 Gil-Pelaez 定理，我们在下述定理中推导 EI 的累积分布函数。

定理 6. 包含上行链路暴露和下行链路暴露的总暴露量（即暴露指数）的累积分布函数为

$$F_{\mathrm{EI}}(\varepsilon) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2j\pi}\int_0^{\infty}\frac{1}{t}\left[e^{-jt\varepsilon}\mathcal{L}_{\mathrm{EI}}(-jt) - e^{jt\varepsilon}\mathcal{L}_{\mathrm{EI}}(jt)\right]\mathrm{d}t. \tag{38}$$

C. 最优电磁场感知设计

如前所述，提高基站密度有助于提升下行链路和上行链路的覆盖性能，并降低上行电磁场暴露。相反，提高基站密度会对下行电磁场暴露产生负面影响。

表 II 系统数值参数表。

系统参数	默认值	系统参数	默认值
λ_r； λ_b	10^{-6} 个空洞/米^2； 10^{-5} 个基站/米^2	α; β	4; 2.5
f	2600 兆赫	η	-40 分贝
G_t	15 分贝	P_t	200 瓦
p_u	0.008 毫瓦	$p_{\max}$	200 毫瓦
ϵ	0.4	m	1
u_0	20 厘米	R	50 m
σ^2(下行链路；上行链路)	10^{-11} 瓦； 10^{-12} 瓦	比吸收率^{UL}; 比吸收率$_{\text{DL}}$	$0.0053\,\mathrm{W\,kg^{-1}\,W}$; $0.0042\,\mathrm{W\,kg^{-1}\,W\,m^2}$

因此，合理设计 λ_B 对于降低上行链路和下行链路暴露至关重要。接下来，我们将建立一个优化问题，以找到使式（33）中的暴露指数最小化的最佳基站密度；式（33）中的暴露指数用于量化下行与上行联合暴露。由于暴露指数是一个随机变量，我们对其 ρ百分位数进行如下优化

$$\mathbf{OP_3}: \underset{\lambda_B \in \mathbb{Z}_+}{\text{minimize}} \quad F_{\text{EI}}^{-1}(\rho, \lambda_B), \tag{39}$$

其中， F^{-1} 暴露指数是暴露指数的逆累积分布函数。最优的 λ_B^* 可通过任何高效的一维搜索算法求得，例如二分法 [45] 或黄金分割法 [46]。根据（2）， λ_B^* 对应于特定的基站基准密度 λ_b^*以及特定的排除区半径 R^*。

VI. 数值结果与讨论

本节通过蒙特卡洛仿真和解析表达式的数值结果进行研究。本文针对三种场景考察电磁场感知蜂窝网络的性能，即下行链路、上行链路以及联合下行链路与上行链路。数值结果所用参数及其默认值列于表 II。为探究这些参数对电磁场暴露和覆盖概率的影响，我们对其中一些参数进行扫描。在不失一般性的前提下，我们考虑具有 $m = 1$的 Nakagami-m 衰落。

A. 下行链路暴露的最坏情况场景

首先在保守设置下进行下行链路仿真，其中我们考虑 5G基站的最大传输功率（200 W）和最大天线增益（15 分贝） [27, 表 6]。根据 3GPP TR 36.814–900 [47], 中的建议

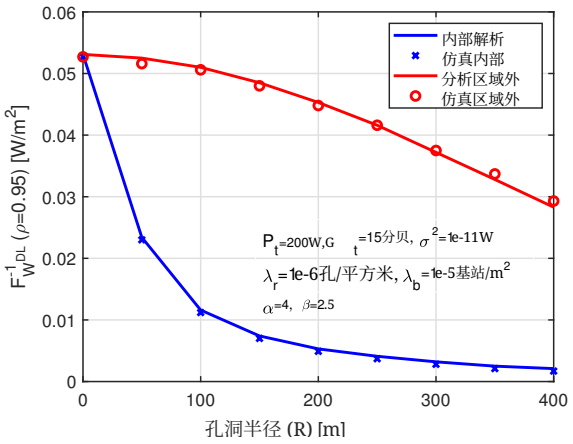


图2。对于不同的排除区半径，限制区域内外下行链路中暴露水平（即典型用户处产生的功率密度）的第95百分位数。

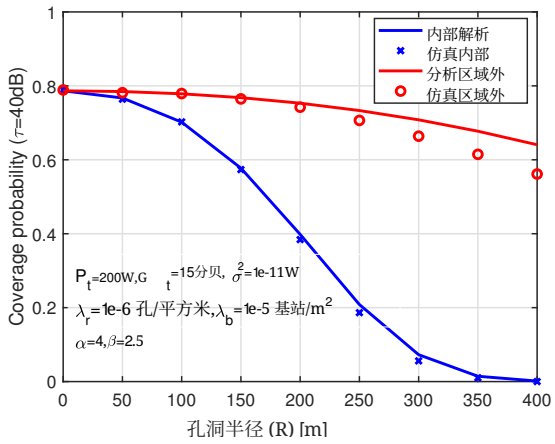


图3。以 $\tau = 40$分贝为重点，对于不同的排除区半径，限制区域内外下行信噪比水平的互补累积分布函数。

作为保守设置，在分析下行覆盖概率时（假设通信链路受到阻塞），路径损耗指数设为 $\alpha = 4$；在计算下行电磁场暴露时（假设环境中没有阻塞物），路径损耗指数设为 $\beta = 2.5$。

在图2中，我们比较了基站与限制区域之间不同最小允许距离 R下，限制区域内外的统计暴露水平。具体而言，如公式（15）所述，以 $F^{-1}_{W^{\mathrm{DL}}}(\rho)$表示的统计水平意味着暴露水平以 ρ的高概率不会超过该水平。根据合规法规 [39], ，我们设定 $\rho = 0.95$，而 $F^{-1}_{W^{\mathrm{DL}}}(0.95)$表示下行链路暴露水平的第95百分位数。未考虑基站与限制区域之间最小距离时的电磁场暴露水平（即空洞半径为 $R = 0$ 米）已在 [4], [12]中研究。由图2可观察到，关于基站与限制区域之间最小距离的法规对电磁场暴露的测量有很大影响。显然，空洞外典型用户的暴露水平高于限制区域内用户的暴露水平，因为限制区域内基站与典型用户之间的距离始终大于空洞半径 R。此外，图2表明，增大空洞半径会显著降低空洞内用户的暴露水平，同时对空洞外用户仍有轻微影响。这是因为R 的较大取值不仅会导致更长的传播距离，还会略微降低公式（2）中的基站密度，从而使基站数量减少，即辐射源减少。

图3展示了在与图2相同的设置下，覆盖概率随空洞半径的变化。我们注意到，位于受限区域外的典型用户体验到更好的

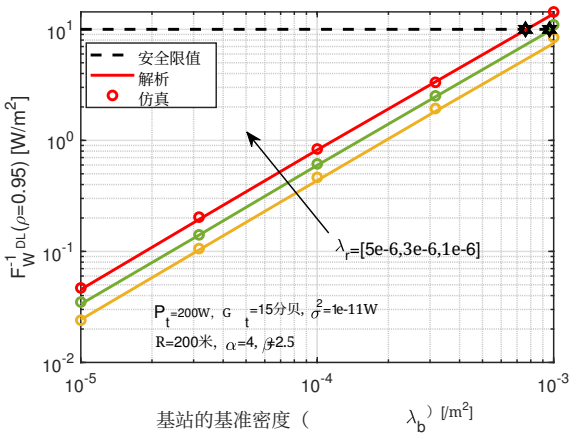


Fig. 4. 受限区域的95百分位数信噪比水平与基站基准密度的关系，不同受限区域密度下的结果。

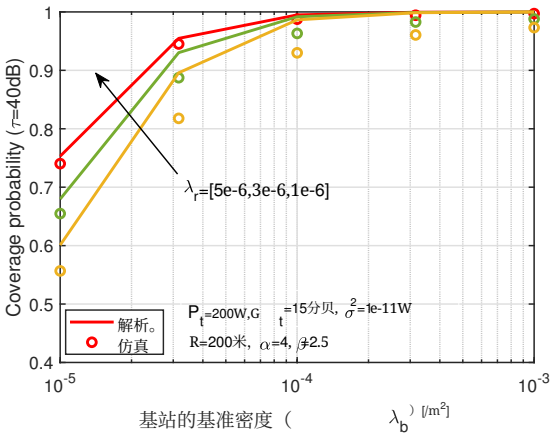


Fig. 5. 受限区域和基站基准密度的覆盖概率关系，不同受限区域密度下的结果。

覆盖，而位于受限区域内的用户则不然。我们还可以观察到，随着空洞半径增大，受限区域外用户的覆盖概率略有下降（原因与我们在图2的评论中所述相似）。通过比较图2和图3可以发现，半径较大的空洞能够保护人们免受严重的电磁场暴露，但会损害通信质量。还值得注意的是，当 R取值较大时，仿真结果与分析结果之间的差距是由基站分布的PHP近似造成的。

图4和图5分别展示了受限区域/空洞密度（λ_r）和基站基准密度（λ_b）对受限区域外用户的电磁场暴露和覆盖概率的影响。由于空洞可确保受限区域内的暴露水平低于空洞外，因此只要空洞外用户的电磁场暴露低于美国联邦通信委员会（FCC）规定的最大允许值（$W_{\max} = 10$ W/m^2, ，如虚线水平线所示），就能保证空洞内用户满足安全要求。我们可以看到， λ_r取值越大，暴露水平和覆盖概率都会降低；而基站密集部署有利于提高覆盖概率，却会加剧下行链路中的电磁场暴露。这是因为随着基站密度增加，服务基站可能更靠近典型用户，从而改善信噪比。然而，基站密集部署会增加辐射源，使典型用户更容易暴露于更高水平的电磁辐射。特别是，最大密度（图4中的星形标记所示）对应于最大允许暴露水平。下一段将分析这一最大密度。

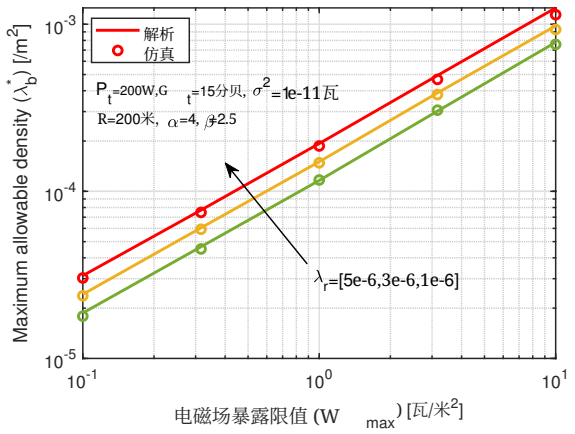


图 6. 不同最大电磁场暴露限值法规下的最大允许基准密度 λ_b^*。

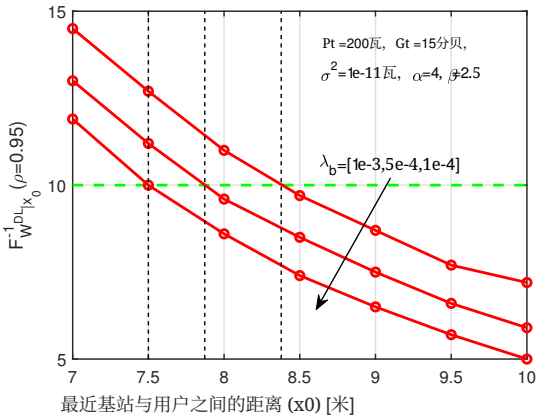


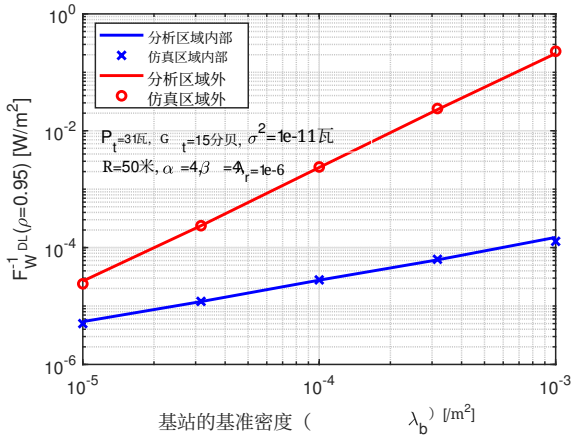
图 7. 在最近基站位于 x_0处的条件下，下行链路暴露水平的第95百分位数。

图6展示了通过求解式（22）中的优化问题得到的最大允许基准密度 λ_b^*与不同最大允许电磁场暴露水平之间的关系，并对比了 λ_r的不同取值。例如，考虑功率密度的FCC限值10 W/m^2, 时，使下行覆盖概率最大化的 λ_b 最优值为 7.6×10^{-4} 基站/m^2, ，对应 λ_r =10^{-6} 空洞/m^2 和 $R = 200$ m。

图 7 绘出了在典型用户与其最近基站之间的距离为 x_0 时，暴露水平的第95百分位数，用于计算用户与基站之间的合规距离。如第三节B-4所述，与美国联邦通信委员会限值（以水平虚线表示）相比，可以得出基站与用户之间的最小合规距离 x_{com}。对于具有 $\lambda_b = 10^{-4}$ 个基站/m^2 和 $\lambda_r = 10^{-6}$ 个空洞/m^{2}的蜂窝网络， x_{com} 为 7。5 m，符合 $F_{W^{\text{DL}}|7.5}(10) = 0.95$。也就是说，如果公共安全人员进入以基站为中心、半径为 x_{com}的区域，则无法确保其安全。

B. 下行暴露的典型场景

更常见情形下的结果如图8和图9所示，其中对一般下行发射功率（100 W）应用了0.31的统计缩减因子，即 $P_t = 100$ W $\times 0.31$ [27, Table 6], ，并且在评估下行链路的网络性能时使用相同的路径损耗指数（$\alpha = \beta = 4$）。图8表明，在这种典型情形下，即使基站密集部署，暴露水平的第95百分位数也远低于FCC限值。这一观察支持了这样的观点：网络密集化的发展不会引发严重的健康问题。在图9中，我们没有给出覆盖概率，而是



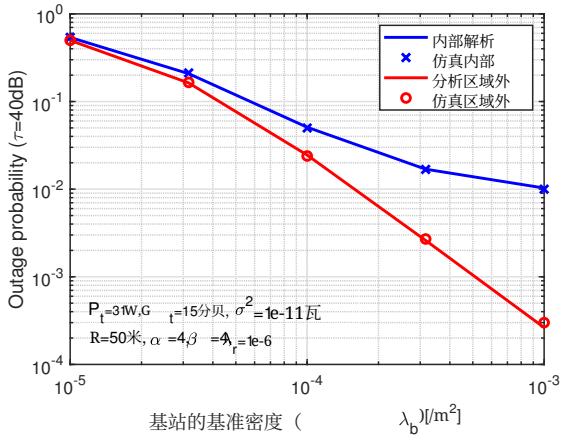


图8. 实际设置下下行链路暴露水平的第95百分位数。图9. 与 $\tau = 40$分贝相比，实际设置下下行链路的中断概率。

绘制了中断概率，即信噪比无法达到所需阈值时发生中断事件的概率；我们可以看到，仿真结果与分析结果高度吻合。

C. 上行链路暴露

在上行链路中，考虑用户设备的分数功率控制，使发射功率成为与其关联基站距离的函数。用户设备的最大发射功率设为 200 mW（即第五代移动通信技术移动设备的最大发射功率 [27, 表 6]）。假设用户与其个人移动设备之间的距离处于用户设备天线的远场范围内，且为 $u_0 = 20$ cm。[2] 由于用户与其个人移动设备之间的距离较近，两者之间的路径损耗指数（β）通常小于移动设备与其服务基站之间的路径损耗指数（α）。因此，我们设定 $\alpha = 4$ 和 $\beta = 2.5$。此外，由于上行链路的频段通常比下行链路窄，因此考虑较低的噪声功率。

功率控制因子 ϵ 对上行电磁场暴露和信噪比分布的影响分别如图10和图11所示。从图10可以看出，增大功率控制因子 ϵ 会导致更严重的上行链路暴露。这是因为采用距离成比例功率控制的用户设备的发射功率会随 ϵ增加，如式（23）所示。类似地，在图11中，功率控制因子越大，服务基站接收的功率越高，

[2]天线的远场定义为 $u > \frac{2D^2}{c/f}$，其中 D 为天线直径，c/f 为上行频率 f的波长。考虑采用 2600 MHz 频段的长期演进（LTE），$D = 10$ cm，且 $c/f =$ $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ /(2600 MHz)，可得 $u > 17.3$ cm。因此，$u_0 = 20$cm 满足用户设备天线的远场条件 [44]。

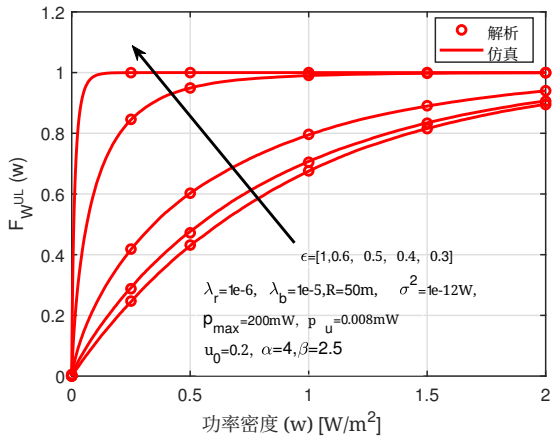


图10. 不同功率控制因子下限制区域外上行功率密度水平的累积分布函数。

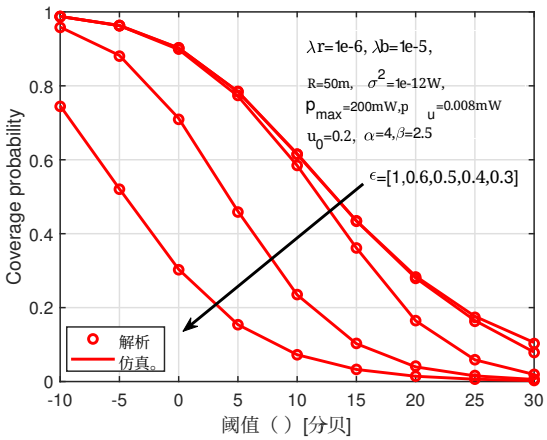


图11. 不同功率控制因子下限制区域外上行信噪比水平的互补累积分布函数。

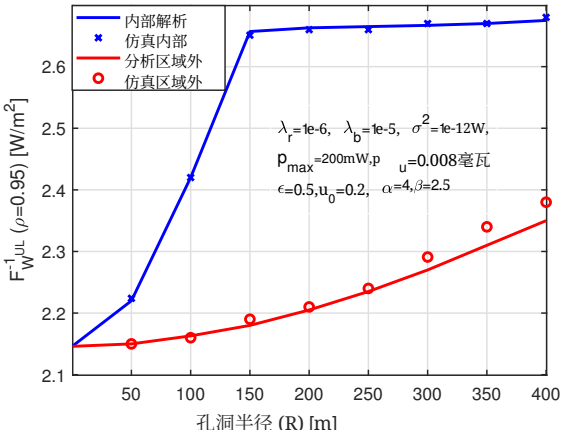


图12. 不同排除区半径下限制区域内外上行链路暴露水平的第95百分位数。

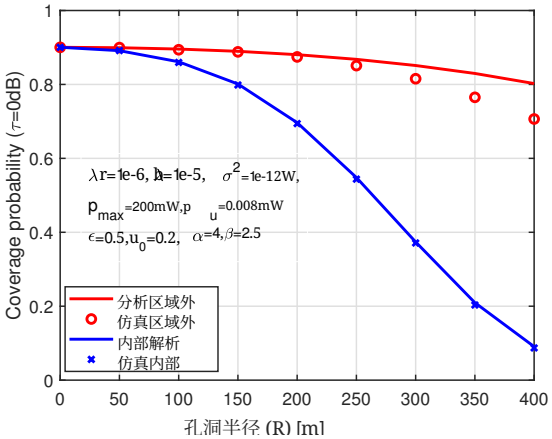
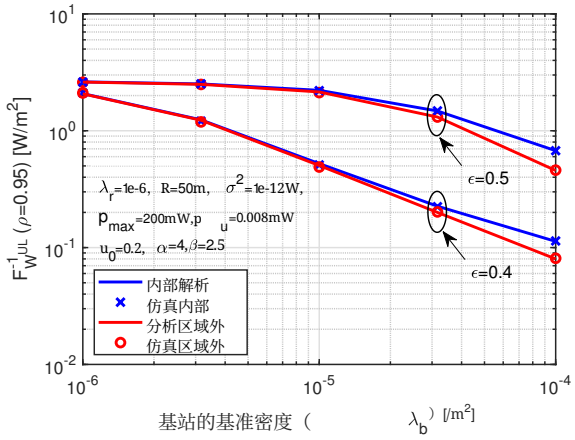


图13. 不同排除区半径下限制区域内外上行信噪比水平的互补累积分布函数。

从而提高覆盖性能。直观地说，当我们将 ϵ 增大到1时，如果基站与其服务用户之间的距离（x_0）小于 $X_{\max}$ （如第IV-A节所述），发射功率可以完全补偿基站—用户设备链路中的路径损耗，且接收功率将等于 p_u 。然而，如果 x_0 超过 $X_{\max}$，则 $P^{\mathrm{UL}}_{\mathrm{tran}}$ 达到其最大值200 mW，这也解释了当 ϵ 从0.6变为 $\epsilon = 1$时，图10和图11中的差异较小。

在图12和图13中，我们探究了空洞半径 R 对上行链路暴露水平和覆盖概率的影响。与第VI-A节中关于下行链路暴露的仿真结果不同，在图12中，空洞内的用户受到个人移动设备发出的更高水平射频辐射，而空洞外的用户受到的射频辐射较低。有趣的是，我们注意到，增加



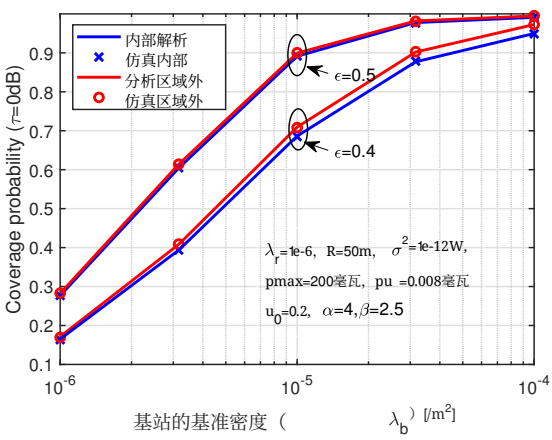


图14. 不同基站基准密度下，限制区域内外上行链路暴露水平的第95百分位数。图15. 不同功率控制因子下，各种基站基准密度对应的限制区域内外上行信噪比水平的互补累积分布函数。

区域半径 R 并不能减轻这两类用户（空洞内和空洞外）的射频辐射。出现这一反常现象的原因是，我们控制了用户设备的发射功率，且该功率会随着用户与其服务基站之间距离的增加而单调增大，如式（23）所示。具体而言，对于空洞外的用户，当我们增大 R时，泊松孔过程分布的基站密度 λ_B会降低。基站数量减少不会影响上行链路辐射源，因为上行链路暴露由个人的移动设备引起。然而，典型用户与最近基站之间的距离可能会增大，导致用户设备的发射功率更高，用户受到的暴露也更强。我们还注意到，空洞内典型用户的上行链路暴露水平在 $R > 150$ m时逐渐趋于恒定，这是最大发射功率约束造成的。另一方面，如图13所示，随着空洞半径增大，上行覆盖概率会降低。这一趋势与图3中观察到的下行链路情形类似。

接下来，我们讨论 λ_b 对图14和图15中网络性能指标的影响。提高 λ_b 的值会降低限制区域内外典型用户的电磁场暴露第95百分位数（如图14所示），并提高覆盖概率（如图15所示）。事实上，提高基准密度λ_b后，典型用户周围会有更多基站，这有可能缩短典型用户与其服务基站之间的距离（x_0）。同时，较短的距离 x_0 会降低式（23）中的发射功率以及式（24）中的电磁场暴露水平。上行链路中覆盖概率的提升和电磁场暴露的缓解表明，基站密集部署

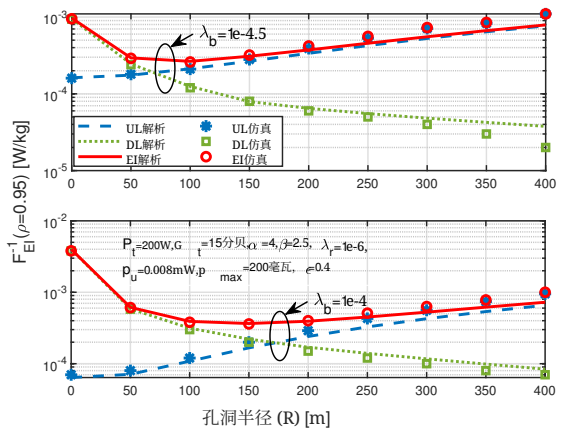


图16. 不同 λ_b下，限制区域内 EI、EI^{UL} 和 EI^{DL} 暴露水平的第95百分位数随排除区半径的变化。

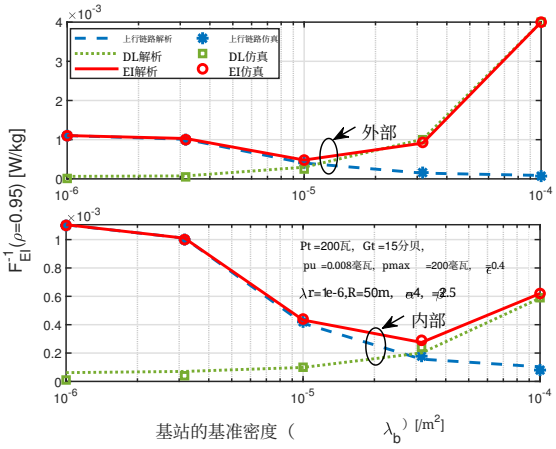


图17. 限制区域内外 EI、EI^{UL} 和 EI^{DL} 暴露水平的第95百分位数随基站基准密度的变化。

有利于未来的蜂窝网络设计。

D. 暴露指数（下行与上行联合暴露）

通常，语音使用的比吸收率值高于其他使用方式，例如数据下载/上传。考虑到这种最坏情况，我们选择 $\text{SAR}^{\text{UL}} = 0.0053$ 和 $\text{SAR}^{\text{DL}} = 0.0042$ [44, 表 27]。

图16展示了空洞半径对下行与上行联合暴露的影响。从图2和图12可以得出，受限区域周围存在空洞并不能减轻来自用户设备的暴露，但能有效降低来自基站的暴露。相互矛盾的趋势（扩大排除区半径时，上行链路暴露增加而下行链路暴露减少）提醒我们，不能盲目地通过移除受限区域附近的基站来保护用户，因为这也会导致上行链路和下行链路覆盖性能下降，如图3和图13所示。因此，图16在调整空洞半径时，将下行链路与上行链路联合暴露作为暴露指数。在图16中，当 $R < 100$ m 时，总暴露量主要来自下行链路中的基站；而当 $R \geq 100$ m 时，下行链路暴露逐渐降低，上行链路暴露则占据主导地位。也就是说，存在一个最优值，例如 $R^* = 100$ m，可使拥有 $\lambda_b = 10^{-4.5}$ 个基站、/m^2 的网络总暴露量最小。

在图17中，我们绘制了不同基站基准密度下，限制区域内外典型用户的暴露指数第95百分位数。正如图5和图15所示，基站密集部署可以提高上行链路和下行覆盖概率。然而，上行链路

和下行链路暴露水平随基准密度 λ_b 的增加呈现相反的变化趋势，分别如图4和图14所示。这表明存在一个使暴露指数最小化的 λ_b 最优值，即式（39）中优化问题的解。对于空洞内的典型用户，从图17可以观察到一个转折点 $\lambda_b^* = 10^{-4.5}$ 基站/米^2。在此点之前，暴露指数主要由暴露指数^{UL}决定；在此点之后，则主要由暴露指数^{DL}决定。在该点，限制区域内的联合暴露（暴露指数）达到最小值。对于空洞外的典型用户，使暴露指数达到最小值的最优基准密度 λ_b^* 为 10^{-5} 基站/米^2。

VII. 结论

本文将电磁场限制纳入覆盖性能和暴露分析，并针对如何设计电磁场感知蜂窝网络制定了优化问题。具体而言，我们利用泊松空洞过程生成基站的分布，并考虑基站与受限区域之间的距离，因为受限区域内禁止设置基站。借助随机几何工具，我们分析了下行链路和上行链路的辐射与覆盖概率。此外，我们通过暴露指数研究了系统参数对基站和用户设备产生的下行与上行联合辐射的影响。数值结果表明，即使采用保守的电磁场暴露水平第95百分位数评估，结果仍符合国际指南；而在更典型的设置下，暴露水平远低于最大允许水平。还可以看出，提高基站的基准密度或缩短受限区域周围的允许距离，能够降低上行链路中移动设备产生的暴露，但会加剧下行链路中基站产生的暴露。这种相反的趋势表明，在为电磁场感知蜂窝网络设计系统参数时，将下行与上行联合暴露纳入考量是合理的。我们发现，在特定网络配置下，受限区域与基站之间的距离以及基站的基准密度均存在最优值，可使总暴露量最小化。

附录A

引理1的证明

泊松空洞过程 Ψ_B 可近似为密度为 $\lambda_B = \lambda_b \exp(-\lambda_r R^2)$ 的泊松点过程。根据泊松点过程的标准结果， [48], 以典型用户为中心的区域的勒贝格测度

空洞之外可表示为 $\rho_{\text{out}}(x) = \pi x^2,\ x \geq 0$。利用 [49], 中泊松点过程的空概率， X_{out} 的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_{X_{\text{out}}}(x) &= \mathbb{P}\left\{X_{\text{out}} \leq x\right\} = 1 - \mathbb{P}\left\{X_{\text{out}} > x\right\} = 1 - \exp\left[\lambda_B \rho_{\text{out}}(x)\right] \\ &= 1 - \exp(-\lambda_B \pi x^2) = 1 - \exp\left[-\lambda_b \exp(-\lambda_r R^2)\pi x^2\right]. \end{aligned} \tag{40}$$

根据概率密度函数与累积分布函数之间的关系，即 $f_{X_{\text{out}}}(x) = \mathrm{d}\ \mathrm{d}x F_{X_{\text{out}}}(x)$，我们可以得到式（12a）中的 X_{out}, $f_{X_{\text{out}}}(x)$ 的概率密度函数。对于空洞内的典型用户，该区域的勒贝格测度为 $\rho_{\text{in}}(x) = \pi(x^2 - R^2)\ x \geq R$，其中 R 是空洞的半径。随后，按照推导 $f_{X_{\text{out}}}(x)$ 的相同步骤，我们完成了$f_{X_{\text{in}}}(x)$的证明。

附录B 定理1的证明

我们首先分析空洞外典型用户的下行覆盖概率。根据式（12a）中 X_{out} 的分布，可以进一步推导式（10）和（11），得到

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\text{cov}}^{\text{DL}} &= \mathbb{P}\left\{\text{SNR}^{\text{DL}} > \tau\right\} = \mathbb{E}_{X_{\text{out}}}\left[\mathbb{P}\left\{\text{SNR}^{\text{DL}} > \tau | X_{\text{out}}\right\}\right] \\ &= \int_0^{\infty} \mathbb{P}\left\{\text{SNR} > \tau | X_{\text{out}} = x_0\right\} f_{X_{\text{out}}}(x_0)\,\mathrm{d}x_0 = \int_0^{\infty} \mathbb{P}\left\{\frac{p\eta H_0}{x_0^{\alpha}\sigma^2} > \tau\right\} f_{X_{\text{out}}}(x_0)\,\mathrm{d}x_0. \end{aligned} \tag{41}$$

根据式（5）s 中 H_0 的分布，我们有

$$\mathbb{P}\left\{\frac{p\eta H_0}{x_0^{\alpha}\sigma^2} > \tau\right\} = \mathbb{P}\left\{H_0 > \frac{\tau\sigma^2}{p\eta x_0^{-\alpha}}\right\} = \frac{\Gamma_u\left(m, s^{\text{DL}}\sigma^2\right)}{\Gamma(m)} \overset{(a)}{=} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(s^{\text{DL}}\sigma^2\right)^k}{k!} \exp\left(-s^{\text{DL}}\sigma^2\right), \tag{42}$$

其中 $\Gamma_u(m, mg) = \int_{mg}^{\infty} t^{m-1}e^{-t}\,\mathrm{d}t$, $s^{\text{DL}} = \frac{m\tau}{p\eta x_0^{-\alpha}}$，且（a）由定义 $\frac{\Gamma_u(m,g)}{\Gamma(m)} = \exp(-g)\sum_{k=0}^{m-1}\frac{g^k}{k}$！得出。将式（42）代入式（41），可得空洞外典型用户的 $\mathcal{P}_{\text{cov}}^{\text{DL}}$ 表达式。空洞内典型用户的 $\mathcal{P}_{\text{cov}}^{\text{DL}}$ 证明与上述方法类似，因此此处省略。

附录 C

定理2的证明

为了求出下行链路中电磁场暴露的累积分布函数，我们首先推导 W^{DL} 的拉普拉斯变换，其表达式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{W^{\text{DL}}}(s) &= \mathbb{E}_{W^{\text{DL}}}\left[\exp(-sW^{\text{DL}})\right] = \mathbb{E}_{W^{\text{DL}}}\left[\exp\left(-s\sum_{i,b_i\in\Psi_B}\frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}\right)\right] \\ &= \mathbb{E}_{\Psi_B}\left[\prod_{i,b_i\in\Psi_B}\mathbb{E}_H\left[\exp\left(-s\frac{pH}{4\pi x_i^{\beta}}\right)\right]\right] \overset{(a)}{=} \mathbb{E}_{\Psi_B}\left[\prod_{i,b_i\in\Psi_B}\kappa^{\text{DL}}(x_i, s)\right], \end{aligned} \tag{43}$$

其中 $\kappa^{\mathrm{DL}}(x_i,s) = \left(\frac{m}{m+sp}\frac{()^{-1}x_i^{-\beta}}{4\pi}\right)^m$，且 (a) 来自式 (5) 中小尺度衰落的分布。考虑空洞外的典型用户，并利用泊松点过程的概率生成泛函 (PGFL)，[35],(43) 可进一步表示为

$$\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}}(s) = \exp\left(-2\pi\lambda_B \int_0^{\infty} \left[1-\kappa^{\mathrm{DL}}(x,s)\right] x\mathrm{d}x\right), \tag{44}$$

其中 $\lambda_B = \lambda_b \exp(-\lambda_r R^2)$。对于位于空洞内的用户，$x_i \geq R$，因此 W^{DL} 的拉普拉斯变换为

$$\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}}(s) = \exp\left(-2\pi\lambda_B \int_R^{\infty} \left[1-\kappa^{\mathrm{DL}}(x,s)\right] x\mathrm{d}x\right). \tag{45}$$

根据 Gil-Pelaez 定理，W^{DL} 的累积分布函数可写为

$$\begin{aligned} F_{W^{\mathrm{DL}}}(w) &= \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{1}{t}\,\mathrm{Im}\left(\exp(-j\,tw)\phi_{W^{\mathrm{DL}}}(t)\right)\mathrm{d}t \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{1}{t}\,\mathrm{Im}\left(\exp(-j\,tw)\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}}(-j\,t)\right)\mathrm{d}t \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2j\,\pi}\int_0^{\infty} \frac{1}{t}\left[e^{-j\,tw}\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}}(-j\,t) - e^{j\,tw}\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}}(j\,t)\right]\mathrm{d}t, \end{aligned} \tag{46}$$

其中 $\phi_{W^{\mathrm{DL}}}(t) = \mathbb{E}\left\{\exp\left(j\,t\,w\right)\right\} = \mathcal{L}_{W^{\text{下行链路}}}(-j\,t)$。将 (44) 或 (45) 代入 (46)，即可证明定理2。

附录 D

定理 3 的证明

在服务基站位于 b_0、与典型用户的距离为 x_0 的条件下，典型用户接收到的功率密度由距离为 x_0 的最近基站以及距离典型用户大于 x_0 的其余基站提供，其表达式为

$$W^{\mathrm{DL}}(x_0) = \frac{pH_0}{4\pi x_0^{\beta}} + \sum_{i,b_i\in\Psi_B\setminus\{b_0\}} \frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}. \tag{47}$$

$W^{\mathrm{DL}}(x_0)$ 的拉普拉斯变换为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(s) &= \mathbb{E}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}\left[\exp\left(-s\frac{pH_0}{4\pi x_0^{\beta}} - s\sum_{i,b_i\in\Psi_B\setminus\{b_0\}}\frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}\right)\right] \\ &= \mathbb{E}_{H_0}\left[\exp(-s\frac{pH_0}{4\pi x_0^{\beta}})\right]\mathbb{E}_{\Psi_B,\{H_i\}}\left[\prod_{i,b_i\in\Psi_B\setminus\{b_0\}}\exp\left(-s\frac{pH_i}{4\pi x_i^{\beta}}\right)\right] \\ &\overset{(a)}{=} \kappa^{\mathrm{DL}}(x_0,s)\mathbb{E}_{\Psi_B}\left[\prod_{i,b_i\in\Psi_B\setminus\{b_0\}}\kappa^{\mathrm{DL}}(x_i,s)\right], \end{aligned} \tag{48}$$

其中， $\kappa^{\mathrm{DL}}(\cdot)$ 如式 (17) 所示，(a) 的推导方法与式 (43) 相同。将泊松点过程的概率生成泛函 [35] 代入式 (48)，可得

$$\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(s)=\kappa^{\mathrm{DL}}(x_0,s)\exp\left(-2\pi\lambda_B\int_{x_0}^{\infty}\left[1-\kappa^{\mathrm{DL}}(x,s)\right]x\,\mathrm{d}x\right), \tag{49}$$

其中 $\lambda_B=\lambda_b\exp(-\lambda_r R^2)$。根据式（46）的结果，将 $\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}}(s)$ 替换为 $\mathcal{L}_{W^{\mathrm{DL}}|x_0}(s)$，即可完成定理 3 的证明。

参考文献

[1] F. Boccardi、R. W. Heath、A. Lozano、T. L. Marzetta 和 P. Popovski，“第五代移动通信技术的五个颠覆性技术方向”，*IEEE* 通信杂志，第 52 卷，第 2 期，第 74–80 页，2014年。[2]瑞士因健康顾虑暂停推出第五代移动通信技术，网址：https://www.ft.com/content/ 848c5b44-4d7a-11ea-95a0-43d18ec715f5，最后访问于 2020年2月18日。[3] 国际非电离辐射防护委员会 等，“限制人体暴露于时变电场、磁场和电磁场（最高 300 GHz）的指南”，*Health Physics*，第 74 卷，第 4 期，第 494–522 页，1998年。[4] 国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP），“ICNIRP 限制人体暴露于时变电场、磁场和电磁场（100 kHz 至 300 GHz）的指南”，https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf，2020年3月。[5] Y. A. Sambo、F. H´eliot 和 M. A. Imran，“移动通信系统中电磁辐射及其降低方法的综述与教程”，*IEEE* 通信调查与教程，第 17 卷，第 2 期，第 790–802 页，2015年。[6] K.-H. Ng，“非电离辐射——来源、生物效应、发射与暴露”，载于 *UNITEN* 非电离辐射国际会议论文集，2003年，第 1–16 页。[7] K. R. Foster、M. C. Ziskin、Q. Balzano 和 A. Hirata，“1 GHz 以上射频暴露限值中平均时间的热分析”，*IEEE Access*，第 6 卷，第 74 536–74 546 页，2018年11月。[8] D. Belpomme、L. Hardell、I. Belyaev、E. Burgio 和 D. O. Carpenter，“低强度非电离辐射的热效应和非热健康效应：国际视角”，*Environmental Pollution*，第 242 卷，第 643–658 页，2018年。[9] 国际电信联盟电信标准化部门建议书，“遵守人体电磁场暴露限值的指南”，2021年。[10] 美国联邦通信委员会 等，“人体射频电磁场暴露以及重新评估美国联邦通信委员会射频暴露限值和政策。美国联邦通信委员会于 2020年4月1日发布的一项规则，刊载于《联邦公报》；2020年”，2020年。[11]“射频场暴露限值（公众）——各国数据”，https://apps.who.int/gho/data/view.main. EMFLIMITSPUBCRADIOFREQUENCYv，世界卫生组织，访问日期：2020年5月19日。[12] “电磁场暴露法规”，通信与信息技术委员会（CITC），技术报告，2021年。 [在线]。网址：https://www.citc.gov.sa/ar/new/publicConsultation/Documents/ExposuretoEMF AR EN.pdf[13] H. Chiang，“制定电磁场暴露标准的理由”，https://www.salzburg.gv.at/gesundheit /Documents/ proceedings (20) chiang.pdf，2009年，访问日期：2020年5月19日。[14] “电气产品和电信设备产生的电磁场（香港法规）”，https: // www.info.gov.hk/gia/general/201212/12/P201212120306.htm，访问日期：2020年5月19日。[15] “列支敦士登下调射频暴露限值”，http://www.emfrf.com/liechtenstein-reduces-rf-exposure-limits/，访问日期：2020年5月19日。

[16] 圣迭戈县监事会，“第 10622 号条例（新系列）”， [在线] 网址：https://tinyurl.com/2p8rr35v，2019年。[17] 国家毒理学计划，“Hsd：Sprague dawley SD 大鼠在手机使用的频率（900 MHz）和调制方式（全球移动通信系统和码分多址）下暴露于全身射频辐射的毒理学与致癌性研究”，国家毒理学计划，美国卫生与公众服务部，技术报告，2018年。[18]S. Wall、Z.-M. Wang、T. Kendig、D. Dobraca 和 M. Lipsett，“真实环境中的手机射频电磁场暴露”，《环境研究》，第 171 卷，第 581–592 页，2019年。 [在线]。网址：http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935118305024[19] Y. Huang、N. Varsier、S. Niksic、E. Kocan、M. Pejanovic-Djurisic、M. Popovic、M. Koprivica、A. Neskovic、J. Milinkovic、A. Gati 等，“法国和塞尔维亚不同地理区域中宏蜂窝 3G 网络引起的人群平均全球暴露比较”，《生物电磁学》，第 37 卷，第 6 期，第 382–390 页，2016年。[20] R. Pawlak、P. Krawiec 和 J. ˙Zurek，“5G 技术中的电磁场测量”，IEEE Access，第 7 卷，第 29 826–29 835 页，2019 年。[21] L. Chiaraviglio 、 C. Lodovisi 、 D. Franci 、 S. Pavoncello 、 T. Aureli 、 N. Blefari-Melazzi 和 M.-S. Alouini，“城镇中的大规模 5G 暴露测量：方法与结果”，《IEEE 通信学会开放期刊》，第 2 卷，第 2029–2048 页，2021年。[22] S. Aerts、L. Verloock、M. Van den Bossche、D. Colombi、L. Martens、C. T¨ornevik 和 W. Joseph，“用于评估 6 GHz 以下频段 5G 新空口大规模多输入多输出基站暴露的现场测量方法”，IEEE Access，第 7 卷，第 184 658–184 667 页，2019年。[23] L. Chiaraviglio、S. Turco、G. Bianchi 和 N. Blefari-Melazzi，“密集 5G 网络是否会增加电磁场暴露？[观点],”《IEEE 会议录》，第 109 卷，第 12 期，第 1880–1887 页，2021年。[24] Q. Gontier、L. Petrillo、F. Rottenberg、F. Horlin、J. Wiart、C. Oestges 和 P. De Doncker，“一种电磁场暴露建模的随机几何方法”，IEEE Access，第 9 卷，第 91 777–91 787 页，2021年。[25] M. Al Hajj、S. Wang、L. Thanh Tu、S. Azzi 和 J. Wiart，“利用随机几何对毫米波频段 5G 大规模多输入多输出网络暴露进行统计估计”，《应用科学》，第 10 卷，第 23 期，第 8753 页，2020年。[26] A. Elzanaty、L. Chiaraviglio 和 M.-S. Alouini，“5G 与电磁场暴露：错误信息、未决问题和潜在解决方案”，《通信与网络前沿》，第 2 卷，第 635716 页，2021年。[27] L. Chiaraviglio、A. Elzanaty 和 M.-S. Alouini，“与 5G 暴露相关的健康风险：通信工程视角”，《IEEE 通信学会开放期刊》，第 2 卷，第 2131–2179 页，2021年。[28] H. Ibraiwish、A. Elzanaty、Y. H. Al-Badarneh 和 M.-S. Alouini，“RIS 辅助环境中的电磁场感知蜂窝网络”，IEEE 通信快报，2021年。[29] A. Subhash、A. Kammoun、A. Elzanaty、S. Kalyani、Y. H. Al-Badarneh 和 M.-S. Alouini，“具有绿色约束的 RIS 辅助上行通信最大最小数据速率优化”，arXiv 预印本 arXiv:2208.00182，2022年。[30] ——，“利用统计信道状态信息为 RIS 辅助上行网络进行公平分配的最优相移设计”，arXiv 预印本 arXiv:2209.08983，2022年。[31] S. Javed、A. Elzanaty、O. Amin、M.-S. Alouini 和 B. Shihada，“面向硬件失真通信系统的电磁场感知概率整形设计”，《通信与网络前沿》，2022年。[32] N. A. Muhammad、N. Seman、N. I. A. Apandi、C. T. Han、Y. Li 和 O. Elijah，“共存的 6 GHz 以下与毫米波网络中的电磁场暴露随机几何分析”，IEEE Access，第 9 卷，第 112 780–112 791 页，2021年。[33] Z. Lou、A. Elzanaty 和 M.-S. Alouini，“用于电磁场感知蜂窝网络的绿色系留无人机”，《IEEE 绿色通信与网络汇刊》，第 5 卷，第 4 期，第 1697–1711 页，2021年。

[34] M. Nemati、J. Park 和 J. Choi，《毫米波蜂窝网络中的 RIS 辅助覆盖增强》，*IEEE Access*，第 8 卷，第 188 171–188185 页，2020年。[35] J. G. Andrews、A. K. Gupta 和 H. S. Dhillon，《利用随机几何分析蜂窝网络入门》，*arXiv* 预印本 *arXiv:1604.03183*，2016年。[36] M. Haenggi，《无线网络随机几何》。剑桥大学出版社，2012年。[37] M. K. Simon 和 M.-S. Alouini，《衰落信道中的数字通信》。约翰·威立父子出版公司，2005年，第 95 卷。[38] P. J. Davis，《莱昂哈德·欧拉积分：伽马函数的历史概述——纪念 Milton Abramowitz》，《美国数学月刊》，第 66 卷，第 10 期，第 849–869 页，1959年。[39] 《5G无线网络的电磁场合规评估》，国际电信联盟（ITU），标准，2019年5月。[40] J. Gil-Pelaez，《关于反演定理的注记》，《生物统计学》，第 38 卷，第 3-4 期，第 481–482 页，1951年。[41] L. Chiaraviglio、A. S. Cacciapuoti、G. Di Martino、M. Fiore、M. Montesano、D. Trucchi 和 N. B. Melazzi，《电磁场限制下的5G网络规划：现状与愿景》，*IEEE Access*，第 6 卷，第 51 021–51037 页，2018年。[42] S. Kuehn、S. Pfeifer、B. Kochali、N. Kuster 和 C. Bern，《不同拓扑结构和用户场景下假设的5G移动网络总暴露量建模》，*CRR*项目最终报告，第 816 卷，2019年。[43] L. Chiaraviglio、C. Lodovisi、S. Bartoletti、A. Elzanaty 和 M.-S. Alouini，《智能手机暴露量在5G移动网络中的主导作用》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2211.01077*，2022年。[44] G. Vermeeren、D. Plets、W. Joseph、L. Martens、C. Oliveira、D. Sebasti˜ao、M. Ferreira、F. Cardoso、L. Correia、M. Koprivica等，《低电磁场暴露未来网络 D2. 8 全球无线暴露指标定义》，*LEXNET*联盟，法国穆利诺，技术报告 *D*，第 2 卷，2015年。[45] A. Eiger、K. Sikorski 和 F. Stenger，《非线性方程组的二分法》，《*ACM*数学软件汇刊》（*TOMS*），第 10 卷，第 4 期，第 367–377 页，1984年。[46] J. Kiefer，《用于寻找最大值的序贯极小极大搜索》，《美国数学会会刊》，第 4 卷，第 3 期，第 502–506 页，1953年。[47] E. Access，《E-UTRA物理层方面的进一步进展》，*3GPP*技术规范 *TR*，第 36 卷，第 V2 页，2010年。[48] H. ElSawy、A. Sultan-Salem、M.-S. Alouini 和 M. Z. Win，《利用随机几何对蜂窝网络进行建模与分析：教程》，*IEEE Communications Surveys & Tutorials*，第 19 卷，第 1 期，第 167–203 页，2016年。[49] J. G. Andrews、F. Baccelli 和 R. K. Ganti，《一种可处理的蜂窝网络覆盖与速率分析方法》，《*IEEE*通信汇刊》，第 59 卷，第 11 期，第 3122–3134 页，2011年。