

## 以用户为中心的基站与波束自适应选择算法

王 涛<sup>1,2</sup>, 周志刚<sup>1,2</sup>, 李 茂<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 根据信道环境选择最优的微基站与波束时存在非自适应问题。为此, 基于随机向量量化码本的限制反馈波束赋形技术, 推导出最大化平均有效信噪比的表达式, 提出以用户为中心的分布式毫米波蜂窝小区基站与波束的自适应选择算法。根据用户在蜂窝内的位置, 以平均有效信噪比为代价函数, 自适应地选择最优的微基站。仿真结果表明, 在反馈比特数为 6 bit 以及信噪比大于 12 dB 的情况下, 该算法的误码率和遍历容量性能都优于固定数目的微基站, 能够获得 2 dB ~ 4 dB 的信道增益。

**关键词:** 有限反馈; 波束赋形; 平均有效信噪比; 毫米波; 自适应基站选择

**中文引用格式:** 王涛, 周志刚, 李茂. 以用户为中心的基站与波束自适应选择算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(1): 50-54.

**英文引用格式:** WANG Tao, ZHOU Zhigang, LI Mao. User-centric adaptive base station and beam selection algorithm[J]. Computer Engineering, 2019, 45(1): 50-54.

## User-centric Adaptive Base Station and Beam Selection Algorithm

WANG Tao<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhigang<sup>1,2</sup>, LI Mao<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**[Abstract]** Aiming at the non-adaptive problem of selecting the optimal Micro Base Stations (MBSs) and beam according to the channel environment, based on the limited feedback beamforming technique of the random vector quantization codebook, the expression of the maximum average Effective Signal-to-Noise Ratio (ESNR) is derived, and an Adaptive Base Station and Beam Selection (ABSBS) algorithm for user-centric distributed millimeter-wave cellular is proposed. According to the location of the user in the cellular, the optimal MBSs is adaptively selected with the average ESNR as the cost function. The simulation results show that, when the feedback bit number is 6 bit and the Signal-to-Noise Ratio (SNR) is more than 12 dB, the error rate and ergodic capacity of the proposed algorithm are better than those of the fixed number of micro base stations, and the channel gain of 2 dB ~ 4 dB is obtained.

**[Key words]** limited feedback; beamforming; average Effective Signal-to-Noise Ratio (ESNR); millimeter-wave; adaptive base station selection

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0049150

### 0 概述

随着移动通信数据量呈指数级增长和蜂窝小区密度的不断增加, 为满足用户无处不在的高速、可靠性的接入需求, 以用户为中心的架构逐渐成为下一代蜂窝网络的设计准则之一。同时, 有限的低频段频谱资源也制约着下一代通信技术的发展, 毫米波以其丰富的频谱资源而备受关注<sup>[1-3]</sup>。

以用户为中心的架构以及毫米波技术发展的意义在于, 无论用户处于小区中的哪一个位置, 用户通信链路的服务质量 (Quality of Service, QoS) 都能以大概率得到保证。为实现这个目的, 文献[3-6]给出一些思路, 比如: 在大规模 MIMO 系统中指定确切的一个波束服务于一个特定用户来满足 QoS<sup>[6]</sup>; 通过利用上下文信息 (用户的位置或移动模式) 来确保通信链路的 QoS<sup>[7]</sup>。然而, 针对以用户为中心的毫米波分布式小区来说, 以上方法并不适用。毫米波的频率高, 毫米波天线尺寸小, 在蜂窝小区内可以分布大量的微基站以供用户选择性接入。一种更为自然的方式就是允许用户和一个或多个微基站通过共享数据和信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 进行合作通信, 从而确保用户通信链路的 QoS<sup>[8-9]</sup>。

如果得到的 CSI 质量较高, 则系统可以获得较高的频谱效率和数据传输速率。但是, 在实践中很难

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (2015AA01A704); 上海市自然科学基金 (15ZR1447600)。

**作者简介:** 王 涛 (1991—), 男, 硕士研究生, 主研方向为毫米波窄波束接入技术; 周志刚, 研究员、博士; 李 茂, 硕士研究生。

**收稿日期:** 2017-11-01 **修回日期:** 2018-01-08 **E-mail:** wtaolin@mail.ustc.edu.cn

获得完整的 CSI,因为发射机不能跟踪信道的实时变化,所以只能获得部分 CSI。得到 CSI 常见的 2 种方式为利用信道互易性和接收机的反馈,但 FDD 系统中不存在信道互易性。随机向量量化(Random Vector Quantization, RVQ)是一种实现简单的码本,该码本可根据信道的变化随机快速的生成,码字向量均匀分布在复单位球面上,已经被证明其是大尺度系统(例如大规模天线系统)中最优的量化码本<sup>[10]</sup>。

现有研究并没有考虑毫米波传播损耗严重的特性和基站选择的自适应性,人为指定与用户通信的基站数目,而不是根据通信的场景自适应选出最优基站数目。本文在随机向量量化码本的有限反馈波束赋形技术<sup>[11]</sup>基础上,从理论上推导出在用户和多个微基站同时通信的场景下平均有效信噪比(Effective Signal-to-Noise Ratio, ESNR)的表达式,提出以用户为中心的分布式毫米波蜂窝小区中基站与波束自适应选择算法 ABSBS,以保证通信链路的 QoS。

## 1 系统模型

选取分布式小区中任意一个蜂窝小区作为研究对象,如图 1 所示,蜂窝小区内的微基站和天线单元分布状况为  $(N_t, N_r, M)$ 。其中,  $(N_t, N_r, M)$  表示小蜂窝内有  $M$  个微基站,每个微基站上的天线数目一致,都是  $N_t$  个发射天线单元,小区内的用户设备(UE)上有  $N_r$  个接收天线单元。

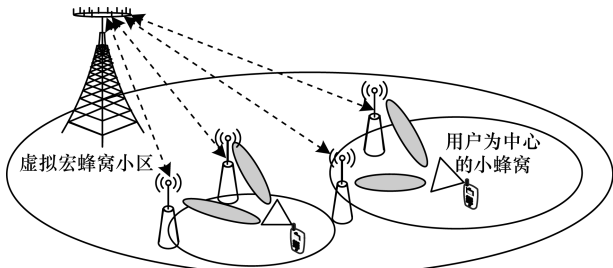


图 1 以用户为中心的分布式小区示意图

### 1.1 系统传输模型

考虑下行链路多个 MBS 协作的传输网络,其中,  $m$  MBS 以相同频率联合服务一个用户,每个用户至多与  $M$  个微基站同时连接。当 MBS 服务于某一用户时,它具有用户的数据和 CSI。用户的信道矩阵  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times mN_t}$  表示为:

$$\mathbf{H} = [\sqrt{L_1} \mathbf{h}_1, \sqrt{L_2} \mathbf{h}_2, \dots, \sqrt{L_m} \mathbf{h}_m] \quad (1)$$

其中,  $\sqrt{L_m}$  是第  $m$  个微基站对用户的平均信道增益,包括大尺度衰落和阴影衰落<sup>[12]</sup>。令  $x$  为功率为  $\rho_0$  的发送信号,  $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  表示用户终端与第  $m$  个微基站之间的小尺度衰落信道矩阵。

$$\mathbf{h}_m = \begin{pmatrix} h_m^{11} & h_m^{12} & \dots & h_m^{1N_t} \\ h_m^{21} & h_m^{22} & \dots & h_m^{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_m^{N_r 1} & h_m^{N_r 2} & \dots & h_m^{N_r N_t} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,各个  $h_m^{ij}$  是相互独立的零均值单位方差的复高斯变量,则接收的信号为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{v}^{rxH} (\mathbf{H} \mathbf{v}^{tx} x + \mathbf{n}_0) = \mathbf{v}^{rxH} \mathbf{H} \mathbf{v}^{tx} x + \mathbf{v}^{rxH} \mathbf{n}_0 \quad (3)$$

其中,  $(\cdot)^H$  表示矩阵的共轭转置,  $\mathbf{n}_0$  是加性高斯白噪声,假设  $E(\mathbf{n}_0 \mathbf{n}_0^H) = \mathbf{I}_{N_r}$ ,  $\mathbf{v}^{tx}$  是  $mN_t \times 1$  的单位发射波束赋形向量,  $\mathbf{v}^{rx}$  是  $N_r \times 1$  的单位接收波束赋形向量。

### 1.2 最优发射波束赋形向量和瞬时信噪比

CSI 有限反馈如图 2 所示,主要分为量化信道增益以及发射机和接收机共享码本 2 种方式。

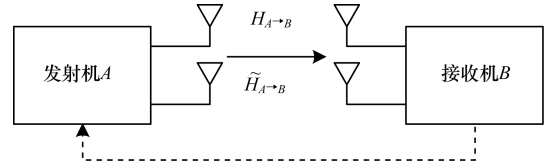


图 2 CSI 反馈示意图

本文选择基站和终端共享码本的方式。其中,码本是码字的集合;码字是量化后的向量,用来表示信道的状态。接收机首先估计出信道增益,然后选择一个适当的码字编号来表示估计出的信道增益。它仅向发射端反馈相应的编号,而不是全部的 CSI。每个编号用  $B$  比特表示。对于给定的码本  $F = \{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_Q\}$ ,根据映射函数  $f(\cdot)$  选择码字。对于给定的信道矩阵,基于码本的方法可以表示为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = f(\mathbf{H}) \in F = \{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_Q\} \quad (4)$$

$$f(\mathbf{H}) = \max_j |\mathbf{H} \mathbf{W}_j| \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$  是从 RVQ 码本  $F$ ,  $|\mathbf{W}_j| = 1$  中选出的最能反映信道,即能获得最大信道增益的码字。  $Q = 2^B$  是码本大小,将最优码字  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$  在码本中的编号  $j$  用  $B$  bit 信息反馈给微基站,由于接收端和发射端共享码本,因此发射端可以根据返回的编号  $j$ ,从码本中选取  $j$  对应的码字  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$ ,使得发射端波束赋形向量  $\mathbf{v}^{tx} = \mathbf{W}_{\text{opt}}$ ,这一反馈过程选出了最优的发射波束赋形向量。

由式(4)和式(5)可以推出,信号在用户接收端的瞬时信噪比为:

$$\gamma_m = \|\mathbf{v}^{rxH} \mathbf{H} \mathbf{v}^{tx}\|^2 \rho_0 / \|\mathbf{v}^{rxH}\|^2 \quad (6)$$

在 UE 接收端采用最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)算法来处理接收信号, MRC 算法的具体证明见文献[13]中式(1)~式(5)。因此,用户接收端的波束赋形向量可以表示为:

$$\mathbf{v}^{rx} = \frac{(\mathbf{H} \mathbf{v}^{tx})}{\|\mathbf{H} \mathbf{v}^{tx}\|} \quad (7)$$

将式(7)和  $\mathbf{v}^{tx} = \mathbf{W}_{\text{opt}}$  代入式(6)得:

$$\gamma_m = \rho_0 \|\mathbf{H} \mathbf{v}^{tx}\|^2 = \rho_0 \|\mathbf{H} \mathbf{W}_{\text{opt}}\|^2 \quad (8)$$

令  $\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{H} / \|\mathbf{H}\|$  并代入式(8),整理可得:

$$\gamma_m = \rho_0 \|\mathbf{H}\|^2 \|\tilde{\mathbf{h}} \mathbf{W}_{\text{opt}}\|^2 = \frac{\rho_0 \|\mathbf{H}\|^2 \|\tilde{\mathbf{h}} \mathbf{W}_{\text{opt}}\|^2}{\rho_0 \|\mathbf{H}\|^2 \|\mathbf{v}\|^2} \xrightarrow{\tilde{\mathbf{h}} \mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{v}} = \quad (9)$$

### 1.3 平均有效信噪比

$\mathbf{h}_m$  中的各项是均值为 0、方差为 1 的相互独立的复高斯变量, RVQ 码本与  $\tilde{\mathbf{h}}$  相互独立, 因此瞬时信噪比并不能确切地反映信道的快衰落变化。ESNR 可以由式(9)的期望得到:

$$E(\gamma_m) = E(\rho_0 \|\mathbf{H}\|^2 \|\mathbf{v}\|^2) = \rho_0 \sum_{i=1}^m N_r N_t L_i E(\|\mathbf{v}_i\|^2) \quad (10)$$

$\mathbf{h}_m^{ij}$  服从  $CN(0, 1)$  分布, 而且  $\mathbf{H}$  中的每一行都是独立同分布的, 则  $\mathbf{H}$  中的每一行的期望是相同的, 取信道矩阵的第一行进行观察, 式(10)可以简化为:

$$E(\gamma_m) = \rho_0 \sum_{i=1}^m N_r^2 N_t L_i E(\|\mathbf{v}_1\|^2)$$

其中,  $\mathbf{v}_1$  是  $\mathbf{v}$  的第一个行向量,  $\mathbf{h}_i^1$  表示第  $i$  个微基站与用户接收端的信道矩阵  $\mathbf{h}_i$  的第一个行向量。

$$\|\mathbf{v}_1\|^2 = \max_{j=1,2,\dots,Q} \left\| \left[ \frac{\sqrt{L_1} \mathbf{h}_1^1}{\|\mathbf{H}\|}, \frac{\sqrt{L_2} \mathbf{h}_2^1}{\|\mathbf{H}\|}, \dots, \frac{\sqrt{L_m} \mathbf{h}_m^1}{\|\mathbf{H}\|} \right] \mathbf{W}_j \right\|^2 \quad (11)$$

因为 RVQ 码本中的不同码字  $\mathbf{W}_j$  是独立同分布生成的, 可以看成是均匀分布在复球面上的单位向量, 所以当  $\tilde{\mathbf{h}}$  是各向同性分布时,  $\mathbf{v}_1$  也是各向同性分布的。但是从式(2)可以看出, 各个  $L_m$  是不相同的, 因此  $\mathbf{v}_1$  不是各向同性分布的, 根据文献[13-15]中对 RVQ 的研究可得:

$$E(\|\mathbf{v}_1\|^2) = 1 - Q\beta\left(Q, \frac{mN_t}{mN_t - 1}\right) \quad (12)$$

其中,  $Q = 2^B$ , 由此可以推出基于 RVQ 码本反馈的通信系统模型的 ESNR 为:

$$E(\gamma_m) = \rho_0 \sum_{i=1}^m N_r^2 N_t L_i \left(1 - 2^B \beta\left(2^B, \frac{mN_t}{mN_t - 1}\right)\right) \quad (13)$$

其中,  $\beta(\cdot)$  是  $\beta$  函数分布, 根据文献[15]和式(10), 当  $mN_t \gg 1$  时, 式(13)可以作如下近似, 得到一个下界:

$$E(\gamma_m) \approx \rho_0 \sum_{i=1}^m N_r^2 N_t L_i (1 - 2^{-B/(mN_t - 1)}) \quad (14)$$

## 2 自适应基站与波束选择算法

在以用户为中心的分布式毫米波蜂窝小区内, 如何最大化 ESNR, 自适应地选择多个微基站进行连接是本文研究的重点。从式(13)可以看出, 以 ESNR 为代价函数, 最大化接收信噪比问题可以归纳为以下非线性函数求解问题。

$$f(B, m) = \max_{B, m} E(\gamma_m), \quad 0 < B \leq B_{\max}, \quad 0 < m \leq M \quad (15)$$

若用户的具体位置确定, 则  $L_m, m = 1, 2, \dots, M$  是可以由用户终端进行估计得到, 假设估计是准确的, 同时反馈给发射机的信息是没有错误和时延的。当反馈的比特数  $B$  固定、用户的位置确定后, 然后考虑如何选择基站, 使得式(13)最大。很显然, 对  $M$  个微基站进行穷举,  $C_M^1, C_M^2, \dots, C_M^M$ , 然后比较得出使 ESNR 最大的一组微基站是性能最优的算法, 但是

穷举算法的复杂度为指数级, 在实际应用中并不可取, 需要降低算法复杂度。

从式(14)可以看出, 在特定的场景下, 即  $L_m$  和  $B$  一定时, 存在最优的微基站个数  $M_{\text{opt}}$  使  $E(\gamma_m)$  最大化。如图3所示, 当  $M = 10$  时, 使  $E(\gamma_m)$  最大化的  $M_{\text{opt}} = 2$ ; 当  $M = 20$  时, 使  $E(\gamma_m)$  最大化的  $M_{\text{opt}} = 5$ 。  $M_{\text{opt}}$  随着用户所处的环境位置而不断变化, 不是一个固定的值, 每一个特定的位置都对应一个最优的  $M_{\text{opt}}$ 。在图3中, 平均信噪比都是负数, 这是由于毫米波衰落特性造成的。

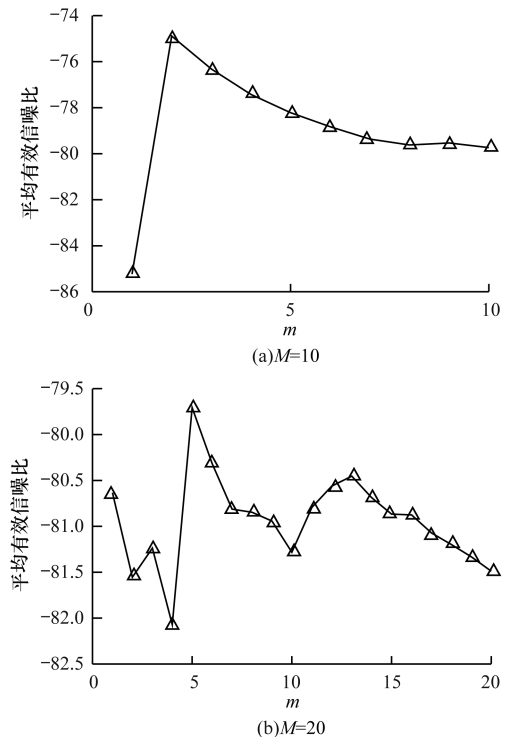


图3 最优的微基站数目  $M_{\text{opt}}$

基于上文分析, 对于寻找最优的微基站数目, 首先, 将  $L_m, m = 1, 2, \dots, M$  进行降序排序, 每一个  $L_m$  对应一个基站; 然后, 将  $m = 1, 2, \dots, M$  分别代入式(13)计算得到一组  $E(\gamma_m)$ , 最大的  $E(\gamma_m)$  对应的  $m$  就是最优的微基站个数  $M_{\text{opt}}$ , 其中, 最优的微基站恰好是按  $L_m$  降序排列的前  $M_{\text{opt}}$  个微基站, 此时算法复杂度降为  $O(M \log M)$ 。ABSBS 算法步骤描述如下:

#### 算法1 自适应基站与波束选择算法 ABSBS

步骤1 同一个小区  $M$  个微基站周期性地广播信道。

步骤2 用户终端进行信道估计, 测量蜂窝小区内各个微基站的大尺度衰落和阴影衰落信息  $L_m, m = 1, 2, \dots, M$ , 通过上行反馈信道把信息传给微基站。

步骤3 用户终端对  $L_m$  降序排序, 根据式(13)计算出使  $E(\gamma_m)$  最大的最优微基站数目  $M_{\text{opt}}$ , 根据  $M_{\text{opt}}$  和  $B$  选出 RVQ 码本, 然后根据式(4)和式(5)计算出码本中最优的码字  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$ , 即最优的波束赋形向量, 并将量化的  $M_{\text{opt}}, B$  和  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$  在码本中的编号  $j$  以如下二进制的方式经上行反馈信道发送给微基站。

$$(M_{opt}, B, j)_2 = a_{n-1} \times 2^{n-1} + a_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + a_0 \times 2^0$$

**步骤 4** 在微基站端根据  $L_m, m=1,2,\dots,M$  进行的降序排序,选出前  $M_{opt}$  个基站,然后发送信号乘上编号为  $j$  的发射波束赋形向量  $v^a = W_{opt}$ ,进行下行数据传输。

**步骤 5** 如果用户在小蜂窝内的位置发生改变,即  $L_m, m=1,2,\dots,M$  发生改变,算法自适应地重复步骤 1 ~ 步骤 4。

### 3 性能仿真及结果分析

为验证本文 ABSBS 算法的有效性,在同一个蜂窝内,相同的用户位置选取了不同数目的基站进行算法的性能对比:1)  $M$  个微基站全部参与传输信号(all MBSs);2) 选择  $M$  个微基站中的一个(大尺度衰落和阴影衰落最小的微基站)(one MBS);3) 随机从  $M$  个微基站中选择  $M_{opt}$  个微基站(random MBSs)。仿真对比了 ABSBS 算法和其他 3 种情况在不同信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)下的误码率(Bit Error Rate, BER)和遍历容量(Ergodic Capacity, EC)性能。在仿真中,毫米波频段为 78 GHz,波长  $\lambda$  为 3.8 mm,小蜂窝覆盖半径  $r$  设为 100 m,用户在蜂窝内的位置是随机生成的。

图 4(a)和图 4(b)分别为在微基站天线数量为 64 根,用户终端天线数为 4 根,反馈比特数为 6 bit,小蜂窝微基站 8 个情况下,不同微基站选择算法在不同信噪比下所对应的误码率变化曲线。

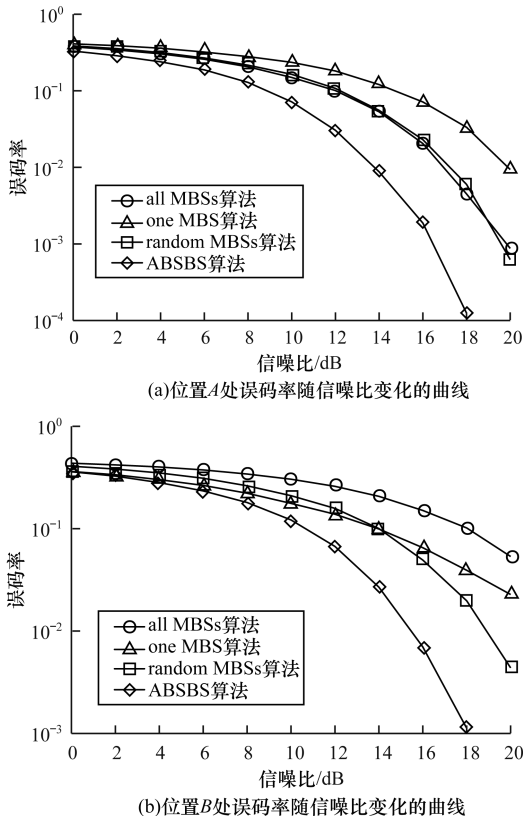


图 4 不同位置下 4 种算法的误码率性能对比

由图 4 可以看出,ABSBS 算法的误码率性能优于其他 3 种算法,因为其 ESNR 最大。同时,对比图 4(a)和图 4(b)可以发现,random MBSs 算法的性能有较大的随机性,与用户在小区内所处的位置有关。特别地,ABSBS 算法在 SNR 较高时,误码率性能明显优于其他 3 种算法,获得 2 dB ~ 4 dB 的信道增益,同时 ABSBS 算法能根据用户的位置变化,自适应地调整最优的微基站数目。

图 5 为在微基站天线数量为 64 根,用户终端天线数为 4 根,反馈比特数为 6 bit,小蜂窝微基站 8 个情况下,不同微基站选择算法在不同信噪比下所对应的系统遍历容量  $E(C) = E(1 + \rho_0 \|H\| \tilde{h} W_{opt}\|^2)$  变化曲线。由图 5 可以看出,在整个信噪比范围内,ABSBS 算法的性能都要优于其他 3 种算法。在相同 SNR 下,ABSBS 算法与其他 3 种算法的遍历容量相差不到  $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,这种特性主要是由毫米波传播损耗引起的,大尺度衰落严重导致后面波束赋形技术补偿的效果不明显。

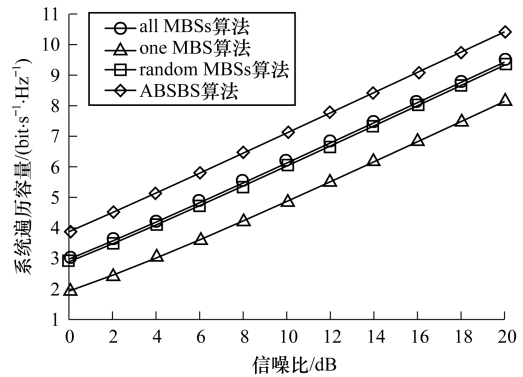


图 5 不同算法的遍历容量曲线

### 4 结束语

本文提出一种自适应基站与波束选择算法 ABSBS,该算法结合有限 CSI 反馈的 RVQ 码本波束赋形技术,可以根据用户在蜂窝内的位置,以平均有效信噪比为代价函数,自适应地选择最优的一组微基站来为它服务,从而保证通信链路的 QoS。与其他 3 种固定数目的微基站选择算法在不同信噪比、不同用户位置下的对比实验结果表明,该算法的误码率和遍历容量性能要优于其他 3 种微基站选择算法。从算法的步骤来看,用户每改变一次位置,微基站和用户终端之间就要反馈一次信道信息,而且反馈的信息量较大,因此该算法适合于用户处于静态和低速运动的场景。下一步将对 ABSBS 算法进行改进,使其适用于终端高速运动的场景。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 卓业映,陈建民,王锐. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国新通信,2015,17(8):13-14.
- [ 2 ] 尤肖虎,赵新胜. 分布式无线电和蜂窝移动通信网络结构[J]. 电子学报,2004,32(1):16-21.
- [ 3 ] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution? [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9):56-62.
- [ 4 ] BOCCARDI F, HEATH R W, LOZANO A, et al. Five disruptive technology directions for 5G [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):74-80.
- [ 5 ] ROH W, SEOL J, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):106-113.
- [ 6 ] RUSEK F, PERSSON D, KIONG B, et al. Scaling up MIMO [ J ]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1):40-60.
- [ 7 ] ABOU-ZEID H, HASSANEIN H S. Predictive green wireless access: exploiting mobility and application information [ J ]. IEEE Wireless Communications, 2014, 20(5):92-99.
- [ 8 ] SU D, YANG C. User-centric downlink cooperative transmission with orthogonal beamforming based limited feedback [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(8):2996-3007.
- [ 9 ] 沈悦,刘占军,武汉,等. 支持 D2D 通信的蜂窝网自适应资源分配算法 [ J ]. 计算机工程, 2018, 44(2):107-113.
- [ 10 ] LOVE D J, HEATH R W, LAU V K N, et al. An overview of limited feedback in wireless communication systems [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26:1341-1365.
- [ 11 ] SANTIPACH W, HONIG M L. Asymptotic performance of MIMO wireless channels with limited feedback [ C ] // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Military Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2003:141-146.
- [ 12 ] AKDENIZ M R, LIU Y, SAMIMI M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1164-1179.
- [ 13 ] LOVE D J, HEATH R W, STROHMER T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems [ J ]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10):2735-2747.
- [ 14 ] AU-YEUNG C K, LOVE D J. On the performance of random vector quantization limited feedback beamforming in a MISO system [ J ]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(2):458-462.
- [ 15 ] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [ J ]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11):5045-5060.
- [ 9 ] ASLAM N, PHILLIPS W, ROBERTSON W, et al. A multi-criterion optimization technique for energy efficient cluster formation in wireless sensor networks [ J ]. Information Fusion, 2011, 12(3):202-212.
- [ 10 ] POHEKAR S D, RAMACHANDRAN M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning: a review [ J ]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004, 8(4):365-381.
- [ 11 ] YIN Y, SHI J, LI Y, et al. Cluster head selection using analytical hierarchy process for wireless sensor networks [ C ] // Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006:1-5.
- [ 12 ] AZAD P, SHARMA V. Clusterhead selection using multiple attribute decision making (MADM) approach in wireless sensor networks [ M ] // SINGH K, AWASTHI A K. Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks. Berlin, Germany: Springer, 2013:141-154.
- [ 13 ] 王林,赵绍英. 无线传感器网络 LEACH 路由协议的研究与改进 [ J ]. 计算机工程与应用, 2012, 48(2):80-82.
- [ 14 ] GAO T, JIN R C, SONG J Y, et al. Energy-efficient cluster head selection scheme based on multiple criteria decision making for wireless sensor networks [ J ]. Wireless Personal Communications, 2012, 63(4):871-894.
- [ 15 ] AZAD P, SHARMA V. Pareto-optimal clustering scheme using data aggregation for wireless sensor networks [ J ]. International Journal of Electronics, 2015, 102(7):1165-1176.
- [ 16 ] 吴琼,曾庆鹏. 基于多目标烟花优化算法的正负量化关联规则挖掘 [ J ]. 计算机工程, 2017, 43(6):158-168.
- [ 17 ] ROIJERS D M, VAMPLEW P, WHITESON S, et al. A survey of multi-objective sequential decision-making [ J ]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2013, 48(1):67-113.
- [ 18 ] 佟晶晶,温俊强,王丹,等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略 [ J ]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1):17-23.

编辑 司森森

编辑 金胡考

(上接第49页)