



5G 网络 SSB 1+X 波束技术应用研究

李贝¹, 胡煜华², 王鑫炎², 许国平³, 刘光海¹, 肖天¹, 成晨¹, 李一¹

(1. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

2. 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司, 浙江 杭州 310051;

3. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033)

摘要: 3GPP 标准在 5G 中引入了波束扫描和空域的维度, 信道状态信息 (channel state information, CSI) 是 UE 上报给 eNodeB 的信道状态信息, 信道状态信息参考信号 (channel state information-reference signal, CSI-RS) 是 UE 用来获取信道状态信息的参考信号。终端接入时基站采用 SSB 波束轮发探测终端的最优波束, 在终端接入后获取参考信号的配置信息后对信道状态信息进行反馈, 基站采用 CSI-RS 波束轮发的最优波束。5G 天线灵活配置波束个数并且兼顾水平维度、垂直维度的覆盖。结合广播波束发展、现网水平 7 波束面临的挑战, 分析比较了水平 7 波束与 1+X 波束两种方案, 并对两种方案进行测试分析。测试结果表明, 1+X 波束具有较水平 7 波束覆盖相当、控制干扰、降低资源开销和设备能耗的优势, 结合自动优化工具的应用达到提升工作效率的效果。

关键词: 5G; 波束扫描; SSB; CSI-RS; 7 波束; 1+X 波束

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022012

Research on SSB 1+X beam technology of 5G network

LI Bei¹, HU Yuhua², WANG Xinyan², XU Guoping³, LIU Guanghai¹, XIAO Tian¹, CHENG Chen¹, LI Yi¹

1. Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China

2. Zhejiang Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

3. China United Network Communications Group Co., Ltd, Beijing 100033, China

Abstract: Beam scanning and spatial dimensions in 5G was introduced in the 3GPP standard. When UE connects gNodeB, gNodeB uses SSB beam rotation to detect the optimal beam of UE. After UE was connected, the CSI-RS configuration information could be obtained and the CSI could be normal feedback, gNodeB adopted the optimal beam transmitted by the CSI-RS beam in turn. 5G antennas flexibly configure the number of beams and take into account coverage in both horizontal and vertical dimensions. The development of broadcast beams and the horizontal 7 beams facing challenges were presented, the horizontal 7 beam and 1+X beam schemes were analyzed. Finally, efficiency was presented.

Key words: 5G, beam scanning, SSB, CSI-RS, 7 beam, 1+X beam

0 引言

移动通信使用的无线电波频率越高路径损耗越大, 在高频场景下穿过建筑物的穿透损耗也随之增加, 势必增加了信号覆盖的难度。3GPP 协议在 5G NR 中引入了波束管理, 波束管理包含波束扫描、波束测量等流程, 其中, 波束扫描阶段, 终端接入时基站采用广播波束 SSB 轮发探测终端的最优波束, 在终端接入, 并获取信道状态信息参考信号 (channel state information-reference signal, CSI-RS) 的配置信息并进行信道状态信息 (channel state information, CSI) 的反馈, 基站采用 CSI-RS 波束轮发的最优波束。同时 5G NR 也引入了空域的维度, 相比较于传统天线, 5G 天线权值配置更为灵活, 灵活配置波束个数和兼顾水平维度、垂直维度的覆盖。利用 SSB 1+X 波束方案可实现不同场景下 SSB 不同波束配置, 能够实现 5G 网络覆盖增强、性能提升、功耗降低, 结合 AI 训练选择最优的权值组实现自动优化, 提升工作效率。

1 广播波束发展

相较于 4G LTE 有 1 个固定宽度且不能场景定制化的广播波束, 5G NR 根据 3GPP 协议规定 SSB 和 CSI-RS 实现广播信道和业务信道的测量, 主同步信号 (primary synchronization signal, PSS)、辅同步信号 (secondary synchronization signal, SSS)、物理广播信道 (physical broadcast channel, PBCH) 和解调参考信号 (demodulation reference signal, DMRS) 在 4 个连续的正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing,

OFDM) 符号内接收并构成 SSB。SSB 波束信号质量影响用户的接入和移动性等性能, CSI-RS 波束信号质量影响速率和用户感知, 不同的波束宽度、高度结合应用可实现波束分层应用, 每 20 ms 为一个扫描周期, 按照时分水平、垂直或立体组网结构进行目标区域扫描, 可灵活适应不同场景。

相较于 4G LTE 多阵列天线, 5G 采用大规模阵列天线且天线波束更窄、增益提高, 在机械、电子调整的基础上增加了数字调整、广播波束支持赋形。水平/垂直覆盖增加到 8/4 通道, 每通道 3/3 个振子, 每通道水平波束宽度扩展到 100°、垂直波束宽度扩展 24°, 支持水平、垂直波束变化, 尤其是垂直面应用更灵活。

2 水平 7 波束面临波束管理挑战

波束扫描使基站针对终端的不用位置在不同方位、倾角的多个波束中选择最优波束发射达到增强下行覆盖、减少干扰。3GPP 协议规定 5G NR case C TDD 下 2.4 GHz < 频率 ≤ 6 GHz, 时域最大支持 8 SSB, 2.5 ms 双周期的帧结构下 (子帧配置配比 D:Gap:U=10:2:2), SSB 必须包含在一个连续 5 ms 内, 低频最多连续 2 ms 内可检测 4 个时隙 slot, 也即最小集 SSB 要求在 2 ms 内发送完毕。受此限制中国电信、中国联通帧结构下有 7 个 SSB, 电联 2.5 ms 双周期的帧结构 SSB 7 波束在每个 slot 的符号位置如图 1 所示。

现网采用水平 7 波束能快速实现高质量拉网性能, 但是从今后商用来看, 覆盖方面, 因水平 7 波束无预留波束, 空间可拓展性差, 未考虑到垂直覆盖的需求; 容量方面, 7 波束及配套的 SIB/paging

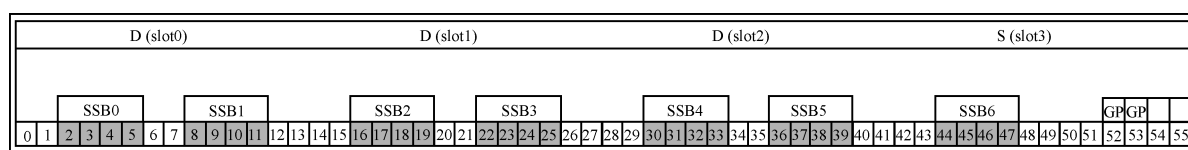


图 1 2.5 ms 双周期的帧结构 SSB7 波束在每个 slot 的符号位置



消息带来较大的资源开销,影响极限体验和网络容量;切换方面,7波束切换决策需要权衡多个波束的测量结果,精细化优化难度大;节能方面,7波束及配套的SIB/paging消息带来较大的时隙占空比,影响低负载条件下的时隙关断和节能。上述潜在问题给后继波束管理提出了挑战。

3 SSB 1+X方案

波束用“五元”权值组画像,“五元”权值组指水平波瓣宽度、垂直波瓣宽度、下倾角、方位角、pattern(即SSB波束数量)。1指1个水平宽波束、 X 指灵活的垂直波束,根据需要配置垂直波束, $X=\{0,1,2,3\}$ 。5G在小区簇优化中采取小区组连片优化,因此在常规优化中需考虑小区组、小区和波束的“三级”优化。“五元”权值组和“三级”优化组合后,单小区数万级权值组,随小区数量指数级增长,大量权值组人工无法精细优化。基于智能化平台实现规划 X 波束权值、时域错开,以及自动优化波束权值实现场景化精细部署,智能迭代优化达到最简单波束结构、最优网络性能、最低设备能耗、最快优化效能的目标。本文研究模型的参数配置见表1。

表1 参数配置

项目	取值
NR 频率	3 400~3 600 MHz
NR 带宽/发射功率	100 MHz/200 W
NR 帧结构/特殊子帧配比	2.5 ms 双周期/10:2:2
PRACH 格式	长格式 Format 0 必选;短格式 Format B4 或 C2 必选
PRACH/PBCH 周期	10 ms/20 ms
PUCCH 格式	Format 0/Format 1 选一种 同时 Format 2/Format 3 选一种
SSB 子载波间隔/PDCCH 符号数	30 kHz/1 个
SSB 波束数量	1; 7
CSI-RS 配置	8Port4Beam
天线通道数	64T64R
上行功率控制/AMC	启用

3.1 弥补覆盖损失、控干扰提升网络性能

为达到单播束获得与多波束相当的覆盖水平的目标,SSB水平覆盖波束方案对比如图2所示,“1”宽波束与多波束相比增益损失6~7 dB,但可通过6 dB SSB功率增强进行弥补,即功率增强型水平单播束获得与7波束接近的覆盖性能,支撑良好网络覆盖水平。

1+X波束方案降低干扰原理如图3所示,1+X

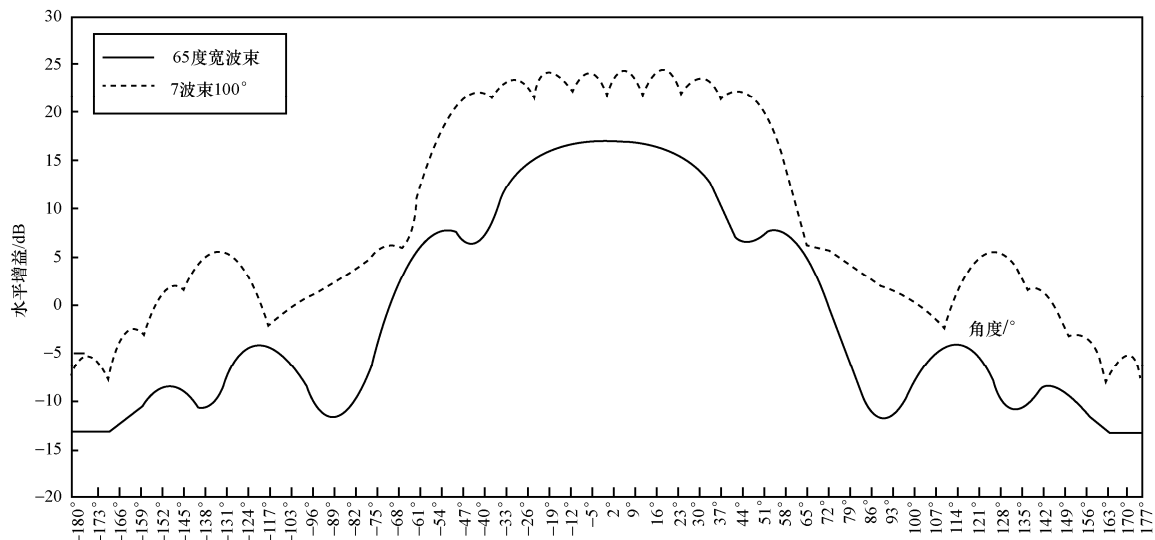


图2 SSB水平覆盖波束方案对比

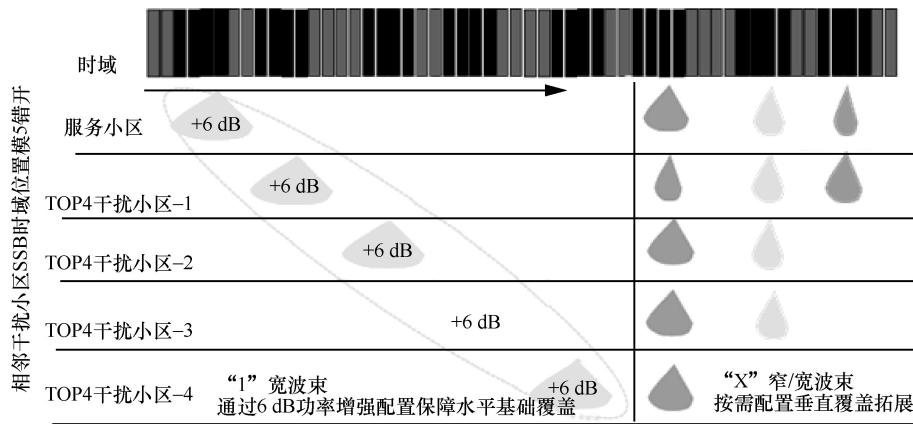


图3 1+X波束方案降低干扰原理

中 $X = \{0,1,2,3\}$, 可预留多个波束位置用于垂直扩充, 以最少水平 SSB 波束加上按需垂直波束实现三维全空间覆盖及深度覆盖拓展, 相邻干扰小区 SSB 时域位置模 N ($N=1, 2, 3, 4$) 错开以降低相邻区间 SSB 的相互干扰, 通过业务信道自动打孔调度降低相邻小区 SSB 与业务信道之间的干扰。

3.2 SSB 灵活使用降低资源开销和设备能耗

当 SSB 周期 20 ms, 5G 系统消息 1 (system information blocks 1, SIB1) 周期 40 ms, paging 周期 10 ms 时, 对功率增强型水平单波束 (以 SSB 单束 boosting 6 dB+模 3 错开为例)、水平 7 波束资源开销和 AAU 节电理论对比分析如下, 根据表 1 参数配置共 273 个 5G 资源块 (resource block, RB), 初始接入相关消息在 48 个 RB 中调度, 资

源开销对比见表 2, 功率增强型水平单播束较水平 7 波束总体开销节省约 3%、接入资源开销节省约 20%。

有源天线单元 (active antenna unit, AAU) 节电能耗对比见表 3, 与 7 波束相比, 功率增强型水平单波束 (以 1+3 波束为例) 下 AAU 节电 4.88% $[(78.06\%-45.56\%)\times 15\%]$, 其中, 15% 为完全空载时 64TR AAU 的节电幅度。

3.3 自动优化提升工作效率

网管上进行小区波束配置时首先配置水平波瓣宽度、垂直波瓣宽度、下倾角、方位角, 系统会自动计算出对应的权值, 选择对应的 pattern, 再考虑小区组、小区和波束的“三级”优化共计数万级单位权值组合, 基于神经网络训练智能规

表2 资源开销对比

	SSB 单束 boosting 6dB+模 3 错开开销计算	7 波束开销计算
总体开销	$\text{PDSCH RB Num} = [273 \text{ RB} \times (7 \times 1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} / 2) - (13 \text{ RB} + 20 \text{ RB} + 60 \text{ RB}) \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms}) - 18 \text{ RB} \times (1 \text{ s} / 40 \text{ ms}) - 30 \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms}) - 20 \text{ RB} \times 50] / (7 \times 1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} / 2) \approx 2.01\%$ 开销 $\approx 1 - (267.5 / 273) \approx 2.01\%$	$\text{PDSCH RB Num} = [273 \text{ RB} \times (1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} \times 7) - (20 \text{ RB} + 12 \text{ RB} + 1 \text{ RB}) \times 4 \text{ slot} \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms}) - (18 \text{ RB} \times 5 + 28 \text{ RB} \times 2) \times (1 \text{ s} / 40 \text{ ms}) - 30 \text{ RB} \times 7 \text{ 波束} \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms})] / (7 \times 1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} / 2) \approx 258$ 开销 $\approx 1 - (258 / 273) \approx 5.49\%$
接入资源开销	$273 \text{ RB} - [273 \text{ RB} \times (7 \times 1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} / 2) - (13 \text{ RB} + 20 \text{ RB} + 60 \text{ RB}) \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms}) - 18 \text{ RB} \times (1 \text{ s} / 40 \text{ ms}) - 30 \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms}) - 20 \text{ RB} \times 50] / (7 \times 1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} / 2) \approx 5.5$ 开销 $\approx 5.5 / 48 \approx 11.46\%$	$273 \text{ RB} - [273 \text{ RB} \times (1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} \times 7) - (20 \text{ RB} + 12 \text{ RB} + 1 \text{ RB}) \times 4 \text{ slot} \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms}) - (18 \text{ RB} \times 5 + 28 \text{ RB} \times 2) \times (1 \text{ s} / 40 \text{ ms}) - 30 \text{ RB} \times 7 \text{ 波束} \times (1 \text{ s} / 20 \text{ ms})] / (7 \times 1 \text{ s} / 2.5 \text{ ms} / 2) \approx 15$ 开销 $\approx 15 / 48 \approx 31.25\%$



表3 AAU 节电能耗对比

配置	SSB 波束 数	单个 SSB 符号数/个	SSB 周期 /slot	SIB 符号 数	SIB 周期 /slot	CSIRS 符号数 /个	CSIRS 周期 /slot	TRS 符 号数/ 个	TRS 周期 /slot	Paging 符号数 /个	Paging 周期/slot	基准 周期 /slot	基准周期 的下行符 号数/个	占空比
2.5 ms 双周期	7	4	40	14	80	4	40	4	40	14	20	40	360	78.06%
2.5 ms 双周期	1+3	4	40	14	80	4	40	4	40	14	20	40	360	45.56%

划实现“1”时域错开规划和“X”波束规划的高效部署使权值组合降低至数千级权值组合,利用AI训练选优权值组确保SSB自动权值优化取得稳定增益,但用户感知速率并未得到实质性改善。目前5G商用终端不支持CSI-RS波束参考信号接收功率(reference signal receiving power, RSRP)测量及上报,无法直接进行优化,通过蚁群优化算法训练建模,建立SSB和CSI权值匹配映射表,然后根据SSB优化后的权值寻优CSI权值。而通过蚁群优化算法优化获取局部最优天线权值,通过初始值个数和迭代次数的优化,自动下发权值,大幅降低了波束的寻优、迭代和配置时间。

4 SSB 1+X 波束方案实施效果

SSB 1+X波束方案理论上达到覆盖与7波束相当、控制干扰、降低资源开销和设备能耗,以及自动优化提升工作效率的作用,某市选取高楼和空旷公园两个场景进行水平7波束和1+3波束的测试验证。

4.1 空旷场景远中近点覆盖和抗干扰效果提升明显

选取某市妇幼保健院场景,妇幼保健院基站高约18 m, PCI 523 小区覆盖广场和公园;选取远、中、近点进行多次测试;拉网路线围绕广场和公园,全长950 m左右,拉网测试RSRP/信号与干扰加噪声比(signal to interference plus noise ratio, SINR)/下行平均速率的7波束与1+3波束对比如图4所示。定点测试数据显示,1+3波束在远中近点效果明显,具有相当的水平覆盖,垂直覆盖提升30%,远点SINR提升1.7 dB降低了

干扰,远点下行速率提升明显,定点测试(远、中、近点)7波束与1+3波束对比如图5所示。拉网测试7波束与1+3波束对比见表4,1+3波束RSRP持平,SINR平均下降1.49 dB,下行平均速率下降5.8 Mbit/s。整体看,1+3波束在空旷场景远中近点覆盖和抗干扰效果提升明显,拉网测试感知与水平7波束相当。

4.2 高层建筑高楼层覆盖和抗干扰提升明显

选取某市财富广场大厦场景,财富广场大厦基站高约18 m, PCI28 小区正对财富广场大厦,直线间距420 m,无遮挡;财富广场大厦共39层,高166 m,定点测试点位分布1F、5F、6F、8F、10F、12F、15F、17F、20F、21F、23F、25F、27F和30F;拉网路线围绕财富广场,全长950 m。测试显示,在低层(1F~5F),水平7波束和1+3波束的覆盖能力相当;在高层(6F~30F),1+3波束的覆盖能力均强于水平7波束。

拉网测试7波束与1+3波束对比见表5,1+3波束与7波束覆盖相当。选取财富广场大厦8楼层道进行走动测试,楼层测试RSRP/SINR/下行平均速率的7波束与1+3波束对比如图6所示,呈现出正向增益。定点1F~30F 7波束与1+3波束对比如图7所示。整体来看,1+3波束与7波束在高层建筑的低层感知相当,在中高层1+3波束覆盖和抗干扰提升明显,综合整体覆盖,1+3波束的覆盖优势较为明显。

4.3 节能降耗

在低负载网络下,采集了2020年5月5日到11日小时级数据,与水平7波束相比,1+3波束配置下发送更少的SSB/SIB1/paging,占用更少的

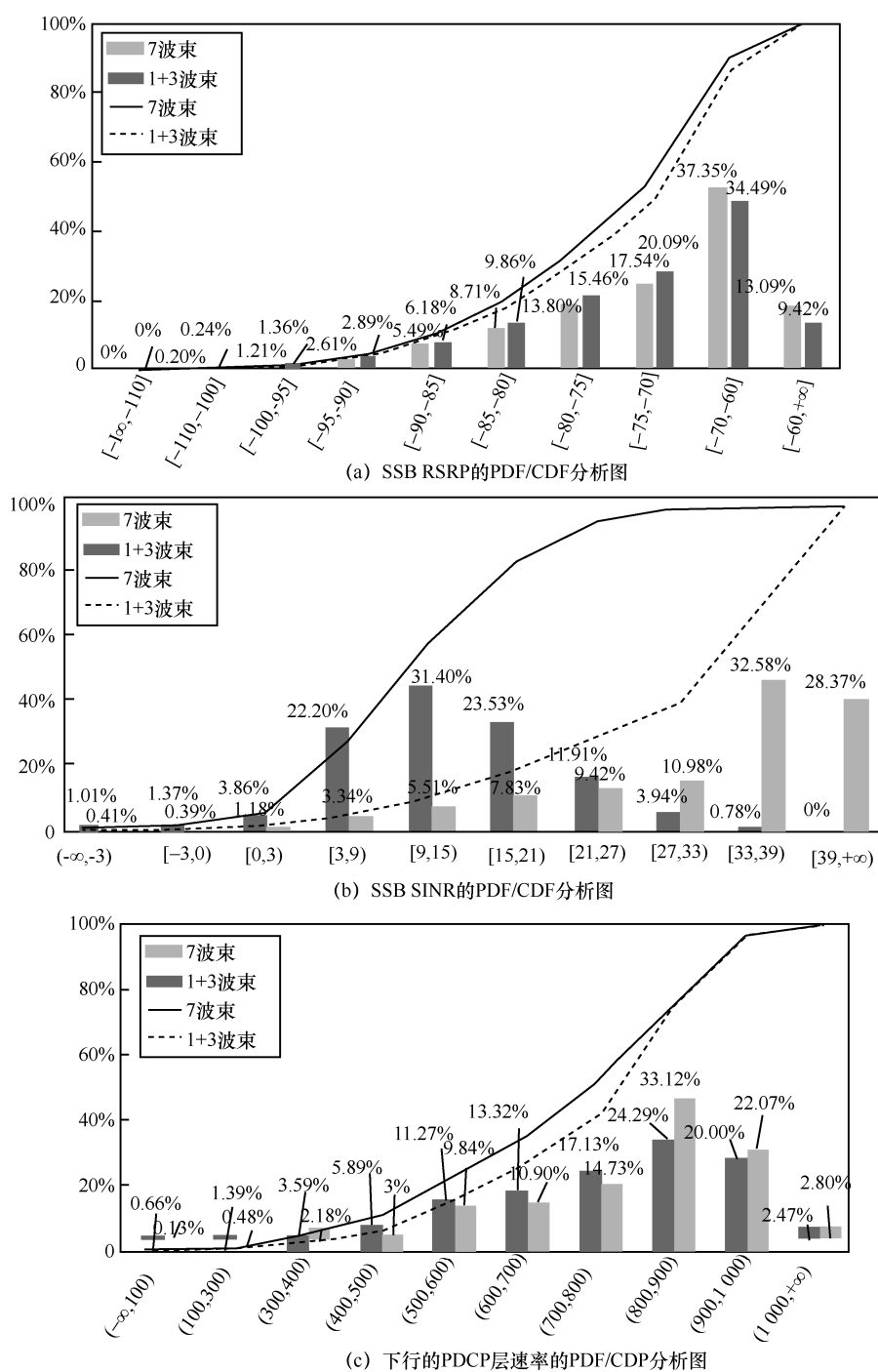


图4 拉网测试 RSRP/SINR/下行平均速率的7波束与1+3波束对比

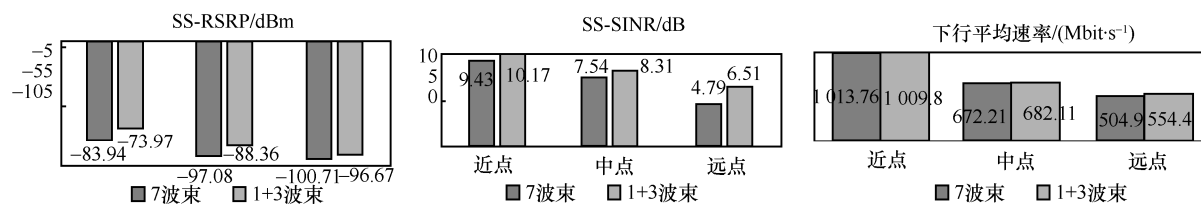
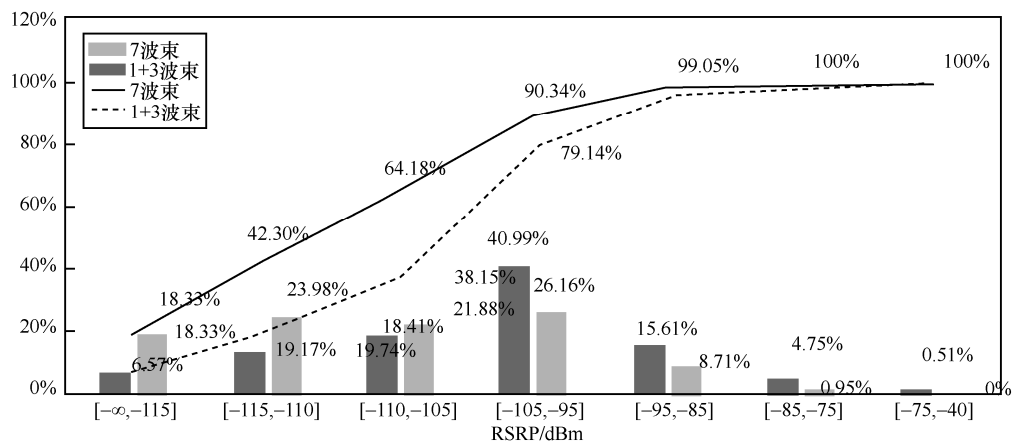


图5 定点测试(远、中、近点)7波束与1+3波束对比

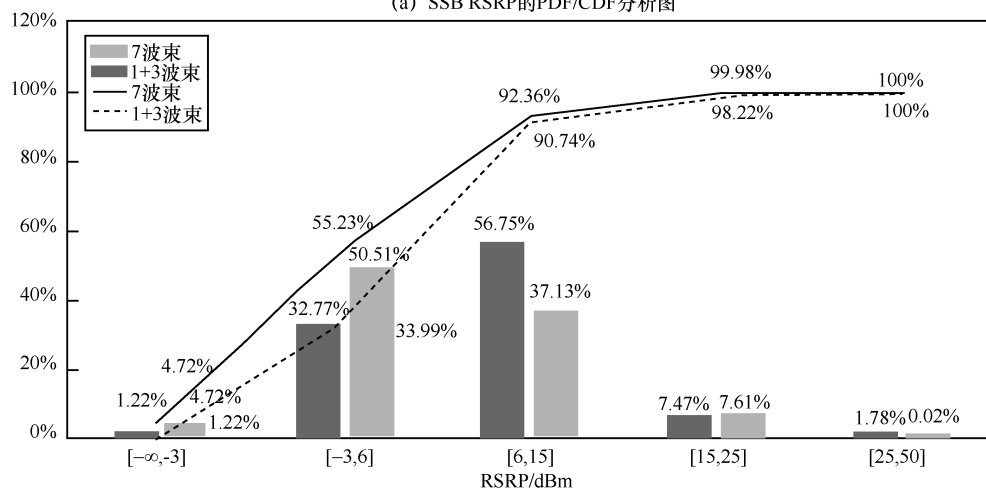


表4 拉网测试7波束与1+3波束对比

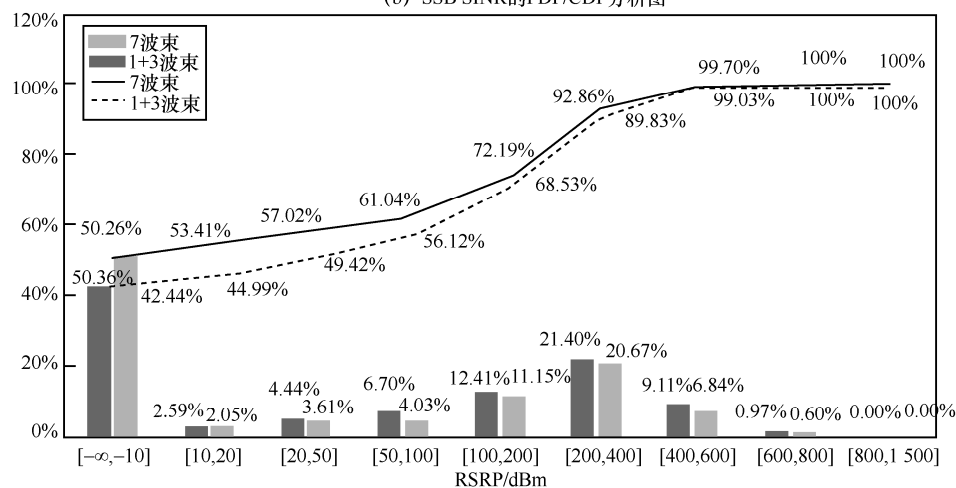
波束配置	点位	RSRP/dBm	SINR/dB	误块率	调制与编码策略	下行平均速率/(Mbit·s ⁻¹)	调度次数/次	信道质量指示
7	拉网均值	-85.09	23.88	7.91%	21.95	670.59	1 394.6	12.01
1+3	拉网均值	-85.95	22.39	7.96%	21.93	663.18	1 393.7	12.15



(a) SSB RSRP的PDF/CDF分析图



(b) SSB SINR的PDF/CDF分析图



(c) 下行PDCP层速率的PDF/CDF分析图

图6 楼层测试RSRP/SINR/下行平均速率的7波束与1+3波束对比

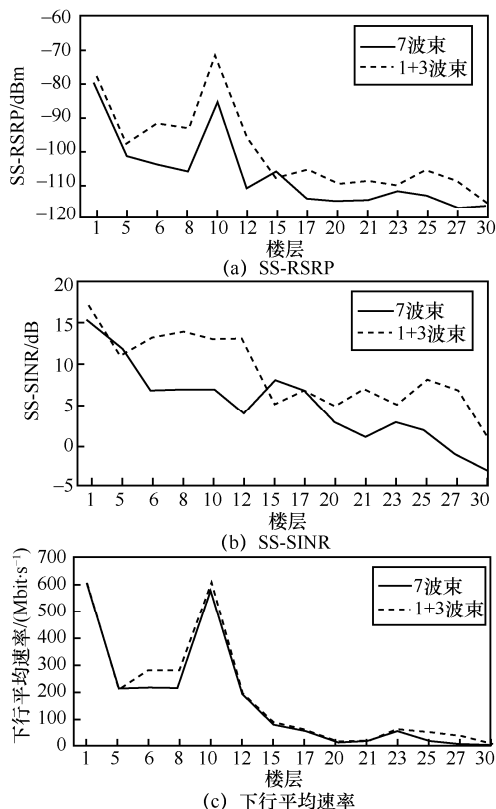


图7 定点1F~30F 7波束与1+3波束对比

时隙/符号,在低负载条件下可以实现更多的亚帧关断。以某区域450个某型号AAU为例,平均每小时0.465 kW·h电(7波束),平均每小时0.386 kW·h电(7波束开启节能),平均每小时0.349 kW·h电(SSB 1+3波束开启节能),能耗改善明显。测算如下,保障最小的复杂度提供最高的网络能耗收

益,能耗对比如图8所示。

7波束开启节能的省电比例: $(0.465-0.386)/0.465=17.0\%$

SSB 1+3波束开启节能后相较于7波束开启节能: $(0.386-0.349)/0.386=9.6\%$

5 1+X方案波束的限制

终端上报NR小区RSRP测量时采用SSB测量结果合并上报RSRP门限和评估小区级质量的SSB两个参数计算小区RSRP,移动终端进行NR小区RSRP测量时只有当NR SSB波束信号高于SSB测量结果合并上报RSRP门限才会参与小区RSRP的计算。若所有波束测量结果均小于该门限,则小区的测量结果上报最好波束的测量结果,否则小区的测量结果则大于该门限的所有波束测量结果的平均值,做平均的波束数不能超过SSB最大个数(一般建议设为3)。对于1+X组网因1和X波束覆盖范围不同则不能按照波束求平均方式上报,需要按照最强波束上报,SSB测量结果合并上报RSRP门限建议设置为-45 dBm。

6 结束语

本方案水平与垂直覆盖解耦设计保证水平连

表5 拉网测试7波束与1+3波束对比

波束配置	点位	RSRP/dBm	SINR/dB	误块率	调制与编码策略	下行平均速率/(Mbit·s ⁻¹)	调度次数/次	信道质量指示
7	拉网均值	-86.23	19.43	9.44%	18.78	500.12	1 339.7	12.27
1+3	拉网均值	-85.21	22.53	9.4%	19.11	476.59	1 331.7	12.07

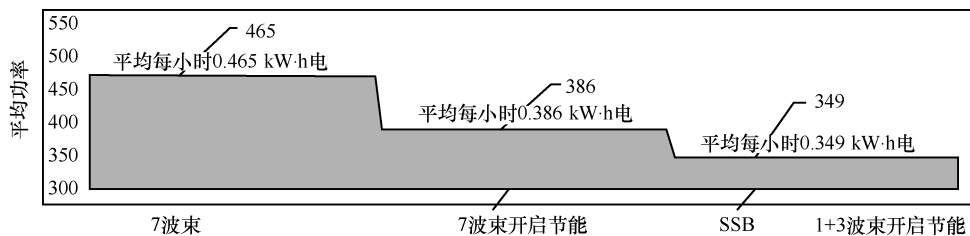


图8 能耗对比



续覆盖稳定的同时,灵活的 X 波束配置满足不同场景的垂直覆盖要求,提供优质水平覆盖的基础上垂直覆盖率提升30%+,更少的时隙资源占用达到低负载下设备功耗降低9%~10%,依托智能网络规划和网络优化工具,高效部署与优化,助力移动网络优化数字化转型。 $1\sim 1+X$ 分步实施,具备演进性。随着5G的广泛覆盖和大量应用,场景精细优化越来越突现其重要性, $1+X$ 的智能应用将会更加广泛应用,提供更好的用户体验。

参考文献:

- [1] 王志勤, 徐菲. 关于5G组网技术路线的分析与建议[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 3-7.
WANG Z Q, XU F. Analysis and suggestion on 5G networking technology route[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 3-7.
- [2] 袁弋非, 王欣晖, 赵孝武. 5G部署场景和潜在技术研究[J]. 移动通信, 2017, 41(6): 39-45.
YUAN Y F, WANG X H, ZHAO X W. Research on deployment scenarios and enabling techniques for 5G[J]. Mobile Communications, 2017, 41(6): 39-45.
- [3] 李培. 5G载波聚合和双连接及提前测量上报技术研究[J]. 邮电设计技术, 2020(3): 23-27.
LI P. Research on 5G carrier aggregation, double connection and early measurement report technology[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(3): 23-27.
- [4] 马洪源, 肖子玉, 卜忠贵, 等. 面向5G的核心网演进[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 135-143.
MA H Y, XIAO Z Y, BU Z G, et al. Evolution of core network oriented to 5G[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 135-143.
- [5] 魏垚, 熊尚坤. 5G eMBB空口时延分析与增强技术研究[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 42-46.
WEI Y, XIONG S K. Analysis on 5G eMBB interface latency and study on enhancement technique[J]. Mobile Communications, 2019, 43(9): 42-46.

[作者简介]



李贝(1983-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为网络智能运营。



胡煜华(1973-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师, 主要研究方向为无线网络规划建设。



王鑫炎(1985-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司工程师, 主要研究方向为无线网络规划优化。

许国平(1978-), 男, 博士, 中国联合网络通信集团有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为无线网络优化。

刘光海(1972-), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为智能运营。

肖天(1991-), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院工程师, 主要研究方向为网络智能运营。

成晨(1990-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院工程师, 主要研究方向为网络智能运营。

李一(1990-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院工程师, 主要研究方向为网络智能运营。