



专题: 5G

基于低精度量化的无线传输理论最新研究进展

乔丹¹, 温朝凯², 高飞飞³, 金石¹

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;
2. 台湾中山大学通讯工程研究所, 台湾 高雄 000800; 3. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 5G 移动通信技术相比于目前的 4G 移动通信技术, 其峰值速率将增长数十倍, 达到吉比特。未来移动通信系统面临着硬件成本高昂、系统功率消耗过高等问题, 成为高传输速率通信的主要瓶颈之一。为了解决上述问题, 学术界展开了对低功耗高效传输技术的研究, 其中能够有效解决上述问题的途径之一就是低精度 (如 1~3 bit) ADC 的接收机。通过对高斯信道下低精度量化的信道容量进行分析, 发现相较于传统高精度 ADC 接收机, 2~3 bit 的 ADC 所带来的信道容量损失在可接受的范围内。面向低精度量化在无线通信系统中的应用, 综合论述了低精度量化对信道容量的影响以及低精度量化下接收机的设计, 解决了低精度量化下诸如同步、增益控制、信道估计等问题, 为低精度量化通信系统的具体实现提供指导。

关键词: 低精度量化; 信道容量; 接收机; 同步; 信道估计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017203

An overview of low resolution quantization in wireless communication system

QIAO Dan¹, WEN Chaokai², GAO Feifei³, JIN Shi¹

1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China
2. Institute of Communications Engineering, Taiwan Sun Yat-sen University, Kaohsiung 000800, China
3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Compared to the 4th generation (4G) mobile communication technology, the 5th generation (5G) mobile communication technology will provide tens of times of peak rate increase, reaching up to several thousands megabit per second. The coming wireless communication systems face the problems of expensive hardware cost and high power consumption, which is becoming a bottleneck of high-rate communication systems. To cope with these problems, redesigning communication systems with the receiver using finite precision analog-to-digital converters (ADC) is one possible approach. The analysis of recent information theory for the AWGN channel shows that the performance loss due to 2~3 bit ADC is acceptable. The application of low resolution quantization in wireless communication systems was focused on, an overview of the channel capacity and receiver design under low-precision ADC was provided.

Key words: low resolution quantization, channel capacity, receiver, synchronization, channel estimation

收稿日期: 2017-05-01; 修回日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61625106, No.61531011)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61625106, No.61531011)



1 引言

随着 4G 移动通信系统进入规模商用阶段, 5G 移动通信的研发正在世界范围内如火如荼地展开。作为下一代无线通信技术, 5G 致力于满足日益增长的移动互联网和物联网市场的业务应用需求, 以期在任何地方、任何时间、任何物体和人人都可以进行快速可靠的信息交换^[1-4]。在很长一段时间内, 无线通信领域的许多研究工作都集中于提高系统的频谱效率。随着高速通信技术的发展, 人们在研究如何提高系统频谱利用率的同时, 逐渐开始关注移动通信系统的能量效率。5G 提出了到 2020 年实现系统容量千倍量级增长的愿景, 但从实际应用的角度来说, 无线通信系统的功率消耗不能也不应该同速增长。因此, 提高无线系统和网络的能量效率成了 5G 发展的关键目标之一^[5]。受经济效益和环境保护责任的驱使, 绿色通信在近几年引起了大量学术界和工业界的研究热情^[6,7]。对于手持设备和无线传感器, 延长电池寿命, 打破电池续航瓶颈才能促进相关技术的进一步发展。对蜂窝网络基站来说, 满足用户终端服务质量要求的同时最小化功率消耗, 同时降低部署和维护成本具有重要的意义。尤其是在大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统中, 由于基站配备了大量的天线, 带来的后果是海量的基带数据, 这极大地提高了基带处理和射频处理的复杂度, 给系统搭建成本的降低带来了巨大挑战。如果采用传统的高精度硬件设备部署大规模 MIMO 系统将会导致过大的系统功耗。由参考文献[8]可知, 系统功率消耗主要包括信号的辐射功耗及处理功耗。信号的辐射功耗主要指来自发送端的功率放大器为保证一定的接收信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)所消耗的功率。处理功耗的产生是由于基带执行各种处理算法所带来电路功率消耗。以大规模 MIMO 系统上行链路中的接收机功耗为例, 其功耗主要

来自模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)处理单元和基带数字处理单元。从参考文献[8]中可知, ADC 的功耗与采样速率和量化间隔有关, 它们的关系可近似表示为 $P_{\text{ADC}} \approx 2^b \times B$, 其中 b 表示量化比特数, B 表示信号带宽。参考文献[9]表明基带处理功耗与 b^2 近似成线性关系。从上述研究结果可知, 接收机的功率消耗在很大程度上依赖于 ADC 的精度, 精度越高, 无线通信系统的总功耗将随之增长, 同时硬件成本也不可避免地随之提高。

随着无线通信业务的不断发展, 无线通信系统的带宽也越来越大, 特别是在短距离无线通信中更为明显, 达到百兆赫兹(MHz)甚至千兆赫兹(GHz)量级^[10-12]。其中超宽带(ultra wide-band, UWB)技术^[13]是短距无线通信的一个典型代表。另一个典型代表是 60 GHz 毫米波通信, 在中国占用 5 GHz (59~64 GHz) 频谱资源, 在欧洲和美国甚至占用了 7 GHz 的带宽。这给实现低功耗的无线通信系统带来了巨大挑战: 要实现 GHz 量级的采样速率和高精度量化, ADC 必须采用成本高昂、复杂度高且功耗极大的闪存(flash)结构^[15,16]; 实现 GHz 量级, 特别是 10 GHz 采样频率的高精度 ADC 在技术上存在一定的困难; 高采样频率和高精度量化产生的海量数据, 加大了低功耗基带数字处理的实现难度; 高采样速率和量化精度的 ADC 芯片集成难度也不容小觑。

由此可见, 无论是对于高速大带宽通信系统还是大规模 MIMO 系统来说, 从降低系统总功耗消耗及部署成本的角度, 采用低精度量化接收机都是有效实现系统高能量效率的直接途径之一。低精度量化接收机的结构如图 1 所示, 接收端接收到的信号通过射频通道后送入量化器, 输入的同相分量和正交分量经过量化器中的一对低精度 ADC 分别进行采样量化, 最后量化输出送到基带处理单元进行后续信号处理。不同于传统的高精度量化, 由于经过量化器的信号非线性失真非常

大,对于低精度 ADC 的研究需要采用不同的量化误差模型和研究方法。学术界之前对量化问题的研究主要基于高精度量化的前提,通过独立看待量化过程和后端基带处理,将量化精度对于系统性能的影响通过量化过程的输出信号模型进行分析^[17,18]。但是,对于低精度量化而言,传统的将量化和后端信号处理视为两个独立问题的方式变得不再适用,必须寻找新的方法对低精度量化下的通信展开研究。同时,由于使用低精度 ADC 会带来一定的系统性能损失,特别是对于大规模 MIMO 系统而言,在基站配备了大规模的天线阵列的前提下,如果统一配置低精度 ADC,还会带来信道状态信息获取困难等问题。因此,参考文献[19,20]提出了一种混合 ADC 的接收架构,即部分配置高精度 ADC 用以信道估计,在获得比较精准的信道状态信息的前提下,剩余部分配置低精度 ADC,从而降低系统功率消耗和部署成本,达到比较可观的系统性能。总之,学术界迫切需要研究低精度量化下的一系列问题,包括低精度量化下的同步问题、增益控制问题、信道估计问题、接收机设计和量化噪声模型及低精度量化对通信系统容量的影响等,完善数字信号处理理论,为相关技术的实际应用提供理论支持。

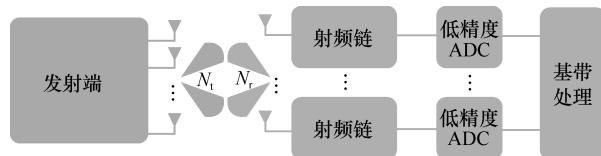


图1 低精度量化接收机的结构

2 低精度量化的信道容量

学术界对于低精度量化系统的信道容量^[21]研究主要关注其相对于传统完美量化的通信系统,采用低精度 ADC 所带来的信道容量损失是否在可接受的范围内。下面从 ADC 的结构入手,研究低精度量化系统的信道容量分析方法。

2.1 ADC 结构

在数字通信系统中 ADC 将接收信号从模拟量转化为数字信号,方便后续数字处理单元的处理和存储。图2所示为 ADC 的结构,模拟信号首先经过前置滤波器,将输入模拟信号中频带外的干扰频率分量去除。接着在采样保持阶段按照一定的采样频率对模拟信号进行采样,并保持采样电平在一定的转换时间内保持不变。最后通过量化器,将采样信号在转换时间内根据量化曲线映射到相应的量化区间,完成量化过程。

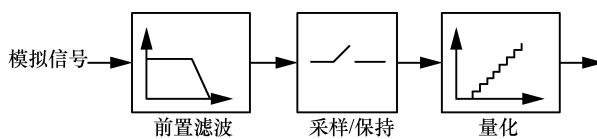


图2 ADC 结构示意图

量化器有均匀量化和非均匀量化之分,均匀量化 ADC 的每一级量化区间都相同。假设采样后进入量化器之前的信号用 X 表示,量化器的输出用 Y 表示,则其系统框架可简化为图3所示结构。ADC 通过量化器将模拟量转换为相应的离散值所引入的误差称为量化误差。当量化器采用均匀量化器时,量化信噪比 (signal-to-quantization noise ratio, SQR) 可以表示为:

$$SQR_{dB} = 6.02b + 10\lg(12 \times \sigma_x^2) \quad (1)$$

其中, b 表示 ADC 的量化比特数, σ_x^2 表示输入信号的均方差值。

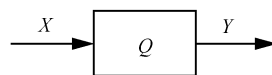


图3 ADC 转换特性等效框架

从上述分析可知,一般来说量化过程是非线性的,量化器的量化误差与输入信号有关。但是,对非线性过程的建模和分析具有一定的难度,因此参考文献[22]对量化过程进行线性建模,即加性量化噪声模型 (additive quantization noise model, AQNM)。该模型将量化器的输出表示为两部分,分别为理想输出信号以及独立于输入信号的量化



噪声。因为对量化器的建模方法不同,相应的对信道容量的分析也不尽相同。下面将分别总结在对量化器非线性建模和线性建模情况下,低精度量化对信道容量的影响。

2.2 非线性建模下的信道容量分析

根据信息论的相关理论可知,信道可分为离散信道和连续信道两种类型。传输离散信源的信道称为离散信道,假设系统输入表示为 $X = \{x_1, \dots, x_N\}$, 发送符号 x_i 的出现概率为 $P_X(x_i), i=1, 2, \dots, N$, 经过信道后的输出表示为 $Y = \{y_1, \dots, y_M\}, j=1, 2, \dots, M$, 信道转移概率矩阵表示为 $P = [P(y_j | x_i)]$, 即发送 x_i 的条件下收到 y_j 的条件概率。将输入输出的最大互信息定义为信道容量:

$$C = \max_{P_X} I(X; Y) \\ = \max_{P_X} \sum_i P_X(x_i) \sum_j P(y_j | x_i) \log \frac{P(y_j | x_i)}{P_Y(y_j; P_X)} \quad (2)$$

其中, $P_Y(y_j; P_X)$ 表示信道输出信号 Y 的概率质量函数。连续信道的输入信号和输出信号都是取值连续的时间函数, 它的信道容量可以表示为:

$$C = \sup_{F_X} I(X; Y) \\ = \sup_{F_X} \iint P(y | x) \log \frac{P(y | x)}{P_Y(y; F_X)} dy dF_X(x) \quad (3)$$

其中, $P(y | x)$ 表示信道的转移概率密度函数, F_X 表示输入信号的累计分布函数, $P_Y(y; F_X)$ 是信道输入 X 情况下的输出信号概率密度函数。

考虑一个时间离散无记忆 AWGN 量化输出 (AWGN-quantized output, AWGN-QO) 信道, 其示意如图 4 所示, 信道可表示为:

$$Y = Q(X + N) \quad (4)$$

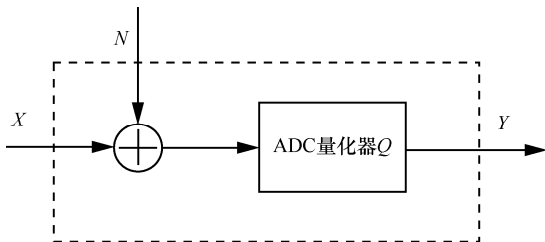


图 4 AWGN 量化输出信道示意

其中, $X \in R$ 为信道输入信号, 其累计分布函数为 $F(x)$, $Y \in \{y_1, \dots, y_k\}$ 为离散信道输出, N 为零均值、 σ^2 方差的高斯随机变量。 $Q(\cdot)$ 为 ADC 量化器的量化函数, 将输入信号映射到 K 个量化区间, 得到离散输出信号 Y 。因为量化器有 K 个量化区间, 相应的即有 $K-1$ 个量化门限 $\mathbf{q} = \{q_1, \dots, q_{K-1}\} \in R^{K-1}$, 且满足 $-\infty := q_0 < q_1 < \dots < q_{K-1} < q_K := \infty$ 。当 ADC 量化器的输入满足 $q_{i-1} < X + N < q_i$, 即落入第 i 个量化区间, 则输出为 y_i , 信道传输概率函数为:

$$W_i(x) = P(Y = y_i | X = x) \\ = Q\left(\frac{q_{i-1} - x}{\sigma}\right) - Q\left(\frac{q_i - x}{\sigma}\right), 1 \leq i \leq K \quad (5)$$

其中, $Q(\cdot)$ 表示 Q 函数。则输入输出的互信息可以表示为^[24]:

$$I(F) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^K W_i(x) \log \frac{W_i(x)}{\int_{-\infty}^{\infty} W_i(x) dF(x)} dF(x) \quad (6)$$

对于一个静态时间离散无记忆的信道, 若输入信号在某一区间取值, 输出信号为有限基数 K , 参考文献[25]表明在信道传输概率函数是连续的情况下, 一个 K 个质点的离散输入分布即可达到信道容量^[26]。对于采用低精度 ADC 的量化系统, 参考文献[27-29]分析研究了高斯白噪声信道下的信道容量表达式。研究结果证明, 若接收端的低精度量化器有 K 个量化区间, 那么只要输入信号在 $K+1$ 个值所构成的输入信号集取值便可达到信道容量。并且使用等概率分布的脉冲幅度调制的通信系统, 接收端使用最大似然准则的硬判决时是近似最优的。下面给出在实加性高斯信道的量化系统中, 采用低精度 ADC 能达到的信道容量以及相应的最优离散输入分布。

对于 1 bit 量化的系统, 即信道表示为 $Y = \text{sign}(X + W)$, 参考文献[27-29]指出, 在平均功率受限的情况下, 信道容量可以表示为 $C = 1 - h(Q\sqrt{SNR})$, 其中 $SNR = P/\sigma^2$, $H(p) = -p \log p - (1-p) \log (1-p)$, $0 \leq p \leq 1$, 该信道容量可以通过二元对称信号获得, 并且最多 3 个质点的离散

输入便可达到该信道容量。

对于多比特量化的信道容量,假设量化器有 K 个对称的量化区间 ($K>2$)。不同于单比特量化,当 $K>2$ 时其系统容量的表达式复杂,因此要得到其信道容量的闭式解及其相应的最优输入分布不太容易。参考文献[27-29]给出了不同的解决方法,用割平面算法在数值上给出了最优的输入分布以及互信息的上界值。其数值计算的结果显示,当信噪比低于 20 dB 时,2~3 bit 量化结果较非量化时只损失了 10%~20%的频谱利用率,理论上说明了使用低量化比特接收机实现数字通信的有效性。

上面考虑了在实加性高斯信道中的低精度量化容量分析,对复信道的相关研究在参考文献[30]中进行。其研究了在均匀量化的单载波系统中采用复值调制(正交幅度调制和相移键控)能够获得的传输速率,该传输速率以发送端符号和接收端量化符号之间的平均互信息来表示;同时指出即使在最优量化下相位偏移依然会带来较大的性能损失,这种性能损失不能通过任何数字后处理进行补偿,只能提高量化精度或者进行模拟补偿,这必然以提高接收机复杂度为代价。参考文献[31]考察了在多址接入信道(multiple access channel, MAC)下低精度量化后的信道容量,发现采用均匀量化会给系统速率带来比较严重的损失。因此,设计了一种非均匀的量化器,通过对量化间隔进行优化,从而提升了系统性能。参考文献[32]将研究扩展到低精度量化的 MIMO 系统中,通过数值仿真证明,低精度量化相较于传统的高精度量化在系统容量方面的损失微乎其微。但是,由于传统的编解码方式不适用于低精度量化系统,采用卷积码编码和维特比译码后,系统将出现较高的误比特率(bit error ratio, BER)。参考文献[33]评估超宽带 MIMO 系统中低精度量化对系统性能的影响以及输入端优化问题。因在超宽带系统中,功率分布在较大的带宽上,导致

功率谱密度较低,从而信噪比也较低。因此重点考察在假设接收端已知 CSI 的条件下,1 bit 量化 MIMO 系统在低信噪比区域的信道容量。其表明 SNR 的一阶函数相较于完美量化系统仅有系数为 $2/\pi$ 的性能损失,而 SNR 的二阶函数能很好地逼近互信息量,并且在此基础上 QPSK 是最优输入分布。基于参考文献[33]的研究基础,参考文献[34]考虑发送端和接收端均未知信道状态信息的情况,给出系统信道容量的表达式,并进一步与传统高精度量化的情况进行对比和分析。参考文献[35]研究了接收端采用 1 bit 量化及过采样的带限系统中的系统性能,基于互信息的下界考察过采样对 1 bit 量化容量的影响,结果表明在过采样下信道容量将得益于信道噪声与符号间干扰。参考文献[36]在假设发送端已知 CSI 的假设下,推导了采用 1 bit 量化的大规模毫米波通信系统在 SNR 趋于无穷时的信道容量。研究结果表明,单比特量化下的系统容量主要取决于受到直射径的数量。进一步,针对单径传播的场景提出了一种可达容量的传输策略。在此研究基础上,参考文献[37]考虑接收端不知道信道状态信息的情形,提出改进的最大期望(expectation maximization, EM)算法和通用的近似消息传递(generalized approximate message passing, GAMP)算法,利用毫米波信道的稀疏特性,对信道估计问题进行求解。

2.3 AQNM 模型下的信道容量分析

从第 2.1 节知量化一般为非线性过程,参考文献[38]给出 AQNM 模型,将量化器的输出信号表示为理想信号与不相关的量化噪声两部分。具体来讲,如图 5 所示加性量化噪声模型,针对接收端拥有 M 根天线的场景,量化输出信号 $\hat{\mathbf{z}} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 可以表示为:

$$\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{F}\mathbf{z} + \mathbf{e} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{z}$ 为输入信号,均值为零, $\mathbf{e}$ 是加性量化噪声, $\mathbf{F}$ 的值满足:



$$\mathbf{F} = E\{\hat{\mathbf{z}}\mathbf{z}^H\}E\{(\mathbf{z}\mathbf{z}^H)^{-1}\} = \mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}}\mathbf{R}_{\mathbf{z}}^{-1} \quad (8)$$

量化噪声 $\mathbf{e}$ 的协方差为:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{e}} = E\left\{\left(\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{F}\mathbf{z}\right)\left(\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{F}\mathbf{z}\right)^H\right\} = \mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}} - \mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}}\mathbf{R}_{\mathbf{z}}^{-1}\mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}}\mathbf{z} \quad (9)$$

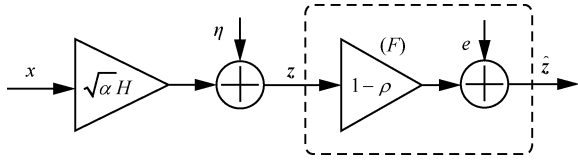


图5 加性量化噪声模型

量化误差为 $\mathbf{q} = \hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}$, 为了便于后续分析, 定义量化失真因子为 $\rho = 1/\text{SQNR}$, SQNR (signal-to-quantization noise ratio) 表示量化信噪比。进一步, 在对量化器输出作出一定调整后可得 $E\{q_i\} = 0$, $E\{\hat{z}_i q_i\} = 0$, $E\{z_i q_i\} = -\rho_i r_{z_i}$ 。其中, q_i 、 z_i 、 $\hat{z}_i$ 分别为量化误差 q 、输入信号 $\mathbf{z}$ 和输出信号 $\hat{\mathbf{z}}$ 的第 i 个元素, r_{z_i} 表示输入信号 z_i 的方差, 即 $\mathbf{R}_{\mathbf{z}}$ 第 i 个对角元素, ρ_i 是与量化器的结构有关的第 i 组量化器的量化失真因子, 此处假设接收端的 ADC 精度相同, 即满足 $\rho_i = \rho, i = 1, 2, \dots, M$ 。由上可知 $r_{q_i} = E\{q_i q_i^*\} = \rho r_{z_i}$ 。当输入信号满足高斯分布时, 对其进行最优的非均匀量化, 在量化比特数比较高时量化失真因子可以作如下近似: $\rho \approx \sqrt{3}\pi \cdot 2^{-2b-1}$ 。

基于上述假设, 输入信号与量化信号之间的协方差矩阵可以记做:

$$\mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}\mathbf{z}} = E\{\mathbf{z}(\mathbf{z} + \mathbf{q})^H\} = \mathbf{R}_{\mathbf{z}} + \mathbf{R}_{\mathbf{z}\mathbf{q}} \quad (10)$$

而量化输出信号的自相关矩阵可以表示为:

$$\mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}} = E\{(\mathbf{z} + \mathbf{q})(\mathbf{z} + \mathbf{q})^H\} = \mathbf{R}_{\mathbf{z}} + \mathbf{R}_{\mathbf{z}\mathbf{q}} + \mathbf{R}_{\mathbf{z}\mathbf{q}}^H + \mathbf{R}_{\mathbf{q}} \quad (11)$$

经过计算可以得到:

$$\mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}\mathbf{z}} = \mathbf{R}_{\mathbf{z}} + \mathbf{R}_{\mathbf{z}\mathbf{q}} = (1 - \rho)\mathbf{R}_{\mathbf{z}} = \mathbf{R}_{\hat{\mathbf{z}}\mathbf{z}} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{z}} = (1 - \rho)((1 - \rho)\mathbf{R}_{\mathbf{z}} + \rho \text{diag}(\mathbf{R}_{\mathbf{z}})) \quad (13)$$

经过简单的推导和整理, 可以得出:

$$\mathbf{F} = (1 - \rho)\mathbf{I}_M \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{e}} = \rho(1 - \rho)\mathbf{R}_{\mathbf{z}} \quad (15)$$

至此, 上述步骤即 AQNM 模型的理论推导过程。由于 AQNM 模型将量化过程进行了线性建模, 屏蔽了 ADC 的内部特性, 分析起来相对简单, 因此大量参考文献运用该模型来对 ADC 量化过程进行快速建模^[28,41]。参考文献[41]将 AQNM 模型应用到点对点 MIMO 毫米波系统中, 研究了两种接收机结构下带宽、ADC 精度及天线数对系统可达速率的影响。这两种接收机结构分别为每根天线配备一对 ADC 的数字合并 (digital combining) 结构, 和接收信号先在模拟域合并再用一对 ADC 进行模数转换的模拟合并 (analog combining) 结构。研究表明, 对于 SISO 系统来说存在最优的带宽和 ADC 精度。对于 MIMO 系统, 当仅对 ADC 功率作约束时, 模拟合并结构能够取得更高的可达速率, 但数字合并结构占用更少的带宽。而当对所有接收机结构的部件作功率约束时, 数字合并结构取得的系统可达速率更高。针对大规模 MIMO 系统, 参考文献[40]利用 AQNM 模型, 研究有限精度量化对系统的上行可达速率和能量效率造成的影响, 给出了基站采用 MRC 接收机的上行可达速率近似表达式, 随后基于该近似式研究量化比特数、发送功率等参数对系统性能的影响, 并进一步研究能量效率与量化比特数的关系。研究结果表明基站端配置低精度 ADC 在保证和速率损失有限的条件下, 能够显著提升能量效率, 意味着大规模 MIMO 系统可以通过低精度 ADC 的运用来实现成本和复杂度的降低。

由于接收机功耗很大程度上由量化精度决定, 并且与量化精度呈指数关系^[42,43], 也就意味着配置高精度 ADC 接收机的系统功耗将不可忽视, 但低精度 ADC 会带来一定的量化误差, 因此对于高效的系统接收机设计来说需要在系统功耗和量化误差之间取得平衡。参考文献[39]将量化系统的能量效率定义为消耗 1 J 能量需要的比特数, 给出了信道容量下界, 建立了系统功耗模型, 研究了 MIMO 系统中最大化能量效率对应的

ADC 精度,并在参考文献[39]中被扩展到利用导频训练进行信道估计的系统,对导频长度、平均接收信噪比、ADC 精度和接收天线数进行联合优化,以最大化能量效率。进一步,参考文献[45]基于前面的功耗模型,建立能量效率优化模型,并提出了几个具体的寻找近优解的算法,包括粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法以及基于天线选择的算法,为低精度 ADC 的运用和部署提供了理论指导。

从上述非线性建模下和 AQNM 模型下的低精度量化系统的信道容量研究来看,目前学术界的很多研究成果都从单比特量化入手,对采用低精度 ADC 的量化系统容量进行分析,比较其相较于传统高精度量化所面临的系统性能损失,探索其在实际应用中的可行性。同时,目前对低精度量化的研究大部分集中在上行接收的系统容量和频谱效率,对下行信道容量的研究结果还比较匮乏。因此,关于低精度量化的信道容量研究势必会推动无线通信技术的进一步发展。

3 低精度量化的接收技术

虽然对低精度量化的研究和应用最早出现在超宽带通信系统中,目前学术界对其研究的范围已经扩展到了大规模 MIMO 系统和毫米波系统中。从系统频谱效率及信道容量角度上的研究结果,促进了对采用低精度 ADC 接收机的各种关键技术的研究,例如载波同步问题、定时同步问题、信道估计问题、时延估计、信道均衡问题和自动增益控制问题等。对低精度量化下的接收机技术的研究分析,可以进一步指导其在实际系统下的具体实现,可以预见在 5G 的推动下将会成为近几

年的研究热点。

3.1 自动增益控制和同步

图 6 是一种具体的采用低精度量化的无线收发机结构,在低精度 ADC 模块之前需要先进行自动增益控制和同步。同步是数字通信系统中一个不可忽视的问题,正确有效的载波频率同步、载波相位同步及定时同步是通信双方能够进行正常通信的必要保障。其中定时同步的方法可以分为两种:第一种定时同步依靠接收信号中的冗余信息进行估计,这种冗余信息通常表现为保护间隔中的数据的统计特性;第二种类型根据发送和接收双方约定好的协议在发送数据中插入引导序列(例如 PN 序列),接收端基于接收的引导序列对符号进行定时同步。在实际系统中,载波同步涉及频率同步和相位同步两个步骤,一般情况下先进行载波频率同步,剩余的较为稳定的相位偏差再通过相位同步进行补偿。参考文献[50]表明,相位同步可经由相位捕获与相位跟踪得以实现。首先,采用某种相位捕获算法得到一个与实际相位偏差值相接近的估计量,进而通过相位跟踪消除剩余相对较小的相位偏移值。在采用复数值调制的情况下,相位偏移对低精度量化接收机性能的影响可由参考文献[46]体现,然而目前关于低精度量化接收机相位估计方法的研究并不充分。针对 PSK 调制,参考文献[48]提出了一种只量化相位的方法。仿真结果表明,通过加入相位抖动,接收机的性能可以得到进一步改善。参考文献[46]对低量化比特 OFDM 系统的载波偏移恢复问题和信道估计问题进行联合设计,通过使用带有反馈的低精度 ADC,使得两者可以达到传统全精度量化的性能。参考文献[49]介绍了如何设计加入相位旋转

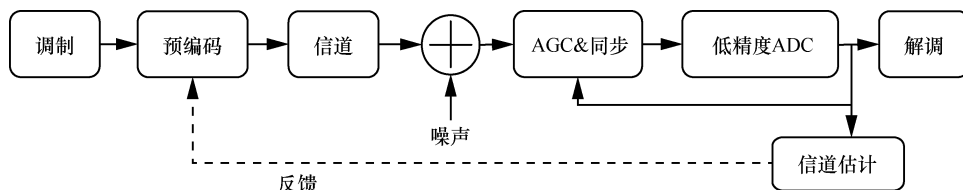


图 6 一种低精度 ADC 无线收发机结构



辅助的单比特量化接收机, 并从理论和实现两个角度加以分析。结果表明, 针对 QPSK 信号, 设计相位旋转辅助角度为 4° 时, 添加的辅助通道具有最大限度优化系统量化性能的功能。可以预见, 研究如何在基于低精度 ADC 的量化系统接收端实现有效的同步具有非常重要的现实意义。

考虑到低精度 ADC 的动态范围较小, 如何有效利用全部的量化区间, 进行高精度的数字自动增益控制 (AGC), 是低精度量化时需要解决的关键问题。目前, 对低精度量化信号处理技术的研究通常都假定理想自动增益控制, 关于低精度量化系统中 AGC 的研究还处于初级阶段。参考文献[51]重点研究的是 PAM 信号的低精度量化接收机的自动增益控制问题, 使用随机的训练序列, 采用最大似然准则确定 ADC 的门限, 结果表明在低信噪比的条件下性能比较理想, 但是随着信噪比的增加性能却逐步下降。通过引入高斯分布的随机抖动信号, 可以达到改善高信噪比时性能的目的。参考文献[52]中进一步引入了粒子滤波器并计算了最大后验概率估计值, 使得性能接近理想的 AGC, 在原来的基础上有了很大的提高。可以看到, 参考文献[53]中共提出了 4 种幅度估计算法用于低量化比特系统的自动增益控制: 迭代的 MAP 幅度估计算法、ML 幅度估计算法、最优量化门限的贪婪算法以及基于粒子滤波的幅度估计算法。总体来讲, 由于单比特量化系统或较高精度的量化系统 (如 4~5 bit) 可以暂且不考虑 AGC, 目前关于低精度量化的实际应用主要致力于这些系统, 但采用 2~3 bit 量化的接收机的关键技术仍旧处于理论研究阶段。因此, 能否对低比特量化器的输入信号进行有效的增益控制成为低精度 ADC 能否在无线接收机中被广泛应用的关键。

3.2 信道估计

在低精度量化系统中, 由于低比特量化带来的失真很大, 且定时同步和载波同步也造成一定的误差, 接收机难以获得准确的参考信号及相位

偏差。在接收端基于低精度 ADC 如何实现有效的信道估计仍是一个开放问题, 受到很多学者的极大关注^[53-58]。

值得注意的是, 在单比特量化接收机中所有关于接收信号的幅度信息都丢失了, 如何在只包含 $\{1, -1\}$ 的高度非线性接收信号中恢复信道信息具有巨大的挑战性。参考文献[54]给出了一种单比特量化信道估计的方法, 该方法基于训练序列得到最大似然信道估计结果。同时, 提出了两种策略以提高接收性能, 分别为迭代解调和去除相关模板中的小幅度点。参考文献[55]针对单比特量化的 ISI 信道, 提出贪婪追求算法 (greedy pursuit algorithm), 结合迭代方法准确地估计出了单比特量化的信道状态信息, 同时给出了对应的发送端预均衡器设计。参考文献[56-58]都通过引入抖动 (dither) 信号的方法, 对抗低精度量化带来的非线性影响。比如, 参考文献[58]表明对于均值估计问题, 在量化前加入抖动信号可以提高克拉美罗下界 (CRLB)。参考文献[56, 57]表明对于信号参数估计问题, 通过引入抖动信号可以使得最小二乘拟合估计具有一致性。不同于参考文献[56-58]中的 1 bit 量化系统, 参考文献[59]考虑有限精度 ADC, 并在抖动信号之外加入增益控制, 运用线性 MMSE 准则设计抖动信号, 重点关注中低 SNR 区域和短训练序列长度, 讨论了低精度量化系统下存在符号间干扰的信道估计问题。

总之, 从这些研究结果可以看出, 由于低精度量化丢失了信号的幅度信息, 因此低精度量化下的信道估计成了接收机性能损失的一个重要来源。如何在低精度量化的前提下有效地获取信道状态信息, 提高低精度量化接收机的性能, 需要进行持续的研究和改进。

3.3 接收机设计

已有参考文献中关于低精度量化场景下接收技术的研究, 大部分旨在分析相较于传统高精度量化, 采用低量化所带来的系统传输速率和信道

容量损失。参考文献[60]分析了 UWB 系统中几种不同的 1 bit 模数转换器 (ADC) 接收机的性能, 指出采用 sigma-delta ADC 并进行过采样能够达到和高精度数字接收机相同的 BER 性能。参考文献[54]给出了脉冲调制下以最大似然 (maximum likelihood, ML) 为准则的最优 1 bit 接收机, 进一步利用泰勒展开简化最优接收机中的相关模块, 提出一种次优的接收机结构, 并通过迭代的方式保证较小的性能损失。数值结果表明, 与理想量化相比, 该低复杂度接收机仅引入 2 dB 的 SNR 损失。参考文献[61]设计了非 1 bit 量化的最大似然接收机, 在对判决似然比进行高斯近似的基础上, 分析了量化信号的最优处理过程并给出了 BER 性能, 最终得到采用 6 级或者 8 级量化接收机能够达到很好的性能的结论。参考文献[62]分析了能够对接收信号进行有效自动增益控制的低精度 UWB 接收机性能, 并对不同接收信号、信道条件下的 ADC 精度进行了研究。以脉冲 UWB 系统为例, 为了达到一定的系统性能要求, 在 AWGN 信道条件下需要 1~2 bit 量化, 而对于存在窄带干扰的信道环境则需要 4 bit 量化。参考文献[63, 64]分别针对采用 QPSK 和 16QAM 调制的大规模 MIMO 系统, 研究了 1 bit 线性接收机的性能, 其中参考文献[64]表明采用最大比合并接收以及导频、数据联合处理能够达到系统容量。同样考虑大规模 MIMO 系统, 参考文献提出了一种 1 bit 量化的近似最大似然接收机, 并且验证了其性能远超过迫零接收机。尽管 1 bit 量化能够带来极大的能量效率和成本效率, 但它所导致的传输速率损失也不容小觑, 尤其是高 SNR 区域。另外, 用 1 bit 量化做信道估计所需的导频开销也远高于高精度量化的情况^[46, 63, 65]。基于这样的考虑, 参考文献[66, 67]重点关注配置混合精度 ADC 的大规模 MIMO 系统中的接收机设计。在混合 ADC 模型中, 部分 ADC 配置低精度, 其他部分按照传统方式配置高精度 ADC。参考文献[66]表明不管

在单用户场景还是多用户场景中, 仅小比例 ADC 配备高精度的混合 ADC 结构都能在大大降低系统功耗的基础上, 取得比传统纯高精度结构更高的信道容量。参考文献[66, 67]的基础上考虑混合 ADC 架构下的接收机设计, 详细介绍了 3 种接收机设计方法^[67], 通过状态演化分析 (state evolution analysis, SE) 评估接收机性能。

除此之外, 在低精度量化场景下接收机算法设计方面, 国内外研究人员也取得了一系列有意义的成果。由于低精度 ADC 造成模拟接收信号强烈的非线性失真, 发送信号与接收信号之间的关系无法用线性关系表示, 而传统接收机多适用于线性发送—接收信号模型, 因而对于低精度 ADC 场景难以获得可接受的性能。接收端使用低精度 ADC 时, ADC 输出信号与发送信号的关系通常可用以下线性混合模型表示:

$$\mathbf{q} = Q_c(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n}) \quad (16)$$

其中, $\mathbf{q} \in \mathbb{C}^N$ 为低精度 ADC 输出信号向量, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^M$ 为发送信号向量, $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^N$ 为加性噪声向量, $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为信道矩阵, $Q_c(\cdot)$ 表示低精度量化映射关系。对于不同的 M 与 N 的值与信道矩阵 $\mathbf{A}$, 以上模型可建模不同的通信系统。接收机设计的核心问题为信号检测问题, 其目标为在已知信道矩阵 $\mathbf{A}$ 的情况下, 根据量化接收信号 $\mathbf{q}$, 以某种最优准则对发送信号 $\mathbf{x}$ 进行还原, 其中最优准则包括 ML 准则、MAP 准则、MMSE 准则等。若依据上述准则直接求解, 需进行穷尽搜索或计算高维积分, 对于大规模通信系统计算复杂度极大。因而已有参考文献或基于特定的假设或松弛设计低复杂度次优算法, 或设计收敛于最优解的迭代算法。

参考文献[68]针对低精度量化大规模 MIMO 系统上行多用户信号检测问题, 通过将原 ML 问题中对于发送信号 $\mathbf{x}$ 的约束进行松弛, 将问题转化为标准凸优化问题, 提出近似 ML 检测算法。参考文献[69]基于发送信号先验分布松弛为高斯



分布这一假设, 利用快速自适应收缩/阈值算法架构, 求解低精度量化 MIMO-OFDM 系统 MAP 以及 MMSE 信号检测问题。上述参考文献的仿真结果表明, 以上算法均可获得较好的性能, 然而, 均未实现最优信号检测。统计推断领域的最新成果使得当信道矩阵 $\mathbf{A}$ 具有一些特殊性质时, 迭代最优信号检测算法设计成为可能。对于 $\mathbf{A}$ 的元素相互独立且服从高斯分布的情形, 也即无空间相关性平衰落 MIMO 系统, 参考文献[67]基于 GAMP 算法架构提出最优信号检测算法, 并推导状态演化方程得出每步迭代算法性能的理论分析结果。进一步地, 参考文献[70]基于 Bi-GAMP 架构提出联合数据检测与信道估计算法, 并通过统计物理学领域的重复实验法 (replica method) 推导出算法的理论分析结果。对于 $\mathbf{A} = \mathbf{F}^H \text{diag}(\mathbf{h})$ 的情形, 其中 $\mathbf{F}$ 为归一化 N 阶 DFT 矩阵, $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^N$ 为频域信道响应矩阵, 也即低精度量化 OFDM 系统, 参考文献[71]基于 GTurbo 架构提出最优信号检测算法, 通过状态演化分析得出解耦准则, 并以此为基础提出子载波功率分配方法进一步降低平均误符号率, 此外通过拓展 GTurbo 架构设计频域信道估计算法, 无需很大的导频开销即可获得较为准确的信道参数。而对于更具一般性的矩阵 $\mathbf{A}$, 基于参考文献[72]提出的广义期望一致 (generalized expectation consistent, GEC) 算法架构, 可设计出从量化接收信号中重建原始发送信号的迭代最优算法, 可应用于更广泛的信道模型。

低精度量化下接收机设计的理论与关键技术研究为当下最热门的研究领域, 仍有很多问题亟待研究, 例如如何在低精度量化系统中支持高阶调制信号的传输以及低精度量化及其关键技术在实际系统中实现等。

4 结束语

本文介绍了低精度量化在无线通信系统中的研究进展, 包括信道容量和接收技术, 简要叙述

了相对于传统不考虑量化的信道, 低精度 ADC 所面临的容量损失, 同时介绍了低精度量化下的诸如同步、增益控制和信道估计等问题, 为接收机设计提供指导。由研究结果可知, 低精度量化接收机的研究已成为一个热点, 并且取得了一定的进展, 但是对其的研究程度尚不充分, 得到的结论局限性很大, 如何解决在大规模 MIMO 系统和毫米波系统中低精度量化的理论与实现问题尚待深入研究。

参考文献:

- [1] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2013.
- [2] BOCCARDI F, HEATH R W, LOZANO A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 74-80.
- [3] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [4] NGO H Q, LARSSON E, MARZETTA T. Energy and spectral efficiency of very large multiuser mimo systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [5] WANG C, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communications Magazine 2014, 52(2): 122-130.
- [6] HAN C, HARROLD T, ARMOUR S, et al. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine 2011, 9(4): 46-54.
- [7] CHEN Y, ZHANG S, XU S, et al. Fundamental tradeoffs on green wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine 2011, 49(6): 30-37.
- [8] WALDEN R H. Analog-to-digital converter technology comparison[C]//16th Annual Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium 1994, Oct 16-19, 1994, Philadelphia, PA, USA. New Jersey: IEEE Press, 1994: 217-219.
- [9] HENNESSY J L, PATTERSON D A. Computer architecture: a quantitative approach[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [10] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access. physical channels and modulation: TS36_V8[S]. 2009.
- [11] IEEE. P802.16m/D4, advanced air interface[S]. 2010.
- [12] ETSI. European standard (telecommunications series) digital video broad-casting (DVB). Specification for service information (SI) in DVB systems: 300 468 v1.4.1[S]. 2000.
- [13] HINT. Ultra-wideband radio technology: overview and future research[J]. Computer Communications, 2003, 26(1):46-52.

- [14] SMULDERS P. Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: prospects and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(1): 140-147.
- [15] JIANG X C, WANG Z Y, CHANG M F. A 2-GS/s 6-b ADC in $0.18\mu\text{m}$ CMOS[C]//2003 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Feb 13, 2003, San Francisco, USA. New Jersey: IEEE Press, 2003: 322-497.
- [16] PRAK S HY, PALASKAS Y, FLYNN M P. A 4-GS/s 4-bit flash ADC in $0.18\mu\text{m}$ CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(9): 1865-1872.
- [17] WIDROW B. A study of rough amplitude quantization by means of nyquist sampling theory[J]. IRE Transactions on Circuit Theory, 1956, 3(4): 266-276.
- [18] BUSSGANG J J. Cross correlation functions of amplitude-distorted Gaussian signals[R]. 1952.
- [19] LIANG N, ZHANG W. Mixed-ADC massive MIMO[J]. arXiv preprint arXiv:1504.03516, 2015.
- [20] ZHANG T C, WEN C K, JIN S, et al. Mixed-ADC massive MIMO detectors: performance analysis and design optimization[J]. arXiv preprint arXiv:1509.07950, 2015.
- [21] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(6,10): 379-423, 623-656.
- [22] BAI Q, MEZGHANI A, NOSSEK J A. On the optimization of ADC resolution in multi-antenna systems[C]//The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Aug 27-30, 2013, Ilmenau, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [23] DABEER O, SINGH J, MADHOW U. On the limits of communication performance with one-bit analog-to-digital conversion[C]//IEEE 7th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, July 2-5, 2006, Cannes, France. New Jersey: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [24] SINGH J. Communication transceiver design with low-precision analog-to-digital conversion[D]. Santa Barbara: University of California, 2009.
- [25] WITSENHAUSEN H. Some aspects of convexity useful in Information theory[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1980, 26(3).
- [26] DUBINS L. On extreme points of convex sets[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1962(5): 237-244.
- [27] SINGH J, DABEER O, MADHOW U. Communication limits with low precision analog-to-digital conversion at the receiver[C]//IEEE International Conference on Communications, June 24-28, 2007, Glasgow, UK. New Jersey: IEEE Press, 2007: 6269-6274.
- [28] SINGH J, DABEER O, MADHOW U. On the limits of communication with low-precision analog-to-digital conversion at the receiver[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(12): 3629-3639.
- [29] SINGH J, DABEER O, MADHOW U. Capacity of the discrete-time AWGN channel under output quantization[C]//IEEE International Symposium on Information Theory, July 6-11, 2008, Toronto, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1218-1222.
- [30] KRONE S, FETTWEIS G. Achievable rate of single-carrier systems with optimal uniform quantization at the receiver[C]//2010 IEEE Information Theory Workshop (ITW), Jan 6-8, 2010, Cairo, Egypt. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [31] CHANDRASEKARAN S, MOHAMMED S K, CHOCK-ALINGAM A. On the capacity of quantized Gaussian MAC channels with finite input alphabet[C]//2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 5-9, 2011, Kyoto, Japan.[S.l.: s.n.], 2011: 1-5.
- [32] NOSSEK J A, IVRLAČ M T. Capacity and coding for quantized MIMO systems[C]//the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, July 3-6, 2006, Vancouver, British Columbia, Canada. New York: ACM Press, 2006: 1387-1392.
- [33] MEZGHANI A, NOSSEK J A. On ultra-wideband MIMO systems with 1-bit quantized outputs: Performance analysis and input optimization[C]//2007 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), June 24-29, 2007, Nice, France. New Jersey: IEEE Press, 2007: 1286-1289.
- [34] MEZGHANI A, NOSSEK J. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output[C]//2008 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), July 6-11, 2008, Toronto, ON, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2008: 260-264.
- [35] KRONE S, FETTWEIS G. Communications with 1-bit quantization and oversampling at the receiver: benefiting from inter-symbol-interference[C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept 9-12, 2012, Sydney, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2012: 2408-2413.
- [36] MO J, HEATH JR R W. Capacity analysis of one-bit quantized MIMO systems with transmitter channel state information[J]. arXiv preprint arXiv:1410.7353, 2014.
- [37] MO J, SCHNITER P, GONZALEZ P N, et al. Channel estimation in millimeter wave MIMO systems with one-bit quantization[C]//2014 48th Asilomar Conference on Signals Systems and Computers, Nov 2-5, 2014, Pacific Grove, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 957-961.
- [38] BAI Q, MEZGHANI A, NOSSEK J A. On the optimization of ADC resolution in multi-antenna systems[C]//the Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Aug 27-30, 2013, Ilmenau, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [39] BAI Q, MITTMANN U, MEZGHANI A, et al. Minimizing the energy per bit for pilot-assisted data transmission over quantized channels[C]//IEEE 25th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'14), Sept 2-5, 2014, Washington, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 81-85.
- [40] FAN L, LIN S, WEN C, et al. Uplink achievable rate for mas-



- sive MIMO systems with low-resolution ADC[J]. *Communications Letters, IEEE*, 2015, 19(12): 2186-2189.
- [41] ORHAN O, ERKIP E, RANGAN S. Low power analog-to-digital conversion in millimeter wave systems: impact of resolution and bandwidth on performance[J]. *arXiv preprint arXiv:1502.01980*, 2015.
- [42] WALDEN R H. Analog-to-digital converter technology comparison[C]//16th Annual Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium 1994, Oct 16-19, 1994, Philadelphia, USA. New Jersey: IEEE Press, 1994: 217-219.
- [43] HENNESSY J L, PATTERSON D A. *Computer architecture: a quantitative approach*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [44] MEZGHANI A, NOSSEK J A. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output[C]//IEEE International Symposium on Information Theory, July 6-11, 2008, Toronto, ON, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2008: 260-264.
- [45] BAI Q, NOSSEK J. Energy efficiency maximization for 5G multi-antenna receivers[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2015, 26(1): 3-14.
- [46] KRONE S, FETTWEIS G. Achievable rate of single-carrier systems with optimal uniform quantization at the receiver[C]//IEEE Information Theory Workshop, Jan 6-8, 2010, Cairo, Egypt. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [47] LIN Z W, PENG X M, CHIN F. Joint carrier frequency offset and channel estimation for OFDM based gigabit wireless communication systems with low precision ADC[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, Sept 5-8, 2011, San Francisco, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [48] SINGLY J, MADHOW U. On block noncoherent communication with low-precision phase quantization at the receiver[C]//IEEE International Symposium on Information Theory, June 28-July 3, 2009, Seoul, Korea. New Jersey: IEEE Press, 2009: 2199-2203.
- [49] WANG Z Y, YIN H R, WEI G. Optimal monobit digital receiver for QPSK modulation with phase rotation[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications, Aug 12-14, 2013, Xi'an, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 525-530.
- [50] Costas N G. Blind carrier phase acquisition for QAM constellations[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(11): 1477-1486.
- [51] SUN F F, SINGLY J, MADHOW U. Automatic gain control for ADC-limited communication[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, Dec 6-9, 2010, Miami, FL, USA. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [52] SUN F F, LIU D P, YUE G X. Particle filtering based automatic gain control for ADV-limited communication[C]//IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, May 5-8, 2011, Yokohama, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [53] 孙霏菲. 低精度量化在无线接收机中应用的关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- SUN F F. Research on Key Technologies of low precision quantization in wireless receiver[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [54] YIN H, WANG Z, KE L, et al. Monobit digital receivers: design, performance, and application to impulse radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(6): 1695-1704.
- [55] LI P F, WANG Z Y, YIN H R. Joint channel estimation and pre-equalization for monobit transmission system[C]//2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Aug 12-14, 2013, Xi'an, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 303-308.
- [56] DABEER O, MASRY E. Multivariate signal parameter estimation under dependent noise from 1-bit dithered quantized data[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(4): 1637-1654.
- [57] DABEER O, KARNIK A. Signal parameter estimation with dithered 1-bit quantization[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5389-5405.
- [58] PAPADOPOULOS H C, WORNELL G W, OPPENHEIM A V. Sequential signal encoding from noisy measurements using quantizers with dynamic bias control[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(3): 978-1002.
- [59] DABEER O, MADHOW U. Channel estimation with low-precision analog-to-digital conversion[C]//IEEE International Conference on Communications, May 23-27, 2010, Cape Town, South Africa. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [60] HOYOS S, SADLER B M, ARCE G R. Monobit digital receivers for ultrawideband communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(4): 1337-1344.
- [61] KE L, YIN H, GONG W, et al. Finite-resolution digital receiver design for impulse radio ultra-wideband communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5108-5117.
- [62] BLAZQUEZ R, LEE F S, WENTZLOFF D D, et al. Digital architecture for an ultra-wideband radio receiver[C]//2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference (VTC), Oct 6-9, 2003, Orlando, USA. New Jersey: IEEE Press, 2003: 1303-1307.
- [63] RISI C, PERSSON D, LARSSON E G. Massive MIMO with 1-bit ADC[J]. *arXiv preprint arXiv:1404.7736*, 2014.
- [64] JACOBSSON S, DURISI G, COLDREY M, et al. One-bit massive MIMO: channel estimation and high-order modulations[J]. *arXiv preprint arXiv:1504.04540*, 2015.
- [65] IVRLAČ M T, NOSSEK J A. On MIMO channel estimation with single-bit signal-quantization[C]//ITG Smart Antenna Workshop, Feb 26-27, 2007, Vienna, Austria.[S.l.:s.n.], 2007.
- [66] LIANG N, ZHANG W. Mixed-ADC massive MIMO[J]. *arXiv preprint arXiv:1504.03516*, 2015.
- [67] ZHANG T C, WEN C K, JIN S, et al. Mixed-ADC massive MIMO detectors: performance analysis and design optimization[J]. *arXiv preprint arXiv:1509.07950*, 2015.
- [68] CHOI J, MO J, HEATH R W. Near maximum-likelihood detector and channel estimator for uplink multiuser massive MIMO systems with one-bit ADCs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(5): 2005-2018.

- [69] STUDER C, DURISI G. Quantized massive MU-MIMO-OFDM uplink[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(6): 2387-2399.
- [70] WEN C K, WANG C J, JIN S, et al. Bayes-optimal joint channel-and-data estimation for massive MIMO with low-precision ADCs[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2016, 64(10): 2541-2556.
- [71] WANG H, WEN C K, JIN S. Bayesian optimal data detector for mmWave OFDM system with low-resolution ADC[Z/OL]. [2017-05-01]. <https://arxiv.org/abs/1704.03591>.
- [72] HE H T, WEN C K, JIN S. Generalized expectation consistent signal recovery for nonlinear measurements[J]. arXiv preprint arXiv: 1701.04301v2, 2017.

[作者简介]



乔丹 (1991-), 女, 东南大学移动通信国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为低精度量化、大规模 MIMO 无线通信系统。



温朝凯 (1976-), 男, 台湾中山大学通讯工程研究所副教授, 主要研究方向为无线通信、最优化理论等。



高飞飞 (1980-), 男, 清华大学自动化系信息处理研究所副教授, 主要研究方向为通信原理、通信信号处理、阵列信号处理、凸优化、多天线传输技术、多载波传输、协作通信、认知无线电及资源分配和优化。



金石 (1974-), 男, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G 移动通信理论与关键技术、多天线技术、协作通信及人工智能在移动通信中的应用等。