

文章编号: 2096-1472(2016)-06-08-05

基于“四色原理”的蜂窝小区分配及干扰对比

李娜, 魏江平, 赵冰冰, 张巍, 袁伟娜

(华东理工大学电子与通信工程系, 上海 200237)

摘要: 针对在Massive MIMO系统中限制系统的码速率的主要因素是不同小区间的干扰, 提出了基于“四色原理”结合频分和码分并结合软频率复用(SFR)的蜂窝系统模型, 并利用扇区划分采用定向天线提高系统容量。此模型增加了复用同一资源的小区之间的距离, 减轻小区间的干扰。由于码分、频分结合使用, 相比于仅用一种资源的复用技术提高通信系统的可靠性。

关键词: 四色原理; 蜂窝系统; Massive MIMO; 软频率复用

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

Cell Distribution and Interference Contrast Based on the "Four-color Theorem"

LI Na, WEI Jiangping, ZHAO Bingbing, ZHANG Wei, YUAN Weina

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In view of the main factors restricting the code rate of the Massive MIMO system is the interference between different inter-cells, we come up with a model of cellular system that is based on "Four-color Theorem" combined with frequency division, code division and soft frequency reuse (SFR). Meanwhile, we use sector partition and directional antenna to improve the system capacity. This model increases the distance between inter-cells that reuse the same resource, and reduce the interference between the inter-cells. Because of the combination of code division and frequency division, this model improves the reliability of the communication system compared with the reuse technology that uses only one resource.

Keywords: four-color theorem; cellular system; massive MIMO; soft frequency reuse

1 引言(Introduction)

5G是面向2020年后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统。Massive MIMO^[1]无线传输技术可将5G频谱效率和功率效率在4G的基础上得到明显提升。

根据信息论, 天线数量越多, 频谱效率和可靠性提升越明显。因而采用大数量天线是大幅度提高系统容量的有效途径。当基站天线数目较少时, 干扰、噪声、导频污染都会对系统性能造成影响; 当基站天线数目快速增加, 甚至远大于当前服务的UE数目时, 各个信道相应之间将服从大数定理, 可消除小区内非相关噪声和快衰落效应的影响。

在传统MIMO系统中, 通信过程主要受到小区内部其他用户的干扰以及小区间的干扰。但是在Massive MIMO中, 由于基站的天线数很大, 相同小区中不同用户的信道趋于正交, 因此相同的小区中不同用户之间的干扰可以忽略不计, 换言之, Massive MIMO系统中限制系统码速率的主要因素是

不同小区间的干扰^[2]。

为了解决在天线数目快速增加时, 小区间的干扰程度也急剧增加, 使得通信可靠性得不到保证的问题, 本文提出了基于“四色原理”结合频分和码分的蜂窝系统模型^[3]。

2 蜂窝小区频率资源分配方案(Scheme of frequency resource allocation)

在给定固定的可利用频带内, 随着频道数量的增加, 每个频道的带宽会减小。以联通的标准, 用于通信的带宽只有40MHz, 为了防止频带重叠, 安全隔离带为5MHz。由于隔离带的存在, 明显造成频带资源浪费, 例如使用四种频率需要三个隔离带, 约占据总带宽的一半。图1为四种方案的频带分配情况。如果不对整个蜂窝系统进行资源划分, 所有小区使用相同的频率资源, 那么落到接收机通带内的与有用信号频率相同的所有无用信号就会出现严重的同频干扰问题。这些无用信号和有用信号一样, 在接收机中经放大, 变频而落

到中频通带内，因此只要在接收机输入端存在同频干扰，接收系统就无法滤除和抑制它。为了解决小区簇内同频干扰问题，可在小区簇内复用七种不同码字。如图1所示。

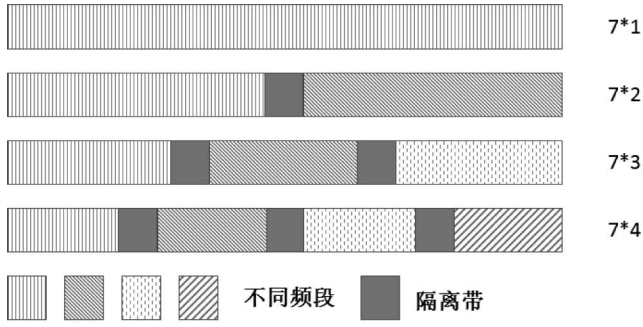


图1 四种方案的频带图

Fig.1 Frequency band chart of 4 schemes

3 基于码分频分结合的资源分配方案(Scheme of resource allocation based on the which combines frequency division and code division)

本文基于码分频分结合，分别研究7*1、7*2、7*3、7*4的资源分配方案，可达到消除同频干扰问题。

资源分配图如图2—图5所示。1—7表示七种不同码字，四种阴影代表不同频段。箭头表示周围使用相同资源的基站对中心的样本蜂窝的干扰。

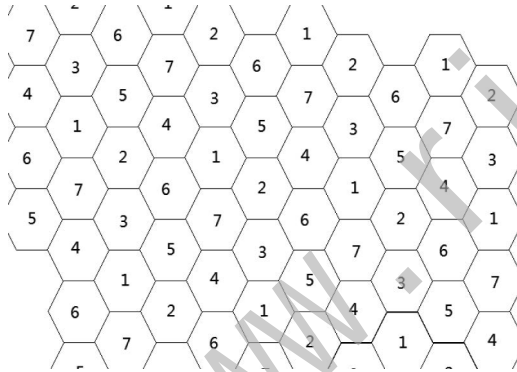


图2 7*1方案蜂窝小区资源分配图

Fig.2 Cell resource allocation chart of 7*1 scheme

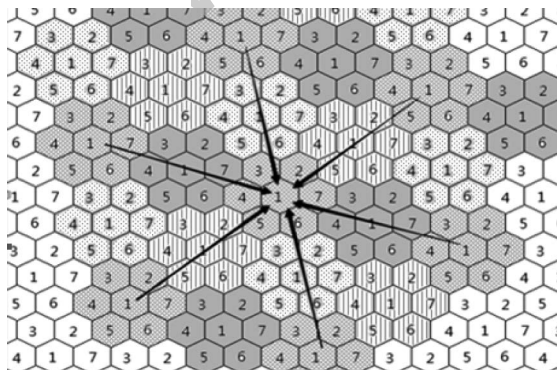


图3 7*4方案蜂窝小区资源分配图

Fig.3 Cell resource allocation chart of 7*4 scheme

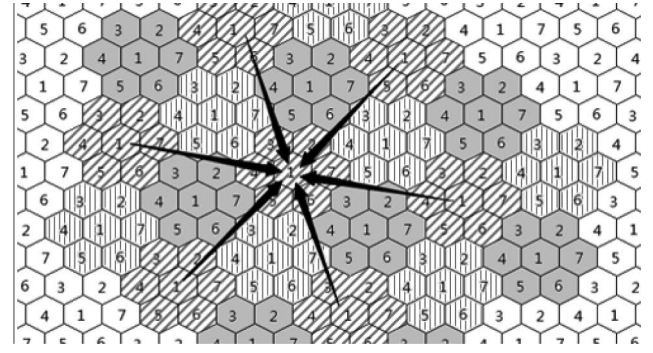


图4 7*3方案蜂窝小区资源分配图

Fig.4 Cell resource allocation chart of 7*3 scheme

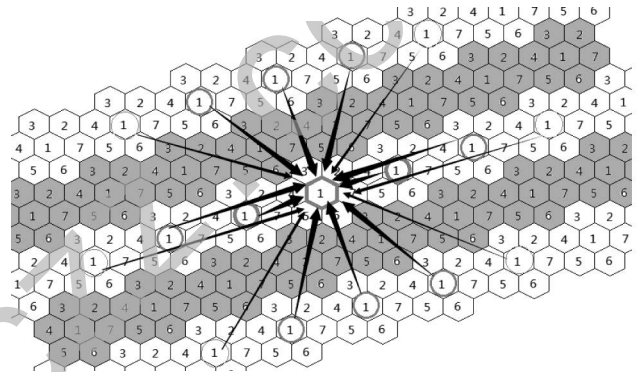


图5 7*2方案蜂窝小区资源分配图

Fig.5 Cell resource allocation chart of 7*2 scheme

3.1 7*1分配方案

如图2提出的模型是标准正六边形小区结构，小区的基本构成是把某种码字分配给某个小区之后，为了不产生干扰则每隔开一定距离 d 进行码字再复用。小区簇 L 使用七种不同的码字，所有小区簇使用相同的频段资源，现假设如图所示某小区簇中心为 L ，可与这小区重复使用同一码字的六个小区的中心与 L 之间的距离为 d ，小区半径为 r 。

重复小区数 N 可以用式(1)表示：

$$d = \sqrt{3Nr} \quad (1)$$

在通信中对连续信道容量定义如下：

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (\text{b/s}) \quad (2)$$

式中， S 为信号平均功率(W)； B 为带宽(Hz)； n_0 为噪声单边功率谱密度(W/Hz)。

而现实中蜂窝系统由于受到相邻基站干扰信号的影响，根据文献[4]将SNR推广为SINR，将式(2)推广为：

$$C = B \log_2 (1 + \text{SINR}) \quad (\text{b/s}) \quad (3)$$

式中， SINR 为接收信号总功率和噪声加干扰信号总功率的比值，计算公式为：

$$SINR = \frac{Pr}{Pr_{others} + P(f)_{noise} * B} \quad (4)$$

$$Pr = -\log r^{3.65} \text{ (dB)} \quad (5)$$

同理可得 Pr_{others} 。

式中, Pr 代表用户接受本基站的有效功率; $P(f)_{noise}$ 代表无线通信信道中噪声功率谱密度; Pr_{others} 代表本基站中某用户接收到其他基站产生的干扰信号功率。

由于此方案在小区簇内采用七种码字和相同的频率资源,虽然使用资源较少,但小区簇之间会存在同频干扰问题,并且会使使用相同资源的小区间的距离 d 过小,使小区间的干扰比较严重,降低了系统容量和通信系统的可靠性。

仿真结果表明随着噪声功率谱密度的增加,系统容量逐渐降低,且此方案中小区之间受到的干扰过于严重,为了解决此问题,在7*1方案基础上提出了基于“四色原理”的7*4方案。

3.2 7*4分配方案

“四色原理”是一个著名的数学定理,即每个平面地图都可以只用四种颜色来染色,而且没有两个邻接的区域颜色相同。现实生活中的地形结构更加复杂,蜂窝小区结构不是严格的六边形,通信过程会受到各种环境因素(建筑、玻璃反射等)的影响。四色原理能使任意两个相邻区域使用不同的频率资源,减少它们之间的干扰,基于此思想每个频段对应一种颜色,每个小区簇使用相同的频段,各小区簇之间复用四种不同的频段资源,使两两相邻的小区簇使用的频段不同,增加了使用相同频率资源小区间的距离 d ,并且小区簇内部仍七种不同的码字。7*4方案如图6所示。

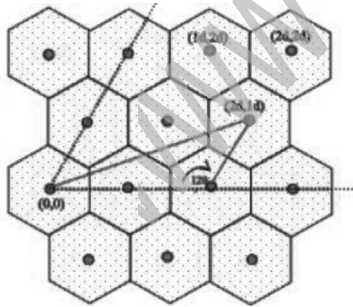


图6 蜂窝小区图

Fig.6 Cell of origin chart

如图6所示,任意两小区中心之间的距离 d 可以用公式(6)计算:

$$d((id, jd), (0,0)) = \sqrt{i^2 d^2 + j^2 d^2 - 2ij d^2 \cos(120^\circ)} = d\sqrt{i^2 + j^2 + ij} \quad (6)$$

通过对此方案的研究仿真发现,相对于7*1方案,7*4方案使用了四种不同的频段,增加了使用相同资源小区间的距离,有效地降低了小区间的干扰,但系统容量却远不如7*1方

案。

信道带宽的减小会使整个系统容量降低,且信道带宽的影响大于信噪比的影响。可通过公式(7)得到证明:

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B(1 + \frac{S}{n_0 B}) \rightarrow \frac{S}{n_0} \log_2 e = 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (7)$$

为了解决使用隔离带数量多降低了频带利用率而造成系统容量过度减小的问题,基于以上研究进一步提出了7*3方案。

3.3 7*3分配方案

由于此模型蜂窝小区考虑理想情况下规则分布,每个小区周围的小区数目都是偶数,使用三种频段资源就可以达到相邻小区簇使用不同资源的目的,使之干扰较小。且此方案仅需两个隔离带,增加了通信的有效带宽,进一步提高了系统容量。

7*3方案模型如图4所示,小区簇内仍然使用七种不同的码字,小区簇之间复用三种不同的频段资源,相对有效的增加了使用相同频率资源小区之间的距离 d 。

仿真结果表明:7*3方案对干扰的降低程度接近于7*4方案,但较7*4方案容量有所提升,虽然干扰降低到了理想程度,相对于7*1方案的系统容量还是有待改进。

3.4 7*2分配方案

在研究了7*3方案后,为了研究复用频段数对系统的容量及干扰的总体影响,以及可以更好地减少成本的使用,再减少一个频段资源的复用,提出7*2的方案,如图5所示。

7*2方案在通信中比较适合应用于偏远地区,因为其地广人稀,在相同时间段同时进行通信的用户数不多,基站配置数目也可以不用很多,可以保证通信的可靠性。但是通过对7*2方案的研究发现:使用相同频率资源的相邻小区间的距离较小,一个小区会受到周围较多小区的干扰,其受到的干扰程度较大。7*2方案若是应用在人口密集的大城市中,不仅通信系统的可靠性得不到很好的保证,且整个系统的容量也会受到影响,降低了系统的有效性。

4 软频率复用和定向天线提高系统容量的改进方案 (Improvement in system capacity by using SFR and directional antennas)

4.1 结合软频率复用技术方案

上述三种方案为了减小干扰采用频分,造成系统容量的牺牲。为提高此模型的性能,结合使用软频率复用^[5](SFR:Soft Frequency Reuse)技术,增加系统容量,改进了之前的方案,提出了更加理想的模型如图7所示。

软频率复用技术结合了2G、3G频率复用技术的特点,来

解决频谱资源地区性分配^[6]的问题，进一步提高了小区频谱的利用率，增加了小区的容量。在7*3方案中结合使用软频率复用技术。该技术对某些子频带上的功率只是部分减少，而不是完全限制使用。在软频率复用技术SFR方案里，一个频率不再是被定义为用或者不用，而是用功率门限规定了其在多大程度上被使用，复用因子可以在1—3平滑过渡。将整个频带分成主载波和副载波，通常副载波分配给小区边缘用户，复用因子大于1，主载波可用于小区中间的所有用户，但是属于其他小区的主频必须降低功率发送。即用功率模版规定了其使用程度，因此无论在小区边缘还是在小区内部，都可以获得更大的带宽和频谱效率。

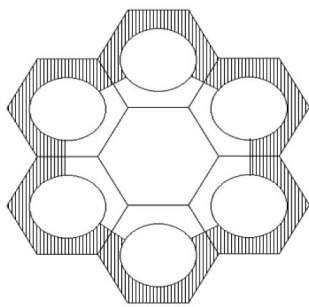


图7 一种新型的软频率复用方案

Fig.7 Innovative soft frequency reuse scheme

此模型将传统的软频率复用改进为小区簇的新型软频率复用。小区内部与小区边缘情况非常不同，在小区簇的内部使用全功率发送，在小区簇边缘降低功率发送。因为功率的分配会影响信道容量的大小，可用以下公式证明此原理：

$$\lim_{S \rightarrow \infty} C = \lim_{S \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \rightarrow \infty \quad (8)$$

所以此方案达到了小区内部期望信号功率大于干扰信号小的目的。

根据仿真结果：与软频率复用技术结合的模式确实有效的增加了整个系统的容量。

4.2 采用定向天线改进方案

在以上几个方案中每个小区受到的干扰都是来自各个方向的，为了进一步减轻小区受到的干扰，可以考虑采用扇区划分方案即采用120°扇区天线将一个全向小区分为三个扇区，扇区划分方案实际是将基站的发射功率降低为原来1/3，这样使得每个小区只受到来自120°方向范围的干扰，可把背景干扰减小到原来的1/3，使系统容量提高接近3倍。

5 仿真结果及其分析(Simulation result and analysis)

5.1 系统总体容量和信噪比的关系仿真

图8是研究7*1、7*2、7*3、7*4四个方案中系统的总体容

量随着信噪比的变化而变化的仿真结果图。

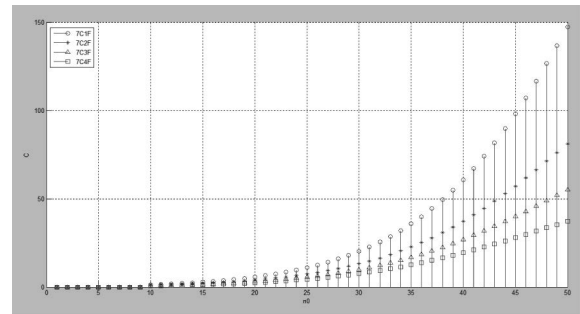


图8 系统容量仿真图

Fig.8 System capacity simulation diagram

图8横坐标是噪声功率谱密度 $-N_0(-dB)$ (即横坐标数值越大，噪声功率越小)，纵坐标是系统容量。根据以上仿真结果，分析可知：

①系统的容量随噪声功率谱密度的降低而增加，在噪声比较大的情况下系统容量增加比较缓慢，在系统信噪比小于某个值时，系统的容量随着信噪比的减小而迅速增加。这与已知减小噪声功率可以增加信道容量的理论推导也是符合的。

$$\lim_{S \rightarrow \infty} C = \lim_{S \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \rightarrow \infty \quad (9)$$

②在噪声功率比较大时，四种方案的系统容量差距不大，这是由于此时噪声功率的影响占主导地位。当噪声功率小于一定值时，差距较明显：以7*1为基准，7*2方案、7*3方案、7*4方案分别约为它的1/2、1/3、1/4，此时带宽的影响起主导作用，因为用于通信的带宽有限，为了防止频带重叠，需要使用安全隔离带，随着复用频率数量的增加，安全隔离带数量增加，导致有效带宽减少。

5.2 小区间干扰程度和用户数的关系仿真

在一个蜂窝系统中，信道中7*1、7*2、7*3、7*4四种方案的干扰程度受用户数的影响的仿真结果，如图9所示。

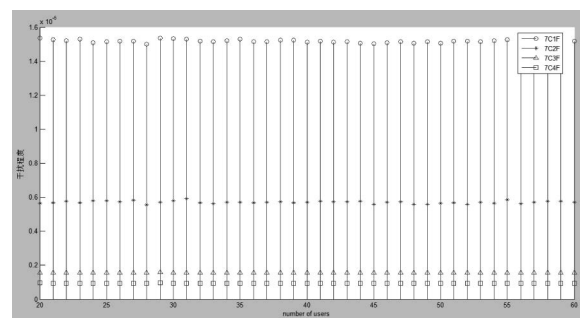


图9 干扰程度仿真图

Fig.9 Degree of interference simulation diagram

以上仿真图横坐标是用户数量，纵坐标是干扰程度(10^{-5})，

根据对仿真图的分析可知：干扰程度几乎不受用户数量的影响。以7*1方案为基准，其他方案干扰程度依次降低，7*2、7*3和7*4分别约为7*1的1/3、1/10、1/20。可见7*3、7*4方案干扰程度接近，且远小于7*1、7*2方案。

由图1和图2可知：

①在四种方案设计中，虽然7*1的容量最大，但其干扰程度也远大于其他方案，增加了误码率，不能保证通信系统的可靠性。

②7*2方案复用了两种频率，干扰并没有降到理想程度，且系统容量较7*3、7*4方案也没有显著提升。

③相比于7*1和7*2方案，7*3方案的系统容量虽有所降低，但7*3方案的干扰程度远小于以上两种方案。以牺牲较小容量为代价，明显提升了通信系统的可靠性。

④7*4方案复用了更多的频率资源，但其干扰程度与7*3方案相近，然而系统容量却远小于以上三种方案。

综合以上分析，7*3方案复用了三种频率资源，虽牺牲了一部分系统容量，但其受到的干扰程度得到了很好的限制。并且此方案中系统的传输速率在可接受的范围内，也降低了系统的误码率。因此，7*3方案整体性能较为优越。

5.3 结合软频率复用技术后系统总体容量和信噪比的关系仿真

四种方案结合软频率复用技术仿真结果图，如图10所示。

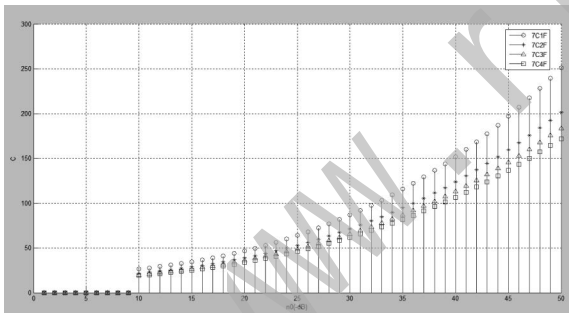


图10 结合软频率复用的容量仿真图

Fig.10 Capacity simulation diagram of schemes combined with the soft frequency reuse

上图横坐标是噪声功率谱密度 $-N_0$ (dB)(即横坐标数值越大，噪声功率越小)，纵坐标是系统容量。根据以上仿真结果，分析可知：

①系统的容量随噪声功率谱密度的降低而增加，在噪声比较大的情况下系统容量增加比较缓慢，在系统信噪比小于某个值时，系统的容量随着信噪比的减小而迅速增加。

②在噪声功率比较小时，结合使用了软频率复用技术后，7*2、7*3、7*4方案的系统容量得到显著提升，接近7*1方案。

综合以上分析，本文提出了减轻蜂窝系统中小区间干扰的最佳方案，即基于“四色原理”的7*3结合软频率复用技术方案。此方案有效地控制了系统干扰程度增加了通信系统的可靠性，同时又保证了系统容量。

6 结论(Conclusion)

本文提出了基于“四色原理”同时使用频分和码分并结合软频率复用技术对蜂窝小区进行资源分配的方案模型，对7*1、7*2、7*3、7*4四种方案，以及结合软频率复用技术的方案进行了仿真，提出了基于“四色原理”的7*3结合软频率复用技术方案，研究发现此方案是性能最优。并且可以利用扇区划分进一步提高系统容量。以上模型有效减少了小区间的干扰，并有效地保证了通信系统的容量，增加通信的有效性。

参考文献(References)

- [1] Shaoshi Yang, et al. Approximate Bayesian Probabilistic-Data-Association-Aided Iterative Detection for MIMO Systems Using Arbitrary M-ary Modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1228-1240.
- [2] Larsson E., et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(2): 186-195.
- [3] Bembé, et al. Uplink spectrum resource allocation in heterogeneous networks (small cell/macrocell)[J]. Annals of telecommunications, 2015, 70(7/8): 311-319.
- [4] 熊丹. 多小区蜂窝系统中用户能效的建模仿真分析[D]. 江苏大学, 2014.
- [5] Suman Kumar, et al. Impact of Correlated Interferers on Coverage and Rate of FFR and SFR Schemes[J]. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, 2016: 434-440.
- [6] 陆冬妹. B3G/4G中的软频率复用方案及算法研究[J]. 通讯世界, 2015, 16: 1-2.

作者简介：

李娜(1995-), 女, 本科生. 研究领域: 通信技术.
 魏江平(1995-), 女, 本科生. 研究领域: 通信技术.
 赵冰冰(1994-), 女, 本科生. 研究领域: 通信技术.
 张巍(1995-), 男, 本科生. 研究领域: 通信技术.
 袁伟娜(1979-), 女, 博士, 副教授. 研究领域: 通信技术.