

# 无线通信发展范式与RIS的赋能作用



## Development Paradigm of Wireless Communication and Enabling Role of RIS

金梁/JIN Liang, 孙小丽/SUN Xiaoli, 钟州/ZHONG Zhou,  
许晓明/XU Xiaoming, 陈如翰/CHEN Ruhan,  
张剑/ZHANG Jian, 邬江兴/WU Jiangxing

(战略支援部队信息工程大学, 中国 郑州 450002)  
(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203002

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220606.1637.002.html>

网络出版日期: 2022-06-07

收稿日期: 2022-05-10

**摘要:** 无线通信利用电磁波承载信息实现远距离通信, 摆脱线缆束缚, 推动世界经济发展和 社会进步。无线通信发展范式是与无线通信技术演进相关的自然规律、理论基础和实践规范。回顾了已有无线通信发展范式的适用范围、关键技术等, 并指出无论被动适应还是主动利用无线环境的发展范式均受到“空频谱墙”的制约, 对抗无线扰动的能力还处于“靠天吃饭”的阶段, 没有从根本上改变受限于无线环境的状况, 制约了无线通信服务能力的提升。针对这一瓶颈问题, 提出“改造定制无线环境”的无线通信发展新范式, 并探索了新范式的理论和智能超表面(RIS)赋能的实践规范。

**关键词:** 范式; 无线通信; RIS

**Abstract:** Wireless communication uses electromagnetic waves to carry information to achieve long-distance communication, which gets rid of the shackles of cables and promotes world economic development and social progress. The wireless communication development paradigm is a natural law, theoretical basis, and practical specification related to the evolution of wireless communication technology. The scope of application and key technologies of the existing wireless communication development paradigms are reviewed, and it is pointed out that development paradigms for both passive adaptation and active use of the wireless environment are restricted by the “space spectrum wall”. The ability of existing wireless communication development paradigms to resist wireless disturbances is still at the stage of “depending on heaven for food”, and the situation limited by the wireless environment has not been fundamentally changed, which restricts the improvement of wireless communication service capabilities. In response to this bottleneck problem, a new paradigm of wireless communication development by “reforming and customizing wireless environments” is proposed. The theoretical exploration of the new paradigm and practical specifications based on the reconfigurable intelligent surface (RIS) are introduced.

**Keywords:** paradigm; wireless communication; RIS

范式(Paradigm)的概念和理论最初由美国著名科学哲学家托马斯·库恩在1962年提出并在《科学革命的结构》中系统阐述<sup>[1]</sup>。范式从本质上讲是一种理论体系、理论框架, 是开展科学研究、建立科学体系、运用科学思想的坐标、参照系和基本方式。范式有3个基本特点: 第一, 在一定的范围内含有普适性; 第二, 是一种以基本的定理、原理、应用及相关装备等集成的综合体; 第三, 为科研与技术开发提供了可重现的成功模板。

2007年1月11日, 图灵奖得主吉姆·格雷发表了一个

基金项目: 国家自然科学基金(61871404)

名为“科学方法的革命”的演讲<sup>[2]</sup>, 将科学研究分为4类范式: 实验/测量、理论分析、数值模拟/仿真和数据驱动。18世纪以前, 人类的科学研究主要以记录和描述自然现象为特征, 称为“实验科学”(第1范式)。以“现代科学之父”伽利略的物理学、动力学为代表的科学发展开启了现代科学之门。然而, 由于实验/经验科学经常从主观的感觉经验出发并且受到实验条件的限制, 因此结论会带有盲目性。18—19世纪, 研究者开始在已有经验、事实、认知的基础上尝试尽量简化实验模型, 通过去除复杂干扰尽可能抓住关键因素, 并经过演绎推理, 归纳出新的理论或模型, 这称为“理论科学”(第2范式)。在该范式的指导下,

数学中的集合论、图论、数论和概率论，物理学中的牛顿三大定律、量子理论、相对论，电磁学中的麦克斯韦理论，生物学中的达尔文进化论等应运而生。该范式存在的挑战是：随着理论验证的难度和代价越来越高，科学研究面临瓶颈。20世纪中期以后，电子计算机的发明使得研究者们能够利用计算机对复杂的现象进行模拟仿真和相关计算。简言之就是用计算机来做实验，这称为“计算科学”（第3范式）。该范式主要包括数值模拟、模型拟合与数据分析、计算优化三大领域。21世纪以后，随着信息技术的飞速发展，人类社会产生的数据呈爆炸式增长。此外，计算机处理和存储能力也在不断提升，这使得计算机不仅能做模拟仿真，还能对海量数据进行处理和分析总结，发现新规律，揭示新机制，从而产生“数据驱动科学”（第4范式）。该范式是在大数据驱动下科学知识发现模式的新变革，而前3种科学范式则以假设为驱动，数据只是用来验证假设的支撑。可以看出，科学研究范式是一个历史阶段的思维视角和方法论，不是一种范式取代另外一种范式，他们之间存在继承发展的关系。其中，经验科学是理论科学的实践基础，理论科学能够对经验科学提供理论指导，计算科学是对经验科学和理论科学方法的进一步优化，而数据驱动科学是对前3类范式的补充。此外，范式的变革往往在现有问题无法解决、科学研究面临瓶颈时才会应运而生。

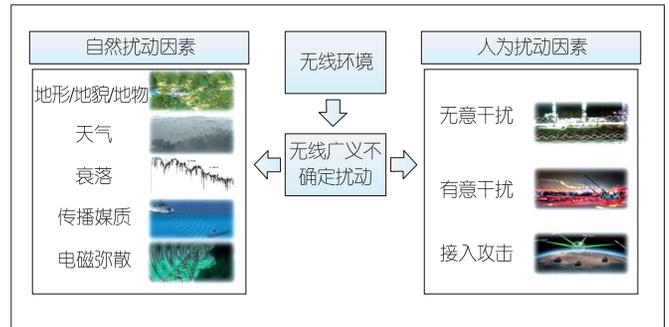
无线电应用始于1897年“无线电通信之父”马可尼的无线电报通信实验。100多年来，无线通信的飞速发展对于人类生活和社会进步有着重大的意义。本文根据范式的定义，回顾和总结无线通信发展历程，给出无线通信发展范式的思考与展望。由于任何发展范式总有其适用范围和阶段性特点，原有无线通信范式无法解决目前无线通信中一些瓶颈问题，本文从世界观和方法论的角度提出无线通信演进中可预见的新范式及其实践规范，为未来无线通信变革性发展提供理念参考。

### 1 无线通信发展范式回顾与分析

无线通信发展范式是与无线通信技术演进相关的自然规律、理论基础和实践规范，如同一般科学发展范式一样，也是阶梯式发展的。

无线通信是通过电磁波在无线环境中传递信息的过程，同时也是对抗与无线环境密不可分的广义不确定扰动的过程。其中，无线通信中的广义不确定扰动是指直接或间接利用无线环境的不确定性和不可操控性引发的非期望事件，包括自然因素和人为因素引发的扰动。如图1所示，自然扰动

因素包括地形/地貌/地物、天气、衰落、传播媒质、电磁弥散等，人为扰动因素包括无意干扰、有意干扰、接入攻击等。



▲图1 无线广义不确定扰动

从电磁波与无线环境相互作用规律的认知过程来看，无线通信的发展历程就是一部对抗广义不确定扰动的历史。基于世界观和方法论的视角，无线通信的发展过程可分为3种范式：发现与使用电磁波、被动适应无线环境、主动利用无线环境。下面我们对无线通信发展已有的3种范式进行简要阐述，归纳各种范式实践规范的特点，并从科学范式的视角探讨无线通信的发展与困局。

#### 1.1 无线通信发展范式1:发现与使用电磁波

1873年麦克斯韦在《电学和磁学论》中提出了电磁波的传播机理。1887年赫兹通过实验验证了电磁波的存在，从而为无线电通信的产生创造了条件，并为1897年马可尼使用电磁波首次实现跨洋的无线电报通信奠定基础。这便形成了无线通信发展的最初范式。该范式所蕴含的世界观为：在麦克斯韦、赫兹等人的工作基础上，首次发现电磁波的存在及传播的科学规律，认识到人类可以摆脱有线通信的束缚、开启无线电通信的新时代；对应的方法论为：如何利用电磁波承载信息实现远距离通信，解决无线通信的有无问题，其中标志性技术是无线电报。无线通信发展的最初范式仅采用增加发射功率、简单编码、重复发送等方式（如摩尔斯码）来对抗自然扰动，还没有涉及复杂无线环境中存在的人为扰动及安全等问题。

#### 1.2 无线通信发展范式2:被动适应无线环境

随着无线通信的发展，广义不确定扰动逐渐成为发展中的主要矛盾。在香农提出信息论之前，人们普遍认为固定速率信息发送的误差概率是不可忽略的，而香农从理论上证明了当通信速率低于信道容量时，总能找到一种编码方式，以

任意低的错误率传送信息<sup>[3]</sup>，即给出了特定信道上的无差错最大传输速率，为有效的信息传输提供了上界，为数字通信奠定了基础。因此，第2范式所蕴含的世界观以香农信息论和香农信道容量为代表。它阐明了无线环境带来的扰动与无线通信质量之间存在内在联系，即要在不可靠的信道上进行可靠的信息传输，必须要有与之匹配的传输方式。为实现上述目标，该范式的方法论是如何适应复杂无线环境，寻找逼近无线通信能力极限的方法。

在对抗自然扰动方面，该范式主要经历了模拟与数字通信两个阶段，利用编码、调制、滤波以及波形设计等把信号转换成适合在信道上传输的形式，从而提高信息传输的可靠性。其中，预编码技术通过在发射端对信号进行设计使得发送信号与信道匹配，从而降低符号间干扰，提高传输性能，同时能够有效降低接收机处理复杂度；均衡技术在接收端对经过信道畸变的信号进行均衡处理，通常用滤波器来校正和补偿失真的脉冲，减少码间干扰的影响；自适应调制编码技术根据终端反馈的信道状况来确定信道容量，从而自适应调整调制方式和编码速率，以便数据传输适合信道变化，实现更高的通信速率。

在对抗人为扰动方面，最初是主要通过对时、频等无线公共资源进行划分与管理来实现的。世界各国都对时频等无线公共资源进行科学合理的规划，结合不同应用领域或场景的特点，给各类无线电业务划分专用频段并成立有关部门进行严格监督管理<sup>[4]</sup>。随后，频分多址（FDMA）、时分多址（TDMA）和码分多址（CDMA）技术也相继在移动通信中得以应用，通过给不同用户分配正交的频率、时间和码块资源来抵抗用户间干扰。然而，无线电频谱等资源是有限的资源，无线通信对频谱的依赖性越来越大。因此，业界不断开发新的频率资源，例如，毫米波与太赫兹通信等<sup>[5]</sup>，用来有效解决日益紧张的频谱资源和当前无线系统容量限制的问题。另外，为了提高频谱利用率，认知无线电技术近年来得到了学术界的广泛关注。通过从环境中感知可用频谱，认知无线电技术自适应改变通信参数，可实现动态频谱分配和频谱共享。

在对抗无线安全威胁方面，该范式主要采用了扩谱、加密、认证、完整性保护等标志性技术。以移动通信为例，1G基本上是没有采用安全防护机制的，但2G数字通信系统开始增加了空口信息加密、身份认证鉴权和身份标识码等安全防护手段并不断更迭演进。例如，为弥补加密算法的缺陷，移动通信加密算法已由2G A51/A52、3G KASUMI演变为4G、5G的高级加密标准（AES）、SNOW3G、祖冲之密码算法（ZUC）等加密强度较高的组密钥或流密钥加密算法<sup>[6]</sup>，密钥长度也

由2G的64 bit不断增加到5G的256 bit。为解决2G因单向鉴权机制引起的伪基站问题，3G时代引入了能够同时鉴别用户和移动通信网络的合法性的双向鉴权机制；为应对不法用户截获明文传输的用户永久身份标识进行识别、定位和跟踪等问题，5G利用基于公钥基础设施（PKI）机制的公钥加密方法对用户永久身份标识（SUPI）进行加密后传输<sup>[7]</sup>。

该范式提升了应对无线扰动的能力，但是存在以下几方面的不足：（1）适应无线环境的能力受限于对无线环境的感知，缺乏对“差异化”无线环境的“精细化”感知能力；（2）因存在频谱资源有限、用户间干扰等问题，通过动态频谱分配、频谱共享等方法提高频谱利用率和系统容量会受到“频谱墙”的制约；（3）无线通信中时/频/码域资源是公共资源，本质上具有不可调和性，无法根本阻断干扰、消除安全威胁，缺乏对无线环境“个性化”资源的开发利用；（4）采用打补丁、外挂式的技术路线，基于密码学的安全手段来增强信息层面的安全，缺乏从安全与通信共有的本源属性来探索安全与通信一体化的内生安全机制。

### 1.3 无线通信发展范式3:主动利用无线环境

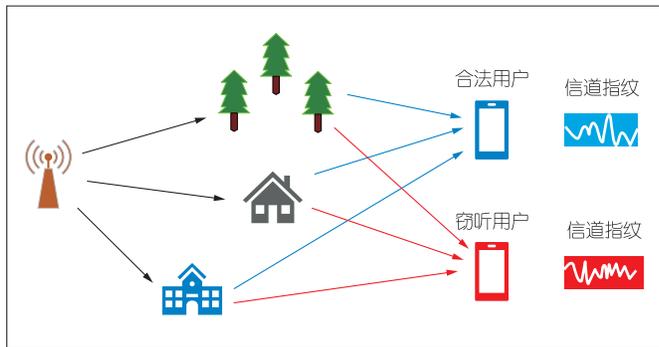
随着通信业务的不断扩展，被动适应无线通信中时/频/码域的公共资源对抗扰动的方式无法满足日益增长的需求，亟待挖掘和利用新的无线环境资源。由于电磁波传播机理可用麦克斯韦方程及其边界条件来刻画，而差异化的无线环境对应的边界条件决定了差异化的方程解，因此可以利用空域资源的差异性来突破时/频/码等无线资源公共属性的束缚。第3范式中所蕴含的理论观点是：相比于时/频/码域等公共资源，空域资源是无线个性化资源，可以利用天然的、内在的空域资源差异应对无线扰动。

在对抗自然扰动方面，该范式主要通过收发分集、空域均衡/预均衡、空时编码等手段来减小衰落和噪声的影响。标志性技术包括分集发送/接收、波束赋形、集中式与分布式多输入多输出（MIMO）、大规模MIMO等。其中，分集技术通过在无线信道传输同一信号的多个副本（同时在接收端合并接收）来补偿衰落信道损耗，可有效提高通信质量，降低发射功率；多天线技术是近年来无线通信发展较快的热点技术之一，从3G的智能天线到5G的大规模MIMO，天线规模不断增加，获得的功率增益、空间分集增益、空间复用增益和阵列增益也在不断提升；空时编码是通过空间和时间二维联合构造码字的信号编码技术，能够获得分集增益和编码增益，有效抵消衰落。

在对抗人为扰动方面，该范式主要通过定向发送与空域滤波来实现干扰抑制。以蜂窝化小区、空域抗干扰技术为

例：蜂窝系统在移动通信中广泛应用，即相邻小区采用不同频率而距离较远的蜂窝则复用相同的频率，在对抗干扰的同时可提高频谱利用率；空域抗干扰通过自适应天线设计使得阵列接收方向图在干扰方向上形成零陷以规避干扰。

在对抗无线安全威胁方面，该范式主要利用无线信道的随机性、多样性、时变性等内生安全属性，在物理层对抗安全威胁，如图2所示。标志性技术是无线物理层安全技术，例如，信道指纹加密<sup>[8-11]</sup>、信道指纹认证<sup>[12-14]</sup>、物理层安全传输<sup>[15-18]</sup>等。其中，信道指纹加密和认证技术分别通过提取收发双方的唯一、互易的无线信道指纹并将其用于密钥生成和数据认证，在信号层面抵御无线主被动攻击；物理层安全传输根据信道指纹的差异设计与位置强关联的信号传输和处理机制，使得只有在期望位置上的用户才能正确解调信号，而在其他位置上的信号是置乱加扰且不可恢复的。



▲图2 基于信道指纹的物理层安全技术原理

该范式选择“个性化空域资源”，挖掘并利用无线环境的差异性对抗无线扰动，但没有从根本上改变受限于无线环境的状况。扩大空域资源自由度的解决思路是通过增加天线阵元单位规模来提升通信容量等性能指标，但因天线孔径受限等现实问题导致受到“空谱墙”的制约，对抗无线扰动的能力还处于“靠天吃饭”的阶段。

## 2 无线通信发展新范式及理论探索

### 2.1 无线通信发展范式4:改造定制无线环境

“空谱墙”的制约使得范式3无法应对无线通信数据业务量的爆发式增长和终端的多样化服务质量需求，因此需要探索“改造定制无线环境”的无线通信发展新范式。该范式的核心观点是：无线广义不确定扰动可归因于无线环境操控性的缺失，要彻底解决这一问题必须提高无线环境操控的自由度；通过改造定制环境约束条件，实现通信的优化目标，而要改造定制无线环境就必须从无线内生属性出发。因此，

该范式对应的方法论是如何挖掘无线内生属性，基于内生属性实现内生构造，创造对抗无线扰动的最优环境。具体表现包括以下几个方面：（1）通过对无线环境进行动态编程和按需重构来对抗自然扰动；（2）通过塑造、拉大无线环境的差异性来对抗人为扰动；（3）通过塑造、强化无线环境的内生安全属性来对抗无线安全威胁。该范式由无线信道“不可操控”向“改造定制”进化，实现从“靠天吃饭”向“天人合一”的技术变革。

### 2.2 无线通信的广义鲁棒控制机制——动态异构冗余(DHR)构造

内生安全DHR构造为无线通信发展新范式提供了一种解决广义不确定扰动问题的机制。理论与实践已经证明内生安全DHR构造可以同时应对可靠性失效和安全攻击等广义不确定扰动<sup>[9]</sup>，即能实现功能安全与信息安全一体化的广义鲁棒控制功能。内生安全DHR构造提供了对抗广义不确定扰动的实践规范。因此，如果能在无线通信中找到一种符合DHR属性规范的构造，则也可以应对无线广义不确定扰动<sup>[20]</sup>。

无线通信的发展也是抵抗无线广义不确定扰动方法的演进过程。用数学模型刻画广义不确定扰动可分为两类：一类是与自然扰动相对应的，可以用概率表述的随机过程，即已知的未知；另一类是与人为扰动相对应的，无法用概率精确刻画的不确定事件，即未知的未知。作为新范式的一大标志性技术，无线内生安全技术<sup>[20]</sup>从电磁波及网络空间内源性缺陷产生的共性和本源问题出发，探索无线网络自身构造或运行机理中的内生安全效应及其科学规律，并基于无线环境内生属性的利用和改造，解决无线环境中的自然扰动和人为扰动带来的问题，提供抵御“已知的未知”和“未知的未知”的能力。

无线内生安全理论是内生安全普遍原理和DHR构造实践规范在无线通信中的拓展，为“改造定制无线环境”这一无线通信新发展范式提供理论探索。如图3所示，内生安全DHR构造<sup>[21-23]</sup>包含输入代理、功能等价异构执行体集合、多模裁决、输出代理和负反馈控制器。其中，输入代理将输入序列分发到多个功能等价的异构执行体，对经过执行体处理后的输出矢量进行多模裁决；多模裁决器对多模输出矢量内容的合规性进行判决，一旦发现非期望裁决状态就将激活负反馈控制器，对差模输出执行体进行替换和清洗。异构冗余构造是“相对正确公理”的逻辑表达与实现方式，能够发现和应对不确定攻击与随机扰动，保证系统安全/稳定运行。基于上述原理可以构造出基于迭代裁决的、多维动态重构反

馈的运行环境，能够形成“测不准”效应，变确定性为动态性，破坏“试错攻击”的前提（即破坏扰动的时空一致性）。内生安全DHR构造是在“构造决定论”指导下的网络安全利剑<sup>[24-25]</sup>。

从电磁波的传播机理来看，无线环境（信道）是无线通信的内生属性。信道源于电磁波传播过程中的直射、反射、散射、折射等各种效应组合，是自然界中一种天然的随机源，其产生机理决定了信道指纹具有各点异性、随机时变性和第三方测不准特性。这就导致通信双方的信道是不可测量、不可复制的，在其他时空坐标上发起攻击产生的扰动，必然会破坏原有信道物理结构的完整性。因此，无线信道是天然的DHR异构执行体，可以作为新质内生安全属性，在电磁波传输过程中抵御已知和未知的自然扰动和人为扰动。

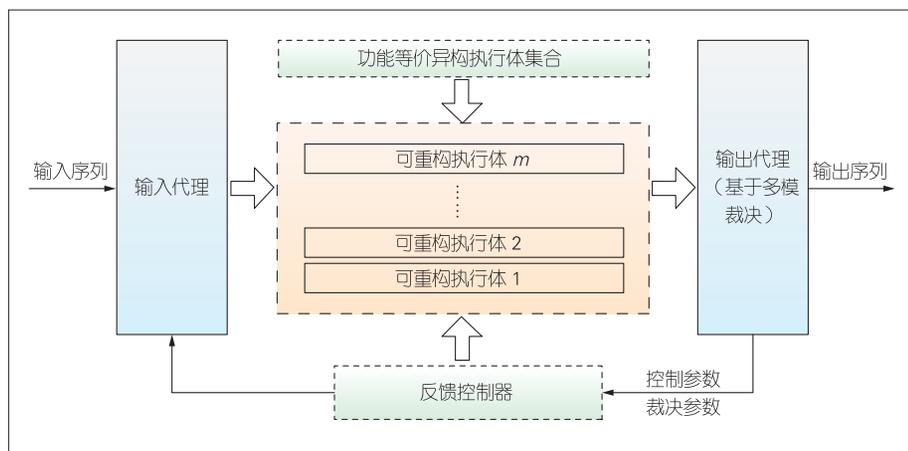
如图4所示，典型无线通信系统天生具有DHR构造的基本属性。其中，无线信道是功能等价异构执行体，发信机端的编码、调制、多天线发送等可起到代理作用，接收机端的解码、解调、多天线接收等可起到裁决作用，收发链路间的导频、功控、码本等为反馈机制。无线信道作为无线通信的DHR异构执行体，具有不可操控性。如何改造并定制

无线环境、异构执行体，即差异化信道的构造，成为无线通信DHR构造的关键。然而，无线通信范式2和范式3分别为“适应”和“利用”自然改变的无线环境，导致异构执行体不可控，使得无线通信的DHR构造受无线环境限制，通信性能受限。为解决上述问题，无线通信新范式在“利用”自然无线环境和挖掘内生安全属性的同时，能够通过“塑造定制”无线环境来主动改造内生安全属性，为实现可控的异构执行体构造提供技术途径。

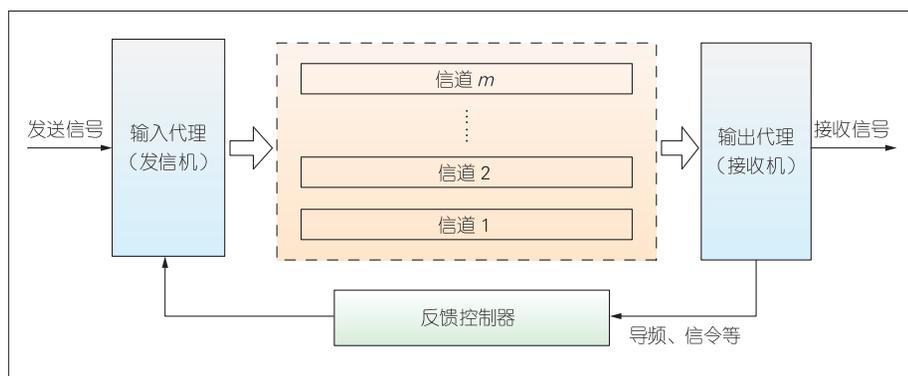
### 3 RIS对无线通信新范式的作用

“改造定制无线环境”的无线通信新范式指导下的DHR构造通过对信道环境进行人工塑造，可使异构执行体构造更加可控，能够对抗无线广义不确定扰动。近年来各类新兴技术的出现为改造定制无线环境提供了有效支撑。智能超表面（RIS）作为下一代移动通信技术潜在的关键候选技术之一<sup>[26-29]</sup>，由超材料技术发展而来，是一种由大量可编程超材料单元排布构成的新型电磁器件。该技术能够实时控制和改变每个粒子单元的状态，进而控制电磁波的传播方向、相位、幅度、频率和极化等特性，具有功耗低、体积小、成本

低、布设方式灵活等优点。目前关于RIS的研究通常是将其作为反射/透射面，布设在通信双方间，以扩大信号的覆盖范围，提升系统容量。另外，也有研究将RIS与射频器件合并，形成RIS天线或称为动态超材料天线（DMA）<sup>[30]</sup>。RIS天线利用超材料在模拟域对电磁波进行调控，增强了射频最前端的信号处理能力，能够增加对无线环境感知的精细程度，进而实现与多径相匹配的细粒度编码、调制、滤波等信号传输技术，可大大提高通信性能。



▲图3 动态异构冗余构造抽象模型

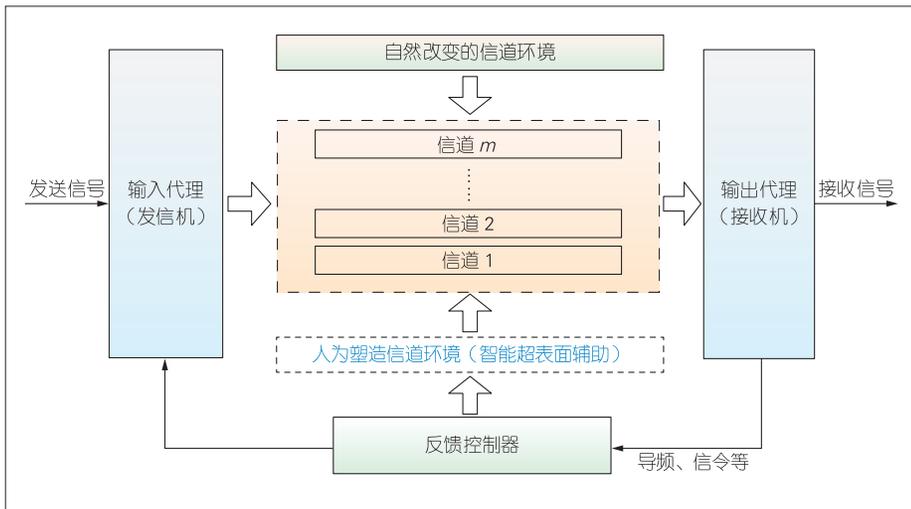


▲图4 无线通信系统的动态异构冗余构造模型

#### 3.1 RIS赋能无线DHR构造

RIS对电磁波的操控能力为无线信道的人工塑造提供了可行的技术手段，使得异构执行体由不可操控向按需改造转变。无线通信DHR构造将不再受限于自然信道环境。如图5所示，新范式下无线通信的DHR构造可通过自然改变的信道环境和人工塑造的信道环境来实现。

RIS作为材料科学与信息科学的交



▲图5 智能超表面辅助的无线通信动态异构冗余构造模型

又融合技术，能够实现对无线环境的实时重构、动态编程，构造无线 DHR 中的异构执行体——差异化信道。优化设计 RIS 的电磁波调控参数可达到人工塑造无线环境的效果，为差异化的无线信道构造提供关键技术支撑。基于 RIS 柔性可重构的特性和操控电磁波传播特性的能力，在无线信道天然内生安全的基础上，进行人为可控的优化与改造，最大限度地构造内生安全属性的安全增量，强化赋能无线内生安全。这将促使无线内生安全技术由被动利用无线内生安全属性向改造定制内生安全属性的方向发展。RIS 技术的出现使无线通信 DHR 构造不再受限于自然信道，为无线通信新范式的实现与落地提供实践规范。

### 3.2 RIS 推动无线通信计算架构演进

从无线通信计算架构发展来看，在模拟通信阶段，当采用模拟器件的物理特性来实现数学运算时，形成的模拟计算架构是固化的。在数字通信阶段，人们主要采用高速数字处理集成电路完成信号处理。此时在软件化/虚拟化技术的带动下，基站射频拉远单元（RRU）与基带单元（BBU）分离，形成了模拟计算、采样和数字相结合的计算架构。由于没有改变模拟电路固化的问题，模拟计算能力受限，计算能

▼表1 无线通信计算结构发展

结构	特点	效果
模拟计算结构	模拟器件的物理特性实现数学运算	模拟电路固化、模拟计算能力受限
模拟计算+采样+数字计算结构	高速数字处理集成电路完成信号处理	以“大算力、大数据”为特点，规模决定论的“数字化大时代”
柔性模拟计算+采样+数字计算结构	基于智能超表面的数控模拟计算	数控模拟计算前端最大限度地保真信息

力提升主要靠后端的数字处理增强。该阶段进入一个以“大算力、大数据”为特点，以规模决定论为指导的“数字化大时代”。

从解决模拟电路固化问题入手，基于 RIS 的智能化模拟计算能力，可为移动通信提供新的模数混合柔性计算结构。从哲学角度看，RIS 推动移动通信计算架构按照“模拟”到“数字”再到“增强模拟+数字”的方式螺旋式上升；从信息论角度看，数控模拟计算前端最大限度地保真了信息量。RIS 的模拟计算能力在现有的研究中已得到证明<sup>[27]</sup>。在东南大学所提出的新型

无线通信发射系统中，RIS 能直接对单音信号进行调制，简化了传统发射机构架。另外，对 RIS 面板的单元状态进行设计，能够实现数字卷积定理的频谱搬移能力，使得复杂的波束调控设计大大简化。

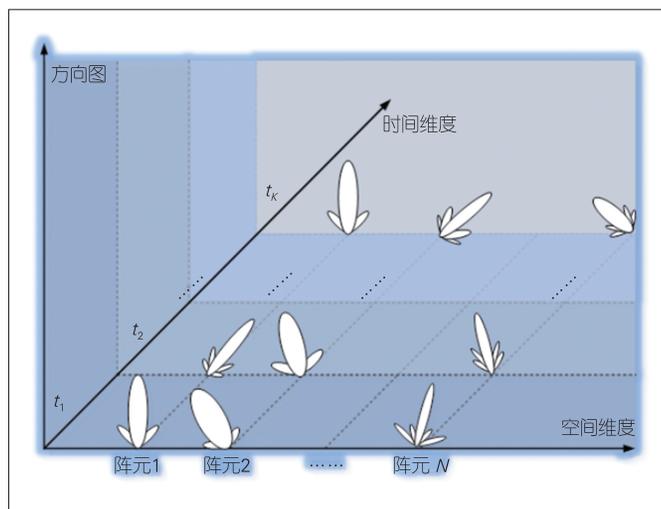
### 3.3 RIS 促进无线通信阵列变革

众所周知，阵列天线技术在移动通信的演进中发挥了重要作用。为提高移动通信速率和通信容量，4G、5G 采用了 MIMO、Massive MIMO 技术来挖掘和利用空域资源，提高空间自由度。然而，当前阵列形态属于同构阵列，依赖于规模性增益。受限于天线阵列孔径，实际系统会出现 MIMO 信道矩阵秩损的现象，实际自由度远小于理论自由度，系统性能受到限制。如果依然遵循“规模决定论”的技术路线，通过简单地增加阵列规模来实现每秒太比特的峰值速率、20 GHz 的大宽带等性能，那么 6G 将面临严峻的挑战。

实现从“规模决定论”向“构造决定论”转型是应对现有挑战的全新技术路线<sup>[31]</sup>。利用具有时空二维敏捷可重构特性的 DHR 阵列是该路线的一种可行实现方式。如图 6 所示，对于同一时刻，不同的阵元能够形成异构的方向图；对于同一阵元，不同时刻也具有异构的方向图。DHR 阵列与同构阵列的本质区别在于，天线阵元具有实时可重构、动态可编程的能力，可带来自由度的提升。

与当前以 5G 超大规模天线为代表的同构阵列相比，DHR 阵列通过动态捷变与异构构造，为改造无线环境提供技术手段，在通信和安全性能方面均表现出明显的优越性<sup>[32]</sup>，具体表现包括 3 个方面：一是在感知无线环境方面，利用差异化的手段解析差异化的无线环境，可以精确感知到

每条多径,进而实现与每条多径匹配的细粒度编码、调制、滤波等信号传输技术;二是在改造无线环境方面,利用空域和时域提供的自由度,可以拉大多流信号间的差异性,实现单RIS阵元的DHR阵列接收和发送多流信号,在提高通信容量的同时提升波束方向的分辨率;三是在安全方面,利用动态捷变改造信道的随机性和时变性“基因”,借助异构改造不同信道的差异性“基因”,提升无线信道指纹的安全能力。因此,这为有效对抗无线扰动,保障信息可靠和安全传输的细粒度、精细化信号传输或处理技术的设计提供了技术支撑。



▲图6 动态异构冗余阵列

### 3.4 RIS驱动电磁信息理论发展

香农信息论基于信号和统计理论,未考虑涉及信号电磁传播特性的麦克斯韦电磁理论。单纯基于香农信息论的系统设计理念使无线通信性能面临天花板,难以满足5G/6G对无线通信性能提出的更高要求。香农限的理论分析依赖于无线信道的准确建模。在传统的信道模型中,输入输出通常为连续时间信号,信道则建模为线性时不变系统。其中,线性高斯信道模型被广泛采纳,当前无线通信赖以生存的采样和滤波理论均建立在该模型基础上。然而,随着通信频带的不断攀升和大尺寸天线的应用,Fraunhofer远场区条件将不再满足,经典的信道模型与电磁波近场传输的现实已不再相匹配。因此,为了刻画实际环境下无线链路的特性,基于场波视角的信息传输理论引起了广泛关注<sup>[33]</sup>。

在电磁信息理论中,信道输入与输出均为连续的时空四维信号。由于实际收发端天线尺寸受限,输入与输出信号在空间维度出现紧支撑。信源到信宿间的电磁传播由格林函数

完全刻画,因此电磁信道应当建模为Hilbert空间上的积分算子。相较于经典模型,电磁信息理论不再局限于单纯改变电磁波的幅度与相位,而是可以将发射信号视为空间上不同的电磁分布。

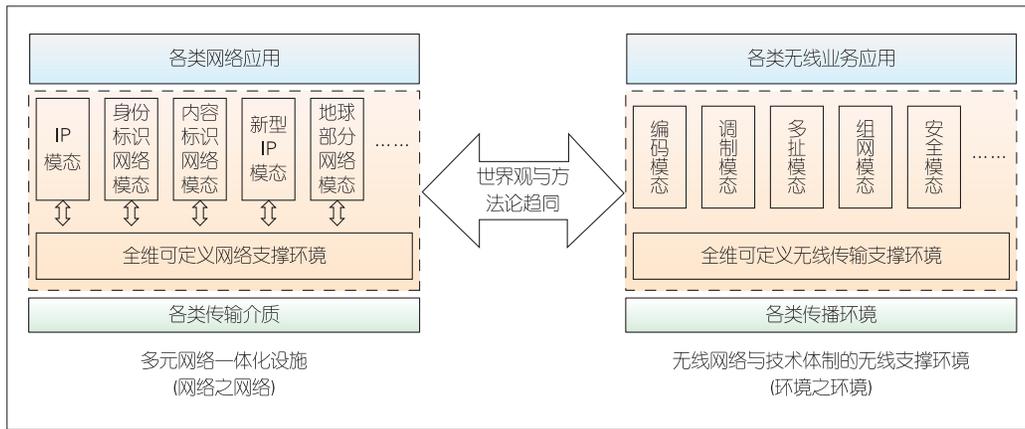
显而易见,电磁信息理论解锁了发射信号的空间维度,也将带来更大的传输自由度。需要注意的是,获取该自由度增益的前提是发射天线具有在给定空间区域产生任意电磁分布的能力。得益于超材料的物理性质,RIS能够同时进行电磁波调控和数字信息处理,完成从数字编码/比特流信息到电磁信息的映射,建立信息理论和电磁理论的桥梁,使得信息理论和麦克斯韦电磁理论完美结合,天然地适配于电磁信息理论,为无线通信发展带来了新的契机。

东南大学崔铁军团队首次提出了基于信息超材料的电磁信息论,把香农信息论应用到电磁理论中,给出了RIS数字编码与电磁波两类信息之和的上限<sup>[34-36]</sup>、数字编码完全随机时的方向图信息,以及一定面积的信息超材料所能辐射的正交方向图信息的理论上限值。另外,RIS能够将数字信号处理的方法从信号域引入到电磁域<sup>[37]</sup>,利用不同数字编码与其方向图之间的傅里叶变换关系实现方向图搬移,即信息超材料的卷积定理。基于该定理,当RIS面积足够大时,2 bit数字编码即可实现上半空间无死角的波束扫描。为了充分利用RIS的全息能力从而逼近无线信道容量,需要进一步发展完善电磁信息理论,特别是在电磁信号的正交展开、空间采样、信道测量和天线样式设计等方面。

### 3.5 RIS支撑多模态无线传输环境

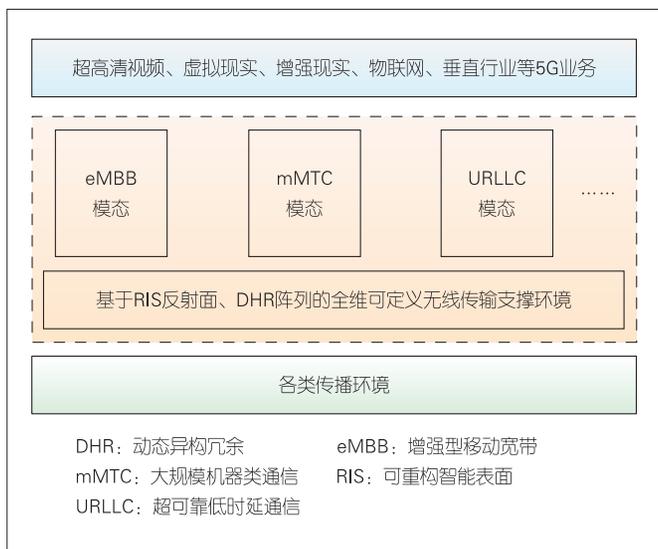
网络技术体系发展经历了从网络与业务紧耦合、综合业务数字网、网络与业务相对分离到网络技术体系与支撑环境相分离这一新范式的转变<sup>[38]</sup>。网络发展新范式下的方法论是建立多模态网络。多模态网络是一种基于全维可定义技术的可共生共存、动态并发、演进变革融合的多元化网络技术架构的一体化网络支撑环境——网络之网络,它既能保障各类业务及网络技术体系的可持续自持发展,又能实现多元网络的智能、高效一体化部署和管理,拥有与具体网络体系及相关业务无关的全维可定义的技术物理环境与生态。

如图7所示,相比于多模态网络中的全维可定义网络支撑环境,RIS的柔性可重构特性和操控电磁波的能力可使无线通信技术体制与无线支撑环境相分离,能够针对各类无线传播环境,构建全维可定义无线传输支撑环境,支撑编码、调制、多址、组网、安全等多种模态,形成无线网络与技术



▲图7 多模态网络通信与多模态无线通信

体制的无线支撑环境，也就是“环境之环境”。如图8所示，以5G三大应用场景为例，针对增强型移动宽带（eMBB）、大规模机器类通信（mMTC）、超可靠低时延通信（URLLC）不同的传播环境和通信需求，利用RIS反射面、DHR阵列构建任何通信体制的无线支撑环境，形成可匹配任何无线环境的柔性适配层，能够屏蔽各类传播环境的差异性，使得无线业务与自然环境解耦。



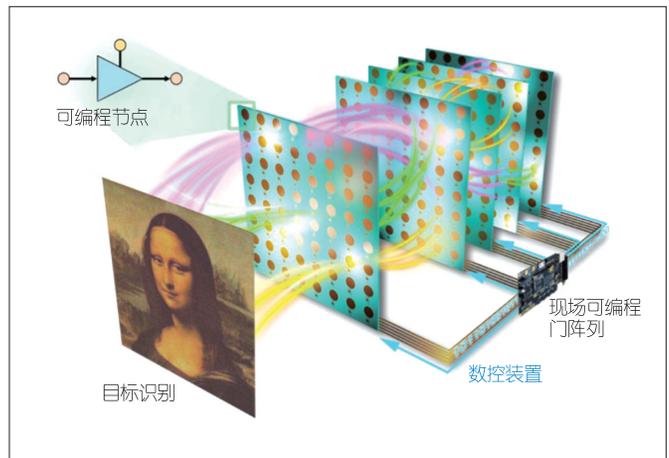
▲图8 5G多模态无线通信实例

### 3.6 RIS助力人工智能发展

人工智能技术诞生于20世纪中叶，近年来由于算力、学习数据量的大幅提升以及网络模型与算法的不断突破，得以再次复兴。人工智能特别是深度学习在计算机视觉、自然语言处理、语音识别等领域已获得巨大成功。无线通信与人工智能技术的有机融合也将大幅度提升无线通信系统的效能。

人工智能的研究主要集中在基于计算机的机器学习方法，如深度学习和强化学习。与传统使用计算机平台来实现人工神经网络的方法不同，基于波的人工神经网络采用3D打印光学透镜阵列形成全光学衍射深层神经网络<sup>[39]</sup>，利用光子的波动特性实现并行计算，成为一类新型的人工智能方法。但这种基于波的人工神经网络一旦产生，自身的网络架构就会固定下来，这限制了它的功能和应用。

RIS的可编程特性为建立可重新训练的基于波的人工神经网络提供了可能。如图9所示，文献[40]提出了一种可编程和现场训练的人工智能机（PAIM）。PAIM采用RIS透射面作为神经网络的网络层，进行波传感和通信，可以在波空间进行计算和光速处理，通过切换超表面状态来实现图像识别、自动聚焦、无线通信等不同功能和应用。基于RIS的可编程人工智能机为人工智能在无线通信不同场景的应用提供了新的可行技术路径。



▲图9 基于智能超表面的可编程人工智能机器<sup>[40]</sup>

### 4 结束语

本文从思维视角和方法论的层面对无线通信发展进行思考，将现有无线通信发展归纳为三大范式，并给出了每个范式的适用范围、阶段性特点和关键技术。针对目前发展范式“受限于”无线环境、对抗无线扰动的能力处于“靠天吃饭”阶段等问题，提出了“改造定制无线环境”的无线通信发展新范式，并给出对于新范式的理论探索。文中以无线通信发

展新范式为指导, 利用RIS构建物理(模拟)世界和信息(数字)空间的桥梁, 赋能无线环境的内生构造, 将被动适应无线环境的“信道编码”向主动改变无线环境的“编码信道”转型, 实现改造定制无线环境的无线通信新范式。

## 致谢

特别感谢东南大学崔铁军院士、程强教授、金石教授和中兴通讯股份有限公司赵亚军总工程师等专家对本文的贡献!

## 参考文献

- [1] KUHN T S. The structure of scientific revolutions [M]. London: University of Chicago Press, 1962
- [2] HEY A, TANSLEY S, TOLLE K. Jim Gray on escience: a transformed scientific method [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.205.4026&rep=rep1&type=pdf>
- [3] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell system technical journal, 1948, 27(3): 379-423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- [4] WANG L, XIE S. Radio spectrum management policy, regulation and technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2018
- [5] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2020, 64(1): 1-74. DOI: 10.1007/s11432-020-2955-6
- [6] DUNKELMAN O, KELLER N, SHAMIR A. A practical-time related-key attack on the KASUMI cryptosystem used in GSM and 3G telephony [J]. Journal of cryptology, 2014, 27(4): 824-849. DOI: 10.1007/s00145-013-9154-9
- [7] 3GPP. Security architecture and procedures for 5G system (release 15): 3GPP TS 33.501 V15.5.0 [S]. 2019
- [8] FURQAN H M, HAMAMREH J M, ARSLAN H. New physical layer key generation dimensions: subcarrier indices/positions-based key generation [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(1): 59-63. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3025262
- [9] EBRAHIMI N, KIM H S, BLAAUW D. Physical layer secret key generation using joint interference and phase shift keying modulation [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2021, 69(5): 2673-2685. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3058183
- [10] LIN K, JI Z J, ZHANG Y, et al. Secret key generation based on 3D spatial angles for UAV communications [C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417510
- [11] LI G Y, SUN C, JORSWIECK E A, et al. Sum secret key rate maximization for TDD multi-user massive MIMO wireless networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 968-982. DOI: 10.1109/TIFS.2020.3026466
- [12] CHEN S L, PANG Z B, WEN H, et al. Automated labeling and learning for physical layer authentication against clone node and sybil attacks in industrial wireless edge networks [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2020, 17(3): 2041-2051. DOI: 10.1109/TII.2020.2963962
- [13] PERAZZONE J B, YU P L, SADLER B M, et al. Artificial noise-aided MIMO physical layer authentication with imperfect CSI [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 2173-2185. DOI: 10.1109/TIFS.2021.3050599
- [14] XIE N, HU T X. Improving the covertness in the physical-layer authentication [J]. China communications, 2021, 18(3): 122-131. DOI: 10.23919/JCC.2021.03.010
- [15] ZHANG C W, YUE J, JIAO L B, et al. A novel physical layer encryption algorithm for LoRa [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(8): 2512-2516. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3078669
- [16] ZHANG Y Y, SHEN Y L, JIANG X H, et al. Secure millimeter-wave ad hoc communications using physical layer security [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 17: 99-114. DOI: 10.1109/TIFS.2021.3054507
- [17] CRIBBS M R, ROMERO R A, HA T T. Alternative codes and phase rotation extensions for alternating space-time coding-based physical layer security [J]. IEEE open journal of the communications society, 2021, 2: 1123-1143. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3075910
- [18] CHOI J, JOUNG J, CHO Y S. Artificial-noise-aided space-time line code for enhancing physical layer security of multiuser MIMO downlink transmission [J]. IEEE systems journal, 2022, 16(1): 1289-1300. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3075721
- [19] 郭江兴. 网络空间内生安全发展范式 [J]. 中国科学(信息科学), 2022, 52(2): 189-204
- [20] JIN L, HU X Y, LOU Y M, et al. Introduction to wireless endogenous security and safety: Problems, attributes, structures and functions [J]. China communications, 2021, 18(9): 88-99. DOI: 10.23919/JCC.2021.09.008
- [21] 郭江兴. 网络空间拟态防御导论-上册 [M]. 北京: 科学出版社, 2017
- [22] 郭江兴. 网络空间内生安全-下册: 拟态防御与广义鲁棒控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2020
- [23] WU J X. Cyberspace mimic defense [M]. Cham: Springer, 2020
- [24] 关于内生安全拟态防御 [EB/OL]. (2020-07-20)[2022-04-15]. <https://www.aqniu.com/vendor/68666.html>
- [25] 我国网络内生安全试验场正式开通上线. [EB/OL]. (2019-05-23)[2022-04-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1634283791171509738>
- [26] LIANG Y C, CHEN J, LONG R Z, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: channel estimation, system design and applications in 6G networks [J]. Science China information sciences, 2021, 64(10): 1-21. DOI: 10.1007/s11432-020-3261-5
- [27] 崔铁军. 电磁超材料: 从等效媒质到现场可编程系统 [J]. 中国科学(信息科学), 2020, 50(10): 1427-1461
- [28] TANG W K, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: new paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 180-187. DOI: 10.1109/MWC.001.1900308
- [29] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE access, 2020, 8: 45913-45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [30] SHLEZINGER N, ALEXANDROPOULOS G C, IMANI M F, et al. Dynamic metasurface antennas for 6G extreme massive MIMO communications [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(2): 106-113. DOI: 10.1109/MWC.001.2000267
- [31] 金梁, 楼洋明, 孙小丽, 等. 6G无线内生安全理念与构想 [EB/OL]. (2021-06-08)[2022-04-15]. <https://doi.org/10.1360/SSI-2021-0095>
- [32] JIN L, LOU Y M, XU X M, et al. Separating multi-stream signals based on space-time isomerism [C]//Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2020: 418-423. DOI: 10.1109/WCSP49889.2020.9299669
- [33] GRUBER F K, MARENGO E A. New aspects of electromagnetic information theory for wireless and antenna systems [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(11): 3470-3484. DOI: 10.1109/TAP.2008.2005468
- [34] WU H T, BAI G D, LIU S, et al. Information theory of metasurfaces [J]. National science review, 2020, 7(3): 561-571. DOI: 10.1093/nsr/nwz195
- [35] MA Q, CUI T J. Information metamaterials: bridging the physical world and digital world [J]. Photonix, 2020, 1: 1. DOI: 10.1186/s43074-020-00006-w
- [36] CUI T J, LIU S, LI L L. Information entropy of coding metasurface [J]. Light: science & applications, 2016, 5(11): e16172. DOI: 10.1038/lsa.2016.172
- [37] LIU S, CUI T J, ZHANG L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams [J]. Advanced science, 2016, 3(10): 1600156. DOI: 10.1002/adv.201600156
- [38] 郭江兴, 胡宇翔. 网络技术体系与支撑环境分离的发展范式 [J]. 信息技术与政策, 2021, 47(8): 1-11. DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2021.08.001
- [39] LIN X, RIVENSON Y, YARDIMCI N T, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks [J]. Science, 2018, 361(6406): 1004-1008. DOI: 10.1126/science.aat8084
- [40] LIU C, MA Q, ZHANG J, et al. Programmable artificial intelligence machine for wave sensing and communications [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://arxiv.org/abs/2012.12033>. DOI: 10.21203/rs.3.rs-90701/v1

作 者 简 介



**金梁**，战略支援部队信息工程大学教授、博士生导师；主要研究领域为移动通信及无线内生安全；先后主持承担国家“863”计划重大项目、国家科技重大专项、国家自然科学基金、国家重点研发计划项目、装发预研等 10 余项，主持制定移动通信安全领域国家技术标准、国家军用标准各 1 项；获得国家科技进步奖一等奖 1 项、国家级教学成果奖一等奖 1 项、军队科技进步奖一等奖 2 项；发表论文 150 余篇，申请发明专利 30 余项，出版译著 1 部。



**孙小丽**，战略支援部队信息工程大学助理研究员；主要研究领域为无线通信及安全；先后参与基金项目 3 项，获科研成果奖 3 项；发表论文 20 余篇。



**钟州**，战略支援部队信息工程大学副教授；主要研究领域为无线通信及安全；先后主持和参与基金与重大项目 10 余项；获军队科技进步奖一等奖、国家保密局保密科学技术奖三等奖；发表论文 40 余篇，获授权专利 14 项，出版著作 2 部。



**许晓明**，战略支援部队信息工程大学副研究员；主要研究领域为无线通信及安全；先后主持和参加基金与重大项目 10 余项；发表论文 20 余篇，获授权专利 5 项，出版译著 1 部。



**陈如翰**，战略支援部队信息工程大学在读博士研究生；主要研究领域为信息论、格码及其在无线通信中的应用。



**张剑**，战略支援部队信息工程大学教授、博士生导师；主要研究领域为无线内生安全和无线光通信。



**邬江兴**，战略支援部队信息工程大学教授、博士生导师，中国工程院院士；长期从事计算技术、网络安全、通信网络等领域的科学技术研究工作；曾获国家科技进步奖创新团队奖 1 项、一等奖 3 项、二等奖 4 项；2018 年以来出版中英文专著 4 部。