

电磁信息论中的自由度、采样与空间几何

沙威[†] 黄崇文 李达 李尔平

(浙江大学信息与电子工程学院 杭州 310027)

2026-05-20 收到

[†] email: weisha@zju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20260604

CSTR: 32040.14.wl20260604

Degrees of freedom, sampling, and spatial geometry in electromagnetic information theory

SHA Wei[†] HUANG Chong-Wen LI Da LI Er-Ping

(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

摘要 无线通信、感知和成像都依靠电磁场承载信息。当天线阵列走向超大规模、连续孔径和近场工作区间时，天线数或信道矩阵维数已不足以刻画系统的信息能力，关键问题变为：在给定频率、孔径、距离、能量和噪声条件下，电磁场中有多少个可稳定区分和利用的独立模式。文章沿着“Gabor 信息图—Shannon 容量—Wigner 相空间—电磁自由度—三维孔径”的脉络，说明自由度、采样和空间几何之间的物理联系。重点指出，自由度不是端口数，而是可用的电磁模式数；采样不是自由度的来源，而是连续场有限自由度在工程端口上的表现；立体天线和三维孔径的意义也不是突破物理极限，而是更充分地组织和读取可访问模式。希望文章可以为人们理解电磁场如何承载和提取信息提供一个直观图像。

关键词 电磁信息论，自由度，Wigner—Ville 分布，空间带宽积，采样，立体天线

Abstract Wireless communication, sensing, and imaging all rely on electromagnetic fields to carry information. As antenna systems move toward extremely large arrays, continuous apertures, and near-field operation, the number of antennas or the dimension of a channel matrix is no longer sufficient to describe their information capability. The central question becomes: under given frequency, aperture, distance, energy, and noise constraints, how many independent electromagnetic modes can be stably distinguished and used? Following the line of “Gabor’s information diagram—Shannon capacity—Wigner phase space—electromagnetic degrees of freedom—three-dimensional apertures”, this article explains the physical connection among degrees of freedom, sampling, and spatial geometry. It emphasizes that degrees of freedom are not port numbers, but usable electromagnetic modes; sampling is not the source of degrees of freedom, but an engineering representation of finite degrees of freedom in continuous fields; three-dimensional antennas or apertures do not break physical limits, but reorganize and access available modes more effectively. The article aims to provide an intuitive picture of how information is carried and extracted by electromagnetic fields.

Keywords electromagnetic information theory, degrees of freedom, Wigner—Ville distribution, space-bandwidth product, sampling, three-dimensional antennas

1 引言：自由度、信息论与电磁学之间的桥梁

今天，人们每天都在和“信息”打交道：手机通信、卫星导航、雷达探测、医学成像、天文观测……这些看似不同的技术，背后其实都依赖同一种东西——电磁波。电磁波不仅负责把信息从一个地方传到另一个地方，也决定了信息能传多远、传多快，以及能否被可靠获取。

过去几十年里，信息论极大推动了现代通信的发展。它告诉人们：在有限带宽、有限功率和噪声存在的条件下，一个系统最多能够可靠传输多少信息。在经典通信理论中，复杂的电磁波传播过程，常常被简化为一个抽象的“信道”。但现实中的信息传输并不是在公式中完成的，而是依靠电磁波在真实物理空间中传播、散射和干涉来实现。天线大小、波长长短、空间几何以及传播环境，都会影响信息最终能否被有效获取。

这就引出了一个更基础的问题：信息究竟是如何“藏”在电磁波中的？为什么有时候增加更多天线，通信系统的性能提升却并不明显？为什么显微镜和望远镜即使不断提高像素，仍然存在分辨极限？这些问题看似属于不同领域，却都指向同一个事实：信息的获取受到电磁波传播规律的约束。电磁信息论(electromagnetic information theory, EIT)正是在这一背景下发展起来的一类新兴研究方向。它试图把信息论与电磁波传播联系起来，从电磁波本身的角度重新理解信息的产生、传播与获取。

伽博(Gabor)早在1946年就指出，有限时间、有限带宽的信号可以放在“时间—频率”平面中理解，信号占据的面积与可承载的信息单元数量有关^[1]。香农(Shannon)随后从带宽、功率和噪声出发，建立了可靠通信的容量理论^[2]。简单说，

Gabor关心信号占用了多少物理资源，Shannon回答这些资源在噪声中能传递多少可靠信息。

类似的问题也出现在图像和光学成像中。Toraldo di Francia 讨论了图像的自由度^[3]，Miller 则把问题推广为两个有限体积之间有多少个正交波通道^[4]。在显微成像中，透镜孔径决定点扩散函数¹⁾，点扩散函数又限制可分辨细节。这与无线阵列中的孔径限制空间自由度是相通的：系统能分辨多少信息，不只取决于探测器或天线数量，也取决于波动传播和可访问孔径。

本文讨论的“自由度”²⁾，就是连接信息论和电磁学的桥梁。当天线阵列较小、端口数有限时，用离散信道矩阵描述系统通常已经足够；但当阵列走向超大规模、连续孔径、全息表面或近场通信时，阵列上的电流和场更接近连续分布。这时，仅看矩阵维数或天线数就不够了，更关键的问题是：在给定频率、孔径、距离和噪声条件下，电磁场到底允许多少个独立模式来承载信息。

近年来，电磁信息论以及连续孔径通信、全息MIMO(多输入多输出)、超大规模阵列和近场通信等研究，正是围绕上述自由度问题不断展开^[5-11]。文章将科普性讨论为什么更多天线不一定意味着更多信息；自由度为什么应理解为可分辨的电磁模式数；Wigner—Ville分布³⁾如何帮助理解空间带宽积⁴⁾和采样；以及立体天线为什么可能成为更充分提取电磁信息的一条具体路径。

2 为什么更多天线不一定意味着更多信息

在很多工程场景中，增加天线数确实能提高通信速率或感知能力。多输入多输出系统可以并行传输多个数据流，大阵列也可以提供更高增益和更窄波束。因此，人们很容易形成一个直觉：天线越多，信息就越多。这个直觉在许多情况下

1) 点扩散函数可理解为成像系统对一个理想点目标的响应。它越窄，系统越容易分辨相邻目标。实际点扩散函数不仅与横向分辨率有关，也与三维传播、孔径和探测方式有关。

2) 本文中的自由度不是力学中的广义坐标数，而是指在给定物理条件下能够被稳定区分和利用的独立电磁模式数。

3) Wigner—Ville 分布是一种相空间表示方法。它同时描述波场的位置分布和空间频率分布，可帮助读者直观看到“波在哪里”和“波往哪里传播”。

4) 空间带宽积可粗略理解为“空间范围”与“空间变化快慢”的乘积。它越大，系统通常可容纳的独立空间模式越多。

有用，但并不是普遍规律。

关键区别在于“端口数”和“模式数”不同。天线端口是读取和控制电磁场的接口，真正承载信息的则是电磁场中的独立模式。如果孔径大小、工作频率和传播环境都没有改变，继续增加阵元，往往只是把同一片电磁场采得更细，而不是产生新的独立模式。

可以把这件事类比为拍摄一幅图像。传感器像素太少时，细节会丢失；但当像素数已经足以记录镜头所能分辨的细节后，继续增加像素，并不会突破镜头孔径决定的分辨率上限。天线阵列也类似：阵元过少会漏掉模式，阵元足够后再继续加密，主要改善的是控制精度、校准能力和系统鲁棒性，而不是自动增加物理自由度。

其原因来自波动约束。在给定频率下，电磁场在空间中的变化速度不能任意快；在给定孔径下，可被稳定激发和接收的空间模式也有限。若阵列采样已经覆盖主要空间带宽，继续减小阵元间距就会进入冗余采样区间。此时系统可能更容易做波束赋形、误差补偿和连续孔径近似，但可独立传输或分辨的信息流数，不会随天线数成比例增加。

因此，评价超密阵列、连续孔径或全息MIMO时，不能只看端口数。更需要问的是：系统是否真正获得了新的可用模式？是否能稳定访问新的传播方向、波前曲率、极化状态或近场结构？如果答案是否定的，更多端口主要是工程实现手段；如果答案是肯定的，更多端口才可能转化为新的有效自由度。下一节将进一步说明：自由度到底是什么。

3 自由度到底是什么：从信道秩到电磁模式

“自由度”在不同语境中有不同说法。在通信中，它常被理解为可并行传输的数据流数；在矩阵模型中，它常表现为信道矩阵中显著奇异值的个数；在电磁场中，它更直接地对应于系统能够稳定激发、传播、接收并区分的独立场模式。这三种说法并不矛盾，而是从工程结果、数学描述

和物理来源三个角度看同一件事。

数据流数告诉我们系统最后能并行传几路信息，但没有说明这些数据流为什么存在。矩阵的秩或有效秩把收发端口之间的关系写成线性代数问题，便于计算和优化。电磁模式则进一步回答：这些并行通道在物理上从哪里来。只有当系统中确实存在若干彼此独立、可被稳定区分的场分布时，矩阵中才会出现相应的显著奇异值，工程上才可能获得多个并行数据流。

连续电磁场在数学上可以有无限多种展开形式，但实际可用的自由度是有限的。原因很简单：孔径有限、频率有限、观测区域有限、能量有限，噪声也不为零。很多数学上可以写出的高阶模式，在真实系统中可能太弱、衰减太快，或对噪声过于敏感，因而不能成为可靠的信息载体。因此，有效自由度并不是“能写出多少个模式”，而是“有多少个模式能够在实际条件下被稳定使用”。

这一观点也适用于光学成像。显微镜或望远镜的分辨率并不只由探测器像素数决定，还受到透镜孔径、点扩散函数、波长和噪声的共同限制。所谓超分辨方法之所以可能成功，往往是因为它引入了新的物理机制、先验信息或编码测量方式，而不是简单违反衍射规律。无线阵列中的“天线数不等于自由度”，与成像系统中的“像素数不等于分辨率”，本质上是同一个道理。

这也说明，离散信道矩阵不是脱离电磁场的抽象对象。它可以看成连续传播过程在发射端口和接收端口上的投影。如果端口布局、基底选择和电磁模型能够合理包含互耦、极化、近场波前和环境散射，矩阵谱就能较好地反映真实模式结构；如果离散化过粗或忽略了关键电磁因素，矩阵秩就可能只是模型中的数字，并不代表真实可用的信息通道。

因此，电磁信息论关心的不只是矩阵有多大、秩有多高，而是：在具体几何、频率、噪声和传播环境下，哪些电磁模式真正能被调用？哪些只是形式上存在，工程上不可用？要回答这些问题，需要一种能同时描述“位置”和“传播方向”的语言。下一节引入Wigner—Ville分布，正是为了提供这样一幅图景。

4 Wigner—Ville 分布：同时看见电磁波“在哪里”与“往哪里去”

描述电磁模式时，只看空间分布是不够的。空间图像能告诉我们场在哪里强、在哪里弱；角谱或波数空间能告诉我们场包含哪些传播方向。但在通信、感知和成像中，人们常常需要同时知道两件事：波出现在什么位置，又主要朝什么方向传播。

Wigner—Ville 分布(WVD)就是描述这种关系的一种工具。它把位置和空间频率放在同一张图中。可以粗略地把它理解为一幅“位置—方向图”：既看见波在哪里，也看见波往哪里去。对于自由度问题，这种表示很有用，因为一个可用模式通常不仅有空间位置特征，也有传播方向或波数特征。

对于一维空间变量，WVD可写为^[12]

$$W(x, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} u\left(x + \frac{\xi}{2}\right) u^*\left(x - \frac{\xi}{2}\right) e^{-jk\xi} d\xi, \quad (1)$$

其中 x 表示位置， k 表示空间频率或波数变量。此处不深究公式细节，其最重要的物理含义是：WVD 不只告诉我们“有哪些波数”，还告诉我们“这些波数主要出现在什么位置”。

这与 Gabor 的信息图思想是一脉相承的。Gabor 认为，有限信号不应只在时间域或频率域中单独讨论，而应放在时间—频率平面中理解。

类似地，有限孔径中的电磁场，也不应只看空间分布或只看传播方向，而应同时看二者的组合。

举例来说，大孔径准直波束在空间上分布较宽，但传播方向较集中；小孔径发散波束在空间上较局域，但包含的传播方向更宽。二者在 WVD 图中会占据不同形状的区域。自由传播、散射和边界作用会改变这些区域的形状和位置，从而影响哪些模式能够被区分和利用。

图 1 给出了这一思想的示意。对自由度而言，关键不是 WVD 图本身多复杂，而是它提醒我们：可用模式对应于 WVD 图中那些能够被系统访问、区分并稳定接收的区域。一个阵列能激发多少模式，一个接收面能分辨多少信息，一个传播系统受什么限制，都与这一区域的大小、形状以及传播后的可分辨程度有关。

因此，WVD 在本文中不是为了增加数学复杂性，而是为了提供直观图像。它把孔径尺寸、传播方向、空间带宽、采样密度和模式可分辨性放到同一幅图中理解。下一节讨论的相空间面积，正是沿着这个图像继续展开。

5 相空间面积：为什么自由度本质上是“面积”而不是“点数”

有了 WVD 这样的相空间图像后，自由度问题可以说得更直接：决定自由度的不是人为取了多少个采样点，而是电磁场在“位置—方向”图

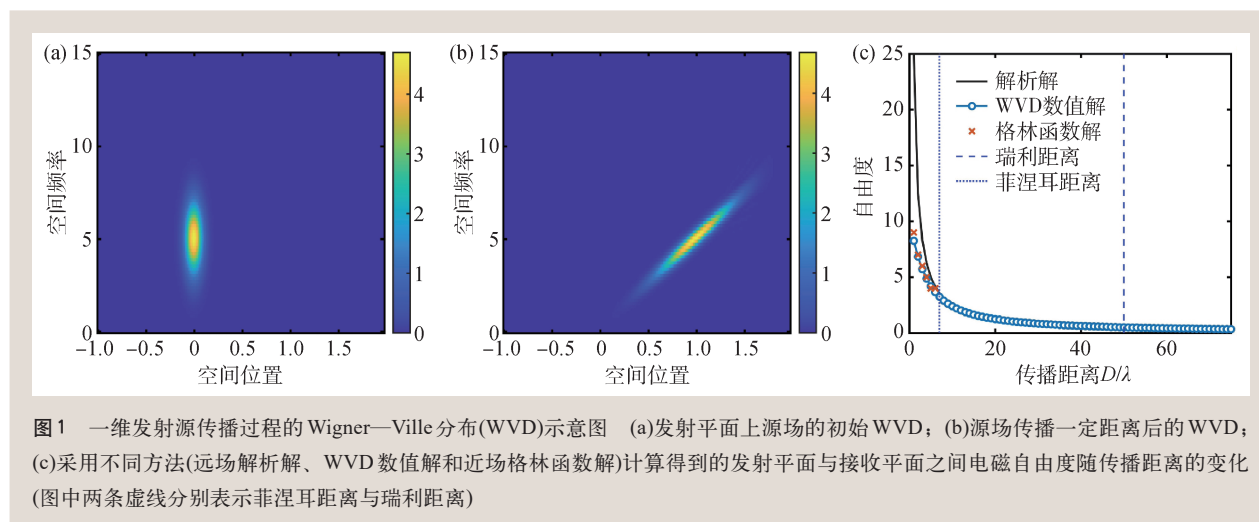


图 1 一维发射源传播过程的 Wigner—Ville 分布(WVD)示意图 (a)发射平面上源场的初始 WVD；(b)源场传播一定距离后的 WVD；(c)采用不同方法(远场解析解、WVD 数值解和近场格林函数解)计算得到的发射平面与接收平面之间电磁自由度随传播距离的变化(图中两条虚线分别表示菲涅耳距离与瑞利距离)

中占据了多大的可分辨范围。这个范围越大，通常能容纳的独立模式越多；如果范围没有扩大，单纯增加采样点，只是把同一片区域描得更细，并不会自动增加新的自由度。

Gabor 的信息图已经包含了这个思想：有限时间、有限带宽的信号会占据有限的时间—频率面积，独立信息单元的数量与这个面积有关^[1]。空间带宽积理论则把这一思想推广到光学、成像和电磁场^[2]。简单说，如果一个波场在空间上范围有限，在传播方向上也范围有限，那么它能包含的独立信息单元也就是有限的。

因此，可以用一个简单关系来概括自由度 (DoF)：

$$\text{DoF} \approx \frac{\text{相空间支撑面积 (或体积)}}{\text{单个独立信息单元所占面积 (或体积)}} \quad (2)$$

这个式子的意义不在于给出精确常数，而在于说明自由度的来源。先有有限的相空间资源，然后才有采样、编码和读取这些资源的问题。

这也解释了为什么“点数”和“面积”不能混为一谈。点数取决于怎样离散化；面积则更接近系统本身的物理约束。若相空间支撑没有扩大，即使采样点更多，也只是对同一块区域描述得更细。只有当孔径、角域、传播环境或几何边界真正打开新的可访问区域时，自由度才会实质增加。

从几何角度看，自由传播、透镜作用和傅里叶变换等操作，常常对应相空间中的剪切、旋转或类似变换。它们会改变相空间区域的形状和位置，但不一定增加总面积。因此，聚焦、传播和模式变换并不必然创造新的自由度；它们更多是在重新排列已有的模式资源。

一些常见自由度公式也可以这样理解。对长度为 L 的一维线源而言，可传播的有效空间频率范围大致受波长限制，因此自由度可写成：

$$\text{DoF}_{1D} \approx \text{SBP} \approx L \cdot \frac{2}{\lambda} \quad (3)$$

对面积为 S 的二维平面孔径而言，自由度常写成：

$$\text{DoF}_{2D} \approx S \cdot \frac{\pi}{\lambda^2} \quad (4)$$

这里的重点不是公式前的具体系数，而是标度关系：线阵自由度主要随 L/λ 增长，面阵自由度主要随 S/λ^2 增长。差别来自可控制的空间维度不同，

而不是简单来自天线数量不同。

由此可以看出，采样定理不是面积思想之外的另一件事。相空间面积有限，意味着连续电磁场可以用有限数量的样本稳定表示；合理采样，正是有限自由度在工程端口上的表现。下一节讨论采样时，应始终记住这一点：采样不是自由度的来源，而是读取自由度的方法。

6 电磁场的采样：不是越密越好

上一节说明，自由度主要取决于电磁场在相空间中占据了多大的可分辨范围，而不是取了多少个离散点。由此可以理解采样定理的物理含义：连续场之所以能用有限个样本表示，是因为它本身只有有限的可用自由度。这与时间信号采样类似。带限信号只要采样率足够高，就能被恢复；电磁场也是如此，只不过这里的“带限”更多表现为空间变化受到波长、孔径、传播距离和边界条件的共同限制。

对电磁场而言，采样并不是简单地把天线摆得更密。孔径上的电流分布、接收面上的波前以及传播算子的响应，都不是任意起伏的函数，而是受到物理规律约束的连续对象。发射孔径有多大，观察角度有多宽，系统处在近场还是远场，环境散射是否丰富，都会决定需要采多密、采多少点，才能把主要模式稳定地读出来。

因此，采样点数不是自由度的来源，而是自由度在工程实现中的表现。如果连续场的可用模式已经固定，继续增加阵元，主要是提高表示精度和控制精度，而不是自动增加新的独立信息通道。这也是为什么更多阵元不一定意味着更多信息：阵列本质上是在读取连续电磁模式，而不是创造自由度。

在最经典的一维均匀孔径情形下，这个思想会导向熟悉的半波长准则。若长度为 L 的线性孔径大致具有 $\text{DoF}_{1D} \approx \frac{2L}{\lambda}$ 个自由度，那么为了把这些自由度完整读取出来，阵元数至少应与之接近。于是典型阵元间距为

$$\Delta d_{\text{opt}} \approx \frac{L}{\text{DoF}_{\text{ID}}} = \frac{L}{2L/\lambda} = \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

这里重要的不是 $\lambda/2$ 这个数字本身，而是它背后的逻辑：阵元间距落在半波长附近，是连续电磁场有限自由度约束下的自然结果。

半波长规则也揭示了阵列设计中的基本权衡。若采样过稀疏($\Delta d \gg \lambda/2$)，空间采样不足，会出现混叠；在阵列中通常表现为栅瓣、方向模糊，以及本可区分模式之间的相互折叠(图2(a))。若采样过密集($\Delta d \ll \lambda/2$)，从理想信息论模型看并不会丢失信息；但在真实电磁系统中，过小间距会增强阵元互耦，降低辐射效率，并损害有效信噪比和系统容量(图2(b))。所以，过密采样可以改善控制精细度，却不能无限增加可用模式数。

由此可以看出，阵列不是生产自由度的机器，而是读取连续模式资源的端口集合。如果空间带宽已经固定，阵列过稀会丢失信息，阵列过密则主要形成冗余采样。当然，冗余采样在工程上并非没有价值。它可以提升鲁棒性、改善波束赋形精度、降低制造误差影响，并更好地逼近理想连续孔径。只是这些收益应与新增自由度区分开来。

这个认识对理解超密阵列、连续孔径和近场通信尤为重要。判断一个系统是否真的获得了更多信息，不能只看阵元数量是否增加，而要看背后的空间带宽、近场结构、极化模式或传播环境是否提供了新的可用模式。电磁场的空间采样比

时间信号采样更复杂，因为它通常是矢量场，涉及极化、互耦、近场波前和非均匀环境；但核心思想没有变：有限自由度意味着可以采样，合理采样则帮助我们把这些自由度稳定读出来。

下一节将进一步讨论：这些空间变化能力究竟由什么决定。答案会落到几何边界、孔径维度和可访问模式空间上。

7 几何如何限制自由度：从线阵、面阵到体积阵列

上一节说明，采样密度不能脱离电磁场本身来讨论，因为场的空间变化受到波长、边界和传播环境限制。进一步说，真正限制自由度的，往往不是采样器本身，而是系统几何。几何决定了电磁场可以在哪些位置被控制，也决定了哪些传播方向、波前形状和极化模式能够被有效访问。

最容易理解的是线阵。当阵列沿一条线展开时，它主要控制一维空间上的场分布；相应地，可利用的模式数通常随阵列长度增长。线阵自由度有限，不是因为天线摆得不够多，而是因为一条线本身能够支撑和区分的场变化有限。

当系统从线阵扩展到面阵时，情况发生变化。控制对象不再是一条线上的场，而是一个二维孔径上的场分布。因此，自由度通常不再主要随长度增长，而是随面积增长。线阵和面阵分别呈现出 L/λ 与 S/λ^2 的典型标度差异。

这说明，从线阵到面阵，不只是把天线铺得更开，而是增加了可控制的空间维度。

但是，几何维度增加并不意味着自由度可以无条件增加。一个系统即使看起来分布在三维空间中，如果它与外界交换信息的模式仍主要受某个二维边界控制，那么有效自由度往往仍由边界决定，而不是简单按体积增长。按照电磁等效原理，真正能够向外传递信息的，

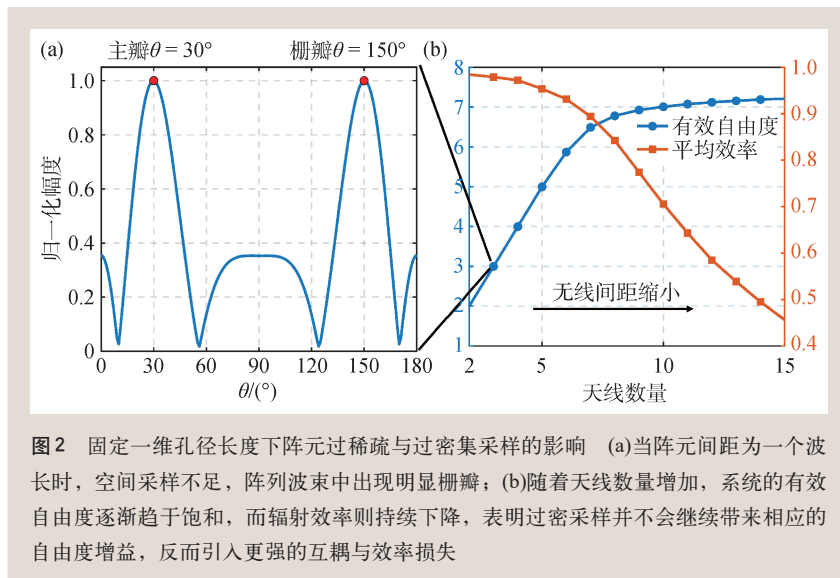


图2 固定一维孔径长度下阵元过稀疏与过密集采样的影响 (a)当阵元间距为一个波长时，空间采样不足，阵列波束中出现明显栅瓣；(b)随着天线数量增加，系统的有效自由度逐渐趋于饱和，而辐射效率则持续下降，表明过密采样并不会继续带来相应的自由度增益，反而引入更强的互耦与效率损失

不是体积内部所有可能的场变化，而是那些能够穿过边界、满足辐射条件，并在接收端被稳定区分的模式。因此，三维结构只有在确实带来新的可访问模式、改变边界上的场结构时，才会转化为新的信息资源。

几何对自由度的影响，可以概括为三点：第一，它决定场在哪些位置上可以被控制；第二，它决定系统对哪些传播方向、波前曲率和极化状态更敏感；第三，它决定哪些模式最终能够进入传播过程并被接收端区分。从这个角度看，几何不是简单的天线摆放方式，而是模式资源的组织方式。

这也解释了为什么任意几何收发区域的自由度分析近年来受到关注。一旦问题不再是理想线阵或平面阵列，而是复杂孔径、包围式布局或三维结构，自由度就不能只靠熟悉的公式简单估算。近期基于互投影几何估算空间自由度的思路表明，自由度不仅取决于单个阵列有多大，也取决于收发区域在不同空间方向上能否“相互看见”^[13]。

因此，这一节的核心并不是比较线阵、面阵和体阵谁更高级，而是说明：自由度始终受几何约束。几何规定了电磁场如何被激发、如何在空间中变化，以及这些变化能否被观察和区分。理解这一点后，立体天线的意义就更清楚了：它并不违背平面孔径的物理规律，而是通过重新组织

几何边界，改变系统可访问的模式集合。

8 立体天线能解决什么：更充分地访问模式空间

上一节说明，几何决定系统能够访问哪些电磁模式。由此自然引出一个工程问题：如果平面孔径已经受到限制，能否通过三维布局、多层阵列或包围式孔径来更充分地提取信息？这正是立体天线和三维阵列受到关注的主要原因^[14-16]。

需要先说明，立体天线并不是无条件地创造新的物理自由度。它的价值在于改变阵列的几何边界、阵元朝向和空间层次，使系统能够访问平面阵列不容易访问的模式。换句话说，它不是改变麦克斯韦方程，而是改变系统利用电磁模式的方式。

平面孔径主要控制一个二维边界上的等效电流或场分布。在远场、窄角域问题中，这通常已经足够，但在近场、宽角扫描、多用户分布复杂、通信—感知一体化以及三维成像任务中，二维平面可能无法充分覆盖有用的传播方向和波前曲率。特别是在大角度方向上，平面孔径的有效投影会变小，可利用的空间带宽也会下降。立体天线通过多高度、多朝向或包围式布局，有可能在更宽角域内保持较大的有效孔径，从而提高可访问自由度，如图3所示。

从相空间角度看，立体天线的作用是改变可访问区域的形状和覆盖范围。不同高度层可以更好地感知近场球面波前，不同朝向的子阵列可以覆盖更宽角域，包围式布局则有利于区分不同空间位置的目标或用户。这些能力并不意味着“凭空多出自由度”，而是意味着原先难以被平面孔径读取的模式，现在有机会被激发、组合和区分。

这也给出了一条较明确的解决路径。若目标是在有限孔径、有限功率和有限噪声条件下提高

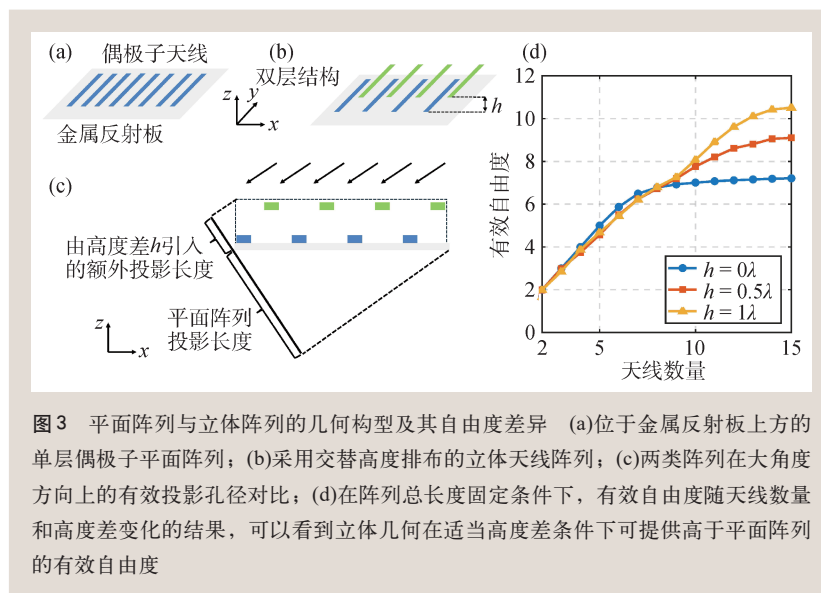


图3 平面阵列与立体阵列的几何构型及其自由度差异 (a)位于金属反射板上方的单层偶极子平面阵列；(b)采用交替高度排布的立体天线阵列；(c)两类阵列在大角度方向上的有效投影孔径对比；(d)在阵列总长度固定条件下，有效自由度随天线数量和高度差变化的结果，可以看到立体几何在适当高度差条件下可提供高于平面阵列的有效自由度

信息提取质量，可以从三方面入手：第一，重构几何，使孔径能看到更多有用方向和波前曲率；第二，优化采样，使离散端口覆盖主要模式而不过度冗余；第三，结合编码测量和重构算法，把可访问模式稳定转化为通信容量、感知分辨率或成像质量。立体天线正是第一条路径的代表，但它需要与采样、编码和算法共同设计。

当然，立体天线并非总能带来显著收益。如果系统工作在典型远场、窄角域和简单散射环境中，三维布局的提升可能主要体现在扫描性能、鲁棒性或工程实现上，而不一定表现为更多自由度。相反，在近场、大孔径、宽角覆盖、多目标解析和感知成像任务中，立体几何的优势更容易显现。

因此，所谓“突破平面孔径限制”应理解为：它突破的是传统平面阵列的模式组织方式，而不是基本物理上限。立体天线最重要的启示，是把设计思路从“增加多少端口”转向“怎样组织可访问模式”。这也是电磁信息论能够给阵列设计带来的实际价值。

9 从模式数到容量：自由度如何影响香农容量

前文说明，自由度不是天线数，也不是信道矩阵的维数，而是在给定几何、频率、传播环境和噪声条件下，系统能够稳定调用的电磁模式数。接下来需要回答的是：这些模式数如何影响 Shannon 意义下的信道容量。

一个电磁系统的总自由度通常来自多个维度。时间上，有限观测时长和有限带宽决定可用的时间模式；空间上，孔径尺寸、传播距离和空间带宽决定可用的空间模式；如果考虑极化，还会引入额外的矢量模式。因此，总自由度不是一个单纯的数学参数，而是时间、空间、极化共同决定的可用模式数。

在一个理想化但有启发性的近似下，若系统总共能够调用 DoF_{tot} 个可用自由度，总信噪比为 γ ，则容量可写成：

$$C \approx \text{DoF}_{\text{tot}} \times \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{\text{DoF}_{\text{tot}}} \right). \quad (6)$$

这个式子表示的不是精确常数，而是一个基本权衡：自由度越多，可并行使用的模式越多；但如果总功率不变，每个模式分到的能量会减少，单个模式上的信噪比也会下降。因此，容量提升来自“更多并行模式”和“每个模式信噪比降低”之间的平衡。

从这个角度看，增加带宽、扩大孔径、优化极化或采用三维几何，都是为了增加可用模式，或者更有效地利用已有模式。增加带宽，可以增加时间模式；扩大孔径或改善几何，可以增加空间模式；合理利用极化，可以调用更多矢量场结构。这些技术路径表面不同，但共同目标都是把电磁场允许的自由度转化为可靠的信息传输能力。

因此，容量不应被看成脱离电磁物理的抽象数字。信道矩阵为什么有较高秩，宽带系统为什么能支持更高速率，三维孔径为什么可能带来性能提升，背后都与可访问模式的数量和质量有关。如果可用模式没有增加，矩阵维数再大、端口再密，也很难从根本上提高容量；如果系统确实打开了新的时间模式、空间模式或极化模式，容量提升才有物理基础。

这样，前文几个问题就可以联系起来：更多天线不一定意味着更多信息，因为端口数不等于模式数；采样点数不等于自由度，因为自由度受相空间范围限制；几何重要，是因为它决定哪些模式能够被激发、传播和接收；立体天线值得研究，是因为它可能改变系统可访问的模式集合。换句话说，Shannon 容量并没有脱离麦克斯韦电磁学，它可以看成电磁模式资源在信息论层面的表现。

10 未来方向：怎样更高效地提取电磁信息

前文讨论了自由度、采样、几何和容量之间的关系。对工程研究来说，更重要的问题是：知道这些约束以后，怎样才能更高效地提取信息？可以从以下几条路径入手。

(1) 面向任务设计孔径和几何。传统系统常先确定阵列形状，再研究信道和算法。面向电磁信息论的设计可以反过来问：目标任务需要哪些模式？这些模式对应哪些方向、距离、极化和波前曲率？如果平面孔径不足以覆盖这些模式，就可以考虑三维阵列、多面孔径、可重构表面或环境协同调控。立体天线正是其中一条具体路径。

(2) 面向模式设计采样。离散端口的间距、数量和位置，不应只按固定半波长规则机械设置，而应与实际可访问的空间带宽匹配。过稀会丢失模式，过密会带来互耦、效率下降和硬件成本。非均匀采样、稀疏阵列和混合模拟—数字架构，可以看作在有限硬件条件下更有效读取主要模式的方法。

(3) 面向噪声选择模式。在有限功率和有限噪声环境中，并非所有模式都值得使用。过弱或病态的模式会消耗能量，却难以提供稳定信息。因此，容量提升不仅依赖自由度数量，也依赖模式质量。在实际设计中，应结合奇异值谱、辐射效率、互耦、热噪声和硬件噪声，优先激发和接收稳定模式。

(4) 统一编码测量与亚奈奎斯特恢复。低于传统奈奎斯特率的测量，并不意味着突破自由度上限，而是利用了信号结构或任务先验。例如，当目标稀疏、场景低维或图像具有结构规律时，压缩感知和编码孔径可以用较少测量恢复关键信息。这里的重点不是“少采样获得无限信息”，而是把有限测量用在最有价值的模式上。

(5) 引入先验信息和人工智能。在通信—感知一体化中，系统通常不是从零开始观测世界。目标位置、运动规律、场景地图、材料特征、历史观测和神经网络模型，都可以作为先验信息⁵⁾。这些先验不会改变基本物理上限，但可以提高信息提取效率，使系统在较少测量下完成检测、定位、成像或资源分配。

(6) 向量子 and 量子启发方向扩展。本文主要讨论经典电磁场和经典信息论，若进一步考虑量子化电磁场，光子数态、纠缠、压缩态和量子测量

会带来新的信息编码与探测方式。它们能扩展可利用的信息空间，也会引入新的噪声和测量限制。未来需要进一步理解经典电磁自由度、量子态空间和实际测量能力之间的关系。

这些方向可以概括为一句话：未来物理层设计不应只研究“给定信道上怎样传得更快”，还应研究“怎样通过几何、材料、编码、采样和先验信息共同塑造信道”。通信、感知和成像的共同目标，是在有限孔径、有限带宽、有限能量和受限噪声条件下，把更多有用模式转化为可靠信息。

11 结语：当信息论回到电磁视角

从Gabor的信息图到Shannon的容量，从图像自由度到有限体积之间的波通道，再到今天的连续孔径、全息MIMO和立体天线，许多问题都指向同一个核心：在有限孔径、有限带宽、有限能量和受限噪声条件下，有多少个独立模式能够稳定承载信息？

本文用较直观的方式说明三点。第一，自由度不是天线数，而是可分辨、可利用的电磁模式数。第二，采样不是单纯的离散化技巧，而是有限自由度在工程端口上的表现。第三，立体天线和三维孔径的意义，不是打破基本物理规律，而是通过改变几何边界，更充分地组织和读取可用模式。

因此，讨论Shannon容量与麦克斯韦方程之间的关系，并不是要否定经典信息论，也不是把已有概念重新包装。它的价值在于提供一个更清楚的判断标准：什么时候增加天线能够带来新信息，什么时候只是冗余采样；什么时候近场和三维几何能够打开新的模式资源，什么时候收益主要来自工程实现。沿着这一视角，通信、感知和成像可以放在同一幅图景中理解：它们本质上都在有限物理资源下提取电磁场中的有用信息。

未来的电磁信息论不应只停留在解释现象上，还应进一步指导设计：怎样选择孔径，怎样布置端口，怎样编码测量，怎样利用先验信息，怎样在噪声和硬件约束下选择稳定模式。归根到底，

5) 先验信息是指观测之前已经知道或可以合理假设的信息，例如目标稀疏性、场景几何、运动连续性或训练数据中学到的统计规律。

信息论和电磁学并不是两个分离的框架，而是共同服务于一个目标：更高效、更可靠地从电磁场中提取信息。

致谢 感谢浙江大学的高权和刘初禹同学协助完成文本插图的绘制。本研究工作得到了华为技术有限公司的资助与技术支持。

参考文献

- [1] Gabor D. Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering, 1946, 93(26): 429
- [2] Shannon C E. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(4): 623
- [3] Toraldo di Francia G. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(7): 799
- [4] Miller D A B. Optics Letters, 1998, 23(21): 1645
- [5] Migliore M D. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 56(10): 3188
- [6] Yuan S S A, He Z, Chen X *et al.* IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 446
- [7] Li R, Li D, Ma J *et al.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(4): 3497
- [8] Yuan S S A, Chen X, Huang C *et al.* IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2023, 4: 237
- [9] Wang C X, Yang Y, Huang J *et al.* IEEE Wireless Communications, 2024, 31(5): 279
- [10] Zhu J, Wan Z, Dai L *et al.* IEEE Wireless Communications, 2024, 31(3): 156
- [11] Gong T, Gavrilidis P, Ji R *et al.* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(1): 196
- [12] Lohmann A W, Mendlovic D, Zalevsky Z. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(3): 470
- [13] Gustafsson M. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(2): 1028
- [14] Yuan S S A, Wu J, Xu H *et al.* IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(8): 11276
- [15] Ji R, Huang C, Chen X *et al.* Science China Information Sciences, 2026, 69: 152301
- [16] Gao Q, Yuan S S A, Wang Z *et al.* Electromagnetic Science, 2026, 4(2): 1



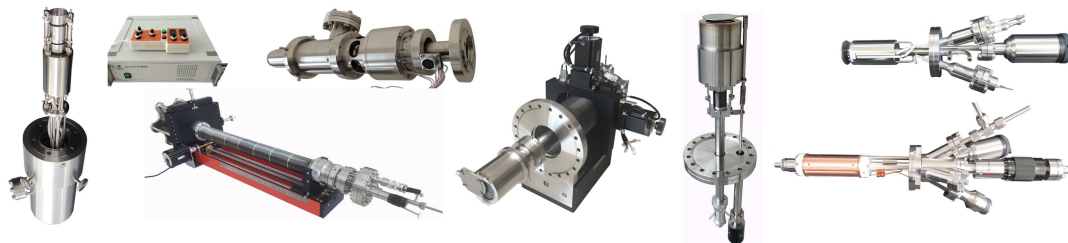
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

