

---

# 5G 毫米波经济性分析

截至 2025 年期总体拥有成本评估



GSMA 代表全球移动运营商的共同权益。GSMA 在更广泛的全球移动生态系统中连接着 750 多家移动运营商和将近 400 家企业，其中包括手机与终端制造商、软件公司、设备供应商、互联网企业，以及相关行业组织。GSMA 每年在巴塞罗那、洛杉矶和上海举办业界领先的 MWC 大会，以及 Mobile 360 系列区域会议。

更多有关 GSMA 信息，请阅览 [www.gsma.com](http://www.gsma.com)

请在 Twitter 上关注 GSMA: [@GSMA](https://twitter.com/GSMA)

GSMA 智库是全球移动运营商数据、分析和预测的权威来源，同时是权威行业报告和研究的发行商。我们的数据涵盖各运营商群体、网络和移动虚拟网络运营商，遍布于阿富汗到津巴布韦等各个国家。这是一套最精确完整的可用行业指标，由数以千万的数据点组成，并且每日进行更新。

一流的运营商、供应商、监管者、金融机构和第三方业内公司使用 GSMA 智库为战略决策和长期投资计划提供依据。这些数据可作为行业的参考指标，并经常被媒体和业内引用。

我们的分析师和专家团队会定期编制研究报告，内容涵盖各个行业，引领行业思想风潮。

[www.gsmaintelligence.com](http://www.gsmaintelligence.com)

[info@gsmaintelligence.com](mailto:info@gsmaintelligence.com)

## 2021 年 1 月出版

### 作者

**Federico Agnoletto**, 高级经济师

**Pau Castells**, 经济分析主管

**Emanuel Kolta**, 高级分析师

**Dennisa Nichiforov-Chuang**, 首席频谱分析师

© 2021 - GSMA 智库。此研究和材料由 GSMA 智库完成，感谢高通公司的支持。GSMA 智库不对所使用的第三方数据的精确性负责。GSMA 智库不对所提供信息中的错误或任何分析、建议和倡议中的错误或其影响负责。

---

# 目录

报告摘要	2
<b>1 进入 5G 时代：毫米波的重任</b>	<b>6</b>
<b>2 5G 毫米波解决方案的生态成熟情况</b>	<b>10</b>
<b>3 2020-2025 年期间的总体拥有成本 (TCO) 分析</b>	<b>18</b>
3.1 密集市区场景	19
3.2 固定无线接入场景	23
3.3 室内场景	32
<b>4 结论和建议</b>	<b>34</b>
<b>附录：2020 年至 2025 年 5G 网络的总体拥有成本建模</b>	<b>36</b>

---

# 报告摘要

5G 已经成为商业的现实。尽管新冠肺炎疫情肆虐全球，但是预计到 2020 年末，5G 连接数将达到 2 亿；预计到 2023 年末，5G 连接数将突破 10 亿；到 2025 年末全球连接数将逼近 20 亿。与 4G 网络相比，5G 的数据速率提高 10 倍，容量扩大 100 倍，时延缩短高达十倍，可以从容处理日益增长的移动数据流量。5G 给企业数字化转型带来了巨大机遇，广泛用于工业应用、汽车、机器人、医疗等领域。不仅如此，5G 也将对消费者产生深远影响。它能实现更高质量的服务，例如流媒体视频和视频会议，通过固定无线接入 (FWA) 实现快速的家庭宽带服务，还能提供边缘计算、增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR) 等全新的消费者服务和商业服务。

在这项研究中，我们评估了六种不同场景下部署 5G 毫米波 (mmWave) 解决方案的成本效益，包括密集市区、FWA 和室内部署。这些结果对移动生态系统中的所有参与者都有着显著的影响。如果运营商眼下低估了毫米波的作用，将来提供 5G 服务时就有可能陷入竞争劣势。如果政府希望利用 5G 来推动经济增长，就要制定明确的计划为移动服务分配毫米波频段。随着 5G 毫米波解决方案不断扩大规模，实现更广泛的经济效益，未来将会出现更加丰富的消费者设备和装置可供选择，从而进一步降低部署成本，带来更多物美价廉的设备，推动 5G 毫米波更加普及。

到目前为止，世界各地推出的 5G 大多依赖于中频段频谱，只有极少数例外。然而，随着普及率的提高，越来越多的消费者和各种服务迁移到 5G 网络，这些网络需要低（如 700 MHz）、中（如 3.5 GHz）、高（如毫米波）频段的频谱，才能提供足够的容量来支持全面的 5G 体验。因为拥有巨大的频谱带宽，毫米波频段既能满足高流量需求，又能保持 5G 服务的性能与质量，作用尤为关键。迄今为止，移动运营商在拍卖中对毫米波频段的竞价，还没有超过对低频段的竞价。这意味着，以美元/MHz/pop 为单位计算，毫米波频段的价格目前普遍低廉。

尽管毫米波具有潜力，但是在移动通信应用中还需要克服几个艰巨的技术挑战：与低频段信号相比，毫米波信号的传输距离较短；容易受到树木和其他障碍物的干扰而衰减；难以穿透混凝土建筑墙体（对于从室外覆盖室内，这常常是必须的）。然而，移动数据流量的持续增长凸显了毫米波频段的优势，因为毫米波比其他任何频段都能提供更多的容量和带宽。

截至 2020 年三季度末，已有三个国家（美国、日本和南非）推出了商用 5G 毫米波网络<sup>1</sup>，未来 5G 毫米波解决方案将会扩大规模。

市场准备就绪的两个重要信号如下：

- **毫米波频谱日益广泛。**美国、意大利、芬兰、日本、韩国等国家已经释放 5G 毫米波频谱，还有一些国家即将跟进。这个进展实属难得，因为毫米波频谱刚刚才在 2019 年 11 月的世界无线电通信大会 (WRC-19) 上进行国际分配，以用于移动服务。
- **有足够广泛的消费设备和装置可供选择。**目前已有可靠的网络解决方案，几乎所有一线和二线设备商都能提供毫米波设备产品，作为他们向移动运营商提供的解决方案组合的一部分。近期，消费类设备的增长尤为显著。其中，2020 年新推出的 iPhone 12 系列产品就支持毫米波，有力地促进这项技术的广泛应用。2019 年市面上只有一些毫米波手机和固定无线接入 (FWA) 客户驻地设备 (CPE)，但是预计 2021 年将有超过 100 款 5G 毫米波手机和超过 50 款 FWA CPE 陆续上市。

随着 5G 部署和应用的快速进展，以及毫米波生态系统显示出准备就绪的迹象，移动行业目前所要解决的主要问题，就是毫米波解决方案可以在何处发挥成本效益，以及何时才能实现成本效益。在本报告中，我们重点讨论毫米波部署成本这一关键问题。

我们列举了一系列场景，而在这些场景中，毫米波可以凭借高吞吐量和网络容量（包括下行链路和上行链路）的优势，在从目前到 2025 年的这段期间内，实现有针对性的、具有成本效益的部署。然后，我们探讨和剖析了这些部署在哪些条件下可以实现成本效益。特别是评估六个不同场景下部署 5G 毫米波解决方案的成本效益：

- 两个场景 - 在大中华区和欧洲的一个假想的密集市区的户外地点进行部署。
- 三个场景 - 在中国的一个假想市区、欧洲的一个郊区和美国的一个村镇部署 FWA。
- 一个场景 - 在一个假想的企业办公场所进行部署。

<sup>1</sup> 在那之后，意大利部署了一个毫米波网络，新加坡宣布了一个毫米波网络的部署。

建模工作显示如下：

• **密集市区场景（大中华区和欧洲）：**

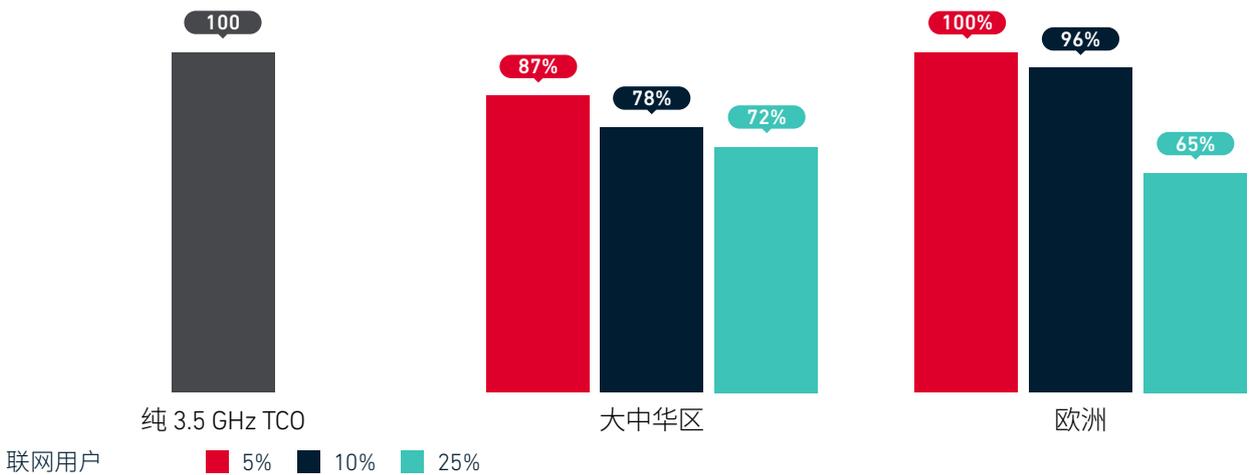
我们发现，与纯粹 3.5 GHz 网络相比，3.5 GHz 与毫米波混合网络在这一时期可以为 5G 业务提供至少 100 Mbps 的下载速度，并具有成本效益。一旦大中华区推出毫米波频谱并进行大规模部署，并假设在需求高峰时段，联网用户的比例高于 5%，而且每个运营商有 800 MHz 的毫米波频谱及 100 MHz 的 3.5 GHz 频谱可用，我们估计，与在中心场景中

只使用 3.5 GHz 相比，在密集市区场景中部署毫米波解决方案可以提供额外的容量层，从而创造成本效益。在欧洲，假设每个运营商拥有 400 MHz 的毫米波频谱和 80 MHz 的 3.5 GHz 频谱，我们的估计是，在中心场景下，如果该地区高峰期联网用户的比例达到或者高于 10%，那么 5G 毫米波 +3.5 GHz 的混合网络解决方案可以带来成本效益。

图 i

3.5 GHz 加 5G 毫米波网络的总体拥有成本 (TCO)净现值 (Net Present Value, NPV)

百分位基线：纯 3.5 GHz 的 TCO



资料来源：GSMA 智库

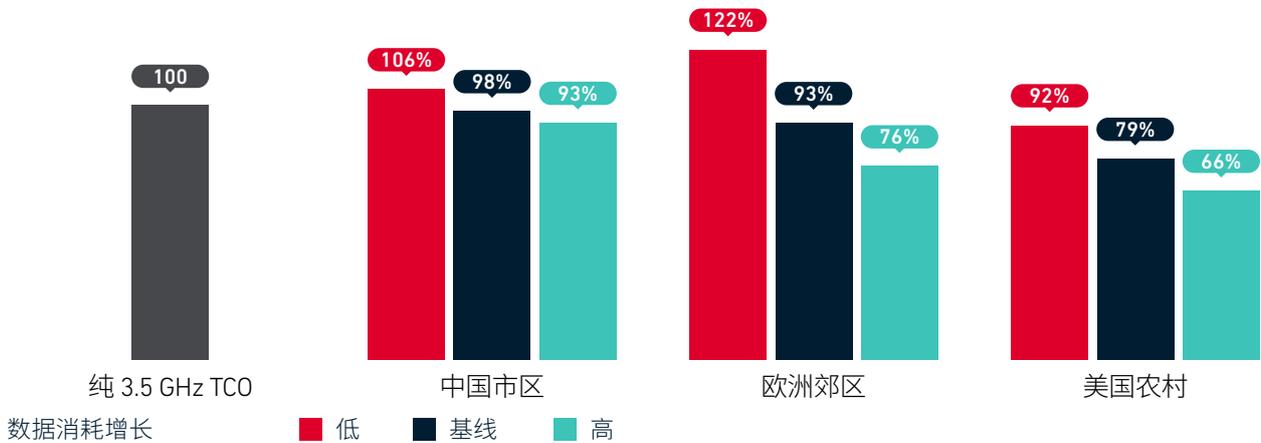
• **FWA 场景：**与 3.5 GHz 5G FWA 网络相比，在此期间部署使用毫米波频谱的 5G FWA 网络也具有成本效益。毫米波网络的成本效益对流量需求的假设和上行链路和下行链路流量的比例很敏感。在中心假设下，如果 5G FWA 能够抓住适当比例的住宅宽带市场需求，那么在中国市区、欧洲郊区和美国村镇部署毫米波 FWA 就是一种具有成本效益的策略（见图 ii）。这些结果对整体流量需求以及需求高峰时段下行链路和上行链路占总流量的比例都非常敏感。例如，如果在此期间上行链路占总流量的比例快速增长，那么与纯 3.5 GHz FWA 网络

相比，部署纯毫米波 FWA 网络所节省的成本将大幅增加。另一种情况是，将毫米波作为容量层与 3.5 GHz 覆盖层同时使用，这也是 5G FWA 的一种可能的部署策略。我们的敏感性分析表明，这种情况下的成本节约可能更大：与纯 3.5 GHz 网络相比，在基线敏感度场景下，中国市区可节省 16%，欧洲郊区为 15%，美国村镇则为 27%（见图 12）。不过，这种敏感性所依据的假设的有效性将因不同的情况而有所不同，因为这些结果只在该地区少数几个局部点出现容量缺口时才有效。

图 ii

## 毫米波 FWA 网络的 TCO NPV

百分位基线：纯 3.5 GHz 的 TCO



资料来源：GSMA 智库

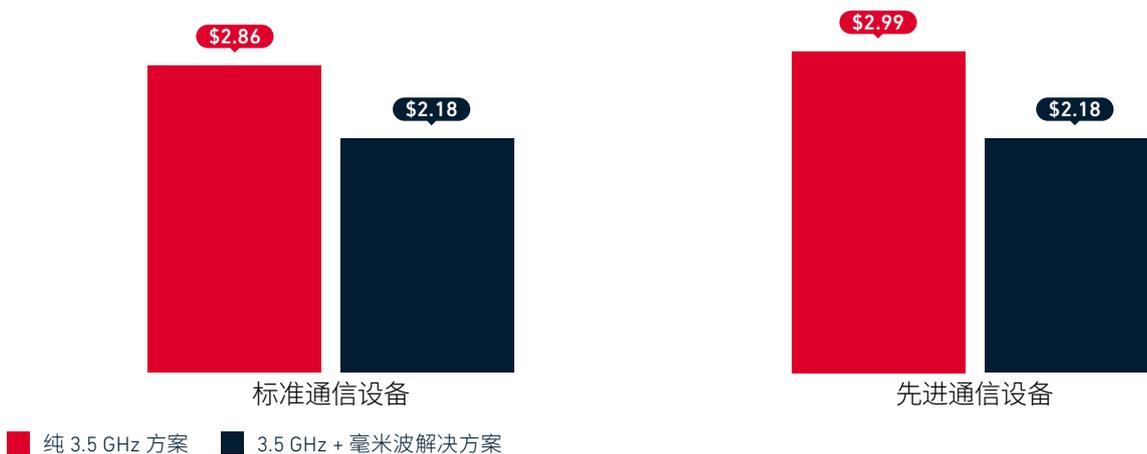
- **室内办公场景：**在中心假设下，毫米波室内 5G 网络具有成本效益，可为运营商节省 5% 至 20% 的成本。我们还发现，当有相当大比例的设备数据流量需要室内 5G 服务支持时，毫米波网络可节省高

达 54% 的成本。这个范围内的精确数值取决于同时活跃的设备的比例，以及是否需要（和在多大程度上需要）为下一代视频通信设备提供连接。

图 iii

## 室内办公空间场景下的每平方米成本

每平方米 TCO（美元）



资料来源：GSMA 智库

虽然我们的 TCO 分析着眼于 2025 年之前的时期，但是我们预计，随着性能更高、成本更低的设备和装置大量涌现，5G 毫米波的部署将在随后的五年进一步加速。我们估计，到 2030 年，5G 每年将为全球 GDP 增

长作出 0.6% 的贡献，每年为全球经济创造约 6,000 亿美元<sup>2</sup>，而毫米波将在实现这些效益的过程中扮演越来越重要的角色。因此，无论从短期还是长期来看，毫米波解决方案都将成为 5G 部署的关键。

<sup>2</sup> Mobile Technology and Economic Growth, GSMA, 2020

# 1 进入 5G 时代： 毫米波的重任

## 5G 服务已成为现实

截至 2020 年第三季度末，共有 47 个市场的 107 家运营商已经推出 5G 商用服务，包括移动通信和 FWA。随着应用快速普及，截至 2020 年第三季度末，全球移动运营商注册的连接数达到 1.35 亿<sup>3</sup>左右，我们预计到 2020 年底，这一数字将逼近 2.35 亿。到 2025 年，我们预测全球 5G 连接将接近 20 亿（见图 1）。

<sup>3</sup> 截至该期间结束时在移动网络上注册的 5G 独立 SIM 卡（如不使用 SIM 卡，则为电话号码）总数。

图 1

## 5G 一览：2020 年第三季度全球展望



\*移动和 FWA 5G 服务的商用部署 资料来源：GSMA 智库  
\*\*不包括美国和加拿大的区域运营商

最新情况，请浏览 [gsmaintelligence.com](http://gsmaintelligence.com)

虽然世界各地的运营商都已经推出或者明确计划推出 5G 服务（见图 1），但是未来几年，大部分的初期部署和用户渗透率的增长都将来自北美、欧洲和亚太地区，其中中国将发挥核心作用。到 2025 年，这三个地区将占全球 5G 移动连接预测数的 90%，其中北美的 5G 连接为 2.18 亿（其中美国有 2 亿），亚太地区的 5G 连接为 12 亿（其中中国有 8 亿），而欧洲的 5G 连接为 2.33 亿。为了适应快速增长的渗透率，运营商也在大力投资于 5G 网络。预计 2020 年至 2025 年期间，全球运营商将投资 1.1 万亿美元来建设网络，其中近 80% 将用于 5G。

新冠肺炎疫情凸显了移动网络的稳健与韧性，它加速了许多活动的数字化，同时也反映出人们对移动通信和流媒体视频的依赖。这可能会在中期内带来更多对先进移动服务的需求。根据爱立信的数据，2019 年至 2025 年期间，移动数据流量将以每年 30% 左右的速度增长。5G 网络可以提供合适的网络和容量来满足这些需求，从中发挥关键作用。与 4G 网络相比，5G 的数据速率提高 10 倍，容量扩大 100 倍，信号响应时间加快多达 10 倍，可以从容处理日益增长的移动数据流量。它能实现更高质量的服务，例如流媒体视频和视频会议，通过 FWA 实现快速的家庭宽带服务，还能提供边缘计算和 AR/VR 等全新的消费者服务和商业服务。

## 5G 网络需要低、中、高频段的频谱

到目前为止，世界各地推出的 5G 大多依赖于 3.5 GHz 频谱，只有极少数例外。这是因为初期服务和采用所需的带宽和速度只有通过这种类型的频谱才能充分满足。然而，随着普及率的提高，越来越多的消费者和各种服务迁移到 5G 网络，这些网络需要低、中、高频段的频谱，才能提供广泛的覆盖和足够的容量来支持 5G 体验。

这三个频段范围在提供 5G 服务方面都有重要作用。低频段频谱（1 GHz 以下）支持城市、郊区和农村的广泛覆盖，也支持物联网服务。没有该频谱，5G 服务就难以覆盖到城市中心以外和建筑物深处。中频段频谱（1-6 GHz）往往兼具覆盖范围和容量的优势。迄今为止，大多数商用 5G 网络都依赖于 3.3-3.8 GHz 范围内的频谱。运营商可以分配给 5G（或重耕）的其他中频段频谱包括：1800 MHz、2100 MHz、2.3 GHz 和 2.6 GHz。

## 毫米波的优点和缺点

尽管毫米波具有潜力，但是在移动通信应用中还需要克服几个艰巨的技术挑战：毫米波信号的传输距离较短；容易受到树木和其他障碍物的干扰而衰减；难以穿透玻璃，木材等材料，特别是混凝土。这意味着毫米波解决方案可能不太适合室内覆盖或者在有严重障碍物的场景。这些挑战与移动行业在前几代移动网络中所要克服的挑战颇为不同，不免使人担忧短期内 5G 毫米波的应用前景。

因为拥有巨大的频谱带宽，毫米波频段（24 GHz 及以上）既能满足高流量、高网速的需求，又能保持 5G 服务的性能与质量，作用尤为关键。特别是，毫米波可以作为一种有效的解决方案，来满足增强型移动数据服务的需求，还可以适用于一些新型用例，而这些用例如果使用其他频谱的话，将会非常有挑战或者成本高昂。目前，26、28 和 40 GHz 在国际上得到的支持最多，势头最劲。2019 年，世界无线电通信大会（WRC-19）修订了规范频谱频率使用的国际条约，将多个毫米波频段纳入 5G 移动服务中使用，在全球或区域范围内，总共确定了大约 17 GHz 的 5G 频谱，范围为 26 GHz（24.25–27.5 GHz）、40 GHz（37–43.5 GHz）、50 GHz（45.5–47 GHz 和 47.2–48.2 GHz）以及 66 GHz（66–71 GHz）。

然而，随着移动数据流量的持续快速增长，人们需要更高的数据速率来服务于新的应用，上行链路可能需要扩容，因此对毫米波频段的需求将会日益迫切。毕竟，毫米波频段拥有任何其他频段都无法企及的容量和带宽。由于这些频段的频谱非常丰富，毫米波频谱非常适合同一时间提供高速度、低时延和高容量的需求。毫米波的短波长允许使用超小型天线，这有助于波束形成，增强覆盖范围和频谱效率。毫米波也可以作为一个很好的室内解决方案，因为它的传播特性有助于避免基站间的干扰。对业界来说，主要的问题是这些解决方案可以在何处发挥成本效益，以及何时才能实现成本效益。这也正是本报告所要回答的问题。

---

## 毫米波能否发挥成本效益？

我们在第 3 节中深入探讨部署成本这一关键问题。我们列举了一系列场景，在这些场景中，毫米波可以凭借短距离、高吞吐量和高容量的优势，在从目前到 2025 年的这段期间内进行有针对性的部署。我们也探索并剖析了在哪些条件下这些部署可能具有成本效益。我们详细模拟了三种场景：A) 利用毫米波在密集的城市地区提供扩容；B) 利用 FWA 提供家庭宽带；C) 满足办公空间的高流量需求的室内解决方案。

目前商用 5G 毫米波网络已在一些国家成功推出，未来 5G 毫米波解决方案需要大规模推广，才能降低部署成本，提供丰富而经济的设备选择，使 5G 应用更加普及。任何技术解决方案所达到的规模都是决定其成功和渗透率的关键。正如我们在第 2 节所述，毫米波已在三个方面形成发展之势，这是任何 5G 频段达到必要的规模和渗透率所必备的条件：频谱的可用性、足够的消费设备选择，以及经济、可靠的网络设备。这将有助于移动运营商考虑毫米波在其部署中发挥的作用，从而确定何时启动或者加快对这项技术的投资。



## 2 5G 毫米波解决方案的生态成熟情况

### 频谱、装置和设备对实现必要的规模至关重要

在移动通信中，任何技术解决方案所达到的规模都至关重要。由于存在显著的规模经济，以及网络与设备的互操作性需求，更大的规模可以降低部署成本，并增加可负担设备的数量，促进整体采用率的提高。

无论是什么 5G 频谱频段，都要满足三个主要条件才能实现规模化，从而使 5G 生态系统中的所有利益相关者都能享受到低成本和广泛可用性的好处：

- 1 全球统一频段中有充足的频谱，可供许多国家在某一特定频段使用。
- 2 有支持该频段的丰富廉价的消费者设备可供选择，这可以刺激消费需求，并在手机和其他移动网络设备（如 CPE 或热点）的生产和制造中实现范围经济与规模经济。

3 有种类丰富、具竞争力的网络设备可供选择，这将使移动运营商在技术和经济上都有动力去铺设使用特定频段的网络。

显而易见，3.5 GHz 频段正在成为目前部署 5G 的大多数市场中最常用的频段。然而，正如我们在本节所述，5G 毫米波的生态系统正在迎头赶上，力争早日准备就绪。

## 5G 频谱需要跨越多个频段

由于 5G 依靠低频、中频和高频段频谱助推，所以不同国家的运营商将会根据频谱的可用情况进行网络投资决策。不同的频段支持不同的特性和功能，而毫米波一般适用于局部区域内的高速度或者高流量的应用。然而，随着可用频谱的增多，那些用于移动服务的新频段可以提供必要的容量或覆盖范围，作为现有频段的有力补充。

至 2020 年第三季度，已有 35 个市场获得分配专门用于 5G 移动服务的新频谱。迄今已有 121 家运营商获得低、中、高频段的频谱（不包括美国和加拿大的区域运营商）：低频段运营商 48 家；中频段运营商 91 家；高频段运营商 35 家。

图 2

### 按频率范围划分的 5G 频谱分配方案



\*2021 年第一季度+ 数据并不详尽；按日期排列  
资料来源：GSMA 智库

有 26 个国家已经在 3.5 GHz 频段上分配了频谱。截至 2020 年 10 月，少数几个市场发布了 5G 毫米波频谱，包括：美国、芬兰、中国香港、意大利、日本、韩国、中国台湾、新加坡、俄罗斯和泰国。不过，已经有更多的国家宣布计划，即将释放毫米波频段的频谱，包括：阿联酋、澳大利亚、马来西亚、丹麦、挪威、卢森堡和斯洛文尼亚。值得一提的是，毫米波频谱是在 2019 年 11 月的世界无线电通信大会 (WRC-19) 上才被分配用于移动服务，而 3.5 GHz 频段早在 2007 年就被几个地区所确定。迄今为止，移动运营商在

拍卖中对毫米波频段的竞价，还没有超过对低频段的竞价。这意味着，以美元/MHz/pop 为单位计算，毫米波频段的价格目前普遍低廉。

衡量一个频段是否准备就绪，还有一个重要指标就是该频段所进行的试验次数。2020 年，由于疫情危机的影响，所有频段的整体试验数量较 2019 年有所减少。然而，毫米波试验占有所有频段试验的比例却从 2019 年的 9% 小幅上升到 2020 年的 13%。目前，毫米波频段的试验总数已超过 100，<sup>4</sup>表明该技术进入成熟阶段。

## 美国：引领毫米波生态系统的发展

美国市场在 5G 毫米波频谱的使用方面处于全球领先地位，国内所有主要运营商都已经使用该频段提供 5G 商用服务。这得益于美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 比大多数国家先行

一步，率先将毫米波频谱用于移动服务，从而为移动运营商提供了一个理想的选择，以发挥这些频段的超高速、低时延和高容量优势。

表 1

### 美国的毫米波频谱分配情况

频段*	日期	数量 (MHz)
28 GHz	2019 年 1 月	850
24 GHz	2019 年 5 月	700
37 GHz	2020 年 3 月	1000
39 GHz	2020 年 3 月	1400
47 GHz	2020 年 3 月	1000

\*之前的毫米波频谱分配和二级市场交易也与 5G 相关，因为在美国，频谱牌照是技术中立的  
资料来源：GSMA 智库

<sup>4</sup> 截至 2020 年第三季度，全球已经进行了 116 项毫米波频段的试验。

## 中国：为毫米波做好准备，2022 年冬奥会的部署计划已经确定

与美国相比，中国尚未向运营商提供毫米波频谱进行商业部署。目前中国的 5G 频段为中频段（2.6、3.3、3.5 和 4.9 GHz）及低频段（700 MHz）。

据说，中国工业和信息化部（工信部）正在探索 5G 毫米波在 26 GHz 频段（24.75–27.5 GHz）的使用。虽然目

前还没有确定分配给运营商的时间表，但是人们已经意识到，毫米波频谱将会深刻影响中国的 5G 机遇。与此同时，中国移动、中国联通和中国电信正在开展试验，建设 26 GHz 试点网络，为 5G 毫米波在 2022 年北京冬奥会上的大规模示范应用做好准备。

## 欧洲：毫米波分配不多，但势头正劲

在欧洲，迄今的重点是 3.5 GHz 频段，有 12 个国家已经分配了频率，34 个移动网络正在使用该频段。截至 2020 年三季度末，欧洲只有两个国家分配了毫米波频谱<sup>5</sup>，尚无运营商推出使用毫米波频谱的商用 5G 网络。

不过，欧盟正在采取有力措施，旨在促进包括毫米波在内的 5G 新频段的可用性。不久的将来，5G 毫米波的部署有望增加和提速。2019 年 5 月，欧盟委员会通过了一项执行决定，以协调 24.25–27.5 GHz（26 GHz）频段的无线电频谱，使成员国能够为使用该频段制定通用的技术条件。成员国的监管机构还被授权在

2020 年 12 月 31 日前分配至少 1 GHz 频段的 26 GHz 频谱以供移动通信使用。尽管大多数监管机构都无法达成这个激进的期限，而且疫情还会延缓这一进程，但是欧洲许多国家已经在就这一频谱的释放进行磋商（如瑞典、法国、德国、荷兰）。为了进一步加快在欧盟范围内部署 5G 网络，欧盟委员会于 2020 年 6 月通过了一项关于小区域无线接入点（小基站）的实施条例。新规明确了 5G 小基站的物理和技术特性，将免除个体规划许可要求。小基站对于及时部署 5G 网络至关重要，这种网络能够提供高容量、增加覆盖范围以及加快连接速度。

<sup>5</sup> 意大利（2018 年 10 月）和芬兰（2020 年 6 月）。此后希腊也分配了毫米波频谱。

## 在其他地区，毫米波频谱的许可条件多种多样

授予移动运营商的毫米波频谱的数量存在着很大差异：例如，意大利在 26 GHz 频段仅释放了 1000 MHz 的频谱，而在新加坡，移动运营商可以在该频段使用的频谱数量是意大利的三倍以上。

目前，已经有 7 家运营商开通了使用毫米波频段的 5G 商用网络：NTT Docomo 和 Rakuten（日本）；MTN（南非）；亚太电信（中国台湾）；AT&T、T-Mobile 和 Verizon（美国）。随着技术的成熟，未来几年使用毫米波频段的商用网络将大幅增加，预计很快将在韩国、泰国和中国香港实现商用。

表 2

### 各国在毫米波频段分配的频谱数量（截至 2020 年三季度）

国家/地区	日期	频段	带宽
韩国	2018 年 6 月	28 GHz	2400 MHz
意大利	2018 年 10 月	26 GHz	1000 MHz
美国	2019 年 1 月	28 GHz	850 MHz
中国香港	2019 年 3 月	28 GHz	1200 MHz
日本	2019 年 4 月	28 GHz	1600 MHz
美国	2019 年 5 月	24 GHz	700 MHz
中国台湾	2020 年 1 月	28 GHz	1600 MHz
泰国	2020 年 1 月	26 GHz	2600 MHz
美国	2020 年 3 月	37/39/47 GHz	3400 MHz
新加坡	2020 年 4 月	26 GHz	3200 MHz
芬兰	2020 年 6 月	26 GHz	2400 MHz

资料来源：GSMA 智库

## 5G 毫米波消费设备越来越多，越来越普及

直到最近，人们对于毫米波的移动通信应用前景还抱有相当多的怀疑态度。2017 年初，多家移动网络运营商成功开展了毫米波服务的外场试验，厂商和 OEM 开始研发 5G CPE 和网络设备。2018 年 10 月，美国一家领先的运营商在一些城市推出了预商用 5G FWA 互联网服务。

这几年，毫米波手机和 CPE 数量增长显著。2019 年市面上只有一些毫米波手机和 FWA CPE，但是预计到 2020 年底将有超过 30 款手机和 35 款 FWA CPE 投放市场。此外，尽管疫情危机和潜在的经济衰退造成了不确定性，但 5G 毫米波设备生态系统仍在继续增长

和扩大。消费者可以预期，到 2021 年将有超过 100 款毫米波手机和超过 50 款 FWA CPE 陆续上市。

随着规模的扩大，设备的价格也会降低。总体而言，随着规模经济的实现和供应 5G 设备的厂商越来越多，5G 设备成本已经开始下降。智能手机关键部件的全球统一改进带来了极大好处，因为这便于扩大生产规模，减少了对设计团队的依赖，由此节省的成本超出了新增的前期成本（例如需要支持多个频段）。当前，美国市场在毫米波设备的供应方面处于领先地位，譬如支持毫米波的 iPhone 12 系列手机就是一个很好的例子，这进一步推动了该技术的普及应用。

## 5G 毫米波网络设备技术进步迅速

如今，所有主要的一线和二线网络设备厂商都在向移动运营商提供毫米波设备产品。此前，在 2017 年至 2020 年期间，毫米波产品的开发进入了紧张的起步阶段，大多数厂商将主要精力投入到研发和覆盖范围测试，以及波束管理<sup>6</sup>稳健性。那时，技术挑战集中在波束故障恢复和覆盖范围的扩展。现在，许多挑战都已迎刃而解，更有一些新的第一代毫米波大规模 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 解决方案，可以处理时速高达 100 公里的高速移动 UE<sup>7</sup>。

我们预计，在 2020 年至 2022 年期间，毫米波设备的成本将大幅降低，在技术和运营方面也将有明显改

进，例如先进的波束管理、更高的峰值速率、多用户 MIMO、更高的等效全向辐射功率 (EIRP)、更低的噪声值以及前向回传共享。从长远来看，更新、更灵活的解决方案将会提供更多的容量来适应流量的增长，并提升特定基站周围的性能。随着越来越多的毫米波设备被消费者使用，新的大规模 MIMO 将能够处理日益增多的用户设备，并使用创新的多用户调度技术。<sup>8</sup>今年完成的 3GPP R16 规范对毫米波的操作作出一些改进，为这项技术指明了具体的演进路径。此外，各种无线接入网 (RAN) 分体模式的产品也将越来越丰富。

6 波束管理可协调多根天线，并支持它们建立必须准确指向接收端 UE 的定向传输。

7 用户设备 (User equipment)

8 在上行链路或下行链路中可同时调度多个用户，并采用连续干扰消除技术。

## 毫米波设备类别



- **大容量宏基站有源天线单元 (AAU)：**这些有源天线单元可以在人口密集的地区为大量用户提供足够的容量，使用的频谱将集中在 24.25 至 29.5 GHz 之间。



- **微站、灯站和杆站：**它们中的大多数服务于 2T2R 800 MHz 或 4T4R 400 MHz 范围的 26 GHz 或 28 GHz 频谱。这些小基站外形紧凑而节能，可提供户外热点覆盖。



- **室内 5G 小基站解决方案：**厂商已开始推出使用毫米波的室内 5G 小基站，确保运营商能够提供连续的 5G 毫米波覆盖。这些小型基站可以使用紧凑、轻巧的设备，确保毫米波频谱达到类似于光纤的速度。利用现有的以太网布线，重量不到 4 千克，通常只需一名工程师就可以轻松安装。

## 毫米波设备成本

目前，与现有的低频段和中频段解决方案相比，毫米波无线电设备的基础设施要昂贵一些，主要因为它是一种新技术，而设备厂商尚未达到规模经济生产。材料清单 (BoM) 成本也是目前增加这种价格差异的因素之一。不过，6 GHz 以下解决方案与毫米波解决方案之间的成本差距正在缩小，预计未来几年将会越来越小。

围绕毫米波 AAU 有很多创新，生态系统提供的解决方案也越来越经济。新设备有望采用专门设计的毫米波射频集成电路 (Radio-Frequency Integrated Circuit, RFIC)，能耗更低，设计更紧凑，风载更小，而且重

量更轻。此外，更高的 EIRP 可以覆盖更广的区域，提高用户吞吐量。新的毫米波 AAU 也将更加依靠自然冷却，前向回传的传输中使用增强型通用公共无线电接口 (Enhanced common public radio interface, eCPRI) 可以减少能耗。厂商的生态系统一直非常注重寻找方法，进一步提高毫米波网络解决方案的成本效益。

正如我们在第 3 节所述，即使短期内设备成本较高，毫米波也已经有可能成为一系列部署场景中的高性价比解决方案，因为它能够容纳比低频段高得多的带宽和流量容量。



# 3 2020-2025 年期间的总体拥有成本 (TCO) 分析

在本节中，我们评估了在六个不同的场景中部署 5G 毫米波解决方案的成本效益，在这一时期，毫米波具有很高的成本效益潜力：

- 两个场景 - 在大中华区和欧洲的一个假想的密集市区的户外地点进行部署。
- 三个场景 - 在大中华区的一个假想市区、欧洲的一个郊区和美国的一个村镇部署 FWA。
- 一个场景 - 在一个假想的企业办公场所进行部署。

在密集市区和 FWA 场景中，我们基于卫星和颗粒度人口数据的分析，选取三个不同的现实地区的平均值，构建了假想的部署区域，而对于室内场景，我们则基于一个假想的大型密集办公空间展开分析。

## 3.1 密集市区场景

考虑到各地至少需要 100 Mbps 的下载速度，我们发现，在 2025 年之前，大中华区和欧洲的人口密集地带除了最初部署的 5G 网络外，还需要扩充容量层。在这两种场景下，用 5G 毫米波网络增加容量层都可以节省成本。在大中华区，当高峰期联网用户数占总用户数的比例超过 10%，且运营商的市场占有率也超过 10% 时，就会出现这种情况。在欧洲，当联网用户数占总用户数的比例超过 25%，且运营商的市场占有

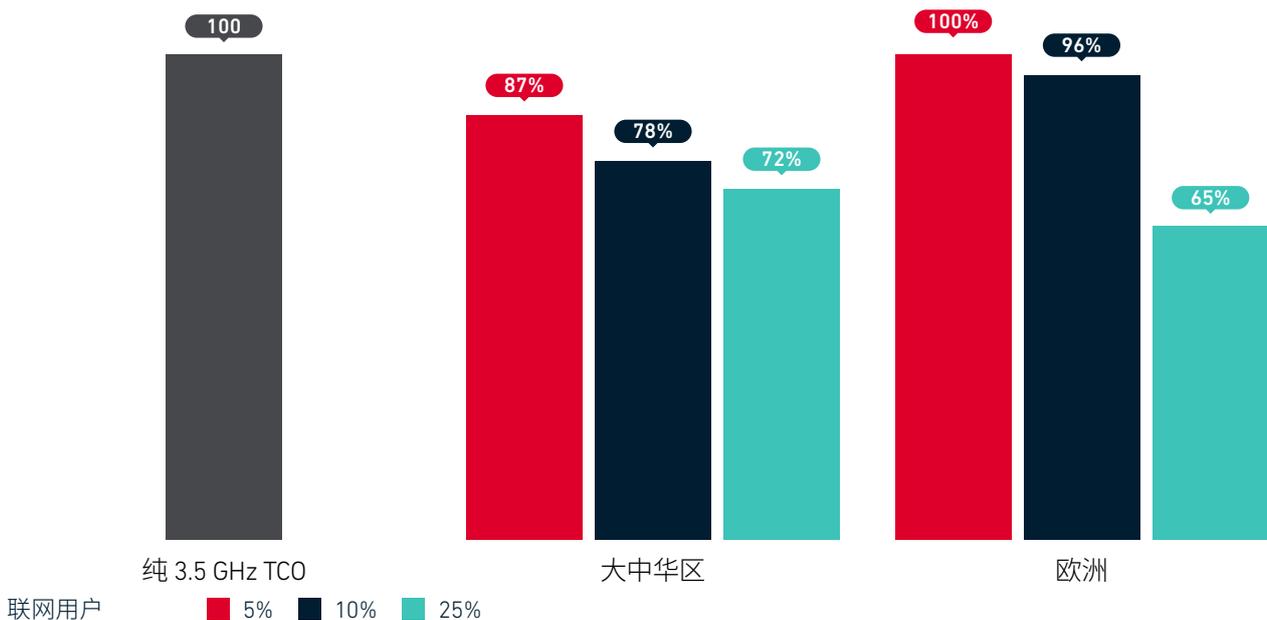
率超过 10% 时，也会出现这种情况。

5G 毫米波的经济性在中国和欧洲之间是不同的，因为前者预期有着更高的流量需求和技术采用率，人口密度更大，并且在高频段有更广的可用带宽（例如 800 MHz 对比 400 MHz），所有这些条件都提高了 5G 毫米波部署的成本效益。

图 3

### 3.5 GHz 加 5G 毫米波网络的 TCO NPV

百分位基线：纯 3.5 GHz 的 TCO



我们的场景只考虑了户外产生的移动数据需求，并比较了两种不同的 5G 部署策略：

- **5G 网络仅依靠中频段基站来实现覆盖和扩容：**我们假设某运营商先是提供覆盖整个区域的 5G 中频段频谱“覆盖”层，日后随着流量需求超过部署容量，使用新的中频段基站（宏基站和小基站）来增加网络密度。
- **5G 网络依靠中频段基站实现覆盖，依靠毫米波基站额外扩容：**与第一种部署策略相似，我们假设某运营商先是提供覆盖整个区域的 5G 中频段频谱“覆盖”层，日后随着流量需求超过部署容量，使用毫米波专用基站（宏基站和小基站），而不是中频段基站，来增加网络密度。

在密集的市区，第二种部署策略（即中频段加 5G 毫米波网络）的成本效益取决于两个主要因素。一方面，

更大的毫米波带宽提供了更高的容量和出色的频谱效率，一旦出现容量缺口，只需要少数基站就能填补缺口。另一方面，与毫米波设备相关的单个基站的成本较高。

我们假设流量需求随人口密度而变化<sup>9</sup>，并评估这两个备选部署策略在不同数值下的成本效益，以反映三个主要方面的不确定性：<sup>10</sup>

- 我们考虑了某一地区可能存在的几种流量需求强度水平，以高峰期联网用户占比的假设值<sup>11</sup>来表示。
- 我们还考虑了不同的运营商市场份额，这反映了运营商所获取的不同用户（及流量需求）水平。
- 最后，考虑到欧洲频谱分配的异质性，我们考虑了这些结果对每个运营商分配频谱数量的敏感性。

## 在大中华区的密集市区场景中，只要有频谱可用，5G 毫米波就可以实现成本效益

在大中华区，我们考虑在一个假想的密集市区采用上述两种备选部署策略，这个市区是以大中华区内的几个密集城市的平均值来构建的。值得注意的是，平均而言，所考虑的城市密集区覆盖了这些城市总人口的近 50%，但仅占城市地理面积的 16%。<sup>12</sup>

在一个中心场景中，当 5G 网络可以在各地实现至少 100 Mbps 的下载速度，高峰期联网用户达到 25%，而运营商的市场份额为 30% 时，我们估计，在中频段基

站加装毫米波基站的部署策略，最多可以节省 28% 的成本。

在不同的城市密集区，运营商的市场份额和联网用户的比例会有很大差异。图 4 显示了市场份额为 5% 至 50%，联网用户为 5% 至 40% 情况下的成本节约。根据我们的估计，举例而言，当联网用户占比超过 8%，运营商市场份额超过 7% 时，毫米波可以带来成本效益。

<sup>9</sup> 这是一个保守的假设，因为每个用户的流量在这一时期保持不变，而且预计 5G 将带来新的用例，产生额外的非人为数据流量。

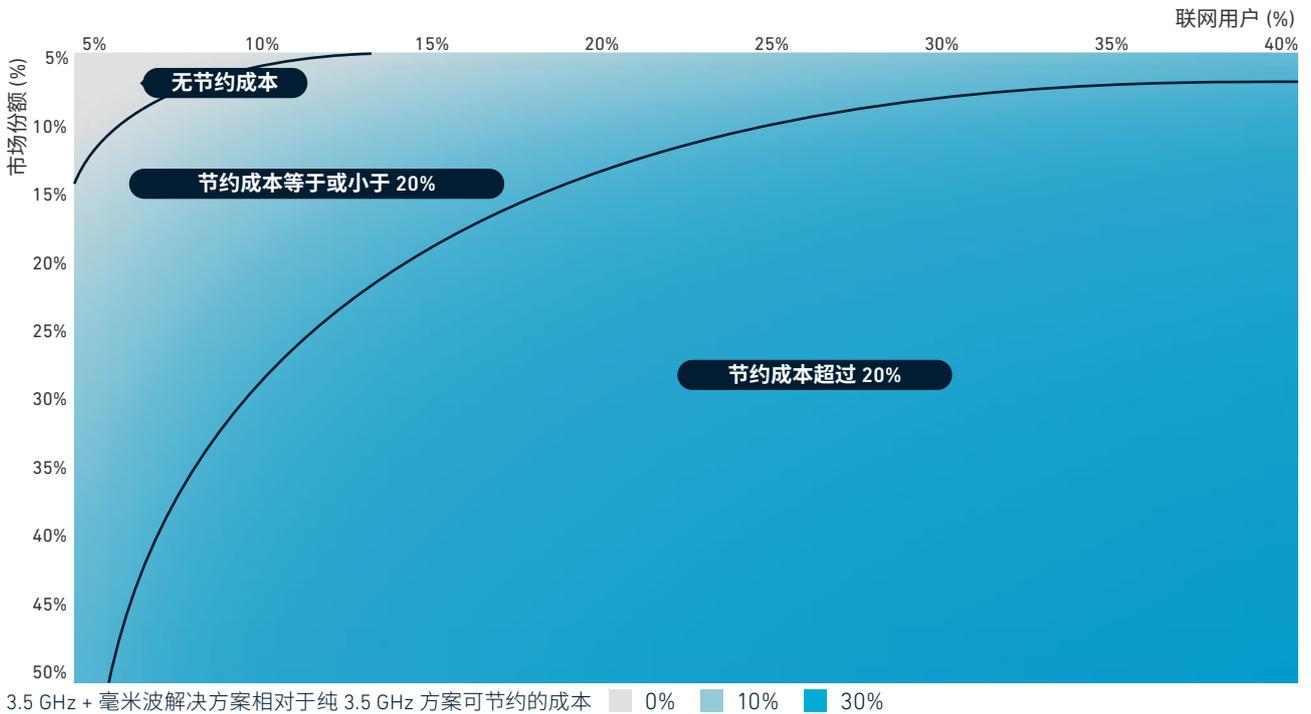
<sup>10</sup> 有关建模假设和资料来源的详情，请参阅附录。

<sup>11</sup> 假设活跃的联网用户为 10%，并且这些用户在任何时间点的下载速度都相同。

<sup>12</sup> 有关所考虑的地区及其人口密度，请参阅附录。

图 4

## 在大中华区的密集市区场景下节约的成本 - 下载速度不低于 100 Mbps



## 在欧洲，如果有很高的户外流量需求，那么这个时期在密集市区部署 5G 毫米波解决方案便可创造成本效益

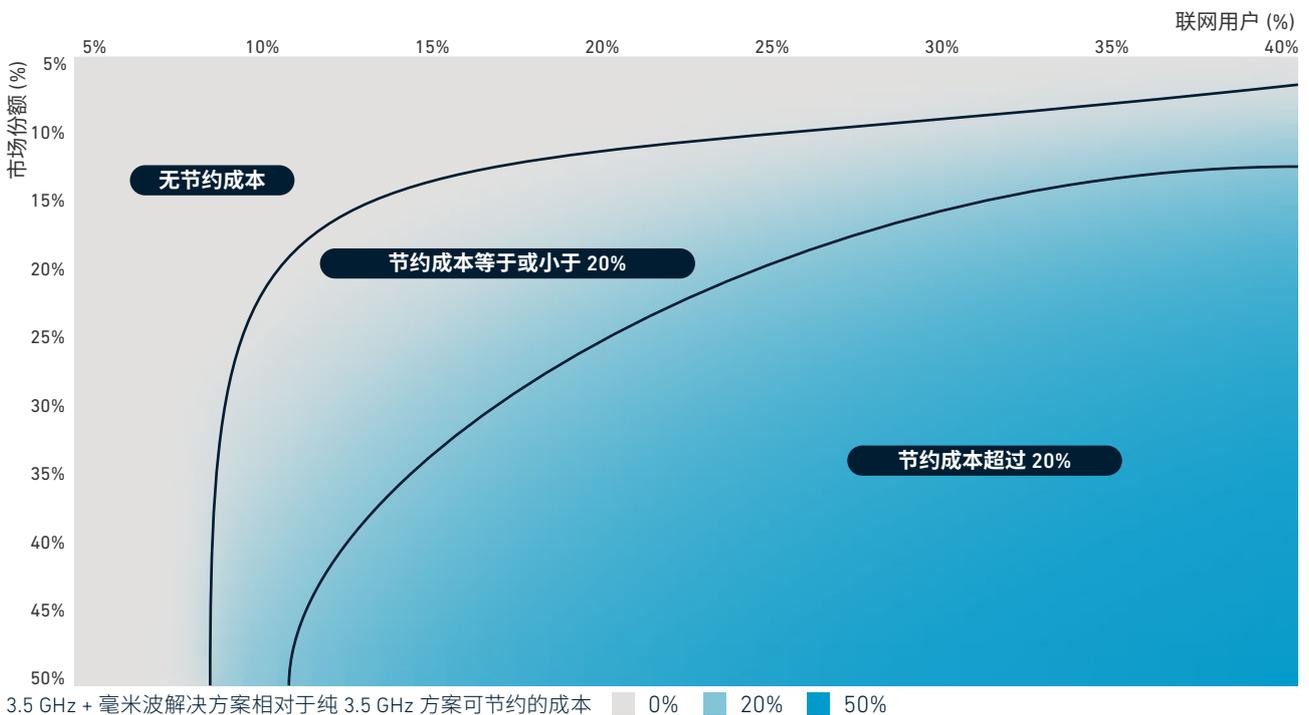
在欧洲，我们考虑了在一个假想的密集市区执行上述部署策略，该地区是根据欧洲三个首都城市的真实密集市区构建的。值得注意的是，平均而言，城市密集区覆盖了这些城市总人口的近 45%，但仅占城市地理面积的 6%。

在一个中心场景中，当 5G 网络可以在各地实现至少 100 Mbps 的下载速度，联网用户达到 25%，而运营商的市场份额为 30% 时，我们估计，在中频段基站加装毫米波基站的部署策略，最多可以节省 35% 的成本。在这个中心场景中，对于毫米波所支持的容量层的需求，只出现在我们研究的密集市区中的最稠密之处。

在欧洲不同的城市密集区，运营商的市场份额和联网用户的比例会有很大差异。图 5 显示了市场份额为 5% 至 50%，联网用户为 5% 至 40% 情况下的成本节约。在每个地方都能达到 100 Mbps 的下载速度时，增加一个毫米波容量层最多可以节省 53% 的成本。根据我们的估计，举例而言，当联网用户占比超过 10%，运营商市场份额超过 23% 时，毫米波可以带来成本效益。假设只有 10% 的联网用户，而运营商的市场份额 30%，在此情况下，毫米波仍然可以节省 4% 的成本，而对毫米波容量层的需求将会在 2025 年出现。

图 5

## 在欧洲的密集市区场景下节约的成本 - 下载速度不低于 100 Mbps



资料来源：GSMA 智库

上述结果是基于每个运营商在 3.5 GHz 频段有 80 MHz 以及在 26 GHz 频段有 400 MHz 的频谱分配。然而，各大洲之间运营商的频谱分配存在很大差异。<sup>13</sup> 我们探讨了这些结果对运营商的另一种频谱分配方案的敏感性，该方案是 3.5 GHz 频段有 100 MHz，或者 26 GHz 频段有 800 MHz。我们发现以下几点：

- 在 3.5 GHz 频段提供更多的带宽，可以使 3.5 GHz 网络的容量更大，从而减少对毫米波容量层的需求。将 3.5 GHz 频段的频谱数量增加到 100 MHz，相应的成本节约从基线值 35% 降低到 27%。
- 在 26 GHz 频段提供更多的带宽，使毫米波网络的容量更大，这样只需较少的毫米波基站即可满足流量需求，从而提高了毫米波的成本节约。将 26 GHz 频段的频谱数量增加到 800 MHz，相应的成本节约增加到 37%。

<sup>13</sup> 例如，在芬兰，一些运营商在 26-28 GHz 频段有 800 MHz，在 3.5-3.8 GHz 频段有 100 MHz；在意大利，一些运营商在 26-28 GHz 频段有 400 MHz，在 3.5-3.8 GHz 频段有 80 MHz。

## 3.2 固定无线接入场景

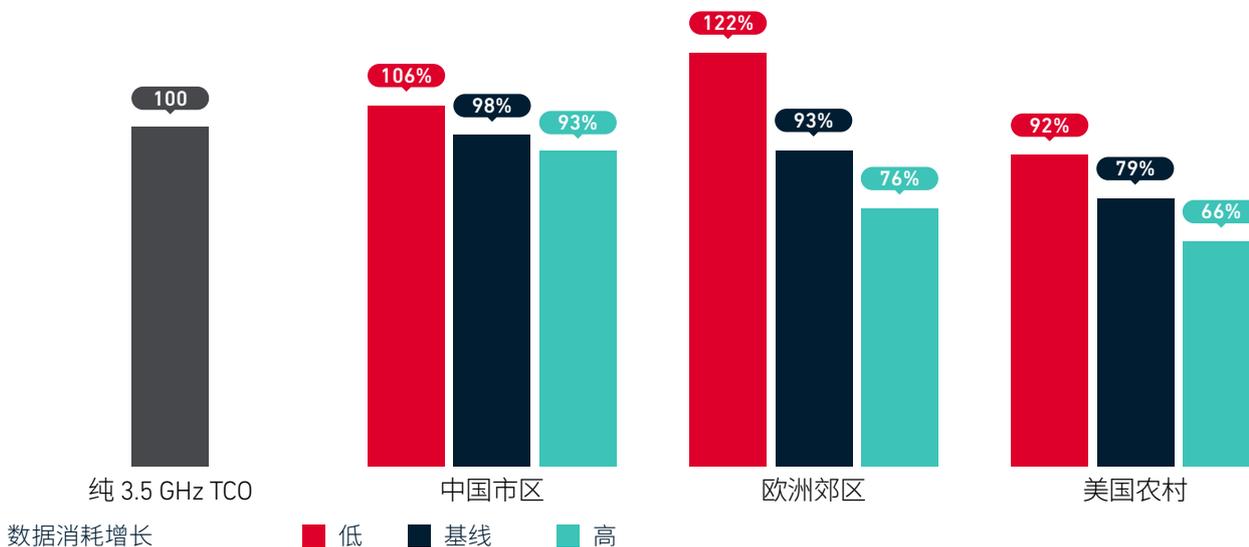
我们发现，使用毫米波频谱部署 5G FWA 网络可以实现成本效益。但是，这些结果对整体流量需求<sup>14</sup>、毫米波传播性能以及需求高峰时段下行链路和上行链路占总流量的比例都非常敏感。

在美国的村镇、欧洲的郊区和中国的城市，如果 5G FWA 能够抓住适当比例的住宅宽带市场需求，繁忙时段的流量需求相对较高，且数据消耗不会放缓，那么毫米波 FWA 就是一种具有成本效益的策略。

图 6

### 毫米波 FWA 网络的 TCO NPV

百分位基线：纯 3.5 GHz 的 TCO



资料来源：GSMA 智库

在 FWA 场景中，我们考虑了两种备选部署策略。需要指出的是，FWA 部署策略并不仅限于这两种。举例而言，其他相关的部署策略还包括部署一个由 3.5 GHz 基站和毫米波基站所组成的混合式 FWA 网络。我们考虑的两种备选部署策略如下：

- 在 3.5 GHz 频谱上部署 FWA 网络来实现覆盖和扩容：**我们假设某运营商将部署一个由 3.5 GHz FWA 基站组成的“覆盖”层，日后当流量需求超过吞吐能力时，追加部署中频段基站。
- 在毫米波频谱上部署 FWA 网络来实现覆盖和扩容：**我们假设某运营商将部署一个由毫米波 FWA 基站组成的“覆盖”层，日后当流量需求超过吞吐能力时，追加部署毫米波基站。

<sup>14</sup> 有关分析中使用的具体假设，请参阅附录。

我们假设流量需求随住户密度而变化，并且是平均数据消耗的函数。对于这两种策略，我们假设 FWA 网络将主要作为现有户外 5G 网络的“棕地”基站进行部署，而客户驻地设备 (CPE) 可采取室内窗挂式安装。<sup>15</sup>

评估这两种备选部署策略的成本效益时，我们假设 FWA 网络能在各地实现至少 100 Mbps 的下载速度和 50 Mbps 的上传速度，并作出了一系列假设，以反映五个主要方面的不确定性：<sup>16</sup>

- **数据消耗场景：**我们根据三个备选方案构建了到 2025 年的住户数据消耗预测：<sup>17</sup>
  - 低场景：数据消耗增长放缓（年复合增长率 CAGR 介于 6% 至 11%，视情况而定）。
  - 基线场景：期内的数据消耗以类似于近年来的速度线性增长（CAGR 介于 13% 至 18%，视情况而定）。
  - 高场景：期内的数据消耗呈指数增长（CAGR 介于 17% 至 22%，视情况而定）。
- **忙时流量的比例：**我们设定中心假设的忙时比例为 10%，据此探讨毫米波在更高和更低数值下的成本效益。

- **本地区订购 FWA 的住户比例（FWA 渗透率）：**我们的中心假设是到 2025 年 FWA 渗透率达到 30%，据此探讨毫米波在更高和更低订购率下的成本效益。
- **提供初始覆盖所需的基站数量：**<sup>18</sup>我们假设需要更多的毫米波（而不是中波段）基站来提供初始覆盖。但是，我们还研究了另一种部署方案，即在使用大功率屋顶安装的 CPE 时，需要的毫米波基站要少于 3.5 GHz 基站。<sup>19</sup>
- **忙时上行流量占总流量的比例：**我们假设高峰时段下行链路/上行链路的基线分担率为 85%/15%，据此探讨毫米波 FWA 网络在更高的上行高峰时段流量占比下的成本效益。

与 3.5 GHz FWA 网络相比，毫米波 FWA 网络的成本效益取决于几个因素。提供 5G FWA 覆盖所需的基站数量是一个关键因素。毫米波设备的相关成本也是比较高的。然而，毫米波拥有出色的吞吐量和容量特性，所以只需较少的基站就能填补下行链路和上行链路容量的缺口。

<sup>15</sup> 其他策略包括户外屋顶安装 CPE 等。

<sup>16</sup> 有关建模假设和资料来源的详情，请参阅附录。

<sup>17</sup> 有关实际使用的数值，请参阅附录。

<sup>18</sup> 有关基站间覆盖距离的假设，请参阅附录。

<sup>19</sup> 如果用户设备是大功率的屋顶安装 CPE，而且视线良好，或者地形特征对信号传播的阻碍较少，此时提供初始覆盖所需的 3.5 GHz 基站数量要多于毫米波基站。

## 在中国的城市地区，如果 5G FWA 能够抓住适当比例的住宅宽带市场需求，且数据消耗增长不会放缓，那么毫米波就能发挥成本效益

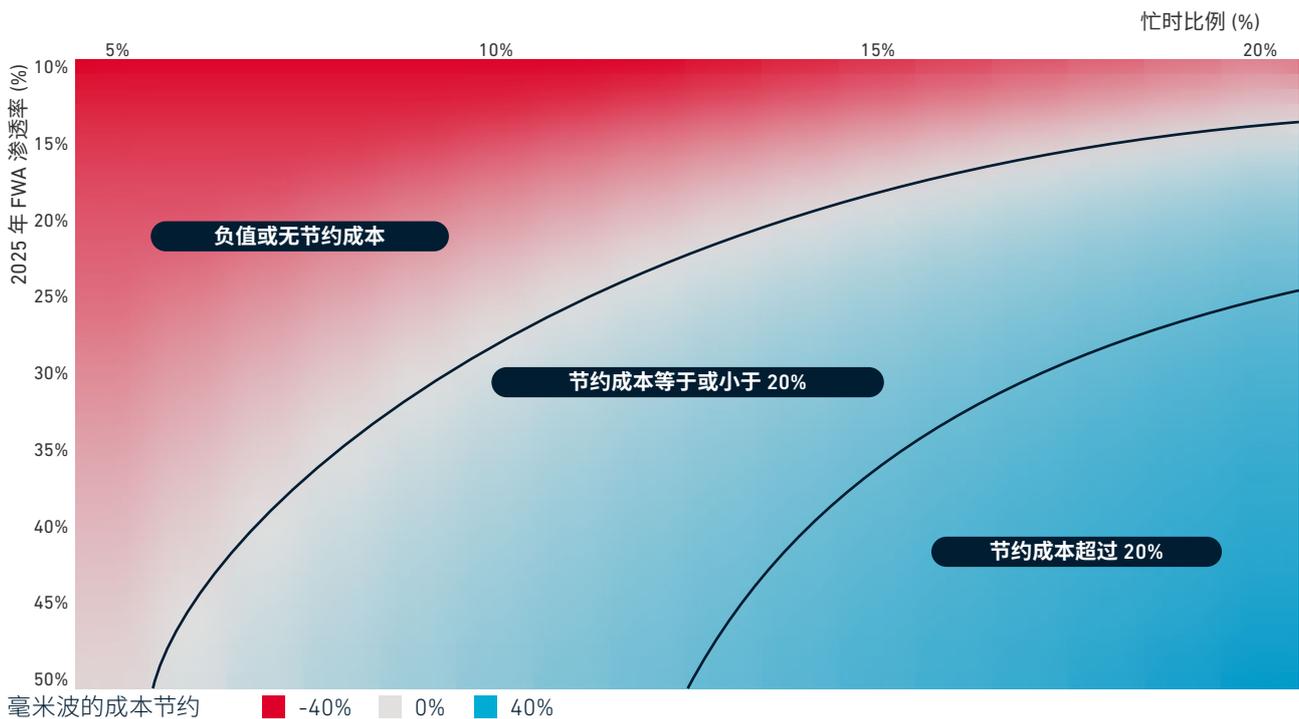
假设 FWA 部署将于 2023 年开始，在我们的中心场景中，我们测算毫米波 FWA 网络的成本如下：

- 在数据消耗低速增长的场景下，成本比 3.5 GHz 高 6%
- 在数据消耗基线增长的场景下，成本比 3.5 GHz 低 2%
- 在数据消耗高速增长的场景下，成本比 3.5 GHz 低 7%。

图 7 显示了在数据消耗基线增长的场景下，根据不同的 FWA 渗透率和忙时比例数值所估算的成本节约。在忙时流量占比 (10%) 的中心假设下，如果特定地区在 2025 年之前 FWA 渗透率达到 28% 或以上，那么毫米波 FWA 网络将具有成本效益。在考虑的数值范围内，如果忙时占比为 5% 至 20%，FWA 渗透率为 10% 至 50%，则毫米波网络的相关成本节约幅度将介于 -40% 至 +38%。

图 7

### 中国城市 FWA 场景下的成本节约 - 数据消耗基线增长



资料来源：GSMA 智库

## 在欧洲郊区，如果能有较高的占有率和流量需求，且数据消耗增长不会放缓，那么 5G 毫米波就是一种具有成本效益的策略

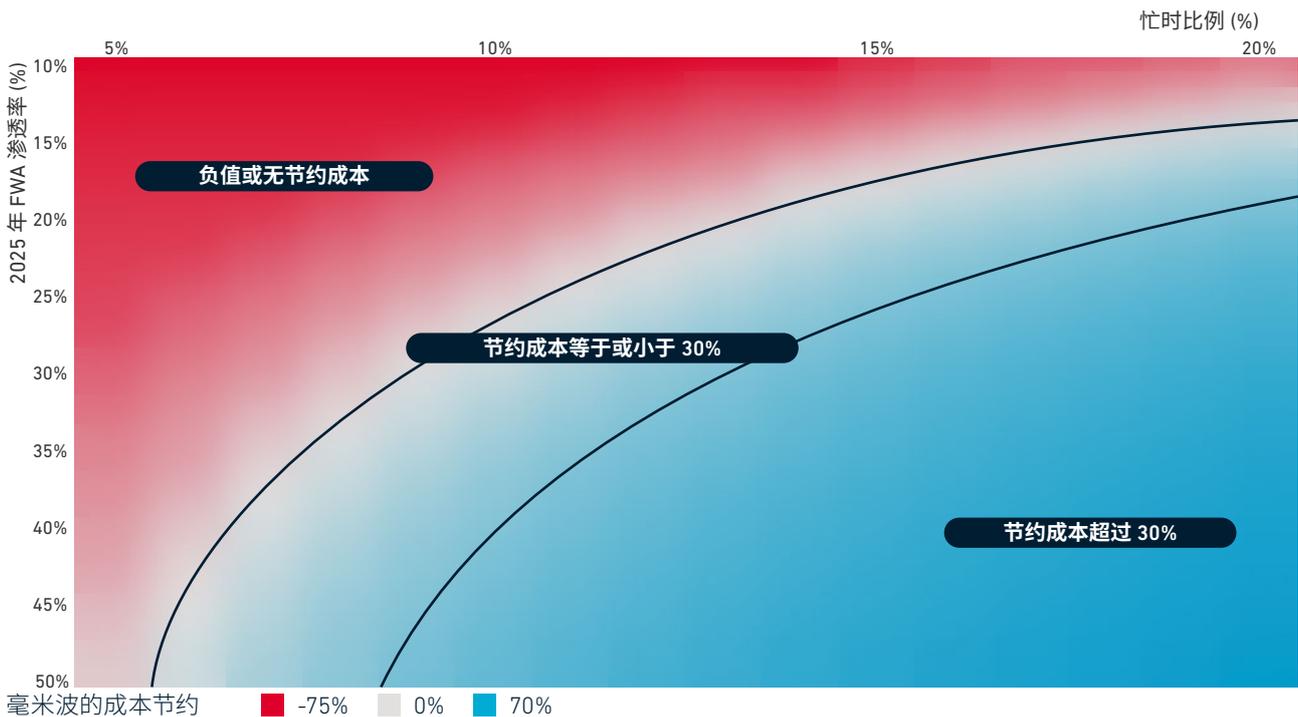
根据中心假设，我们测算毫米波 FWA 网络的成本如下：

- 在数据消耗低速增长的场景下，成本比 3.5 GHz 高 22%
- 在数据消耗基线增长的场景下，成本比 3.5 GHz 低 7%
- 在数据消耗高速增长的场景下，成本比 3.5 GHz 低 24%。

图 8 显示了在数据消耗基线增长的场景下，根据不同的 FWA 渗透率和忙时比例数值所估算的成本节约。在忙时流量占比 (10%) 的中心假设下，如果 2025 年之前 FWA 渗透率达到 27% 或以上，那么毫米波 FWA 网络将具有成本效益。如果忙时占比为 5% 至 20%，FWA 渗透率为 10% 至 50%，则毫米波 FWA 网络的相关成本节约幅度将介于 -75% 至 +68%。

图 8

### 欧洲郊区 FWA 场景下的成本节约 - 数据消耗基线增长



资料来源：GSMA 智库

## 在美国的村镇，如果忙时流量大，数据消耗增长不放缓，并且有相当比例的住宅宽带市场用户使用 FWA 服务，那么毫米波 FWA 部署也将具有成本效益

我们研究了在美国一个假想的农村小镇部署 FWA 网络，它是根据三个真实的村镇构建的。我们假设 FWA 部署将在 2022 年开始。

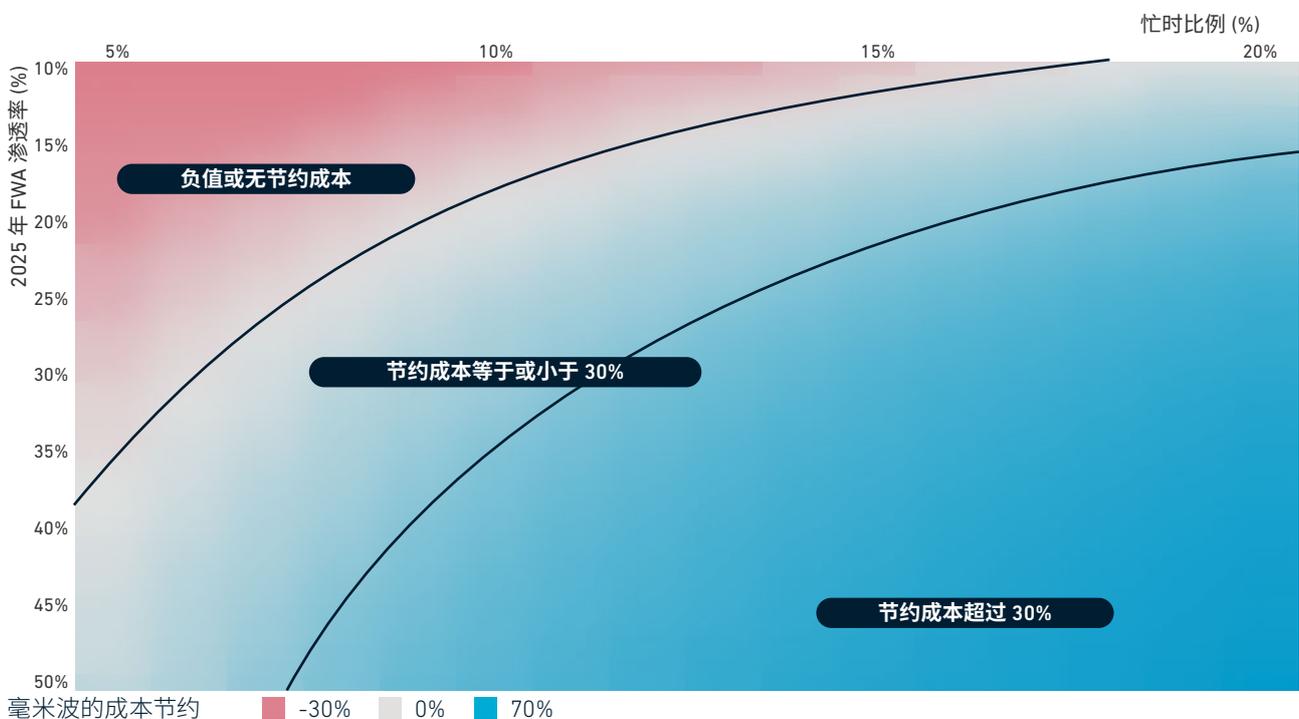
根据中心假设，我们测算毫米波 FWA 网络的成本如下：

- 在数据消耗低速增长的场景下，成本比中频段低 8%
- 在数据消耗基线增长的场景下，成本比中频段低 21%
- 在数据消耗高速增长的场景下，成本比中频段低 34%。

图 9 显示了在数据消耗基线增长的场景下，根据不同的 FWA 渗透率和忙时比例数值所估算的成本节约。在数据消耗基线增长的场景下，根据忙时流量占比 (10%) 的中心假设，如果 2025 年之前 FWA 渗透率达到 18% 或以上，那么毫米波 FWA 网络将比 3.5 GHz 网络更具成本效益。如果忙时占比为 5% 至 20%，FWA 渗透率为 10% 至 50%，则毫米波网络的相关成本节约幅度将介于 -30% 至 +71%。

图 9

### 美国农村 FWA 场景下的成本节约



资料来源：GSMA 智库

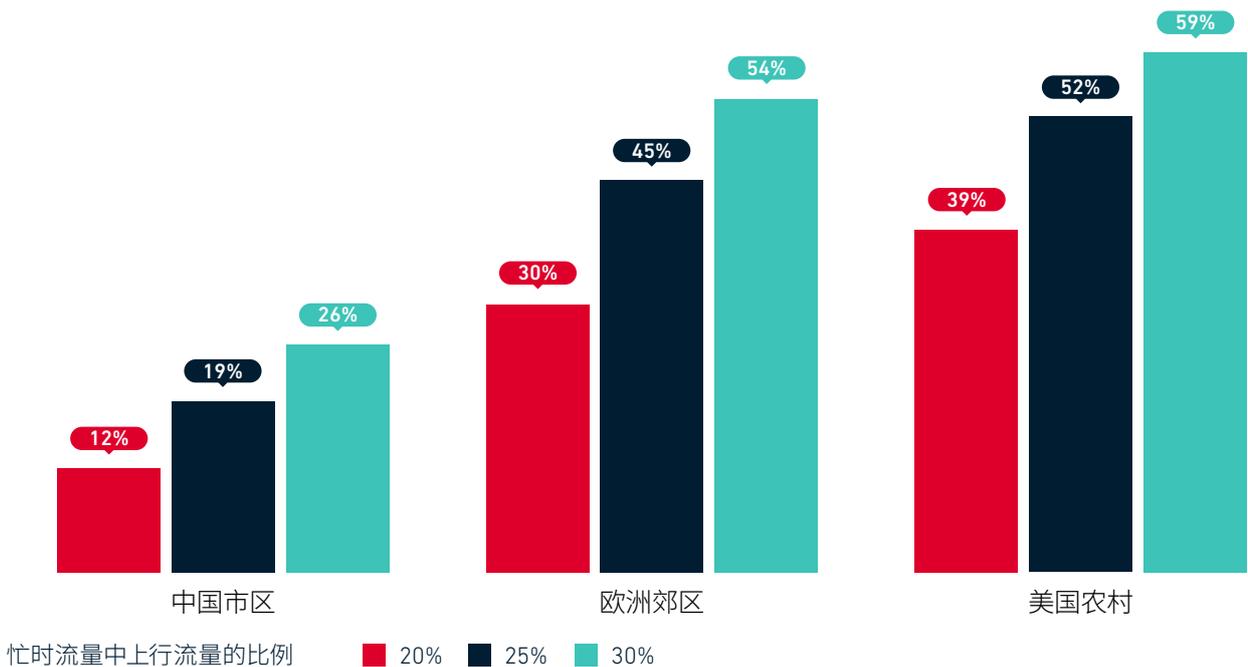
## 敏感性分析表明，上行忙时流量占比越高，毫米波的成本效益越好；而在低流量需求的场景下，如果部署地能够为该频段提供良好的传播条件，那么毫米波也可以发挥成本效益

我们分析了这些结果对较高的上行忙时流量占比的敏感性。游戏、视频会议等用例通常具有很高的上行流量比例，这些用例的增长速度会超过传统的下行链路导向的用例（如视频流）。在上行忙时流量占比高的情况下，我们发现相对于基线场景，毫米波 FWA 网络的成本效益更高，因为它在上行链路中的容量特性比 3.5 GHz 频段更好。

图 10 所示为下行链路/上行链路忙时流量分担率 80%/20%、75%/25% 和 70%/30% 的情况下，毫米波 FWA 网络的相关成本节约幅度，所依据的假设是忙时流量占比为 10%，数据消耗基线增长，且 2025 年之前 FWA 渗透率达到 30%。当下行链路/上行链路忙时流量分担率为 75%/25% 时，毫米波 FWA 网络的相关成本节约幅度在中国达到 19%，在欧洲达到 45%，在美国达到 52%。

图 10

不同的下行链路/上行链路忙时流量分担率所对应的 FWA 场景下的成本节约毫米波成本节约 (%)



我们还分析了这些结果对其他覆盖方案的敏感性，在这种方案下，覆盖特定地区所需的毫米波基站数量要少于 3.5 GHz 基站。举例而言，如果是屋顶安装的大功率 CPE，而且视线良好及/或地形特征对信号传播的阻碍较少，很可能就会出现这种情况。在这些条件下，即使流量需求不高，且数据消耗低速增长，毫米波也是划算的。

图 11 显示了与毫米波 FWA 网络相关的成本节约，假设覆盖所需的毫米波基站数量约占覆盖中国城市和欧洲郊区所需 3.5 GHz 基站的 70%，约占覆盖美国农村所需 3.5 GHz 基站的 33%。从这些假设得出，美国农村的成本节约较大。假设数据消耗低速增长，FWA 渗透率为 20% 及忙时流量占 5%，则在中国和欧洲，毫米波的成本节约在 7% 左右，在美国农村则高达 43%。

图 11

FWA 场景下的成本节约；假设使用大功率屋顶安装的毫米波 CPE，因此覆盖所需的毫米波基站数量少于 3.5 GHz 基站

毫米波成本节约幅度 (%)



资料来源：GSMA 智库

## 我们还对另一种策略的结果进行了额外的敏感性分析，即在 3.5 GHz 覆盖层之上使用毫米波为 FWA 提供容量层

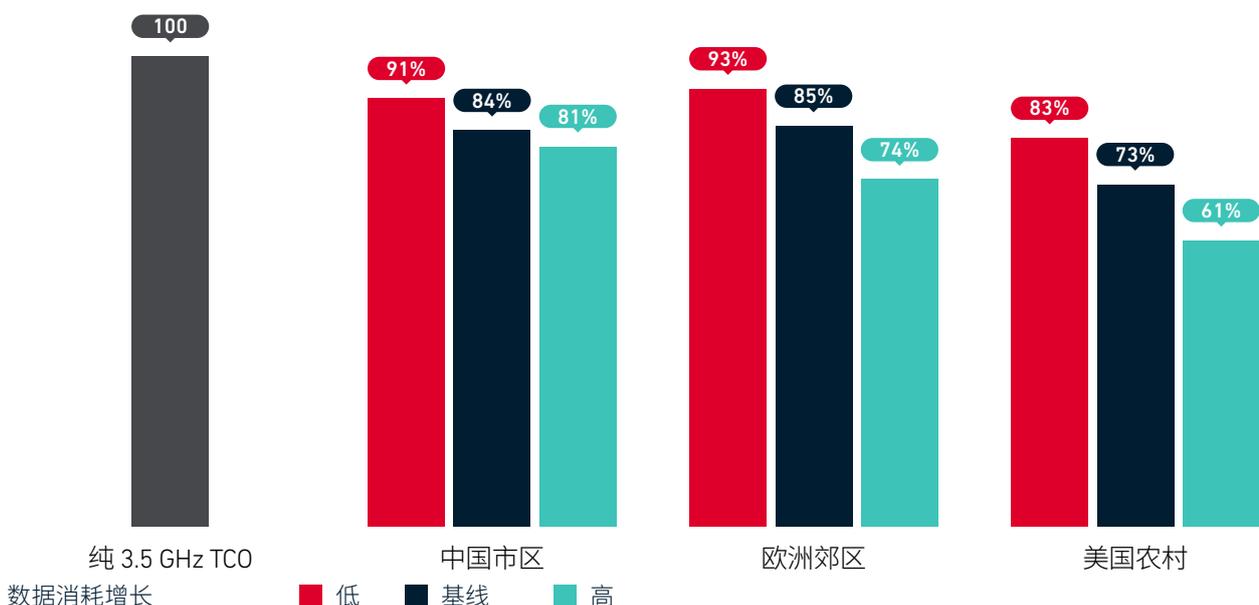
我们的敏感性分析表明，在这种情况下，成本节约可能会更大：在中心场景下，与纯 3.5 GHz 网络相比，针对基线敏感性的情形，中国城市的成本节约可以达到 16%，欧洲郊区达到 15%，美国村镇则达 27%（图 12）。但是，这些结果仅供参考，它们仅在该地区少

数局部地点出现容量缺口时才有效。图 13、图 14 和图 15 详细呈现了在中国城市、欧洲郊区和美国村镇的这种敏感性结果，描绘了在当地不同的 FWA 渗透率和忙时流量占比的情况下，所能达到的潜在成本节约。

图 12

## 3.5 GHz 加 FWA 毫米波网络的 TCO NPV

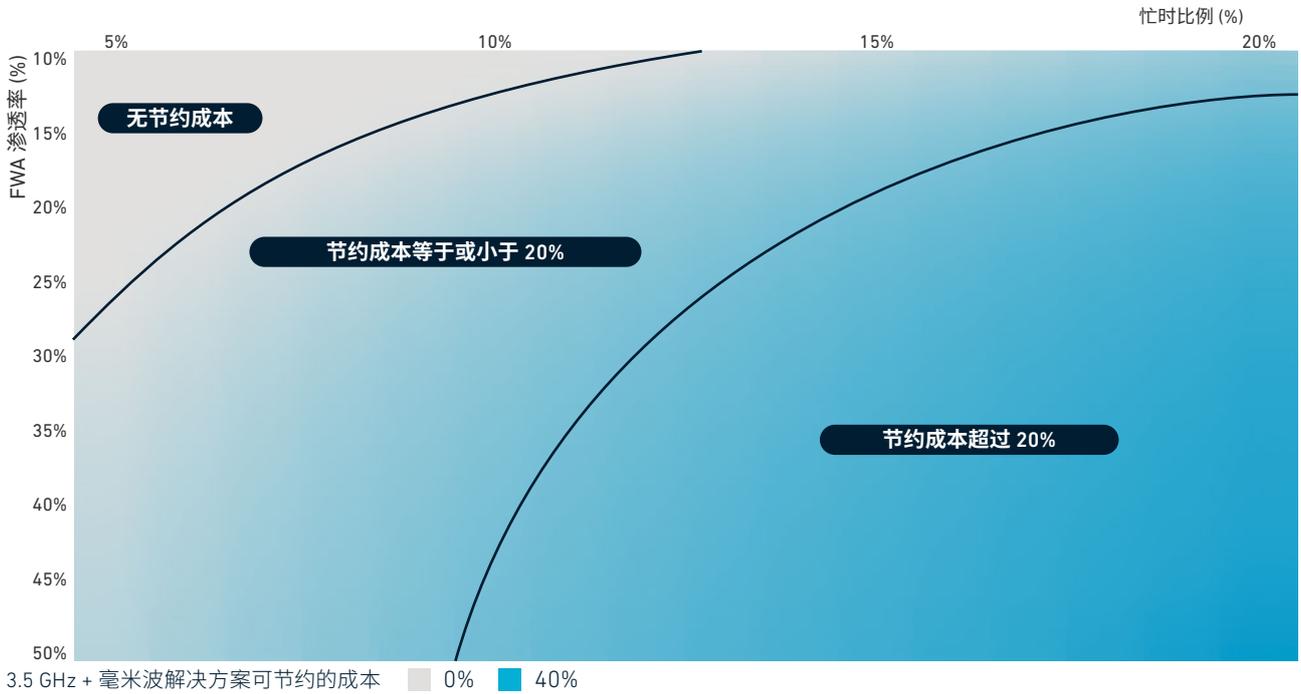
百分位基线：纯 3.5 GHz 的 TCO



资料来源：GSMA 智库

图 13

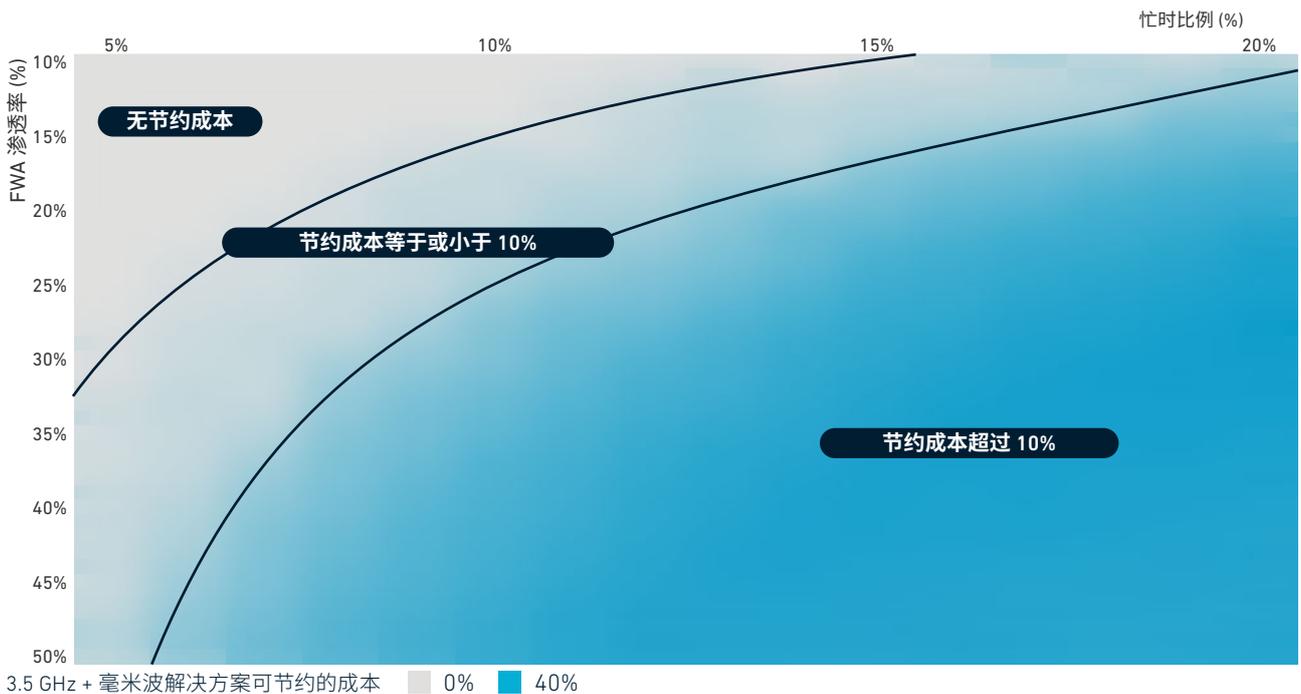
中国城市 FWA 场景下的成本节约 - 纯 3.5 GHz 网络对比 3.5 GHz 加毫米波网络



资料来源: GSMA 智库

图 14

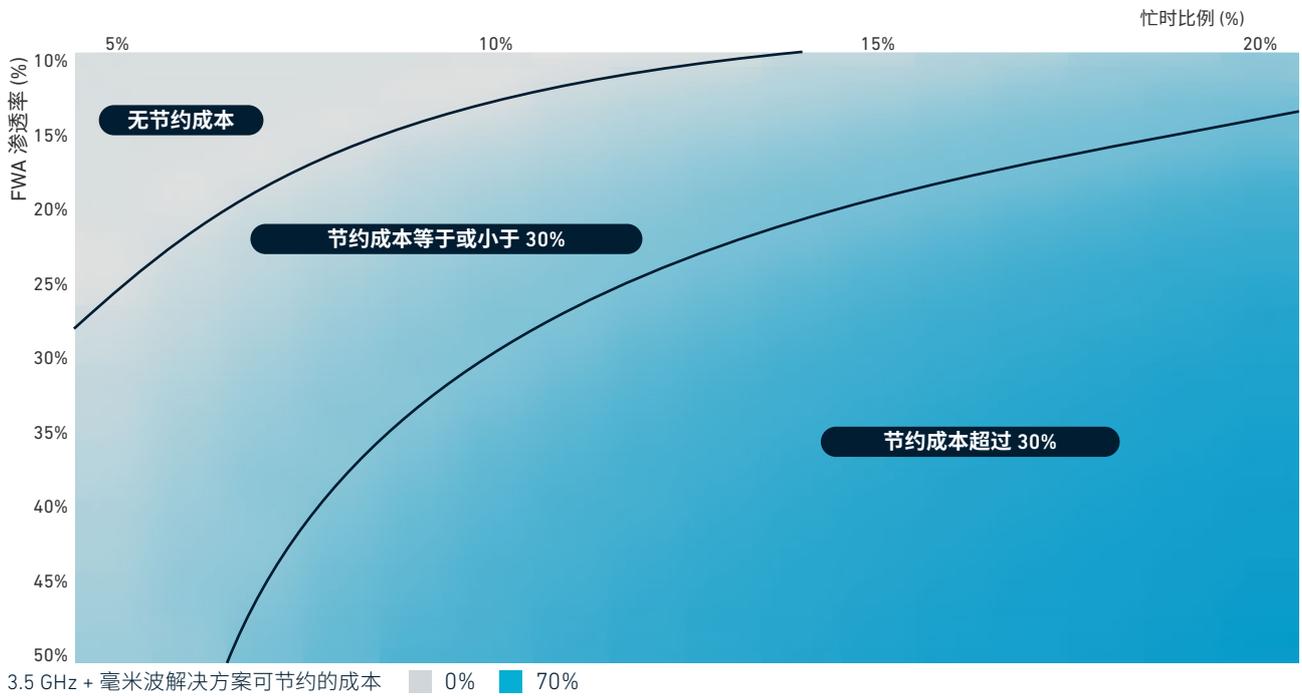
欧洲郊区 FWA 场景下的成本节约 - 纯 3.5 GHz 网络对比 3.5 GHz 加毫米波网络



资料来源: GSMA 智库

图 15

## 美国农村 FWA 场景下的成本节约 - 纯 3.5 GHz 网络对比 3.5 GHz 加毫米波网络



资料来源：GSMA 智库



### 3.3 室内场景

我们探讨了在一个假想的办公大楼中，在中频段小基站的基础上部署毫米波室内小基站的成本效益：

- 办公面积为 15,000 平方米，设有 1,875 个开放式工位。
- 平均每个工作日有 80% 的工位被员工占用。
- 内有 38 间会议室，每间会议室有 50 个工位。
- 我们假设办公室有多种联网设备：智能手机、笔记本电脑、安防摄像头和会议室的视频通信设备。假设其中一些设备连接 Wi-Fi 和以太网，还有一些设备连接室内 5G 网络。
- 我们还假设室外基站对室内的覆盖是有限的，因此只有一小部分 5G 流量（10% 的下行流量和 5% 的上行流量）可以分流到户外基站。
- 最后，我们考虑在会议室部署先进的通信设备，如 VR 设备、全息通信设备，以及大量使用边缘计算服务或者云端应用，这样可以节约成本。

我们假设部署 15 个 3.5 GHz 室内小基站，以提供完整的室内 5G 覆盖，假设每个基站的覆盖面积约为 1,000 平方米。在此场景下，在中频段覆盖层中增设毫米波

室内小基站，它的成本效益取决于两个主要因素：毫米波小基站带来的高容量，以及与毫米波小基站相关的高成本。

图 16 显示了在部署 3.5 GHz 小基站的同时部署毫米波室内小基站，预计可以节省的成本。这些基站是根据连接到室内 5G 网络的设备比例和同时活跃的设备比例部署的，并假设标准通信设备全部连接 5G。

我们发现，当有相当大比例的设备数据流量需要室内 5G 服务支持时，毫米波网络可节省高达 54% 的成本。这个范围内的精确数值取决于同时活跃的设备的比例，以及是否需要（和在多大程度上需要）为下一代视频通信设备提供连接。

取决于部署的设备是标准通信设备还是先进通信设备，<sup>20</sup>毫米波室内小基站与 3.5 GHz 小基站配合使用，可以节省 42% 到 46% 的成本。在部署标准通信设备的情况下，当移动设备、笔记本电脑和安防摄像头的比例超过 10%，而笔记本电脑和标准通信设备的比例超过 17% 时，部署毫米波小基站来补充 3.5 GHz 网络是符合成本效益的。

20 同时假设有 40% 的移动设备、笔记本电脑和安防摄像头接入 5G，并有 25% 的笔记本电脑和通信设备同时处于活跃状态。

图 16

## 室内办公空间场景下的成本节约 - 标准通信设备

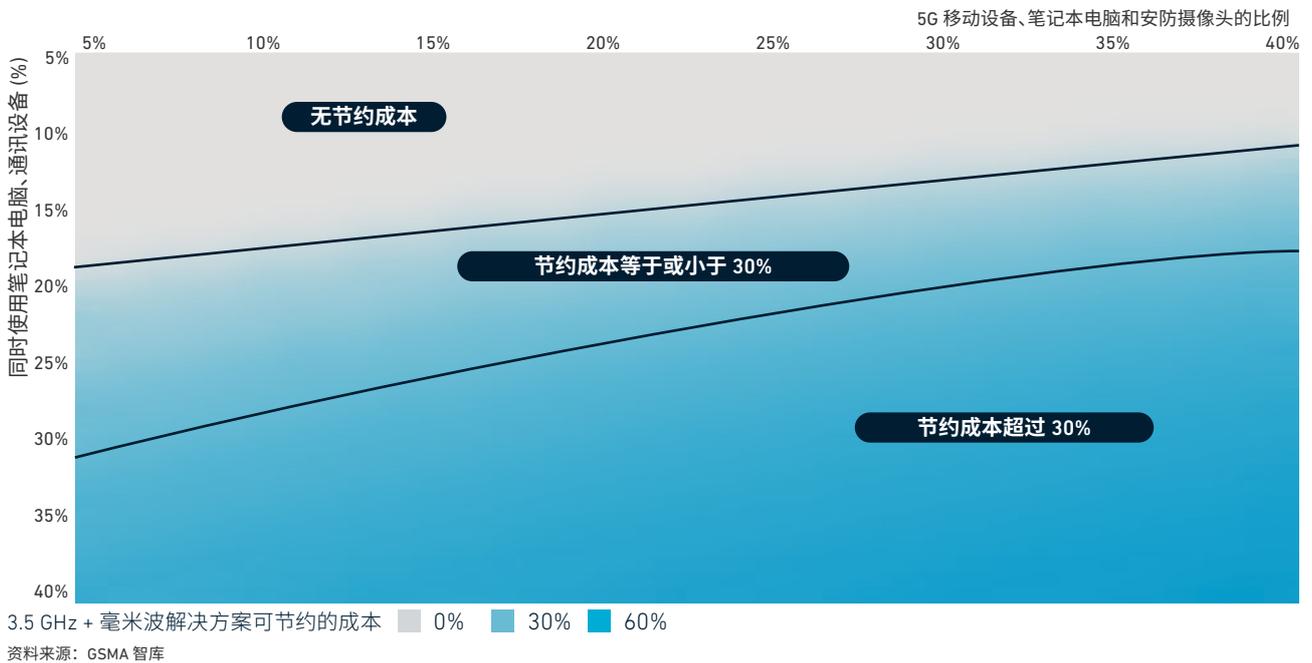
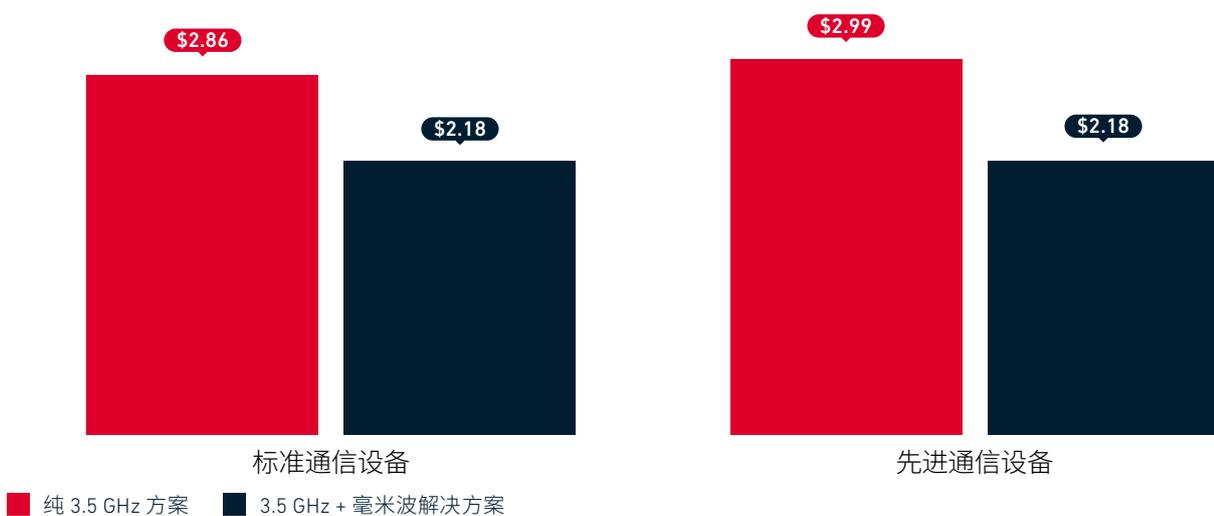


图 17 是只使用中频段的室内 5G 网络，与毫米波加中频段的 5G 网络的每平方米成本对比，我们假设有 10% 的智能手机、笔记本电脑和安防摄像头连接 5G，并有 20% 的笔记本电脑和通信设备同时处于活跃状态，<sup>21</sup> 具体取决于会议室部署的是标准通信设备还是先进通

信设备。我们估计，如果采用标准通信设备，中波段室内网络每平方米的年成本约为 2.90 美元，<sup>22</sup> 而如果采用先进通信设备，毫米波加中波段网络每平方米的成本约为 3.00 美元。

图 17

## 室内办公空间场景下的每平方米成本



<sup>21</sup> 并且假设有 10% 的移动设备和 100% 的安防摄像头同时处于活跃状态

<sup>22</sup> 包括资本开支在内，假设 5 年资产寿命和线性折旧

## 4 结论和建议

正如 TCO 分析所示，尽管毫米波的距离较短，设备成本较高，但是凭借高吞吐量和高容量，它可以在从目前到 2025 年的这段期间内，实现有针对性的、具有成本效益的 5G 部署。这些结果对移动运营商、装置和设备制造商以及政府都有着显著的意义：

- **移动运营商不应低估毫米波在短期内的作用。**毫无疑问，毫米波将是未来 5G 高容量和高吞吐量用例的推动条件。与此同时，在短期之内，毫米波同样可以作为一种高效的解决方案，适用于流量需求集中的地区。正如分析所示，在 3.5 GHz 网络中使用 5G 毫米波解决方案来增加容量层，可以实现成本效益。在 2025 年之前的这段时期，这些结果对于相当多的场景都是成立的，包括在一些城市中最密集的地方提供 FWA 5G 服务，或者作为一种室内解决方案来提供 5G 连接。如果运营商没有取得这个频谱，或者尚未充分测试这种网络解决方案，那么由于只能提供没有毫米波解决方案的 5G 服务，就有可能陷入竞争劣势。

- **政府和监管部门应在合适的情况下尽快推出毫米波频段投入使用。**各国政府都希望将 5G 作为一个新的经济增长点，推动经济进一步数字化。正如我们的分析所述，我们估计 5G 每年将为全球 GDP 增长作出 0.6% 的贡献，每年为全球经济创造约 6,000 亿美元，而毫米波将在实现这些效益的过程中扮演越来越重要的角色。如果不在合适的情况下及时分配足够的毫米波频谱（每个运营商约 1 GHz），政府就有可能给 5G 网络的发展设置人为障碍，妨碍其发挥社会经济效益。尽管毫米波频谱越来越广泛，许多国家仍未制定明确的计划为移动服务分配毫米波频段。
  - **市场已经万事俱备，预计将有更多更丰富的设备和装置加速投入使用。**过去几年，毫米波生态系统方兴未艾，市场蓬勃发展，然而厂商仍然需要继续完善 5G 毫米波设备和装置的产品，以达到完全成熟。许多 5G 运营商已经向他们的设备供应商施压，要求为所有新款旗舰设备（甚至是所有新款手机）提供 5G 支持。从事 5G 毫米波服务的运营商可以考虑类似的策略，向供应商表明支持毫米波手机是一项优先要务。随着 5G 毫米波解决方案的规模不断扩大，它将实现更加广泛的经济效益。未来将会出现更加丰富的消费者设备和装置可供选择，从而进一步降低部署成本，带来更多物美价廉的设备，推动 5G 更加普及。
-

---

# 附录： 2020 年 至 2025 年 5G 网络的总体 拥有成本建模

# A1 密集市区场景

我们评估了两种备选部署策略的成本效益：

- **5G 网络仅依靠 3.5 GHz 移动基站：**我们假设某运营商先是提供覆盖整个区域的 3.5 GHz 频谱 5G “覆盖”层，日后随着流量需求超过吞吐容量，使用新的 3.5 GHz 基站（宏基站和小基站）来增加网络密度。
- **5G 网络依靠 3.5 GHz 及毫米波移动基站：**与第一种部署策略相似，我们假设某运营商先是提供覆盖整个区域的 3.5 GHz 频谱的 5G “覆盖”层，日后随着流量需求超过吞吐容量，使用毫米波基站（宏基站和小基站）而不是 3.5 GHz 基站，来增加网络密度。

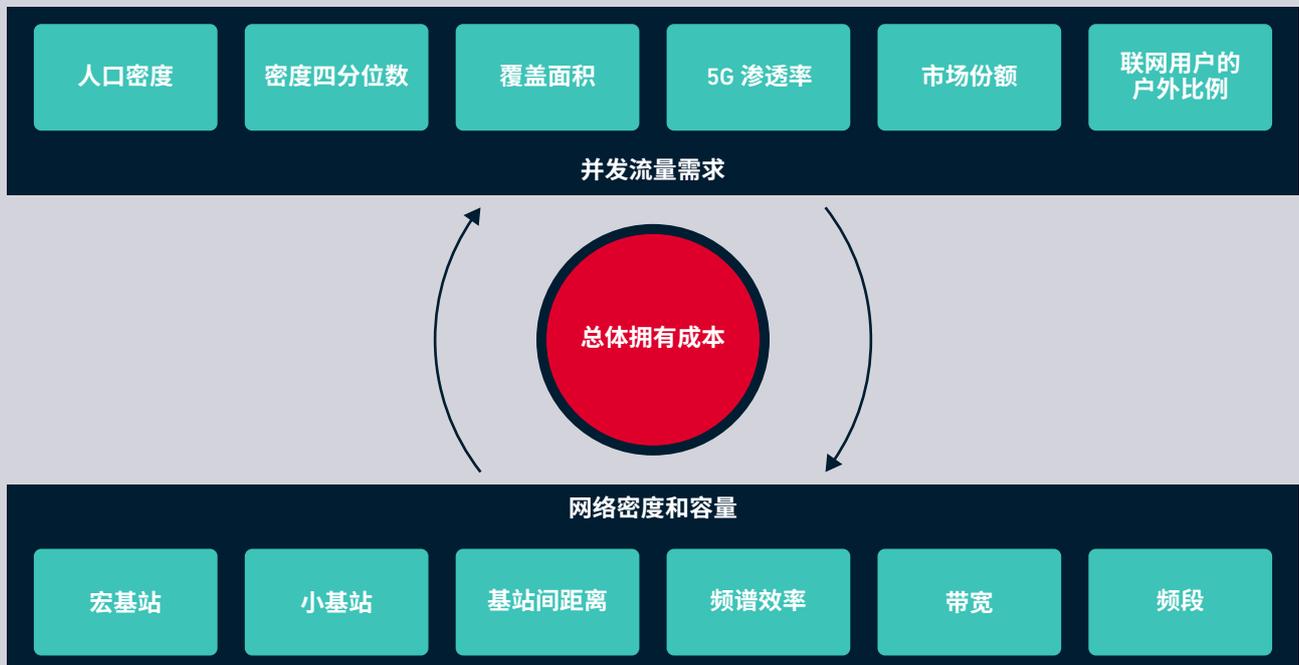
我们的模型利用三个模块来估计与这两种部署策略相关的总体拥有成本：

- 流量需求模块
- 供应模块
- 成本模块。

图 A1 为高级方法。

图 A1

## 密集型城市模型高级方法



资料来源：GSMA 智库

## i 流量需求

流量需求的估算取决于几个因素：

- 人口密度
- 5G 渗透率
- 网络支持的下载速度（网络性能场景）
- 连接的用户比例（联网用户比例）
- 主动下载数据的联网用户比例（活跃用户比例）
- 户外流量占总流量的比例
- 运营商的市场份额。

$$\text{流量需求} = \text{市场份额} * \text{人口密度} * \text{5G 连接渗透率} * \text{下载速度} * \text{联网用户比例} * \text{活跃用户比例} * \text{户外比例}$$

我们假设流量需求随人口密度而变化。<sup>23</sup> 我们利用卫星图像结合颗粒人口密度数据，确定了研究报告中选取的城市最密集区域。就部署而言，我们只考虑人口密集区。

表 A1 和表 A2 分别列出了大中华区和欧洲的考虑区域。

表 A1

### 大中华区的密集市区场景所考虑的地区

城市	考虑的地区			市区	市区		
	人口 (百万)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)		人口 (百万)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)
中国香港	5.4	342	15.8	7.5	11,151	6.5	
北京	9.0	374	24.0	23.9	3,440	6.9	
上海	8.2	188	43.6	26	2,452	10.6	
平均	7.5	301	25	19.1	2,348	8.1	

资料来源：GSMA 智库

<sup>23</sup> 我们假设中国的人口密度年增长率为 1.78%，欧洲为 0.3%。

表 A2

## 欧洲的密集市区场景所考虑的地区

城市	考虑的地区			市区		
	人口 (百万)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)	人口 (百万)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)
马德里	3.5	408	8.5	6.7	4,512	1.5
巴黎	3.4	154	22.0	11.6	5,606	2.1
雅典	2.1	153	13.4	3.8	2,988	1.3
平均	3	238	12.4	7.4	4,369	1.7

资料来源：GSMA 智库

如表 A1 和表 A2 所示，假设大中华区密集市区的平均人口密度约为每平方公里 25,000 人，假设欧洲密集市区的平均人口密度约为每平方公里 12,000 人。需指出的是，这些平均数既包括人口密度较高的地区，也包括人口密度较低的地区。为了反映少数局部地区占据大部分的流量需求，我们计算了各地区四分位数的

人口比例，并研究了各四分位数的 5G 部署情况。表 A3 为两个城市密集区按人口四分位数划分的需求占比。人口密度的最高四分位数，在大中华区是平均人口密度约为每平方公里 65,000 人，在欧洲是每平方公里 21,000 人。

表 A3

## 大中华区和欧洲的密集市区场景下按地区四分位数分列的人口比例

地区	四分位值	需求比例	人口密度 (千人/平方公里)
大中华区	25%	65%	65.3
大中华区	50%	19%	19.3
大中华区	75%	11%	11.3
大中华区	100%	4%	4.0
欧洲	25%	43%	21.6
欧洲	50%	30%	14.9
欧洲	75%	18%	9.2
欧洲	100%	8%	4.0

资料来源：GSMA 智库

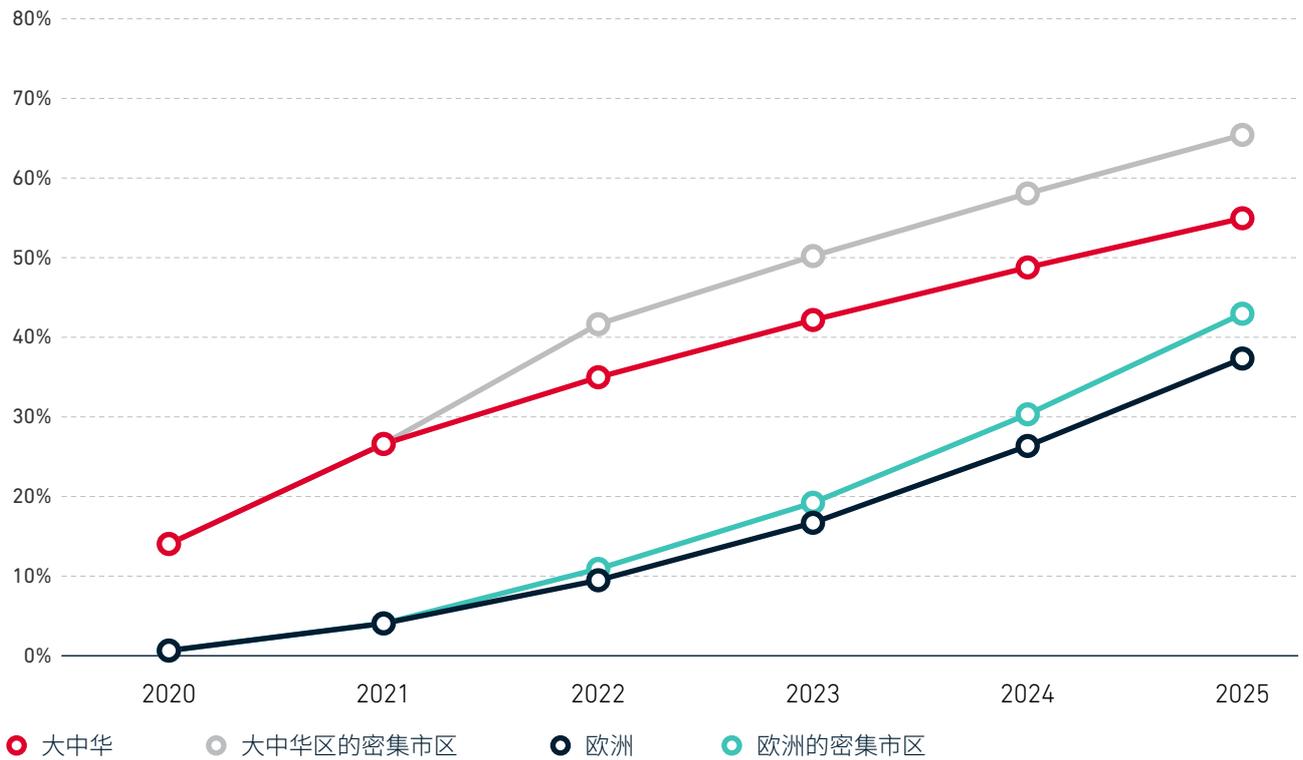
流量需求强度根据联网用户比例进行调整，假设 10% 的联网用户主动下载数据。

5G 采用率以 5G 连接数占人口的比例来表示。我们主要依据 GSMA 智库对 2020-2025 年期间的预测，并进

行了相应调整，以反映在 5G 初期，大多数的 5G 连接将集中于城市地区。图 A2 是我们的研究得出的两个地区的 5G 渗透率预测结果。

图 A2

### 2020-2025 年 5G 连接渗透率预测 占人口比例



资料来源：GSMA 智库

我们只考虑户外移动数据流量，并假设其占总流量需求的 20%。最后，我们根据 2020-2025 年期间的市场

份额假设，调整特定运营商所经历的流量需求。

## ii 供应模块

为了确定覆盖特定地区所需的基站数，我们假设要覆盖的表面积是规则的六边形，并用它来除以一个基站所覆盖的表面积。一个基站所覆盖的表面积是根据宏

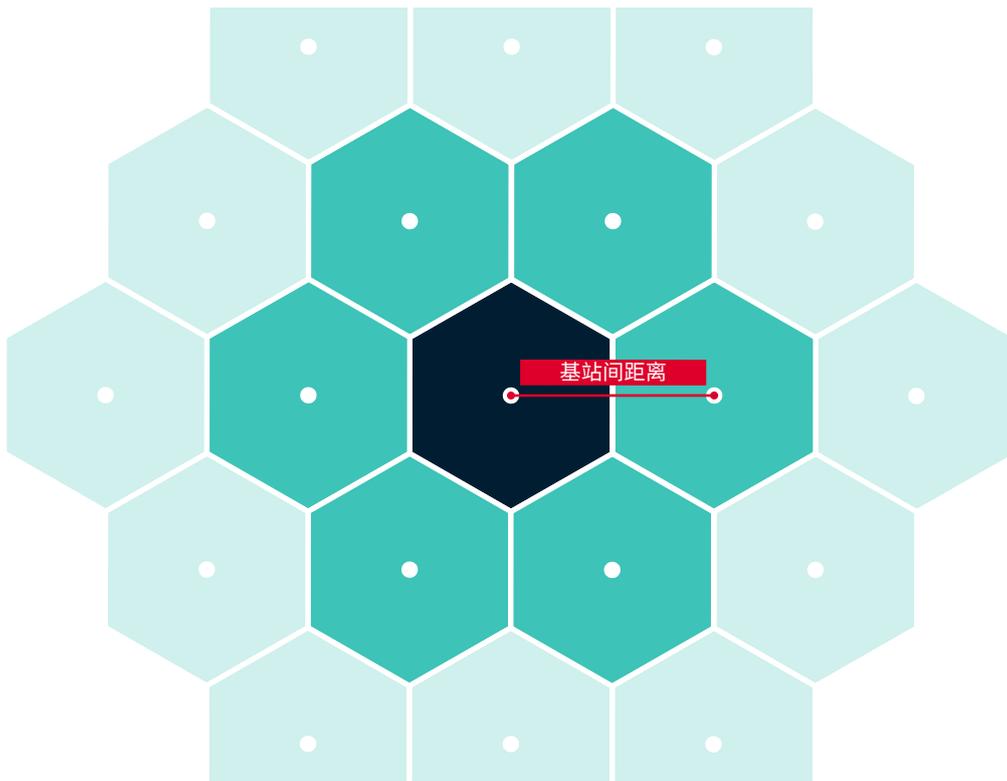
基站之间的平均距离（基站间距离，如图 A3 所示）计算的。根据以下的行业标准公式，可以算出一个宏基站所覆盖的表面积：

$$\text{基站所覆盖的表面积} = 2.6 * \left( \frac{\text{基站间距离}}{2} \right)^2$$

我们的中心假设是边缘用户的下行速度为 100 Mbps，则初始 3.5 GHz 覆盖层的站间距离约为 1,000 米。

图 A3

### 确定覆盖特定地区的基站数量



资料来源：GSMA 智库

假设到 2023 年，我们研究的两个城市密集区的 5G 区域覆盖率将达到 100%。

当确定 3.5 GHz 基站的数量后，我们考虑通过增设 3.5 GHz 基站（宏基站和小基站），或者增设毫米波基站（宏基站和小基站）来填补网络中出现的容量缺口。我们假设毫米波基站可以放置在户外的任何地方。

容量缺口是指对应下行吞吐能力<sup>24</sup>与下行流量需求之间的差异。总容量缺口除以吞吐量来决定，具体公式如下：

$$\text{吞吐量} = \# \text{扇区} * \text{带宽} * \text{频谱效率}$$

表 A4 列出了用于确定吞吐量的技术假设。

表 A4

## 技术假设

地区	频段 (GHz)	宏基站/小基站	扇区数	DL 频谱效率 (bps/Hz/基站)	带宽 (MHz)	双工方式
大中华区	3.5	宏基站	3	2.2	100	TDD
大中华区	3.5	小基站	2	2.2	100	TDD
大中华区	28	宏基站	3	3.5	800	TDD
大中华区	28	小基站	2	3.5	400	TDD
欧洲	3.5	宏基站	3	2.2	80	TDD
欧洲	3.5	小基站	2	2.2	80	TDD
欧洲	26	宏基站	3	3.5	400	TDD
欧洲	26	小基站	2	3.5	200	TDD

资料来源：GSMA 智库

为了反映棕地和绿地基站部署的成本差异，我们假设宏基站将被设置于现有的棕地位置<sup>25</sup>，或者绿地位置，因此，模型估算出 3.5 GHz 和毫米波容量层的数量如下：

- 升级的棕地宏基站数量
- 绿地宏基站数量
- 绿地小基站数量。

为了确定小基站的数量，我们假设在中国小基站占宏基站总数的 10%，而在欧洲小基站占宏基站总数的 50%。

<sup>24</sup> 我们假设在用户体验的质量开始下降之前，基站理论容量的利用率可以达到 80%。

<sup>25</sup> 为了确定可以升级到 5G 的棕地基站数量，我们假设现有 4G 网络的站点间平均距离为 773 米。

### iii 成本模块

表 A5 列出了我们对每类基站的资本开支和运营开支的估计。我们的估算是由下而上，将与资本开支（设备、回传、服务和安装）和运营开支（能源成本、机房租赁、维护和优化）相关的不同成本项目汇总计算

得出。在估算过程中，我们参考了 GSMA 智库对业界主要人士的专访，以及 GSMA 智库的网络经济模型得出的结果。

表 A5

#### 成本假设

地区	项目	资本开支	运营开支
大中华区	棕地宏基站的 3.5 GHz 升级	\$39,000	\$13,000
大中华区	3.5 GHz 新建绿地宏基站	\$88,000	\$14,900
大中华区	3.5 GHz 新建小基站	\$20,700	\$2,400
大中华区	现有棕地宏基站的毫米波升级	\$48,000	\$12,800
大中华区	毫米波新建绿地宏基站	\$95,000	\$14,700
大中华区	毫米波新建小基站	\$24,700	\$2,300
欧洲	棕地宏基站的 3.5 GHz 升级	\$54,000	\$15,200
欧洲	3.5 GHz 新建绿地宏基站	\$125,000	\$23,000
欧洲	3.5 GHz 新建小基站	\$33,000	\$2,800
欧洲	现有棕地宏基站的毫米波升级	\$73,000	\$15,000
欧洲	毫米波新建绿地宏基站	\$141,000	\$22,800
欧洲	毫米波新建小基站	\$38,000	\$2,700

资料来源：GSMA 智库

## A2 固定无线接入场景

在 FWA 场景中，我们考虑了两种备选部署策略：

- **在 3.5 GHz 频谱上部署固定无线接入网：**我们假设某运营商将部署一个由 3.5 GHz FWA 基站组成的“覆盖”层，日后当流量需求超过吞吐能力时，追加部署中频段基站。
- **在毫米波频谱上部署固定无线接入网：**我们假设某运营商将部署一个由毫米波 FWA 基站组成的“覆盖”层，日后当流量需求超过吞吐能力时，追加部署毫米波基站。

在这两种部署策略中，我们假设部署是通过以下方式完成的：首先升级现有的户外 5G 基础设施，最终部署新的绿地基站。

我们评估了这两种备选部署策略在三种场景下的 TCO：

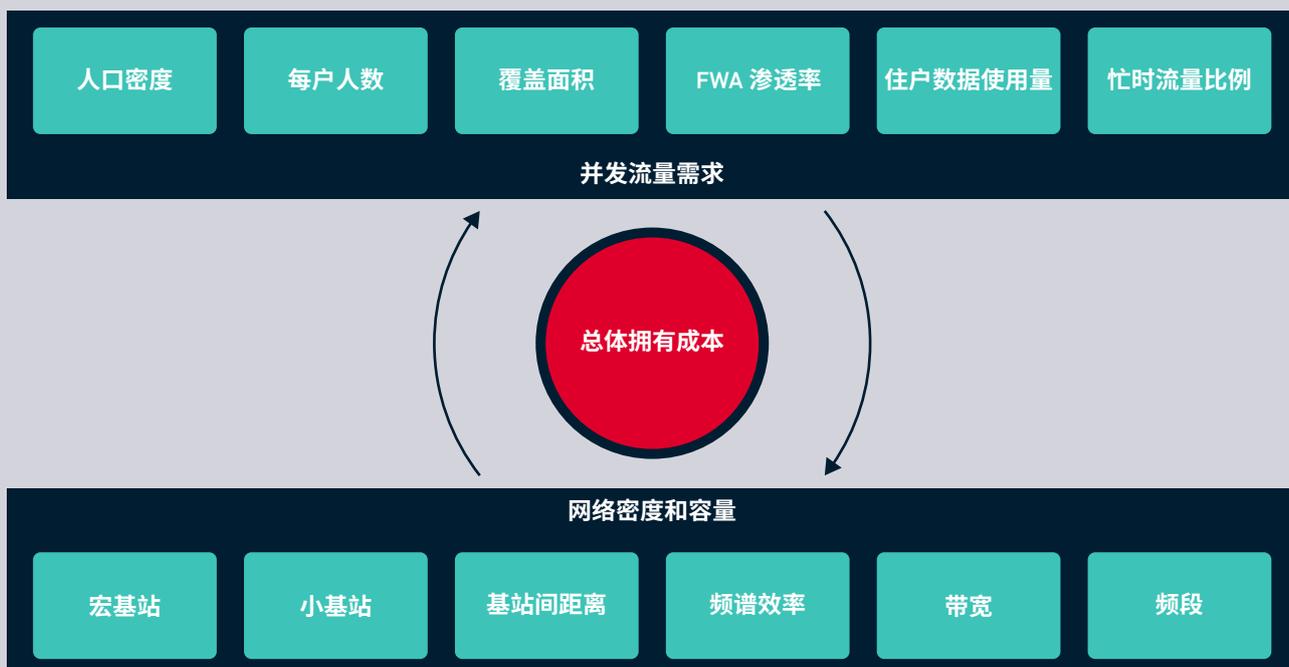
- 中国的一个假想市区，该地区是根据现实中的中国城市地区的平均值构建的。
- 欧洲的一个假想郊区，该地区是根据现实中的欧洲郊区城镇的平均值构建的。
- 美国的一个假想村镇，该地区是根据现实中的美国农村地区的平均值构建的。

为了估计与每个部署策略相关的总体拥有成本，我们的模型利用了三个模块：

- 流量需求模块
- 供应模块
- 成本模块。

图 A4

### FWA 模型高级方法



资料来源：GSMA 智库

## i 流量需求

我们对流量需求的估算分为上行流量和下行流量，主要取决于五个因素：

- 覆盖住户数
- 订购 FWA 的住户比例（FWA 渗透率）<sup>26</sup>
- 户均数据消耗水平及增长情况
- 总忙时流量中下行流量的占比
- 忙时流量的比例

DL 流量需求 (Mbps)

= (覆盖住户数 \* FWA 渗透率)

$$* \frac{\text{数据消耗量} \left( \frac{\text{GB}}{\text{月}} \right) * \text{忙时比例} * \text{下行流量比例} * 8 * 1024}{3600 * 30}$$

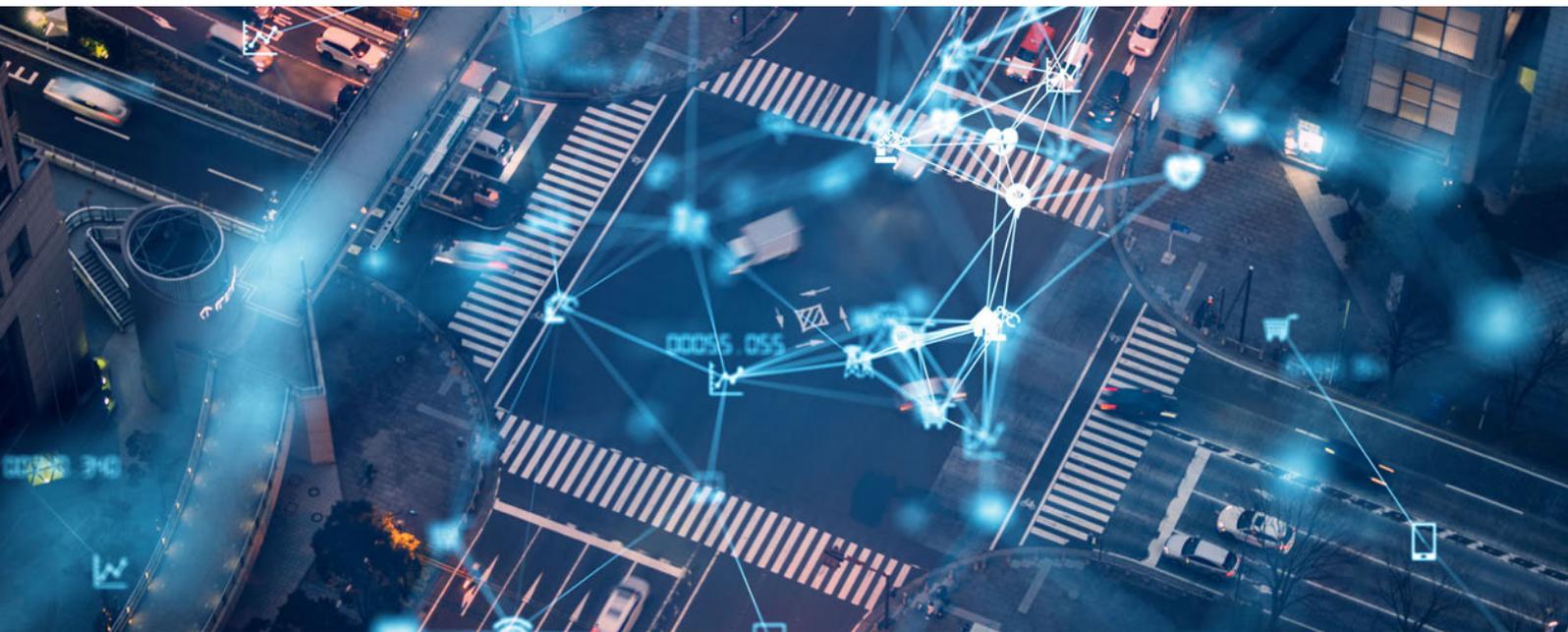
UL 流量需求 (Mbps)

= (覆盖住户数 \* FWA 渗透率)

$$* \frac{\text{数据消耗量} \left( \frac{\text{GB}}{\text{月}} \right) * \text{忙时比例} * \text{上行流量比例} * 8 * 1024}{3600 * 30}$$

住户密度是根据人口密度和面积（针对每个地区和地理类型，选取三个真实地区的平均数）以及每户人口数的假设而得出的。<sup>27</sup> 我们假设住户密度在中国场景

下每年增长 1.8%，在欧洲场景下增长 0.3%，在美国场景下增长 0.6%。



<sup>26</sup> 这也可以理解为 FWA 运营商在整个家庭宽带市场的市场份额。

<sup>27</sup> 我们假设中国每户 3.4 人，欧洲每户 2.3 人，美国每户 3 人。

表 A6、A7 和 A8 列出了我们研究中各地区的面积和平均人口密度。在中国，我们研究了在一个 112 平方公里、平均人口密度约为每平方公里 20,000 人的假想市区部署 FWA。

在欧洲，我们考虑的是一个约 6 平方公里的郊区，平均人口密度为每平方公里 5,000 人；在美国，我们考虑的是一个 17 平方公里的假想农村地区，平均人口密度约为每平方公里 1,100 人。

表 A6

## 中国市区 FWA 场景所考虑的地区

城市	人口 (百万)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)
昆明	1.8	71	25.6
哈尔滨	2.3	102	22.9
重庆	2.7	163	16.4
<b>平均</b>	<b>2.3</b>	<b>112</b>	<b>20.3</b>

资料来源：GSMA 智库

表 A7

## 欧洲郊区 FWA 场景所考虑的地区

城市	人口 (千人)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)
阿什福德 (英国)	24.1	5.2	4.6
梅赫伦 (比利时)	37.4	6.6	5.6
圣莫代福塞 (法国)	13.6	4.8	2.8
<b>平均</b>	<b>25</b>	<b>5.6</b>	<b>5</b>

资料来源：GSMA 智库

表 A8

## 美国村镇 FWA 场景所考虑的地区

城市	人口 (千人)	面积 (平方公里)	人口密度 (千人/平方公里)
纽约州 Elmira	35	25	1.4
印第安纳州 Mitchell	4	5	0.7
田纳西州 Shelbyville	17	21	0.8
<b>平均</b>	<b>19</b>	<b>17</b>	<b>1.1</b>

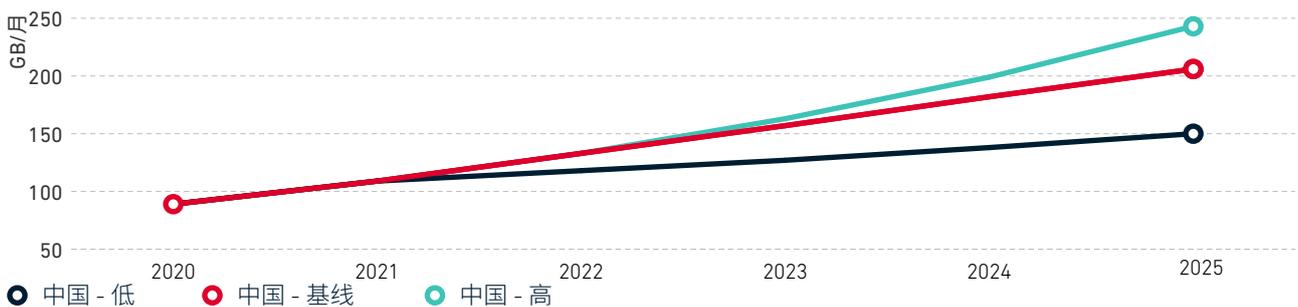
资料来源：GSMA 智库

图 A5、图 A6 和图 A7 显示了我们对于 2021 年至 2025 年期间每种场景下的住户平均数据消耗的预测。我们编制了三份预测，以评估两种部署策略的成本效益：

- 低场景：数据消耗量缓慢增长（年复合增长率 CAGR 在 6% 到 11% 之间）。
- 基线场景：数据消耗量增长率基本以这几年的速率线性变化（CAGR 在 13% 到 18% 之间）。
- 高场景：数据消耗量指数增长（CAGR 在 17% 到 22% 之间）。

图 A5

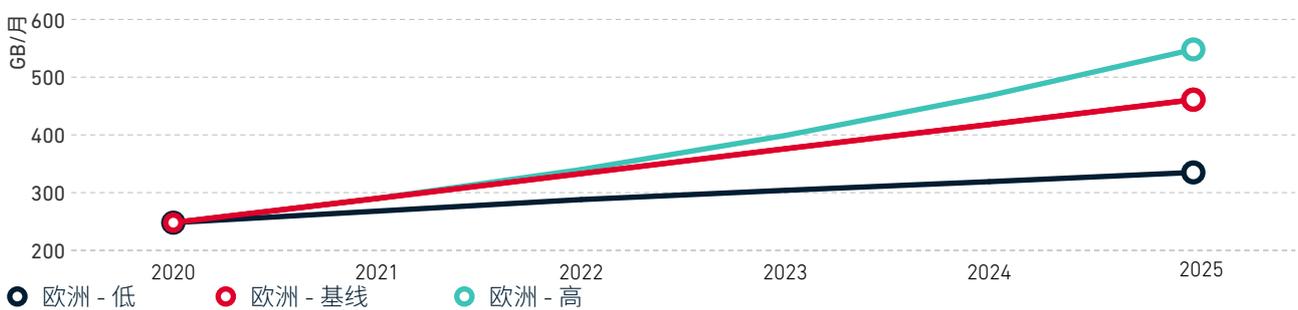
### 中国：2020-2025 年户均数据消耗预测



资料来源：GSMA 智库

图 A6

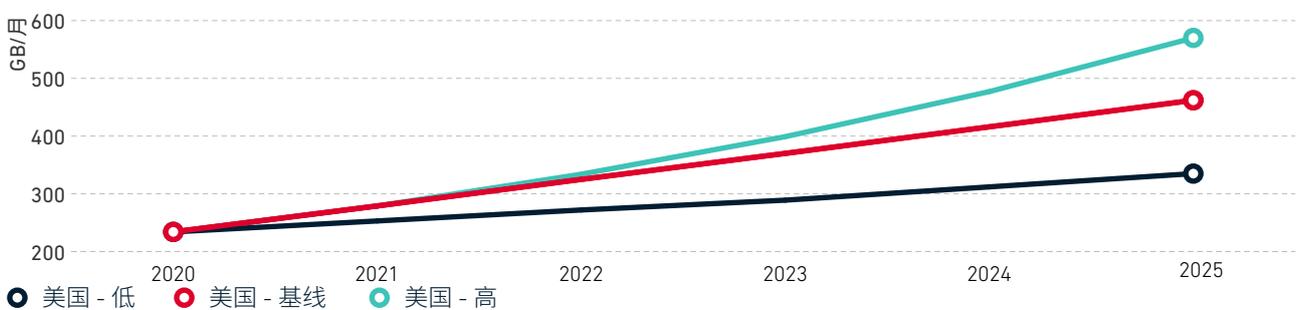
### 欧洲：2020-2025 年户均数据消耗预测



资料来源：GSMA 智库

图 A7

### 美国：2020-2025 年户均数据消耗预测



资料来源：GSMA 智库

我们结合几个因素来分析结果，这些因素影响着流量需求的强度和方向，它们是：数据消耗增长场景、繁忙时段流量占比、住户的 FWA 业务订购率，以及下行流量占总流量的比例。

## ii 供应模块

供应模块分为两个步骤：

- 首先，我们要确定覆盖研究区域所需的宏基站数量，并使所有住户可以达到 100 Mbps 的下载速度和 50 Mbps 的上传速度。
- 其次，我们要确定初始的宏基站网络是否能够满足上行和下行流量需求。如果初始宏基站网络不能满足流量需求，我们就要算出填补容量缺口所需的宏基站和小基站数量，来增加网络密度。

覆盖特定区域所需的初始宏基站数量，是根据覆盖该区所需的基站间距离的假设计算的，并且要达到必要的下载速度，无论是毫米波网络还是 3.5 GHz 网络。考虑到部署区域的不确定性，以及近期毫米波传播技术所取得的进步，我们认为用来覆盖该区的毫米波基站应该比 3.5 GHz 基站更多（表 A9 中的配置 1），但我们也探讨了该模型对另一种场景的敏感性，即 3.5 GHz 基站比毫米波基站更多（表 A9 中的配置 2）。这种结果适用于下列情况：用户设备是大功率的屋顶安装 CPE 及/或地形特征对信号传播的阻碍较少。

表 A9

### 下行链路速度 100 Mbps 和上行链路速度 50 Mbps 的基站间距离假设

地区	配置 1		配置 2	
	3.5 GHz	毫米波	3.5 GHz	毫米波
中国	800	600	770	960
欧洲	900	700	760	920
美国	2,500	2,200	1,480	2,950

资料来源：GSMA 智库

填补容量缺口所需的宏基站和小基站数量，根据每个基站的下行和上行容量而定，<sup>28</sup>并假设 TDD DL/UL<sup>29</sup> 比率为 75%。在下行或上行流量出现容量缺口的情况下，我们假设运营商会通过进一步的基站密集化来填

补这些缺口，在实际操作中，我们取填补上行链路和下行链路缺口所需基站数量的最大值。为了确定小基站的数目，我们假设它们占中国宏基站总数的 10%，欧洲为 50%，美国为 0%<sup>30</sup>。

<sup>28</sup> 实践中，我们假设每个基站可以满足其理论吞吐量 80% 的流量需求，然后用户才开始出现体验质量下降的情况。

<sup>29</sup> 时分双工下行与上行比率

<sup>30</sup> 我们预计美国农村地区不会安装小基站。

表 A10

## 技术假设

地区	频段 (GHz)	宏基站/小基站	扇区数	UL/DL 比率	DL 频谱效率 (bps/Hz/基站)	UL 频谱效率 (bps/Hz/基站)	双工方式
中国	3.5	宏基站	3	25%	3.2	1.6	TDD
中国	3.5	小基站	2	25%	3.2	1.6	TDD
中国	28	宏基站	3	25%	5.1	2.6	TDD
中国	28	小基站	2	25%	5.1	2.6	TDD
欧洲	3.5	宏基站	3	25%	3.2	1.6	TDD
欧洲	3.5	小基站	2	25%	3.2	1.6	TDD
欧洲	26	宏基站	3	25%	5.1	2.6	TDD
欧洲	26	小基站	2	25%	5.1	2.6	TDD
美国	3.5	宏基站	3	25%	3.2	1.6	TDD
美国	3.5	小基站	2.5	25%	3.2	1.6	TDD
美国	28	宏基站	3	25%	5.1	2.6	TDD
美国	28	小基站	2.5	25%	5.1	2.6	TDD

资料来源: GSMA 智库

表 A11

## 带宽可用性假设

地区	频段 (GHz)	2020	2021	2022	2023	2024	2025
中国	3.5	100	100	100	100	100	100
中国	28	0	0	0	800	800	800
欧洲	3.5	80	80	80	80	80	80
欧洲	26	400	400	400	400	400	400
美国	3.5	25	25	50	80	80	80
美国	28	400	400	400	400	400	400

资料来源: GSMA 智库

为了反映在 2025 年之前的这段时期部署户外 5G 基础设施服务于移动用户, 而且最有可能选址“棕地”来建设 FWA 基础设施。<sup>31</sup>

基于上述假设, 该模型估算了毫米波网络和 3.5 GHz 网络的以下数量:

- 升级的棕地宏基站数量
- 绿地宏基站数量
- 绿地小基站数量。

<sup>31</sup> 基站间距中国 316 米, 欧洲 716 米, 美国 1,418 米。

### iii 成本模块

表 A12 是我们对每类基站相关的资本开支和运营开支的估算，以及客户驻地设备的相关估算。我们的估算是以自下而上的成本计算方法为基础，根据与资本开支（设备、回传、服务和安装）和运营开支（能源成本、

机房租赁、维护和优化）相关的不同成本项目进行估算。我们还纳入了与客户驻地设备相关的资本开支和运营开支数字。数据来源包括 GSMA 智库的网络经济模型、内部访谈以及对供应商和运营商的外部采访。

表 A12

#### 成本假设

地区	项目	资本开支	运营开支
中国	棕地宏基站的 3.5 GHz 升级	\$39,000	\$13,000
中国	3.5 GHz 新建绿地宏基站	\$88,000	\$14,900
中国	3.5 GHz 新建小基站	\$20,700	\$2,400
中国	3.5 GHz CPE	\$300	\$14
中国	现有棕地宏基站的毫米波升级	\$48,000	\$12,800
中国	毫米波新建绿地宏基站	\$95,000	\$14,700
中国	毫米波新建小基站	\$24,700	\$2,300
中国	毫米波 CPE	\$300	\$14
欧洲	棕地宏基站的 3.5 GHz 升级	\$54,000	\$15,200
欧洲	3.5 GHz 新建绿地宏基站	\$125,000	\$23,000
欧洲	3.5 GHz 新建小基站	\$33,000	\$2,800
欧洲	3.5 GHz CPE	\$330	\$15
欧洲	现有棕地宏基站的毫米波升级	\$73,000	\$15,000
欧洲	毫米波新建绿地宏基站	\$141,000	\$22,800
欧洲	毫米波新建小基站	\$38,000	\$2,700
欧洲	毫米波 CPE	\$330	\$15
美国	棕地宏基站的 3.5 GHz 升级	\$67,000	\$15,600
美国	3.5 GHz 新建绿地宏基站	\$134,000	\$21,800
美国	3.5 GHz 新建小基站	\$36,000	\$2,700
美国	3.5 GHz CPE	\$390	\$21
美国	现有棕地宏基站的毫米波升级	\$93,000	\$15,500
美国	毫米波新建绿地宏基站	\$157,000	\$21,700
美国	毫米波新建小基站	\$43,000	\$2,600
美国	毫米波 CPE	\$390	\$21

资料来源：GSMA 智库

## A3 室内场景

我们的模型利用三个模块来估计与这两种部署策略相关的总体拥有成本：

- 流量需求模块
- 供应模块
- 成本模块。

### i 流量需求

流量需求的估算取决于三个因素：

- 设备数量和 5G 设备比例
- 同时下载或上传数据的设备比例。
- 每种设备所需的下载和上传速度

$$\text{流量需求 (上行或下行)} = \sum (\text{设备数量} * \text{速度要求} * \text{活跃的设备比例})$$

表 A13 列出了办公区域假想的设备数量及其下载和上传速度要求。

表 A13

### 设备数量和速度要求的假设

设备	设备总数量	DL 速度要求 (Mbps)	UL 速度要求 (Mbps)
移动设备	1,800	50	10
桌面电话	1,875	0.1	0.1
笔记本电脑	1,875	50	10
安防摄像机	375	2	25
会议室的标准通信设备	38	50	25
会议室的先进通信设备	38	100	50

资料来源：GSMA 智库

同时工作的笔记本电脑和通信设备的比例随时变化，我们假设有 10% 的移动设备和 100% 的安防摄像头同时工作。我们假设办公区域的会议室装有通信设备，

包括标准设备（如高清视频）和先进设备（如 AR/VR 或全息通信）。

## ii 供应模块

在供应方面，我们假设有一定比例的设备使用 5G，其他设备则连接 Wi-Fi 或以太网。我们还假设部署在会议室的通信设备 100% 使用 5G。

我们假设来自于户外的移动网络覆盖是有限的，只有 10% 的 5G 下载流量和 5% 的 5G 上传流量可以分流到户外 5G 网络。

我们分两步估算 3.5 GHz 和毫米波室内小基站的数量：

- 第一，我们假设在室内布设 15 个 3.5 GHz 小基站，以完成办公区的移动覆盖。
- 第二，我们计算了在 3.5 GHz 初始部署无法满足不同类型设备产生的流量需求的情况下，需要增加 3.5 GHz 小基站或毫米波小基站的数量。<sup>32</sup>

我们用下行链路或上行链路的频谱效率，乘以可用带宽和 TDD UL/DL 比率，计算出吞吐量。表 A14 列出了用于确定吞吐量的技术假设。

表 A14

### 技术假设

技术	频段 (GHz)	TDD UL/DL 比率	DL 频谱效率 (bps/Hz/基站)	UL 频谱效率 (bps/Hz/基站)	带宽 (MHz)	双工方式
3.5 GHz	3.5	50%	9	6.75	80	TDD
毫米波	28	50%	9	6.75	400	TDD

资料来源：GSMA 智库

32 填补容量缺口所需的室内基站数量计算如下：

$$\text{满足容量所需的基站数量} = \max \left( \frac{\text{实现覆盖所需的基站下行容量} - \text{下行流量需求}}{\text{3.5GHz 或毫米波的下行容量}}, \frac{\text{实现覆盖所需的基站上行容量} - \text{上行流量需求}}{\text{3.5GHz 或毫米波的上行容量}} \right)$$

### iii 成本模块

表 A15 是我们对 3.5 GHz 小基站或毫米波小基站相关的资本开支和运营开支的估算。我们还假设每个项目的集中单位成本为 1,200 美元。我们的估算是以自下而上的成本计算方法为基础，根据与资本开支（设

备、回传、安装）和运营开支（能源成本、逐年软件更新、维护和优化）相关的不同成本项目进行估算。数据来源包括 GSMA 智库的网络经济模型、内部访谈以及对供应商和运营商的外部采访。

表 A15

#### 每个基站的成本假设

频段	资本开支	运营开支
3.5 GHz	\$4,700	\$911
毫米波	\$5,700	\$934

资料来源：GSMA 智库



## GSMA 总部

Floor 2

The Walbrook Building

25 Walbrook

London EC4N 8AF

United Kingdom

电话: +44 (0)20 7356 0600

传真: +44 (0)20 7356 0601