

# 面向下一代网络的近场通信: 理论、应用与挑战



## Near-Field Communication for Next-Generation Networks: Theory, Applications, and Challenges

万雨/WAN Yu<sup>1,2</sup>, 李翔宇/LI Xiangyu<sup>1</sup>, 武庆庆/WU Qingqing<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 中国 上海 200240;

2. 中山大学, 中国 深圳 518107)

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202403005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240624.1151.002.html>

网络出版日期: 2024-06-24

收稿日期: 2024-04-25

**摘要:** 从电磁理论出发, 分析了近场通信不可忽视的电磁特性和波束特性, 以及对现有通信系统性能的影响。利用近场效应, 阐释了几种典型近场应用场景以及如何实现更高的性能指标。最后, 为实现近场通信容量的提升, 介绍了一些实现方法与架构, 并对近场信道估计的两种技术进行展望, 指出了未来研究方向。本研究可为未来近场通信的研究提供参考。

**关键词:** 近场通信; 近场波束特性; 通信容量; 信道估计

**Abstract:** From the electromagnetic theory, the non-negligible electromagnetic and beam characteristics of the near-field are analyzed, as well as the impact on the performance of existing communication systems. Then, using the near-field effect, several typical near-field application scenarios and how to achieve higher performance indexes are elucidated. Finally, in order to improve the capacity of near-field communication, several implementation methods and architectures are introduced. Two technologies of near field channel estimation are prospected, and the future research direction is pointed out. This study serves as a reference for future research in near-field communication.

**Keywords:** near-field communication; near-field beam characterization; communications capacity; channel estimation

**引用格式:** 万雨, 李翔宇, 武庆庆. 面向下一代网络的近场通信: 理论、应用与挑战 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 21-25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403005

**Citation:** WAN Y, LI X Y, WU Q Q. Near-field communication for next-generation networks: theory, applications, and challenges [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(3): 21-25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403005

### 1 近场通信技术的发展与需求

随着信息和通信技术领域的快速发展, 近场通信 (NFC) 技术成为了一项备受关注的重要技术。传统远场通信技术通过无线电波在远距离内进行数据传输, 这使得设备之间可以快速、便捷地进行通信和交换信息。具体来说, 当通信距离大于瑞利距离 ( $2D^2/\lambda$ , 其中  $D$  为天线阵列孔径,  $\lambda$  为电磁波波长) 时, 通信场景即为远场通信, 电磁波的波前可视为平面波。然而, 随着天线孔径的不断增大, 以及更高

频段如毫米波太赫兹等波段的使用, 通信的近场范围不断扩大。例如, 假设阵列孔径  $D=1$  m 时, 载波频率为 28 GHz, 瑞利距离可达 187 m。此时, 平面波假设不再成立, 必须采样更为精确的球面波建模, 因此传统的远场通信算法会面临严重的性能损失, 对近场通信的探索不可被忽略。

本文将从理论、应用与挑战 3 个方面对面向下一代网络的近场通信进行深入探讨。首先, 我们将对近场通信技术的电磁基本原理进行介绍, 剖析了近场中的传输特性; 接着, 将探讨近场通信技术在不同场景下的应用案例, 并分析其中存在的问题和挑战; 最后, 将介绍一些潜在解决方案和未来发展的建议, 以期在近场通信技术在下一代网络中的应用提供参考和指导。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2023YFB2905000); 国家自然科学基金项目 (62371289、62331022)

## 2 近场传输特性

由于电磁波传播特性的变化,在近场中电磁波不再能简单地视为平面波,而被视为球面波。因此,在无线近场区域,信号的电磁物理效应以及带来的波束效应不可忽略。本节中,我们从电磁理论出发,简要分析了近场传输特性的根源及其对现有通信系统性能的影响。

### 2.1 电磁特性

本小节我们将从建立近场信道模型出发揭示这些电磁特性。

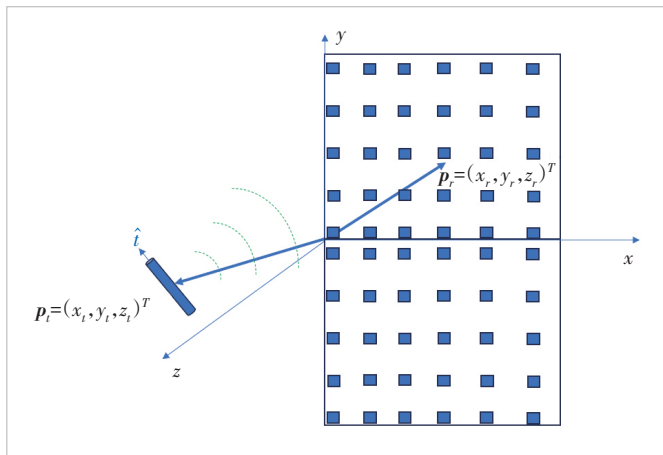
如图1所示,考虑发射天线位于  $\mathbf{p}_t = (x_t, y_t, z_t)^T$ 。发射天线为单极化天线,具有归一化极化方向矢量  $\hat{\mathbf{i}} = t_x \hat{\mathbf{x}} + t_y \hat{\mathbf{y}} + t_z \hat{\mathbf{z}}$  ( $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\hat{\mathbf{y}}$ 、 $\hat{\mathbf{z}}$ 为单位向量)。接收天线阵列上的各点坐标为  $\mathbf{p}_r = (x_r, y_r, 0)^T$ 。

从能量的角度出发,接收处的电场表达式为  $\mathbf{E}_s(r) = |\mathbf{E}_s(r)| \exp(jk_0 r)$ , 其中:

$$|\mathbf{E}_s(r)|^2 = \|\mathbf{E}(r)\|^2 \left( -\frac{\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_t}{\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_t\|} \cdot \hat{\mathbf{z}} \right) = E_{in}^2 \frac{1}{4\pi r^2} \frac{z_t}{r} \frac{1}{r^2} \left[ (t_y x_{r,t} - t_x y_{r,t})^2 + \sum_{(\alpha, \beta) \in \mathcal{M}} (t_\alpha l_\beta + t_\beta l_\alpha)^2 \right], \quad (1)$$

其中,  $\|\mathbf{E}(r)\|^2$  为发射端初始能量,  $-\frac{\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_t}{\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_t\|} \cdot \hat{\mathbf{z}}$  为沿  $z$  轴方向的能量映射系数, 坐标点对  $\mathcal{M} = \{(z, x), (z, y)\}$ ,  $l_x = x_{r,t}$ ,  $l_y = y_{r,t}$ ,  $l_z = z_t$ ,  $x_{r,t} = x_r - x_t$ ,  $y_{r,t} = y_r - y_t$ 。此外,  $E_{in} = \frac{\eta_0 I_{in}}{2}$  为发射端的初始电场强度,  $[\cdot]$  为极化损耗。

例如,当发射天线朝向正  $Y$  轴极化时,有  $\hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{y}}$ , 且信



▲图1 近场电磁辐射系统图

号垂直于接收表面入射时,即  $x_t = y_t = 0$  和  $\frac{z_t}{r} = 1$ , 这时公式(1)简化为:

$$|\mathbf{E}_{s,y}(r)|^2 = E_m^2 \frac{1}{4\pi r^2} \frac{x_{r,t}^2 + z_t^2}{r^2}, \quad (2)$$

其中,  $\frac{x_{r,t}^2 + z_t^2}{r^2}$  就是沿  $Y$  轴的极化损耗。

当  $y_t = y_r$ , 即  $\frac{x_{r,t}^2 + z_t^2}{r^2} = 1$ , 这时没有极化损耗, 公式(2)可简化为:

$$|\mathbf{E}_s(r)|^2 = E_m^2 \frac{1}{4\pi r^2}. \quad (3)$$

公式(3)就是经典的远场 Friis 公式。它表明了信号发射功率与接收功率的基本关系。以上推导内容的详细过程参见文献[1]。

从近场信号模型中我们可以看到,振幅项包含天线的极化损耗、能量映射系数和点到点的自由空间损耗因子,相位项由准确的点到点距离决定。由于球面波模型,发射端到接收端的电磁波不可视作平行,这就是近场不可忽略的天线极化效应和能量映射效应。

### 2.2 波束特性

#### 1) 波束聚焦效应

在传统的远场无线通信中,发射波束转向指的是一种阵列信号处理技术,即多天线发射器向特定方向发送电磁信号,发射波束转向是远场通信中提高频谱效率和控制同信道干扰的关键方法。然而,由于电磁波面是平面的,发射机只能控制大部分能量向其辐射的相对角度。不同的是,在辐射近场区域,波束聚焦利用不可忽略的球面波,将辐射能量聚焦在特定的空间位置,即不仅按角度聚焦,而且按沿传播方向的特定深度聚焦。事实上,与波束转向类似,波束聚焦也是一种发射技术,其基础是对发射信号进行预编码,以实现所需的辐射模式。特别地,为了正确产生聚焦波束,必须分别对来自每个天线的球面波信号进行加权,使其在所需的焦点处进行建设性相加,从而产生高信号强度,并在其他点对辐射球面波信号进行破坏性相消(例如抑制干扰)。通过增加距离维度的信息,波束聚焦为无线通信提供了新的自由度(DoF)和通信容量增益。

#### 2) 波束分裂效应

在近场可重构智能表面中,基于移相器的波束成形器可以生成针对特定位置的聚焦波束,以提供波束聚焦增益。这种波束成形器在窄带系统中表现良好。然而,在毫米波、太

赫兹宽带系统中,由于使用几乎与频率无关的移相器,不同频率的球面波束将聚焦于不同的物理位置,这被称为近场波束分裂效应。该效应会导致严重的阵列增益损失,因为不同频率的波束无法与特定位置的目标用户对齐。在宽带系统设计中,需要仔细考虑这一点。

尽管波束分裂效应使得宽带系统更难将能量准确对准于用户,从而导致波束赋形性能下降,但它也具有一定的优势:由于相同的导频可以在空间上产生多个波束,通过设计系统参数,可以控制波束在不同频率上的覆盖角度范围。借助这一点,可以实现快速获取信道状态信息(CSI),从而实现快速波束训练或波束跟踪。传统通信中针对这个问题的研究主要分为两类工作:第一类技术旨在减轻波束分裂造成的阵列增益损失,通过引入时延电路来缓解波束分裂效应;第二类技术则通过控制时延参数和多波束来实现在大规模多输入多输出系统中快速获取信道状态信息。

### 3 近场通信的典型应用

为满足IMT-2030对频谱效率的要求,我们需要进一步探索更高频段和更大规模阵子的应用潜力。与此同时,更高频段所使用的超大规模阵列将带来近场效应。利用近场效应,可以更好地实现IMT-2030更多的应用场景和关键性能指标。本节中,我们将以超大规模天线阵列、智能超表面(RIS)使能近场、无蜂窝(Cell-Free)近场和通信感知一体化(ISAC)为例,对近场的应用场景进行阐释。

#### 3.1 超大规模天线阵列近场

为了解决带宽受限的问题,太赫兹(THz)频段被视为支持6G通信系统达到太比特/秒(Tbit/s)数据传输速率的关键技术<sup>[2]</sup>。太赫兹波段的亚毫米波长使得在有限的空间内密集部署数百甚至数千个天线成为可能,从而构建了超大规模多输入多输出(UM-MIMO)系统<sup>[3]</sup>。UM-MIMO系统通过产生具有高波束成形增益的尖锐窄波束,有效地解决了距离限制问题。

然而,UM-MIMO系统面临着两个主要挑战。首先,从信道建模的角度来看,由于太赫兹通信通常涉及远场和近场,因此单纯使用球面波模型或平面波模型,会导致相当高的复杂度或性能下降。例如,对于球面波模型,其参数数量与发射天线数、接收天线数和传播路径数的乘积成正比。如果考虑发射和接收天线各有1024根,传播路径数为10,则复杂度将会很高<sup>[4]</sup>。相比之下,仅采用平面波模型的复杂度与传播路径数成正比,但其在近场范围内的性能将受到严重影响。因此,针对远近场混合的场景,仍然需要更精确的信

道模型。

其次,从系统架构的角度来看,采用球面波建模为近场引入了额外的自由度,增强了复用能力,提高了信道容量。然而,要利用这种复用能力,需要更多的射频链路,从而增加了UM-MIMO系统的硬件复杂性和功耗。此外,射频链路的数量通常少于天线数量,因此为了获得完整的信道信息,需要对天线维度进行观测,但这会导致信道估计的前导开销过大。

#### 3.2 智能超表面使能近场

智能超表面(RIS)被视为6G技术中的关键潜力之一,其由大量低成本的可重构单元组成。RIS技术的典型应用之一是在毫米波及太赫兹通信中利用数百至数千个元件实现足够的波束赋形增益,以补偿信号的传输覆盖盲区。更大规模的RIS阵列以及更高的工作频率进一步扩大了RIS辅助通信链路的近场覆盖范围。当用户位于辐射近场区域时,即使多个用户位于相同的辐射角度,也可以通过对智能超表面进行不同的近场编码,实现波束聚焦,从而减轻同信道干扰,支持多个共存的正交链路,实现空分多址。RIS通常用于在发射机/接收机之间建立直连信道。在远场区域,信道的秩通常较小,这限制了信道的空间复用增益。相反,在近场区域,由于球面波引起的信号幅度和相位的非线性变化,信道往往具有满秩特性,从而可以有效提高系统的复用增益和空间自由度。利用球面波所提供的额外自由度,同时携带角度和距离信息的近场辐射波,进一步提高了无线定位服务和感知精度。然而,这也意味着信道的空间非平稳性增加,从而给信道估计、编码设计、波束训练复杂度、移动性管理和信令设计等方面带来挑战。

#### 3.3 无蜂窝近场通信

不同于传统的蜂窝小区通信架构,无蜂窝(Cell-Free)通信架构通过分布式部署大量接入节点,在同一时频资源块内共同服务用户,实现了以用户为中心的通信范式<sup>[5]</sup>。这种架构能够有效克服小区间的干扰,避免通信中断,从而显著提升下一代6G移动通信的性能。基于无蜂窝通信架构,由于多个阵列的分布式部署,其等效阵列口径显著扩大,使得近场球面波效应更加显著。同时,由于接入节点的更密集分布和通信距离的缩短,用户更有可能位于近场范围内。此外,由于无蜂窝通信架构的协作特性,用户可能会同时受到多个不同天线规模、不同距离的接入节点的服务,从而可能处于不同节点的远场或近场范围,面临更为复杂的远近场混合通信场景。另外,无蜂窝通信通常需要复杂的站点协调和较高的回程容量。因此,无蜂窝近场通信将成为未来6G的

重要研究场景之一。

### 3.4 近场通感一体化

通信感知一体化 (ISAC) 代表了感知技术和无线通信交叉领域的变革,其核心是通过促进雷达和通信之间的频谱和硬件共享,从而优化资源分配,并在感知和通信之间创造协同作用。由于超大规模阵列技术和超高频段通信技术的发展,无线通信和感知在近场区域有着广阔的应用前景。

在通信方面,首先,与远场波束赋形将波束能量指向特定方向不同,基于球面波的近场波束赋形实现了波束聚焦的新功能,能够将波束能量集中在特定位置。这不仅提高了目标用户接收到的信号功率,还消除了对非目标用户的干扰。其次,在远场中,无法区分处于相同或相似角度的用户,用户间的干扰是不可避免的;而在近场中,基站可以将波束聚焦在不同的距离上,从而降低了用户间的干扰。这有效提高了信道的自由度,并进一步提高系统容量。

在感知方面,利用近场球面波可估算目标的角度和距离,可以有效减少对分布式阵列及其同步的需求。同时,增大的阵列孔径在角度域和距离域都提供了更细粒度的空间分辨率。此外,利用近场波束聚焦效应可以提高回波信号的感知信噪比,从而实现更精确的估计。

对于近场 ISAC,一种设计方法是在共享系统架构和硬件平台中共同优化通信与感知性能。因此,在权衡通信与感知性能时,必须考虑几种新的近场效应。对于一个近场无线系统,配备超大规模阵列的 ISAC 可以同时为多个通信用户提供服务,并在其近场区域感知周围的目标。对于联合通信与感知,需要设计有效的波束赋形来补偿高频波段严重的路径损耗。具体而言,一方面,为了提高近场通信性能,应利用近场波束聚焦效应将通信波束调整到固定位置;另一方面,近场雷达感知的波束控制通常取决于其探测目标,对于目标参数如角度和距离进行估计,感知波束应在角度域和距离域中动态扫描感兴趣的区域。

此外,近场通信的应用还包括近场定位<sup>[6]</sup>、近场无线传能<sup>[7]</sup>、近场物理层安全<sup>[8]</sup>等。在近场通信下,这些应用会有不同的性能表现,由于篇幅有限,读者可自行探索。

## 4 近场通信的潜力与挑战

### 4.1 通信容量提升的潜力

在远场 MIMO 通信中,视距信道的空间自由度非常有限。然而,在近场,由于相位的非线性变化,信道矩阵的秩显著提高。因此,通过 MIMO 预编码可以实现多个数据流同

时传输,为系统容量的提升带来了新的可能性。于是,一些新的预编码架构被提出。

在文献[9]中,作者提出了距离感知预编码架构 (DAP)。与传统的混合预编码不同,DAP 架构能够灵活调整射频链的数量,以匹配与距离相关的自由度。具体做法是通过部署一个选择网络,将每个射频链配置为激活和非激活两种状态。在远场区域,只激活一个射频链进行数据传输,而在近场,则可以根据传输距离激活特定数量的射频链,从而实现动态匹配传输数据流的数量和自由度。仿真结果表明,DAP 架构能显著提升频谱效率。

为了避免使用额外的射频链,作者在文献[10]中提出了宽间隔多子阵列预编码架构 (WSMS)。在这种结构中,子阵列间距较大,以扩大阵列孔径,从而人为地扩大近场区域。与经典的混合预编码相比,WSMS 架构需要额外设计子阵列的数量和子阵列间距。为此,作者联合优化了子阵列的数量、间距和预编码矩阵,以最大限度地提高可实现速率。仿真证明,WSMS 的频谱效率比经典混合预编码高出近 200%。

### 4.2 信道估计的挑战

将波束从远场转向近场的聚焦,需要高度依赖准确的信道状态信息。在这一过程中,近场波束聚焦不仅要求将波束对准特定方向,还需要将其聚焦到特定点上,因此对信道状态信息误差更为敏感。获取信道状态信息的方法包括显式的信道估计法和隐式的波束训练法。

针对远场和近场混合的场景,一种基于压缩感知的信道估计方法被提出了<sup>[11]</sup>。具体而言,作者采用了子阵列架构,在每个子阵列中,将路径的入射角视为对所有子阵列元素都相同。因此,在操作过程中,可以对子阵列信道的角域进行采样,以生成子阵列码本。此外,不同子阵列之间被认为具有不同的路径入射角,因此,各个子阵列的角度采样是独立的。通过这种方法,基于子阵列的方法能够对近场和远场信道进行稀疏表示。所提出的稀疏表示方法在复杂性上与传统基于平面波的解决方案相当,但在近场具有更高的精度。此外,与使用球面波的角域和距离域联合稀疏表示法相比,所提出的编码本计算复杂度显著降低。

在波束训练的方法中,我们通常通过对发射区域和接收区域进行采样,并采用不同的波束训练策略,例如分层波束训练、子阵列波束训练等。基于波束训练的方法可以在获取信道状态信息的开销和性能之间取得良好的折衷,这也是未来研究的方向之一。

## 5 结束语

阵列孔径的增大和更高频段电磁波的使用使得近场通信不可忽视。本文中,我们从信道模型出发,研究了近场的电磁特性和波束特性,评估了近场的几种典型应用,最后介绍了近场通信在提高通信容量上的潜力及部分实现方案,并对有待探索的信道估计提供了潜在研究方向。通过对近场通信技术的深入研究和探讨,本文有望为下一代网络的建设和发展提供新的思路和方法,推动近场通信技术在未来网络中的广泛应用和发展。

## 参考文献

- [1] WEI L, HUANG C W, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Tri-polarized holographic MIMO surfaces for near-field communications: channel modeling and precoding design [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(12): 8828–8842. DOI: 10.1109/TWC.2023.3266298
- [2] SSAD W, BENNIS M, CHEN M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems [J]. IEEE network, 2020, 34(3): 134–142. DOI: 10.1109/MNET.001.1900287
- [3] AKYILDIZ I F, JORNET J M. Realizing ultra-massive MIMO (1024 × 1024) communication in the (0.06–10) terahertz band [J]. Nano communication networks, 2016, 8: 46–54
- [4] CUI M, DAI L. Channel estimation for extremely large-scale MIMO: far-field or near-field [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(4): 2663–2677. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3146400
- [5] ZHANG J Y, CHEN S F, ZHENG J, et al. Cell-free massive MIMO: a new next-generation paradigm [J]. IEEE access, 2019, 7: 99878–99888. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2930208
- [6] CHEN A, CHEN L, YOU C S, et al. Near-field positioning and attitude sensing based on electromagnetic propagation modeling [EB/OL]. (2023–10–26) [2024–04–10]. <https://arxiv.org/abs/2310.17327>
- [7] ZHANG H Y, SHLEZINGER N, GUIDI F, et al. Near-field wireless power transfer for 6G Internet of everything mobile networks: opportunities and challenges [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(3): 12–18. DOI: 10.1109/MCOM.001.2100702
- [8] ANAYA-LOPEZ G J, GONZALEZ-COMA J P, LOPEZ-MARTINEZ F J. Spatial degrees of freedom for physical layer security in XL-MIMO [C]// 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022–Spring). IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/VTC2022–Spring54318.2022.9860861
- [9] WU Z D, CUI M Y, ZHANG Z J, et al. Distance-aware precoding for near-field capacity improvement in XL-MIMO [C]//

Proceedings of IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022–Spring). IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/VTC2022–Spring54318.2022.9860745

- [10] YAN L F, CHEN Y H, HAN C, et al. Joint inter-path and intra-path multiplexing for terahertz widely-spaced multi-subarray hybrid beamforming systems [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(2): 1391–1406. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3138791
- [11] HEYDARI P. Terahertz integrated circuits and systems for high-speed wireless communications: challenges and design perspectives [J]. IEEE open journal of the solid-state circuits society, 2021, 1: 18–36. DOI: 10.1109/OJSSCS.2021.3110748

## 作者简介



**万雨**, 中山大学在读本科生, 上海交通大学准研究生; 主要研究领域为近场通信、智能超表面辅助的通信系统优化。



**李翔宇**, 上海交通大学在读博士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化、空地海一体化网络、多址接入、大规模MIMO等。



**武庆庆**, 上海交通大学电子系长聘副教授、国家“海外优青”、全球高被引科学家; 从事6G IRS、通信感知一体化、无人机空地网络、大规模绿色智能物联网的研究; 入选科睿唯安-全球高被引科学家(2021–2023)、AI-2000全球最具影响力学者(2022–2023)、全球前2%顶尖科学家(2020–2023), 并获得上海市自然科学奖一等奖、IEEE通信学会亚太最杰出青年学者奖、IEEE通信学会Fred Ellersick论文奖、IEEE通信学会最佳教程论文奖、IEEE通信学会最佳青年论文奖、IEEE通信学会亚太杰出论文奖(2次)、IEEE ICC最佳论文奖、WCSP最佳论文奖、IEEE CL优秀编委奖; 已发表论文300余篇。