

基于位置信息辅助的网格化波束切换方法

邵霞, 翟亚坤, 罗文字, 许丽

(华北水利水电大学电子工程学院, 郑州 450045)

摘要: 随着通信技术的发展, 越来越高的通信频段得以采纳。然而电磁波衍射能力随频率的增加而降低, 新一代通信系统变得更加依赖视距传播。在复杂移动场景下频繁切换波束, 增加了过多的系统开销和延迟。针对该问题, 提出一种基于位置信息辅助的网格化波束切换方法, 利用可视路径中存在时最佳波束对保持不变的特点, 划分网格波束一一对应关系及覆盖分布结构, 建立位置-波束映射表, 基于用户位置信息和运动状态计算下一时刻切换点。仿真和分析结果表明, 所提方法相比非网格切换方式系统频谱效率显著提高, 且所提正六边形网格切换性能优于方格, 波束切换概率降低了50%, 保障了通信质量, 验证了基于位置信息辅助的网格化波束切换方法的合理性。

关键词: 毫米波通信; 视线传播; 网格; 波束切换

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Grid-Based Beam Searching Assisted by Location Information

SHAO Xia, ZHAI Yakun, LUO Wenyu, XU Li

(School of Electronic Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: With the development of communication technology, increasingly higher communication frequency bands are adopted. However, the electromagnetic wave diffraction capability decreases with increasing frequency. New generation communication systems become more dependent on line-of-sight propagation. Frequent beam switching is required in complex mobile scenarios, which increases excessive system overhead and delay. To address this problem, a position information-assisted grid-based beam switching method is proposed. The feature that the optimal beam pair remains constant in the presence of line of sight (LOS) path is utilized. The grid beam one-to-one correspondence and coverage distribution structure are divided. A position-beam mapping table is established. All the next switching points and switching information are predicted based on position information and motion speed. The simulation and analysis results show that the proposed method significantly improves the spectral efficiency of the system compared with the non-grid switching method, and the proposed square hexagonal grid switching performance is better than the square grid, and the beam switching probability is reduced by 50%. It guarantees the communication quality and verifies the rationality of the grid-based beam switching method assisted by the position information.

Key words: millimeter wave communication; line-of-sight propagation; grid; beam switching

引言

在大规模多输入多输出(massive Multi-input multi-output, m-MIMO)系统中,波束成形方法可显著提高系统容量,减少干扰^[1-3],但同时也存在波束失准和波束切换而导致频繁的服务中断情况,严重影响了通信质量。在移动通信场景下,完成通信过程往往需要更加频繁地重新搜索波束,也导致增大波束切换失败的概率,同时波束切换也是通信系统开销的一个来源,骤增的波束搜索开销使得通信系统有效性降低。因此,如何提升移动场景下的波束切换性能是当前无线通信研究工作的热点之一。

近年来,对于毫米波通信系统波束切换方案的研究非常多。目前波束切换的研究主要分为基于非码本的波束切换与基于码本的波束切换两个方面。非码本的波束切换是利用信道状态信息来确定最优波束^[4-5]。利用用户设备(User equipment, UE)的坐标、运动状态和信道增益等来预测下一时刻的波束^[6]。基于码本的波束切换是利用一组组码字来实现,将整个空间波束方向量化,每组码字代表一个方向,发射端和接收端通过在码本中查找其通信的最佳波束的码字。文献[7]则提出一种基于传感器辅助多级码本的波束宽度自适应和波束切换,可以覆盖更多的波束宽度和指令增益。文献[8]提出使用扩展卡尔曼滤波器来使配备有数字波束形成器的静态基站(Base station, BS)能够在初始信道获取之后有效地跟踪配备有模拟波束形成器的移动UE,这将使波束保持更长时间的连接,减少波束切换次数。然而现有的研究工作当中关于准确高效的波束切换方案尚未提出明确标准,存在较大的应用瓶颈,尤其是在信道参数频繁改变的城市区域和高度移动场景当中^[9]。相比目前广泛采用的总速率标准来优化网络性能,通过管理波束的方法可有效优化其覆盖范围,并更好地支持移动用户的普适性^[10]。文献[11]提出了波束管理中相干时间的概念,相比以信道相干时间作为切换点,在移动场景下,这将减少额外的波束训练开销。

机器学习(Machine learning, ML)由于具有很强的拟合能力,被认为是解决毫米波波束切换问题的一种很有前途的方法。诸如UE位置^[12-14]、低于6 GHz的带外信息^[15-16]等上下文信息可用于预测最佳波束。通过捕捉移动UE经历的毫米波信道的时间相关性,神经网络可以较好地提前预测备选波束,缩短波束切换所需的时间^[17-20]。但是这也将进一步提高系统的复杂度。将位置信息与波束赋形辅助成为新的想法。文献[21]提出在高度动态的环境中,使用UE的车载传感器侧信息可以用来辅助波束切换。文献[22]则研究基于波束切换的毫米波车辆对基础设施(Vehjcle to infrastructure, V2I)系统中使数据速率最大化的波束设计,其中采用基于位置预测的波束切换,以最大限度地提高非重叠波束的数据速率。有很多方法可以获得UE位置,如GPS和基于传感器的无线定位系统^[23]。但采用这些方法,当初始接入时,位置信息就不能被获取和使用。即使初始接入完成,位置信息的测量和报告也会占用开销,而广泛使用多样的图像采集装置可轻松获知目标图像信息。文献[24]提出一种基于图像感知技术的智能天线阵列,能够自动切换波束跟踪用户,并利用深度神经网络从图像中寻找用户的位置信息。

到目前为止,现有工作中所提方案都是以信号的接收功率作为波束对准的准则,使得UE始终处于最强的信号接收功率下,但往往会导致切换开销急剧增加。从另外一个角度,若此刻的波束能够满足UE的通信需求,就可以继续使用其建立通信,不必要切换到接收功率最强的波束对。基于此,本文提出一种基于位置信息辅助的网格化波束切换方法,考虑通过几何网格划分的形式将UE的位置分区化,并将波束对准用户的结构转变为波束对准网格的结构。即用户在一个网格的范围内移动,波束不发生切换,超出网格边界则发生切换。在系统部署阶段测量最佳波束对,建立“位置-波束”映射表,在实际通信阶段,基于UE位置信息和运动信息计算下一切换时间。这样只要UE始终在所服务的网格范围内,始终可以使用网格所对应的波束对,本文所提方案的优势在于保证通信质量的前提下尽可能地减少必需的波束切换次数以降低切换概率,同时提高系统的频谱效率,降低现有无线通信网络中波束对准和切换的设计复杂度。

1 系统模型

通信系统考虑在室内环境中^[25],室内场景只是本文对应用场景的一个示例,对室外视距(Line of sight, LOS)小区同样适用。部署小型蜂窝毫米波BS,如图1所示。

BS配备具有 M 个元素的均匀面阵列(Uniform planar array, UPA)和一个标准分辨率的RGB摄像头^[26]。出于实用性考虑,假设BS采用具有单个射频链和 M 个移相器的模拟赋形架构。对于模拟波束赋形系统,假定系统中有一个BS和一些通信目标UE。BS配备 N 个收发器,信号由收发器通过天线传输,每个UE配备单天线。因此,单用户下行接收信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}^H \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: \mathbf{s} 为一个 $N \times 1$ 维的向量,是发射信号; \mathbf{W} 为发射端波束控制码本,其中 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_p]$; \mathbf{V} 为接收端合并波束控制码本,其中 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_p]$,它们遵循天线阵列的选择; \mathbf{n} 为噪声矢量; \mathbf{H} 为下行链路信道矩阵,其复数值是对传输信号的振幅和相位的响应。

模拟波束成形系统可以同时为 N 个UE服务,在存在多径传播的情况下,可以为UE构建以下通道矩阵

$$\mathbf{h}_i = \sqrt{\frac{N_{\text{BS}} N_{\text{UE}}}{P_L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{A}_{\text{UE}}(\phi_l^{\text{UE}}, \theta_l^{\text{UE}}) \mathbf{A}_{\text{BS}}^H(\phi_l^{\text{BS}}, \theta_l^{\text{BS}}) \quad (2)$$

同时得到

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_N^T]$$

式中: N_{BS} 和 N_{UE} 分别为基站和用户侧天线数量; L 为多路径的数量; α_l 为与第 l 条路径相关的复数增益,所有径的复系数独立同分布,且服从均值为0、方差为 σ_a^2 的复高斯分布; $\phi_l^{\text{BS}}, \theta_l^{\text{BS}}, \phi_l^{\text{UE}}, \theta_l^{\text{UE}}$ 分别为从基站发射端至用户侧的方位角和仰角以及从接收用户至基站端的方位角和仰角,取值范围为 $\phi_l \in [0, 2\pi]$ 和 $\theta_l \in [0, 2\pi]$;向量 \mathbf{A} 表示基站和用户端波束成形矢量; P_L 表示BS和UE之间的路径损耗。室内、视距条件下的路径损耗公式^[27]为

$$P_L = 32.4 + 17.3 \lg d + 20 \lg f \quad (3)$$

式中: d 为传播距离; f 为载波频率。

由于信道矩阵是根据方位角、俯仰角计算而来,在视距传播时,获取UE相对于BS的位置信息和角度信息,此位置信息可直接用于波束赋形,以更低的开销来找到最佳的波束赋形矢量 \mathbf{w}_i ,即降低波束赋形的训练开销。

设BS坐标 $T_x(x_0, y_0, z_0)$,UE坐标 $R_x(x_i, y_i, z_i)$,则

$$\phi = \arctan \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \quad (4)$$

$$\theta = \arccos \frac{z_0 - z_i}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \quad (5)$$

$\mathbf{A}_{\text{BS}}^H(\phi_l^{\text{BS}}, \theta_l^{\text{BS}})$ 和 $\mathbf{A}_{\text{UE}}(\phi_l^{\text{UE}}, \theta_l^{\text{UE}})$ 为与第 l 条路径相关的BS和UE的阵列响应。对于一个 yoz 平面上的UPA,其中, y 轴上有 F 列天线阵元, z 轴上有 H 列天线阵元,则UPA的天线响应为

$$\mathbf{A}_{\text{UE}}(\phi_l^{\text{UE}}, \theta_l^{\text{UE}}) = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{MS}}}} \left[1, \dots, e^{jkD(m \sin(\phi_l^{\text{UE}}) \sin(\theta_l^{\text{UE}}) + n \cos(\theta_l^{\text{UE}}))}, \dots, e^{jkD((W-1) \sin(\phi_l^{\text{UE}}) \sin(\theta_l^{\text{UE}}) + (H-1) \cos(\theta_l^{\text{UE}}))} \right]^T \quad (6)$$

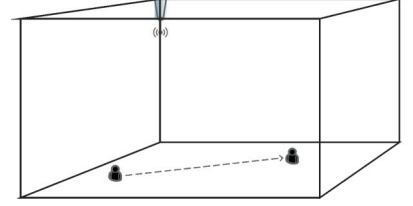


图1 室内毫米波通信环境

Fig.1 Indoor mmWave communication environment

式中: $k = 2\pi/\lambda$, λ 为信号波长; D 为天线间隔; $1 \leq m \leq F$ 且 $1 \leq n \leq H$; 天线阵的大小为 $N = FH$ 。 $A_{BS}(\phi_i^{BS}, \theta_i^{BS})$ 可以用同样方法得到。在基于 LOS 的信道模型中, 通常认为信号主要通过 LOS 路径传播。所以在本文中, L 被设定为 1。

采用 DFT 码本^[28], 码本的第 n 行第 m 列元素表达式为

$$W(n, m) = \exp\left(j \frac{2\pi mn}{M}\right) \quad m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

式中: N 为天线阵元数目; M 为波束方向数目。由于 BS 通过一定的模拟波束成形权重向量 w_i 向 UE 发射信号, w_i 和信道状态 h_i 都与 UE 与 BS 的相对角度有关, 如果能找到 UE 的位置或角度信息, 该信息可直接用于确定最佳码字, 可以省略部分搜索步骤, 提高频谱效率。

本文所提场景为双目相机辅助下的无线移动用户服务案例, 双目相机可用于获取用户位置信息, 使得基站端能够准确有效地对移动用户进行波束对齐。双目相机的具体工作方式为先获取用户的位置坐标 $P(x, y, z)$, 而后通过双目相机分别获取的投影点坐标 $p_1(X_1, Y_1)$ 和 $p_2(X_2, Y_2)$ 对实际用户位置进行计算, 得到空间点 P 的估计位置 $P'(x', y', z')$, 即

$$\begin{cases} x' = \frac{B \cot(\omega_1 + \alpha_1)}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \\ y' = \frac{z' \tan \phi_1}{\sin(\omega_1 + \alpha_1)} \frac{z' \tan \phi_2}{\sin(\omega_2 + \alpha_2)} \\ z' = \frac{B}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\omega_1 = \arctan \frac{X_1}{f_1}$, $\omega_2 = \arctan \frac{-X_2}{f_2}$, $\tan \phi_1 = \frac{Y \cos \omega_1}{f_1}$, $\tan \phi_2 = \frac{Y \cos \omega_2}{f_2}$; B 为双目相机两个摄像头的间距; α_1, α_2 为相机光轴与水平轴的夹角; f_1, f_2 分别为两个摄像头的焦距。

本文所提方案中双目相机设置 $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$, 因此式(7)可改写为

$$\begin{cases} x' = \frac{X_1 z'}{f} \frac{X_1 B}{X_1 - X_2} \frac{X_2 B}{X_1 - X_2} \\ y' = \frac{Y_1 z'}{f} \frac{Y_1 B}{X_1 - X_2} \frac{Y_2 B}{X_1 - X_2} \\ z' = \frac{Bf}{X_1 - X_2} \end{cases} \quad (9)$$

分别获取用户在 t_2 和 t_1 时刻的真实位置 $P_2'(x', y', z')$ 和 $P_1'(x', y', z')$, 那么 $|P_2 - P_1|$ 代表用户在 t_2 和 t_1 时刻移动的距离, 计算出移动距离后, 可以根据帧率得出时间差, 根据移动距离和时间差计算出用户的速度, 计算如下

$$V_u = \frac{|P_2 - P_1|}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

2 本文方法

2.1 切换算法设计目标

波束切换的目标是选择最佳发送波束和接收波束组合, 使得通信链路频谱效率最高。对于上述毫米波系统结构下的接收信号 y , 本文考虑以最大化频谱效率为准则, 具体来说, 单用户频谱效率可以表示为

$$R = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{H} \mathbf{v}|^2}{p_n} \right) \quad (11)$$

式中:发送功率归一化为1; p_n 表示噪声功率; $|\mathbf{w}^H \mathbf{H} \mathbf{v}|^2$ 表示接收信号功率。可以看出噪声功率一定时,接收信号功率越大,频谱效率越高。因此波束切换的目标可以看作最大化接收信号功率。通常将全空间方向量化成有限数量的波束码本,波束切换问题变成在码本中搜索波束,即波束搜索问题,而基站端至用户处的下行链路反馈波束信息时也只需要反馈波束在码本中的序号。基于码本的波束切换问题可以看作

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}^{\text{opt}}, \mathbf{v}^{\text{opt}}) &= \arg \max |\mathbf{w}^H \mathbf{H} \mathbf{v}| \\ \text{s.t. } \mathbf{w} &\in \mathbf{W}, \mathbf{v} \in \mathbf{V} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: \mathbf{W} 为发端波束成形向量的码本; \mathbf{V} 为接收端波束合并向量的码本。优化目标为选择波束码本以最大化接收信号功率。

考虑到毫米波系统的信号波束较窄,UE的轻微移动或许会造成切换,这会导致系统容量降低,因此需要尽量减小切换开销和切换次数。由于UE移动位置可以实时通过相机获取,利用UE位置坐标和网格分布的几何关系可以判断出UE是否还在上一时刻的通信网格范围内。因此,若当前时刻UE与服务网格中心点的距离为 d ,所服务网格中心点到边界各点的最大距离为 r ,可见,只要 $d > r$,UE就一定在网格外,必定发生切换,当 $d < r$ 时,有可能发生切换,因此切换概率为

$$P_{\text{switch}}(d, r) = \begin{cases} \frac{d}{r} & d < r \\ 1 & d > r \end{cases} \quad (13)$$

由于每次波束切换占用系统开销是固定的,因此切换开销和切换概率是正比关系 $m(d, r) \propto P_{\text{switch}}(d, r)$ 。因此降低切换概率将减少切换开销。

基于此,本文提出一种针对于无线移动通信场景下的网格化波束覆盖分布结构,其采用类似于蜂窝通信网的划分结构^[29-30],与传统的覆盖结构相比,本文所提网格化波束覆盖分布结构扩大了波束覆盖范围,最大限度地减少波束切换,并基于所提覆盖结构设计一种基于位置信息的高效波束切换方法。

2.2 网格化波束切换

考虑通信场景为一个室内单用户场景,BS具有一个高度为 h 的天线阵列,它覆盖一个方位角从 $\varphi_1 \sim \varphi_2$ 的LOS区域。地面划分若干个网格,分为:(1)正方形的方格,(2)正六边形。UE在这些网格的范围内移动。毫米波BS位于室内天花板,假设捕获视频以帮助BS执行基于位置的波束形成的双目相机与BS天线阵列位于同一位置,相机面向整个通信范围,基于双目相机实时获取UE当前位置坐标。

当UE从一个网格运动到另一个网格时,之前的波束发生失准,为保证通信需要切换到新的波束。如果在失准后再进行波束搜索、波束切换步骤,在完成切换后的波束可能仍不能保证新位置的通信需求,且会造成延迟。因此波束信息需要在UE到达之前就已经确定,基于此建立“位置-波束”映射表,UE一旦到达,收发双方就可以直接切换至相应的波束。考虑的网格通信如图2所示。

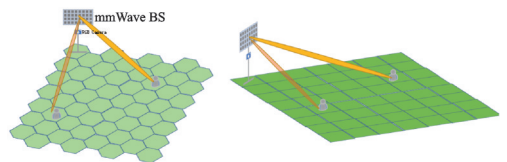


图2 网格波束切换
Fig.2 Grid beam switching

2.3 切换方法

在系统部署阶段,BS遍历所有网格中心点位置,在每个网格中心点与BS进行波束训练,基于最大接收功率准则确定该网格中心点位置与BS通信可用的最佳收发波束对。

在实际通信阶段,UE在移动的过程中,BS通过双目相机实时获取UE当前位置,基于该位置信息动态调整收发波束对。当UE移动位置超出所处网格的边界时,BS和UE的当前通信链路不再对准,BS和UE可以直接切换至新网格范围内的收发波束对通信。因此,基于位置信息辅助的网格化波束切换方法的系统部署阶段算法可以总结如下。

系统部署阶段算法

输入:基站的坐标 $T_x(x_0, y_0, z_0)$ 和每个网格中心点的位置坐标 $R_x(x_i, y_i, z_i)$

输出:位置-波束映射表 $(p, \mathbf{w}_p, \mathbf{v}_p)$

- (1) 初始化基站端和所有网格中心点坐标信息
- (2) for $p=1$ to P do
- (3) 由相机得到第 p 个网格中心点的坐标信息 $R_x(x_i, y_i, z_i)$
- (4) 结合基站的坐标信息 $T_x(x_0, y_0, z_0)$,通过式(3,4)计算得到 (ψ, θ)
- (5) 通过 (ψ, θ) 计算得到 $A_{BS}(\phi_p^{BS}, \theta_p^{BS})$,并能得到BS侧模拟波束成形权重向量 \mathbf{w}_p
- (6) end for
- (7) 计算得到 $\mathbf{W}=[\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_p]$
- (8) 所有网格得到基站相对于网格中心点的位置坐标 $T_x(x_0, y_0, z_0)$
- (9) for $p=1$ to P do
- (10) 第 p 个网格得到 $\phi_p^{UE}=\pi/2-\phi_p^{BS}, \theta_p^{UE}=\pi/2-\theta_p^{BS}$
- (11) 通过 ϕ_p^{UE} 和 θ_p^{UE} 得到 $A_{UE}(\phi_p^{UE}, \theta_p^{UE})$,并能得到网格端模拟波束成形权重向量 \mathbf{v}_p
- (12) end for
- (13) 计算得到 $\mathbf{V}=[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_p]$
- (14) 构建位置-波束映射表 $(p, \mathbf{w}_p, \mathbf{v}_p)$

在初始连接阶段,BS通过双目相机获取UE位置信息,BS根据UE位置,判断UE所处的网格标号,查询位置-波束映射表,并下发给UE最佳波束,BS,UE双方使用最佳波束对建立通信链路。当UE所处网格位置发生变化,BS根据UE当前移动方向和速度计算波束切换时间。BS和UE分别在最佳切换时间执行相应的波束切换。若将此时正在通信的网格称作服务网格,下一时刻拟切换的网格称作目标网格。随着UE位置的不断变化,UE在服务网格内的接收信号功率不断下降,而与目标网格的接收功率变得增强,此时,BS与UE的通信链路就由原服务网格切换到目标网格,目标网格便成为新的服务网格。因此实际通信阶段的切换算法可以总结如下。

系统实际通信阶段算法

输入:当前UE坐标 (x, y)

输出:所处网格的最佳波束对

- (1) 计算当前UE坐标 (x, y) 和目标网格中心点坐标 (x_s, y_s) 之间距离值为 L_s
- (2) UE和服务网格中心点坐标 (x_p, y_p) 距离值为 L_p
- (3) if $L_s \leq L_p$
- (4) 则UE处于新的网格覆盖范围,执行波束切换流程
- (5) else

(6) 则仍继续使用当前组波束建立通信

(7) end if

3 仿真结果分析

本节通过仿真单用户 UE 在室内的运动场景,评估在不同网格划分下,基于位置信息辅助的网格化波束切换方法的性能,仿真环境如图 2 所示。其中,室内场景设为长 20 m、宽 20 m、高 5 m,地面划分为若干网格,分为正方形的方格和正六边形两种情况,两者采用同等面积的划分,因此共需要划分 49 个方格,或者划分 42 个正六边形网格。UE 的移动路径相同。采用扩展 Saleh-Valenzuela (extend Saleh-Valenzuela, eSV) 信道模型,系统带宽设为 400 MHz,噪声功率谱密度设为 -174 dBm/Hz,参考文献[28],BS 高度为 10 m,发射功率为 20 dBm,配备 UPA 天线,用户采用单天线结构。本文以频谱效率和波束切换概率作为性能评估的依据。

3.1 不同网格下的频谱效率性能分析

为验证所提方案的实际性能和应用价值,本节内容采用不同码本方案,比较两种网格下分别采用 3c 码本和离散傅里叶变换 (Discrete Fourier transform, DFT) 码本的频谱效率差异。仿真分析结果如图 3(a) 所示,可以看出, DFT 码本优于 3c 码本。这是由于 3c 码本仅采用 4 个复数值来构建加权向量矩阵,多数波束都存在较大的增益损失。同时对不同天线数目下的同场景作出进一步仿真分析,仿真结果如图 3(b) 所示,结果表明,针对不同数量的发射天线条件下网格的频谱效率差异,该方法的性能随天线数目的增加而单调增加。

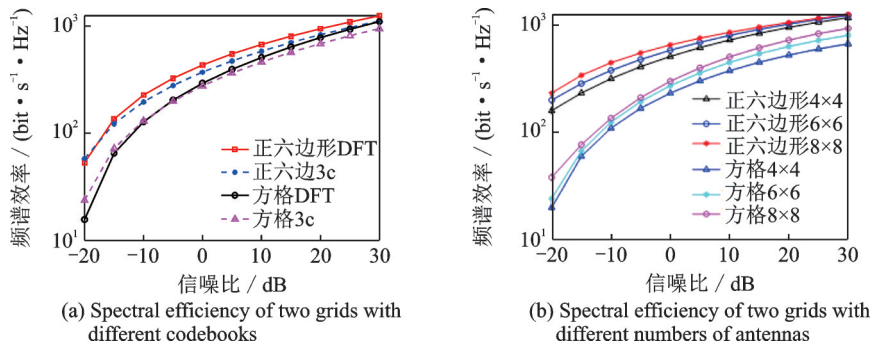


图3 不同信噪比条件下频谱效率分析

Fig.3 Spectral efficiency analysis of two grids with different codebooks

图 3 表明了同等网格数量下不同方法的对比,然而只做相同网格数量对比是不够全面的。本文针对同一场景下,划分不同网格数量条下网格的频谱效率差异,如图 4 所示。通过仿真结果可以看出,该方法的性能随网格数目的增加而上升,但网格数量数量增加同时会增加系统的切换开销,在实际通信中,需要根据不同应用场景折衷选择。

3.2 切换性能对比分析

表 1 比较了 UE 在不同起止位置时,基于方格和正六边形网格划分情形下,波束切换次数比较,可以看出同样路径情况下,正六边形可以减少 50% 的切换次数。

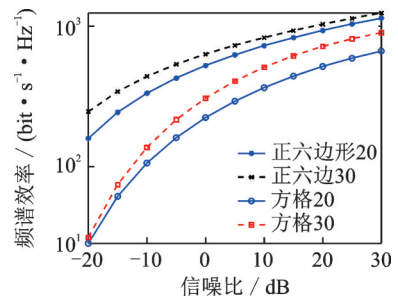


图4 不同网格数目下两种网格方式的频谱效率分析

Fig.4 Spectral efficiency analysis of two grid methods with different grid numbers

接下来对移动场景中,波束切换的性能进行分析,具体包括两方面:网格切换和传统切换的频谱效率分析以及波束切换概率分析。本节在相同信噪比门限值的条件下,将所提出的方案与传统非网格切换进行比较。如图5所示,非网格切换方法频谱效率性能最低。同时可以看出本文提出方案的正六边形网格比方格的频谱效率明显提高。这是因为正六边形结构相比较于方格结构来说,在一定区域内正六边形布局可使波束覆盖面积广且布置的网格数量可最小,能够完整地覆盖某一区域可能的几何形状中,正六边形的张开面积最大(波束圆区覆盖的重叠面积最小),分布在正六边形网格内的波束能够提供更长时间的服务,从而减少切换次数、切换开销,提高整个系统的频谱效率。

如图6所示,横坐标为单个网格中心点到边界的最大距离,从一条曲线上可以看出,单个网格覆盖面积越大,切换概率越低。因为网格覆盖面积越大,波束的覆盖范围越广,UE移动前后时刻处于同一波束范围的概率越大。从图6中两条曲线可以看出,单个网格覆盖面积一定时,正六边形的切换概率要低于方格的,这是因为同等覆盖面积的情况下,正六边形的张开面积最大,可以包含更大的有效波束范围,因此UE落在同一波束覆盖范围内的概率越大,切换概率越低。

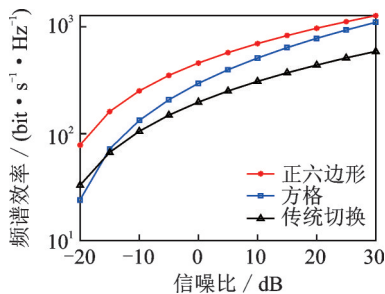


图5 网格切换和传统切换的频谱效率分析

Fig.5 Spectral efficiency analysis of grid switching and traditional switching

表1 波束切换次数和距离的关系
Table 1 Relationship between beam switching times and distance

起止点 距离 D/m	方格	正六边形	相对减少 切换次数
4.7	3	1	2
11.4	6	3	3
20.5	10	6	4

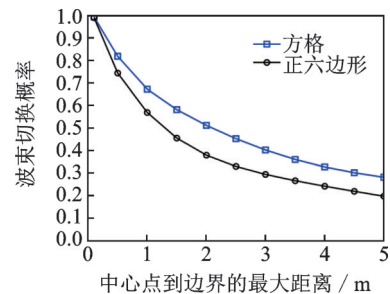


图6 波束切换概率分析

Fig.6 Beam switching probability analysis

4 结束语

为解决毫米波通信移动场景中频繁波束切换带来的额外开销和延迟过大问题,本文提出一种基于位置信息辅助的网格化波束切换方法。该方法利用毫米波通信依赖LOS径传播的特点,在此基础上,划分网格波束覆盖分布结构,在系统部署阶段测量网格覆盖的最佳波束对,从而建立位置-波束映射表。在实际通信阶段,基于位置信息和运动状态计算下一时刻切换点。仿真结果表明,本文基于位置信息辅助的网格化波束切换方法,能够提高移动场景下的传输质量,明显提高系统频谱效率,同时降低切换开销。未来将针对阻塞情景下的波束切换方法做进一步研究。

参考文献:

- [1] BIGLARBEGLIAN B, FAKHARZADEH M, BUSUIOC D, et al. Optimized microstrip antenna arrays for emerging millimeter-wave wireless applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(5): 1742-1747.
- [2] NITSCHKE T, CORDEIRO C, FLORES A B, et al. IEEE 802.11 Ad: Directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-

- per-second Wi-Fi[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(12): 132-141.
- [3] ZHOU Pei, CHENG Kaijun, HAN Xiao, et al. IEEE 802.11 ay-based mmWave WLANs: Design challenges and solutions [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 1654-1681.
- [4] SHEN Zhexian, XU Kui, WANG Yurong, et al. Angle-domain channel tracking for high speed railway communications with massive ULA[C]//*Proceedings of 2018 IEEE the 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Chongqing, China: IEEE, 2018: 159-165.
- [5] XU Kui, SHEN Zhexian, WANG Yurong, et al. Location-aided mMIMO channel tracking and hybrid beamforming for high-speed railway communications: An angle-domain approach[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 14(1): 93-104.
- [6] SHAHAM S, KOKSHOORN M, DING M, et al. Extended kalman filter beam tracking for millimeter wave vehicular communications[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Dublin, Ireland: IEEE, 2020: 1-6.
- [7] YANG Zhicheng, PARTH H P, ZENG Yunze, et al. Sensor-assisted codebook-based beamforming for mobility management in 60 ghz wlans[C]//*Proceedings of the 2015 IEEE 12th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*. Dallas, USA: IEEE, 2015: 333-341.
- [8] JAYAPRAKASAM S, MA X, CHOI J W, et al. Robust beam-tracking for mmWave mobile communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(12): 2654-2657.
- [9] HENG Y, ANDREWS J G, MO J, et al. Six key challenges for beam management in 5.5 G and 6 G systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(7): 74-79.
- [10] JU Honghao, LONG Yan, FANG Xuming, et al. Systematic beam management in mmwave networks: Tradeoff among beam coverage, link budget, and interference control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15325-15334.
- [11] 何兴文. 高动态场景毫米波波束管理技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2021.
HE Xingwen. Research on millimeter wave beam management technology for high dynamic scenes [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [12] VA V, CHOI J, SHIMIZU T, et al. Inverse multipath fingerprinting for millimeter wave V2I beam alignment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 67(5): 4042-4058.
- [13] MASCHIETTI F, GESBERT D, DE KERRET P, et al. Robust location-aided beam alignment in millimeter wave massive MIMO[C]// *Proceedings of the GLOBECOM 2017 IEEE Global Communications Conference*. Singapore: IEEE, 2017: 1-6.
- [14] HENG Y, ANDREWS J G. Machine learning-assisted beam alignment for mmWave systems[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(4): 1142-1155.
- [15] ALI A, GONZÁLEZ-PRELCIC N, HEATH R W. Millimeter wave beam-selection using out-of-band spatial information[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 17(2): 1038-1052.
- [16] ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Deep learning for mmWave beam and blockage prediction using sub-6 GHz channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5504-5518.
- [17] KAYA A Ö, VISWANATHAN H. Deep Learning-based predictive beam management for 5G mmwave systems[C]// *Proceedings of the 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Nanjing, China: IEEE, 2021: 1-7.
- [18] LIM S H, KIM S, SHIM B, et al. deep learning-based beam tracking for millimeter-wave communications under mobility[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(11): 7458-7469.
- [19] ECHIGO H, CAO Y, BOUAZIZI M, et al. A deep learning-based low overhead beam selection in mmWave communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 682-691.
- [20] MA Kema, HE Dongxuan, SUN Hancun, et al. Deep learning assisted calibrated beam training for millimeter-wave communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(10): 6706-6721.
- [21] SEMYOUNG O H, DAEJIN P. Low-power beam-switching technique for power-efficient collaborative IoT edge devices[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1608.
- [22] ZHANG Hao, WU Chunlei, CUI Xuerong, et al. Low complexity codebook-Based beam switching for 60 GHz anti-blockage communication[J]. *JCM*, 2013, 8(7): 428-439.

- [23] LIM C H, WAN Y, NG B P, et al. A real-time indoor WiFi localization system utilizing smart antennas[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(2): 618-622.
- [24] MA Yuchen, TIAN Weihai, WANG Junhong, et al. An image-aware based smart antenna capable of automatic beam switching for indoor mobile communication[J]. *IEEE Access*, 2019, 8: 379-388.
- [25] 林峰, 李建飞, 秦笙. 60 GHz无线通信系统中临近波束搜索算法研究[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(3): 1-4.
LIN Feng, LI Jianfei, QIN Sheng, Research on near beam search algorithm in 60 GHz wireless communication system[J]. *Modern Electronic Technology*, 2020, 43 (3): 1-4.
- [26] Alrabeiah M, Demirhan U, Hredzak A, et al. Vision aided URLL communications: Proactive service identification and coexistence[C]//*Proceedings of the 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. [S.l.]: IEEE, 2020: 174-178.
- [27] 任文静. 面向高频高速的5G多天线波束管理技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2020.
REN Wenjing. Research on 5G multi-antenna beam management technology for high frequency and high speed[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [28] 刘月贞. 大规模MIMO下码本设计与容量优化的研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2017
LIU Yuezheng. Research on codebook design and capacity optimization under large scale MIMO[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017
- [29] 张翼德, 冯钢, 薛飞. 无线通信网中的新型移动性模型[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(3): 333-337, 384.
ZHANG Yide, FENG Gang, XUE Fei. A novel mobility model in wireless communication networks[J]. *Journal of the University of Electronic Science and Technology*, 2009, 38(3): 333-337, 384.
- [30] 王梦冉, 乔少杰, 于珊珊. 蜂窝网中基于位置预测的切换算法[J]. *计算机科学*, 2014, 41(S2): 187-190, 220.
WANG Mengran, QIAO Shaojie, YU Shanshan. Location-based predictive switching algorithm in cellular networks[J]. *Computer Science*, 2014, 41(S2): 187-190, 220.

作者简介:



邵霞(1970-),女,副教授,硕士生导师,研究方向:通信与信息安全等, E-mail: shaoxia_hs@163.com。



翟亚坤(1994-),男,硕士研究生,研究方向:智能无线通信技术、波束管理等。



罗文宇(1982-),通信作者,男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:智能无线环境、通信感知一体化等, E-mail: wyluo_hs@163.com。



许丽(1978-),女,博士,教授,研究方向:计算机视觉、模式识别、机器学习等。

(编辑:陈珺)