

5G 毫米波波束赋形和波束管理

Beamforming and Beam Management of 5G Millimeter-Wave

延凯悦,张忠皓,李福昌,高 帅(中国联通网络技术研究院,北京 100048)

Yan Kaiyue,Zhang Zhonghao,Li Fuchang,Gao shuai (China Unicom Network Technology Research Institute,Beijing 100048,China)

摘 要:

毫米波具有较大的路径传播损耗,需要利用定向波束赋形技术来弥补路径损耗。有效的波束管理对于提升毫米波系统性能至关重要。首先介绍了毫米波的频谱特性、优缺点,之后详细介绍了毫米波中的波束赋形和波束管理方案,给出了毫米波波束相关测试数据,为毫米波的应用和部署提供了参考。

关键词:

毫米波;波束赋形;波束管理;波束失败

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2020.07.008

文章编号:1007-3043(2020)07-0039-07

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:

Millimeter wave has a large path propagation loss,so it is necessary to use directional beamforming technology to make up for the path loss. Effective beam management is very important to improve the performance of millimeter mobile communication systems. It first introduces the millimeter spectrum characteristics,advantages and disadvantages. Then the beamforming and beam management schemes of MMW are described in detail. Finally,it gives the beam-related test results of Millimeter-Wave,which provides references for the application and deployment of MMW.

Keywords:

Millimeter-Wave;Beamforming;Beam management;Beam failure

引用格式:延凯悦,张忠皓,李福昌,等. 5G 毫米波波束赋形和波束管理[J]. 邮电设计技术,2020(7):39-45.

0 引言

毫米波一般是指波长 1~10 mm、频率 30~300 GHz 的电磁波^[1]。近年来快速发展的移动通信业务对通信带宽的需求急速提升,与此同时,6 GHz 以下频率资源匮乏,很难找到连续的大带宽满足 5G 系统需求。移动通信行业的目光开始向高频段转移,毫米波开始成为移动通信发展的重要研究方向^[2]。

相对于 6 GHz 以下频段,毫米波频段有丰富的带宽资源,并且由于传播特性和波束赋形方面的特点,可以广泛用于雷达、交通、医疗、安检等领域^[3]。但 5G

毫米波距离落地应用还有很多问题有待解决和进一步完善^[3-4],如高频器件性能、电磁兼容问题、波束赋形和波束管理算法、链路特性等方面。

1 毫米波简介

随着无线网络的演进升级,业务类型变得更加丰富多样,对网络的需求也呈现爆炸式增长,6 GHz 以下的低频段已经无法支持超高容量通信,通信频段必然向毫米波方向延伸,高低频段混合组网将是 5G 通信系统未来的基本架构。相较于低频段,毫米波频段有以下优势。

首先毫米波频谱资源丰富,支持高达 800 MHz 的超大带宽通信系统,是解决容量的最直接途径;其次,

收稿日期:2020-06-03

现有通信频段波长较长,在分米级或厘米级,受尺寸和体积限制,设备很难小型化,很难集成大规模天线阵列,而毫米波波长短,非常适合与大规模天线结合,可以极大地提升频谱利用率;最后,毫米波虽然路径损耗大、传输距离短,但恰好可以成为高密度小区频率复用的优点^[5]。

毫米波的独特优势使得 5G 毫米波有丰富的应用场景,目前商用的毫米波通信标准和系统大多限于 60 GHz 免费频段的室内通信,例如 IEEE 802.15.3c 和 802.11ad 标准。5G 低频与 28 GHz 毫米波进行高低频混合组网是解决室外无线移动通信的重要技术,低频

用于连续覆盖,毫米波进行补热补盲。比如可以将毫米波基站部署于半径 200 m 区域内,如场馆、机场、步行街等人流密集场所,提供大容量上传能力,进行流量保障;同时 5G 毫米波可以作为其他无线接入的回传方式,解决一些场景无法布放光纤的问题,如毫米波作为 LTE、5G 低频基站的回传,毫米波转 Wi-Fi 作为家庭或企业宽带的服务;此外,毫米波还可以与 MEC、AI 技术结合,为覆盖区域提供定制化的园区专网服务,满足园区大带宽、低时延的服务需求,并提供丰富多样的增值服务(见图 1)。

然而,毫米波的频段特性也为系统设计带来了新

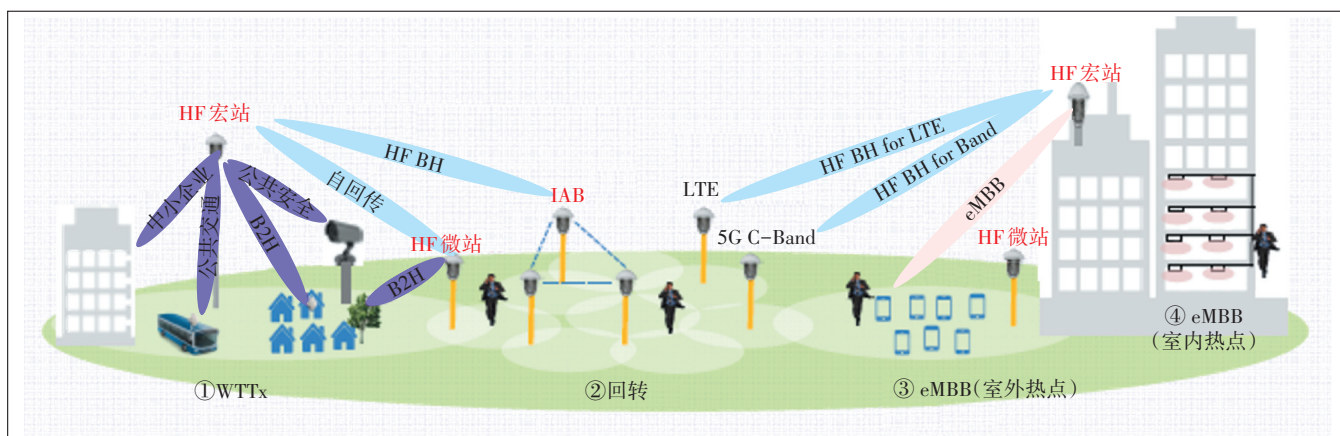


图1 毫米波应用场景

的问题与挑战。毫米波相对于 6 GHz 以下频段路径损耗大,透射绕射能力差,通常需要在收发端配置十几乃至上百根天线组成阵列获得高方向性的增益来弥补其在传输路径上的损耗,自适应波束赋形技术(BF)是保证毫米波覆盖的首要必备技术。相比现有 6 GHz 以下频段的移动通信系统,宽带毫米波系统在 BF 设计上具有 3 个方面的不同与挑战^[6-7]:首先,毫米波系统较大的通信带宽大大增加了硬件成本和功耗。以模数转换器(A/D)为例,基于最新互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺制作的具有 12 bits 精度、100 Ms/s 采样率,并且支持 16 路天线的 A/D 的功耗大于 250 mW^[8]。如果继续采用传统的全数字实现方案,需要为每根天线都配置一套射频(RF)链路,成本和功耗都难以承受,对于基带的处理能力也是一个很大的挑战。其次,毫米波系统中天线阵列规模很大,天线数目达到十几甚至上百,使得 BF 矩阵优化问题变得更加复杂,增加了信道建模的难度和计算复杂度。最后,相比 6 GHz 以下频段的移动通信系统,毫米波信道在延时和角度域上都具有稀疏性,如何很好地利用这一特

性降低 BF 设计的复杂度仍需要进行深入研究。

2 5G 毫米波波束赋形

2.1 混合波束赋形

波束赋形技术可以在数字域实现或者模拟域实现,采用不同硬件结构和波束赋形算法,分别叫做数字域波束赋形和模拟域波束赋形。同时,波束赋形技术还分为自适应阵列天线系统和固定波束切换系统^[9]。

现有的数字域波束赋形通常采用自适应阵列天线系统,根据参考信号的接收质量,进行信道估计计算产生对应用户的波束赋形矢量,通过灵活控制波束赋形矢量,使波束主瓣对准用户,低功率的旁瓣或者零限位置对准干扰源,提高通信系统的信噪比使系统性能得到提升。数字域波束赋形需要将每根天线都分别连接至其对应的模拟前端链路,实现数字基带到模拟射频的转换(见图 2)^[10]。

固定波束切换系统通常在模拟域实现,利用低成本的移相器来控制调整每个天线发射信号的相位,形

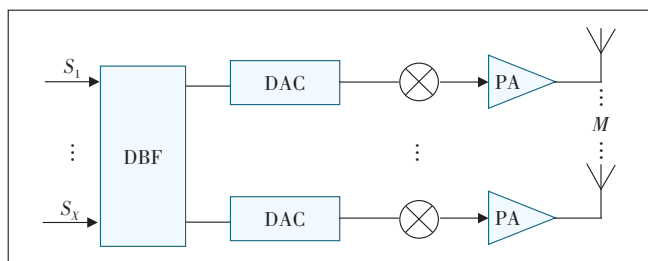


图2 数字波束赋形结构

成若干定向波束。具体实现上,需要预先设计好一组备选用波束模式的波束加权向量或者波束码本,对于波束码本集合,不同厂家有不同的设计。当需要进行数据传输时,从设计好的码本中选取最优波束进行通信。码本中的每一列代表波束成形的权重向量。原始信号经过基带信号处理之后变频到射频,射频的信号根据发送权重向量进行相移操作然后发送。接收到的射频信号根据接收权重向量进行相移操作然后变频到基带。不同的码本对应了不同的相移,也对应了不同的波束宽度。

移相器成本低廉,简单易行,因此模拟波束赋形在经济上比数字波束赋形上更受欢迎(见图3)。但是,模拟波束赋形的性能达不到数字波束赋形的效果,也无法实现较优的 MIMO 性能,因此在 NR 高频中,考虑有限数量数字通道下 MIMO 技术方案来减少能耗和降低设备成本,通常采用模拟电路与数字电路相结合的基于数模混合信号处理的混合 BF(HBF)方式^[11]。

如图4所示的混合波束赋形结构,基站配置 M 根

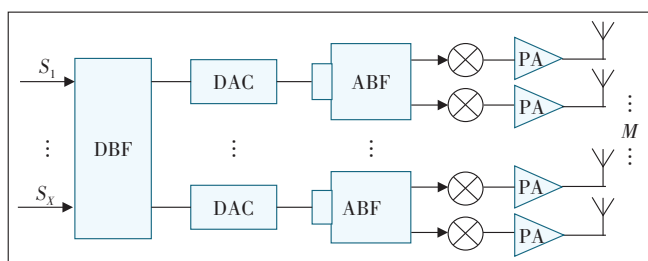


图3 模拟波束赋形结构

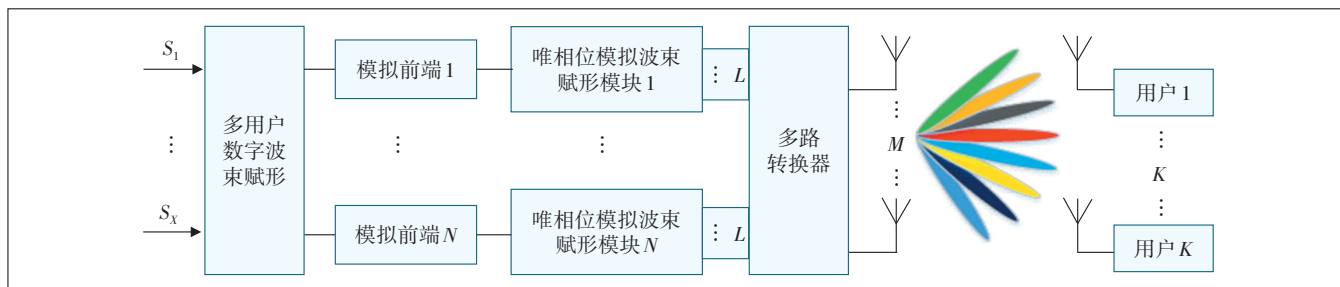


图4 混合波束赋形结构

天线,服务 K 个用户, M 根物理天线分为 N 组,每组 L 根物理天线,分别与 N 个模拟前端相连 ($M=N \times L$),每个模拟前端链路包括上、下变频器、ADC 和 DAC。模拟域波束赋形是基于 RF 射频链路 M 个物理天线来做, M 根物理天线经过模拟波束赋形模块,经过移相形成若干个发送波束。数字波束赋形是在 N 路模拟前端链路之前来做, N 路发送信号进行数字波束赋形,发送给 K 个用户。在混合模拟、数字波束赋形结构中,需要满足 ($M > N > K, M=N \times L$),因为对于 $N=M$ 和 $N=1$ 的极限情况,混合波束赋形就转变为普通的全数字域的波束赋形。

在混合模拟、数字波束赋形中,发送信号的处理流程如下:某个子载波上发送给某个用户的信号经过数字波束赋形后,进行快速傅里叶变换将频域信号转换到时域,通过模拟前端链路的 DAC 模块转化为模拟信号,模拟信号经过模拟波束赋形矩阵的作用,产生 L 路具有不同相位的模拟信号,最终将 ABF 模块输出的 L 路信号映射到天线上。其中模型波束只进行相位旋转,赋形权重的幅度相同均为 1。

2.2 波束形态设计

假设系统发射端含 M 个天线阵元,接收端含 N 个天线阵元,在发射端,信号乘以发送权重矢量 t 之后利用天线阵列发射到空间中;相应地,接收端将接收信号乘以接收权重矢量 c 后,进行加权求和得到输出信号送至信号处理模块。在毫米波通信系统中,加权矢量各分量均为相移因子,即模为 1。因此,可简单地将发射信号经过不同相移后,利用阵列天线发射出去。

波束码本是一个 $M \times N$ 的矩阵,其中行数 M 为天线阵元数,列数 N 为波束数目,对于均匀分布的 1 维线性阵,其第 n 个波束的阵列响应因子可以表示为^[12]:

$$A_n(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} w_{m,n} e^{j2\pi m(d/\lambda) \sin\theta}$$

式中:

$w_{m,n}$ ——码本中第 n 个波束的第 m 个天线阵元的

加权因子

d ——天线阵元间距

λ ——信号的波长

θ ——来波方向与天线阵法线方向的夹角(波达角)

一般情况下,设置 $d = \lambda/2$ 。

波束设计中对于控制波束和业务波束可以独立设计,也可以统一设计,目前标准中这2种方式都可能支持,具体实现时通过高层信令配置。其中,控制波束要强调其传输的鲁棒性,可以考虑在不同时刻使用不同鲁棒性或不同方向的波束给终端传输控制信道,以解决高频信道突发阻塞的问题;另外,波束设计还需要考虑到场景的需要,相对较窄的波束会有较好的模拟赋型增益和干扰屏蔽效果,但是对移动性的支持较差,更适合于用户较固定的场景。设计相对较宽的波束,可以减少总波束的个数,降低测量开销,而且用户移动出波束的时间也更长,有利于更好地跟踪波束。如果有移动性较强的用户,倾向于设计较宽的波束。

3 5G 毫米波波束管理

毫米波通信系统中,终端和基站侧经过波束赋形后会形成大量窄波束。波束管理的目的是获取并维护一组可用于DL和UL传输/接收的UE波束对,提高链路的性能。波束管理包括以下几方面内容:波束扫描、波束测量、波束上报、波束指示、波束失败恢复。

3.1 波束扫描流程

波束扫描通常包括以下几个过程(见图5)。

a) P1 阶段——基站/终端波束粗扫描:基站使用基于SSB的小区级宽波束扫描,终端使用不同的宽波束接收并通过PRACH接入。

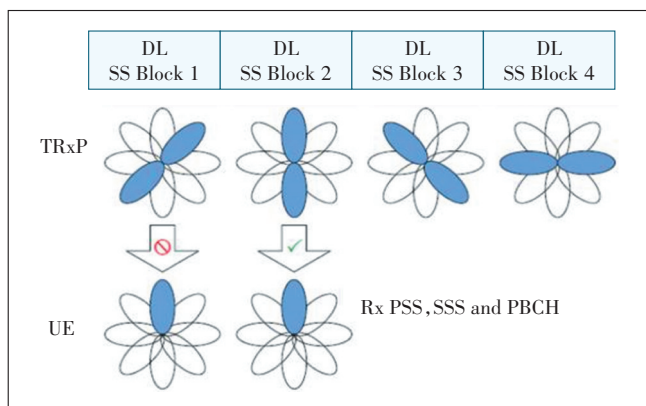


图5 波束扫描过程

b) P2 阶段——基站精准扫描:基站使用CSI-RS窄波束进行扫描用以对TX进行细化,终端使用最优宽波束接收。

c) P3 阶段——终端精准扫描:基站使用从P2过程中UE选出最佳CSI-RS波束传输给UE,终端使用多个窄波束接收,UE更新其最佳RX波束。

在波束扫描过程中,为了尽快匹配和搜索最佳收发波束对,常用的搜索算法有以下几种:穷举搜索、多级分层扫描^[13]、基于预编码的扫描^[14]。穷举搜索直接对所有可能波束对的接收SNR、RSRP或者是频谱效率等进行测量,选择最优波束对的优点是简单易行,缺点是开销大,搜索时间长。在穷举搜索的基础上可通过用户分组,多级分层减小开销:先进行粗波束选择,将选择的波束序列号反馈到接收机;之后扫描并选择低分辨率覆盖区域范围内所对应的高分辨率的波束对(细波束选择),训练开销大大减少。基于预编码的搜索需要基站将预编码之后的波束参考信号广播给所有用户,每个用户根据不同的扫描波束预编码估计传输信道,然后基于预定义的传输波束码本检测最佳波束对。该机制利用了物理信道的稀疏性,可以采用一些先进的算法来减小开销简化流程,如压缩感知。

目前较为成熟的毫米波波束搜索有基于码本的802.15.3c和802.11.ad波束搜索技术^[15]。相比于简单穷举搜索而言,这2种方案均在一定程度上有效降低搜索复杂度。802.15.3波束赋形和搜索过程分为3个阶段:准全向级别、扇区级、波束级别。3个阶段对应不同的波束赋形区域,定向增益依次增大,覆盖范围依次减小,通过这种从宽到窄的波束搜索方式,寻找到最佳波束,如图6所示,(b)、(c)、(d)图分别表示了波束赋范围逐渐变窄的过程。

802.11.ad波束搜索过程分为2个阶段:扇区级搜索阶段、波束优化协议阶段。与802.15.3c波束赋形的方法类似,这2个阶段的波束赋形的范围也是依次减小,任何阶段的波束赋形都必须在前一阶段波束成形完成后才能进行,但是与802.15.3c波束赋形方法不同的是,802.11ad波束赋形方法寻找最佳波束的时候采用的是定向发送、全向接收的方式。而802.15.3c波束赋形方法寻找最佳波束的时候采用的定向发送、定向接收的方式。

3.2 波束测量

空闲态初始接入过程中,下行主要依靠SSB(见图7),通过测量SSB的RSRP,选择质量最好的SSB。SSB

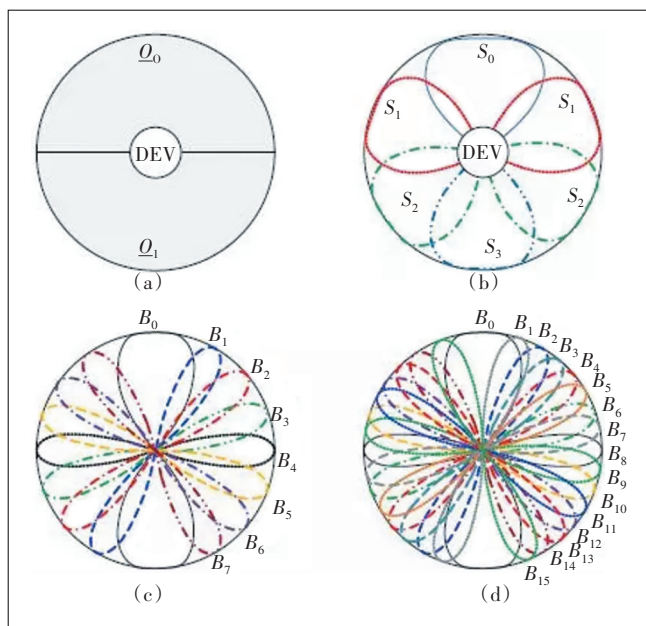


图6 常用2种波束搜索过程

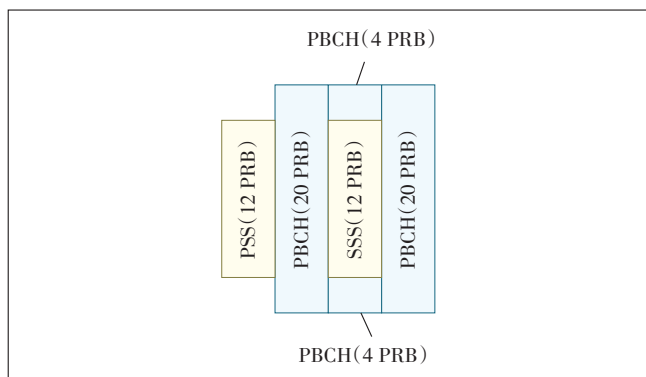


图7 SSB构成

由 PSS, SSS 和 PBCH 组成, 占 4 符号 $\times$ 20 PRB; 一个 SSB 对应一个波束。用于波束扫描的一组 SSB 的集合叫做 SS burst set; 集合中 SSB 最大数量与频段有关, 在毫米波频段上, 毫米波频段上最多布置 64 个 SSB。

空闲态初始接入过程中, 上行主要依靠 PRACH, PRACH 和 SSB 资源之间存在映射关系。UE 在初始接入时首先会选择与最佳 SSB 关联的 PRACH 资源发送 MSG1。基站根据收到的 UE 上行 PRACH 的资源位置确定 UE 所选择的 SSB 波束, 并在此 SSB 波束上发送下行 RAR 和后续信令, 至此, UE 和基站完成了初始接入过程中基于 SSB 波束的初步训练过程。

在连接态下为了跟踪信道的变化和选择更精细的波束进行传输, 需要通过波束测量不断评估发送侧和接收侧的波束方向。下行方向基站配置一组或多组用于波束管理 CSI-RS 进行波束扫描, UE 通过对

CSI-RS 的测量得到 L1-RSRP 结果, 上报不同 CSI-RS 的测量结果。基站选择 L1-RSRP 最强的 CSI-RS 波束进行下行信道发送。CSI-RS 参数配置中包含 repetition 字段, 当设置为 off 时, 同方向波束不会连续重复发送, UE 可以保持接收波束不变, 进行波束测量; 当设置为 on 时, 同方向波束会连续重复发送, UE 可以扫描接收波束, 进行波束测量。

连接态的上行方向基站可配置用于波束管理的 SRS 进行波束测量, 用于波束管理的 SRS 多个资源集对应 UE 的 TX Panel, 资源集中的每个 SRS 资源对应一个波束。SRS 资源配置中的 spatialRelationInfo 参数可用于上行波束训练, 当资源集中的 SRS 资源的 spatialRelationInfo 配置为不同发送波束时, UE 进行发送波束扫描, 基站可以保持接收波束不变, 进行上行波束测量; spatialRelationInfo 配置为相同发送波束时, UE 发送波束不变, 基站可以进行接收波束扫描, 进行上行波束训练。

3.3 波束失败和恢复

如果当前由于遮挡导致用户控制信道的接收质量低于一定门限, UE 侧发起波束失败恢复流程。波束失败检测主要基于基站侧配置的 SSB 或 CSI-RS 参考信号。UE 在失败检测定时器时长内, 检测到失败的个数大于或等于失败的最大个数参数, 则触发波束失败恢复流程, TRP 通过收端波束扫描接收到上行恢复请求信号, UE 会根据波束恢复的参数配置重新选择新的 SSB 对应波束, 并在用于波束恢复的 PRACH 资源上发起随机接入过程, 与基站重新建立新波束对, 恢复传输(见图 8)。

4 现有毫米波设备波束性能

4.1 毫米波设备发展情况

目前, 毫米波产业链尚不成熟, 现有毫米波设备形态单一、功能和性能尚不满足组网需求, 尤其是射频相关的功能和性能较 5G 低频段设备有较大差距。毫米波设备主要受限于高频器件, 相关的高频核心器件主要包括功率放大器、低噪声放大器、锁相环电路、滤波器、高速高精度数模及模数转换器、阵列天线等。这些器件也都与波束赋形的实现紧密相关, 例如数模及模数转换器件需要满足至少 1 GHz 的信道带宽的采样需求, 并进一步提高精度和降低功耗, 新型的高频阵列天线需要满足高增益波束和大范围空间扫描等方面需求。

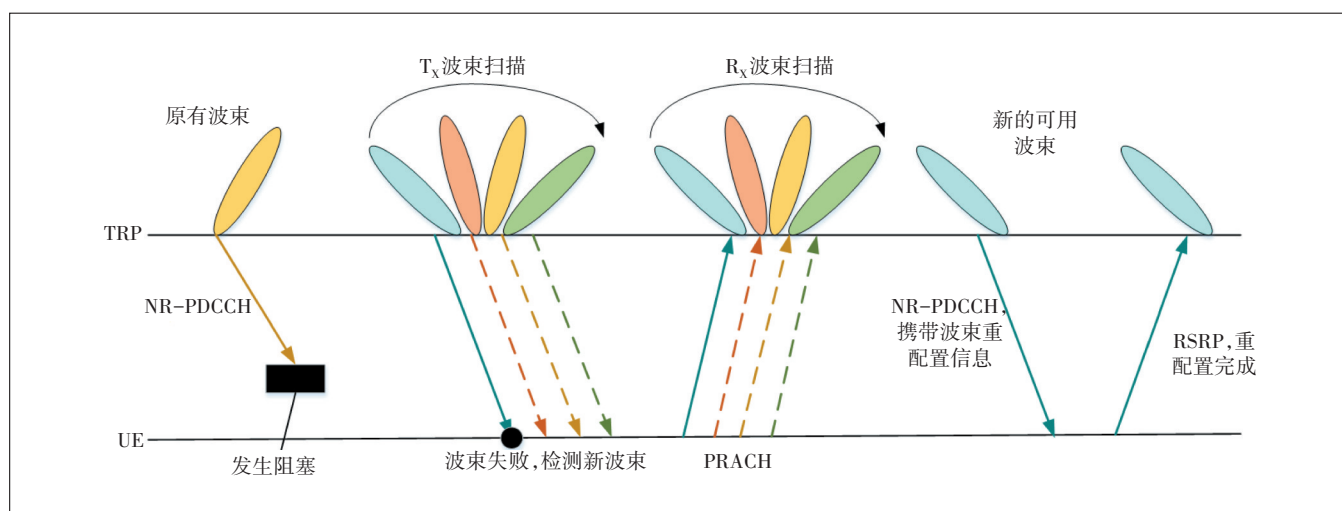


图8 波束失败和恢复流程

由于目前北美和日韩走在毫米波研究部署的前沿,已经逐步开始部署毫米波系统,所以目前厂家设备主要支持北美和日韩的 28 和 39 GHz 频段。设备满足基本功能,例如,可以支持 200、400 MHz 单载波能力,多载波聚合可以最大实现 800 MHz 带宽,支持 64QAM 和 256QAM 调制方式,系统峰值传输速率达到 10 Gbit/s 以上。在波束管理、波束移动性等功能方面,目前主流设备厂家采用模拟波束赋形或者混合波束赋形,基于 SSB 的初始接入过程,支持业务信道的波束管理和波束切换扫描,但对于小区间或者系统间的移动性支持还未满足。

4.2 毫米波设备波束测试

如何测试验证毫米波设备波束能力,包括不同厂家的波束配置、波束赋形的准确度、波束移动切换情况、遇到遮挡波束能否快速恢复等问题也是目前产业界面临的难题。Sub-6 GHz 设备通常使用传导测试或者射频线缆相连的方式进行测量,而毫米波设备 RRU 和 AAU 集成在一起,且毫米波波束赋形在模拟域实现,难以采用传统的连线测试,只能采用 OTA 的测试方法。信通院研发了波束跟踪端到端测试系统,整个系统部署在暗室中,基站侧装置一个高精度三轴转台,通过固定终端,旋转基站,可以验证终端对基站侧的波束追踪能力。但目前 OTA 的测试方法和测试技术尚未成熟,暗室建设成本高昂,该系统尚未投入使用,业界难以开展有效验证。

目前对毫米波设备波束的测试只能间接进行,通过测试小区的峰值速率、覆盖范围、接入时间、切换时间等移动性指标来测试波束性能,测试参数配置如表

1 所示。

表1 测量参数配置表

NR 频段/ GHz	26
网络架构	单站单小区
小区带宽/ MHz	400
帧结构	DDDS
SSB 波束个数	8
业务信道波束个数	48
测试场景	控制信道接入、数据信道波束切换、波束失败和恢复

4.2.1 SSB 接入测试

初始接入过程广播信道配置有 8 个 SSB 波束,编号 0~7。在小区覆盖范围内,终端沿着天面法线的切线方向移动,随机寻找 5 个不同测试点位,终端在每个点进行小区接入测试,监控到的每个点的广播波束信息和信号强度信息如表 2 所示。

从测试结果可以看出,终端在不同的测试点均可以正常接入不同的 SSB,对应不同的 SSB ID。改变终端的移动速度,测试不同移动速度场景下广播波束实时的测量和切换过程,发现随着终端的移动,控制信道波束始终可以在 0~7 的范围内依次切换,与 SSB 的

表2 不同接入点的同步信道波束测量和选择情况

测试点	SSB 波束 ID	SSB RSRP/dBm	SSB SINR/dB
测试点 1	0	-97	9
测试点 2	3	-88	19
测试点 3	5	-85	22
测试点 4	7	-77	25
测试点 5	1	-93	11

ID 相对应,与实际场景天线的波束所覆盖角度方向一致。在不同速度下的移动过程,SSB 的 SINR 和 RSRP 的测量值都较为稳定,说明终端始终可以平稳完成波束切换。

4.2.2 数据信道波束切换测试

下行 PDSCH 业务信道共有 48 个窄波束,水平方向依次分布 12 个波束,对应垂直方向上下分布 4 个波束。在小区覆盖范围内,选择随机接入点进行接入,终端发起正常的业务且业务稳定后,令终端以一定速度沿着天面法线的切线方向移动,测试业务信道的波束切换情况,可以看到移动过程中,数据信道波束均可以正常切换,且终端的业务过程维持正常,没有发生业务中断现象。在移动过程中随机选择 5 个测量点,监控到的每个点的业务波束信息和信号强度信息如表 3 所示。

表 3 不同接入点的业务信道波束测量和选择情况

测试点	窄波束 ID	CSI-RS RSRP/dBm	PDSCH SINR/dB
测试点 1	42	-96	10
测试点 2	34	-99	14
测试点 3	25	-93	13
测试点 4	18	-89	20
测试点 5	6	-94	12

4.2.3 波束失败检测与恢复

测试过程中,在终端和基站的直射路径上设置大型障碍物,终端移动到障碍物时,信号覆盖变差,下行速率出现断流;UE 下行吞吐量为 0 时即判断为终端数据断流,此时处于波束失败状态,基站和 UE 的窄波束都保持断流之前的编号。当终端重新移动回到正常覆盖区之后,UE 和基站重新进行波束选择和切换,终端的下行业务速率能够快速恢复,波束恢复流程通过 MAC 信令完成(MAC-CE),波束恢复时延在毫秒级别。

5 总结

本文介绍了毫米波系统中的多波束方案,首先介绍了毫米波的系统特征、毫米波的优势和劣势以及使用波束赋形的必要性。在此基础上,介绍了毫米波系统中特有的混合波束赋形方案和实现方式。紧接着介绍了如何对多波束系统进行管理,包括波束测试、扫描、上报以及波束失败和恢复的过程。最后理论结合实际,给出了波束性能的仿真测试结果,提出了加速设备和终端成熟、加快整合产业力量的产业发展建

议。

参考文献:

- [1] 何世文,黄永明,王海明,等. 毫米波无线通信发展趋势及技术挑战[J]. 电信科学,2017(06):11-19.
- [2] HOSSAIN E, HASAN M. 5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges [J]. IEEE Instrument Measurement Magazine, 2015, 18(3): 11-21.
- [3] 洪伟. 关于毫米波与太赫兹通信的思考[J]. 中兴通信技术, 2018, 24(3): 39-42.
- [4] 张然. 5G 移动通信网络关键技术研究[J]. 信息与电脑:网络与通信技术, 2018(3): 168-169.
- [5] RANGAN S T, RAPPAPORT S, ERKIP E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 366-385.
- [6] 朱宇,李先驰. 宽带毫米波数模混合波束赋形[J]. 中兴通信技术, 2017(6): 14-19.
- [7] LI X, ZHU Y, XIA P. Enhanced Analog Beamforming for Single Carrier Millimeter Wave MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017(99).
- [8] XIAO X, XIA X, JIN D. Iterative Eigenvalue Decomposition and Multipath-Grouping Tx / Rx Joint Beamformings for Millimeter-Wave Communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1595-1607.
- [9] WINTERS J H. Smart antennas for wireless systems [J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(1): 23-27.
- [10] KUTTY S, SEN D. Beamforming for millimeter wave communications: An inclusive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 949-973.
- [11] 朱宇,李先驰. 宽带毫米波数模混合波束赋形[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(3): 14-19.
- [12] 邹卫霞,杜光龙,李斌,等. 60 GHz 毫米波通信中一种新的波束搜索算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 683-688.
- [13] 刘凌. 毫米波通信中一种优化的波束搜索算法研究[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(4): 33-36.
- [14] ZOU W X, GUO C, DU G L, et al. A New Codebook Design Scheme for Fast Beam Searching in Millimeter-Wave Communications [J]. 中国通信(英文版), 2014, 11(6): 12-22.
- [15] 丁昌峰. 毫米波通信中波束管理方案研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.

作者简介:

延凯悦,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、MEC、5G 通信等;张忠皓,教授级高级工程师,博士,北京邮电大学兼职教授,主要从事移动网无线新技术相关课题研究、标准制定、设备验证和新业务研究工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,国家知识产权局中国专利审查技术专家,主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作;高帅,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、MEC、5G 通信等。