

如果 DARPA 如愿以偿，AI 将统治无线频谱

孔倩（译），临菲君（校）

本文译自：If DARPA Has Its Way, AI Will Rule the Wireless Spectrum, By Paul Tilghman, IEEE spectrum, 28 May 2019

<https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/if-darpa-has-its-way-ai-will-rule-the-wireless-spectrum>

编者按

无线频谱的开发、分配、管理和使用，是一切无线应用的基础。

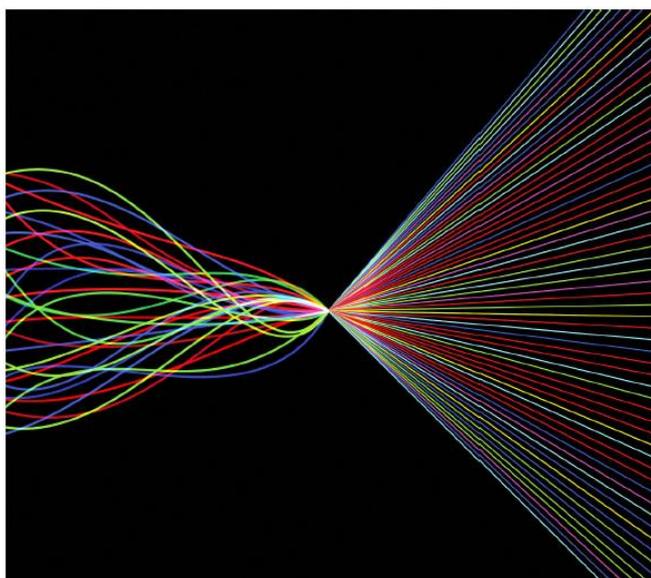
传统跳频技术是避免干扰的重要手段。通过频率跳变，它可以“避开”别人的干扰，也可以避免对别人造成干扰。

前些年，为了弥补固定频率分配（包括授权频段和自由频段）对频谱资源的浪费，提出了认知无线电。认知无线电可以使用已经分配、但在某些空域或某些时段并未使用的空闲频谱，也可以在保证授权频段用户不受影响的前提下，允许非授权用户使用授权频段。其基本原理，是非授权用户先检测可用频谱，再分配使用。

DARPA（美国国防高级研究计划局，Defense Advanced Research Projects Agency）开展的频谱协同挑战赛，是用人工智能（AI）实现频谱实时协同共享。无疑，基于 AI 的频谱管理和利用，会比认知无线电更加诱人，也更具挑战性。

也许，人工智能可以开创无线通信的新时代。

DARPA 的频谱协同挑战赛表明，自主无线电频谱管理优于人工无线电管理。



在 21 世纪初，蓝牙差点夭折。由于与蓝牙设备共享频谱资源的 Wi-Fi 路由器成熟、且功率高，并为了避免干扰，第一批蓝牙设备工程师不得不修改标准，采用了跳频技术，当检测到有 Wi-Fi 信号时，转移至空闲频段工作。这项技术修改，拯救了蓝牙，使其免于早期死亡。

跳频只是避免干扰的一种方式。干扰问题从一开始就困扰着无线电。很久以前，监管部门就通过授权方式管理频谱，为不同的无线电用户分配不同的频段供其独用。虽然这种规则避免了匆忙的传输检测和频率搬移，但会导致部分频谱处于空闲状态，频谱使用率非常低。

现今，无线电频谱资源的需求不断飙升。在过去几年中，无线数据传输年增长约 50%，主要是因为人们利用智能手机进行大量视频传输和社交媒体等活动。为了满足需求，我们必须尽可能给每位用户分配频谱资源，这意味着传统的固定频谱分配必须转向频谱共享。蓝牙使用的跳频技术是解决该问题的一种方式，但为了应对不断增加的需求，我们不得不对其扩展。

为了解决频谱稀缺问题，我作为一名项目经理，在美国国防研究计划局（DARPA）开展频谱协同挑战赛（Spectrum Collaboration Challenge, SC2），SC2 是一项为期三年的公开赛，来自世界各地的团队将重新构想频谱管理规则。参赛团队将利用人工智能（AI）新技术与竞争对手解决频谱共享问题，其最终目标是提高整体吞吐量。这些团队将于今年 10 月在洛杉矶举行的 SC2 冠军赛中争夺近 400 万美元的奖金。经过两年的竞赛，我们首次见证了通过自主协同无线电共享频谱，传输的数据量远远超过了为每台无线电分配专用频谱的传统方式。

在开展 SC2 之前，各种 DARPA 项目已证明，少数无线电可以通过跳频自主管理频谱，就像蓝牙一样，以避免彼此之间的干扰。那么为什么我们不能将跳频技术扩展到更广泛的无线电应用，并以此来解决频谱资源稀缺问题呢？

不幸的是，跳频的解决范围是有限的。这取决于未使用频谱的可用性，如果有太多无线电试图同时发送信号，则没有足够的频谱资源可资利用。我们意识到，为了使 SC2 工作有意义，需要测试每个团队的效果，使数十种无线电试图共享频谱。这样，我们就可以确保每种无线电都不会有自己的专属信道，因为没有足够的频谱供其分配。

考虑到这点，我们设定了一系列场景，并以循环赛方式进行。3 个、4 个或 5 个独立的无线网络，在大约 1km^2 区域内同时广播。允许这些无线网络接入相同频段，并且每个网络将利用 AI 技术来确定如何与其他网络共享资源。我们将根据完成多少任务（如电话和视频流）确定团队参赛的成功度和最终赢家。一组无线网络，如果它完成的任务多余其它组，则它就是比赛的赢家。但是，我们的主要目标是看团队开发 AI 管理的无线网络，这种无线网络能够协同完成的任务，要比每个无线设备使用专用频段完成的任务多。

我们很快就意识到，要在现实世界进行实际系统操作是行不通的，因为无法保证每个参赛

团队的无线条件都一样。而且，移动各个无线电来建立每个场景和每场比赛，是非常复杂和耗时的。

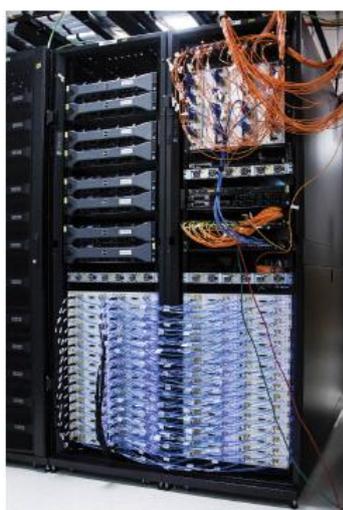
因此，我们建造了“斗兽场”——世界上最大的射频模拟实验平台。目前位于马里兰州劳雷尔的约翰霍普金斯大学应用物理实验室。斗兽场占用 21 个服务器机架，耗电 65 千瓦，可以同时模拟 128 个无线电之间超过 65,000 次独立交互，例如文本消息或视频流。有 64 个 FPGA 通过共同执行超过 150 万亿次浮点运算（teraflops）来完成模拟。

对于每场比赛，我们直接将射频信号“广播”到罗马斗兽场。根据给定场景的数学模型，实验平台具有足够的计算能力来计算和模拟信号行为。例如，在罗马斗兽场内有墙壁，使信号“反弹”；有模拟的暴风雨和池塘，使信号被部分“吸收”。

模拟提供了团队人工智能在每个模拟场景中根据其观察做出适当决策所需的所有信息。例如，面对手机干扰器正以噪声淹没一个频率，AI 可能会选择将自己的频率更改为不受干扰的频率。

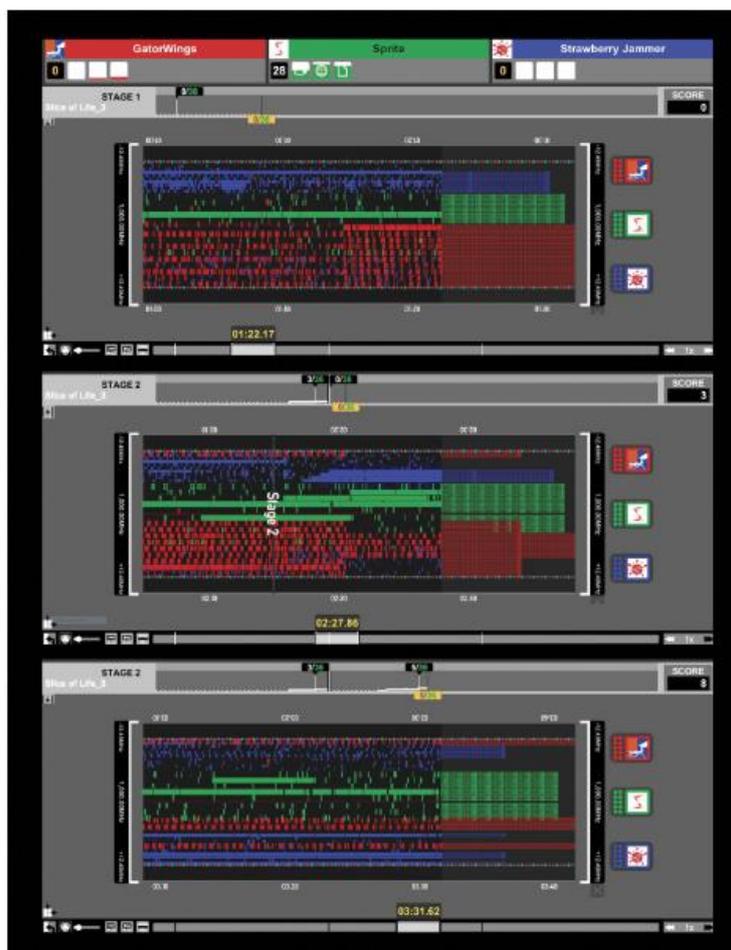
为 AI 提供协同频谱管理的场景是一回事，但创建这些 AI 完全是另一回事。要了解在 SC2 中参与竞争的团队如何构建 AI 系统，就需要先了解 AI 在过去几十年中如何发展的背景知识。

从广义上讲，研究人员在几波 AI 浪潮中推动了 AI 的进步，这几波浪潮重新定义了系统是如何学习的。第一波 AI 是专家系统。这些 AI 是通过采访特定领域的专家并从中推导出一套规则来创建的，自主系统可以在尝试完成某些任务时使用这些规则做出决策。这些 AI 在诸如国际象棋之类的场景中表现出色，以简单方式即可表示规则。第一波 AI 最著名的例子之一是 IBM 的 DEEP BLUE，在 1997 年首次击败了国际象棋大师 Garry Kasparov。



图片：DARPA

Colosseum: DARPA 建造了世界上最大的射频模拟试验平台，称为斗兽场 (Colosseum)，可以让团队相互竞争。
图右 Paul Tilghman 和 Ben Hilburn 在第二轮初赛中正在向观众展示结果。



图片：DARPA

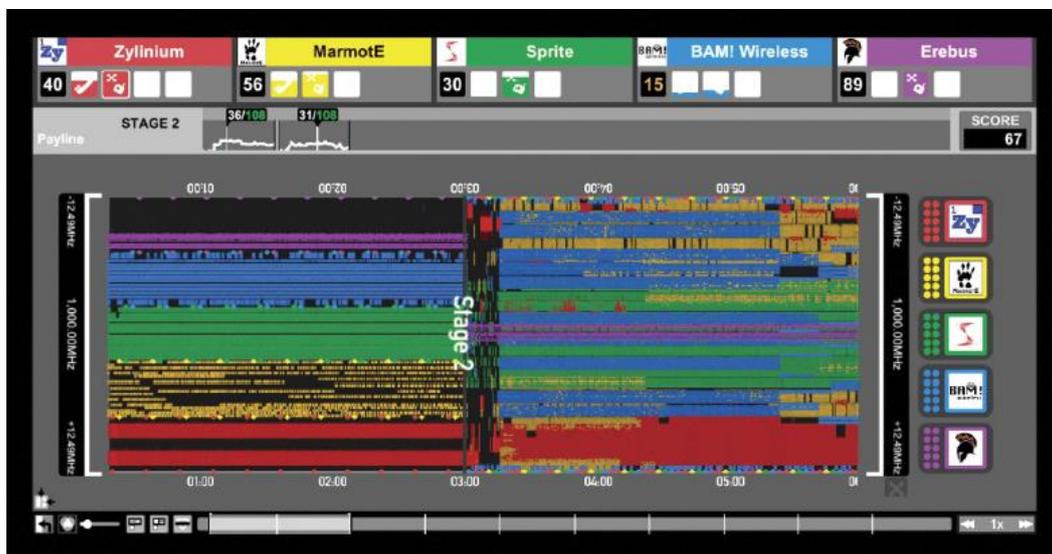
场景 *Slice of Life*，设置在户外购物中心，每个团队的无线网络模拟不同商家的 Wi-Fi 热点。在早晨，红色团队可能充当咖啡店的 Wi-Fi，需要最大带宽[顶部]。之后，绿色团队需要占用更多带宽，并开始与红色重叠，同时竞争频谱[中部]。最终，由于绿色拥有最高流量需求[底部]，三个团队由此建立了新的分配机制。

第二波 AI 依赖于大量数据而不是人类的专业知识来学习给定任务的规则，更擅长于人们无法完全考虑到的所有问题的细微差别，而这些差别比规则具有更多的有效信息。语音识别就是一个典型例子。AI 系统首先获取原始数据，例如音频信号，然后对数据进行处理，例如生成对应文本。这种 AI 浪潮与 Siri 和 Alexa 等数字助理使用的语音识别类似。

无论是第一波 AI 还是第二波 AI 都没有用于管理无线频谱。这意味着我们可以考虑 AI 的两次浪潮以及研究人员如何规约 AI 找到解决问题的最佳方案。事实上，将频谱管理视为一种强化学习问题是合适的。在此问题中，我们会在 AI 成功时对其进行奖励（加分），并在失败时对其进行惩罚（减分）。例如，当 AI 成功传输时，可获得一分；但当传输丢失时，就减去一分。通过训练期间累积分数，AI 就能够记住成功策略并试图重复，同时远离失败策略。

在竞赛中，由于来自其它无线电传输的干扰，常会发生传输中断。因此，由于同时有多个无线电存在，我们还必须将无线电管理视为一项协同挑战。AI 管理无线电比传统的静态分配表

现更好，其关键是开发可以最大化自己的得分、同时还为其它 AI 最大化得分留出空间。如果团队尽可能多地获得成功传输，而又在追求可用频谱时并不经常与别人发生频点碰撞，团队就会得到加分，这样就可以防止大家最大限度地占用频谱。



图片：DARPA

有序的混乱：五个团队的人工智能管理网络首先分布在已定义的频段上[左]。然后删除这些频段，AI 解决如何共享频谱[右]。结果看起来很混乱，但网络成功完成了几乎与以前一样多的连接。

好像上面的难度并不足够大，还有一种使频谱协作看起来比许多类似问题更难的情形。想象一下，由过去从未见过面的人一起组队去打篮球比赛，该球队的实力不会达到多年来队友们一起训练的球队的实力。迄今为止，包含多个代理的最成功挑战，是多个 AI 一起接受训练。最近一个例子是 2018 年的一个项目，非营利性人工智能研究公司 OpenAI 证实，在频游戏 Dota2 中，五个 AI 一起，可以击败一组人类玩家。

2018 年 12 月 9 日，我和我的 DARPA 同事终于有机会了解一组 AI 能否在如此复杂的多代理问题上取得成功。我们围在酒店会议室的电脑周围，距离斗兽场只有一个街区。酒店成为我们的指挥中心。在一周之内我们分析了 300 多场比赛，并确定得分最高的团队。在三天内，我们预计会颁发多达 8 个 75 万美元的奖励，每个顶级团队一个。但就目前而言，我们实际上并不知道最终会分发多少奖金。

在一年前的第一场资格赛中，仅仅依据团队的相对排名对他们进行评判。然而，这一次，要赢得奖励，顶级团队还必须证明他们的无线电对频谱的管理能够优于传统专用频谱管理。

为了比较自主无线电与专用频谱管理，我们设计了最后一组比赛。首先，我们先设定基准，为每个团队分配专用频率，以衡量他们可以传输多少数据。然后我们取消此限制，以考察每个团队的网络是否可以传输更多数据，且不会妨碍共享频谱的其它 4 个网络。

在酒店房间里，我们焦急地等待着最后一组完成比赛。如果没有人能够消除我们为他们设定的障碍，那么两年的艰苦工作都将付之东流。我们突然感到，如果每个队都失败了，我们并没有备用计划。SC2 的现实让我们的神经有些紧张，我们已经开始看到了一些方法的局限性。

幸运的是，我们也发现了一些成功的关键。比赛开始时，几乎所有团队都采用第一波 AI 方法。这是一个有意义的起点——请记住现在并没有 AI 系统用于管理频谱。在第一波方法中，各团队正在尝试编写协作使用频谱的一般规则。

当然，每个团队都有自己不同的规则，但每个系统都会存在一部分相同的一般性原则。首先，系统监听每个网络需要使用的频段。其次，对于剩余频谱资源，每个频段只能分配给一个无线网络。各团队都应该是好邻居，对频谱的要求不企图超过大家的公平性。第三，如果没有空闲频段，无线电应选择干扰最小的频段。

不幸的是，这些规则无法捕捉到无线管理的所有特性，这样就会导致意想不到的后果——妨碍无线电之间的协作能力。在 SC2 期间，我们已经看到了很多类似简单的规则最终以失败告终的例子。

例如，还记得第二条规则是做一个好邻居而不是霸占频谱？原则上，这种协作方式应该为其它无线电在需要时提供选择更多频谱的机会。在实践中，我们看到了这种策略是如何出错的：在这个例子中，三个团队留下了大量的频谱完全没有使用。

观察结果，我们发现，有一个团队坚持使用不超过三分之一的频谱。虽然这种策略非常无私，但也限制了他们本来可以为完成任务所能建立的联系——因此降低了他们的得分。当另一个团队注意到第一个团队没有得到足够的分数时，情况变得更糟。他们采取限制自己而允许第一个团队的无线网络使用更多频谱，其实这原本是他们根本不会这样做的。基本上，这些系统都过于谦让，其结果是造成频谱浪费。

为了解决第一波 AI 带来的问题，团队不得不制定新的规则。当新的规则产生另一个意想不到的结果时，他们又通过编写另一条规则来解决该问题，如此继续。这些不断出现的意外以及由此带来新规则，是第一波 AI 的主要缺点。一个看起来很直接的问题，最终往往会比较难。

似乎更好的方法是，让每个无线电基于与其共享频谱的其它无线电来调整策略，而不是依赖于一些硬性规则。实际上，无线电应该通过大量数据挖掘开发一系列不断扩展的规则——斗兽场擅长产生这类数据。这就是为什么现在，在 2018 年 12 月 9 日的试验期间，我们看到团队转向第二波人工智能方法的原因。几个团队建立了初出茅庐的第二波 AI 网络，可以快速表征其它网络是如何比赛的，并使用这些信息即时更改他们各自的无线电规则。



竞争对手在第二轮比赛后聚集在一起合影。该竞赛吸引了来自世界各地的研究人员，并荣获了近 400 万美元的奖金。

当 SC2 启动时，我们怀疑许多团队会采用简单的“感知—避免”策略。这是蓝牙设备在发现 Wi-Fi 路由器正在使用它所需的频段时所做的事情：跳转到一个新的频段。但是，蓝牙跳频的正常工作，还因为 Wi-Fi 是可预测的（即以特定的频率广播并且不会改变）。

然而，在我们的挑战赛中，每个团队的无线电行为都表现得不尽相同，完全没有可预测性，从而使得“感知—避免”策略变得毫无意义。

相反，我们看到更具优势的方法是预测未来频谱会怎样变化。无线电可以使用这些预测结果来判决哪些频率可能会被释放——即使只是一两分钟，也足以推送少量数据。更精确的预测可使协作无线电传输更多的数据，而不会造成同时使用相同的频段。现在我们希望第二波 AI 能够学会以足够的精度预测频谱环境，避免浪费每一赫兹。

当然，如果 AI 管理的系统不能优于传统的频谱分配，那么所有这些理论都是无用的。这就是为什么那天晚上在酒店房间我们很高兴看到斗兽场的结果，前 8 个团队中的 6 个已经成功！这些团队证明，当他们协作共享频谱时，他们的无线电可以比使用专用频谱传输更多的数据。三周后，另外 4 个团队也会这样做，总数将达到 10 个团队。

当然，即使我们欣喜若狂，但现在就回答我们何时会看到使用人工智能管理无线频谱，还为时尚早。要明白，DARPA 大挑战重要的是，他们并不关心竞赛结束时所能达到的技术状态。相反，这些挑战旨在确定能否发生根本性的技术转变。看看 DARPA 在 2004 年的自动驾驶大挑战，花了 10 年时间，才开始在商用车中以非常有限的方式使用自动驾驶化技术。

也就是说，我们最初的比赛结果是很有希望的。到目前为止，我们发现当三个无线网络共享频谱时，他们的预测要比 4 个或者 5 个尝试共享频谱的情况好得多。但我们尚未就此结束，我们的团队目前正在构建更好的系统。2019 年 10 月 23 日，将在洛杉矶美国移动世界大会 (Mobile

World Congress Americas) 上进行 SC2 现场锦标赛，也许这些系统将比以往更加成功地证明，人工智能操作的无线电可以共同创造一个无线通信新时代。

关于作者

Paul Tilghman 是美国国防研究计划局微系统技术办公室的项目主管，负责监督 DARPA 的频谱协作挑战赛。

译者简介：孔 倩，重庆大学微电子与通信工程学院研究生。



临菲信息技术港



临菲信息技术港 公众号



临菲学堂