

文章编号: 2095-4980(2022)08-0762-08

## 高铁毫米波最优自适应波束成形与联合传输

黄高勇, 郑添, 方旭明\*

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 高铁车地移动通信系统的吞吐量不仅受到频谱的限制, 而且受到高移动性的限制, 已成为制约智能高铁发展的重要瓶颈。一种提高系统吞吐量的有效方法是使用拥有较宽连续频谱的毫米波频段以及使用大规模多输入多输出(MIMO)和多波束成形技术。然而, 使用固定波束宽度的多波束流在列车高速行驶过程中会产生严重的波束间干扰, 因此, 论文提出了基于最优波束宽度的自适应波束成形和联合传输方案。当列车距离基站较近时, 激活全部波束, 实现波束的空间复用, 提高系统容量和传输可靠性。当列车距离基站较远时, 为了避免波束间的严重干扰, 用更多的天线阵元形成较少的波束, 获得更大的波束增益, 并与相邻基站进行波束联合传输, 提升系统的吞吐量。仿真结果表明, 与现有波束成形及传统自适应选择方案相比, 所提方案吞吐量在小区边缘附近可以提升超过 150%。

**关键词:** 高铁; 毫米波; 波束选择; 干扰

**中图分类号:** TN928

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021355

## Optimal adaptive beamforming and joint transmission for millimeter wave under high-speed railway

HUANG Gaoyong, ZHENG Tian, FANG Xuming\*

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China)

**Abstract:** The throughput of high-speed railway train-ground mobile communication system is not only limited by spectrum, but also limited by high mobility, which has become an important bottleneck restricting the development of intelligent high-speed railway. An effective way to improve the system throughput is to use millimeter wave band with wide continuous spectrum and large-scale Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) and multi-beamforming technology. However, the multi-beam streams with fixed beam width will result in serious inter-beam interference when the train is running at high speed. An adaptive beamforming and joint transmission scheme based on optimal beam width is proposed in this paper. When the train is close to the Base Station(BS), all beams are activated to realize spatial multiplexing thereafter to improve system capacity and transmission reliability. When the train is far away from the BS, in order to avoid serious interference between beams, more antenna array elements are utilized to form fewer beams to obtain greater beam gain, and beams of the adjacent BS are cooperated to transmit to improve the throughput of the system. Simulation results show that the performance of the proposed scheme is significantly better than that of the existing beamforming and traditional adaptive selection schemes.

**Keywords:** high-speed railway; millimeter wave; beam selection; interference

高铁的发展迫切地希望进入新的时代, 列车、旅客将越来越多地紧密联系起来。高铁会提供给旅客更高的舒适度和安全感。为了实现这一愿景, 需要高铁通信实现高数据速率的无缝连接, 从以往仅有的语音业务和传

收稿日期: 2021-10-01; 修回日期: 2021-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071393; U1834210); 四川省应用基础研究重点资助项目(2020YJ0218); 中央高校基本科研业务费资助项目(2682021CF019)

\*通信作者: 方旭明 email:xmfang2002@163.com

统的列车控制系统业务转而提供高数据速率服务，包括高清视频业务和其他宽带旅客服务，例如车载高清视频监控、多媒体视频流调度、车载 WiFi 等<sup>[1]</sup>。

随着新兴应用和智能终端的发展，预计未来 10 年移动数据流量将增长约 1 000 倍<sup>[2]</sup>。依据香农理论，适应大量无线数据的一个最简单的方法是获得更多的频谱资源。而第五代移动通信技术 (5th Generation Mobile Communication Technology, 5G) 所使用的毫米波正是具有丰富频谱资源的无线频段<sup>[3]</sup>。然而，高频段意味着更大的路径损耗、更短的通信距离、更大的多普勒频移，这对于高铁车地通信是不利的。目前，以华为、中兴、爱立信以及高通等公司为代表的第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 成员正在积极推动高速铁路场景下的毫米波通信 5G 标准化演进工作<sup>[4]</sup>。若下一代高铁车地通信采用 5G 毫米波技术，毫米波所处的高频段会带来更严重的路径损耗，大大限制无线信号的可传输距离。但由于毫米波的波长较短，因此可以采用大规模 MIMO 技术，利用波束成形技术，将波束能量集中在较窄的波束范围内，形成无线信号传输距离更长的毫米波定向通信。在高铁传输场景下，为了克服车厢穿透损失和群体切换，目前多采用两跳结构。这种结构将高铁通信链路分为两个部分，第一部分为基站 (BS) 到列车车厢顶部的移动中继 (Mobile Relay, MR)，第二部分为 MR 到车厢内部乘客的移动设备<sup>[5]</sup>。由于第二部分的通信链路相对固定，因此只需要考虑 BS 到 MR 的通信链路。目前高铁毫米波传输有作者提出采用多 MR 配置方案，在增强接收信号质量，提高系统容量等方面有很大优势。文献 [6] 提出了一种控制面/用户面分离的低开销毫米波波束成形方法，该方法不仅可以减少系统链路的反馈开销，还可以将信噪比保持在较高、较稳定的水平。但是，仅采用单个波束来传输信号限制了系统容量的进一步提升。而高铁在运行过程中大部分时候都处于视距传输，文献 [7-8] 表明了在这种传输环境下，信道相关性较弱，不能通过预编码的方法降低波束间干扰。波束的到达方向 (Direction-Of-Arrival, DOA) 在高速运行过程中很可能会发生估计误差，因此有学者提出了基于 DOA 误差估计的自适应天线激活方案<sup>[9]</sup>。文献 [10] 考虑了双波束通信的情况，提出了基于波束分合传输方案，但是它通过划分列车经过的区域来激活不同的波束数量且仅考虑了双波束情况。文献 [11] 提出了一种自适应多波束成形方法，但其没有考虑高铁在小区边缘的吞吐量提升，而且对未使用波束的激活天线造成了浪费。为了减少发射波束更新的次数并且进一步提升高铁车地通信系统的吞吐量，本文在文献 [11] 的基础上提出了一种基于最优波束宽度的自适应波束成形和联合传输方案。该方案中，毫米波基站发射多个具有最优波束宽度的波束同时进行车地无线通信，利用列车的位置信息，可以对波束宽度和数量自适应调整优化，列车运行到小于边缘时，与同频邻基站之间进行波束联合传输，进一步提升系统的吞吐量性能，在降低波束间干扰的同时提升大规模天线的利用效率。

## 1 高铁毫米波通信模型

目前的研究文献中大多针对的是单基站传输模型，本文研究双基站协作模型<sup>[1]</sup>，且相邻同频基站之间共享列车控制系统所提供的高铁位置信息。基于此研究多波束协作可靠传输方案，通过波束间互为备份，进一步提高系统频谱效率。然而，通过对高铁线性布网场景进行深入分析后发现，当列车距离毫米波基站较近时，波束间的空间角度差异较大，旁瓣干扰比较小，在满足基本的信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 前提下可以实现多波束同时传输，进而提升系统容量，如图 1 所示；而当列车处于毫米波基站边缘区域时，同一个基站下的多波束间干扰严重，仅能支持单波束。此时通过与目标基站进行协作传输，提升列车在小区边缘时的系统容量。

整个高铁通信过程中利用列车的 DOA 进行波束成形具有更高的精准性，本文给出了不同的列车车厢顶部的 MR 的 DOA 计算公式，作为后续分析的基础。如图 2 所示，以 CRH3C 动车组列车为例，共有 8 节车厢，车头目前处于基站的正下方，设此时列车的位置  $d=0$  m，列车长度  $L_T=200$  m，列车运行轨道与基站的垂直距离为  $d_{\min}=30$  m，列车向右行驶，令从右至左的车顶移动中继分别为 MR1 至 MR8，因此每个波束的到达角分别为  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_8$ ，且基站与 MR1 通信的波束 3 dB 宽度为  $\theta_1$ ，与 MR2 通信的波束 3 dB 宽度为  $\theta_2$ ，以此类推。

假设所有波束都被激活，利用天线数量为  $N_T$  的大

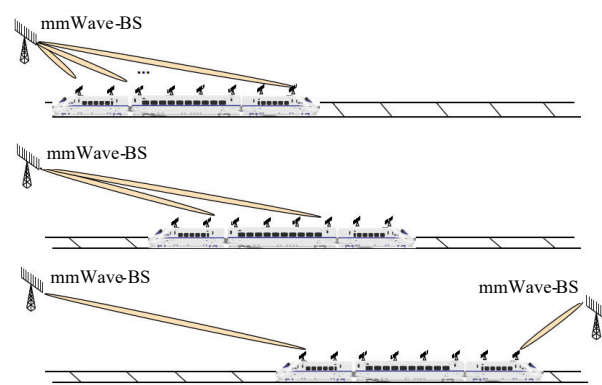


Fig.1 High speed rail millimeter wave multi-beam cooperative transmission scenario

图 1 高铁毫米波多波束协作传输场景

规模均匀阵列天线 (Uniform Linear Array Antenna, ULAA) 可以通过下式得到列车运行到每个位置时, 指向每一节车厢顶部的所有波束的 DOA 为:

$$\varphi_i = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\sqrt{\Delta h^2 + d_{\min}^2}}{\sqrt{\Delta h^2 + d_{\min}^2 + (d - \psi)}}\right), & d < \psi \\ \pi - \arcsin\left(\frac{\sqrt{\Delta h^2 + d_{\min}^2}}{\sqrt{\Delta h^2 + d_{\min}^2 + (d - \psi)}}\right), & d \geq \psi \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta h$  是基站与列车的高度差;  $\psi = \frac{(i-1)L_T}{N_R}$ ;  $N_R$  是列车移动中继的个数。

通信过程中的接收信号模型为:

$$y_i(t) = \sqrt{P} h_i(t) \omega_i(t) x_i(t) + \sum_{j \in B_{\text{opt}}, j \neq i} \sqrt{P} h_j(t) \omega_j(t) x_j(t) + n_i(t) \quad (2)$$

式(2)中等式右侧的三项分别表示所需有用信号、干扰信号和加性高斯白噪声。其中,  $P = p_i \beta_i(t, d, f_c) G_R^i G_T^i$ ,  $p_i$  是信号发射功率,  $\beta_i(t, d, f_c)$  是  $t$  时刻基站与列车之间第  $i$  个波束的大尺度衰落,  $d$  是基站与第  $i$  个列车移动中继之间的直线距离,  $f_c$  为此波束的载波频率。大尺度衰落通常由路径损耗与阴影衰落共同组成, 但在本文中仅考虑路径损耗, 其具体计算公式由下式给出:

$$\beta_i = 92.4 + 20 \lg f_c + 10 \lg d \quad (3)$$

$G_R^i$  和  $G_T^i$  分别是第  $i$  个波束的发射天线增益与接收天线增益, 为了简化起见, 这里将  $G_R^i$  设为 1, 而 ULAA 的指向性增益  $G_T^i$  可以表示为<sup>[12]</sup>:

$$G_T^i(\theta_i) = \begin{cases} 2\pi - (2\pi - \theta_i)z, & \text{主瓣} \\ z, & \text{旁瓣} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\theta_i$  是第  $i$  个波束的主瓣的 3 dB 宽度, 可以表示为:

$$\theta_i = \frac{k\lambda}{N_T \Delta d \cos \theta_m^i} \quad (5)$$

式中:  $k$  为波束宽度因子;  $N_T$  是大规模天线阵列所使用的天线数量;  $\Delta d$  是天线间的间隔;  $\theta_m^i$  是扫描角, 也就是第  $i$  个波束的指向方向。信道矢量表示为<sup>[13]</sup>:

$$\mathbf{h}_i(t) = \alpha_i \exp\left(\frac{j2\pi d_i(t)}{\lambda}\right) \mathbf{f}(\varphi_i(t)) \quad (6)$$

式中:  $\alpha_i$  是均值  $\mu$  为 0, 标准差  $\sigma$  为 1 的随机变量, 也就是  $\alpha_i \sim N(0, 1)$ ;  $d_i(t)$  是  $t$  时刻发射天线与第  $i$  个 MR 之间的距离;  $\mathbf{f}(\varphi_i(t))$  是大规模天线的导向矢量, 可以由下式表示为:

$$\mathbf{f}(\varphi_i(t)) = [1, e^{-j2\pi\Delta \cos(\varphi_i(t))}, \dots, e^{-j2\pi(N_T-1)\Delta \cos(\varphi_i(t))}] \quad (7)$$

式中:  $\omega_i(t)$  是波束成形的权重矢量;  $[\cdot]^H$  是 Hermitian 变换, 可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$\omega_i(t) = \frac{\mathbf{f}(\varphi_i(t))}{\sqrt{N_T}} \quad (8)$$

式中:  $\omega_i(t)$  满足功率约束  $\sum_{i \in B_{\text{opt}}} \|\omega_i(t)\|^2 \leq P_{\text{total}}$ ,  $P_{\text{total}}$  是基站发射的总功率;  $x_i(t)$  表示为  $t$  时刻的发送信号, 其满足  $E\{|x_i(t)|^2\} = 1$ ,  $E\{\cdot\}$  为期望符号;  $n_i(t)$  是复高斯噪声, 服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的独立同分布的量, 即  $C \sim N(0, \sigma^2)$ 。

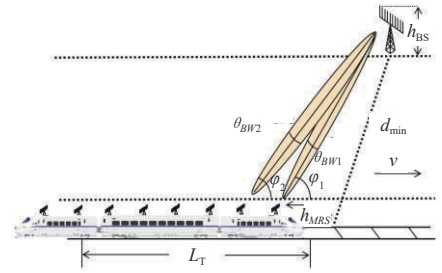


Fig.2 DOA analysis diagram of train position  
图2 列车位置 DOA 分析图

## 2 基于最优均匀波束宽度的多波束成形方案

高铁在运行过程当中，实时地检测与掌握信道状态信息(Channel State Information, CSI)是至关重要的，而高铁的高速特性使得估计CSI变得异常困难。由于高铁是线性布网，其运行具有很强的规律性，因此基站端可以通过列控信息提前知道列车运行的速度和位置，从而使波束直接对准列车车顶的MRs，提供最大的传输容量。为了便于分析，本文假定基站端通过列控系统实时掌握列车位置信息和速度信息，且仅考虑下行链路的通信情况。

定义列车运行在  $t$  时刻与基站间被激活的最优波束子集  $B_{\text{opt}}$ ，子集中每一个波束  $i$  的 SINR 可以被表示为：

$$SINR_i = \frac{p_i \beta_i G_T^i |h_i \boldsymbol{\omega}_i^H| / \sigma_n^2}{1 + \sum_{j \in B_{\text{opt}}, j \neq i} p_j \beta_j G_T^j |h_j \boldsymbol{\omega}_j^H| / \sigma_n^2} \quad (9)$$

为了进一步提升系统性能，采用注水算法对毫米波基站发射功率进行了分配<sup>[15-16]</sup>：

$$p_i = (\mu \lambda_i - 1)^+ \quad (10)$$

式中： $\lambda_i = \frac{1}{\|\boldsymbol{\omega}_i\|^2}$ ； $(\cdot)^+ = (\max\{0, x\})$ ；且  $\mu$  应该满足：

$$\sum_{i \in B_{\text{opt}}} (\mu \lambda_i - 1)^+ = P_{\text{total}} \quad (11)$$

高铁运行在  $t$  时刻时，整个高铁毫米波通信系统的吞吐量可以表示为：

$$C(B_{\text{opt}}) = \sum_{i \in B_{\text{opt}}} B \log_2(1 + SINR_i) \quad (12)$$

式中  $B$  是信道带宽。

对于多波束选择的问题，现有的文献中通常都采用贪婪法来解决波束的选择问题。但是利用穷举思想的贪婪法在进行波束选择时需要遍历所有的波束集合，使得计算量大大增加。因此在最大化系统吞吐量目标函数下求解基站的最优波束，可以表示为：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in B_{\text{opt}}} B \log_2(1 + SINR_i) \\ \text{s.t.} \quad & B_{\text{opt}} \subset \Omega \\ & \sum_{i \in B_{\text{opt}}} p_i \leq P_{\text{total}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\Omega$  是天线端所有待激活的子波束集合。

基于最优均匀波束宽度的自适应多波束选择算法，如表1所示。首先，选择容量最高的单波束作为初始最大吞吐量。得到最高容量的单波束作为初始选择的波束子集。其次，通过算法流程计算出可替换的最大吞吐量，并更新所选的波束子集。再次判断是否激活了全部波束，若是激活了全部波束，则终止算法，否则将重新为此激活波束分配发射天线。最后，该算法输出了最大的系统吞吐量和选定的波束子集。算法具体步骤描述如下：

1) 初始化参数，定义  $n=1$  为激活波束数量， $\psi$  是最大波束集。 $\gamma$  为候选最优激活波束子集。使传输容量最大的单波束作为暂时的最优波束与暂时的最大传输容量，即  $B_{\text{temp}}$  与  $C_{\text{temp}}$ 。 $N_T = 1024/\text{length}(\psi)$ ，按照式(5)生成  $\theta_i$ ，按式(4)生成  $G_T^i$ 。

2) 当  $n < N_R = 8$  时，令  $n = n + 1$ ，进入步骤3)，此时激活波束数量为  $n$ 。否则进入步骤9)。

3) 对于每一个波束  $i \in \psi$ ， $B_{\text{temp}} = \gamma + \{i\}$ ，计算每一种组合的吞吐量  $C_{\text{opt},i}$ ：

$$C_{\text{opt},i} = \sum_{i \in B_{\text{temp}}} B \log_2 \left( 1 + \frac{p_i \beta_i G_T^i |h_i \boldsymbol{\omega}_i^H| / \sigma_n^2}{1 + \sum_{j \in B_{\text{temp}}, j \neq i} p_j \beta_j G_T^j |h_j \boldsymbol{\omega}_j^H| / \sigma_n^2} \right)$$

4) 将此时  $C_{\text{opt},i}$  与  $C_{\text{temp}}$  进行比较，若  $\max C_{\text{opt},i} > C_{\text{temp}}$ ，则  $\psi = \psi - \{\arg \max C_{\text{opt},i}\}$ ， $\gamma = \gamma + \{\arg \max C_{\text{opt},i}\}$ ， $C_{\text{temp}} = \max C_{\text{opt},i}$ ，进入步骤2)。否则进入步骤9)。

5) 如果此时  $\gamma$  内波束数量小于  $N_R$ ，那么进入步骤6)，否则进入步骤9)。

- 6) 重新将  $N_T = N_T / \text{length}(\gamma)$  根天线数分配给波束集  $\gamma$ , 代  $N_T$  进入式(4)与式(5), 计算波束宽度  $\theta_m^i$  与波束增益  $G_T^i$ 。  
 7) 按照式(6)、式(7)、式(8)重新计算此时每个接收端的信道矢量、天线导向矢量以及权重矢量。  
 8) 那么就得到了经过天线分配和窄波束增益的最优吞吐量:

$$C_{\text{temp}} = \sum_{i \in \gamma} B \log_2 \left( 1 + \frac{p_i \beta_i G_T^i |h_i \omega_i^H| / \sigma_n^2}{1 + \sum_{j \in \gamma, j \neq i} p_j \beta_j G_T^j |h_j \omega_j^H| / \sigma_n^2} \right)$$

- 9) 输出: 最优波束子集  $\gamma$ , 最大子集吞吐量  $C_{\text{temp}}$ 。

表 1 基于最优均匀波束宽度的自适应多波束选择算法

Table 1 Adaptive multi-beam selection algorithm based on optimal mean square and beam width

1) initialization:

$N_{\text{opt}} = 1, \psi = \{1, 2, \dots, N_R\}, \gamma = \emptyset, N_T = 1024, \theta_i, G_T^i$

$B_{\text{temp}} = \arg \max_{i \in \psi} p_i \beta_i G_T^i |h_i \omega_i^H| / \sigma_n^2$

$C_{\text{temp}} = \max_{i \in \psi} p_i \beta_i G_T^i |h_i \omega_i^H| / \sigma_n^2$

$\psi = \psi - \{B_{\text{temp}}\}, \gamma = \gamma + \{B_{\text{temp}}\}$

2) select active receive beam index:

while  $n < N_R$  do

$n = n + 1$

for  $i \in \psi$  do

$B_{\text{temp}} = \gamma + \{i\}$

calculate the total throughput of the active beam subset( $B_{\text{temp}}$ ):

$$C_{\text{opt},i} = \sum_{i \in B_{\text{temp}}} B \log_2 \left( 1 + \frac{p_i \beta_i G_T^i |h_i \omega_i^H| / \sigma_n^2}{1 + \sum_{j \in B_{\text{temp}}, j \neq i} p_j \beta_j G_T^j |h_j \omega_j^H| / \sigma_n^2} \right)$$

power allocation using water injection algorithm:

$B_{\text{opt}} = \arg \max C_{\text{opt},i}$

if  $\max C_{\text{opt},i} < C_{\text{temp}}$  do

the end of the algorithm, the activated beam subset is  $\gamma$

else do

$\psi = \psi - \{B_{\text{opt}}\},$

$\gamma = \gamma + \{B_{\text{opt}}\},$

$C_{\text{temp}} = \max C_{\text{opt},i}$

end if

end for

end while

3) reassign the number of active antennas:

a) if  $\gamma \neq \{1, 2, \dots, N_R\}$  do

reassign the number of  $N_T = N_T / \text{length}\{\gamma\}$  antennas to beamset  $\gamma$ , substitute  $N_T$  into equations (4) and (5) to calculate the beam width  $\theta_m^i$  and beam gain  $G_T^i$ .

b) recalculate the channel vector, antenna guidance vector and weight vector of each receiving end according to equations (6), (7) and (8).

c) optimal throughput after antenna allocation and narrowing beam gain:

$$C_{\text{temp}} = \sum_{i \in \gamma} B \log_2 \left( 1 + \frac{p_i \beta_i G_T^i |h_i \omega_i^H| / \sigma_n^2}{1 + \sum_{j \in \gamma, j \neq i} p_j \beta_j G_T^j |h_j \omega_j^H| / \sigma_n^2} \right)$$

end

4) output: optimal beam subset  $\gamma$ , maximum subset throughput  $C_{\text{temp}}$

### 3 性能仿真分析

仿真参数在表 2 中给出。图 3 结果表明, 文献[10]所提出的自适应多波束成形方案在高铁列车运行到基站附近时, 由于接收端波束之间的 DOA 差异较大, 激活所有波束进行高铁车地通信, 此时系统吞吐量与八波束成形方案的相近, 但由于没有考虑基站间的波束联合传输, 对于列车在小区边缘的吞吐量没有提升, 仅与单波束的传输容量相等。并且, 该方案通过简单地在激活波束中选择最优波束进行车地无线通信, 并未加入窄波束增益, 且对未使用波束的激活天线造成了浪费, 因此对整个系统的吞吐量的提升有限。

表 2 仿真参数  
Table 2 System simulation parameters

simulation parameters	value
5G BS total transmission power/dBm	46
carrier frequency/GHz	28
bandwidth/GHz	1
number of transmitting antennas	1 024
normalized antenna spacing	0.5λ
cell radius/m	600
$d_{min}/m$	30
length of train $L_T/m$	200
BS height/m	30
vehicle antenna height/m	2.5
noise power/(dBm/Hz)	-174
number of MRs	8

如图 4 所示，高铁在行驶过程中，本文所提方案在双基站模式下整个运行过程中激活波束数量情况与波束间干扰有着直接的关系。在小区基站附近时，波束间干扰较小，可以激活所有波束进行车地无线通信。在小区边缘，也就是 [400,600] m 的区间内，此时列车通过与同频邻基站使用大规模 MIMO 技术与波束成形技术所形成的波束进行联合传输，使得此时的波束数量有所提升。

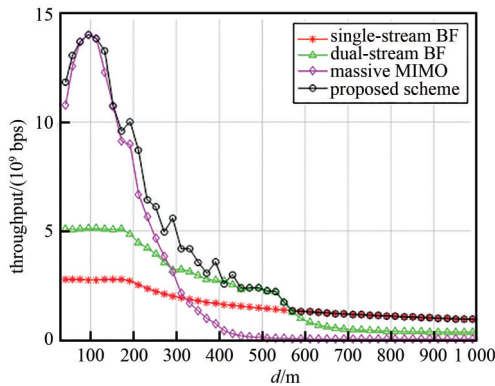


Fig.3 Comparison of system throughput of different schemes

图 3 不同方案系统吞吐量对比

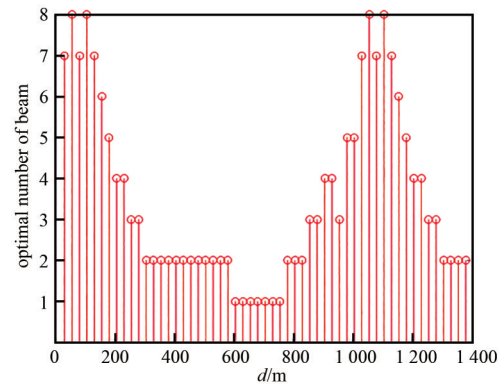


Fig.4 Variation of optimal beam number during high-speed rail operation

图 4 高铁运行时最优波束数量变化情况

图 5 是高铁列车整个运行过程中激活的最优波束数量与激活波束均匀宽度的关系的仿真结果图。可以看出波束均匀宽度是随着激活波束数量而变化的。在基站附近，列车与毫米波基站的距离较小，此时路径损耗较小，因此可以将全部天线分配给 8 个波束。由于此时 8 个波束平分全部激活天线，所以形成的波束宽度较大。随着列车朝着目标基站行驶，波束 DOA 差异变小，波束间干扰增大，通过最优均匀多波束成形方案所形成的波束数量变少，形成每个波束的激活天线数量增多，此时波束宽度变窄。当列车运行到小区边缘，全部天线用于形成一个定向波束，此时的波束宽度最小。

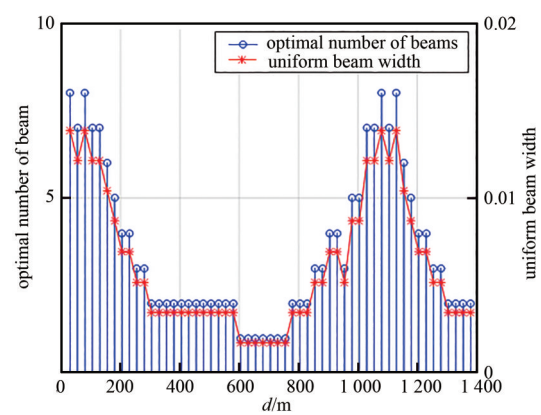


Fig.5 Variation of optimal beam number and uniform beam width

图 5 最优波束数量与波束均匀宽度变化情况

如图 6 所示，窄波束所获得的增益随着波束宽度的降低而提升。当列车运行到毫米波基站附近时，由于波束间 DOA 差异较大，此时激活波束数量较多，那么每个定向波束所能分配的激活天线数量就较少，进而获得的波束增益较小。当列车运行到小区边缘时，此时激活波束数量最少，分配得到的激活天线数量最多，所形成的窄波束的增益最大。

如图 7 所示，本文所提基于最优均匀波束宽度的自适应多波束选择方案，经过重新分配天线和增加窄波束宽度增益之后，整个系统的吞吐量有很大的提升。这是因为在高铁整个运行过程当中，一直为自适应波束成形提供最优的均匀波束宽度增益，并未造成大规模天线的浪费，从而使得系统性能有显著提升。当高铁列车运行到

基站附近时,此时由于波束间干扰较小,所激活的波束与自适应多流波束成形方案的激活波束数量相差不大,所能提供的波束增益较小,因此吞吐量的提升相对较少,与文献[10]方案相比,吞吐量提升13%左右。但随着列车运行到小于边缘时,此时波束间干扰增大,所激活的最优波束数量变小,本文所提方案带来吞吐量性能提升非常明显,同时与同频邻基站之间进行波束联合传输,进一步提升了高铁列车的整体吞吐量,与文献[10]方案相比,吞吐量增加超过150%。此外,在高铁列车的整个运行过程中,其吞吐量的变化与波束间干扰成反比,与所激活波束数量呈非线性关系。

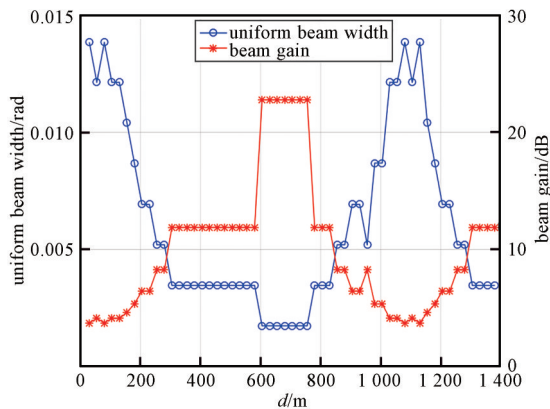


Fig.6 Comparison of beam uniform width and beam gain during the high-speed train operation  
图6 高铁运行时波束均匀宽度与波束增益对比

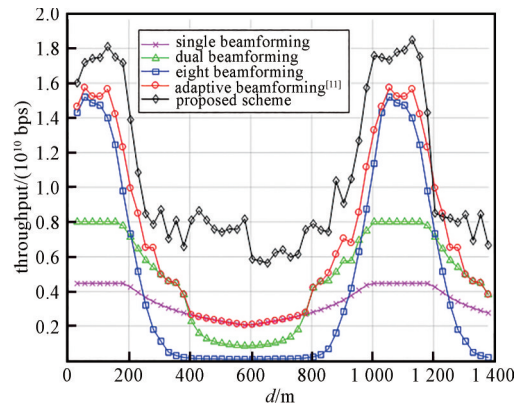


Fig.7 Throughput performance comparison during the high-speed train operation  
图7 高铁运行时吞吐量性能比较

#### 4 结论

本文针对高铁车地毫米波多波束传播场景,提出了一种最优自适应波束成形与联合传输方案,并给出了吞吐量优化公式。与现有方案相比,可以有效提升小区边缘吞吐量,降低波束间干扰,提高传输可靠性。所提的基于最优均匀波束宽度的自适应多波束成形方案不仅可以实时地调整用于车地通信的波束数量和波束宽度,带来更大的波束增益,而且并未对大规模天线造成浪费。通过仿真结果分析,验证了所提方案能使列车在运行过程中时刻保持最大的吞吐量和最优激活波束。下一步工作主要研究高铁场景下的波束跟踪及切换方案。

#### 参考文献:

- [1] AI Bo, GUAN Ke, Markus Rupp, et al. Future railway services-oriented mobile communications network[J]. IEEE Communications Magazine, 2015,53(10):78–85.
- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI Wan, et al. What 5G will be?[J]. IEEE JSAC, 2014,32(6):1065–1082.
- [3] ZHANG Lin, XIAO Ming, WU Gang, et al. A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017,24(5):44–51.
- [4] SAMSUNG. Email discussion summary for [101-e][320] NR\_HST\_FR2\_Scenario[C/OL]// 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting # 101-e. [s.n.], 2021. [2021-12-12]. [https://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/wg4\\_radio/tsgr4\\_101-e/inbox/drafts/%5B101-e%5D%5B320%5D%20nr\\_hst\\_fr2\\_scenario/round%201/Summary\\_320\\_1stRound\\_v04\\_QC\\_Nokia2.docx](https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg4_radio/tsgr4_101-e/inbox/drafts/%5B101-e%5D%5B320%5D%20nr_hst_fr2_scenario/round%201/Summary_320_1stRound_v04_QC_Nokia2.docx).
- [5] FAN Pingzhi, ZHAO Jing, CHIH-LIN I. 5G high mobility wireless communications: challenges and solutions[J]. China Communications, 2016,13(2):1–13.
- [6] YAN Li, FANG Xuming, FANG Yuguang. Stable beamforming with low overhead for C/U-plane decoupled HSR wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(7):6075–6086.
- [7] 方旭明, 崔亚平, 闫莉, 等. 高速铁路移动通信系统关键技术的演进与发展[J]. 电子与信息学报, 2015,37(1):226–235. (FANG Xuming, CUI Yaping, YAN Li, et al. The evolution and development of key technologies of mobile communication systems for high-speed railway[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015,37(1):226–235.)
- [8] LUO Wantuan, FANG Xuming, CHENG Meng, et al. Efficient Multiple-Group Multiple-Antenna(MGMA) scheme for high-speed railway viaducts[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013,62(6):2558–2569.
- [9] CHENG Meng, YANG Shaoshi, FANG Xuming. Adaptive antenna-activation based beamforming for large-scale MIMO communication systems of high speed railway[J]. China Communications, 2016,13(9):12–23.