文章编号:1001 – 893X(2011)09 – 0020 – 07

TD – LTE 系统中工程实用的发射通道幅度校准方法*

曹 峥,樊 迅

(上海贝尔股份有限公司,上海 201206)

摘 要:为了解决宽带 TD – LTE 系统中传统发射通道幅度校准在通道幅频特性不平坦时校准性能不理想的问题,根据利用子载波发送信号长短时功率统计特性的不同,提出了两种基于“能量归一化”预均衡的校准方法:长时预均衡和短时预均衡,对它们的性能、特点进行了理论分析和仿真研究,并结合工程应用对相关问题进行了深入讨论。仿真结果表明,由于有针对性地将“能量归一化”的预均衡与系统中的闭环增益控制(CLGC)功能相结合,所提方法可以有效补偿发射通道幅频特性不平坦,获得比传统方法更好的校准性能。所提方法及其分析结论为宽带 TD – LTE 系统中高性能发射通道校准的工程实现提供了参考依据。

关键词:TD – LTE ;波束赋形;通道校准;幅度校准;预均衡

中图分类号:TN929.5 **文献标识码**:A doi:10.3969/j.issn.1001 – 893x.2011.09.005

Engineering-Practical Transmission-path Amplitude Calibration Methods for TD – LTE Systems

CAO Zheng, *FAN Xun*

(Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: To improve the degraded performance of the traditional transmission-path amplitude calibration method in the case of unflat transmission-path amplitude-frequency characteristics in wideband TD – LTE systems, this paper proposes two energy-normalized-pre-equalization-based transmission-path amplitude calibration methods: the long-term pre-equalization and the short-term pre-equalization, distinguished according to the difference in the used(long or short term) sub-carrier transmission-signal power statistics. The performance and characteristics of the methods are studied by theoretical analysis and simulation investigation, and the engineering application related problems for them are deeply discussed. Simulation results show that, by elaborately combining the energy-normalized pre-equalization and the close-loop gain control(CLGC) function in systems, the proposed methods can effectively combat the unflatness of transmission-path amplitude-frequency-response and hence obtaining better calibration performance than the traditional one. The proposed methods and the corresponding analysis conclusions in this paper provide a reference for the high-performance-transmission-path-calibration engineering implementation in wideband TD-LTE systems.

Key words: TD-LTE; beam forming; path calibration; amplitude calibration; pre – equalization

1 引 言

TD – LTE 系统采用时分双工(TDD)模式,具有天然的上下行无线信道互易性,便于采用“波束赋形”技术,提高系统下行传输性能[1-4]。但是,为了充分挖掘波束赋形带来的性能增益,需在发送和接

* **收稿日期**:2011 – 06 – 10;**修回日期**:2011 – 08 – 15
基金项目:国家科技重大专项(2010ZX03002 – 006)
Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2010ZX03002 – 006)

收方向上对系统中的多个中射频通道进行幅度相位校准,以维持多通道响应相对的一致性[5]。另外,TD – LTE 系统在实现多小区联合组网时,需要采用小区间干扰协同(ICIC)技术抑制邻小区干扰。为了有效地基于邻小区多载波信号发射功率的联合调度实现下行 ICIC,需要对系统基站侧中射频发射通道进行幅度校准,以使得通道(在信号带宽内)具有绝对稳定的增益以及平坦的频响特性。系统基站侧中射频发射通道幅度校准的好坏对 TD – LTE 系统的性能有直接影响。

在传统基站系统的工程实现中,中射频处理子系统部分通常包含闭环增益控制(CLGC)功能,用于保证系统运行时中射频发射通道增益稳定在期望的精度(如 ± 0.1 dB);与之对应,通常不增加额外的幅度校准处理,而仅借助系统中的 CLGC 功能完成发射通道的幅度校准。该方法在发射通道具有平坦的幅频特性时,可以获得较好(接近 CLGC 精度)的校准性能。但对于宽带的 TD – LTE 信号而言,发射通道并非平坦,而且不平坦性还会随着环境温度的变化而变化。由于 CLGC 功能仅能够保持整体通道增益的稳定,而无对通道幅频不平坦特性的补偿(或均衡)功能,传统方法在发射通道具有不平坦幅频特性的场合,不能有效地补偿通道不平坦及多通道间幅度响应的不一致,校准性能不理想。

为了解决宽带 TD – LTE 系统中发射通道幅频特性不平坦情况下的通道幅度校准问题,本文提出了两种基于“能量归一化”预均衡的发射通道幅度校准方法:基于子载波发送信号长时功率统计特性的能量归一化预均衡(简称长时预均衡)以及基于子载波发送信号短时功率统计特性的能量归一化预均衡(简称短时预均衡),对它们的性能、特点进行了理论分析和仿真研究,并结合工程应用对相关问题进行了深入讨论。仿真与分析表明,所提方法能有效地补偿发射通道幅频特性不平坦,获得比传统方法更好的通道校准性能。

2　系统模型

图 1 所示为 TD – LTE 基站工程实现中广泛采用的发射通道校准系统结构。如图所示,在 TD – LTE 系统基站侧配置多条发射通道。在每条发射通道上,下行信息基于调度结果在被调度的频域子载波上传输;频域子载波数字信号的幅度基于预定义的、与通道外部天线连接口(EAC 口)最大发送功率 $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}$ 相对应的最大数字功率 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$ 定标(即假设所有子载波有一个常数的中射频发射通道增益幅度 $g=\sqrt{P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}/\mathrm{P}_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}}$),并由调度器保证被调度子载波上数字信号的功率总和不超过 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$。频域子载波信号经过频时域变换(即 IFFT 变换)转化为时域基带 I/Q 信号,经中射频发射通道处理后,通过外接射频电缆传输到天线网络中对应的发射天线发射。中射频发射通道主要完成基带 I/Q 信号到射频发射频段的射频调制,并维持通道线性及增益等功能。工程实现中,常采用数字中频或零中频方案完成基带信号的射频调制;基于射频功率放大器(PA)输出信号反馈的基带数字预失真(DPD)技术维持通道线性化;基于 PA 或通道输出射频信号反馈以及通道增益离线校准数据(如反馈通道的增益校准数据,射频前端发射滤波器的增益校准数据等)的实时 CLGC 功能维持通道增益稳定。发射通道中 EAC 口的外接部分(含射频电缆和天线网络中的天线通道)通常会对发送信号引入一定衰减。但是,这部分通常具有较好的宽带幅频平坦度,而且不同通道间的增益差别也容易通过离线校准的方式得到并进行补偿。对于本文所讨论不平坦发射通道幅频特性下的实时通道幅度校准问题,为了突出描述重点,不失一般性,不妨假设通道外接部分均具有理想的单位增益,即通道天线口发射功率 P_{out} 等于 EAC 口信号发射功率 $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC}}$。

为了有效挖掘 TD – LTE 系统波束赋形以及下行 ICIC 的性能增益,需要对相同子载波多个中射频发射通道的增益幅度以及同一发射通道不同子载波的增益幅度进行校准,使得校准补偿后不同子载波和发射通道的增益幅度 $g_{n,k}$ 保持一致,即:

$$g_{n,k}=g,n=1,2,\cdots,N;k=1,2,\cdots,K \tag{1}$$

式中,$g_{n,k}$ 为通道 n 子载波 k 的增益幅度,N 为系统中的发射通道数,K 为映射到每条发射通道上的子载波数。

在传统基站系统的工程实现中,发射通道幅度的校准通常仅借助系统中的 CLGC 功能完成。由于不具备通道不平坦特性的补偿(或均衡)功能,该方法在发射通道幅频特性不平坦的宽带 TD – LTE 系统中校准性能并不理想。为了解决此问题,本文将提出两种基于能量归一化预均衡的发射通道幅度校准方法:长时预均衡和短时预均衡。出于定量分析比较不同幅度校准方法性能的需要,定义反映幅度校准绝对偏差量 $\Delta_{n,k}^{\mathrm{abs}}$ 和相对偏差量 $\Delta_{m,k}^{\mathrm{rel}}$ 如下:

$$\Delta_{n,k}^{\text{abs}} = \left| \frac{g_{n,k} - g}{g} \right|, n = 1,2,\cdots,N, k = 1,2,\cdots,K \quad (2)$$

$$\Delta_{m,k}^{\text{rel}} = \left| \frac{g_{m,k} - g_{1,k}}{g_{1,k}} \right|, m = 2,3,\cdots,N, k = 1,2,\cdots,K \quad (3)$$

特别地，$\Delta_{n,k}^{\text{abs}}$表示通道 n 子载波 k 的增益幅度 $g_{n,k}$ 相对理想增益幅度 g 的归一化偏差，$\Delta_{m,k}^{\text{rel}}$表示通道 m 子载波 k 的增益幅度 $g_{n,k}$ 相对通道 1 对应子载波增益幅度 $g_{1,k}$ 的相对归一化偏差。

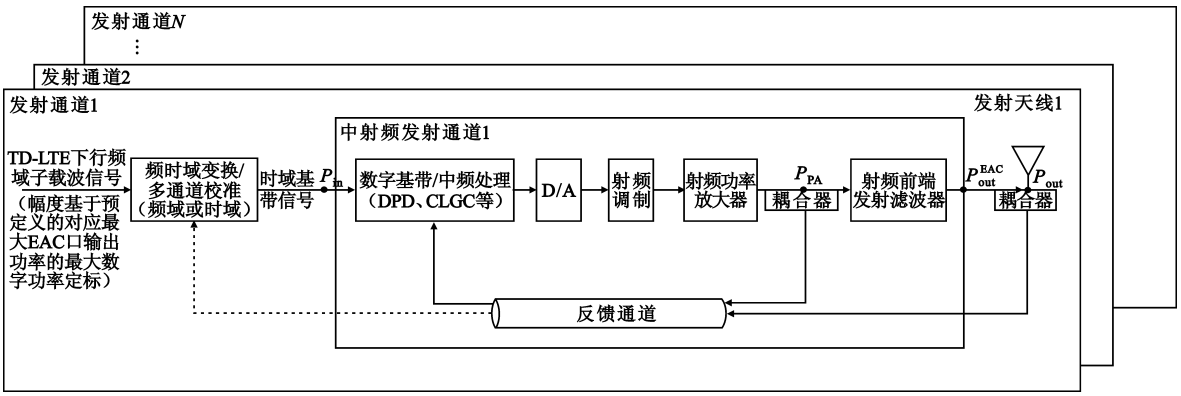

图 1 TD－LTE 发射通道校准系统结构示意图

Fig. 1 A sketch of TD－LTE transmission－path－calibration system structure

3 两种基于能量归一化预均衡的多通道幅度校准方法

3.1 基于子载波发送信号长时功率统计特性的能量归一化预均衡(长时预均衡)

该方法的基本思想是：对每条发射通道，在获得通道幅频不平坦特性实时观察的基础上，基于先验的 TD－LTE 系统下行子载波发送信号长时功率统计特性，产生基带“长时”统计意义上“能量归一化”的频域子载波通道幅度补偿系数(或等效地，时域预均衡滤波系数)进行补偿，完成校准。

工程实现中，发射通道幅频不平坦特性的实时观察通常可通过如下两种方法之一得到：基于周期宽带导频信号发送的方法和基于预先测量校准数据的方法。

TD－LTE 系统下行子载波发送信号长时功率统计特性与系统网络规划、用户长时分布及资源调度策略等一些相对稳定的系统特性相关，可以通过理论仿真或者实际的系统性能测量得到，并配置到系统中作为先验信息使用。考虑到在实际的 TD－LTE 系统中，出于对通道发射功率控制方便的需要，所应用的多天线处理技术(MIMO、波束赋形)通常会在相同子载波的多个发射通道间均匀分配发射功率，表示基带发送信号带宽内子载波 k 上发送信号的长时功率统计为 $p_k^{\text{IN,Long}}, k = 1,2,\cdots,K$。

为了达到式(1)所示基带发送信号带宽内所有子载波和发射通道的增益都为理想增益的目标，对每条需要校准的发射通道，如通道 n，定义基带频域(K 个)子载波增益长时幅度补偿因子向量为

$$\boldsymbol{v}_n^{\text{Long}} = \alpha_n^{\text{Long}}[1/f_{n,1}, 1/f_{n,2}, \cdots, 1/f_{n,K}]^{\text{T}} \quad (4)$$

式中，$f_{n,k}(n = 1,2,\cdots,N, k = 1,2,\cdots,K)$表示基带发送信号带宽内通道 n 子载波 k 上观察到的通道不平坦幅度响应；补偿项$[1/f_{n,1}, 1/f_{n,2}, \cdots, 1/f_{n,K}]^{\text{T}}$用于抵消不同子载波信道增益上的不平坦；$\alpha_n^{\text{Long}}$ 为长时能量归一化因子，用于在子载波发送信号长时功率统计意义上使得补偿前后输入到中射频通道的基带信号功率 P_{in}保持不变，即使得

$$\sum_{k=1}^{K} p_k^{\text{in,Long}} = (\alpha_n^{\text{Long}})^2 \sum_{k=1}^{K} (p_k^{\text{in,Long}}/f_{n,k}^2) \quad (5)$$

也即

$$\alpha_n^{\text{Long}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K} p_k^{\text{in,Long}}}{\sum_{k=1}^{K} (p_k^{\text{in,Long}}/f_{n,k}^2)}} \quad (6)$$

$\boldsymbol{v}_n^{\text{Long}}$ 用于在基带频域对通道 n 的 k 个子载波通道进行幅度校准补偿。由于补偿向量 $\boldsymbol{v}_n^{\text{Long}}$ 中 α_n^{Long} 的存在使得长时统计意义上 P_{in}不变，发送信号经过包含(可实时维持通道固定增益幅度 g 的)CLGC 功能的中射频通道处理后，通道输出信号长时统计意义上

的功率 $P_{out} = g^2 P_{in}$ 也不变。这样,经过补偿后,将在长时统计意义上使得所有子载波通道增益平坦且为期望的增益幅度 g。

与基带频域子载波增益幅度补偿因子向量 $\boldsymbol{v}_n^{Long}$ 对应,如采用基带时域预均衡滤波进行通道校准补偿,相应的能量归一化时域预均衡滤波系数向量为

$$\boldsymbol{\mu}_n^{Long} = F^{-1}\{\boldsymbol{v}_n^{Long}\} \tag{7}$$

式中,$F^{-1}\{\cdot\}$ 为反傅里叶变换。

3.2　基于子载波发送信号短时功率统计特性的能量归一化预均衡(短时预均衡)

该方法的基本思想是:对每条发射通道,在获得通道幅频不平坦特性实时观察的基础上,基于实时计算的 TD－LTE 系统下行子载波发送信号“短时”功率统计特性,产生基带短时统计意义上“能量归一化”的频域子载波通道幅度补偿系数(或等效地,时域预均衡滤波系数)进行补偿、完成校准。

该方法获得通道幅频不平坦特性实时观察的方法与长时预均衡相同。与长时预均衡方法不同的是,该方法利用统计周期较短的、与实时调度特性相关性强的下行子载波发送信号短时功率统计特性计算通道校准补偿系数。在工程实现中,需要的下行子载波发送信号短时功率统计特性,可以基于对下行调度器输出的每个调度周期子载波功率调度信息进行短时统计,或者直接对子载波发送信号进行短时功率统计得到。

与长时预均衡获取基带频域子载波增益幅度补偿因子的思想类似,为了达到式(1)所示基带发送信号带宽内所有子载波和发射通道的增益都为理想增益的目标,对每条需要校准的发射通道,如通道 n,定义基带频域(K 个)子载波短时增益幅度补偿因子向量为

$$\boldsymbol{v}_n^{Short} = \alpha_n^{Short}\,[1/f_{n,1}, 1/f_{n,2}, \cdots, 1/f_{n,K}]^{T} \tag{8}$$

式中,α_n^{Short} 为短时能量归一化因子,用于在子载波发送信号短时功率统计意义上使得补偿前后输入到中射频通道的基带信号功率 P_{in} 保持不变,即使得

$$\sum_{k=1}^{K} p_k^{in,Short} = (\alpha_n^{Short})^2 \sum_{k=1}^{K} (p_k^{in,Short}/f_{n,k}^2) \tag{9}$$

也即

$$\alpha_n^{Short} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K} p_k^{in,Short}}{\sum_{k=1}^{K} (p_k^{in,Short}/f_{n,k}^2)}} \tag{10}$$

式中,$p_k^{in,Short}$ 表示基带发送信号带宽内子载波 k 上发送信号的短时功率统计。由于补偿向量 $\boldsymbol{v}_n^{Short}$ 中 α_n^{Short} 的存在使得短时统计意义上 P_{in} 不变,发送信号经过包含(可实时维持通道固定增益幅度 g 的)CLGC 功能的中射频通道处理后,通道输出信号短时统计意义上的功率 $P_{out} = g^2 P_{in}$ 不变;经过补偿,将在短时统计意义上使得所有子载波通道增益平坦且为期望的增益幅度 g。

与 $\boldsymbol{v}_n^{Short}$ 对应,如采用基带时域预均衡滤波进行通道校准补偿,相应的能量归一化时域预均衡滤波系数向量为

$$\boldsymbol{\mu}_n^{Short} = F^{-1}\{\boldsymbol{v}_n^{Short}\} \tag{11}$$

3.3　方法性能分析

3.3.1　幅度校准性能

对于具有不平坦发射通道幅频响应的宽带 TD－LTE 系统,所提两种基于能量归一化预均衡的通道幅度校准方法,通过基带补偿抵抗中射频通道幅频特性的不平坦,并且,兼顾系统中的 CLGC 功能有针对性地对基带补偿系数进行某种意义上的归一化,使得补偿且经 CLGC 控制后的多通道每子载波增益在一定意义上稳定在理想的通道增益。相对于传统的仅借助系统 CLGC 功能而无通道不平坦抵消能力的幅度校准方法,所提方法能获得更好的幅度校准性能。

在所提的两种方法中,长时预均衡方法基于“配置的”子载波发送信号长时功率统计产生通道校准补偿系数,相对需要“实时计算”子载波发送信号短时功率统计产生通道校准补偿系数的短时预均衡方法,具有较低的计算和工程实现复杂度。

在幅度校准性能上,对比式(6)和式(10)可见,当系统短时子载波发送信号功率特性与长时特性成比例时,即

$$\frac{p_k^{in,Short}}{p_k^{in,Long}} = c,\ k = 1, 2, \cdots, K \tag{12}$$

长时预均衡方法可以获得与短时预均衡方法相同的性能。

当系统短时子载波发送信号功率特性与长时特性不完全成比例时,基于长时补偿系数(式(4))进行通道校准补偿不能保证短时意义上补偿前后输入中射频通道的功率 P_{in} 不变,即不能保证短时意义上的能量归一化。特别地,对于发射通道 n,如子载波长短时功率统计有比例偏差:

$$\frac{p_k^{in,Short}}{p_k^{in,Long}} = c_k \tag{13}$$

式中，$k=1,2,\cdots,K$，且 $c_1=c_2=\cdots=c_K=c$ 不满足，采用长时补偿系数 $\boldsymbol{v}_n^{\mathrm{Long}}$ 进行通道补偿将对信号产生短时意义上能量非归一的补偿增益幅度

$$\delta_n=\alpha_n^{\mathrm{Long}}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K}(p_k^{\mathrm{in,Short}}/f_{n,k}^2)}{\sum_{k=1}^{K}p_k^{\mathrm{in,Short}}}}\neq 1,\quad n=1,2,\cdots,N \tag{14}$$

以致于尽管校准补偿后不同子载波的通道增益被平坦化，但是在经过包含（可实时维持通道固定增益幅度 g 的）CLGC 功能的中射频通道处理后，补偿后的通道增益幅度为 $\delta_n g$，相对期望的理想增益幅度 g 将出现绝对偏差（式(2)）。此外，由式(14)还可以看出，当不同通道幅频不平坦特性不一致时，即

$$b_{m,k}=\frac{f_{m,k}}{f_{1,k}} \tag{15}$$

式中，$k=1,2,\cdots,K$，且 $b_{m,1}=b_{m,2}=\cdots=b_{m,K}=b_m$ 不满足，$m=2,3,\cdots,N$，将导致不同通道校准补偿后有差别的非归一补偿增益幅度 δ_n 以及补偿后通道增益幅度 $\delta_n g$，出现幅度校准相对偏差（式(3)）。

而短时预均衡方法由于直接使用了实时计算的子载波发送信号短时功率统计产生通道校准补偿系数（式(8)），能有效地跟踪子载波发送信号的实时功率波动，获得实时能量归一化的补偿增益幅度。这样，经过基带校准补偿及包含 CLGC 功能的中射频通道处理后，能够获得理想的幅度校准性能。

3.3.2 射频功放（PA）最大输出功率需求影响

在中射频通道的工程实现中，当下行被调度信号实时（或短时）数字总功率 $P_{\mathrm{in}}=\sum_{k=1}^{K}p_k^{\mathrm{in,Short}}$ 达到最大功率 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$ 时对应的 PA 最大输出功率需求，是系统设计进行性能和成本折衷时一个需要重点考虑的问题。为了减轻实现负担，希望 PA 最大输出功率需求尽可能低。

考虑在可调度的子载波信号带宽（即支持的下行传输频带[7]）内，所采用射频前端发射滤波器的增益幅度范围为 $[f^{\mathrm{Min}},f^{\mathrm{Max}}]$。对于采用传统仅借助 CLGC 功能进行幅度校准的系统，为了使得在任意的子载波频域功率分布情形下实时数字总功率为 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$ 的输入信号在经过发射通道处理后总可以在相应 EAC 口达到最大输出功率

$$P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}=g^2P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}} \tag{16}$$

PA 最大输出功率需求为 $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}/(f^{\mathrm{Min}})^2$。可见，由于存在滤波器插损（特别地，$f^{\mathrm{Min}}<1$），为了获得 EAC 口的最大输出功率 $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}$，PA 设计时要留出一定的输出功率余量。

对于采用长时预均衡进行幅度校准的系统，在子载波被调度信号的实时数字总功率 $P_{\mathrm{in}}=\sum_{k=1}^{K}p_k^{\mathrm{in,Short}}$ 达到最大的 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$ 时，由于存在可能的非归一补偿增益幅度 δ_n（式(14)），会使得相应的 PA 最大输出功率需求也有所变化。特别地，对于发射通道 n，输入信号经过校准补偿和包含（可实时维持通道固定增益幅度 g 的）CLGC 功能的中射频通道处理后，EAC 口子载波（如子载波 k）实时输出功率 $p_{n,k}^{\mathrm{EAC_Out}}$ 与对应子载波被调度信号数字功率 $p_k^{\mathrm{in,Short}}$ 有如下关系：

$$p_{n,k}^{\mathrm{EAC_Out}}=(\delta_n g)^2p_k^{\mathrm{in,Short}},\ k=1,2,\cdots,K \tag{17}$$

另由 $p_{n,k}^{\mathrm{EAC_Out}}$ 与通道 PA 口输出功率 $P_{\mathrm{PA},n}$ 的关系：

$$P_{\mathrm{PA},n}=\sum_{k=1}^{K}(p_{n,k}^{\mathrm{EAC_Out}}/f_{n,k}^2) \tag{18}$$

可以得到：

$$P_{\mathrm{PA},n}=\frac{\sum_{k=1}^{K}p_k^{\mathrm{in,Long}}}{\sum_{k=1}^{K}(p_k^{\mathrm{in,Long}}/f_{n,k}^2)}\cdot\left[\frac{\sum_{k=1}^{K}(p_k^{\mathrm{in,Short}}/f_{n,k}^2)}{\sum_{k=1}^{K}p_k^{\mathrm{in,Short}}}\right]^2\cdot P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}} \tag{19}$$

由此可见，对于任意的长短时子载波频域功率分布情形，PA 最大输出功率需求为 $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}(f^{\mathrm{Max}})^2/(f^{\mathrm{Min}})^4$。此需求相对采用传统校准的系统中的对应需求 $P_{\mathrm{out}}^{\mathrm{EAC,Max}}/(f^{\mathrm{Min}})^2$ 较高，在一定程度上增加了 PA 输出功率的负荷。例如，对于射频滤波器增益不平坦最大波动幅度0.4 dB（即对应 $f^{\mathrm{Max}}/f^{\mathrm{Min}}=1.407$），PA 输出功率的负荷增加0.4 dB。

而对于采用短时预均衡进行幅度校准的系统，在多子载波被调度信号的实时数字总功率达到最大的 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$ 时，由于采用了实时的短时功率统计计算通道校准补偿系数可以获得实时能量归一的补偿增益幅度，使得补偿后信号的实时数字功率仍然为 $P_{\mathrm{in}}^{\mathrm{Max}}$，将和采用传统幅度校准的系统具有相同的 PA 最大输出功率需求，无需增加额外的 PA 输出功率负荷。

4　仿真结果

本节结合 TD – LTE 的系统特点,通过蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真对所提发射通道幅度校准方法的性能进行分析验证。在仿真中,如图 1 所示,考虑系统配置 2 条发射通道。每条发射通道频域子载波信号带宽内具有 6 个独立的调度带;调度带上的子载波信号具有相同的调度功率,服从独立的包含零功率调度下限的均匀分布;并且,不同发射通道相同调度带的调度功率一致。由信号带宽内射频前端发射滤波器幅频特性不平坦引入的发射通道增益波动幅度为0.4 dB(即 $f^{Max}/f^{Min}=1.407$);对于每条发射通道,调度带上射频前端发射滤波器的增益服从独立的位于[– 0.7 dB, – 0.3 dB](即对应 $f^{Min}=0.923$, $f^{Max}=0.966$)间的随机分布;而且,考虑到工程实现中不同通道通常采用相同型号的射频前端发射滤波器,在幅频特性上具有一定类似性,不同发射通道的滤波器增益特性建模为具有相关系数 0.8 的相关性。

图 2 比较了所提两种幅度校准方法和传统方法通道幅度校准绝对偏差(式(2))和相对偏差(式(3))的 CCDF(互补积累分布函数)性能。从图中可以看到,由于采用了能量归一化的预均衡抵抗通道幅频特性的不平坦,所提两种方法都能获得比传统仅借助系统 CLGC 功能的方法更好的性能;而且,在所提两种方法中,短时预均衡由于采用了实时计算的子载波发送信号短时功率统计产生通道校准补偿系数,相对基于配置获得的子载波发送信号长时功率统计产生通道校准补偿系数的长时预均衡,可获得更好的理想幅度校准性能。

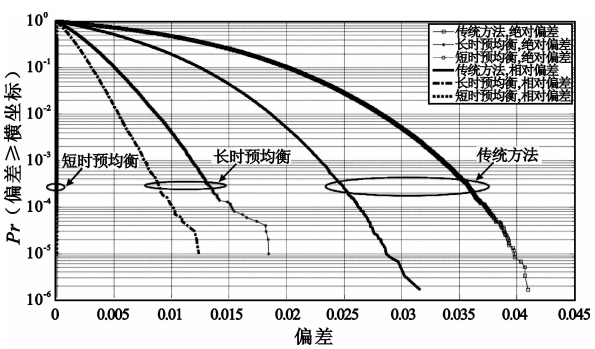

图 2　不同 TD – LTE 发射通道幅度校准方法的性能比较
Fig.2 Performance comparison of TD – LTE transmission-part amplitude calibration methods

图 3 通过统计直方图比较了所提两种幅度校准方法和传统方法的 PA 最大输出功率需求的差别。图中的横坐标为归一化的 PA 输出功率,将传统方法对应最大被调度信号数字功率 P_{in}^{Max}的 PA 输出功率区间[$P_{out}^{EAC,Max}/(f^{Max})^2$, $P_{out}^{EAC,Max}/(f^{Min})^2$]归一化映射到坐标区间[0,1]。从图中可以看到,相比采用传统幅度校准方法的系统,采用长时预均衡进行幅度校准的系统,由于存在可能的长短时功率统计特性不匹配,会引入超额的 PA 最大输出功率需求(图中横坐标大于 1 的部分),在一定程度上增加了 PA 输出功率的负荷;而采用短时预均衡进行幅度校准的系统,由于采用了实时的短时功率统计计算通道校准补偿系数,可以获得实时能量归一的补偿增益幅度,并不增加额外的 PA 输出功率负荷。

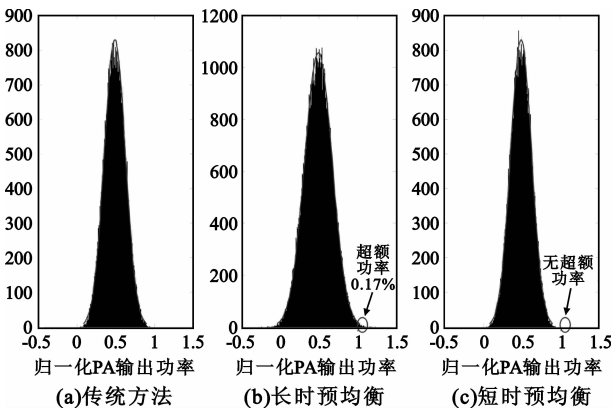

图 3　不同 TD – LTE 发射通道幅度校准方法的射频功放(PA)输出功率直方图
Fig.3 PA output power histogram of TD – LTE transmission-part amplitude calibration methods

对不同调度带数、子载波调度功率分布以及射频前端发射滤波器增益分布的仿真也验证了相同的结论,限于篇幅,不再列举。

5　结　论

本文提出了两种实用的 TD – LTE 系统发射通道幅度校准方法:长时预均衡和短时预均衡,并结合工程实现,对所提方法的性能特点进行了理论分析和仿真研究。仿真结果表明,由于在系统 CLGC 功能的基础上有针对性地进行了长时或短时意义上“能量归一化”的子载波通道增益补偿,所提方法相对传统仅基于 CLGC 的校准方法可以有效抵抗中射频通道幅频特性不平坦,获得较好的幅度校准性能。通过分析可知,长时预均衡虽然基于“配置的”子载波发送信号长时功率统计产生通道校准补偿系数,计算和工程实现复杂度较低,但是,由于存在可能的

子载波长短时功率统计特性不匹配,相对传统方法会在一定程度上增加 PA 输出功率的负荷;而短时预均衡采用了“实时计算的”短时功率统计产生通道校准补偿系数,复杂度较大,但可以获得理想的校准性能,并且,相对传统方法不会增加额外的 PA 输出功率负荷。所提方法及其分析结论对于实际系统中高性能校准方法的选择具有指导意义。

参考文献:

[1] Thomas T A, Mondai B, Vook F W. Methods for Switching Between Long Term and Short Term Transmit Beamforming in OFDM[C]//Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference. Dublin, Ireland: IEEE, 2007: 574 – 578.

[2] 樊迅,郭彬,曹伟,等. TD – LTE 系统中基于奇异值分解的高效波束赋形方法[J].电讯技术,2010,50(8):46 – 51.
FAN Xun, GUO Bin, CAO Wei, et al. Singular – value – decomposition – based high – efficient beam forming method in TD – LTE systems [J]. Telecommunication Engineering, 2010,50 (8): 46 – 51. (in Chinese)

[3] 郭彬,樊迅,曹伟,等. 八天线 TD – LTE 系统的波束赋形算法分析[J].电讯技术,2010,50(8): 41 – 45.
GUO Bin, FAN Xun, CAO Wei, et al. 8 antennas eigen – based single stream baemforming algorithm for TD – LTE system[J]. Telecommunication Engineering, 2010,50(8):41 – 45.(in Chinese)

[4] 曹伟,樊迅,郭彬,等.TD – LTE 系统中动态下行波束赋形算法性能分析[J].电讯技术,2010,50 (8): 36 – 40.
CAO Wei, FAN Xun, GUO Bin, et al. Performance analysis of downlink beam forming algorithms in TD – LTE system [J]. Telecommunication Engineering,2010,50(8):36 – 40.(in Chinese)

[5] 李亚麟,樊迅,胡波,等.天线校准误差建模即对开环波束赋形技术的影响[J].电讯技术,2010,50(3):45 – 48.
LI Ya – lin, FAN Xun, HU Bo, et al. Modeling of Antenna Calibration Error and its Impact on Open – Loop Beam forming[J]. Telecommunication Engineering, 2010,50 (3):45 – 48. (in Chinese)

[6] 3GPPR1 – 073187, Interference Coordination Framework with Results[S].

[7] 3GPP. TS 36.104 V8.6.0, E – UTRAN Base Station (BS) radio transmission and reception [S].

作者简介:

曹　峥(1973—),男,湖北武汉人,1999 年获浙江大学信息电子专业硕士学位,现为上海贝尔股份有限公司无线研发部硬件设计顾问工程师,主要从事无线产品的研究和开发;

CAO Zheng was born in Wuhan, Hubei Province, in 1973. He received the M. S. degree from Zhejiang University in 1999. He is working for the Alcatel – Lucent Shanghai Bell Company, Ltd. as a hardware consulting engineer in Wireless R&D Department. His research concerns R&D of wireless product.

Email: Zheng.Cao@alcatel – sbell.com.cn

樊　迅(1975—),男, 江苏南京人,2006 年获上海交通大学通信与信息系统专业博士学位, 现为上海贝尔股份有限公司无线研发部系统设计顾问工程师, 主要从事 MIMO 无线通信系统中的信号检测、多用户检测、智能天线理论和技术等的研究。

FAN Xun was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1975. He received the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2006. He is working for Alcatel – Lucent Shanghai Bell Company, Ltd. as a system advisory engineer in Wireless R&D Department. His research interests include signal detection in MIMO wireless communication systems, multi – user detection and smart antenna, etc.

Email: Xun.Fan@alcatel – sbell.com.cn

会议信息

2011 年中国国际雷达会议将在四川成都召开

会议时间:2011 年 10 月 24—27 日,会期 4 天。

会议地点:成都

会议主题:“共享信息,共享未来”

会议内容:雷达系统、雷达分系统、雷达信号处理、现象学与建模,以及一些相关的新兴雷达技术。

会议规模:总人数 430 人,其中外宾为 80 人。附设 500 m^2 小型展览。

国内主办单位:中国电子学会

国内承办单位:中国电子学会

更多信息请浏览本次会议官方网站:http://www.radar2011.org