

## 应用于 LTE 上行链路的 MMSE-TEDF 均衡器

王连友<sup>1,2</sup>, 钟 贞<sup>2</sup>, 李 彬<sup>1,3</sup>

(1. 电信科学技术研究院 无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083;

2. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 大唐移动通信设备有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种适用于 LTE 上行 SC-FDMA 中的判决反馈均衡架构 TEDF。依照最小均方误差准则, 组成 MMSE-TEDF 均衡器。在 3GPP LTE 协议中常用的 EVA 信道下将这种均衡器进行计算机仿真, 结果表明该均衡器在 EVA 信道下系统性能明显提高。

**关键词:** 长期演进系统; 判决反馈均衡器; 最小均方误差准则

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

## Application of MMSE-TEDF equalization in LTE system

WANG Lian You<sup>1,2</sup>, ZHONG Zhen<sup>2</sup>, LI Bin<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Wireless Communications, CATT, Beijing 100083, China;

2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. Datang Mobile Communications Equipment Company Limited, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper presented TEDF architecture of decision feedback equalizer for SC-FDMA uplink system of the project LTE. Adopted minimum mean square error principle and composed MMSE-TEDF equalizer. The new equalizer were simulated in EVA channel which is very common in 3GPP LTE protocol. The result shows that the new equalizer improving the ability of the system obviously in EVA channel.

**Key words:** long term evolution system; decision feedback equalizer; minimum mean square error principle

## 1 LTE 上行链路模型

图 1 和图 2 分别是 LTE 上行系统的用户设备 UE (User Equipment) 发射过程和基站接收过程的流程图。在 UE 发射端, 要发射的数据首先要添加循环冗余校验 CRC (Cyclic Redundancy Check), CRC 在接收端用于检测收到的信号是否正确<sup>[1]</sup>, 随后进行 Turbo 编码、速率匹配、加扰调制等处理; 最后进行 SC-FDMA 信号生成时, 首先进行 DFT 运算。在资源映射后加频域保护带 (Guard), 然后进行 IFFT 运算, 最后加上 CP, 这样 SC-FDMA 信号就生成完毕<sup>[2]</sup>。

LTE 上行接收机系统框图中, 基站接收到时域信号  $r$ ,  $r$  在时域上以帧 (frame) 为单位, 帧长为 10 ms 分 20 时隙 (slot), 10 子帧 (subframe), 每个子帧有 14 个 symbol<sup>[3]</sup>。去掉 CP 后经过 FFT 运算去掉在频域添加的保护带 (Guard), 将解调参考信号 DMRS (Demodulation Reference

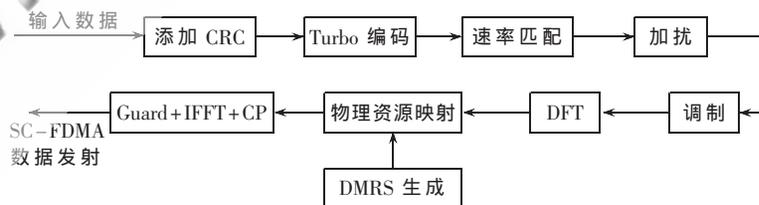


图 1 UE 发射机模型

Signal) 与数据分离, 对 DMRS 进行信道估计和信噪比计算, 然后进行频域均衡, 均衡后估计到软比特数据<sup>[2]</sup>。软比特数据经过 IFFT、解调、解扰、解速率匹配、Turbo 解码等去掉 CRC, 恢复了最终数据。

## 2 最终有误数据反馈均衡器的结构

图 3 中, 接收数据  $R$  先经过 MMSE 线性均衡, 再经过接收机其他部分的处理, 如果 CRC 的检测结果正确, 证明此次 UE 发射的数据接收机已经完全正确恢复, 可以直接输出, 这个输出数据是整个接收机的输出。如果

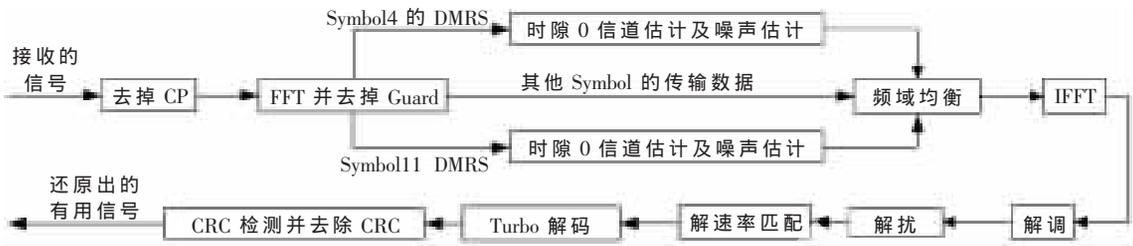


图2 LTE上行基站接收系统框图

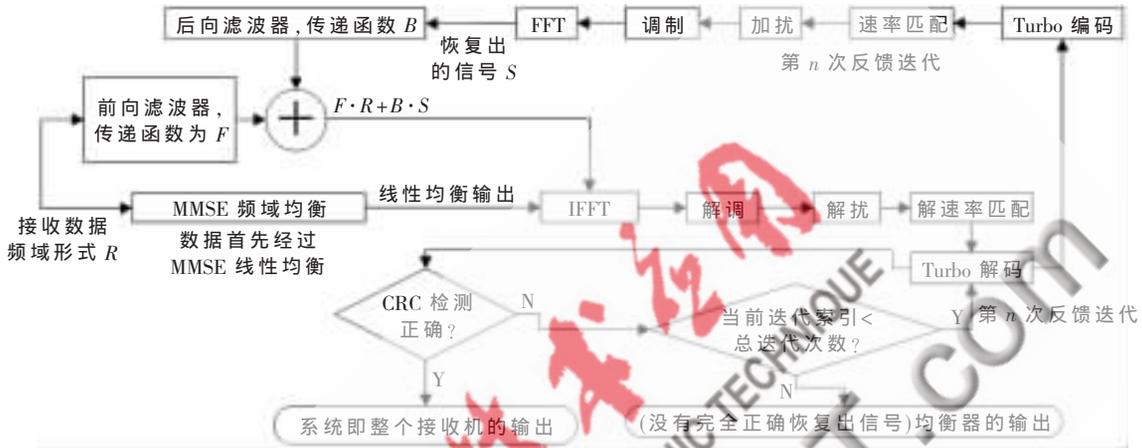


图3 最终有误数据反馈频域判决反馈均衡器框图

CRC检测结果证明有误,则要把数据反馈给后向滤波器计算,所以称为最终有误数据反馈均衡器 TEDF(Terminal Error Data Feedback),大大减少了运行时间。首先,在满足一定的准则下计算出前向滤波器传递函数  $F$  和后向滤波器传递函数  $B$ ;而反馈链路中最关键的部分是 Turbo 译码,其强大的纠错功能能够化突发错误为随机独立错误,使反馈数据更加正确;反馈数据再经过 Turbo 编码、速率匹配、加扰、调制和 FFT 等一系列 UE 接收端的相应处理后得到  $S$ ,数据  $S$  经过后向滤波器  $B$ ,接收机接收数据  $R$  经过前向滤波器  $F$ ,然后得到最新估计到的信号  $\hat{S}=F \cdot R+B \cdot S$ 。

### 3 前向后向传递函数的确定

在 LTE 上行 SC-FDMA 的 SIMO 结构下,以两天线为例,对于 LTE 上行 SC-FDMA SIMO 接收系统下的频域 MMSE 均衡算法,有

$$S = \frac{\frac{\sigma_s^2}{\sigma_{n1}^2} \cdot R_1 \cdot \hat{H}_1^* + \frac{\sigma_s^2}{\sigma_{n2}^2} \cdot R_2 \cdot \hat{H}_2^*}{\left| \hat{H}_1 \right|^2 \cdot \frac{\sigma_s^2}{\sigma_{n1}^2} + \left| \hat{H}_2 \right|^2 \cdot \frac{\sigma_s^2}{\sigma_{n2}^2} + 1} \quad (1)$$

其中  $R$  为接收到的数据,  $H$  为信道估计模块估计出的传递函数,  $R=H \cdot S+N$ ,  $\sigma_s^2$  为发射信号的功率。  $\sigma_{n1}^2$  是 UE 的发射天线和接收天线 1 在信道环境下的噪声功率。  $\sigma_{n2}^2$  是 UE 的发射天线和接收天线 2 在信道环境下的噪声功

率。首先通过 MMSE 线性均衡处理完毕信号数据后,如果 CRC 检测结果没有完全恢复信号,将按图 3 进行反馈操作。反馈数据为  $\tilde{S}=S+E$ 。其中  $S$  为有用数据,  $E$  为误判的信号。

判决反馈均衡器公式:  $\hat{S}=F \cdot R+B \cdot \tilde{S}$ ,其中  $F$  为前向滤波器传递函数,  $B$  为后向滤波器传递函数,  $\tilde{S}$  为上一次反馈估计出的信号。由于  $R=H \cdot S+N$ ,故有  $\hat{S}=F \cdot (H \cdot S+N)+B \cdot \tilde{S}$ ,  $\tilde{S}$  由有用信号  $S$  和误判  $E$  两部分组成,所以又有  $\hat{S}=(F \cdot H+B)S+F \cdot N+B \cdot E$ 。

所以在 SIMO<sub>1x2</sub> 的情况下

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} + B \cdot \tilde{S} = F_1 \cdot R_1 + F_2 \cdot R_2 + B \cdot \tilde{S} \\ = (F_1 \cdot H_1 + F_2 \cdot H_2 + B)S + F_1 \cdot N_1 + B \cdot E + F_2 \cdot N_2 \quad (2)$$

由式(2)可得  $B=1-(F_1 \cdot H_1 + F_2 \cdot H_2)$ ,可见此次迭代反馈均衡器的输出可分 3 个部分:信号部分  $S$ 、误判造成的干扰部分  $1-(F_1 \cdot H_1 + F_2 \cdot H_2)E$ 、噪声部分  $F_1 \cdot N_1 + F_2 \cdot N_2$ 。

所以均衡器输出的均方误差  $E_r$  为:

$$E_r = (1 - (F_1 \cdot H_1 + F_2 \cdot H_2))^2 \cdot \sigma_e^2 + F_1^2 \cdot \sigma_{n1}^2 + F_2^2 \cdot \sigma_{n2}^2 \quad (3)$$

式(3)中的  $\sigma_e^2(k) = 2\sigma_s^2 \cdot P_e(k-1)$ ,其中  $P_e(k-1)$  是指第  $k-1$  次反馈数据的误码率<sup>[5]</sup>。

分别把均方误差  $E_r$  对传递函数  $F_1$  和  $F_2$  进行求偏导的操作,并让得出的式子等于零。得到式(4)和式(5),可

## 网络与通信 Network and Communication

用于计算满足均方误差极小值的  $F_1$  和  $F_2$ 。

$$\frac{\partial(E_r)}{\partial F_1} = -2H_1^* \cdot (F_1 \cdot H_1 + F_2 \cdot H_2 - 1) \cdot \sigma_e^2 + 2F_1 \cdot \sigma_{n1}^2 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(E_r)}{\partial F_2} = -2H_2^* \cdot (F_1 \cdot H_1 + F_2 \cdot H_2 - 1) \cdot \sigma_e^2 + 2F_2 \cdot \sigma_{n2}^2 = 0 \quad (5)$$

式(4)和式(5)形成一个二元二式方程组,求解得到  $F_1$  和  $F_2$  的值为:

$$F_1 = \frac{\frac{\sigma_e^2}{2} \cdot \hat{H}_1^*}{\left| \hat{H}_1 \right|^2 \cdot \frac{\sigma_e^2}{2} + \left| \hat{H}_2 \right|^2 \cdot \frac{\sigma_e^2}{2} + 1}$$

$$F_2 = \frac{\frac{\sigma_e^2}{2} \cdot \hat{H}_2^*}{\left| \hat{H}_1 \right|^2 \cdot \frac{\sigma_e^2}{2} + \left| \hat{H}_2 \right|^2 \cdot \frac{\sigma_e^2}{2} + 1}$$

#### 4 测试环境与结果

采用 3GPP LTE 标准中的 Extended Vehicular A(EVA)信道模型作为测试信道进行 MMSE 线性均衡器和 MMSE-TEDF 均衡器的性能比较。EVA 信道是一个 9 径信道模型,多径时延分别为(0, 30, 150, 310, 370, 710, 1 090, 1 730, 2 510)(ns),多径的归一化功率分别为(0.0, -1.5, -1.4, -3.6, -0.6, -9.1, -7.0, -12.0, -16.9)(dB)<sup>[6]</sup>,多普勒频移为 5 Hz。整个仿真链路系统如图 1 和图 2 所示。参数设置为频域上 10 MHz 带宽满载;调制方式为 16 QAM;FFT 阶数为 1 024;CP 长 80 或 72(symbol1 和 symbol7 的 CP 长 80,其他 symbol CP 长 72<sup>[7]</sup>);有效子载波数为 600;单发射天线双接收天线;信道估计算法为 Base Dft Channel Estimate<sup>[5]</sup>算法;Turbo 译码迭代 2 次。

图 4 是整个系统仿真的输出误码率曲线,由图可知,整个接收机系统性能优良,信噪比在 7 dB 的时候误码率非常低。MMSE-TEDF 后的数字代表迭代次数,例如 MMSE-TEDF-2 指反馈 2 次。它们的性能都明显优于 MMSE 线性均衡算法,随着迭代次数的增多,性能提升幅度越来越小直至最后收敛。

仿真结果证实,MMSE-TEDF 均衡器在 EVA 信道上比 MMSE 均衡性能有比较明显的提升。该均衡器的反馈链路中有 Turbo 纠错模块,使得反馈数据接近于发射信号,所以使系统性能提升比较大。虽然其复杂度也比较高,用当前硬件平台实现资源消耗比较大,但随着硬件

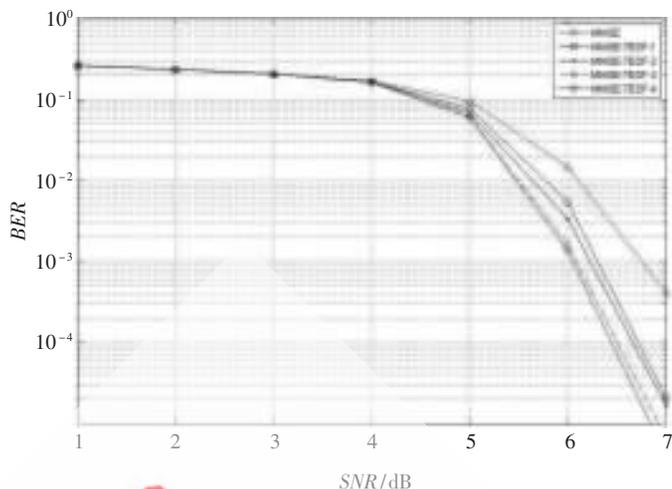


图 4 EVA-5 信道环境下的输出误码率曲线比较

平台的不断发展和人们对通信系统性能要求的提高,MMSE-TEDF 均衡器将会体现出很高的价值。

#### 参考文献

- [1] 3GPP TS 36.212.V8.6.0.Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA);Multiplexing and channel coding[S].
- [2] 沈嘉,索士强,全海洋,等.3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M].北京:人民邮电出版社,2008:114-174.
- [3] 3GPP TS 36.211.V8.6.0.Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA);Physical Channels and Modulation [S].
- [4] SGATHE F S,SARI H.Single-carrier transmission with frequency-domain decision-feedback equalization[C].Proceedings EUSIPCO 2005.2005.
- [5] ANDREOTTI J P,BEUTNER M,MARTINEZ V.Algorithms specification document for LTE\_L1[R].Freescale Semiconductor Digital Systems Europe.2008.
- [6] 3GPP TS 36.104 V8.5.0.Evolved universal terrestrial radio access(E-UTRA).Base Station(BS) Radio Transmission and Reception[S].

(收稿日期:2009-09-21)

#### 作者简介:

王连友,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:智能信息与语音信号处理。

钟贞,女,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:导航、制导与控制。

李彬,男,1982年生,硕士,主要研究方向:基于 LTE 系统的信道编码技术。