



5G 过载零星传输系统中的多用户检测技术性能分析

马国玉¹, 艾渤¹, 胡显安¹, 蒋笑冰²

(1. 北京交通大学轨道交通与安全国家重点实验室, 北京 100044;

2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

摘要: 目前, 机器通信具有大规模连接及零星传输的特点, 大规模连接导致系统必须使用非正交的接入方式, 而零星传输的特性则使接入用户行为具有稀疏性。基于以上特性, 相关文献提出了基于压缩感知的多用户检测技术。从用户行为及用户数据的检测性能方面对多用户检测技术进行分析研究, 并通过仿真分析得出新的结论: 尽管非正交扩频码的互相关性会影响接收端对用户行为及用户数据的检测性能, 但 CS-MUD 仍然可以有效地支持大规模连接用户下稀疏传输的场景。

关键词: 机器通信; 非正交扩频; 压缩感知

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016223

Performance analysis of multi-user detection of 5G overloaded sporadic system

MA Guoyu¹, AI Bo¹, HU Xian'an¹, JIANG Xiaobing²

1. State Key Lab of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Currently, MTC has two main characteristics: massive connectivity and sporadic transmission. Massive connectivity makes the access behavior non-orthogonal and the sporadic characteristic makes the user activity sparsity. Based on those characteristics, some literatures introduce a corresponding detection technique called compressive sensing based multi-user detection. Performance of multi-user detection technique was analyzed by evaluating the user activity detection performance and the user data detection performance. The simulation results conclude that the detection performance will be influenced by the cross correlation between the non-orthogonal spreading sequences, but CS-MUD can still support the massive connection scenario in which the user activity is sparse.

Key words: machine type communication, non-orthogonal spreading, compressive sensing

收稿日期: 2016-06-28; 修回日期: 2016-08-04

通信作者: 艾渤, boai@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目 (No.2014AA01A706); 北京市科学技术委员会资助项目(No.D151100000115004); 陕西省基础研究基金资助项目(No. 2015JM6320)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program) (No.2014AA01A706), Beijing Science and Technology Commission Project(No.D151100000115004), The Natural Science Base Research Plan in Shaanxi Province of China(No.2015JM6320)

1 引言

随着移动通信在技术层面的飞速发展,消费市场对于通信的需求也随之飞速提升,通信技术也逐渐从之前的以技术为导向转向为以市场为导向。移动通信技术即将在2020年跨入第五代(5G)移动通信时代,消费市场对于未来5G通信的需求不仅包括更高的通信速率、更广的用户覆盖以及更多的接入用户,还包括对诸如高铁等特殊场景的适用性^[1-3]。其中,由于未来物联网(internet of things, IoT)概念逐渐深入人心,大规模机器通信(machine type communication, MTC)将成为未来市场的需求常态。目前,3GPP也致力于增强现行的LTE标准,以满足未来市场对IoT技术的需求^[4]。为了解决未来蜂窝网中大规模IoT设备通信可能产生的拥堵问题,基于竞争的随机接入机制成为物理层对于未来5G中MTC技术的一个研究热点。在这种竞争式的接入机制中,由于接入节点的数量规模庞大,所以有限的时频资源会使系统过载,从而会造成多个数据分组碰撞的现象。但是在IoT技术中,MTC一般传输小尺寸的数据分组,所以其传输方式会呈现一定的零星性^[5]。因此,本文的研究重点集中在这种过载零星传输系统上。这种系统作为一种竞争式随机接入系统的形式,系统内每个用户在不同时间随机地激活并发送数据分组,因此数据分组很有可能在基站接收端发生碰撞,且过载系统的过载率越高,不同用户的数据分组在基站接收端发生碰撞的概率也越高,发生碰撞的数据分组数也越多。如图1所示,一小区内具有单个基站(base station, BS)和 K 个接入用户终端 $UE_1, UE_2, \dots, UE_K$ 。假设用户终端数 K 大于系统的时频资源

数,则该系统为过载系统。这 K 个用户在一段时间内的不同时隙随机地激活并发送数据分组,如 UE_2 在时隙3、4发送数据分组, UE_3 在时隙2、4、6发送数据分组,而 UE_1 在当前时间段没有发送数据分组。在时隙4上,基站就会收到 UE_2, UE_3 两个用户的叠加信号,即 UE_2 与 UE_3 在时隙4发生了数据分组碰撞。

对于聚合点(aggregation point, AP)或基站接收机而言,数据分组的碰撞要借由多用户检测(multi-user detection, MUD)解决,但MUD的前提条件是接收机已知用户行为状态,在传统MUD中是通过用户节点向AP或基站发送请求以获得许可及资源分配来实现的。但是在过载零星传输系统中,这种方式会有大量的控制信令开销,不仅使系统的复杂度增加,更使系统的能量效率变低。然而由图1可知,在零星传输机制中,单位时间内在基站接收端碰撞的数据分组数量很大程度上取决于接入用户的激发概率,且该激发概率一般远小于1,即激活用户的数量一般会远小于接入用户的数量。因此,在一段时间内的用户行为便具有稀疏性,而对于这种稀疏的用户行为,接收端可以利用压缩感知技术进行用户行为检测,从而避免通过用户节点发送请求来获得用户行为状态这种原始方法,进而节省了大量的控制信令开销,提高了系统效率。由此,基于压缩感知的多用户检测(compressed sensing MUD, CS-MUD)技术便应运而生。CS-MUD技术^[6]针对的场景为全载的CDMA系统;而对于过载的情况,参考文献[7]则在参考文献[6]的基础上对CS-MUD技术进行了研究;参考文献[8]对CS-MUD中的算法进行改进,并将其应用在信道估计上;参考文献[9]则进行了另一种改进,使CS-MUD适用于

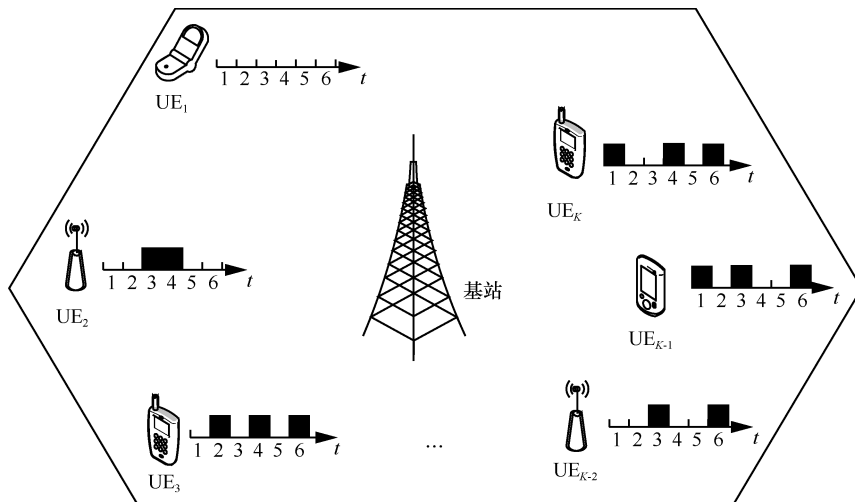


图1 过载小分组传输系统

用户数据分组异步到达的情况;参考文献[10]则利用信道编码对 CS-MUD 的接收机进行了改进,从而使系统具有了更高的检测效率。本文就是基于参考文献[7]及后续工作对 CS-MUD 技术进行分析研究。

2 系统模型

2.1 扩频在过载零星系统中的作用

同参考文献[6]类似,参考文献[7]同样使用了扩频技术。对于这种过载零星传输系统,扩频有以下几点优势:由于系统中传输的数据分组的尺寸一般较小,导致其时间相关性差,而通过扩频可以使小分组的突发式传输变得平滑,从而易于功率控制及链路适应(link adaption),另外,当发射功率变平滑之后,功率控制对调度信息的干扰变小;扩频可以使接收端在多个时频资源上进行相关信号检测,相较于扩频之前需要对多个时频资源进行信号检测,其检测复杂度会有所降低;零星传输机制具有稀疏特性,因此在过载系统中,可以使用非正交扩频码实现接入用户的区分。对于第 3 点优势,包含扩频的过载系统可以称为过载 CDMA 系统,在这种系统中,接入的用户数大于扩频因子数,即扩频码的维度不足以支撑所有的接入用户,于是过载 CDMA 系统便使用非正交的扩频方式^[1]。非正交扩频使不同用户的扩频码之间具有一定的互相关性,这种互相关性会对 AP 或基站接收端的用户检测造成影响,即若不同用户扩频码的互相关性较大,接收端对于接入用户就会出现虚警与漏警现象,即把此时刻不活跃的用户判别为活跃的,或者把此时刻活跃的用户判别为不活跃的,另外还会出现活跃用户之间的错判现象。所以,在过载零星传输系统中,接收端的检测性能除了取决于对数据的接收检测之外,还取决于对用户行为的识别检测,即检测误差包含了用户行为的检测误差和用户数据的检测误差。

2.2 过载零星系统下的 MC-CDMA 模型

为了在过载零星传输系统中体现 LTE 系统的演进性及传承性,本文考虑多载波 CDMA (multi carrier-code division multiple access, MC-CDMA) 的方式,而多载波将考虑 OFDM 中的正交子载波组,即 OFDM-CDMA 的方式。在传统 LTE 中,上行系统采用单载波形式的 SC-FDMA,其原因是之前用户设备并不能支持 OFDM,且 OFDM 具有较大的峰均功率比(peak to average power ratio, PAPR),但随着移动设备的更新换代,未来移动端的放大器可以承受较大

的 PAPR 来支持 OFDM。所以对于上行系统,采用 MC-CDMA 是合理的。在 MC-CDMA 中,首先考虑资源的映射问题,如图 2 所示,一个帧的物理资源块(physical resource block, PRB)具有 L_p+L 个符号时隙。其中,前 L_p 个符号时隙用来传输信道估计所用的前导符号等控制信令,下标 p 表示前导(preamble)符号,后 L 个符号用来传输数据符号,每个符号时隙包含 N_s 个子载波,下标 s 表示所有子载波(subcarrier),承载每个用户数据符号扩频后的全部 N_s 个码片,即扩频因子 $N_c=N_s$,下标 c 表示正交扩频码(code)。如此,一个 PRB 将具有 $(L_p+L) \times N_s$ 个资源单位来承载接入用户的 L_p 个控制信令符号和 L 个数据符号,为了简化后面的分析,假设信道信息在基站接收端是已知的,所以后面将不再讨论 L_p 个控制信令符号。

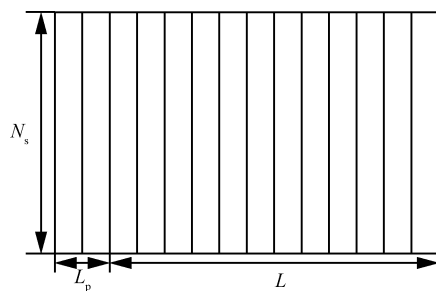


图 2 MC-CDMA 的 PRB 映射

对于一个 PRB 上的 MC-CDMA,基站在上行接收到信号后,将其循环前缀(cyclic prefix, CP)移除并进行离散傅里叶变换(DFT),得到接收信号的频域形式 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N_s \times L}$ 为:

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k \mathbf{S}_k \mathbf{D}_k + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{D}_k \in \mathbb{C}^{1 \times L}$ 为接入用户 k 的发送信号,在小分组传输系统中,每个用户在每一个传输间隔(transmission time interval, TTI) 上仅有 p_a 的概率来激活发送数据,下标 a 表示激活(active)状态。从二项分布可知,平均一个 TTI 中仅有 $K \times p_a$ 个接入用户在发送信号,而其他用户都处于空闲状态。因此发送信号 $\mathbf{X}$ 平均仅在 $K \times p_a$ 行上是非零的。 $\mathbf{S}_k \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ 代表了用户 k 的长为 N_s 非正交扩频码,由根为 $2 \times \lceil K / N_s \rceil + 1$ 、长为 N_s 的 Zadoff-Chu 序列循环移位可得。 $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_s \times N_s}$ 为一个对角矩阵,即:

$$\mathbf{H}_k = \text{diag}[\mathbf{h}_k] \quad (2)$$

其中, $\mathbf{h}_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,N_s}]$ 对应了 N_s 个子载波的信道衰落。 $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{N_s \times L}$ 为均值为 0、方差为 $N_0 \mathbf{I}$ 的加性高斯噪声。系统模型可以写成向量形式,为:



$$\mathbf{Y}=\mathbf{A}\mathbf{X}+\mathbf{N} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ 为 K 个接入用户的发送信号, $\mathbf{X}$ 的第 k 行代表了第 k 个用户发送的数据符号, $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N_s \times K}$ 为融合信道及非正交扩频码的测量矩阵, 此矩阵的特性也将决定 CS-MUD 的检测性能^[12]。

2.3 过载零星传输系统模块

由于本文考虑在发送端采用 MC-CDMA, 因此在接收端便可采用 CS-MUD 技术, 其系统模块如图 3 所示。

由于 MIMO 不是本文的考虑重点, 所以本文假设发射端和接收端都使用单天线, 因此层映射、预编码在系统中并不起作用。另外, 本文假设信道估计是理想的, 即基站接收端知道信道状态信息 $\mathbf{H}$ 。最后值得注意的是, 基站接收端采取了 CS-MUD 技术, 即群正交匹配追踪 (group orthogonal matching pursuit, GOMP) 算法, 这种算法可以很大程度上减少非正交扩频对多用户检测性能的影响。

3 基于压缩感知的多用户检测

3.1 正交匹配追踪算法

传统压缩感知所用的为正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP) 算法, 即探究每个用户的每个数据符号的稀疏性。以参考文献[7]中的例子来说, 假设其稀疏基 (sparsity basis) 矩阵如下所示。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} r_{1,1,1} & & r_{2,1,1} & & \\ r_{1,1,2} & & r_{2,1,2} & & \\ r_{1,1,3} & r_{1,2,1} & r_{2,1,3} & r_{2,2,1} & \\ & r_{1,2,2} & & r_{2,2,2} & \\ & r_{1,2,3} & r_{1,3,1} & r_{2,2,3} & r_{2,3,1} \\ & & r_{1,3,2} & & r_{2,3,2} \\ & & r_{1,3,3} & & r_{2,3,3} \end{pmatrix} \quad (4)$$

矩阵 $\mathbf{A}$ 由时域信道卷积矩阵与扩频序列相乘而得, 其中, $r_{k,l,i}$ 为第 k 个用户第 l 个数据符号的第 i 个码片。在传统 OMP 中, 接收机将对测量矩阵 $\mathbf{A}$ 的每一列进行相关, 来

探究每个用户每个符号的稀疏性。然而, 在过载零星传输系统中, 如果某个用户没有被激活, 则该用户在观测矩阵中所有符号的所有码片都将为 0。因此, 观测矩阵在该特定系统下会呈现一种块稀疏性 (block sparsity), 所以接收机可以直接对观测矩阵 $\mathbf{A}$ 中所有属于某个用户的列进行相关, 而非对单个矩阵列进行相关, 以充分利用其块稀疏性, 因此, GOMP 便应运而生。显而易见的是, 由于其对块稀疏性的充分利用, GOMP 相较于 OMP 在计算复杂度上有所降低, 同时其检测性能也会有所提升。

在本文系统中, 除了在接收端完美信道状态信息的假设外, 这里还假设了 CS-MUD 中激活用户的个数 K_a 是已知的。如果其激活用户的个数未知, 则需要通过设定功率门限, 判别接收信号与接收端本地参考序列的相关值来获得。由上文可知, 即使在 $K > N_s$ 的情况下, GOMP 算法可以利用多用户信号 $\mathbf{X}$ 的稀疏性, 从 $N_s \times L$ 个观察值 $\mathbf{Y}$ 中重建 K 个多用户信号 $\mathbf{X}$ 。其算法流程如图 4 所示^[13]。

其中, $\overline{\mathbf{G}}^{I-1}$ 指 $\mathbf{G}^{I-1}$ 的补集, $\mathbf{A}^H$ 指 $\mathbf{A}$ 的 Hermitian 转置, $\mathbf{A}_G^+$ 代表 $\mathbf{A}_G$ 的伪逆。从算法描述中可以看到, GOMP 采用类似串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 的方式, 迭代式地对多用户碰撞的叠加信号进行先检测后恢复, 最后再逐个从相应的残余信号解出激活用户的信号。这里激活用户的数量 K_a 可以看作发送信号的稀疏度, 而为了利用压缩感知, K_a 必须足够小来最小化发送信号的 0 范数, 以满足压缩感知的基本要求, 所以其用户激发概率 p_a 通常被设定为远小于 1 的数, 才能重建出发送信号 $\mathbf{X}$ 。

3.2 基于压缩感知的多用户检测性能分析

前文提到, 过载零星传输系统中存在两种错误: 一种是用用户行为检测错误, 即由于非正交扩频码的互相关性过高使 GOMP 算法中的 $k_{\max}$ 检测出现错误, 从而出现了检测用户时的虚警与漏警等误检现象; 另一种是用户数据的检测错误, 即由于噪声等原因使解相关出现误码现象。对于

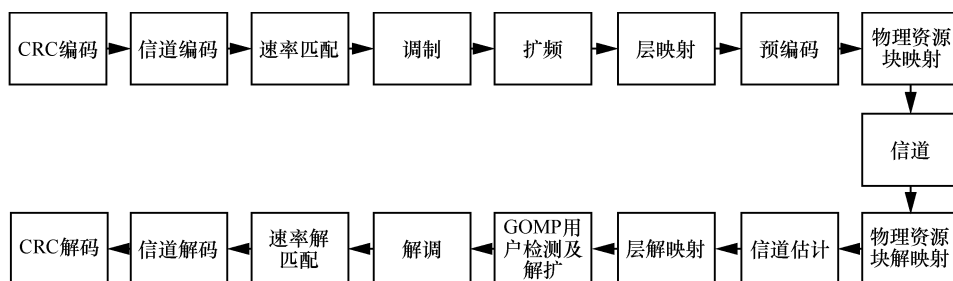


图 3 基于 CS-MUD 的传输系统模块

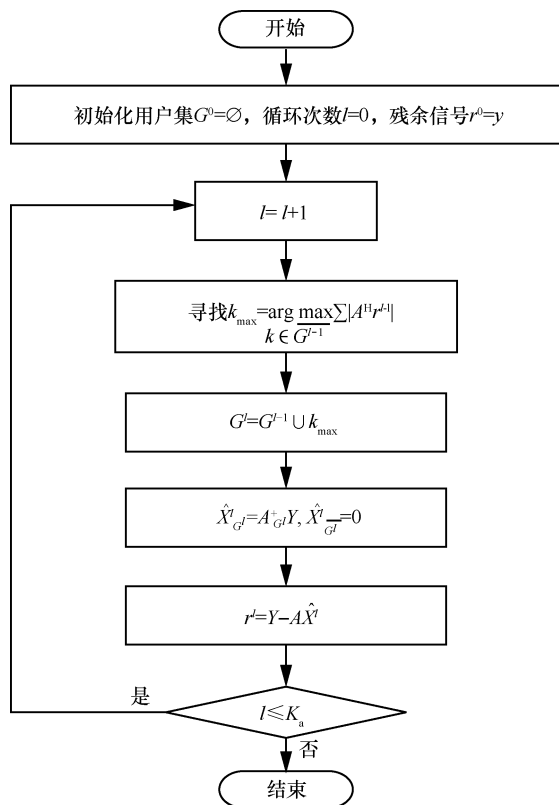


图4 GOMP 算法流程

第一种错误,可以通过合理地设计非正交扩频码来避免,所以这里暂且不做理论分析。对于第二种错误,可以得到 G^l 中用户的联合检测值 $\hat{X}_{G^l}^l$ 为:

$$\hat{X}_{G^l}^l = X_{G^l}^l + A_{G^l}^+ N \quad (5)$$

这里 $\hat{X}_{G^l}^l \in \mathbb{C}^{K_a \times L}$ 指 G^l 中用户的 L 个估计符号, $X_{G^l}^l \in \mathbb{C}^{K_a \times L}$ 指 G^l 中用户的 L 个原发送符号,而后可以得到 G^l 中用户 k 接收信号的有效 E_s/N_0 为:

$$\overline{(E_s/N_0)_k} = \frac{LE_s}{(A_{G^l}^+)_k NN^H (A_{G^l}^+)_k^H} \quad (6)$$

这里, E_s 指单个发送符号的能量,另外可以看到 NN^H 是一个 $N_s \times N_s$ 的 Wishart 矩阵 $\mathcal{W}(N_s, L)$, 另外, $(A_{G^l}^+)_k$ 为一个 $1 \times N_s$ 维的向量,所以由参考文献[14]中的引理可得:

$$(A_{G^l}^+)_k NN^H (A_{G^l}^+)_k^H \sim (A_{G^l}^+)_k N_0 I (A_{G^l}^+)_k^H \chi_L^2 \quad (7)$$

这里 χ_L^2 指自由度(degree of freedom, DOF)为 L 的 Chi-Square 分布。因此,可得其有效噪声的能量为 $\|(A_{G^l}^+)_k\|^2 N_0 L$ 。因此,可以得到有效 E_s/N_0 为:

$$\overline{(E_s/N_0)_k} = \frac{E_s}{N_0} \frac{1}{\|(A_{G^l}^+)_k\|^2} \quad (8)$$

由式(8)可以看到, $\|(A_{G^l}^+)_k\|^2$ 项对噪声的影响里有扩频增益,而且以往 LS-Filtering 或 ZF 对噪声的增强效应在这里变为对扩频增益的削弱。值得注意的是,非正交扩频序列的互相关性对扩频增益也有削弱作用,这将在后面的仿真中证实。

4 链路级仿真

对于过载零星传输系统,本文对其系统进行了链路级的仿真验证。在链路级层面, LTE 系统的上行和下行的不同之处在于上行运用 SC-FDMA 而下行运用了 OFDM, 所以为了方便仿真过载零星传输系统中 OFDM 信号的发送, 本文使用 LTE 下行链路传输平台, 其仿真参数见表 1。

表1 过载小分组传输系统仿真参数

参数	取值
载波频率/GHz	2
系统带宽/kHz	195
物理资源块数	13
扩频因子	13
传输时隙/ms	1
传输比特率/(kbit·s ⁻¹)	156
CRC	CRC24A
信道编码	Turbo 码
AMC	否
调制策略	QPSK
扩频序列	Zadoff-Chu 序列
过载率	400%
ZC 根值	3、5、7、9
信道估计	理想
HARQ	否

该仿真采用 13 个 PRB 来传输数据, 每个 PRB 占用 15 kHz 的带宽, 于是其总带宽为 195 kHz。另外, 该仿真将原先 LTE 中留给解调参考信号 (demodulation reference signal, DMRS) 和小区参考信号 (cell reference signal, CRS) 的资源单元全部用来映射数据, 同时, 由于扩频采用 Zadoff-Chu 序列, 而素数 Zadoff-Chu 序列循环移位得出的扩频码具有很好的正交性, 所以将扩频因子设为 13, 并设定 1 个 PRB 具有 13 个子载波来承载扩频码片。除此之外, 本文没有设定自适应调制编码 (adaptive modulation and coding, AMC) 模式, 而是将 MCS 固定为 QPSK 调制及码率为 1/2 的 Turbo 码。在该仿真中, 本文分析过载率为 400% 时以及 ETU 和 EPA 信道下, 2、3、4 个用户碰撞的情



况,所以本文将仿真中的接收信号设定为 2、3 或 4 个用户信号的叠加。同时,本文还将仿真过载率为 400% 时 EPA 信道下两用户在不同移动速度下的碰撞性能。

图 5 为 ETU 信道下不同激活用户数的 CS-MUD 性能。首先,ETU 信道的最大时延为 $5 \mu\text{s}$ ^[15,16],则其信道相干带宽为 200 kHz,而系统总带宽为 195 kHz,所以其属于平坦衰落,因此这里可以先不考虑信道对非正交扩频码之间互相关性的影响,即设定信道状态信息在接收端是已知的。由图 5 可以看出,当用户数为 2 时,系统具有良好的检测性能,但其性能相较于 100% 负载情况时有所下降,主要来自式(8)中 $\|(A_{G'}^+)_k\|^2$ 项对扩频增益的削弱。当激活用户增加到 3 个时,可以发现系统性能在高信噪比下出现了误码平底,这是因为当 3 个用户同时发送数据时,CS-MUD 出现了用户检测错误。该错误主要来自于 400% 过载率下非正交扩频码之间的互相关性,即非正交扩频码的互相关性对 CS-MUD 产生了干扰,而这种干扰将会影响用户身份的检测。当激活用户数增加到 4 个时,检测性能将会大幅下降,且会较早地出现平底。因此,非正交扩频码的非相关性对 CS-MUD 的干扰将会随着激活用户数量的增加而增加。

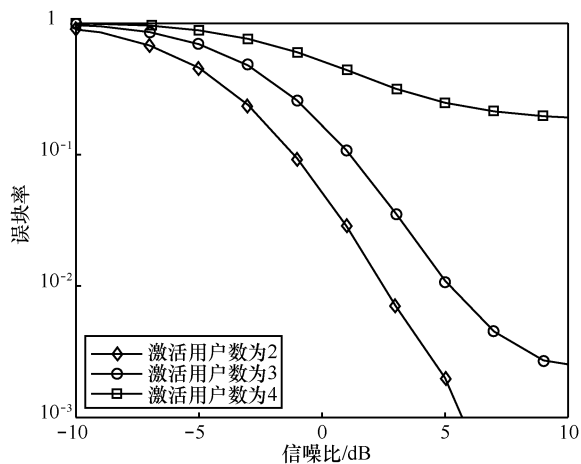


图 5 过载率为 400% 时 ETU 信道下不同激活用户数的比较

图 6 展示了 EPA 信道下不同激活用户的性能。EPA 信道的最大时延为 410 ns,所以其相干带宽仍大于系统的总带宽而使信道属于平坦衰落。从图 6 中可以看出,无论激活用户数为 2、3 或 4,系统在 EPA 信道下的检测性能相较于 ETU 信道都有所下降,且当激活用户数为 4 时,系统的性能相较于激活用户数为 2 或 3 时依然有明显的下降并会出现平底。但是与 ETU 信道不同的是,当激活用户数为 3 时,系统并没有出现平底,而是相对于 2 个激活用户

下的情况保持 2 dB 左右的性能下降。该下降依旧是由于 $\|(A_{G'}^+)_k\|^2$ 项对扩频增益的削弱。

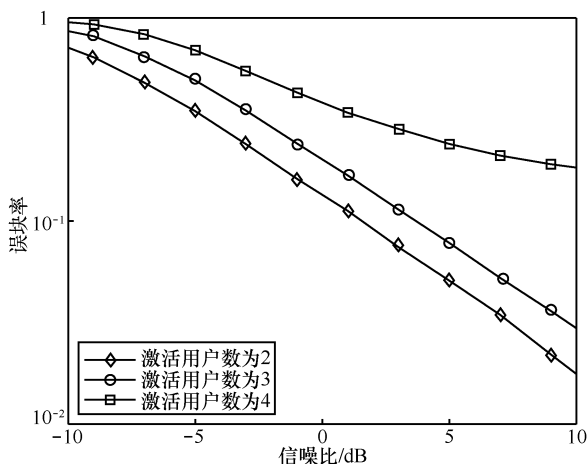


图 6 过载率为 400% 时 EPA 信道下不同激活用户数的比较

最后,本文仿真了系统在 EPA 信道下针对不同的用户移动速度的接收检测性能。从图 7 可以看到,当移动速度在 30 km/h 时,移动速度对 CS-MUD 的检测性能影响有限,但当速度增加到 100 km/h 时,性能出现了平底,即系统出现了用户检测错误。因此,目前的 CS-MUD 并不适用于高速移动的情况。

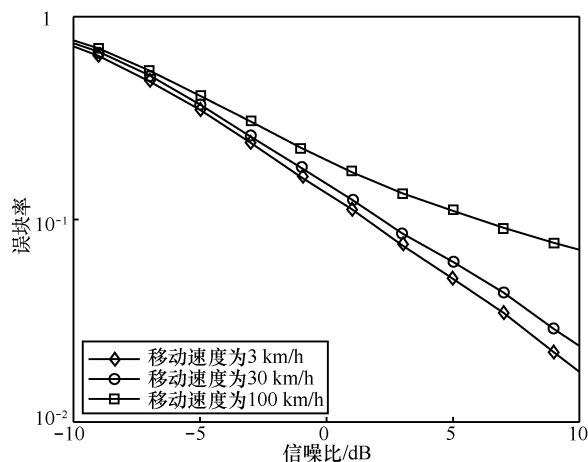


图 7 过载率为 400% 的 EPA 信道下两用户碰撞时不同移动速度的比较

5 结束语

从本文的分析结果可以看出,CS-MUD 技术基于压缩感知的理论,利用大规模连接下用户行为的稀疏性,对激活用户的身份进行有效识别,进而对激活用户的数据进行多用户检测。另外,从仿真中可以看出,虽然由于非正交扩

频码的互相关性,CS-MUD 可以支持同时传输的用户数有限,但 CS-MUD 依然可以支持大规模连接用户下的稀疏传输。未来可以通过合理的设计来降低非正交扩频码之间的互相关性,从而增加可同时支持的传输用户数以满足 5G 对 MTC 的要求。

参考文献:

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C, et al. What will 5G be[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [2] AI B, GUAN K, RUPP K, et al. Future railway traffic services oriented mobile communications network [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 78-85.
- [3] AI B, CHENG X, KURNER T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 2143-2158.
- [4] BONTU C S, PERIYALWAR S, PECEN M. Wireless wide-area networks for internet of things: an air interface protocol for IoT and a simultaneous access channel for uplink IoT communication[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(1): 54-63.
- [5] PRATAS N K, THOMSEN H, STEFANOVIC C, et al. Code-expanded random access for machine-type communication[C]//IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1681-1686.
- [6] ZHU H, GIANNAKIS G B. Exploiting sparse user activity in multiuser detection [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(2): 454-465.
- [7] SCHEPKER H F, DEKORSY A. Sparse multi-user detection for CDMA transmission using greedy algorithms [C]//IEEE 8th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), November 6-9, 2011, Aachen, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2011: 291-295.
- [8] SCHEPKER H F, BOCKELMANN C, DEKORSY A. Exploiting sparsity in channel and data estimation for sporadic multi-user communication [C]//IEEE 10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), August 27-30, 2013, Ilmenau, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [9] SCHEPKER H F, BOCKELMANN C, DEKORSY A. Coping with CDMA asynchronicity in Compressive sensing multi-user detection [C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), June 2-5, 2013, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [10] SCHEPKER H F, BOCKELMANN C, DEKORSY A. Efficient detectors for joint compressed sensing detection and channel decoding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2249-2260.
- [11] HOSSEINI S A, JAVIDBAKHT O, PAD P, et al. A review on synchronous CDMA systems: optimum overloaded codes, channel capacity, and power control [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011(1): 1-22.
- [12] VERDU S. Multiuser detection [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [13] BOCKELMANN C, SCHEPKER H, DEKORSY A. Compressive sensing based multi-user detection for machine-to-machine communication[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2013, 24(4): 389-400.
- [14] RAO C R. Linear statistical inference and its applications[M]. New Jersey: Wiley, 1965: 535.
- [15] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); user equipment (UE) radio transmission and reception; TS 36.101[S]. 2007.
- [16] 3GPP. 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA): TS 36.104[S]. 2011.

【作者简介】



马国玉(1989-),男,北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室博士生,主要研究方向为 5G 新型非正交多址接入技术、大规模 MIMO 技术。



艾渤(1974-),男,北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授、博士生导师、副主任,IET 会士,IEEE 高级会员,《IEEE Transactions on Consumer Electronics》期刊、《IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter》期刊副主编,主要研究方向为宽带移动通信和轨道交通专用移动通信。



胡显安(1990-),女,北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室硕士生,主要研究方向为 5G 新型非正交多址接入技术。

蒋笑冰(1975-),女,中国铁道科学研究院高级工程师,主要研究方向为铁路运输、网络规划。