5G波束覆盖优化研究

Research on Coverage Optimization with 5G Beam

梁松柏，李新卫，徐军平（中国联通河南省分公司，河南 郑州 450008）
Liang Songbai，Li Xinwei，Xu Junping（China Unicom Henan Branch，Zhengzhou 450008，China）

摘　要：
从Massive MIMO波束赋形原理、关键参数入手，讨论SSB、CSI-RS和业务波束特点及其对网络的影响，明确SSB波束是影响当前5G网络覆盖的关键因素。进而引入SSB波束权值计算公式和场景通用覆盖需求参数，即可计算得出SSB波束权值方向角、倾角、水平波束宽度、垂直波束宽度四元组参数的多种组合；最后选取4种典型波束权值参数分别应用到广覆盖、低层多密度建筑物及高层楼宇覆盖场景，通过各方案覆盖性能对比分析，得出了各场景覆盖提升的权值参数经验，为后续5G广播波束优化提供参考。

关键词：
5G；Massive MIMO；波束；覆盖优化
doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2020.08.006
文章编号：1007-3043（2020）08-0027-07
中图分类号：TN929.5
文献标识码：A
开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：
Starting from the principle and key parameters of beam shaping in Massive MIMO，it discusses the characteristics of SSB，CSI-RS and service beam and their influence on the wireless network，which clears that SSB beam is the key factor affecting the current 5G network coverage. Then it introduces the formula of SSB beam weight and the general coverage demand parameters of the scene to calculate the multiple combinations of the four parameters of SSB beam weight：direction angle，angle，horizontal beam width and vertical beam width. Finally，four typical beam weight parameters is selected to apply to wide coverage，low-rise multi-density buildings and high-rise buildings respectively. Through the comparative analysis of the coverage performance of each scheme，the weight parameter experience of each scene coverage improvement is obtained，which provides a reference for the following 5G broadcast beam optimization.

Keywords：
5G；Massive MIMO；Beam；Coverage optimization

引用格式：梁松柏，李新卫，徐军平. 5G波束覆盖优化研究[J]. 邮电设计技术，2020（8）：27-33.

1 概述

当前，5G进入规模部署阶段，5G相对于4G最大的特点是引入了大规模天线阵列，大规模天线阵列主要实现2项功能：一是提供容量解决方案。利用用户所在位置不同、空间信道传输多径的非相关性，通过空分复用（SDM），形成多层概念，实现时域、频域和空域三维立体的容量模型，因此，5G在一定范围内的扩容即为扩流，为用户提供更好的业务体验。二是提供覆盖解决方案。相较于传统的天线，5G天线最大的特点就是天线阵子多、体积庞大；比如目前最大的天线阵列为64T64R，可实现多天线阵子作用于不同的用户，实现多用户之间的干扰抑制，以及不同立体方向的精准覆盖，即天线阵列中不同的天线阵子（天线）作用于不同位置的用户，实现网络跟踪用户信号覆盖增强。

本文尝试深入研究大规模天线阵列信号覆盖增强实现原理，并在提升场景的覆盖效率方面进行天馈

收稿日期：2020-06-29

赋形参数实际试点应用，总结优化效果形成相关经验，以期在5G大规模商用优化时，快速推广应用至各类典型场景。

2 Massive MIMO波束赋形原理

2.1 下行波束赋形原理及实现

2.1.1 下行波束赋形定义

基站发射信号经波束赋形器控制每一个发射装置的相位和信号幅度，通过调整相位阵列的基本单元的参数空域预处理，使得某些角度的信号获得相长干涉，而另一些角度的信号获得相消干涉；经过加权后，形成了指向UE的窄带波束，这就是波束赋形。

波束赋形是一种基于天线阵列的信号预处理技术，波束赋形通过调整天线阵列中每个阵元的加权系数产生具有指向性的波束，从而能够获得明显的阵列增益。因此，波束赋形技术在扩大覆盖范围、改善边缘吞吐量以及干扰抑止等方面都有很大的优势。由于波束赋形带来的空间选择性，使得波束赋形与SDMA之间具有紧密的联系。实际系统中应用的波束赋形技术可能具有不同的目标，如侧重链路质量改善，覆盖范围扩展、用户吞吐量提高；或者针对多用户问题，如提升小区吞吐量与干扰消除/避免。

与4G以及以往的天线覆盖不同，NR Sub6G多天线下行各信道默认支持波束赋形（beamforming，以下简称“BF”），可以形成更窄的波束，精准地指向用户，提升覆盖性能。

2.1.2 下行波束赋形原理

根据应用场合的不同，一般可以将波束赋形算法分为上行链路应用以及下行链路应用。无论是哪种情况，一般用一个时变矢量（MIMO）信道来描述用户端与基站端的信号关系。对于上行链路，多个发射信号实质上是N个用户终端设备同时发送的信号，基站侧使用多个天线单元接收信号，对其进行处理和检测，这时发送端的信号分配仅在各个支路分别进行；对于下行链路，基站使用多个天线单元向特定用户发射信号，但用户设备使用单天线检测与其有关的信号，这时接收部分降为一维，信号组合也仅对于单路信号进行。

a）波束赋形应用了干涉原理，波峰与波峰相遇的位置叠加增强，波峰与波谷相遇的位置叠加减弱。

b）未使用BF时，波束形状、能量强弱位置是固定的，对于叠加减弱点用户，如果处于小区边缘，信号强度低。使用BF后，通过对信号加权，调整各天线阵子的发射功率和相位，改变波束形状，使主瓣对准用户，信号强度提高。

c）一般控制信道和广播信道系统采用预定义的权值生成离散的静态波束，而基于SRS加权或PMI权获得的波束一般称为动态波束，依据测量结果随时调整。

d）对于TDD系统，可以方便地利用信道的互易性，通过上行信号估计信道传播向量或DoA（Direction-of-Arrival）并用其计算波束赋形向量。对于FDD系统，也可以通过上行信号估计DoA等长期统计信息并进行下行赋形。

2.1.3 下行波束赋形流程

通道校正：保证上下行收发通道的互易行和通道间的一致性；对于上行链路，由于可以获得可靠的信道实时估计；对于TDD模式的系统，在上下行信道间隔时隙很小的条件下，可以近似认为信道未发生变化，从而可以在下行链路使用由上行数据获得的信道空时域参数的估计值，甚至可以直接使用上行波束赋形的数据。但是对于FDD系统，则一般无法满足上下行信道频率间隔足够小的要求使得两者的变化强相关，因此如果不使用反馈回路获取移动站的测量数据，仅可根据上行数据获得一些与频率变化无关或者弱相关的信道参量，这包括信道的空域参量以及空时域参量的平均值等。

a）权值计算：gNB基于下行信道特征计算出一个向量或权值矢量的值，以便作用于数据流信号预处理，用以改变波束形状和方向。

b）加权：在基带信号处理时，将权值与待发射的数据进行矢量相加，改变信号幅度和相位。

c）赋形：应用了干涉原理，调整波束的宽度和方向。

2.2 Massive MIMO参数

5G Massive MIMO设备相对4G天线属性的差异如表1所示。

如表2所示，5G AAU重要工程参数既包含如4G RRU的射频性能参数，也包含了传统天线的工程属性参数。

Massive MIMO设备参数是实现5G波束赋形的关键。

2.3 5G波束分类

5G Massive MIMO天线波束分为静态波束和动态

表1　5G Massive MIMO设备相对4G天线属性对比

序号	4G天线属性名称	5G天线中该技术指标名称	指标含义	指标范围	是否可调	是否可从OMC读取
1	工作频率	工作频率	与4G指标定义基本一致	3 400~3 600 MHz	实际工作频率可以在指标方位内调整	暂时不支持直接读取
2	天线增益	天线增益		25 dBi	否	
3	极化方式	计划方式		+45°，−45°	否	
4	水平面波瓣宽度	水平面波瓣宽度		−60°~60°	否	
5	垂直平面波瓣宽度	垂直平面波瓣宽度		−15°~15°	否	
6	前后比	前后比		≥28 dB	否	
7	第一瓣抑制	无	不涉及			
8	交叉极化比	无				
9	驻波比	无				
10	隔离度	无				
11	三阶交调	无				
12	阻抗	阻抗	与4G指标定义基本一致	50 Ω	否	
13	功率容量	模块功率	模块最大支持的输出功率	200 W	最大功率不可调整，实际发射功率可以调整	
14	电下倾角	波束倾角	波束倾角，波束方向角	不同的波束配置下的可调范围不一样	在特定的波束场景下，可以调整	可在参数配置中查询

表2　5G AAU重要工程参数

序号	参数名	参数含义	参数取值
1	覆盖场景	小区广播波束配置方案	DEFAULT（可优化）
2	机械下倾角	AAU的物理下倾角	根据业务需要来确定（可优化）
3	波束下倾角	小区广播波束下倾角	6（可优化）
4	机械方位角	AAU的物理方位角	根据业务需要来确定（可优化）
5	波束方位角	小区广播波束方位角	0（可优化）
6	TRX通道数	TRX通道的数量	64
7	AAU发射功率	AAU发射功率	200 W
8	AAU型号	AAU型号	AAU5613
9	AAU设备功率	AAU设备功率	1 090 W@满负载
10	AAU带宽	AAU带宽	200 MHz

波束。5G Massive MIMO天线对于导频信道，可以通过天线架构和预定义的权重矩阵生成静态波束。其中SS Block及PDCCH中小区级数据、CSI-RS采用小区级静态波束，采用时分扫描的方式。而PDSCH中用户数据采用用户级动态波束，根据用户的信道环境实时赋形，一般为动态波束，如图1所示。

Massive MIMO目前主要是广播波束SSB，后续还有业务信道CSI-RS。5G为支持广播信道赋形以及节省系统固定开销，将同步、广播信道进行组合，形成多流波束赋形的传输模式，因此取消了4G中的CRS。使用SSB和CSI-RS得到RSRP和SINR测量功能。

2.3.1　SSB静态广播波束

SSB静态广播波束主要组成及功能参见表3，主要用于下行同步、小区信号质量测量以及发送系统广播。

协议规定，SSB波束包含7个或者8个（协议不超过8个）子波束。按照时分方式轮发，每个波束占用4个符号，决定小区接入和切换性能。波束覆盖基于场景化参数配置，是小区级静态波束。其扫描范围如图1（a）所示。

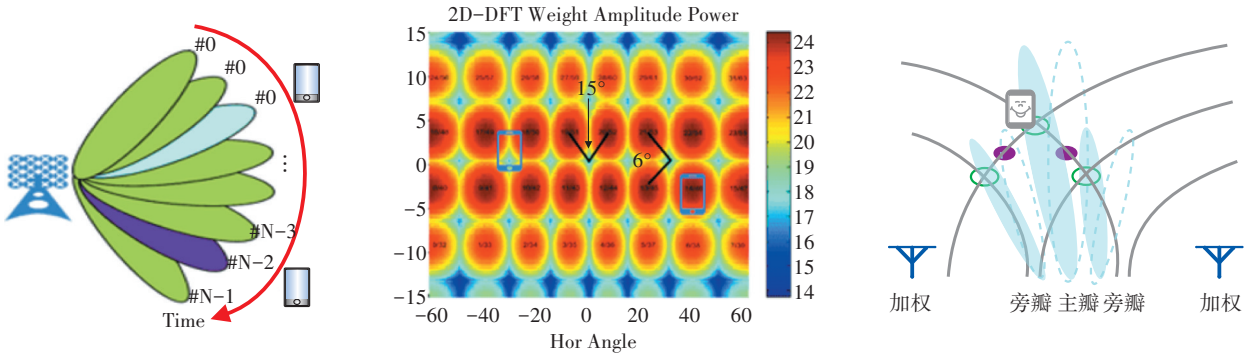
对于TDD系统，不同子帧配比可配置的SSB波束个数不一样，如表4所示。

对于SSB广播信号时分扫描的方式，协议中定义Sub3G场景最大SSB波束个数为4个时也应支持扫描。比如8T8R，也支持扫描，配的波束会胖一些，没有M-MIMO增益，带来30%~40%的增益。目前中国移动已明确使用2.6 GHz来部署5G，4个静态波束会限制覆盖场景使用的灵活性，3GPP RAN#81会议中提出2.6 GHz频谱应用时，也要支持SSB的最大8个波束分时扫描，图2为小区SSB（7+1波束）与用户级窄波束二维覆盖示意图。

1个胖波束+7个窄波束，比LTE（同频段的LTE TDD相比）有9 dB的增益。每个用户接收到SSB的扫描，然后解调。

2.3.2　CSI-RS静态控制波束

与SSB波束不同的是CSI-RS波束为用户级静态



（a）SSB波束　（b）CSI-RS波束　（c）PDSCH波束

图1　SSB、CSI-RS和PDSCH波束属性对比

表3　SSB信道功能描述

功能	信道	描述
下行同步	PSS	包括时钟同步，帧同步和符号同步
	SSS	
小区信号质量测量	SSS	用于RSRP/RSRQ/RS-SINR测量、初始波束选择、RRM测量等
发送系统广播	PBCH	用于用户获取接入网络中的必要信息，包括系统帧号SFN、RMSI使用的SCS等

表4　不同帧结构下的最大SSB个数

帧结构	子帧配比	最大SSB个数
2 ms单	10:2:2	5
2.5 ms单	10:2:2	7
2.5 ms双	10:2:2	7

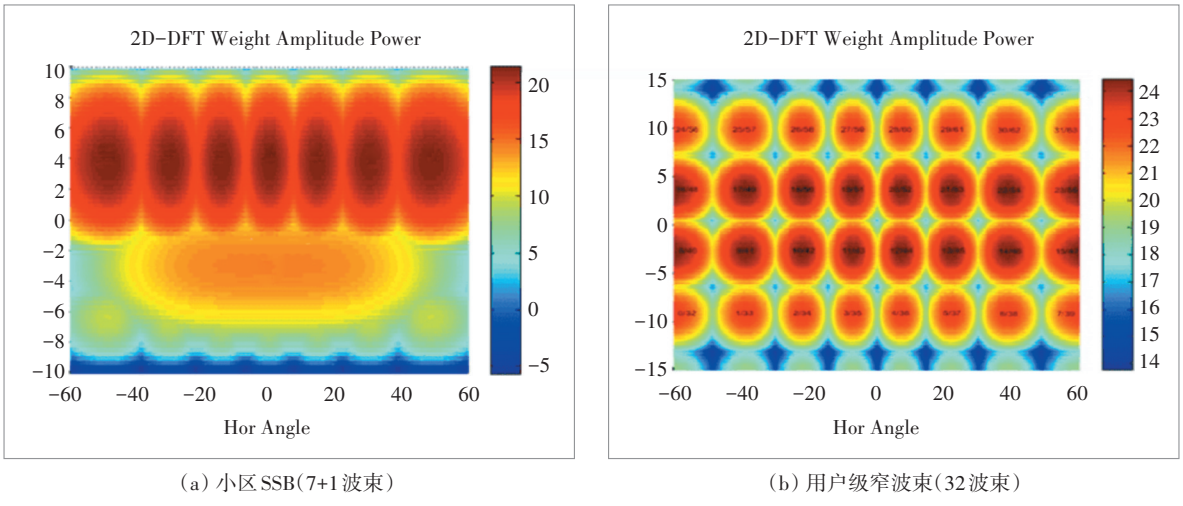
波束。CSI-RS信号的主要功能如表5所示，主要包含信道质量测量、波束管理、时频偏跟踪以及RRM/RLM测量。

波束覆盖由AAU硬件能力决定，CSI-RS波束决定了用户的业务信道能力。CSI-RS波束连接态可用，与用户业务连接行为相伴。如图1(b)所示。

2.3.3　PDSCH业务信道动态波束

业务信道波束决定UE的速率体验及重传，是与用户密切相关的用户级动态波束，波束覆盖由波束赋形过程的权值计算结果决定。如图1(c)所示。

PDSCH波束与SSB和CSI-RS波束不同，后两者采用静态权，前者依据信号强度、质量情况，采用不同的beam pattern。PDSCH波束有2种情况：中近点信号强的时候，采用SRS测量，通过动态权，能获得精度高的波束；对于远点信号弱的场景，采用PMI测量，通过静



（a）小区SSB(7+1波束）　（b）用户级窄波束(32波束）

图2　小区SSB(7+1波束)与用户级窄波束二维覆盖示意图

表5　CSI-RS信道功能描述

功能	CSI-RS类别	描述
信道质量测量	NZP-CSI-RS	用于信道状态信息（CSI）测量，UE上报的内容包括：CQI、PMI、RI（Rank Indicator）、LI（Layer Indicator）
	Non-Zero Power CSI-RS	
	CSI-IM	
	CSI-RS Interference Measurement	
波束管理	NZP-CSI-RS	用于波束测量，UE上报的内容包括：L1-RSRP、CRI（CSI-RS resource indicator）
时频偏跟踪	TRS（Tracking RS）	用于精细化时频偏跟踪
RRM/RLM测量	NZP-CSI-RS	用于RRM/RLM测量，UE上报的内容包括：CSI-RSRP、CSI-RSRQ、CSI-SINR

态权也能获得相应精度的波束。

以上各种波束的电平值（RSRP）和Throughput有直接的关系。从以上这3类波束中，简析其对应RSRP如下：

第1种广播波束：SS RSRP。即PBCH的DM-RS RSRP，接收到的广播消息，空闲态可测量。

第2种控制波束：CSI RSRP。即确定CSI-RS序列下的RSRP，连接态可测量。如64T64R，则CSI波束采用64个静态波束。

第3种业务波束：PDSCH RSRP。即PDSCH的DM-RS RSRP，采用基于SRS的动态权值或者PMI静态权值赋形后的RSRP，业务态可测量。SRS信噪比不足时，动态权可切换至PMI静态权。

综上所述，动态波束是一种网络和终端依据无线环境自适应的波束调整方式。而对于现有网络来说，静态波束的优化对网络覆盖和质量起到决定性作用。

2.4 静态波束优化

关于Massvie MIMO 2种波束的优化，业界一直认为分别对SSB的优化和CSI-RS的优化是保障物理网络性能的重要手段。目前网络部署优化主要集中在SSB的优化，SSB和CSI-RS虽然是2张逻辑覆盖网，但在覆盖上两者趋势相同。也就是说，SSB好，CSI-RS大概率会好。CSI-RS优化重点聚焦干扰。从双层波束的功能特性看，不同SSB和CSI-RS的性能还是会产生不同的影响。

a）SSB RSRP和SINR反映广播信道的质量，影响5G终端的初始接入和切换性能，决定小区在路面及整网的覆盖范围。

b）CSI-RS RSRP和SINR反映业务信道的质量，影响5G终端的MCS选阶、调制方式、RANK等，决定实际的用户体验速率。

SSB静态波束通过调整以上Massive MIMO参数（指配好不再改变，比如指向方向等），然后在设定周期内一个个扫描。

SSB和CSI-RS的覆盖范围大致趋同，也就是SSB好的时候，CSI大致也会好。但是因为CSI的波束更窄一些，所以会覆盖稍微大一些。因此，静态波束优化，特别是广播波束的优化是当下5G覆盖优化的关键。

3 SSB波束研究及应用分析

3.1 SSB波束因子

表征一个波速的四元组为方向角、倾角、水平波束宽度、垂直波束宽度。以64TRX为例，可以由2个极化方向的天线使用相同的权值，总共32组权值数据生产一个波束。

3.2 5G权值规划及计算

5G权值的规划涉及到5个流程：明确新建站点、场景识别、覆盖范围需求、权值计算、权值匹配。5G权值的计算如图3所示。

依据图3中的公式以及场景通用覆盖需求，引入场景参数，可计算得出16种权值参数组合（见表6），可以应用到不同场景。

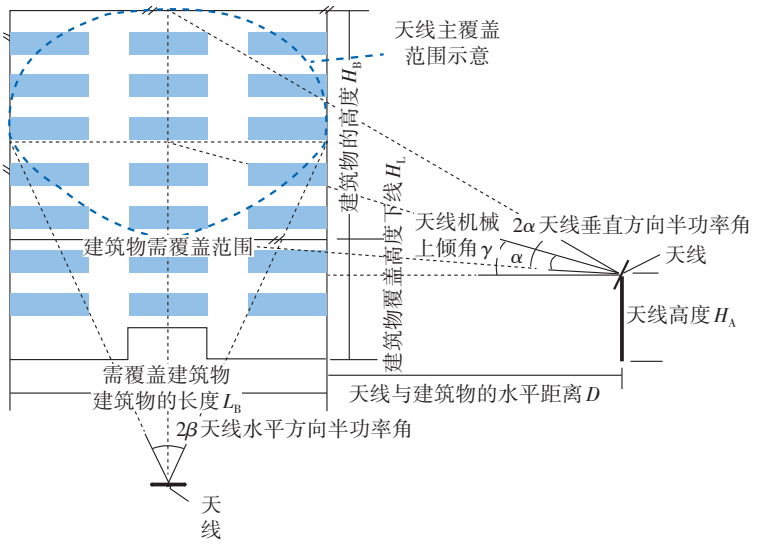
3.3 典型权值应用

选取广覆盖场景、低层密集场景、高层场景进行测试，其中广覆盖场景采用DT测试，低层密集场景、高层场景采用CQT测试。匹配相同的4个波束方案进行测试对比，确认不同权值对场景的覆盖差异，如表7所示。

路面覆盖，从DT测试覆盖数据上来看，当选用波束方案1时覆盖最佳。方案2在水平波宽减小后，覆盖效果大幅降低。方案3、4在垂直波宽增大后，覆盖效果大幅降低，如图4所示。

覆盖场景主要为密集中低层楼宇，从CQT测试覆盖数据上来看，当选用波束方案2时整体覆盖最佳。方案1、2，在水平波宽减小后，覆盖效果变好。方案1、3、4，随着垂直波宽增大，覆盖效果越来越差，如图5所示。

覆盖场景主要为高层场景，从CQT测试覆盖数据上来看，当选用波束方案3时整体覆盖最佳。方案1、3在垂直波宽增大后，覆盖效果变好；但方案4在大幅增大垂直波宽后，覆盖效果却变差。方案4设计本身存在缺陷，若采用多层覆盖效果更好，如图6所示。



建筑物高度/m	H_B	75
建筑物覆盖下限/m	H_L	0
建筑物长度/m	L_B	40
天线高度/m	H_A	26
天线与建筑物的水平距离/m	D	80
天线垂直方向上所需半功率角	2α	49.49
天线机械上倾角	γ	6.74
天线水平方向上所需半功率角	2β	27.89

$$\alpha = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{(H_B - H_L)\times D}{\sqrt{\left[D^2 + (H_A - H_L)^2\right]\times\left[D^2 + (H_B - H_A)^2\right]}}\right)$$

$$\beta = arctg\frac{L_B \times \cos\gamma}{2D}$$

$$\gamma = \text{arctg}\frac{H_B - H_A}{D} - \alpha$$

图3　5G权值计算公式及应用

表6　典型天线权值参数组合

场景	方案	水平宽度/°	垂直宽度/°	子波束配置	子波束水平宽度/°	子波束垂直宽度/°	波束增益/dB	备注
广场场景	0	105	6	7	13	6	25	3扇区
广场场景	1	110	6	7	13	6	25	低层楼宇
干扰场景	2/3	90/65	6	6	13	6	25	
热点覆盖	4/5	45/25	6	4/2	13	6	25	
广场场景	6	110	12	7	13	12	21	中层楼宇
干扰场景	7/8	90/65	12	6	13	12	21	
热点覆盖	9/10/11	45/25/15	12	4+3/2+2/1+1	13	6	25	
广场场景	12	110	25	7	13	25	20	高层楼宇
干扰场景	13	65	25	6	13	25	20	
热点覆盖	14	45	25	4	13	25	20	
热点覆盖	15/16	25/15	25	2+2+2+1/1+1+1+1	13	6	25	

表7　实验权值参数组合方案

方案序号	子波束数量	子波束层数	水平波宽/°	垂直波宽/°	下倾角	方位角
方案1	7	1	110	6	现网默认配置（厂家B为65°，厂家A为105°）	
方案2	6	1	65	6		
方案3	7	1	110	12		
方案4	7	1	110	25		

综上所述：广覆盖场景，优先采用水平宽波束方案覆盖，垂直波宽保持不变。低层密集场景，优先采用中等水平波宽，垂直波宽保持不变。高层场景，优先考虑增大垂直波宽，可以考虑适当收缩水平波宽，并采用分层覆盖。

4 总结

本文从Massive MIMO波束赋形原理、关键参数入手，讨论SSB、CSI-RS和业务波束特点及对网络的影响，明确SSB波束是影响当前5G网络覆盖的关键因素。进而引入SSB波束权值计算公式和场景通用覆盖需求参数，即可计算得出SSB波束权值方向角、倾角、水平波束宽度、垂直波束宽度四元组参数的多种组合；最后选取4种典型波束权值参数分别应用到广覆盖、低层多密度建筑物及高层楼宇覆盖场景，通过各方案覆盖性能对比分析，得出了广覆盖优先优化水平

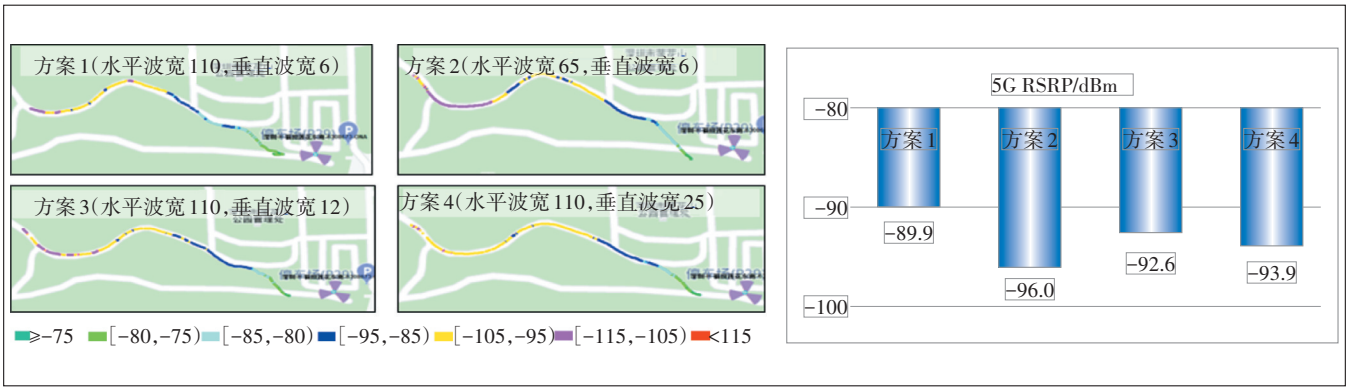


图4　道路覆盖不同权值方案差异性

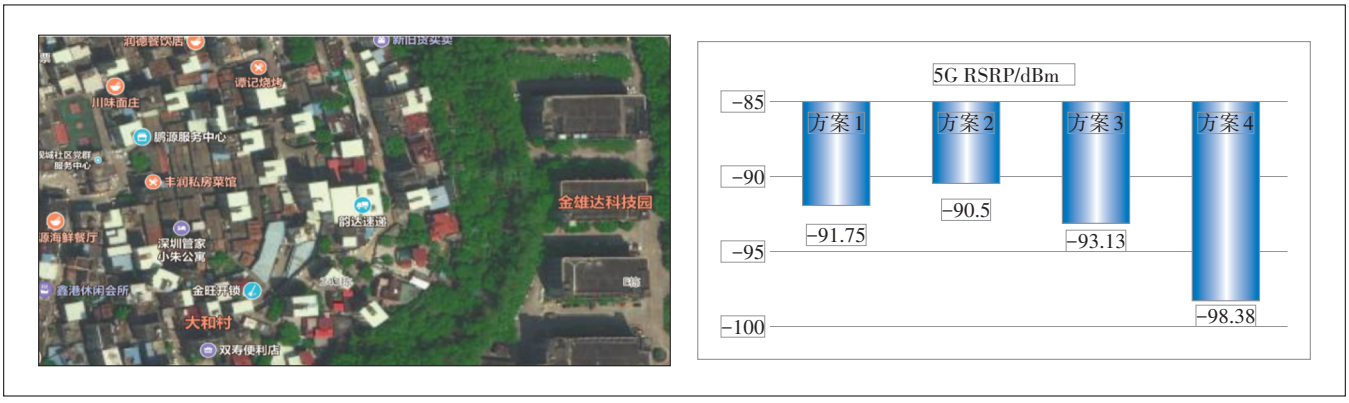


图5　中低层密度楼宇覆盖不同权值方案差异性

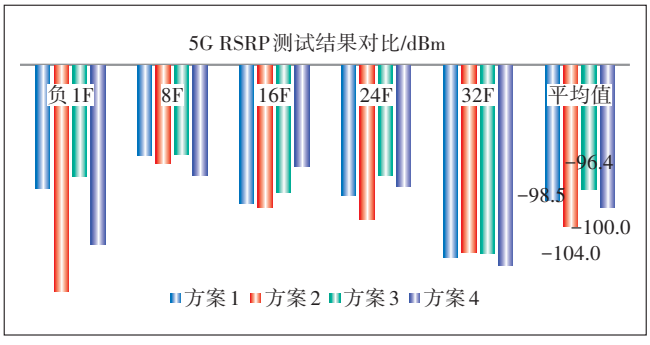


图6　高层楼宇覆盖不同权值方案差异性

波束，高层优先增加垂直波束的场景覆盖提升的权值参数优化经验，对后续5G波束优化提供了参考，改善了5G网络用户感知。

参考文献：

[1] 李东泽，苏亭. 简析5G多模终端的多天线系统设计[J]. 中国新通信，2017(20)：59.
[2] 梁书华. 多天线技术概述[J]. 数字通信，2011(4)：48-50.
[3] 刘毅，牛海涛，张振刚，等. 3D-MIMO天线技术应用研究[J]. 移动通信，2017，41(1)：52-57.
[4] 朱伏生，鲁照华，胡留军. 探究5G多天线技术[J]. 上海信息化，2017(5).
[5] 王晟劼. 基于5G大规模阵列天线波束指向精度的研究[J]. 通讯世界，2017(12)：22-23.
[6] 张长青. 面向5G的大规模MIMO天线阵列研究[J]. 邮电设计技术，2016(3)：34-39.
[7] 阴燕，周峰，马蓁. 移动通信有源天线技术和产业的军民融合发展[J]. 现代电信科技，2016，46(2)：69-72.
[8] 栾帅，冯毅，张涛，等. 浅析大规模MIMO天线设计及对5G系统的影响[J]. 邮电设计技术，2016(7)：28-32.
[9] 肖显芬. 5G移动通信的发展趋势以及技术研究[J]. 中外企业家，2016(23).
[10] 宋立众，房亮，聂玉明，等. 基于FEKO的双极化振子天线设计与仿真研究[J]. 实验技术与管理，2014(6)：102-105.
[11] 韩玮，江海，李晓彤. 5G网络设计与规划优化探讨[J]. 中兴通讯技术，2019，25(4)：59-66.
[12] 吴雅颖. 大规模MIMO容量优化算法[D]. 西安：西安电子科技大学，2014.

作者简介：
梁松柏，毕业于北京大学，高级工程师，硕士，主要从事无线网络优化工作；李新卫，毕业于北京邮电大学，工程师，硕士，主要从事无线网络优化工作；徐军平，毕业于武汉大学，工程师，硕士，主要从事工程项目管理工作。