

DOI: 10.7652/xjtuxb201608008

大规模 MIMO 系统中单精度模数转换器的 量化门限设置方案

严飞, 李国兵, 张国梅, 吕刚明
(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对配置单精度模数转换器(ADC)的大规模多输入多输出(MIMO)系统中信道估计误差和上行信号误符号率较高的问题,提出一种基于大规模 MIMO 信道相关性的自适应 ADC 量化门限设置方案,并据此给出了相应的信道估计及上行多用户检测方案。首先根据 3GPP 信道模型建模并生成信道数据,对该数据进行线性分类以获得与发射功率及用户数自适应的量化门限及相应的量化值,以此对上行导频及有用信号进行量化,然后设计基于该自适应量化门限的信道估计及信号检测矩阵,最终检测出上行信号。所提自适应门限设置方法将相关性强的天线进行组合,为同一组合内的多个单精度 ADC 设置不同的量化门限以提升量化精度。仿真结果表明:与传统固定量化门限的方法相比,所提出的自适应门限设置方法可充分利用信道相关特性,当天线的相关性较强(天线间距小于等于 0.5λ)的时候,信道估计的最小均方误差降低到原来的 50% 左右,同时系统的误符号率提升了 5 dB 以上。

关键词: 多输入多输出;单精度模数转换器;信道估计;多用户信号检测

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0045-07

Adaptive Quantization Threshold Setting Method for Massive MIMO Systems with 1-bit Analog-to-Digital Converter

YAN Fei, LI Guobing, ZHANG Guomei, LÜ Gangming
(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new adaptive threshold setting method using the channel correlation as well as its corresponding channel estimation and multiuser signal detection scheme is proposed to improve the performance of channel estimation and signal detection in massive multi-input multi-output systems with 1-bit analog-to-digital converter(ADC). Channel data is firstly generated using the 3GPP channel model, and linearly categorized to obtain the quantization thresholds and codebook that are adaptive to the transmitting power and the number of users. Then based on the adaptive thresholds, the channel estimation and signal detection matrices are designed for the final uplink multiuser signal detection using the quantized uplink reference and desired signals. The method combines high-related antennas and jointly sets different thresholds for 1-bit ADCs to improve quantization precision. Simulation results and comparisons with the conventional quantization method with fixed threshold show that the proposed method makes full use of the channel

correlation, improves the accuracy of channel estimation by about 50%, and reduces the system symbol error rate by more than 5 dB when the antenna spacing is 0.5λ .

Keywords: multi-input multi-output; 1-bit analog-to-digital converter; channel estimation; multiuser signal detection

在大规模多输入多输出(MIMO)系统中,由于数字化处理的需要,每个天线的射频(RF)端口需要配置一对模数转换器(ADC)以分别用于 I 路和 Q 路的模数转换^[1-3],但高精度 ADC 会导致功率耗散和硬件成本上升,这将极大增加基站的部署成本和能量消耗^[3-11]。鉴于此,有文献提出了在大规模 MIMO 系统中应用低精度 ADC 的方案^[4-6]。进一步地,如果利用单精度 ADC(1-bit ADC),一方面可以降低成本和基站端运算的复杂度,另一方面单精度 ADC 可以通过简单的比较器实现,不需要使用自动增益控制器(AGC),可避免大量的功率耗散,因而获得了广泛的研究^[4,7]。

目前,已有的相关研究主要针对瑞利衰落信道模型下的上行链路模型,研究的焦点在配置单精度 ADC 时信号调制、系统容量及互信息的分析、信道估计方案和检波方案的优化等^[4-9]。文献[4]基于最小二乘估计方案,采用 QPSK 和 16-QAM 调制方案对系统容量进行了定性分析。文献[5]通过对基站配置的单精度 ADC 量化还原后的信号进行检波,运用 Monte Carlo 方法对互信息进行了分析,并且在天线数量庞大的情况下实现了多用户的空分复用。文献[8]提出了基于最大似然的信道估计方案和检波方案,并提出了基于凸优化求解的次优方案,降低了运算的复杂度。然而,现有工作有关容量和传输性能的方案分析都假设大规模 MIMO 信道是独立同分布(i. i. d)信道^[4-11],并且单精度 ADC 的量化门限均固定设置为 0,而在实际中,大规模 MIMO 系统的天线间距受限,其无线传输信道并不能满足 i. i. d 假设,这使得 i. i. d 信道的相关分析结果在实际应用中存在着较大的局限性^[12-15]。针对这一问题,本文为考察信道相关性及其影响,首先依据 3GPP^[13-14]协议和 ITU 协议^[15]建立了适用于大规模 MIMO 系统的信道模型,对产生的信道数据进行相关性分析,结果表明:在实际大规模 MIMO 系统中,信道相关性不可忽略。因此,有必要研究相关信道下配置单精度 ADC 时的信道估计和信号检测问题。

本文针对配置单精度 ADC 的大规模 MIMO 系统,提出一种利用信道相关性的自适应量化门限设

置方法,并据此给出应用此方法的信道估计及上行信号检测方案。与现有工作相比,本方案的特点在于:通过对信道相关性的分析揭示了天线间接收信号的相关性,首次提出了利用这一相关性的自适应量化门限设置方法。该门限由多根天线的 ADC 联合设定,可间接提高量化的精度。同时,利用这一门限及 ADC 的输出信号设计了上行信道估计和信号接收方案。仿真结果表明,所提方案可以提高信道估计的准确性,并且在上行信号检测时能够获得比传统方案更低的系统误符号率。

1 系统模型

考虑一个单小区的大规模 MIMO 上行多用户传输场景,基站端配置 M 根天线,服务于 K 个单天线用户,并且满足 $M \gg K$ 。在基站侧,每根天线均配置了一对单精度 ADC 分别用于 I 路和 Q 路信号的模数转换,系统模型如图 1 所示。

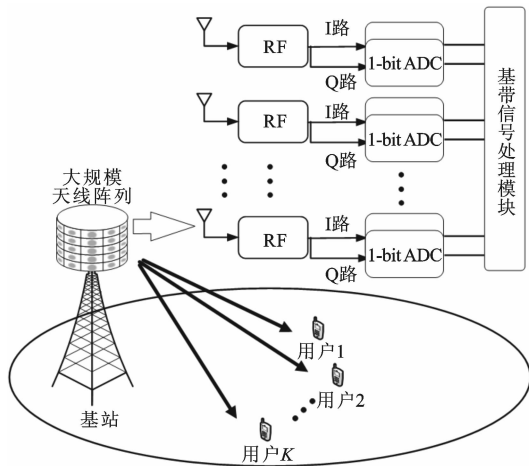


图 1 上行链路系统模型

图中在一次上行传输中,基站端 M 根天线接收到的基带信号可表示为

$$\mathbf{r} = P^{1/2} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: P 表示用户的信号发射功率; $\mathbf{H} \in \mathbf{C}^{M \times K}$ 为 K 个用户到 M 根天线的信道矩阵;向量 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_K]^T \in \mathbf{R}^K$ 是所有用户发送的信号,其中 $x_k \in \mathbf{x}$ 表示第 k 个用户发送的信号,满足 $E[x_k] = 0$ 和 $E[|x_k|^2] = 1$ 。在实际系统中, $\mathbf{x}$ 可以由 QPSK、16QAM 等调制方式产生; $\mathbf{n} \in \mathbf{C}^M$ 是 M 根天线上的

加性噪声,服从均值为 0、协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}_M$ 的复高斯分布,即 $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 。

在上行信号检测之前,接收信号还需进行量化。定义 $Q(\cdot)$ 为量化函数,则在使用单精度 ADC 的情况下,对于实数自变量定义为

$$Q(u) = \text{sgn}(u) \tag{2}$$

式中: $\text{sgn}(u)$ 为符号函数, u 为实数,即如果 $u \geq 0$, 返回值为 1, $u < 0$ 则返回值为 -1 。对于复数 $v = v_R + jv_I$, 则定义 $Q(\cdot)$ 对实数部分和复数部分分开进行判别,即

$$Q(v) = \text{sgn}(v_R) + j\text{sgn}(v_I) \tag{3}$$

对于式(1)中的接收信号 $\mathbf{r}$, 信号经过 ADC 量化后可表示为

$$\hat{\mathbf{y}} = Q(\mathbf{r} - \boldsymbol{\delta}_0) \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{\delta}_0$ 表示判决门限矢量,现有文献一般将其设置为 $\mathbf{0}$ ^[4-5]。

因此,在应用单精度 ADC 的大规模 MIMO 系统中,一次完整的上行信号检测包括以下 2 个阶段。

(1)信道估计。由用户端发送导频信号,通过天线 RF 端口下的 ADC 对接收到的信号值进行量化,基站依据量化后的导频信号对信道系数进行估计,得到估计的信道信息 $\hat{\mathbf{H}}$ 。具体的单精度信道估计方案有 LS 方案和迫零(zero-forcing, ZF)方案^[4-5]等。

(2)利用估计的信道信息 $\hat{\mathbf{H}}$ 进行信号检测。用户发送有用信号,基站端利用线性检测方法对经过 1 bit 量化后的接收信号进行检测, $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^H \hat{\mathbf{y}}$, 其中 $\mathbf{A}$ 表示迫零等检测矩阵,可根据具体检测方案确定。

2 基于自适应量化门限的信道估计及信号检测方案

本节以城市微小区(UMI)环境下的信道模型为例,详细描述本文所提出的对天线间相关性加以利用的自适应量化门限设置方案。

2.1 基于 LBG 分类的自适应量化门限设置方案

多个天线的信道之间存在相关性意味着这些天线的瞬时信道系数值存在关联,因此在对这些信道系数进行量化时,使用矢量量化等联合量化方法优于各个信道独立进行量化的方案,而联合量化方法的关键在于量化门限及量化值的确定。为了获得较准确的量化门限及量化值,首先需要大量的信道样本。在本文中,先对大规模 MIMO 信道建模,以此生成比较接近实际环境的信道数据,作为 LBG 线性分类器的训练序列。需要指出的是,信道建模方法是依据文献[13]提出的信道模型建立的,所生成的

信道数据也与 3GPP 给出的校准结果一致^[16],生成的信道系数比特定的实测信道数据更具有一般性。

2.1.1 线性分类器 LBG 是一种用于相关性数据的线性分类器,是一种经典的矢量量化方法,其核心思想是将一个 N 维的训练样本分成 K 类(第 k 类记作 S_k),每一类的质心 C_k ,用 C_k 代替该类中的其他点。LBG 分类准则包括最近邻条件和质心条件。

(1)最近邻条件

$$S_k = \{\mathbf{x}: \|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|^2 \leq \|\mathbf{x} - \mathbf{c}_{k'}\|^2 \forall k' = 1, 2, \dots, K\} \tag{5}$$

(2)质心条件

$$\mathbf{c}_k = \frac{\sum_{\mathbf{x}_m \in S_k} \mathbf{x}_m}{\sum_{\mathbf{x}_m \in S_k} 1} \quad \forall k' = 1, 2, \dots, K \tag{6}$$

当分类过程完成后, S_k 表示属于第 k 类的所有矢量的集合,而 c_k 就是第 k 类的量化值。

2.1.2 自适应量化门限设置 为了利用信道相关性,本节主要是从理论上分析基于相关性下自适应门限设置的依据,主要用 LBG 对这些数据线性分类,并在分类的过程中分别找到边界和门限、质心和量化值的映射关系。首先产生具有相关性的训练序列,假设在天线面阵中某一组编号为 $m_1, m_2, \dots, m_N$ 的 N 个天线阵元距离很近,那么用户到 N 根天线的信道信息构成的 N 维度向量在时间上具有较强的相关性。假设在时间 T 内,天线阵元接收到的信号构成的集合为 $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^{N \times T}$,运用 LBG 对 N 维度的训练样本 $\mathbf{s}$ 进行线性分类。

在单个城市微小区场景下生成一个单天线用户,仿真参数设置如表 1 所示,采用上述信道模型生成相应的训练样本 $\mathbf{s}_0$ 。当 $N=2$ 、 $T=10\ 000$ s 时。用 LBG 线性分类算法对样本数据训练。以 I 路数据为例(Q 路类似),将信道系数映射到图 2 中,浅色点是由同一时刻用户到这 2 根天线的信道系数值构

表 1 仿真场景参数设置

参数	取值
基站垂直方向天线数	2
基站水平方向天线数	1
基站垂直方向天线间距/m	0.5λ
基站水平方向天线间距/m	10λ
中心频率/GHz	2.5
用户端移动速度/km · h ⁻¹	3
仿真时长/s	10 000
Drop 数	1

成的。

运用 LBG 训练出的质心数据作图,横坐标 h_1 为用户到第 1 根天线的信道系数,纵坐标 h_2 为用户到第 2 根天线的信道系数,具有相关性的信道数据的线性分类如图 2 所示。同种浅色的点共有 10 000 个,信道数据的分布集中在第 I 象限和第 III 象限中,图 2 中训练得到的质心分别为 $c_1(-0.931\ 2, 0.936\ 2)$ 、 $c_2(-0.256\ 4, 0.257\ 8)$ 、 $c_3(0.272\ 6, 0.272\ 2)$ 和 $c_4(0.911\ 9, 0.932\ 1)$ 。质心 c_1 和 c_4 、质心 c_2 和 c_3 关于原点 O 近似中心对称。

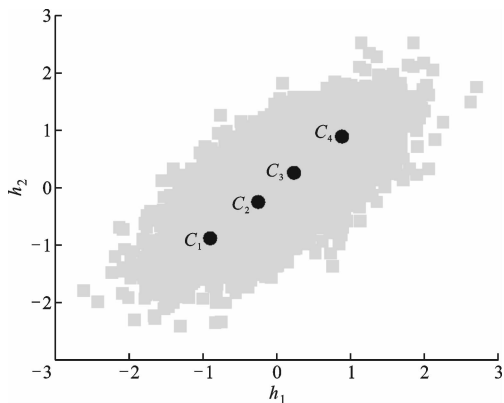


图 2 具有相关性的信道数据的线性分类

将在其他象限的训练点映射到第 I 象限得到新的训练样本 s_1 ,映射方法为将第 II、III、IV 象限的点以绝对值变化的方式映射到第 I 象限,以变换后的训练样本 s_1 为训练对象,映射后的点经过 LBG 后,得到的质心为 $c'_1(0.343\ 7, 0.344\ 7)$ 和 $c'_2(0.950\ 2, 0.954\ 1)$ 。对这 2 个质心用拟合的方法获得边界,拟合的结果为

$$h_1 + 0.995\ 1h_2 \approx 1.293\ 1 \quad (7)$$

式(7)的边界可以近似记作 $h_1 + h_2 \approx \gamma$ 。对于一个 2 维度训练样本的边界拟合结果表明,当 2 个维度间的数据存在相关性时,质心和原点 O 之间的连线与横坐标轴近似成 45° ,而边界的斜率为约等于 -1 。若 s_1 中存在一点 $A(a, b)$,判断点 A 属于哪一类的问题可归结为:如果 $a + b \leq \gamma$,点 A 属于第一类,对应的量化值为 c_1 ;如果 $a + b > \gamma$,点 A 属于第二类,量化值为 c_2 。

结论推广:将基站面阵上的 M 根天线成 G 组,每组天线数不固定,同一组内的天线到用户的信道系数具有很强的相关性,而组与组间的信道系数近似独立(在仿真中,将距离较近的天线分为一组)。为了表述方便,假定第 i 组下有 N_i ($N_i = 2^n$) 根天线。用现有的信道模型产生相应场景下的模拟数

据,对模拟场景下 N_i 根天线对应的接收数据用 LBG 分类得到 N_i 个 N_i 维的质心,将质心按照与原点 O 的距离由近到远排列

$$\mathbf{C} = [\mathbf{c}_0 \quad \mathbf{c}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{c}_{N_i-1}] \quad (8)$$

式中: $\mathbf{c}_i^T \in \mathbf{R}^{N_i}$ 。

通过 LBG 分类设置的自适应门限同样由小到大排列为

$$\mathbf{\Gamma} = [\gamma_0 \quad \gamma_1 \quad \cdots \quad \gamma_{N_i-1}] \quad (9)$$

通常 $\gamma_0 = 0$ 。

在实际系统中,为了充分利用天线的相关性优势以及组内的 ADC 资源,首先对第 i 组的信号用加法器进行整合,整合后的信号为

$$y_i = \sum_{n=1}^{N_i} r_n = \sum_{n=1}^{N_i} (P^{1/2} \mathbf{h}_{i,n}^T \mathbf{x} + n_{i,n}) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{h}_{i,n} \in \mathbf{R}^{1 \times K}$ 是 K 个单天线用户到基站第 i 组第 n 根天线的信道矩阵; r_n 表示第 i 组内第 n 根天线上接收的信号; $n_{i,n}$ 为天线上的噪声信号。

将自适应门限的量化过程记作 Q_{ada} ,则第 i 组第 N_i 根天线上接收到的信号经过自适应量化的过程如以下伪代码所示。

输入 $y_i, \mathbf{C}, \mathbf{\Gamma}$

输出 $\hat{\mathbf{y}}_i \in \mathbf{R}^{N_i}$

- (1) 获得 I 路信号 $y_{R,i} = \text{real}(y_i)$
- (2) if $y_{R,i} \geq \gamma_0$ do
- (3) $F_R = 1; y_{pR,i} = y_{R,i}$
- (4) else do
- (5) $F_R = -1; y_{pR,i} = -y_{R,i}$
- (6) end
- (7) for $i = 1, 2, \dots, N_i - 1$ do
- (8) if $y_{pR,i} \leq \gamma_i$ do
- (9) $\boldsymbol{\varphi}_I = \mathbf{c}_i$;
- (10) break;
- (11) end
- (12) end
- (13) $\hat{\mathbf{y}}_i = F_R \times \boldsymbol{\varphi}_I$

对基站端天线上接收到的信号经过 ADC 量化后为

$$\hat{\mathbf{y}}_i = Q(y_i) \in \mathbf{C}^{N_i} \quad (11)$$

2.2 信道估计方案和信号检测

将自适应门限应用到上行链路检测中,能够提升信道估计效果,降低系统误符号率。完整的上行链路需要考虑到信道估计和信号检测。由于大规模 MIMO 计算的复杂性,简单的线性信道估计方案(如 LS 和 ZF 方案),不仅能够减低运算的复杂度,

提高计算的速率,同时能够在信道估计和检波方面取得较好的效果。本文的上行链路仿真采用 LS 信道估计方案,其表达式^[5]为

$$\hat{\mathbf{H}} = \left(\sum_{l=1}^L P^{1/2} \hat{\mathbf{y}}^{(l)} \mathbf{x}^{(l)H} \right) \left(\sum_{l=1}^L P^{1/2} \mathbf{x}^{(l)} \mathbf{x}^{(l)H} \right)^{-1} \quad (12)$$

式中: $\hat{\mathbf{H}}$ 为估计的信道信息; L 为发送的导频符号的长度; $\hat{\mathbf{y}}^{(l)}$ 表示第 l 个导频信号到达基站后经过基站端量化后的列向量,维度为 $M \times 1$; $\mathbf{x}^{(l)}$ 表示用户发送的第 l 个导频信号,维度为 $K \times 1$ 。

在信号检测中,采用迫零(ZF)线性检波方案。ZF 检波计算简单,并且也能够取得较低的系统误符号率。ZF 检波方案定义为

$$\mathbf{A}^H = \hat{\mathbf{H}}^+ \quad (13)$$

式中: $\hat{\mathbf{H}}^+ = (\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-1} \hat{\mathbf{H}}^H$ 为 $\hat{\mathbf{H}}$ 的伪逆矩阵。仿真条件相同时,ZF 检波效果一般会优于 MRC^[6]。

有用信号经过 ZF 检波后,获得信号 $\hat{\mathbf{x}}_{ZF}$ 。由于 $\hat{\mathbf{x}}_{ZF}$ 的 2 范数与对 K 个用户的符号功率 K 不一定相等,因此有必要对其进行归一化处理

$$\bar{\mathbf{x}}_{ZF} = K^{1/2} \frac{\hat{\mathbf{x}}_{ZF}}{\|\hat{\mathbf{x}}_{ZF}\|} \quad (14)$$

将检测到的信号对应到星座点上,结果如下

$$\hat{x}_{ZF,k} = \arg \min_{x' \in S} |\bar{x}_{ZF,k} - x'|^2 \quad (15)$$

式中: S 为发送端相应调制方式下归一化后星座点的集合; x' 为星座图上的某一个星座点; $\bar{x}_{ZF,k}$ 为归一化后的 $\bar{\mathbf{x}}_{ZF}$ 中第 k 个用户检波后的符号; $\hat{x}_{ZF,k}$ 为 $\bar{x}_{ZF,k}$ 在星座图上对应的点。

3 仿真实验和分析

本节主要在城市微小区中针对基站间不同天线面阵排列,研究基于天线联合的自适应门限设置方案,并进一步验证自适应门限设置对信道估计和系统误符号率的影响。仿真过程主要有以下 2 个步骤。

(1)对建模产生的数据线性分类,并映射获得不同场景所对应的量化门限和量化值;

(2)将相应场景下的自适应门限方案运用于上行多用户信号检测过程。

3.1 影响自适应门限设置的因素分析

采用适用于大规模 MIMO 的信道模型, $\mathbf{H}$ 均值为 0,方差为 1。首先产生城市微小区下的信道信息,以 2 根天线的组合为例进行训练。取仿真场景城市微小区, $K=4$,天线阵列 4×4 ,天线间距 $0.5\lambda \times 10\lambda$ 。在该场景下对信道数据进行线性分类后的自适应门限设定的结果如图 3 所示。当训练序列数

较短(训练序列数小于等于 500)的时候,门限的设置波动很大,训练序列数增加到一定程度(训练序列数大于等于 1 500),门限设置趋于稳定。2 根天线联合时,训练序列数应大于等于 2 000。

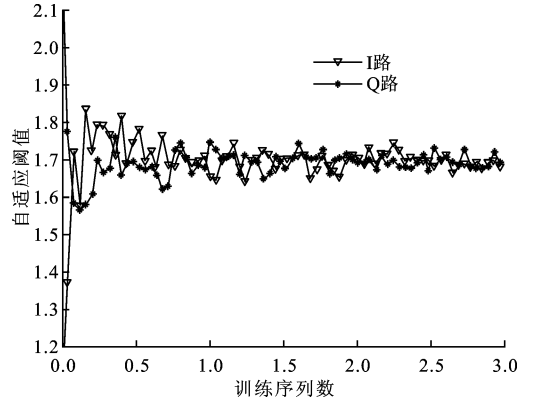


图 3 训练序列数和自适应门限设定

影响自适应门限设定的因素有用户数、发送功率等。如图 4 所示,在城市微小区场景下生成不同用户数进行自适应门限设置,用户发送功率越大,门限会越大,用户数的增加门限也会变大。但在同一个发送功率下,当增加相同的用户数时,门限的变化量却不相等,门限变化的大小和用户数增加的大小并不成正比。

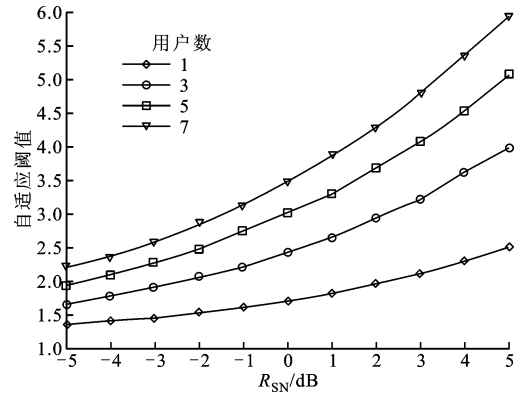


图 4 同一场景时不同用户数下的自适应门限设置

3.2 自适应门限下的信道估计

已有的信道估计方案有 LS 方案^[5]和 ZF 方案^[6]。对已有的信道估计方案进行评估,评估准则基于最小均方误差(MSE)或归一化的最小均方误差(NMSE),此处采用 MSE。

图 5 的仿真场景为城市微小区,基站天线分布为 $M=2 \times 16$, $K=8$,用户移动速度 $V=3$ km/h,信噪比为 0 dB,采用 QPSK 调制,信道估计方案为 LS 方案。图中比较的是不同相关性面阵下自适应门限与信道估计对最小均方误差的影响。不管天线面阵如何摆放,当只用 1 个 ADC 判别时,信道估计的

MSE 的值相差不大;当天线间距为 $5\lambda \times 5\lambda$ 时,利用天线间相关性估计信道,MSE 的值会比原方案更大;当天线间距为 $0.5\lambda \times 5\lambda$ 时,利用相关性,联合 ADC 后的自适应门限设置会使信道估计的效果大幅度提高;尤其是当天线间距为 $0.25\lambda \times 5\lambda$ (天线间距一般不会小于 0.25λ ,此处仅作为相关性效果比较)时,所提方案效果进一步提升。图 5 表明:相关性越强,自适应门限下的信道估计效果越好。

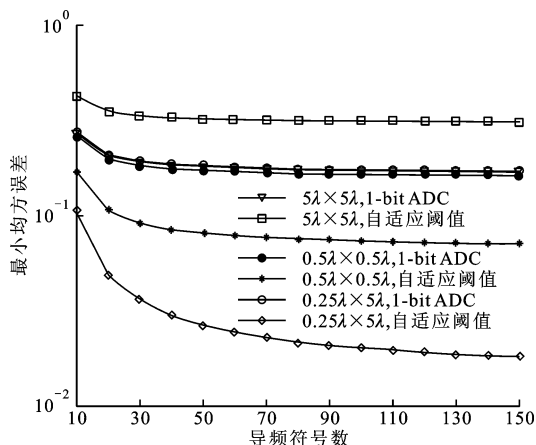


图 5 不同面阵下自适应门限与信道估计对最小均方误差的影响

3.3 自适应门限下的系统误符号率

基站在第 1 个时隙发送完导频信号后开始估计信道信息,在第 2 个阶段基站对接收到的信号进行检波,在自适应门限下检波,并计算检波后的系统误符号率。

仿真场景为城市微小区,天线排列 $M=2 \times 32$, $K=10$,仿真独立运行 100 000 次,10 个用户,QPSK 调制,采用 LS 信道估计方案和 ZF 检波方案,仿真结果如图 6 所示。由图 6 可见:当采用单精度 ADC 量化时,天线间距为 $10\lambda \times 10\lambda$ 的情况要远远优于天线间距为 $0.5\lambda \times 10\lambda$,这是因为天线的相关性造成了分集增益的损失;当天线间距为 $10\lambda \times 10\lambda$,在 $R_{SN} \leq 0$ dB 时,本文提出的方案效果会更差,这是因为天线间相关性很弱,随着发送功率的增大,自适应门限的精度优势可以适当降低系统的误符号率;当天线间距为 $0.5\lambda \times 10\lambda$ 时,基于天线联合的自适应门限设置方案能够充分利用相关性的优势,系统的误符号率大幅度减小,设置已经低于单精度 ADC 量化时的理想信道。

上述仿真结果表明:所提出的自适应量化门限具有时间上的稳定性,不需要实时更新(如图 3 和图 4 所示);所得的信道估计结果在不同的导频长度下

相比已有工作均具有较小的均方误差(如图 5 所示);上行信号检测的误符号率性能相比理想信道下单精度量化的情况都有显著的性能提升(如图 6 所示)。

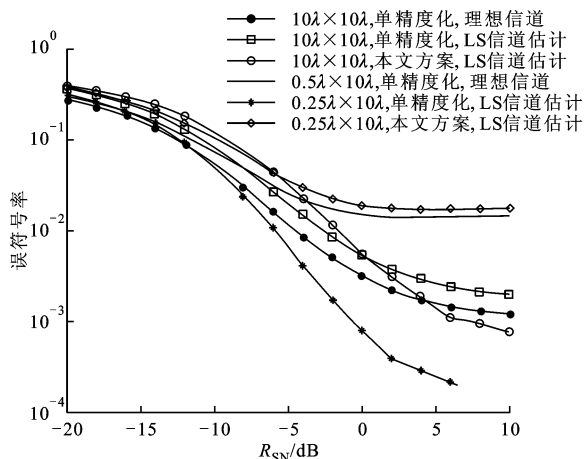


图 6 自适应门限下的误符号率

4 结束语

本文针对配置单精度 ADC 的大规模 MIMO 系统,通过信道建模及分析揭示了天线间接收信号的相关性,提出了利用这一相关性的自适应量化门限设置方案,并据此给出应用此方案的信道估计及上行信号检测方案。仿真结果表明,本文所提方案可以提高信道估计的准确性,并降低上行信号检测的误符号率。

参考文献:

- [1] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: benefits and challenges [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758.
- [2] RUSEK F, PERSSON D, BUON K L, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays [J]. IEEE Magazine in Signal Processing, 2013, 30(1): 40-60.
- [3] PANZNER B, ZIRWAS W, DIERKS S, et al. Deployment and implementation strategies for massive MIMO in 5G [C]//2014 IEEE Globecom Workshops. Piscataway NJ, USA: IEEE, 2014: 346-351.
- [4] JACOBSSON S, DURISI G, COLDREY M, et al. One-bit massive MIMO: channel estimation and high order modulations [C]// IEEE International Conference on Communication Workshop. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1304-1309.
- [5] CHIARA R, DANIEL P, ERIK G L. Massive MIM-

- O with 1-bit ADC [EB/OL]. [2015-08-01]. <http://arxiv.org/abs/1404.7736>.
- [6] LIANG N, ZHANG W Y. A mixed-ADC receiver architecture for massive MIMO systems [C] // 2015 IEEE Information Theory Workshop. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 229-233.
- [7] ZHANG Ti-Cao, WEN Chao-kai, JIN Shi, et al. Mixed-ADC massive MIMO detectors: performance analysis and design optimization [EB/OL]. [2015-08-01]. <http://arxiv.org/pdf/1509.07950.pdf>.
- [8] JUNIL C, JIANHUA M, ROBERT W H. Near maximum-likelihood detector and channel estimator for up-link multiuser massive MIMO systems with one-bit ADCs [EB/OL]. [2015-08-01]. <http://arxiv.org/abs/1507.04452>.
- [9] WEN C, WANG C, JIN S, et al. Bayes-optimal joint channel-and-data estimation for massive MIMO with low-precision ADCs [EB/OL]. [2015-08-01]. <http://arxiv.org/abs/1507.07766>.
- [10] MO Jianhua, HEATH R W. Limited feedback in multiple-antenna systems with one-bit quantization [C] // Conference Record of the 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2015: 1432-1436.
- [11] JUNIL C, LOVE D J, BROWN D, et al. Quantized distributed reception for MIMO wireless systems using spatial multiplexing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(8): 3357-3548.
- [12] 王东明, 张余, 魏浩, 等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(1): 3-21.
- WANG D M, ZHANG Y, WEI H, et al. Large-scale wireless transmission theory and technology in 5G mobile communication [J]. Scientia Sinica: Informationis, 2016, 46(1): 3-21.
- [13] KAMMOUN A, KHANFIR H, ALTMAN Z, et al. Preliminary results on 3D channel modeling: from theory to standardization [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1219-1229.
- [14] JASSAL A, KHANFIR H, LOPEZ S M. Preliminary system-level simulation results for the 3GPP 3D MIMO channel model [C] // 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [15] THOMAS T A, VOOK F W, MELLIOS E, et al. 3D extension of the 3GPP/ITU channel model [C] // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-5.
- [16] MONDAL B, THOMAS T, VISOTSKY E, et al. 3D channel model in 3GPP [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 16-23.
- [17] 朱丰, 张群, 段艳丽, 等. 基于压缩感知和 LBG 算法的 SAR 数据压缩与重构方法 [J]. 信号处理, 2012, 28(6): 842-850.
- ZHU F, ZHANG Q, DUAN Y L, et al. SAR data compressing and reconstructing method based on compressed sensing and LBG algorithm [J]. Signal Processing, 2012, 28(6): 842-850.
- [18] 姜高霞, 王文剑. 时序数据曲线排齐的相关性分析方法 [J]. 软件学报, 2014, 25(9): 2002-2017.
- JIANG G X, WANG W J. Correlation analysis in curve registration of time series [J]. Journal of Software, 2014, 25(9): 2002-2017.

[本刊相关文献链接]

- 刘健伶, 陈志刚, 王磊. 一种自适应广义空间调制及其低复杂度算法. 2016, 50(4): 48-53. [doi:10.7652/xjtuxb201604008]
- 范正光, 屈丹, 闫红刚, 等. 借助音频数据的发音字典新词学习方法. 2016, 50(6): 75-82. [doi:10.7652/xjtuxb201606012]
- 陈斌, 胡平舸, 屈丹. 子空间域相关特征变换与融合的语音识别方法. 2016, 50(4): 60-67. [doi:10.7652/xjtuxb201604010]
- 王富平, 水鹏朗. 采用多尺度方向微分比率的角度点检测算法. 2016, 50(4): 68-75. [doi:10.7652/xjtuxb201604011]
- 孙黎, 徐洪斌. 协作式终端直通系统中星座旋转辅助的干扰避免策略. 2015, 49(12): 6-11. [doi:10.7652/xjtuxb201512002]
- 王天荆, 姜华, 刘国庆. 采用分组数据的序贯频谱感知方法. 2015, 49(12): 34-39. [doi:10.7652/xjtuxb201512006]
- 包昕, 周磊珂, 何可, 等. 误码条件下的 LDPC 码盲识别算法. 2015, 49(12): 53-58. [doi:10.7652/xjtuxb201512009]
- 张东伟, 郭英, 齐子森, 等. 采用空间极化时频分布的跳频信号多参数联合估计算法. 2015, 49(8): 17-23. [doi:10.7652/xjtuxb201508004]
- 巴斌, 娜娜娥, 朱世磊, 等. 利用蒙特卡罗的最大似然时延估计算法. 2015, 49(8): 24-30. [doi:10.7652/xjtuxb201508005]
- 俱莹, 殷勤业, 陈媛, 等. 发射聚焦式的多天线跳空安全通信技术. 2015, 49(6): 22-26. [doi:10.7652/xjtuxb201506004]
- 刘进, 李赞, 高锐. 低信噪比下采用广义随机共振的能量检测算法. 2015, 49(6): 27-32. [doi:10.7652/xjtuxb201506005]
- 熊涛, 江桦, 崔鹏辉, 等. 应用基扩展模型的混合信号单通道盲分离算法. 2015, 49(6): 60-66. [doi:10.7652/xjtuxb201506010]
- 王云龙, 吴瑛. 联合时延与多普勒频率的直接定位改进算法. 2015, 49(4): 123-129. [doi:10.7652/xjtuxb201504020]

(编辑 刘杨)