跨介质磁感应通信研究进展：理论、技术与应用

冯川[1,2,3]，金孟鑫[1,2]，廖亮[1,2]，张旭[1,2]，郭磊[4]
（1.重庆邮电大学通信与信息工程学院，重庆 400065；2.重庆邮电大学智能通信与网络安全研究院，重庆 400065；
3.重庆邮电大学大数据智能计算重点实验室，重庆 400065；4.东北大学计算机科学与工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘要：针对传统通信手段在跨越介质界面时面临的波阻抗失配，以及高损耗介质中的剧烈衰减等物理瓶颈，磁感应通信凭借其准静态磁场跨界连续且低损耗的特性，成为突破该难题的关键途径。首先，分析了侧波机制和介质涡流损耗等跨介质基础理论。接着，从收发硬件架构、物理层传输与调制、信道建模和中继协作网络4个方面归纳已有技术的研究进展，并总结了磁感应通信技术在海洋监测与地下救援等场景中的应用。在此基础上，分析了该技术所遇到的物理机制与工程实现等瓶颈，并探讨了动态信道建模、新型收发硬件与量子传感技术等前沿技术的发展趋势，为全域无缝互联网络的构建提供参考。

关键词：磁感应通信；跨介质通信；近场耦合；涡流损耗
中图分类号：TP309
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.1000–436x.TXXB260196

Advances in cross-medium magnetic induction communication: theories, technologies, and applications

Feng Chuan[1,2,3], Jin Mengxin[1,2], Liao Liang[1,2], Zhang Xu[1,2], Guo Lei[4]
1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Institute of Intelligent Communications and Network Security, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
3. Key Laboratory of Big Data Intelligent Computing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
4. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: To address physical challenges including wave impedance mismatch at media interfaces and severe signal attenuation in high-loss media, magnetic induction communication was adopted, owing to the continuous transboundary propagation capability and inherent low-loss characteristics of quasi-static magnetic fields. Firstly, fundamental cross-medium propagation theories, non-trivial lateral wave phenomena, and eddy current losses in dielectric media were comprehensively considered. Secondly, recent research advancements in this field were systematically reviewed across four core dimensions: transceiver hardware design, physical-layer transmission and modulation schemes, channel modeling, and relay-assisted networking technologies. Meanwhile, magnetic induction communication was applied to typical application scenarios, including ocean monitoring and underground rescue operations. On this basis, the existing bottlenecks in both physical mechanism research and engineering implementation were discussed in depth, and key promising technologies, including dynamic channel modeling, novel transceiver hardware, and quantum sensing, were further identified. These insights provide a valuable and practical reference for realizing seamless connectivity in heterogeneous cross-medium environments.

Key words: magnetic induction communication, cross-medium communication, near-field coupling, eddy current loss

收稿日期：2026–04–12；**修回日期：**2026–05–22
通信作者：张旭，zhangxu@cqupt.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.62501097）；重庆市自然科学基金资助项目（No.CSTB2025NSCQ-GPX1283）；重庆市教育委员会科学技术研究基金资助项目（No.KJQN202400621）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62501097), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.CSTB2025NSCQ-GPX1283), The Chongqing Municipal Education Commission (No.KJQN202400621)
*第二十八届中国科协年会学术论文

0　引言

随着人类对海洋探索、地下空间开发以及复杂极端环境作业的需求日益增长，构建无缝覆盖的空–天–地–海全域协同通信网络已成为当前的战略前沿。然而，传统通信手段在跨介质和高损耗导电介质中面临着严峻的物理限制[1]，例如，射频电磁波因严重的趋肤效应在水下或地下迅速衰减；水声通信受制于高时延和严重的多径效应，难以满足近距离宽带需求；水下光通信则极易受到水质浑浊和视距遮挡的干扰[2-3]。在此背景下，磁感应（magnetic induction, MI）通信凭借其独特的物理优势受到广泛关注，准静态磁场在导电介质中传播损耗低、多径效应弱，且可缓解空–海、空–地跨介质界面间的波阻抗失配问题，被视为短距离跨介质场景下突破通信瓶颈的一种极具潜力的技术方案[4]。传统通信技术与MI通信技术对比如表1所示。

MI通信的物理基础建立在近场互感耦合机制之上。在严格定义的MI边界内，磁场能量占主导地位，展现出有别于远场辐射的传播规律[5]。然而，受限于近场耦合的固有属性，早期MI技术面临着三大核心瓶颈：低频辐射效率低导致的传输距离受限、高品质因数（quality factor, Q）值谐振导致的可用带宽狭窄，以及高衰减导致的微弱信号检测困难。近年来，为突破这些物理极限，研究人员在理论建模与工程实现上展开了深入探索。在理论层面，分布电容与自谐振模型、导电介质涡流损耗分析，以及跨介质侧波传播机制等研究的深入，为系统设计奠定了坚实基础；在技术层面，研究重心已从传统的感应线圈逐步拓展至新型磁电机械天线[6]、超材料透镜增强[7]、高灵敏度量子传感接收机[8]等前沿方向，同时结合宽带多载波调制、中继与协作传输等网络级架构[9]，初步构建了新一代MI技术体系。

随着上述理论体系与关键技术的日益成熟，MI通信正逐步从理论探索向工程应用跨越。在海洋协同数据采集、深海基础设施监测、隧道坍塌与矿井救援以及农业土壤环境监测等场景中，MI技术展现出独特的应用优势。通过与声波、光波及射频技术构建异构多模态融合网络，可有效填补跨介质环境下的通信盲区，为全域无缝互联网络的构建提供重要支撑。

尽管跨介质MI通信在上述领域具有巨大潜力，但是，大部分文献仅涉及一个应用场景或者特定硬件设备，几乎没有对该领域的相关工作进行从基本物理机制到系统设计的综述。本文旨在对这一领域的相关研究进行总结，主要包括MI通信的近场理论与跨介质信道传播模型，新的增强型收发器件、物理层宽带传输体制、信号处理算法等关键技术突破，空–海、空–地等领域现有应用现状，并展望该领域当前存在的技术难题和未来趋势，为后续跨介质MI通信的研究提供参考和借鉴。

1　磁感应通信的基本理论

MI通信的物理基础是法拉第电磁感应定律，与远场电磁波通信依赖辐射场实现信息传输的机制不同，MI通信主要工作在感应近场区，利用非辐射的准静态磁场在收发线圈间建立磁耦合链路完成信号传输。

1.1　磁感应边界与场区定义

对于MI通信，应界定感应近场区与辐射远场区的物理界限，传输和接收链路的场域决定信号传播的主要物理机制、衰减规律、信道模型。从定性角度来看，传统定义上，感应近场边界基于弧度距

表1　传统通信技术与MI通信技术对比

通信体制	传播原理	优势	固有技术瓶颈	典型适用场景
射频电磁波通信	远场辐射场传输	空气中传输距离远、速率高	海水/岩土中趋肤效应极强，跨界面波阻抗失配严重，衰减急剧	陆地视距通信、水面短距通信
水声通信	声波在水介质中传播	水下远距离传输能力强	多径效应严重、传输时延高、受环境噪声干扰大，无法跨空–水界面传播	水下长距离骨干传输
水下光通信	光波在水介质中传播	近距传输速率极高、功耗低	受水质浑浊度影响极大，需严格视距对准，遮挡后链路中断	清水环境短距高速传输
MI通信	近场准静态磁场互感耦合	导电介质中衰减小、多径效应弱，跨界面磁场连续，穿透非铁磁介质能力强	近场耦合传输距离受限，高Q值谐振导致带宽窄，微弱信号检测难度大	水下/地下近距离高可靠通信、空–海/空–地跨介质通信

离，近场和远场的划分则基于瑞利距离，如式(1)所示。

$$d = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{1}$$

其中，d为瑞利距离，D为天线孔径，λ为波长。

但是，随着通信场景的发展，传统的基于相位误差或简单波长的硬性边界就不再适用了。Sun等[10]发现，对于大孔径天线阵列，通常的瑞利距离不再能够反映信道容量，为此提出了基于有效自由度的场区判断标准。对于基于非传播感应场进行能量耦合的MI通信，其工作区域主要为感应近场区，传统的瑞利距离是基于远场辐射假设得出的，不具有感应近场场景适用性；且传统的瑞利距离无法考虑天线尺寸与能量接收方式的影响，也不能准确描述实际覆盖范围。为此，刘光华等[11]针对MI通信，提出了一个更为严格的MI边界判定模型。该模型基于薄环形天线的电磁场空间分布，并严格将MI边界定义为辐射功率与感应功率绝对值相等的临界距离。同时通过对波阻抗幅值、电磁场相位差以及感应接收强度因子等参数随距离变化规律的深入分析发现，在规定的MI边界内，磁场能量占据主导地位，电场与磁场处于非稳定状态，并且接收能量呈现出明显的近场快速衰减特性，这与远场辐射的$\frac{1}{r}$衰减规律完全不同。

进一步从定量角度看，传统瑞利距离、弧度距离和MI边界判断模型对线圈尺寸、工作频段和介质环境的响应规律不同，因此适用场景也应有所区分。传统瑞利距离以波前最大相位误差不超过$\frac{\pi}{8}$为依据，由式(1)可知，边界仅随天线孔径平方的增大和工作频率的升高呈现向远端几何级数式的快速扩展，因此主要适用于高频段、大孔径的通信场景。相比之下，弧度距离仅由信号波长决定，因此在理想电小天线或磁偶极子近似下，可作为感应近场范围的基础参考尺度。对于MI通信，仅依赖弧度距离难以反映线圈尺寸和电流分布对场域的影响，故其定量公式表现为弧度距离乘以线圈尺寸修订因子，当线圈半径趋于0时，边界在数学上会坍缩为弧度距离；但在实际中，线圈尺寸的增大或频率的升高反而会激发更强的辐射分量，导致修订因子减小，使边界反而向近端收缩。此外，MI边界在海水、湿土等有损介质中会因高频引发涡流等附加损耗，其实际判定必须将介质电磁特性纳入综合求解。

1.2 磁感应耦合模型与电路特性

1.2.1 互感耦合模型

MI通信系统的核心可以等效为一对弱耦合的变压器。根据法拉第电磁感应定律，当发射线圈中通以时变电流时，会在周围空间产生准静态交变磁场，该交变磁场使穿过接收线圈的磁通量发生变化，从而在线圈两端产生感应电动势。系统的接收信号强度主要取决于收发线圈间的互感，而系统的传输效率由互感、线圈损耗、工作频率等多因素共同决定。

根据文献[12]的研究，优化线圈的自感与互感的协同效应是提升磁耦合效率、改善系统电路传输性能的有效路径。互感的大小不仅与线圈匝数、面积有关，同时受收发线圈的间距、空间对准姿态、几何排布关系的影响。Li等[13]基于串–串拓扑的MI互感耦合模型提出了线圈参数优化方案，通过提升车地间的互感与耦合系数，有效解决了高速列车因安装距离增大导致的MI信号衰减问题。在深水系泊系统等应用中，建立不同空间姿态、传输距离下的互感模型同样是系统建模的前提[14]。

1.2.2 分布电容与自谐振频率

在实际工程应用中，MI通信所用的线圈并非理想的电感元件，其匝间、层间及绕组与周边结构间会产生分布寄生电容。尤其在高频工作场景、多匝数密绕线圈中，分布电容的影响不可忽略。线圈的等效电感与固有分布电容共同决定了线圈的固有自谐振频率，当工作频率接近该频率时，线圈表现出并联谐振特性，直接影响磁耦合链路的阻抗匹配与传输效率。自谐振频率公式为：

$$f_{\mathrm{SRF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mathrm{LC}_p}} \tag{2}$$

文献[15]指出，分布电容的存在会破坏无线LC谐振传感器测量系统的距离无关特性，导致谐振频率与品质因数的测量结果出现严重偏差。此外，当工作频率接近自谐振频率时，线圈的等效电感、阻抗特性会发生剧烈变化，同样会导致磁耦合链路的测量失准，这也是线圈设计与系统工作频率选取中必须考虑的关键因素。

1.3 导电介质中的传播与损耗机制

与空气介质不同，海水、土壤和岩石等属于典

型的有损导电介质。MI信号在这些导电介质中传播时，交变磁场会激发涡流，进而产生额外的欧姆损耗并引发趋肤效应，从而形成区别于空气场景的独特信道衰减特性[16]。

1.3.1　趋肤效应与涡流损耗

当交变磁场穿过导电介质时，会在介质内部感应出涡流。这些涡流反过来会产生一个反向磁场，削弱原始磁场，使磁场幅值随介质内的穿透深度呈指数衰减，这一现象即趋肤效应。趋肤深度定义为磁场幅值衰减至介质分界面处幅值的$\frac{1}{\mathrm{e}}$时的深度，麦克斯韦方程组在无限大均匀介质中趋肤深度的完整通用表达式为：

$$\delta = \frac{1}{2\pi f\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}\left(\sqrt{1+\frac{\sigma^2}{(2\pi f)^2\epsilon^2}}-1\right)}} \tag{3}$$

其中，f为MI信号的载波频率，μ为传播介质的磁导率，ϵ为传播介质的介电常数，σ为传播介质的电导率[17]。当$\sigma \gg 2\pi f\epsilon$时，趋肤深度的公式可近似为：

$$\delta \simeq \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \tag{4}$$

式(4)本质上是求解麦克斯韦方程组得到的有损耗介质中均匀平面波的衰减特征。但在实际的MI通信中，收发天线通常为物理尺寸较小的线圈，其激发的是似稳态的磁偶极子近场，具有强烈的空间曲率，其磁场分布并非平面波。因此，直接套用平面波趋肤深度公式来表征磁偶极子场的衰减会引入显著误差，特别是当线圈尺寸与趋肤深度相近时，简单的指数衰减等效将完全失效。此时，涡流损耗的精确计算需采用矢量磁位法，对磁偶极子在分层（或均匀）有损介质中的场进行严格的积分求解。

1.3.2　路径损耗模型

针对跨介质MI通信的路径损耗建模问题，Yang等[18]将极低频磁机械天线等效为旋转磁偶极子。在此基础上，该研究构建了由空气、水和土壤构成的3层介质物理模型。针对跨非均匀介质的MI通信场景，Guo等[19]提出了信道与天线联合建模方法，包含全波解析与近场近似模型。在路径损耗建模方面，该研究推导了链路级计算公式，将受介质参数影响的天线阻抗与信道的传播、透射及反射损耗进行联合求解，理想谐振状态下传输窄带单音信号且不计噪声的稳态MI通信链路的路径损耗可以表示为：

$$L = -10\lg\frac{P_{\mathrm{r}}}{P_{\mathrm{t}}} = -10\lg\frac{r_1\omega^2|M|^2}{\zeta^{\mathrm{r}}\beta_1} \tag{5}$$

其中，路径损耗L定义为发射功率与接收功率的比值；P_{t}为发射端输入功率；P_{r}为接收端负载上的有效接收功率；r_1为接收端负载电阻；$|M|$为收发线圈的互感模量；ζ^{r}为接收端电路的总等效电阻；β_1为系统阻抗与耦合的综合参数，具体关系式为$\beta_1 = \zeta^{\mathrm{t}}\zeta^{\mathrm{r}} + \omega^2M_{\mathrm{r}}^2 - \omega^2M_{\mathrm{i}}^2$，其中$\zeta^{\mathrm{t}}$为发射端电路的总等效电阻，$M_{\mathrm{r}}$与$M_{\mathrm{i}}$分别为互感的实部与虚部。式(5)区别于传统电磁波自由空间路径损耗模型，充分考虑了MI通信近场耦合的本质特征，同时将天线本身的损耗与信道传播损耗联合建模。

1.4　跨介质传播模型

跨介质传播是MI通信主要复杂场景之一，尤其在空气与海水、高导电岩土等介质特性差异大的跨介质传输中，MI通信需要解决界面处的磁场反射损耗、介质内的涡流衰减等问题。

1.4.1　侧波传播机制

在近海面的水下MI通信场景中，磁偶极子激发的磁场传播并非只依赖海水内的直射与反射路径。Khan等[20]针对海面附近水下磁偶极子的辐射特性，改进和拓展了侧波近似公式，指出部分能量会沿界面在低损耗介质一侧传播，然后再泄漏回高损耗介质。这种侧波机制在远距离近海面水下通信中占据主导地位，因为海水的高导电特性，在海水中传播的直射波、反射波衰减极快，而侧波的主传播路径位于低损耗的空气中，整体衰减速率远低于前者，因此可支撑更远距离的水下MI通信。

1.4.2　索末菲积分与界面折射

空–海跨介质MI通信的磁场传播建模，关键是要对分层导电媒质下索末菲积分进行求解与简化。针对经典索末菲积分求解复杂、传统准静态解适用范围受限的问题，Xu等[21]通过渐近展开法对索末菲积分进行化简，推导了空气–水下跨介质垂直磁偶极子近场传播的闭式解，验证了此闭式解突破了传统准静态方法的距离与频段限制，可适用于100 kHz以下全频段、任意距离的空对海近场传播场景。柴彬彬等[22]则基于索末菲积分的分层媒质建模框架建立了跨空海界面的磁场传输模型，且通过仿真与

海上试验，验证了该模型对跨介质磁场分量传输特性的分析有效性，明确了低频磁场跨空海界面的衰减规律与工程设计约束。

1.4.3 中继辅助跨介质模型

受海水高导电特性带来的强衰减影响，MI跨空–水界面通信的单链路传输距离与覆盖能力受到严格限制，中继技术成为突破传输瓶颈、拓展系统性能的重要研究方向。在MI中继传输的基础理论与网络级优化方面，Kisseleff等[23]建立了MI波导中继与直接传输的对比优化框架，尽管该研究依托于地下传感器网络，但其中的网络级中继优化逻辑，为跨介质中继模型的链路设计提供了底层理论支撑。在此基础之上，Forget等[24]建立了MI跨介质传输的解析模型。基于该跨介质模型的分析推导与性能评估，揭示了常规无源谐振中继在尺寸和放置位置的严重局限，而适配磁屏蔽接收端的耦合中继结构可以实现接收电压的量级提升，为跨介质MI通信的中继系统设计提供了模型指导与可行方向。

2 跨介质磁感应通信技术

跨介质MI通信利用准静态磁场在导电介质中传播损耗低、多径效应弱的特性，被视为实现跨域环境信息交互的一种极具潜力的技术方案。然而，受限于近场耦合的物理本质，传统MI技术仍面临诸多难以突破的性能瓶颈，例如，准静态磁场三次方衰减规律导致的传输距离受限、高Q值谐振回路引发的可用带宽狭窄等技术难题。为缓解上述瓶颈，近年来国内外学者围绕收发器硬件架构优化、物理层传输机制与调制技术、信号处理与信道建模技术等方向开展了大量研究。为便于比较不同新型天线、增强结构、接收技术、宽带传输体制及中继方案的性能差异，本文对其工作频点、传输距离、通信速率及主要性能结果进行了整理，跨介质MI通信主要技术性能对比如表2所示。在此基础上，进一步从主要优势、局限、适用场景及当前性能瓶颈等方面对各技术进行总结，如表3所示。

2.1 收发器硬件架构优化

针对传统MI系统在低频时磁激励耦合效率低、跨介质传输后弱信号检测难度大的痛点，相关研究除了持续优化传统感应线圈的性能外，更将前沿探索方向拓展至新型磁电机械天线技术、超材料磁场增强技术，以及高灵敏度接收技术等。

2.1.1 磁电机械天线技术

在跨介质通信常用的极低频与超低频频段，电磁波波长可达数百千米甚至更高，传统电激励线圈天线若要实现可接受的辐射效率，需要远超潜航器、传感器节点承载能力的物理尺寸，在便携化场景中不具备工程可行性。机械天线通过机械运动驱动永磁体产生时变磁偶极矩，无须依赖天线尺寸与电磁波波长的匹配实现谐振，使得在便携尺寸下实现低频磁场的高效发射成为可能，主要可以分为磁机械旋转调制天线与磁电耦合型机械天线。

在磁机械旋转调制技术方向，主要围绕系统搭建与实地验证、倍频调制两个方面进行研究。Yang等[18]研制了超紧凑极低频磁机械天线，利用三相电机驱动构建等效旋转磁偶极子，在淡水下实现了210 m的远距离通信，同时验证了跨空–水界面的210 m信号传输能力。针对传统旋转磁机械天线受电机转速限制、载波频率难以提升的瓶颈，Li等[38]提出了磁快门式机械天线结构，通过旋转高磁导率屏蔽材料间歇性遮挡永磁阵列磁场，实现了信号倍频，这种方法将旋转部件从大质量永磁体替换为轻质快门结构，大幅降低了转动惯量，更容易实现电机调速与快速调制。

在磁电耦合型机械天线技术方向，主要围绕多物理场耦合效率提升、带宽与可重构性优化、跨介质通信验证三大维度进行研究。为了突破小型化低频发射机的能效瓶颈，Chang等[39]提出了一种基于硬–软混合阶跃刚度悬臂梁的电–机–磁耦合谐振器，实现了极低频/超低频磁场的高效激发，有效突破了小型化低频通信节点的能效瓶颈。针对磁电天线普遍存在的带宽窄、工作频点固定的问题，王世宇等[40]引入了机械调节机制，实现了天线频率和带宽的可逆重构，使系统能够根据信道环境灵活切换工作频点。针对空–海跨介质通信场景，Liu等[25]建立了垂直磁偶极子跨介质传输的电磁场模型，通过理论分析与实验测试，验证了该类天线在空–海跨介质场景下的通信能力，在14.1 kHz谐振频率下可实现200 bit/s速率的无差错跨介质数据传输，为小型化特低频跨介质通信系统设计提供了实验参考。

表 2　跨介质 MI 通信主要技术性能对比

技术分类	方案	文献	工作频点/频段	传输距离	速率	结论
磁电机械天线	极低频机械天线	文献[18]	70 Hz、210 Hz、340 Hz	60 m、140 m、175 m、210 m	—	水下及跨水–空介质，最长约 210 m
	磁电机械天线	文献[25]	14.1 kHz	1 m（空气中 0.7 m，水下 0.3 m）	200 bit/s	实现无差错文本传输
超材料磁场增强	水下负磁导率板增强	文献[26]	3.9 MHz	通信距离提升 56.8%	—	近距链路显著增强
	地下 M^2I 收发结构优化	文献[27]	3.15 MHz	1 m、2 m	—	1m 处接收功率提升 58.4~83.2 dB，2 m 处提升 40.2~72.2 dB
	强化学习共振成形 M^2I	文献[28]	约 2 MHz	通信范围提升约 5 倍	≥10 kbit/s	在低损耗/高损耗介质中均显著扩展范围
	超材料增强水下网络	文献[29]	甚低频、极低频	34 km	kbit/s 级	实现长距离低时延双向网络
高灵敏度接收	无死区量子磁力计	文献[30]	—	—	—	实现全向无盲区接收
	巨磁阻抗磁传感接收机	文献[31]	20 kHz	2.174 m	—	灵敏度 700 kV/T，优于典型感应式接收
	磁芯电感式谐振接收机	文献[32]	约 1 kHz 量级	25.3 m	—	检测限最低 15 pT
宽带与高谱效物理层	离散傅里叶变换扩频正交频分复用水下 MI	文献[33]	17.5 MHz	10 m、2 m、1 m	5.4 Mbit/s、10.8 Mbit/s	在不同水环境下实现高速宽带传输
	电流驱动宽带 MI	文献[34]	15 kHz	100 m	2 kbit/s	透地通信，兼顾低功耗与宽带特性
	双谐振耦合	文献[35]	25~40 MHz、30 MHz	0.7 m、0.9 m、1.1 m	>30 Mbit/s、约 40 Mbit/s、约 10 Mbit/s	显著提升近距高速传输能力
中继与协作传输	分布式时空中继协作	文献[36]	1 kHz	—	100 bit/s	在误码率为 10^{-4} 时获得 3~6 dB 分集增益
	海–空跨介质主动中继	文献[37]	2 kHz	最大发射深度从 100 m 增至 145 m	—	覆盖范围与可用带宽同步提升

表 3　跨介质 MI 通信主要技术的优势、局限与适用场景比较

技术分类	主要优势	主要局限	适用场景	当前性能瓶颈
磁电机械天线	可在便携尺寸下实现低频远距跨介质传输	带宽窄、速率低，机械结构复杂	空海、空地低速远距链路	小型化条件下的辐射效率、有效磁场强度和可用带宽仍限制链路余量
超材料增强 MI	可显著增强磁通聚焦和接收功率，并有望扩展至长距离低时延网络	对谐振匹配敏感，结构设计复杂，部分成果仍以仿真为主	水下、地下高损耗环境及广域海洋网络	磁场增强效果在工作频偏、空间位置变化和复杂介质扰动下的稳定性仍需提升
高灵敏度接收	可显著提升低频和弱磁信号接收能力，适合极低信噪比场景	量子/新型传感器集成复杂，动态范围和抗干扰要求高	极弱信号遥测、低频接收、无盲区检测	接收噪声底、环境磁噪声和前端漂移共同限制极弱磁信号检测门限
全双工通信	可实现同频双向传输并提升频谱效率	自干扰抑制困难，对姿态和环境变化敏感	近距离双向低时延通信	发射端近场强耦合产生的自干扰限制接收动态范围
宽带与高谱效物理层	可显著提升近距传输速率和频谱效率	难以同时兼顾长距离、低功耗和高数据率	近距离高速数据传输、透地宽带链路	MI 信道带宽有限且频率选择性损耗明显，制约频谱效率和稳定吞吐率
低信噪比信号处理	可提高极低信噪比下的检测、同步和解调性能	参数依赖较强，算法泛化和实时性受限	弱信号检测与同步	低信噪比下同步捕获、信号检测和解调误差累积限制误码率性能
中继与协作传输	可同时提升覆盖范围、有效带宽和分集增益	节点部署、同步和功率控制复杂	空海、地下中长距链路	多跳链路的损耗累积、时延增加和链路选择误差限制端到端可靠吞吐

2.1.2 超材料磁场增强技术

MI通信依赖准静态磁场的近场感应耦合实现信息传输，在准静态近场区内，磁场强度随距离呈三次方衰减，这种物理规律导致传统MI系统的有效通信距离在空–水、空–地跨导电介质场景中通常被限制在数米至数十米量级。针对这一瓶颈，磁超材料可通过单元阵列设计构建磁透镜，精准调控准静态磁场的空间分布，实现磁场定向聚焦，大幅降低磁场的空间扩散损耗，提升收发端的磁耦合效率与接收信号强度，从而在硬件层面有效拓展MI系统的通信距离。针对水下MI通信传输距离受限的问题，Wang等[26]提出在收发端加载负磁导率超材料板来聚焦磁通量，在3.9 MHz频率下、淡水环境中成功将有效通信距离提升了56.8%。针对地下通信场景中MI通信路径损耗大、接收信号弱的痛点，Hao等[27]优化了多构型超材料增强MI通信（metamaterial-enhanced magnetic induction, M^2I）系统的收发器，通过仿真可以实现最高提升83.2 dB的接收功率，为地下复杂环境中的MI通信性能优化提供了仿真依据与设计思路。针对现有M^2I系统存在共振失配而引起信道增益不足的问题，Chen等[28]提出基于强化学习的自适应共振成形技术，在保障100 kbit/s以上信道容量的前提下，将通信范围较传统均匀调谐方案提升了约5倍。基于海洋广域覆盖的要求，Li等[29]针对基站和移动节点分别设计了有源超表面/超球面增强的MI收发机，仿真实现了长达34 km的kbit/s级双向通信链路，表明超材料增强MI技术在海洋广域通信领域的应用前景。需要指出的是，现阶段超材料增强MI技术更适合作为提升近场耦合效率和链路性能的前沿增强手段，其现有成果仍以实验验证、仿真分析和系统设想为主，与真实复杂外场下的成熟工程部署之间仍存在距离。

2.1.3 高灵敏度接收技术

在完成跨高损耗介质的长距离传输后，MI信号的磁场强度往往衰减至pT~fT量级，极易被环境噪声与接收端本征噪声淹没。传统感应线圈的接收灵敏度受限于本征热噪声基底与磁–电转换效率，在体积受限的跨介质场景中，难以实现极微弱磁信号的有效接收。近年来，量子磁传感器以及基于巨磁阻抗效应的新型磁力计，凭借远超传统线圈的磁场探测灵敏度，为跨介质场景下的MI弱信号接收提供了一种全新的技术路径。

在量子与新型磁传感接收方向，针对跨介质微弱磁信号的检测难题，Barbeau等[41]基于隧道磁阻量子传感技术搭建了高灵敏度接收原型系统，成功实现了纳特斯拉级的弱磁信号检测与环境噪声分析。Ermak等[30]研发了基于铷-87原子的光泵量子磁力计，解决了传统光泵磁力计存在的信号接收“死区”问题，在160 Hz带宽内实现了无盲区的全向磁信号接收。Xu等[31]通过实验对比了巨磁阻抗传感器与传统感应线圈的接收性能，结果表明巨磁阻抗传感器在低频段、小尺寸约束下具备更优的磁检测灵敏度与更低的等效磁噪声，同时可以实现更优的通信传输距离。从工程成熟度来看，量子磁传感器相关研究[30-31,41]主要集中在极弱磁信号检测和原型接收，并且具有跨介质MI弱信号接收的潜力；基于巨磁阻抗效应的接收方案更接近具体链路性能验证。总体来看，目前的成果更多的是实验室原型、受控环境测试、器件级能力验证，在真实复杂外场中的系统级应用能力仍需进一步验证。

在传统感应线圈的高灵敏度优化方向，研究主要聚焦于天线本体结构的改进。Wang等[32]提出了磁芯电感式谐振器设计，通过串并联电容的谐振频率调制优化线圈调谐方式，将接收线圈的磁场检测限降至15 pT，大幅提升了弱磁信号的接收能力。Feng等[42]提出了环岛串联变截面微纳线圈结构，相较传统几何螺旋线圈实现了磁传感性能的显著优化。Xiang等[43]设计了面向水下无人潜航器远程遥控场景的超低频高灵敏度微型MI天线，可实现水下无人潜航器的远距离信号接收，在满足小型化约束的同时，为水下超低频隐蔽遥控提供了高灵敏度接收天线方案。

2.1.4 全双工通信技术

受限于高Q值谐振架构与低频工作特性，传统MI通信的单链路可用带宽极窄，频谱资源利用效率受限。同频同时全双工技术支持收发链路在同一频段、同一时刻工作，在理想自干扰完全抵消的前提下，理论上能提升频谱效率，同时降低收发切换带来的传输时延。在反向散射全双工方面，Wang等[44]提出了基于反向散射的双向全双工MI通信方案，该方案利用MI信道反向散射特性实现单频点传输，使终端免受自干扰；并结合磁波束成形与时间分配联合优化策略，大幅提升了系统的能量效率

与频谱效率。在全双工 MI 通信的物理层架构设计上，Muzzammil 等[45]提出了一种基于二维正交线圈的全双工收发架构，利用磁场方向性抑制自干扰，实现同频双向传输并使数据速率翻倍；但是，该方案对天线姿态极敏感，水下动态环境易破坏线圈正交性，导致信号衰减与自干扰激增，面临严峻的鲁棒性挑战。

2.2　物理层传输机制与调制技术

为了缓解 MI 通信受物理本质约束的窄带宽、低速率瓶颈，当前 MI 通信物理层的研究，围绕宽带化、高谱效调制等方向展开，目的是提升有限带宽内的传输能力。

传统谐振型 MI 通信系统受限于谐振 Q 值与可用带宽的固有物理矛盾，普遍存在可用带宽窄、传输速率上限低的问题；同时，传统窄带单载波调制方案难以在有限带宽内兼顾传输速率、频谱效率与抗干扰性能。因此，有限带宽内的宽带化传输与频谱效率提升以及物理层可用带宽拓展成为突破 MI 通信高速率传输瓶颈的有效路径。

为了实现 MI 的宽带化传输与频谱效率提升，Chen 等[33]将具有低峰均比特性的离散傅里叶变换扩频正交频分复用技术应用于水下 MI 通信系统以适应功率受限设备，并在 1 m 距离的高浊度海水中成功实现了 10.8 Mbit/s 的高速传输验证。Zhang 等[46]提出了轨道角动量−正交频分复用技术，通过频域子载波与空间正交模式的双重复用，在不增加频带占用的前提下成倍提升了 MI 系统的频谱效率。针对 MI 通信带宽受限的跨介质场景，Cheng 等[47]提出了基于直接序列扩频的极小频移键控 MI 调制方案，该调制方式具有极高的频谱集中度，能有效适应极窄带宽的 MI 信道并增强弱信号检测。Li 等[48]则提出了一种基于磁弹异质结构谐振器的机械共振复用磁通信方法，在不拓展单信道带宽的前提下，实现了传输带宽的成倍拓展，总数据速率较单通道提升了一个数量级，大幅提升了 MI 通信的并行传输能力与频谱利用率。

物理层带宽拓展技术则主要通过驱动电路设计、谐振耦合结构以及天线架构的优化，突破传统单谐振线圈的带宽限制，拓展系统的可用通频带，为高速率传输提供硬件基础。在驱动电路设计方面，针对传统电压驱动源的系统阻抗随频率变化呈现剧烈波动，发射线圈电流仅在谐振频点附近达到峰值，进而导致有效带宽变窄的问题，Yoon 等[34]提出了 MI 电流驱动方案，该方案确保发射电流在宽频带内保持恒定，从而在地下环境中实现了相对平坦的 MI 宽带频率响应。在谐振与天线架构优化方面，Shaw 等[35]提出的双谐振磁准静态耦合系统通过收发端差异化谐振调谐设计，在 70 cm 传输距离下实现了 30 Mbit/s 的高速点对点通信，大幅拓宽了 MI 系统的宽带传输能力。此外，Oh 等[49]设计了无互耦双线圈的多谐振环路天线，通过多个谐振频点的响应叠加，将系统通频带扩展了 50% 以上，有效缓解了传统 MI 通信中传输距离与带宽的固有矛盾。

2.3　信号处理与信道建模技术

在跨介质 MI 通信系统中，长距离传输后信号严重衰减带来的低信噪比问题、收发器硬件引入的非线性失真，会给高可靠信号的接收带来挑战。传统线性信号处理方法在强非线性失真、低信噪比等极端场景下，性能会出现明显下降，难以满足跨介质场景的高可靠接收需求。

2.3.1　微弱信号增强技术

MI 信号在海水、高电导率土壤等导电介质中长距离传输时，会因趋肤效应产生严重的传播损耗，导致接收端信号信噪比极低，极弱信号的可靠检测与高保真接收成为跨介质 MI 通信面临的挑战。

在算法与信号处理层面，针对极低信噪比下的弱信号检测难题，柴彬彬等[50]提出利用参数调节随机共振算法转化噪声能量，并结合相关接收技术，成功从−24 dB 的极低信噪比环境中提取出二进制频移键控（binary frequency-shift keying, 2FSK）微弱 MI 信号，实现了 5~7 dB 的信噪比增益。进一步地，针对跨介质传输中因复杂海况引起的未知频偏与相位失配导致的同步难题，张夏瑜等[51]提出基于多 Duffing 振子阵列的间歇混沌算法，在信噪比低于−10 dB 且存在频偏的动态 MI 信道下，成功实现了 2FSK 非合作信号的高精度盲捕获与解调。此外，Zhang 等[52]针对空−海跨介质 MI 通信场景，提出融合直接序列扩频、相干接收与多重滤波的联合信号处理框架，经过湖海实测验证，该方案有效抑制了低频与工频干扰，显著提升了接收端信噪比。

在硬件架构层面，微弱磁信号的实时高精度提取对接收机底层的数字信号处理能力有极高要求。在这一方面，低场磁共振成像系统的弱磁探测硬件

架构提供了有价值的跨领域借鉴。Jiang等[53]和Zhang等[54]分别基于FPGA和PXIe架构搭建了超低场磁信号处理平台，这些硬件利用高速模数转换与数字下变频技术结合多级滤波，实现了对极微弱磁信号的低时延、高信噪比提取。这种硬件级的高速数字前端设计，为未来MI通信系统中微弱信号的实时增强与处理提供了坚实的硬件架构参考。

2.3.2 信道建模技术

跨介质MI通信的信道传输特性受传播介质的电导率、磁导率以及介质参数非均匀分布等因素影响。传统基于磁偶极子理论的解析模型在复杂动态跨介质场景中，难以精准拟合信道时变特性与收发硬件系统引入的非线性畸变，建模精度与场景适配性存在明显局限。数据驱动的深度学习方法，可通过采集真实硬件系统的信道数据完成模型训练，拟合复杂场景下的信道传输特性与系统畸变，有效弥补传统解析模型在动态场景下的精度短板。Liang等[55]针对MI的深度学习端到端优化的梯度反向传播需求，提出基于条件生成对抗网络的信道模型，经50 cm实测数据训练后成功高精度模拟了20 kHz二进制相移键控信号的传输畸变。Liu等[56]开发了面向水下物联网的集成模拟器，结合MATLAB和COMSOL实现了从底层物理场到高层通信协议的端到端联合信道仿真。

2.4 中继与协作传输技术

传统谐振型MI信号受海水趋肤效应的制约，单链路在海水中的有效传输距离难以突破百米级，针对跨介质的长距离通信需求，中继与协作传输技术成为延伸跨介质MI系统整体覆盖范围、突破单链路传输极限的有效途径。

根据中继节点的能量状态，MI通信中的中继技术主要可划分为无源中继技术与有源中继技术两大类。无源中继技术在MI通信中最为典型的代表是MI波导技术[57]，该技术不包含复杂的信号放大、额外的能量源或数字处理模块，而是通过在发射机和接收机之间按一定几何拓扑放置一系列简单的谐振线圈来实现。无源中继具有无须额外供电、成本低廉的优势，但其系统性能对中继线圈的位置与空间方向有着极高的要求。相邻线圈间的距离和角度偏移会直接改变互感系数并破坏系统的谐振状态，一旦存在对准误差，耦合效率就会大幅下降。因此，这种无源波导机制主要适用于地下传感器网络等节点位置相对固定的稳定环境[58]。与之相对，有源中继技术则要求中继节点具备独立的电源、信号处理能力和收发装置；中继节点在接收到源端信号后，会进行放大、解调等处理，再将其重新发射。由于其对节点位置的相对要求不如无源波导严苛，有源中继极其适合部署在存在高损耗且节点易发生动态位移的复杂环境中，如水下动态监测网络与空中的跨介质信息交互[36-37]。在跨介质通信的应用中，现有的MI中继技术主要聚焦于有源协作中继方案。

在空–海跨介质场景中，Song等[36]提出基于分布式空时编码的MI跨介质中继协同方案，仿真分析表明，在10^{-4}误码率下，采用2~4个中继节点，较传统方案获得了3~6 dB的空间分集增益。在海–空跨介质场景中，张歆等[37]基于分层导电媒质磁偶极子模型分析了MI中继技术，通过优化主动中继布局，可将海空跨介质MI通信的水下覆盖范围与有效传输带宽同时提升一倍。此外，针对实际海洋等动态环境中节点运动导致的线圈角度失配问题，Zhang等[59]推导了MI解码转发中继的性能界限，并提出功率–位置联合优化策略，成功实现了动态失配场景下的中继与功率最优配置。

2.5 小型化磁感应系统的多变量工程权衡

上述收发硬件优化、宽带传输机制和中继协作等技术虽然分别从提高发射效率、拓展可用带宽和延伸覆盖范围等角度改善了MI系统性能，但小型化MI系统的工程设计本质上是在天线体积、发射功耗、传输距离和可用带宽之间进行多目标折中，而非单纯缩小天线尺寸。对于MI通信，天线体积减小会限制线圈面积、匝数、磁芯尺寸或磁体体积，进而降低有效磁偶极矩和接收感应电动势；同时，准静态近场磁场随距离快速衰减，使通信距离和接收信噪比首先受到影响。文献[39]通过高Q电–机–磁耦合谐振器提高单位体积的磁场发射效率，在降低发射功耗的同时牺牲了可用带宽和调制速率。文献[40]通过机械调节负载、刚度和阻尼实现小型化磁电天线的频率与带宽可重构，在保持小型化优势的同时换取一定的频点适应性和速率提升，但增加了结构复杂度。文献[25]利用机械天线完成空–海跨介质短距通信验证，说明小型化机械天线具有实际可行性，但其传输距离仍受近场衰减和接收信噪比限制。文献[43]则从接收端出发，将重量、体积、3 dB带宽和灵敏度联合优化，通过限制

带宽和优化磁芯、绕组参数来提高窄带弱信号检测能力。由此可见，小型化 MI 系统难以同时实现小体积、低功耗、远距离和宽带高速，应根据具体场景选择折中方案。

3　跨介质磁感应通信应用场景

根据应用环境与介质跨越特性，目前的研究主要可总结为空–海与空–地两大场景类。空–海场景可分为海洋协同数据采集、深海基础设施监测，其场景如图 1 所示。由图 1 可以看出，底层部署着海底管道等基础设施与静态传感节点，负责在底栖环境中持续进行感知数据的采集与底层网络互联；中层作为连接深海与海面的枢纽，多自主水下航行器（autonomous underwater vehicle, AUV）在此区域进行集群协同作业，实现底层节点数据的动态抵近采集与中继转发；最上层由海面作业船只和空中无人机构成，主要负责接收并汇聚来自水下的跨介质回传数据。

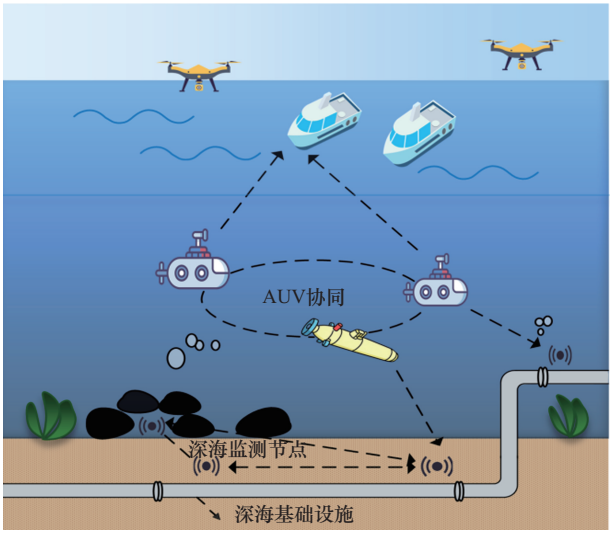

图 1　海洋协同数据采集和深海基础设施监测场景

空–地场景可分为隧道坍塌与矿井救援、农业土壤环境监测，其场景如图 2 所示。由图 2 可以看出，地下层为矿井作业区，位于此区域的发射节点负责持续采集数据，并向上发射跨介质信号；地面层由农田和隧道等场景构成，信号车作为移动节点接收来自地表节点和隧道内部节点的数据，同时将这些信号转发至空中无人机；空中层作为空中数据汇聚平台，负责接收来自地面节点的跨介质回传信息。除了对不同应用场景下应用模式和系统结构进行分析外，在实际工程场景下还需要考虑环境适应性、器件可靠性、复杂干扰下的系统稳定性等问题。

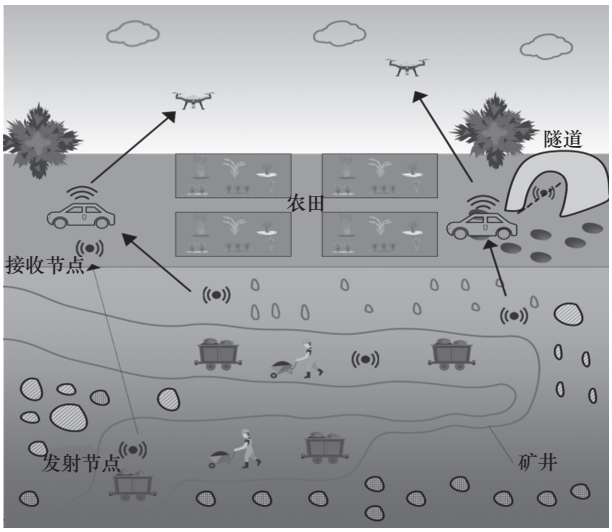

图 2　隧道坍塌与矿井救援和农业土壤环境监测场景

3.1　海洋协同数据采集

在水下物联网与复杂的海洋探测任务中，传感器节点往往需要深埋部署在海底沉积物、岩礁内部或处于水空交界面[60]。针对深埋于海底泥沙内的环境监测节点，跨越海床–海水界面的可靠通信是构建海底物联网络的关键。文献[61]提出了一种基于跨介质协作的分层多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）组网架构。在该场景中，底层深埋节点利用 MI 信道不受介质突变影响的穿透特性，进行无缝的低功耗跨介质交互，在海底构建出跨越海床介质的虚拟 MIMO 阵列；随后，系统再将聚合数据交由处于水体中的主节点，通过长距水声链路回传至水面。此外，结合底层节点搭载的通用多模软件定义调制解调器，跨介质感知网络能够对动态变化的界面信道状态进行自适应调整[62]。当系统面临穿越高浑浊度的底泥–水体界面或进行近距离高吞吐跨介质交互时，底层设备可自主无缝切换至 MI 模式，实现了 MI 跨介质强穿透力与声波水下长距优势的深度融合。

AUV 的引入极大地突破了深埋节点跨介质传输的能量瓶颈。在广域的底栖生态或海洋地质采集中，海底静态锚节点若直接向水体进行长距离的声波发射，会因跨越物理界面带来的极高损耗而迅速耗尽电池。为此，文献[63]提出了一种基于 AUV

辅助的MI与声波混合跨介质动态采集机制。以AUV作为移动数据收集器在海水中航行，当它接近海底深埋锚节点时，可以建立短距MI通信链路，利用MI特性快速完成感知数据的跨介质传输。但是AUV要实现高效的三维水下巡航路径规划和快速抵近，需要预先或实时获取水下网络节点空间位置[64]。此外，对于多AUV协同作业或潜水员编队协同作业，例如，利用空闲AUV作为中继节点，通过短距MI链路协助繁忙节点进行协作数据卸载，从而显著降低跨介质传输的总时延[65]。基于MI技术短距互联的系统可以提高隐蔽性、持续性，通过带有高灵敏度的超低频MI天线，编队成员可以在不需要视距对准、不受浑浊度影响的条件下完成低功耗、抗干扰的实时协同通信，特别是在近海底作业中能利用瞬变磁场收发安全或危险等紧急分类信号，提高系统的隐蔽性和持续性，为潜水员安全监控与AUV集群动态响应提供了高可靠的底层通信支撑。

需要指出的是，尽管通过海洋协同数据采集场景验证了跨介质MI通信技术在海底以及海水界面附近的应用性，但在实际工程部署中仍然面临着环境适应问题。一方面，海水的高盐度、长期浸泡和生物附着会对线圈绕组绝缘层、连接器密封、封装材料耐腐蚀性等要求更高，在长时间服役中可能会导致线圈的漂移和谐振失配。另一方面，AUV或潜水员等移动节点在动态作业过程中还会产生姿态、相对位置的波动，而MI链路对互感耦合敏感，易出现接收信号的起伏甚至链路断开等情况，因此面向海洋协同数据采集的跨介质MI系统在后续的研究中还要重点研究耐腐蚀封装、动态姿态鲁棒线圈、链路自适应补偿等功能。

3.2 深海基础设施监测

深海基础设施长期处于海水、沉积物、岩石等多介质交互的物理环境中，监测节点往往需要跨越海床泥沙或底层海水等物理边界进行数据传输。

在面向实际深海场景时，文献[14]针对海底传感器节点的真实部署需求，指出传统的声波、光波和射频通信在海床土壤、水体密度变化下往往性能不佳或无法工作，MI通信对散射和反射具有免疫力，验证了磁场信号在深水复杂的混合介质包围下，依然能够穿透泥沙与海水的阻碍，维持稳定的数据流转。然而，随着跨越的介质层增多，自然衰减会导致监测节点之间的有效交互距离严重受限。为了让节点在复杂的深海地形中建立更远的连接，文献[26]引入了一种基于超材料增强的MI通信方案，该方案在发射或接收线圈前方装配具有负磁导率特性的超材料板，利用微观结构带来的聚焦效应，将原本在多重介质中逐渐弥散的信号重新汇聚，极大地抵消了深海环境带来的穿透损耗。尽管目前该方案的有效覆盖仍局限于近场范围，但它契合了深海环境的生存与部署需求。这种异构介质的穿透能力，弥补了深海环境下传统通信的不足，为深海基础设施的非接触式、跨介质监测提供了一种切实可行的场景解决方案。

此外，深海基础设施监测场景还需要提升跨介质MI系统的工程可靠性。深海环境下的超高静水压会对节点外壳、密封结构以及线圈封装产生持续的机械应力，进一步降低收发器件的电气特性和长期可靠性；海水腐蚀和多介质附着场景会加速连接界面老化、材料退化和维护困难。对于海底长期值守型传感节点来说，除了跨介质MI通信外，还需满足低功耗、长寿命、低维护成本的需求。因此，在该类场景下需要加强面向高压、防腐、低漂移的器件与封装设计，并结合长期部署下的可靠性评估方法，使跨介质MI监测系统从短期实验走向长期工程应用。同时，深海基础设施附近可能存在海底电缆、机电设备以及水下作业平台等引入的复杂电磁干扰，容易造成MI链路噪声底抬升、谐振失配和弱磁信号误检。针对该问题，可利用MI线圈的方向性和极化特征进行三轴线圈接收、线圈选择或极化优化，降低姿态失配和同频干扰对链路可靠性的影响[66]。同时，深海基础设施监测数据具有较强的敏感性，因此在长期值守情况下除保证器件可靠性外，还需兼顾跨介质MI通信的可靠接收与可探测性，可同时采用差分接收[67]和安全传输机制[68]，增加覆盖面积和弱信号接收能力，避免敏感信息被非法窃取。

3.3 隧道坍塌与矿井救援

基于透地MI通信的地下工程灾害应急救援场景可划分为矿井事故应急透地通信场景[34]与隧道坍塌灾害应急通信场景[69]。

在地下工程灾害应急救援场景中，现有的通信方式存在以下问题：有线通信系统会在坍塌、透水等灾害中产生物理损毁，无法继续使用[70]；

通常的透地通信设备天线较大，不能适用于狭小地下空间，同时又不能随处携带。因此，在数十至百米级高致密、非均匀的岩土介质中，设计语音传输带宽、功耗小的高可靠通信链路仍有巨大的物理衰减阻碍。针对以上这些问题，在矿井事故应急透地通信场景中，文献[34]设计了基于电流驱动的宽频MI通信系统，采用发射线圈在矿井100 m垂深的井下到地面进行透地通信试验。结果表明，该系统可实现2 kbit/s速率的稳定数据传输，比传统电压驱动方案功耗降低约81%，在保障百米级透地传输距离的同时，兼顾了设备便携部署与低功耗需求，验证了该技术在矿井事故应急救援场景中的工程可行性。在隧道坍塌灾害应急通信场景中，文献[69]设计了基于二进制相移键控和极化码短码信道编码的MI通信系统，对不同坍塌体传输距离的仿真性能进行验证，并得出了90 cm传输距离下误码率为2×10^{-5}的结论，采用极化码信道编码后比未采用编码系统有了多个数量级的编码增益，具备了在低信噪比环境下的通信可靠性，能够满足隧道坍塌场景中的双向语音与数据通信需求。

与此同时，矿井环境中供电设备、电机、变频器、长距离电缆和金属支护结构等会产生明显的工频磁场、谐波分量及宽带电磁干扰，给MI通信中的微弱感应电压检测、相干解调和链路稳定性带来挑战。在井下强电磁噪声背景下，接收端线圈仍可能感应到由动力电缆、变频设备和金属结构扰动产生的干扰磁通，从而降低信噪比并引起误码率上升。因此，在矿井救援场景中，MI系统除需提升透地传输距离和接收灵敏度外，还应结合其磁场耦合特性设计专门的抗干扰机制。同时，塌方体中的钢筋、金属支护和非均匀岩土介质可能改变局部磁场分布，使磁耦合系数和接收功率产生波动，因此还需开展井下电磁环境建模、金属障碍物磁场扰动评估和应急设备快速部署方法研究。此外，井下救援信息涉及人员位置、调度指令和生命体征等敏感数据，在保证MI信号可靠接收的同时，还应引入加密认证、身份校验和抗非法截获机制，以提升MI应急通信系统在矿井环境中的可靠性、安全性和工程落地能力。

3.4　农业土壤环境监测

在智慧农业的发展趋势下，数据驱动的精细化决策对于优化作物生长和水资源综合管理具有重要意义。土壤对电磁波呈现出极高的吸收与衰减特性，相比于极易受环境介质影响的传统电磁波，MI以磁场为载体，对非磁性的土壤介质具有优异的穿透性，受土壤水分及盐分波动的影响较小。在此背景下，将MI通信技术与地下物联网相融合，正成为克服复杂农田环境中环境感知与数据跨介质传输瓶颈的关键技术路径之一。目前，跨介质MI在智慧农业领域的应用部署主要聚焦于农田生长环境的三维感知与精准灌溉以及空–地–地下多智能体跨介质协同作业。

在农田生长环境的三维感知与精准灌溉场景中，农业的水资源管理高度依赖于对广域土壤水分空间分布的动态掌握。文献[71]提出了一种基于MI网络的大尺度非均匀土壤湿度传感方案。该方案利用磁信号穿透不同介质时的参数变化特征，在低节点密度下构建互联链路，实现了三维土壤含水量分布的高分辨率重建，为精准农业的大规模水分监测与智能灌溉提供了空间数据支撑。在空–地–地下多智能体跨介质协同作业场景中，为了突破单一地下节点通信距离受限的系统瓶颈，基于无人机或移动机器人进行动态数据采集的跨介质协同场景成为研究热点。文献[72]提出对于地下信号传输，虽然单一MI节点的通信距离通常局限于几米以内，但可以通过安装由小型收发线圈组成的中继节点来保障传输的连续性，从而建立起突破土壤介质的通信链路。地下节点利用这些链路将深层土壤温湿度及PH等参数通过地表传输给移动设备，从而实现地下数据驱动地上装备的闭环管理，有效提升了农业作业的安全性与精度。

对于农业土壤环境监测场景，其实际部署过程中还会面临土壤参数时变带来的环境适应性问题。土壤含水率、盐分浓度、温度等随着季节、灌溉过程和作物生长状态发生变化，从而使介质参数发生变化，进一步引起链路损耗、谐振状态和通信距离的变化；此外，农田场景要求节点低成本、大规模部署和长期免维护，对硬件复杂度、功耗和可靠性等方面的要求比较高，未来需要研究针对非均匀时变的土壤环境自适应调谐、低功耗组网和长期稳定封装等技术，从而提升跨介质MI在智慧农业场景中的实际可部署性。

4 未来展望

尽管跨介质MI通信在理论模型、硬件实现及应用场景探索方面取得了显著进展，但要实现从实验室原型到大规模全域部署的跨越，仍面临着物理机制、工程实现与网络架构层面的诸多深层次挑战。

4.1 高动态信道建模与AI原生空口设计

由前文关于跨介质传播模型、信道建模方法和弱信号处理技术的讨论可以看出，MI信道的时变特性往往与介质参数变化、节点运动、姿态扰动以及硬件非理想因素交织在一起，导致传统解析模型难以支撑复杂外场下的可靠链路预测与自适应传输，未来可在传统解析模型的基础上进一步融合数据驱动方法和物理先验算法，以提升复杂动态环境下的信道表征、参数预测和自适应传输能力。现有信道模型多基于准静态假设，难以精确表征海洋波浪、地下湿度变化引起的介质参数时变，以及节点运动或天线振动引入的快衰落[73]。跨介质界面的随机波动进一步加剧了信道估计的难度。数据驱动的深度学习方法展现出良好的拟合能力，如基于条件生成对抗网络的端到端模型已初步验证其对MI信号非线性畸变的模拟能力。然而，将AI部署于MI系统仍需攻克两大瓶颈：一是纯数据驱动的“黑盒”模型缺乏物理可解释性，未来可探索物理启发神经网络，将麦克斯韦方程组等先验知识嵌入网络结构，提升少样本泛化能力；二是MI节点算力与资源极端受限，亟须发展轻量化智能物理层技术。构建大规模实测数据集，形成离线预训练与在线微调结合的模型演进闭环，是支撑高可靠通信的关键。

4.2 6G融合与空–天–地–海一体化

在单一链路覆盖能力和多跳传输性能仍受限制的背景下，MI通信在跨介质和弥补声、光、电通信盲区方面具有一定优势，其近场耦合特性也决定了其更适合作为全域网络中的近距离高可靠接入方式和移动协同中继手段，与其他通信体制协同支撑跨介质信息传输。随着6G技术演进以及空–天–地–海一体化网络宏大愿景的展开，网络架构的立体化与接入节点的极强机动性对跨域数据交互与组网动态性提出了严峻挑战[74]。将MI技术深度融入多模态异构网络，填补声、光、电信号在跨介质界面与高损耗环境中的传输盲区，是构建空–天–地–海全域立体网络的关键。

在物理层，可借鉴6G超大规模天线阵列的近场波束聚焦新范式[75]，探索多线圈协同的MI阵列波束赋形技术，在磁准静态场内实现能量聚焦，突破单线圈传输距离限制。在网络架构层面，需设计兼容声、光、电、磁的统一网络架构，攻克跨介质环境下的统一寻址、多模态无缝切换及跨层服务质量保障等难题。在跨域协同方面，面向广域覆盖需求，可通过对无人机、无人水面艇及AUV等移动中继的动态轨迹规划与资源分配，构建按需随动的跨介质数据采集与中继网络。

4.3 新型收发硬件与量子传感技术

受低频发射效率低、弱磁信号检测困难等因素制约，收发端硬件能力仍是支撑跨介质MI通信走向实用化的关键基础，未来需要围绕发射效率、带宽可调、接收灵敏度和工程集成能力继续优化。发射端方面，传统旋转磁体机械天线虽实现了小型化，但电机磨损、高频辐射受限及波形失真仍是瓶颈。基于磁快门的新构型可在不增加电机转速的前提下实现载波倍频；基于微机电系统工艺的微型磁电天线则通过多物理场耦合大幅提升低频辐射效率，但其高Q值特性导致带宽极窄[76]。未来需探索阵列耦合或频段可重构技术，以破解带宽窄、阻抗匹配难的应用痛点。接收端方面，传统线圈在极低频段感应电动势微弱，严重制约通信距离。量子隧道传感器、原子磁力计及巨磁阻抗传感器在极低频段具备极高的灵敏度，表明其在跨介质MI弱信号接收中具有应用潜力。然而，这类技术当前更多体现为高灵敏检测能力和原型接收能力，其在海洋、矿井等真实外场条件下的长期稳定应用仍存在明显差距。因此，将其推向工程实用仍面临严峻挑战，除需突破实验室设备在尺寸、重量、功耗方面的限制外，还需解决高灵敏度传感器在地球磁场波动下的动态范围受限问题，并开发有效抑制平台自身电磁干扰的滤波隔离技术。

4.4 多维复用与宽带物理层增强技术

前文关于宽带化调制、全双工传输的研究分析表明，MI系统在提升磁耦合效率，拓展可用带宽和保持链路可靠性之间还有待进一步平衡，未来可结合空间复用、多维复用等技术提升有限频带内的容量和鲁棒性。空间复用方面，轨道角动量近场MI通信利用不同模态间的正交性提升信道容量，

但高阶模态随距离衰减更快，且在复杂介质中相位结构易畸变，亟须探索扰动下的模态发散与串扰抑制机制。双工复用方面，同频全双工理论上可使频谱效率加倍，但需消除高达 100 dB 以上的自干扰。二维正交收发架构依赖精确姿态对准，在动态环境中难以维持稳定性；反向散射全双工方案则主要适用于极近距离的非对称场景。针对近距离大容量数据交互需求，宽带物理层设计也取得进展，如离散傅里叶变换扩频正交频分复用和电流驱动宽带发射方案。但宽带 MI 通信客观上难以兼顾长距离与高数据率。未来研究宜聚焦于场景自适应的物理层多模态切换机制，在节点近距离对接时利用宽带技术实现 Mbit/s 级高速传输，在中长距离跨域场景下自动回退至低速高可靠的遥测模式。

5　结束语

跨介质 MI 通信具有在导电介质和跨介质场景中的独特传播优势，为以往采用传统通信技术无法应用的水下、地下以及跨域场景提供了新的通信技术。本文归纳总结了跨介质 MI 通信的基本理论、主要技术发展和典型应用，阐述了目前跨介质 MI 通信所处的研究阶段、面临的关键难点。今后的跨介质 MI 通信需要不断突破物理机制和工程瓶颈，引入 6G 空天地海一体化网络架构，支撑全域无缝覆盖的通信目标。

参考文献：

[1] Li Y Z, Wang S N, Jin C, et al. A survey of underwater magnetic induction communications: fundamental issues, recent advances, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2466-2487.

[2] Akyildiz I F, Wang P, Sun Z. Realizing underwater communication through magnetic induction[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11): 42-48.

[3] Yang S J, Lu Y, Wei Y, et al. A feasibility study of cross-medium direct acoustic communication between underwater and airborne nodes[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(12): 2340.

[4] Jiang T, Zhang Y X, Liu G H. Magnetic induction communication in extreme environments: principles, technologies, and challenges[J]. China Communications, 2025, 22(1): 256-264.

[5] Pal A, Kant K. NFMI: near field magnetic induction based communication[J]. Computer Networks, 2020, 181: 107548.

[6] Gong Z, An Z L, Dai D H, et al. Enabling cross-medium wireless networks with miniature mechanical antennas[C]//Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2024: 648-662.

[7] Guo H Z, Sun Z, Zhou C. Practical design and implementation of metamaterial-enhanced magnetic induction communication[J]. IEEE Access, 2017, 5: 17213-17229.

[8] Li Y L, Xu T Q, Wang Y, et al. Development of an HTS-SQUID-based receiver for long-range magnetic induction communication in extreme environments[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4434.

[9] Zhang Y X, Chen D, Liu G H, et al. Performance analysis of two-hop active relaying for dynamic magnetic induction based underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(10): 6938-6949.

[10] Sun S, Li R W, Han C, et al. How to differentiate between near field and far field: revisiting the Rayleigh distance[J]. IEEE Communications Magazine, 2025, 63(1): 22-28.

[11] 刘光华, 李秋澎, 赵国政, 等. 磁感应通信的边界建立与分析[J]. 科技导报, 2025, 43(14): 69-81.
Liu G H, Li Q P, Zhao G Z, et al. Boundary establishment and analysis of magnetic induction communication[J]. Science & Technology Review, 2025, 43(14): 69-81.

[12] Sathish K. Next-generation underwater magnetic induction systems by exploiting self and mutual inductance synergies[C]//Proceedings of the 2025 6th International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1866-1870.

[13] Li B, Ding H, Dai P F, et al. Research on antenna parameter optimization scheme for vehicle-ground induction communication system in high-speed train control systems[C]//Proceedings of the 2024 4th International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE). Piscataway: IEEE Press, 2024: 376-382.

[14] Zhao Z, Ge S S, He W, et al. Modeling and simulation of magnetic induction wireless communication for a deepwater mooring system[C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2012: 373-378.

[15] Masud M, Vazquez P, Rehman M R U, et al. Measurement techniques and challenges of wireless LC resonant sensors: a review[J]. IEEE Access, 2023, 11: 95235-95252.

[16] Zhang X, Huang H, Cheng R. Channel capacity of magnetic induction communication from air to undersea[C]//2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.

[17] Ma H, Liu E, Ni W, et al. Through-the-earth magnetic induction communication and networking: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 2263-2305.

[18] Yang S, Geng J, Zhou H, et al. Long-range EM communication underwater with ultracompact ELF magneto-mechanical antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 71(3): 2082-2097.

[19] Guo H, Ofori A A. Joint channel and antenna modeling for magnetic induction communication in inhomogeneous media[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 1457-1469.

[20] Khan M A, Wang H, Wang Z, et al. A novel low-frequency lateral wave approximation formula of submerged magnetic dipoles near sea surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 23(2): 708-712.

[21] Xu H, Gu T, Zhu Y, et al. Communication with a magnetic dipole: near-

field propagation from air to undersea[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(2): 1052-1064.

[22] 柴彬彬, 张歆. 跨空海界面磁感应通信特性分析及应用[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(21): 129-135.
Chai B B, Zhang X. Research on characteristic analysis and application of air-to-undersea magnetic induction communication[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(21): 129-135.

[23] Kisseleff S, Akyildiz I F, Gerstacker W H. Throughput of the magnetic induction based wireless underground sensor networks: key optimization techniques[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(12): 4426-4439.

[24] Forget A, Rangraz P, Bousquet J F. A model of the magneto-inductive link with relays to cross the air-water interface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(5): 4549-4563.

[25] Liu Z G, Song Y X, Yang X Q. Research on air-sea cross-medium communication based on mechanical antenna[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 2991(1): 012026.

[26] Wang Z H, Zhang X T, Xu W. A new method and implementation of metamaterial-enhanced underwater magnetic induction communication system[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1848-1853.

[27] Hao J J, Zhao D H, Shang X R, et al. Optimization of M2I based transceiver structure for underground communication system[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 8th International Conference on Signal Processing and Machine Learning (SPML). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-8.

[28] Chen Y W, Liu G H, Wang J T, et al. Resonance-forming: achieving high gain metamaterial-enhanced magnetic induction communication based on reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.

[29] Li Z Y, Wang J T, Sun Z. Long-distance low-latency underwater networks using metamaterial-enhanced magnetic induction[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2024 - 2024 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2024: 4738-4743.

[30] Ermak S, Kuzmin R, Ermak O, et al. Magnetometer without “dead zones” for receiving magnetic induction signals[C]//Proceedings of the 2025 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). Piscataway: IEEE Press, 2025: 404-407.

[31] Xu M, Asfour A, Traore P S. Magnetic sensors for magnetic communication: a comparison between giant magneto-impedance (GMI) and induction-based sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 61 (6): 1-4.

[32] Wang Z G, Deng Z Y, Jin Q R, et al. Magnetic core inductor-based resonator for magnetic sensing and communication[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 7th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). Piscataway: IEEE Press, 2024: 593-596.

[33] Chen Q R, Huang Y F, Gao Y H, et al. Experimental demonstration of a broadband underwater magnetic induction communication system enabled by DFT-s-OFDM in various underwater environments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2025, 51(1): 158-169.

[34] Yoon K S, Oh J H, Lee H J, et al. Wideband magnetic induction wireless communications in challenging underground environments: a current-driven scheme[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(13): 24929-24943.

[35] Shaw S, Yang D, Barik G, et al. Enhanced channel capacity underwater multi-diver communication with dual-resonant magnetoquasistatic coupling[C]//Proceedings of the 2025 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2025. Piscataway: IEEE Press, 2025: 118-121.

[36] Song W X, Zhang X, Ge Y Z. Cross-border magnetic induction relay cooperative communication scheme based on distributed space-time coding[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-4.

[37] 张歆, 童昱泽, 田志颖, 等. 基于中继传输的海-空跨界磁感应通信覆盖范围与可用带宽分析[J]. 物理学报, 2020, 69(24): 299-306.
Zhang X, Tong Y Z, Tian Z Y, et al. Coverage and transmission bandwidth analyses of underseato-air magnetic induction communication with relay transmission[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(24): 299-306.

[38] Li N, Shan Y Y, Bao J Q, et al. Magnetic shutter mechanical antenna for cross-media communication[J]. Chinese Journal of Electronics, 2025, 34(2): 464-474.

[39] Chang J L, He Z Z, Xu S P, et al. A high-Q electric-mechano-magnetic coupled resonator for ELF/SLF cross-medium magnetic communication[J]. Advanced Materials, 2024, 36(13): 2309159.

[40] 王世宇, 窦高奇, 易达, 等. 面向跨介质通信与探测的可重构特低频小型化磁电天线[C]//中国电子学会. 2025年全国微波毫米波会议报告集-WA2T. 西安, 2025: 2-4.
Wang S Y, Dou G Q, Yi D, et al. Reconfigurable miniaturized extremely low frequency (ELF) magnetoelectric antenna for cross-medium communication and detection[C]//Chinese Institute of Electronics. Proceedings of 2025 National Conference on Microwave and Millimeter Waves-WA2T. Xi’an, 2025: 2-4.

[41] Barbeau M, Huang S, Krayem N, et al. Long range magnetic field-based communications taking advantage of quantum sensing[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 14th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS). Piscataway: IEEE Press, 2025: 307-312.

[42] Feng Q H, Ma X H, Xin M Y, et al. Round about tandem coil design for high performance magnetic sensing[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). Piscataway: IEEE Press, 2024: 3170-3175.

[43] Xiang Y L, Yan B. High sensitivity miniaturized remote control magnetic induction antenna design[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1414-1421.

[44] Wang J Y, Cheng W C, Zhang W, et al. Backscatter based bidirectional full-duplex magnetic induction communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(11): 6258-6271.

[45] Muzzammil M, Al-Kuwari S, Ahmed N, et al. Full-duplex magnetic induction communication: opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 31(4): 293-298.

[46] Zhang T Y, Zhang H L, Elkashlan M. Near-field magnetic induction

OAM communications with OFDM modulation[C]//Proceedings of the ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 3939-3944.

[47] Cheng R X, Zhang X, Qi X M, et al. Modulation technology in cross-domain magnetic induction communication[C]//Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.

[48] Li J L, Rong J M, Xing E B, et al. Mechanical resonance multiplexed magnetic communication via magnetoelastic heterostructured WGM resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(20): 9742-9750.

[49] Oh T, Cho I K, Lee H J, et al. Design of multi-resonant loop antenna for magnetic induction communication[C]//Proceedings of the 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 2086-2088.

[50] 柴彬彬, 彭铮雪, 张歆. 基于参数调节随机共振的微弱磁通信信号处理研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(2): 152-158.
Chai B B, Peng Z X, Zhang X. Research on weak signal processing of magnetic communication based on parameter adjusted stochastic resonance[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(2): 152-158.

[51] 张夏瑜, 姜嘉豪, 焦杰, 等. 海洋跨介质 2FSK 低频磁通信的高精度同步与频偏估计[J]. 遥测遥控, 2026, 47(2): 37-47.
Zhang X Y, Jiang J H, Jiao J, et al. High-precision synchronization and frequency offset estimation for ocean trans-medium 2FSK low-frequency magnetic communication[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2026, 47(2): 37-47.

[52] Zhang X, Cheng R X, Qi X M, et al. Signal processing in air-to-undersea magnetic induction communication[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 15th International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.

[53] Jiang Z S, Zhang M H, Zhang Q, et al. A low-field magnetic resonance signal transmission and reception processing platform[C]//Proceedings of the 2024 7th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 65-69.

[54] Zhang Y Y, Wang H M. Research on communication transmission of ultra-low field MRI digital receiver based on PXIe architecture[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1302-1307.

[55] Liang X T, Ze Q J. A CGAN channel model of magnetic induction communications for deep learning end-to-end optimization[C]//Proceedings of the 2025 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-3.

[56] Liu S Z, Ullah I, Muzzammil M, et al. Empowering Internet of underwater things: an integrated simulator for underwater magneto-coupled wireless sensor networks[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2025, 8(1): 109-114.

[57] Sun Z, Akyildiz I F. Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7): 2426-2435.

[58] Kisseleff S, Akyildiz I F, Gerstacker W H. Digital signal transmission in magnetic induction based wireless underground sensor networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2300-2311.

[59] Zhang Y X. Cooperative magnetic induction communications: performance analysis and power-location optimization[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.

[60] Selvi V M, Brindha S, Harini S, et al. Advancement in underwater wireless communication technology for efficient marine application[C]//Proceedings of the 2025 International Conference on Computing and Communication Technologies (ICCCT). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.

[61] Ren Q Y, Sun Y J, Wang T T, et al. Energy-efficient cooperative MIMO formation for underwater MI-assisted acoustic wireless sensor networks[J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3641.

[62] Zhilin I V, Bushnaq O M, De Masi G, et al. A universal multimode (acoustic, magnetic induction, optical, RF) software defined modem architecture for underwater communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(12): 9105-9116.

[63] Wei D B, Huang C P, Li X H, et al. Power-efficient data collection scheme for AUV-assisted magnetic induction and acoustic hybrid Internet of underwater things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(14): 11675-11684.

[64] 羊秋玲, 唐智超, 朱荣鑫, 等. 水下无线传感器网络节点定位方案综述[J]. 通信学报, 2025, 46(8): 225-240.
Yang Q L, Tang Z C, Zhu R X, et al. Survey of node localization scheme in underwater wireless sensor network[J]. Journal on Communications, 2025, 46(8): 225-240.

[65] Liu P, Zhao Y S, Hu Z Y, et al. MI-based cross-medium communication for multi-auv-assisted underwater data acquisition[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.

[66] Guo H Z, Sun Z, Wang P. On reliability of underwater magnetic induction communications with tri-axis coils[C]//Proceedings of the ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

[67] Kim J Y, Lee H J, Lee J H, et al. Experimental assessment of a magnetic induction-based receiver for magnetic communication[J]. IEEE Access, 2022, 10: 110076-110087.

[68] Wang J Y, Liu B, Ren J X, et al. High-security physical layer encryption scheme for dual-mode index modulation-aided OFDM in magnetic induction communication[J]. Optics Letters, 2025, 50(2): 285-288.

[69] Wu F, Yang H, Pan C Y, et al. Simulation of a magnetic induction communication system for tunnel collapse scenarios[C]//Proceedings of the 2025 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). Piscataway: IEEE Press, 2025: 213-216.

[70] 胡青松, 杨维, 丁恩杰, 等. 煤矿应急救援通信技术的现状与趋势[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 163-179.
Hu Q S, Yang W, Ding E J, et al. State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 163-179.

[71] Li Z Y, Sun Z, Singh T, et al. Large range soil moisture sensing for inhomogeneous environments using magnetic induction networks[C]// Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

[72] Cariou C, Moiroux-Arvis L, Pinet F, et al. Internet of underground things in agriculture 4.0: challenges, applications and perspectives[J]. Sensors, 2023, 23(8): 4058.

[73] Ma H L, Liu E W, Fang Z J, et al. Fast-fading channel and power optimization of the magnetic inductive cellular network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 15096-15111.

[74] 谢健骊, 陈龙, 张泽鹏, 等. 基于位置预测模型的空天地一体化网络切换算法[J]. 通信学报, 2024, 45(12): 162-178.
Xie J L, Chen L, Zhang Z P, et al. Handover algorithm for space-air-ground integrated network based on location prediction model[J]. Journal on Communications, 2024, 45(12): 162-178.

[75] Zhang H Y, Shlezinger N, Guidi F, et al. 6G wireless communications: from far-field beam steering to near-field beam focusing[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(4): 72-77.

[76] Wang S Y, Song G M, Dou G Q, et al. Mechanism and key technology of low-frequency magnetoelectric antenna: a systematic review[C]// Proceedings of the 2024 3rd International Joint Conference on Information and Communication Engineering (JCICE). Piscataway: IEEE Press, 2024: 26-32.

[作者简介]



冯川（1991– ），女，博士，重庆邮电大学讲师，主要研究方向为磁感应通信、算力网络、任务卸载。



金孟鑫（2002– ），男，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为磁感应通信、算力网络。



廖亮（2001– ），男，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为磁感应通信、算力网络。



张旭（1992– ），男，博士，重庆邮电大学副教授、博士生导师，主要研究方向为软件定义网络、光网络、算力网络。



郭磊（1980– ），男，博士，东北大学教授、博士生导师，主要研究方向为光网络和无线通信网络。