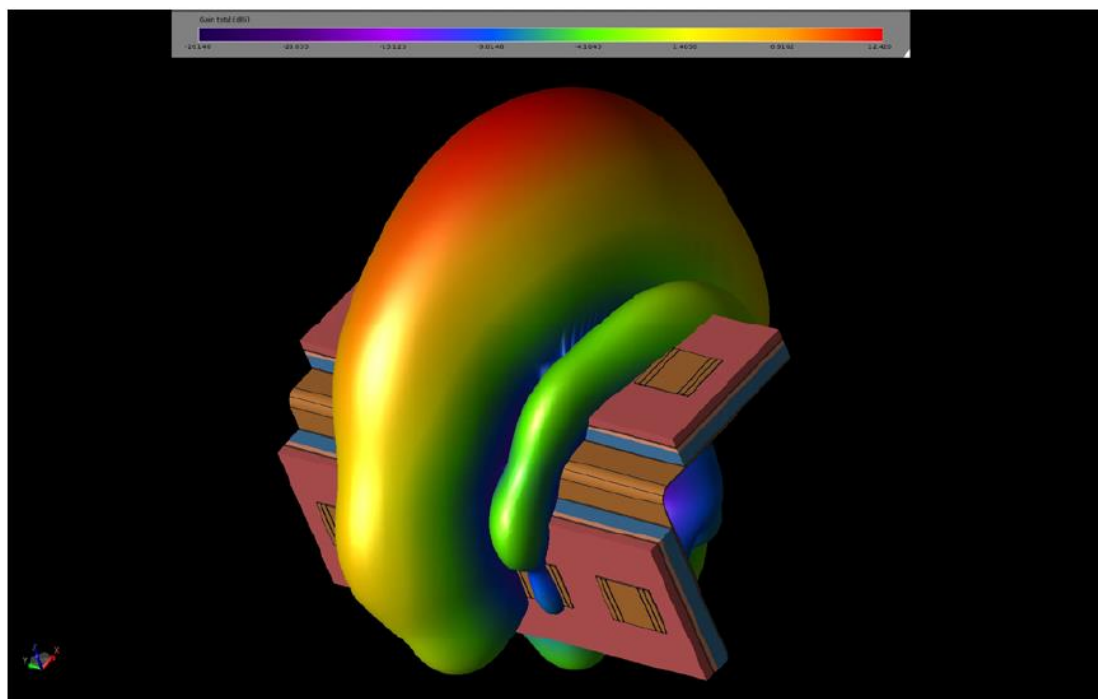


60 GHz 相控阵天线设计与波束成形分析——使用 XFDTD



XFDTD 计算的 60.48 GHz 三维远场增益方向图，显示 1×4 孔径耦合阵列的宽边波束

引言

设计用于 60 GHz WiGig 频段的高增益相控阵，需要精确捕捉多层孔径耦合结构的完整电磁行为——包括单元间的 S 参数耦合、远场辐射方向图以及波束扫描 EIRP 覆盖。XFDTD 的全波 FDTD 求解器，结合其叠加与阵列优化后处理能力，能够高效地处理该工作流程的每个阶段。

本示例对一款双阵列、8 单元 (2×4) 孔径耦合贴片天线进行建模，工作于 WiGig 信道 2 频段，中心频率 60.48 GHz (关注频率范围：55–65 GHz)。两个正交取向的 1×4 阵列安装在共享的 L 形框架结构上。仿真表征了各单元方向图、互耦 (S 参数)、叠加波束成形状态以及波束扫描 EIRP——最终给出每个阵列的 EIRP 累积分布函数 (CDF) 以及显示总空间覆盖的合成最大保持图。

多层毫米波结构的全波 FDTD 仿真

该天线采用三层介质堆叠结构，包含铜制辐射贴片和带状线馈电网络，如图 1 所示。XFDTD 从 .stp 文件导入完整 CAD 几何模型，并为每个部件分配用户定义的材料。

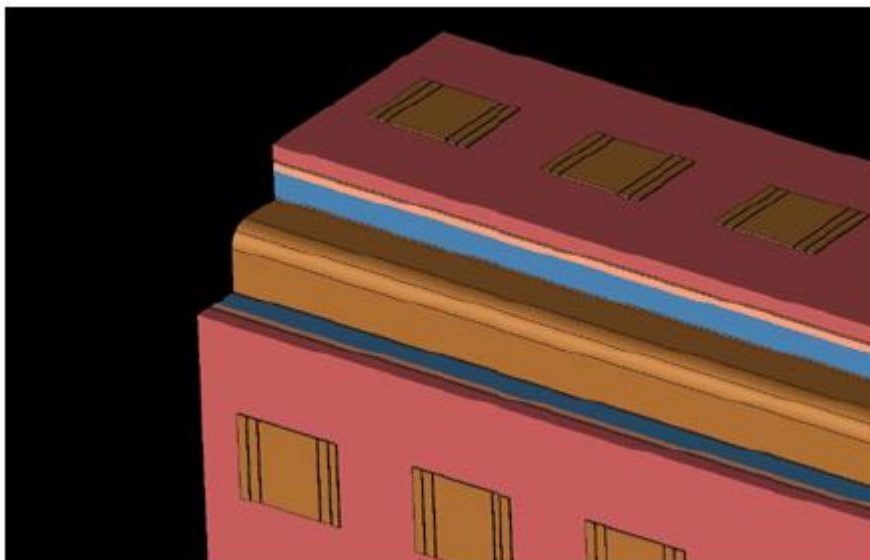


图 1：60 GHz WiGig 相控阵天线几何结构的三维 CAD 模型，显示两个 1×4 阵列

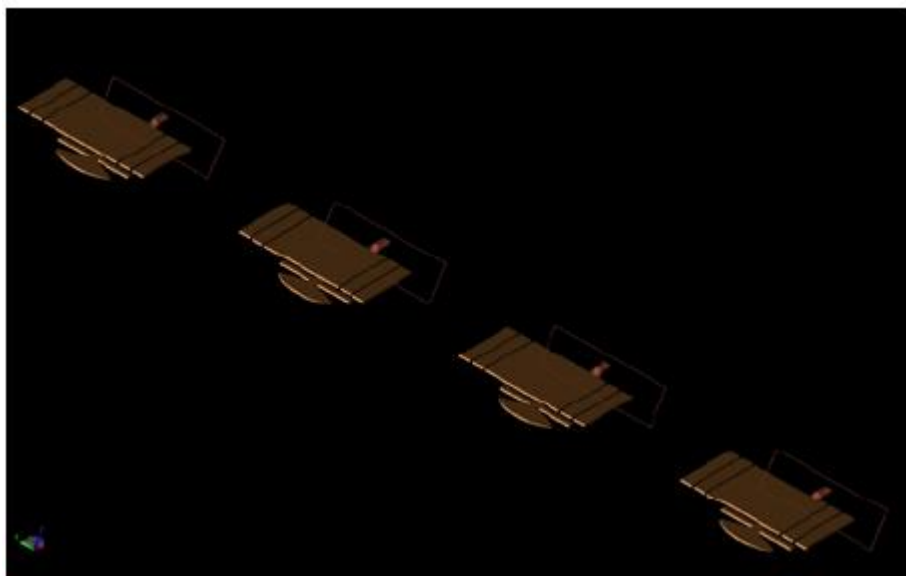


图 2：阵列的每个单元都有一个波导端口馈电至贴片下方的带状线结构。带状线通过接地层中的孔径与贴片耦合（图中未显示）。

八个馈电点各由一个模式波导接口激励，如图 2 所示（以顶部阵列的贴片为例）。对八个端口分别进行 XFDTD 仿真（每次一个端口有源），以计算完整的 S 参数矩阵。端

口 1 的 S 参数数据如图 3 所示，各贴片的三维增益方向图如图 4 所示。该仿真数据提供了叠加与阵列优化后处理所需的完整单元间耦合数据。

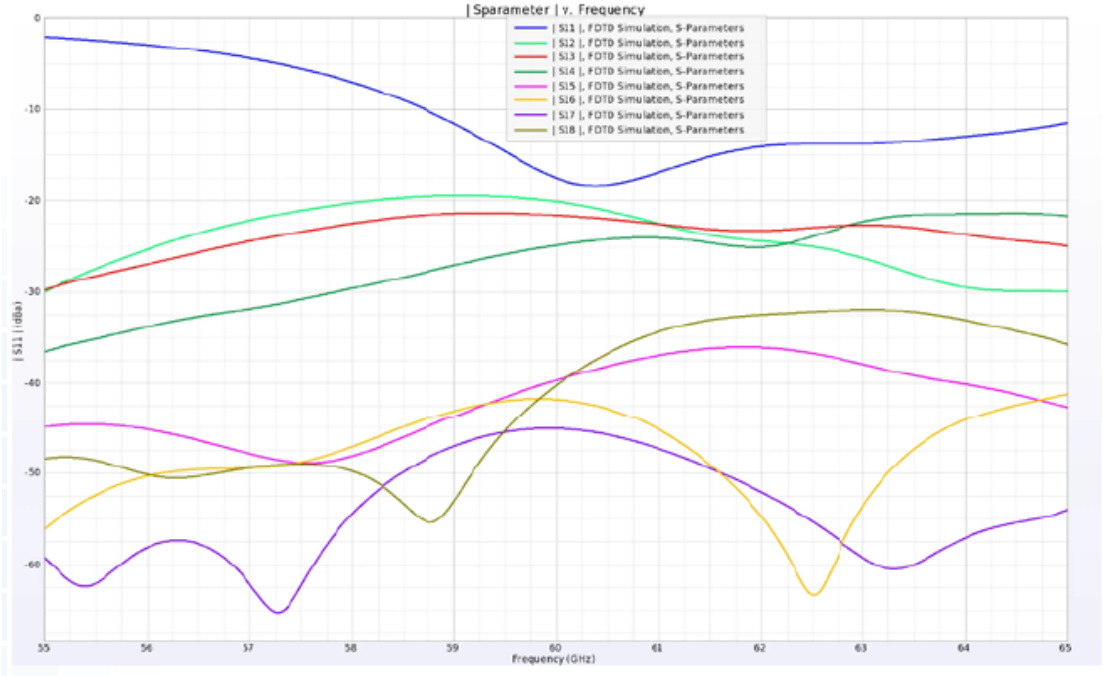


图 3：顶部 (+Z) 1×4 阵列一端贴片的完整 S 参数结果。60 GHz 处回波损耗 (S11) 约为 -18 dB，而所有其他贴片之间的耦合均低于 -20 dB。

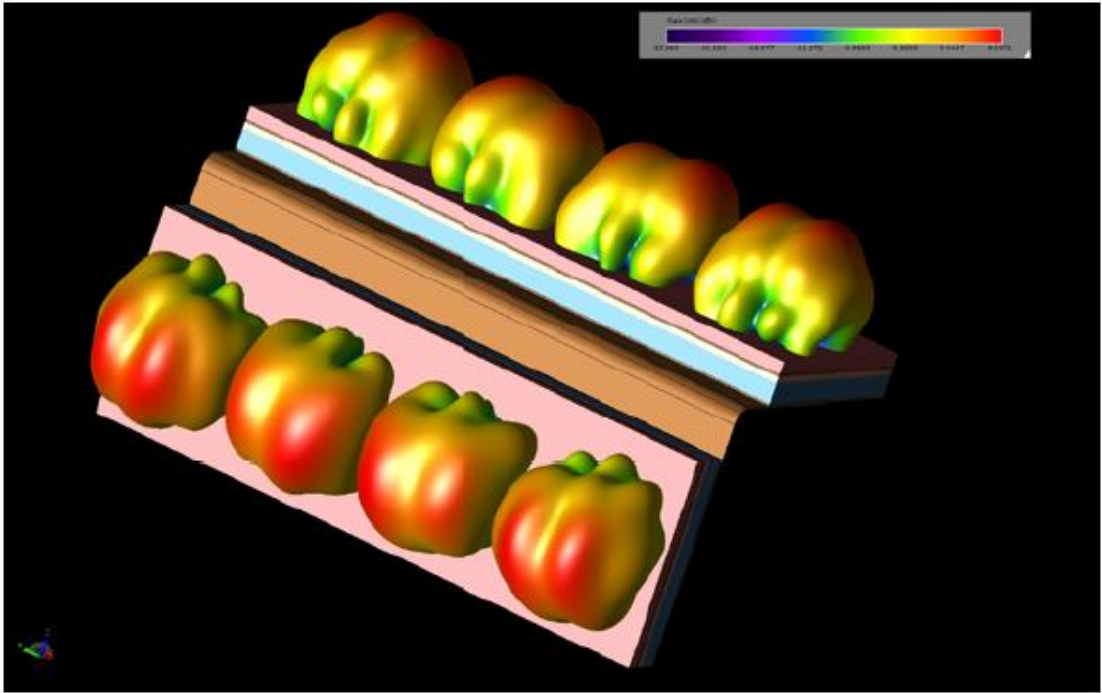


图 4: XFDTD 仿真对每个贴片单独激励，生成该贴片的增益方向图，随后与 S 参数数据一起供叠加工具使用。

叠加仿真：各阵列波束成形

XFDTD 的叠加仿真利用指定的每端口幅度和相位权重，将稳态 FDTD 结果进行组合，而无需重新运行 FDTD 求解器。对于该结构，定义了两个叠加——每个四单元阵列一个——每个端口可用功率为 23 dBmW。每个贴片均为 0 度相位的叠加定义如图 5 所示，生成的方向图如图 6 所示。相位权重可在叠加定义编辑器中调整，并可在多种设置下扫描。这种相位调整工作流程使工程师能够在后处理中快速评估波束成形状态，而无需额外的求解器时间。

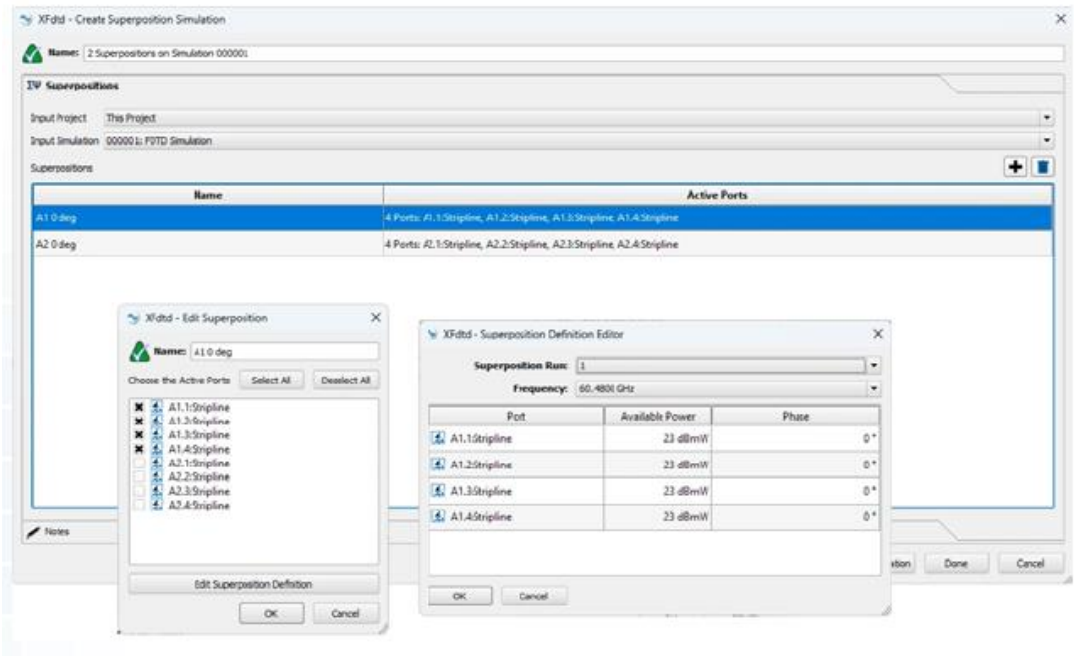


图 5: 叠加仿真菜单，用于计算结构 +Z 面上四个贴片在 60.48 GHz 处的状态，每个贴片给定 23 dBmW 可用功率和恒定相位。

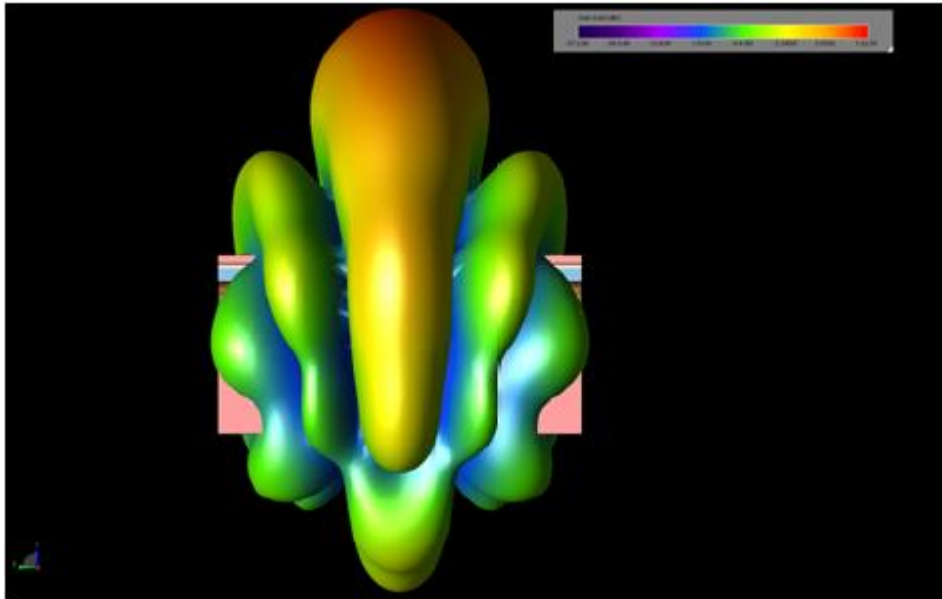


图 6: +Z 阵列中每个贴片以恒定相位馈电时, 生成宽边方向图, 峰值增益为 12.4 dBi。

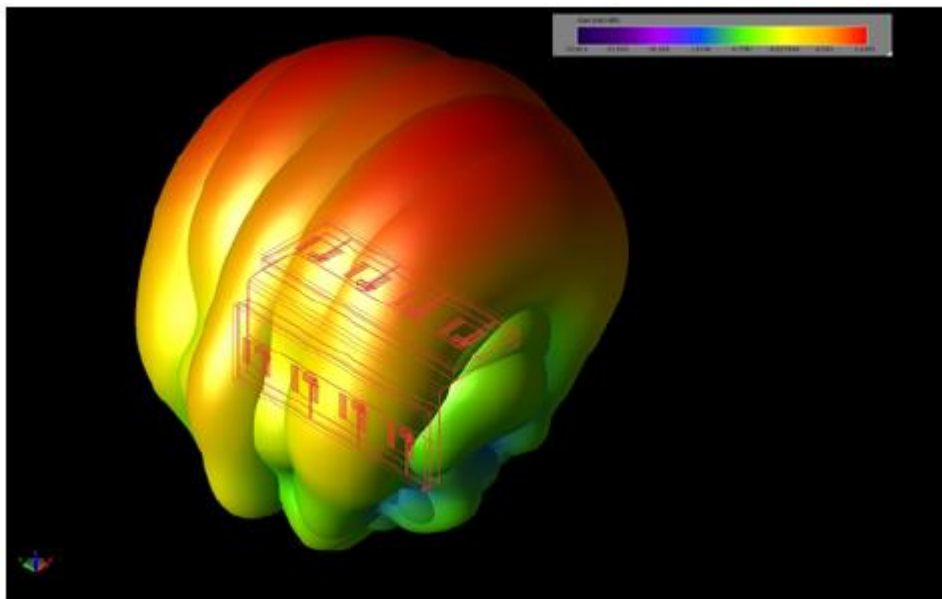


图 7: 使用阵列优化, 在 $\Phi=90^\circ$ 度平面内为 +Z 阵列生成五个波束, 仰角范围 -30° 至 $+30^\circ$ 。

阵列优化: 最大 EIRP 波束合成

XFDTD 的阵列优化功能应用叠加原理, 确定使指定方向 EIRP 最大化的各单元激励权重——幅度和相位。与手动叠加不同, 优化求解的是产生目标波束所需的激励状态, 而非要求用户指定。

在图 7 中, 阵列 1 针对仰角 (Theta, $\Phi=90^\circ$) 从 -30° 到 $+30^\circ$ 的五个波束方向进行优化; 在图 8 中, 阵列 2 针对方位角切面范围 ($\Phi=150^\circ$ 至 210°),

Theta=90°) 进行优化。两个阵列配置为相互偏移 90°, 从而实现组合空间覆盖分析。

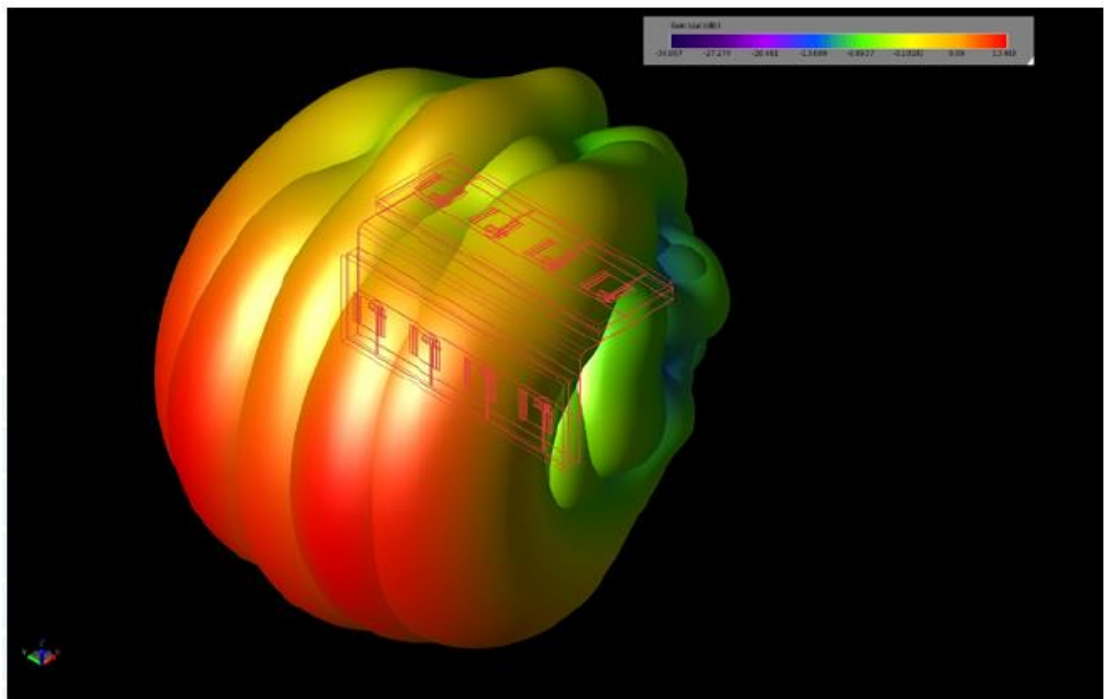


图 8: 在 Theta=90° 平面内, 沿 150° 至 210° 方位角范围生成五个波束。

EIRP 的 CDF 与最大保持覆盖分析

阵列优化结果以 EIRP 的累积分布函数 (CDF) 图形式可视化, 表征超过给定辐射功率水平的方向比例。这是 WiGig 和 5G 毫米波系统设计中空间覆盖的标准品质因数。

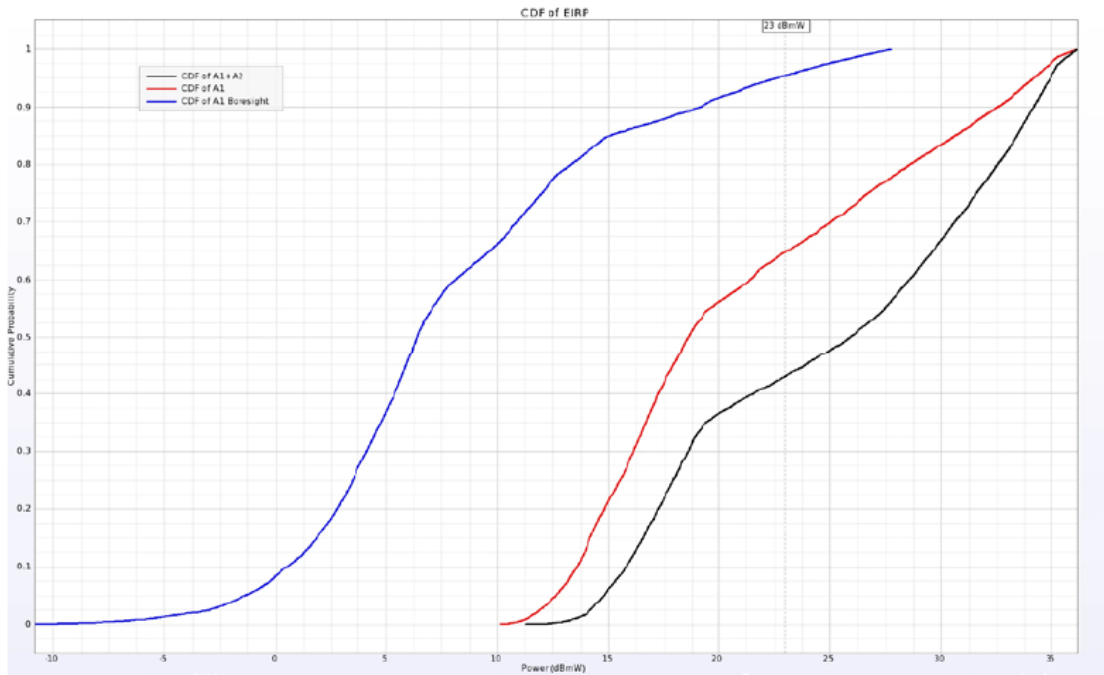


图 9: EIRP 的 CDF 图显示了阵列在给定输入功率下的性能。此处将 +Z 阵列所有单元同相 (A1 宽边) 与同一阵列的最大保持 (包含该阵列所有可能的相位组合) 进行比较。两个阵列的组合 (A1+A2 曲线) 在 23 dBmW 下表现出最佳性能。

XFDTD 为每个分析方向生成逐波束 CDF 图、聚合所有波束最佳可达 EIRP 的最大保持方向图, 以及合并两个阵列的合成 CDF。图 9 显示了阵列 1 宽边 (所有单元同相) 与阵列 1 最大保持的 CDF 对比, 以及阵列 1 和阵列 2 组合最大保持的 CDF。合成图直接展示了两个阵列同时工作带来的总空间覆盖收益, 支持系统级 EIRP 预算和链路余量分析。

结论

工作于 60 GHz WiGig 频段 (IEEE 802.11ad/ay, 信道 1-4; 信道 2 中心频率: 60.48 GHz) 的相控阵天线用于多 Gbps 短距离无线链路, 包括笔记本电脑到扩展坞连接、无线扩展坞、AR/VR 头显以及固定无线接入点。相对于 6 GHz 以下频段, 毫米波频率的自由空间路径损耗更高, 因此需要高增益阵列来克服。

系统设计人员不仅需要验证每个单元是否达到目标辐射方向图, 还需要验证阵列在波束成形时是否在预期覆盖区域内达到足够的 EIRP——包括最差和最佳方向。XFDTD 中的 EIRP 的 CDF 分析直接映射了这种覆盖。

天线几何结构和介质堆叠的精确建模——包括频率相关损耗角正切——以及单元间真实的 S 参数耦合, 对于预测波束成形保真度至关重要。XFDTD 的全波 FDTD 方法无需简化近似即可捕捉这两者, 使其适用于原型制造前的最终设计验证。

Q 群名称: REMCOM 电磁仿真软件技术支持

QQ 群号: 994349133

技术支持窗口微信号: CAEsoftware0822

商务销售窗口微信号: Christina--ma

或是来电: 13524674000 / 13061673257