

基于容量相关字典的5G毫米波大规模天线单元选择算法

王琦^① 赵雄文^{*①②③} 张蕊^② 李树^① 王蒙军^③ 孙韶辉^③

^①(华北电力大学电气与工程学院 北京 102206)

^②(中国电波传播研究所电波环境特性与模化技术国家重点实验室 青岛 266107)

^③(电信科学技术研究院无线移动通信国家重点实验室 北京 100191)

摘要: 针对传统天线选择算法在大规模天线阵列应用中的局限性,该文在多用户场景下提出一种基于容量相关字典的5G毫米波大规模天线随机选择算法。该算法通过特定环境中不同位置处的多用户与基站的交互,快速提取大规模天线单元间容量的强弱相关特性,并建立相关字典;在天线选择时,先搜索最优信道容量单元连接射频链路,再随机选择相关字典中与最优单元容量相关大的天线单元接入其余射频链路。该方法大大降低了传统天线选择算法应用的复杂度,只与环境有关且较为稳定,当新用户加入时也无需重新建立相关字典。该方法通过损失一部分性能来换取较低的复杂度,适用于天线单元多的大规模天线阵列。此外,该文在室内开放式办公室开展了26 GHz视距和非视距下的大规模天线信道测试,分析了不同场景下的天线阵列行间单元间的容量相关性,并对该算法的系统信道容量性能进行了实验验证。

关键词: 大规模天线系统; 相关字典; 随机选择; 毫米波

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-2990-09

DOI: 10.11999/JEIT170228

Antenna Selection Algorithm Using Capacity Correlation Dictionary for 5G Millimeter Wave Massive Antenna Systems

WANG Qi^① ZHAO Xiongwen^{①②③} ZHANG Rui^②
LI Shu^① WANG Mengjun^③ SUN Shaohui^③

^①(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

^②(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China)

^③(State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunication Technology Beijing, 100191, China)

Abstract: In order to solve the limitation to use the traditional antenna selection algorithm in a massive antenna for fifth Generation (5G) system, a random antenna selection algorithm based on the dictionary of capacity correlation in multi-users scenario is proposed. Before the dictionary is built, the correlation characteristics among antenna units are abstracted by the interactions between the base station and users at different locations. It needs to search the antenna unit with optimal capacity to connect one Radio Frequency (RF) link, and the reminder RF links can select the antennas randomly which have the large correlation with the optimal one in the dictionary. The method is applicable to massive antennas system because of its low complexity and stability. Moreover, there is no need to renew the dictionary for coming new users. In addition, the massive antenna channel measurements in an open office including line-of-sight and none-line-of-sight at 26 GHz are carried out to analyze the capacity correlations among the antenna units located in different rows as well as to verify the system capacity performance with the random antenna selection algorithm proposed in this work.

Key words: Massive antenna system; Dictionary of capacity correlation; Random selection; Millimeter wave

收稿日期: 2017-03-20; 改回日期: 2017-06-28; 网络出版: 2017-08-28

*通信作者: 赵雄文 zhaowx@ncepu.edu.cn

基金项目: 中国电波传播研究所电波环境特性与模化技术国防重点实验室基金(201600012), 电信科学技术研究院无线移动通信国家重点实验室基金(DTimo.15.094), 中央高校基金(2015XS19)

Foundation Items: The National Key Laboratory of Electromagnetic Environment(201600012), China Research Institute of Radiowave Propagation, The State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunications Technology (DTimo.15.094), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015XS19)

1 引言

大规模天线是第五代(5G)无线通信系统中非常重要的传输技术。通过使用多个天线单元,实现分集复用,同时同频的为多用户服务。与传统多输入多输出(MIMO)天线相比,大规模天线阵列的单元个数将增加数十倍以上^[1]。在大规模天线阵列系统中,数百个天线服务用户终端,理论以及测量结果都表明大规模天线阵列系统能够有效地提高频谱效率,同时降低辐射功率^[2,3]。

信道测量是无线信道特性研究与建模的必要条件,目前已有的大规模天线信道测试集中在6 GHz以下,研究多用户系统信道相关性及预编码性能问题。文献[4]通过在2.6 GHz开展的室外虚拟ULA(均匀线性阵列)和UCA(均匀圆柱型阵列)的大规模天线信道测试,研究了用户间的空间相关性及隔离度。文献[5]在2.6 GHz研究了大规模多用户MIMO信道统计参数在线性天线不同位置处的变化情况。文献[6]在街区进行了大规模天线信道测试,采用圆柱型天线及面板天线,频点在2.6 GHz,带宽为50 MHz。对迫零编码以及最小均方根误差编码等几种线性预编码方式的性能进行比较,并且发现基站天线个数的增加可降低用户间的相关性,增加发射端的天线数能够使多用户的信道更趋向于正交。当天线数超过一定数量后,信道特性趋于稳定,更多地依赖于传播环境和用户位置。文献[7]是贝尔实验室进行的旋转虚拟大规模阵列信道测试,测试地点选择在德国斯图加特阿尔卡特-朗讯的校园,载频为2.6 GHz,带宽20 MHz。研究结果发现,尽管独立同分布的信道与实测信道间有显著的差异,但大规模天线阵列的理论增益在实际中是可以实现的。此外,研究还发现不同的链路间存在相关性,是由于经过了共同的散射环境。为了研究公共散射体对双链路信道的影响,Aalto大学在5.3 GHz进行了双链路大规模天线信道测试^[8],发现在非视距场景中,公共簇的比例较低,集中在0~20%之间。在视距场景中,公共簇的比例高于50%,在部分测试点中,甚至达到100%。文献[9]在4.45 GHz开展了大规模天线信道测试,场景选在北京交通大学的体育馆内,利用实测数据对频率相关性进行了研究,结果表明大规模天线阵列并不满足广义平稳非相关散射的信道特性。以上信道测试都集中在6 GHz以下频段进行。在更高频段中,文献[10,11]在13~17 GHz开展了虚拟大规模天线信道测量,文献[10]主要对信道参数进行了研究,包括信道增益,莱斯因子,均方根角度及时延扩展等。文献[11]利用高分辨率SAGE算法对传播信道中的第1跳簇和最后一跳簇进行了分

析。在5 G毫米波频段目前还没有大规模阵列信道(天线单元大于100)测试和研究结果。本文在中国和欧洲5 G毫米波热点频段26 GHz,开展了开放办公室场景下虚拟大规模阵列信道测试工作,主要目的是研究如何进行大规模天线单元的选择以简化毫米波频段的大规模天线系统的射频链路复杂度。从传统多天线扩展到大规模天线阵列系统技术,天线单元的大幅度增加需要更多的射频链路,射频链路的数目直接影响硬件复杂度。在理论上,基站处的每个天线单元都需要连接射频链路,射频链路包含放大器,模数转换器,以及混合器等,通过并发并收真正实现多天线技术。然而射频链路价位昂贵,能耗较大,通常,射频链路消耗的功率将占总发送功率的50%~80%^[12]。大规模阵列天线单元间的相关性会导致每个单元对系统贡献减小,在实际应用中,并不是每个天线单元都会匹配射频链路,一种可行的方法是通过天线开关将天线单元分时接入射频链路,如天线单元个数在128以上的大规模天线系统,射频链路可配置8~32个^[13]。由于每个天线单元对系统整体性能的贡献不同^[4],因此,射频链路采用何种方式接入天线单元使大规模天线阵列的性能和能耗达到一个平衡,将是一个非常重要的研究课题。

针对传统多天线系统,过去研究中已经形成了几种经典算法,有限的射频链路通过天线选择算法接入天线单元中达到系统整体能耗能量开销最小,性能最优。第1种是基于接收功率或信噪比的天线选择算法^[14,15],射频链路选择信噪比或接收功率最大的天线单元,第2种为基于最大信道容量的天线选择算法^[16],天线单元中信道容量最大的单元接入射频链路。第3种为基于特征根的天线选择算法^[17]。此外,也有文献在上述算法的基础上引入平均能耗,和干扰因子^[18-20]。上述算法都是基于通过遍历方式寻优,在传统多天线系统中天线单元和射频链路个数都有限,这些算法的遍历次数及复杂度都较低,所以具有较好性能。在大规模天线系统中,天线个数将以数十倍的增加,射频链路数也大幅提高将提高到10个左右,若每次通信,使用遍历算法,其复杂度、能耗和能量额外通信开销对系统来说是极大的负担。此外,在设备对设备(D2D)通信中,当周围环境稳定,没有大量的移动散射体时,上述提到的几种最优选择算法每次寻优会选择固定的天线单元,长时间与射频链路的连接会使得最优天线单元更易磨损,而其他天线单元也不能够得到合理使用。本文将针对上述遍历方式寻优算法的缺陷,提出一种基于容量相关字典的随机天线单元选择算法。通过均匀采集获取环境信息,提取天线阵列中

单元间的容量的相关信息特性,并建立相关字典。每次通信只需搜索最大容量单元连接射频链路,其余射频链路在与最大容量相关性大的天线单元所构成的字典中随机选取,此种方法通过损失一部分容量性能来换取较低的复杂度,非常适用于天线数目较多的大规模天线阵列。

文章主要分为4个部分,第2节重点介绍基于容量相关字典的随机天线单元选择算法以及相关字典的构造过程;第3节描述实验的验证与分析,着重分析天线阵列的相关特性以及算法性能;第4节总结全文。

2 基于相关字典的大规模天线阵列随机选择算法

图1为大规模天线系统框图,为和本文实验系统一致,假设基站BS为单天线,移动端MS有 M 个天线单元, N 条射频(RF)链路,通过开关部分从 M 个单元中选择 N 个单元与射频链路合并。天线选择算法决定开关部分如何匹配。

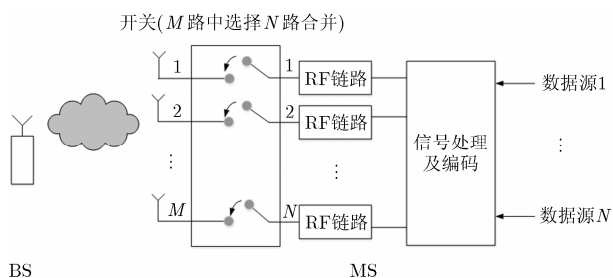


图1 大规模天线系统框图

基于最大信道容量,最大信噪比或接收功率,以及基于范数的天线选择算法的本质都是寻找连接最优信道的天线单元,算法的复杂度都类似。在传统多天线系统中,天线单元通常通过一个开关分时接入射频链路,在大规模天线系统中,为了提高系统性能,也可以通过多个开关分时接入射频链路。

在通信过程中,从 M 个单元中选择 N 个最优单元的复杂度,大于从 M 个单元中选择1个最优的复杂度。射频链路数目的增加,提高了系统性能,同时带来了开关部分复杂度。若能每次通信中其余 $N-1$ 个最优搜索的复杂度简化,将使对开关部分性能得到较大提升。根据以上思路,本文构造了一个基于容量相关字典的大规模天线阵列随机选择算法,算法过程如图2所示。系统初始化时,通过用户与基站的交互构造相关字典,相关字典中定义了与每个天线单元相关性较大的若干天线单元,在多用户系统下相关字典具有统计意义。实际的多用户

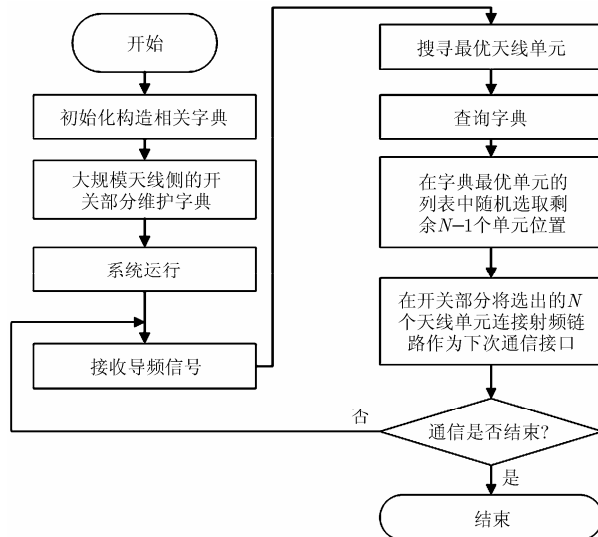


图2 基于相关字典的随机天线选择算法在大规模天线侧的流程图

系统一般基站设置大规模天线,用户设为单天线,这时多用户依次通过导频信道向基站反馈信道信息,基站系统中的射频链路采用时分的方式扫描所有天线单元,根据每个天线单元接收到的来自不同用户的信道冲激响应计算信道容量并建立相关字典。如用户端使用大规模天线,基站为单天线时,通过3次握手能够快速建立并维护相关字典。首先基站向所有用户发射导频信号,用户端的射频链路采用时分的方式获取所有天线单元接收到的信道冲激响应并计算信道容量反馈给基站,基站根据所有天线单元在不同位置处的容量信息计算相关字典,最后将相关字典通过广播发送给所有用户,用户对字典进行维护。本文中,系统初始化采用3次握手的方式来构造相关字典。初始化后正常通信时,根据导频信号,运用经典算法^[14]搜寻容量最优天线单元,将最优单元与一个射频链路连接,其余 $N-1$ 个射频链路在本文定义的容量相关字典中查询,随机选出与容量最优天线单元(容量)相关大的 $N-1$ 个单元接入射频链路。

这种算法将每次通信中 $N-1$ 个最优搜索的复杂度进行合并,转换成构建相关字典的复杂度。在最优搜索算法中,每次通信,都会产生 $N-1$ 个单元的搜索计算量,而基于相关字典的随机搜索算法中,一旦将特定环境的相关字典建立后,后续不需要再更新字典,也不会再产生 $N-1$ 个单元的搜索计算量。当新用户接入基站时,相关字典也无需重新构建。

相关字典的构造如下:

大规模天线多用户系统不同天线单元间存在容量相关性,这种相关性取决于基站和移动台所处的

环境，对于确定环境下的多用户，我们可根据信道矩阵建立反应单元间容量相关性的列表，将其称之为相关字典，且每种环境对应一本相关字典。相关字典反映了天线单元间在特定环境下的信道容量的相关性的统计特性。信道容量计算公式为

$$C = \log_2(1 + \text{SNR} \cdot \|\mathbf{h}\|_F^2) \quad (1)$$

其中，SNR为发送信噪比， \mathbf{h} 表示第 M 个接收天线单元对应的信道冲激响应， $\|\cdot\|_F$ 表示F范数。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1M} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{L1} & C_{L2} & \cdots & C_{LM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵为初始化阶段在环境均匀采样 L 个位置 M 个天线单元的信道容量。

$$\mathbf{Cor} = \begin{bmatrix} \text{cor}_{11} & \text{cor}_{12} & \cdots & \text{cor}_{1M} \\ \text{cor}_{21} & \text{cor}_{22} & \cdots & \text{cor}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cor}_{M1} & \text{cor}_{M2} & \cdots & \text{cor}_{MM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{Cor} 为相关系数矩阵，又是对称矩阵，每个元素为天线单元间的容量相关系数， cor_{ij} 为式(4)求解的向量 $\mathbf{a} = [C_{1i} \ C_{2i} \ \cdots \ C_{Li}]$ 与 $\mathbf{b} = [C_{1j} \ C_{2j} \ \cdots \ C_{Lj}]$ 间的相关系数。

$$\text{cor}_{ij} = \frac{\text{Cov}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\sqrt{D(\mathbf{a})}\sqrt{D(\mathbf{b})}} \quad (4)$$

$$\mathbf{Dic} = \mathbf{Dic}_i, \quad \{i | 1 \leq i \leq M, i \in Z\} \quad (5)$$

$$\mathbf{Dic}_i = \arg \max_{\text{cor}_{i(j)} \in \mathbf{Cor}} \text{cor}_{i(j)} > \gamma, \quad (6)$$

$$\{j | 1 \leq j \leq M, j \neq i, j \in Z\}$$

\mathbf{Dic} 为相关字典，包含了 M 个天线单元对应的较大相关性单元列表， γ 是相关性阈值，当相关性大于 γ 时，我们认为两个单元存在较大的相关性，将相关单元序号存储在字典当中。

3 实验与验证

3.1 实验设计

为了验证上述算法，本文在200 m²大的开放式办公室分别开展了大规模天线阵列视距和非视距实验，如图3所示，其中图3(a)为视距(LOS)场景，(b)为非视距(NLOS)场景，测试频段为26 GHz，带宽为1 GHz。由于目前毫米波频段的大规模阵列在硬件上还难以实现，实验采用如图4(a)所示的收发系统，收端采用虚拟天线阵列，通过电机驱动全向天线在水平和垂直方向平移形成44×3大小规模的阵列，水平和垂直单元间分别相距半波长，132个天线单元的编号如图4(b)所示。发端采用全向天线，高度为2.09 m，接收天线最低高度为1.98 m。在视距场景中，发送天线用三角表示，大规模阵列测试位置共有20个用圆圈表示，它们均匀散布在环境中。在非视距场景里，发射端放置在走廊，通过墙壁阻挡形成非视距环境，接收端均匀的散布在环境中，共选择19个位置。

测试系统采用时域信道探测仪，发端包含全向天线，铱钟，任意波发生器，信号源，上变频器，以及30 dB增益的功率放大器等。收端包含虚拟天线阵列，低噪声功率放大器，下变频器及数据采集卡等。表1列出了系统的详细参数。

3.2 结果分析

在大规模天线系统中，信道容量随着天线单元

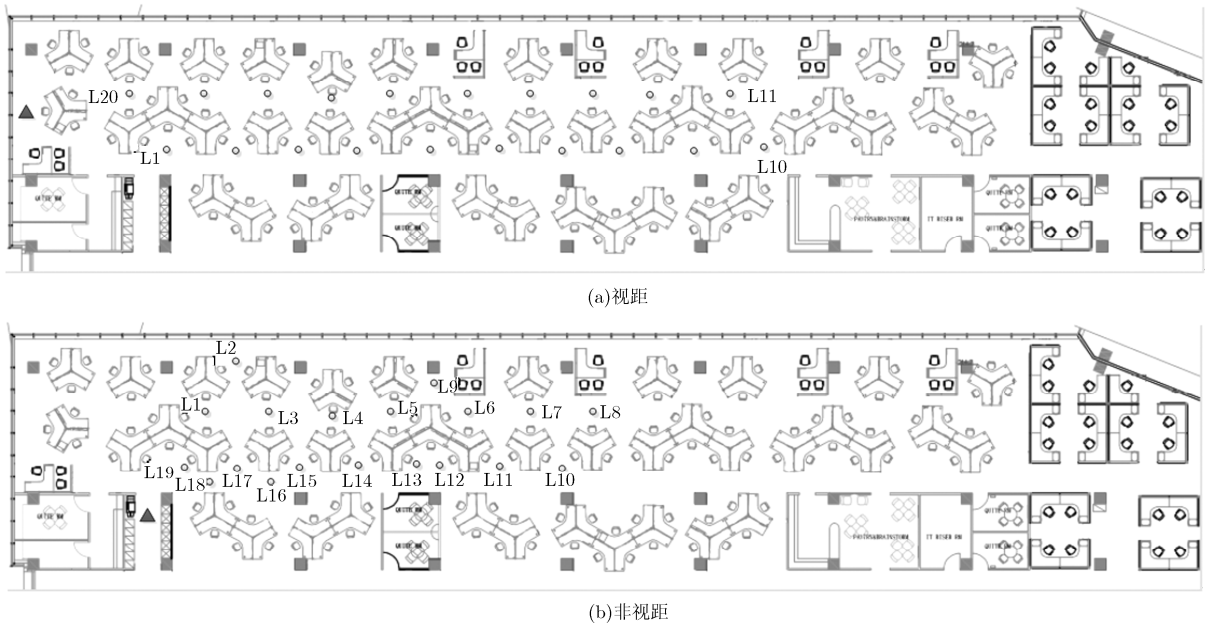


图3 实验场景图



(a)系统收发端

89	90	91	92	...	129	130	131	132
45	46	47	48	...	85	86	87	88
1	2	3	4	...	41	42	43	44

(b)虚拟阵列天线单元编号

图 4 测试系统

表 1 系统参数

参数	数值
中心频率	26 GHz
带宽	1 GHz
最大时延范围	1.024 μs
时延分辨率	1 ns
发射功率	24 dBm
收/发端高度	1.98/2.09 m
接收端天线增益	5 dBi
发送端天线增益	3 dBi

个数的增加而增大，曲线呈现凸函数特性。我们在视距和非视距场景下，研究了 132 个天线单元中，能够达到信道容量 80% 的天线单元个数以及最大接收信噪比随着距离的变化情况，如图 5(a)和图 5(b)所示。最大接收信噪比为

$$SNR_{max} = 10 \times \lg(P_{max}/P_{noise}) \text{ dB} \quad (7)$$

其中， P_{max} 是接收到的最大功率， P_{noise} 是噪声功率。

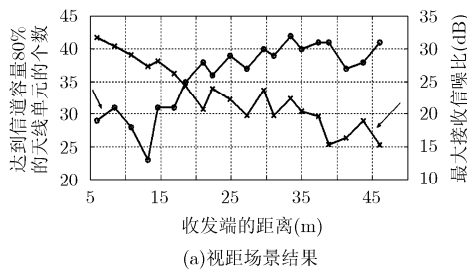
如图 5(a)所示的视距情况，当收发端距离较小时，采用 30 个以内的天线单元就可以达到整体容量

的 80%。随着收发距离的增大，达到 80%性能的天线单元个数整体呈现上升趋势，而最大接收信噪比呈现整体下降趋势，并与前者呈反比例关系，达到 80%信道容量的天线单元数与最大接收信噪比的相关系数为-0.80。当收发距离较远时，最大接收信噪比整体减小，这时天线阵列中需要更多的天线才能达到较好性能。由于视距非视距两种场景采用同一套系统，非视距中墙壁的遮挡使得所测距离小于视距如图 5(b)所示。与视距情况不同，非视距情况时，达到 80%信道容量的天线个数及最大接收信噪比随着收发距离的增大而增多或减少的趋势并不是很明显，而达到 80%信道容量的天线个数与最大接收信噪比呈现明显反比关系，相关系数为-0.92。

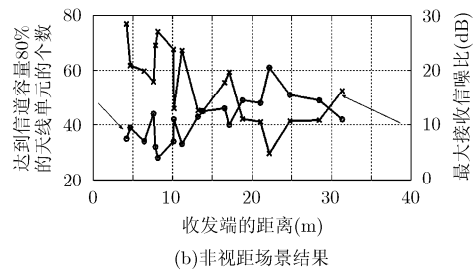
为了研究阵列天线不同单元的性能差异，图 6(a)和图 6(b)分别给出了视距，非视距两种情况下，在 L1 位置处的每个天线单元的信道容量。从两个图中可以发现同一场景下天线阵列中不同天线单元的贡献差距较大，最小信道容量与最大信道容量相差 6 bit/(s·Hz)左右。相比于视距情况，非视距相邻天线单元的信道容量变化更为平缓。由此可以看出，当射频链路的数量有限且远小于天线单元个数时，根据信道环境，选择性能较好的天线单元接入链路对于提高大规模天线系统的性能非常有意义。

此外，通过观察阵列的 3 行天线单元，发现无论视距与非视距，3 行的变化趋势呈现一致性，说明天线阵列的 3 行间信道容量存在一定的相关性。3 行天线单元间的信道容量相关性随着距离的变化如图 7 所示。可以看出，非视距的行间天线单元容量相关性比视距时波动更为明显，且非视距场景 3 行天线单元间的平均相关性小于视距场景 3 行间的平均相关性。此外，在 3 行天线中，相邻两行间的相关性均大于第 1 行与第 3 行间的相关性，如表 2 所示。在视距情况下，相邻行间的相关性基本一致，而非视距情况下，相邻行间的相关性差别较大。

由图 7(a)和图 7(b)，我们发现阵列的 3 行天线单元间容量存在较大的相关性，而相关字典需要存



(a)视距场景结果



(b)非视距场景结果

图 5 达到信道容量 80% 的天线单元个数及最大接收信噪比随着距离的变化曲线

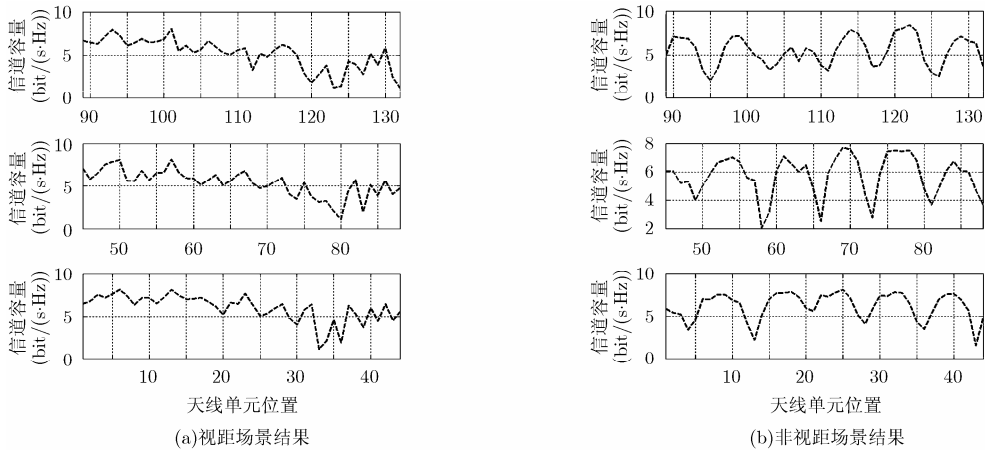


图6 L1位置处每个天线单元的信道容量

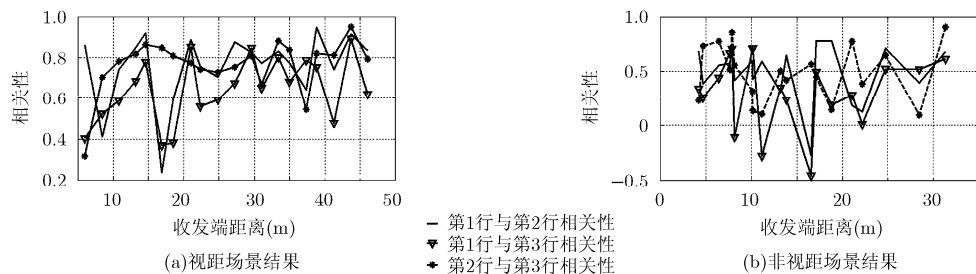


图7 大规模天线阵列行间天线单元的容量相关性

表2 视距与非视距情况下行间天线单元的容量相关性

场景	第1行与第2行	第2行与第3行	第1行与第3行
视距	0.76	0.76	0.65
非视距	0.51	0.48	0.41

储更详细的信息，需要提取特定场景下天线阵列中天线单元间的容量相关性。对基站采用单天线，用户端采用大规模天线其相关字典构成和维护步骤如下：首先，系统初始化时，基站在导频信道中依次向所有用户发送导频信息，所有用户的射频链路采用时分的方式获取所有天线单元接收到的信道冲激响应并根据式(2)用户端计算各天线单元的容量，反馈给基站后构成矩阵 Q ，视距非视距的维数分别为：

20×132 和 19×132。第2步：基站通过式(4)计算信道容量相关系数矩阵。第3步，基站根据式(5)和式(6)，提取相关字典，在这里视距，非视距的相关阈值，定义为0.7，射频链路定为10条。最后，基站通过广播，将容量相关字典发送给用户，用户端进行维护。

图8(a)和图8(b)分别为视距和非视距的容量相关系数矩阵。容量相关系数矩阵是对称矩阵，在图8(a)中，对角线上为天线单元与自身相关系数，除了对角线，还有4条相关性较大的直线与对角线平行，说明天线单元与所处同一列的天线单元间的相关性较大。此外，有的天线单元与周围单元的容量相关性较大，因此在图8(a)中会有较大的浅色方块出现在5条平行线上。还有部分天线单元的容量相

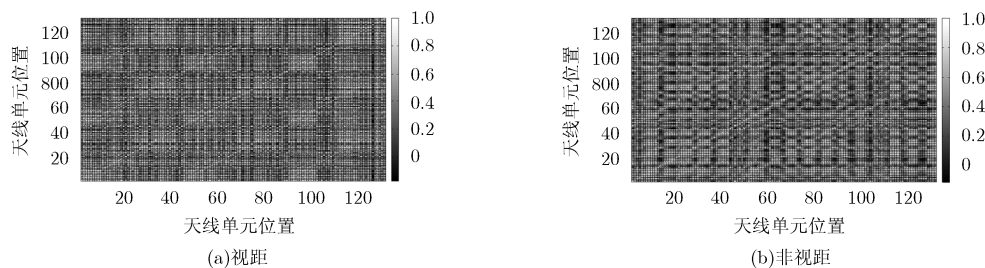


图8 大规模天线单元间容量相关矩阵

关性单元比较分散，在图上没有出现聚集现象。当大相关性单元聚集时，说明在当下环境中这部分天线单元除视距外会接收到经过同一个散射簇的信号，簇较大且集中。当大相关性单元分散时，说明这部分相关单元除视距外，在环境中会接收到不同簇的散射信号，簇普遍较小。在非视距场景中，除了对角线，只有两条与对角线平行的直线，且线条不完整。说明在非视距中，同一列中处于中间位置的天线单元与上下两个单元有一定的容量相关性，而处于上方和下方的两个单元间的相关性较小，与图 7 分析结果一致。此外，不同于视距场景，非视距中没有较大的浅色方块，容量相关性大的天线单元都是小范围出现，且不止出现在平行线上，说明非视距中，散射贡献主要来自不同的小的散射体簇。

图 9 和图 10 研究了 3 种天线组合模式对不同区域用户的系统性能影响，以及 3 种组合模式在不同射频链路个数下对系统的性能影响，图 9 中射频链路个数为 10。

图 9(a)为视距情况下，用户处于不同区域时，3 种天线选择算法对系统性能的影响。当发端固定时，不同区域的用户转化为不同的收发端距离，可以看出，当收发距离逐渐增大时，3 种天线选择算法下，用户的信道容量整体呈现下降趋势，基于相关字典的随机选择算法的性能介于其他两种算法之间。图 9(b)为非视距情况下，3 种天线选择算法对于不同区域用户的信道容量的影响。随着收发距离的增加，相比于视距，非视距的信道容量没有呈现出明显的下降趋势，这是受到散射体分布的影响，部分用户虽然离发射端较远，但可视散射体较多，利于信号

的传输，信噪比较大，从而使得信道容量较大。

为了研究 3 种不同天线选择算法在不同的射频链路个数下对系统容量大小的影响，分别选取视距和非视距的 L1 位置测量数据进行研究对比，如图 10(a)和图 10(b)所示。可以看出，在视距和非视距的情况下，无论使用何种天线选择算法，信道容量都是随着射频链路的个数逐渐增大，并缓慢达到平稳。3 种天线选择算法中，最优信道容量选择算法的性能最优，基于相关字典的随机选择算法介于其他两种算法之间。

虽然，基于相关字典的随机选择算法的性能没有最大信道容量选择算法高，但其算法复杂度具有很大的优势，当天线阵列有 n 个天线单元， m 条射频链路时，运用最大容量选择算法的复杂度是 $O(C_n^m)$ ，而基于相关字典的最大容量选择算法在构建完容量相关字典后，其复杂度只有 $O(n)$ ，如表 3 所示。

本文所提出的算法通过损失一部分容量性能来换取较低的复杂度，适用于天线数目较多的大规模天线阵列。在实际应用中，也存在一定的挑战，主要的难点在于如何降低天线开关的硬件成本，如何控制天线开关在不同天线单元间的接入，以及如何快速建立相关字典。在算法测试阶段，相比随机天线选择算法的容量提升率作为该技术的主要测试指标来衡量算法的有效性，有一定的鲁棒性。

4 结论

针对传统天线选择算法在大规模天线阵列应

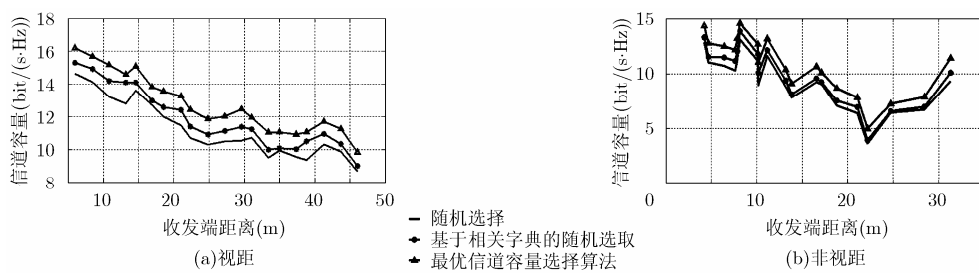


图 9 用户在不同区域时，3 种天线选择算法对系统信道容量的影响

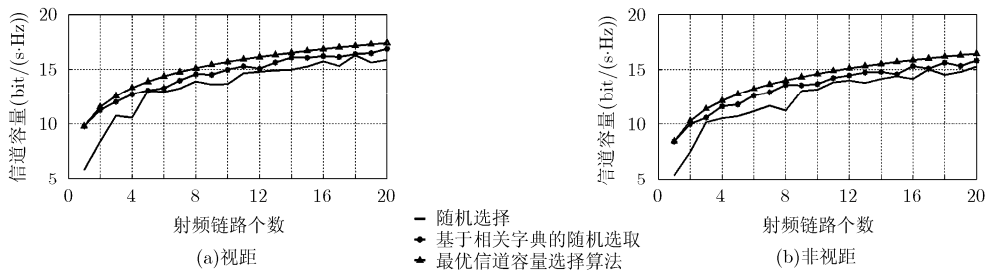


图 10 3 种天线选择算法在不同的射频链路个数下对系统信道容量的影响

表 3 算法复杂度比较

最大容量选择算法	$O(C_n^m) = O\left(\frac{n!}{m!(n-m)!}\right)$
基于相关字典的容量选择算法	$O(n)$

用中的局限性，本文提出一种基于容量相关字典的毫米波频段大规模天线随机选择算法。该算法通过特定环境中不同位置处的多用户与基站的交互，快速提取大规模天线单元间容量的强弱关联特性，并建立相关字典；在天线选择时，先搜索最优信道容量单元连接射频链路，再随机选择相关字典中与最优单元容量相关大的天线单元连接其余射频链路，此种方法大大降低了传统天线算法应用的复杂度，只与环境有关且较为稳定，当新用户加入时也无需重新建立相关字典。本文通过在 26 GHz 室内开放式办公室进行的大规模天线阵列视距非视距实验对算法进行了验证，并对天线阵列行间容量相关性，单元间相关性进行了研究。结果发现，非视距场景天线阵列 3 行间的平均容量相关性小于视距场景 3 行间的平均相关性。视距场景下，3 行中相邻行间的相关性基本一致，而非视距场景下，3 行中相邻行间的相关性不同。此外，在视距中，存在容量相关性大的天线单元集中聚集的现象，而非视距中，相关性大的天线单元都较为分散。最后对 3 种天线组合模型在不同区域用户以及不同射频链路个数情况下的性能进行了分析对比，发现复杂度较低的基于相关字典的随机选择算法性能介于随机选择和最优信道容量选择算法之间，且信道容量都是随着射频链路的个数的增加而逐渐增大，并缓慢达到平稳。

参 考 文 献

- [1] LU Lu, LI G Y, SWINDLEHURST A L, *et al.* An overview of massive MIMO: Benefits and challenges[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 742-758. doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [2] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, *et al.* Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 186-195. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [3] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, *et al.* Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(1): 40-60. doi: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [4] GAO Xiang, EDFORS O, RUSEK F, *et al.* Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3899-3911. doi: 10.1109/TWC.2015.2414413.
- [5] PAYAMI S and TUFVESSON F. Channel measurements and analysis for very large array systems at 2.6 GHz[C]. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, Czech Republic, 2012: 433-437. doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206345.
- [6] GAO Xiang, EDFORS O, RUSEK F, *et al.* Linear pre-coding performance in measured very-large MIMO channels[C]. 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), San Francisco, CA, USA, 2011: 1-5. doi: 10.1109/VETEFCF.2011.6093291.
- [7] HOYDIS J, HOEK C, WILD T, *et al.* Channel measurements for large antenna arrays[C]. 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Paris, France, 2012: 811-815. doi: 10.1109/ISWCS.2012.6328480.
- [8] POUTANEN J, HANEDA K, SALMI J, *et al.* Significance of common scatterers in multi-link indoor radio wave propagation[C]. 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, Spain, 2010: 1-5.
- [9] LU Yanping, TAO Cheng, LIU Liu, *et al.* Frequency correlation investigation of massive MIMO channels in a stadium at 4.45 GHz[C]. 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Seoul, South Korea, 2015: 271-274. doi: 10.1109/ICACT.2015.7224801.
- [10] CHEN Jiajing, YIN Xuefeng, and WANG S. Measurement-based massive MIMO channel modeling in 13-17 GHz for indoor hall scenarios[C]. 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1-5. doi: 10.1109/ICC.2016.7511276.
- [11] CHEN Jiajing, WANG S, and YIN Xuefeng. A spherical-wavefront-based scatterer localization algorithm using large-scale antenna arrays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(9): 1796-1799. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2585478.
- [12] CORREIA L M, ZELLER D, BLUME O, *et al.* Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(11): 66-72. doi: 10.1109/MCOM.2010.5621969.
- [13] Samsung, Ericsson, Intel, *et al.* WF on Dense Urban Scenarios[R]. 3GPP R1-168537, 2016.
- [14] CHEN Zhuo, YUAN Jinhong, VUCETIC B, *et al.* Performance of Alamouti scheme with transmit antenna selection[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(23): 1666-1668. doi: 10.1049/el:20030966.
- [15] CHEN Zhuo, YUAN Jinhong, and VUCETIC B. Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(4): 1312-1321. doi: 10.1109/TVT.2005.

- 851319.
- [16] GOROKHOV A, GORE D A, and PAULRAJ A J. Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(11): 2796–2807. doi: 10.1109/TSP.2003.818204.
- [17] CHEN R, HEATH R W, and ANDREWS J G. Transmit selection diversity for unitary precoded multiuser spatial multiplexing systems with linear receivers[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(3): 1159–1171. doi: 10.1109/TSP.2006.887147.
- [18] LE N P, SAFAEI F, and TRAN L C. Maximising energy efficiency in antenna selection MIMO wireless systems subject to QoS constraints[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(16): 1290–1292. doi: 10.1049/el.2015.1304.
- [19] AMADORI P V and MASOUROS C. Interference driven antenna selection for massive multi-user MIMO[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 5944–5958. doi: 10.1109/TVT.2015.2477457.
- [20] 李洁. 基于天线选择技术的 Massive MIMO 系统能效优化问题研究[D]. [硕士学位论文], 郑州大学, 2015: 13–49.
- LI Jie. Research on efficiency optimization of massive MIMO systems with antenna selection technology[D]. [Master dissertation], Zhengzhou University, 2015: 13–49.
- 王琦: 女, 1990 年生, 博士生, 研究方向为毫米波无线通信、大规模 MIMO 信道建模、毫米波人体阻挡模型等.
- 赵雄文: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线信道建模和实验、无线通信系统、电磁场理论及其应用、频谱管理和干扰协调技术等.
- 张蕊: 女, 1979 年生, 女, 高级工程师, 主要研究方向为对流层电波传播特性、包括波导传播、对流层散射传播、移动信道传播特性等.
- 李树: 男, 1991 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 信道建模、毫米波通信、高分辨率算法等.
- 王蒙军: 男, 1973 年生, 高级工程师, 主要研究方向为移动通信、高频段通信、MIMO 传输技术等.
- 孙韶辉: 男, 1972 年生, 高级工程师, 主要研究方向为 LTE 和第 5 代移动通信关键技术等.