

一种 LTE 下行链路信号检测算法

朱 磊^{1,2,3}, 熊 勇^{1,2,3}, 杨秀梅^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 上海无线通信研究中心, 上海 200335;
3. 中国科学院无线传感网与通信重点实验室, 上海 200335)

摘要: 研究一种适用于长期演进(LTE)系统下行信号的检测算法, 并提出其实现架构。该算法使用统一结构对 LTE 系统下行各种传输模式的发送信号进行处理, 以实现 MRC、ZF 和 MMSE 检测, 在节省终端硬件开销的同时, 简化在不同传输模式之间切换的软件控制, 既能为 LTE 终端芯片设计提供低复杂度的接收机实现方案, 也能为用户在使用 LTE 终端时节省更多的电力资源。仿真实验结果表明, 该算法的综合性能优于传统 MRC、ZF 和 MMSE 检测算法。

关键词: 长期演进; 接收机; 最大比合并; 最小均方误差检测; 迫零检测

Detection Algorithm for LTE Downlink Signal

ZHU Lei^{1,2,3}, XIONG Yong^{1,2,3}, YANG Xiu-mei^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200335, China;
3. Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200335, China)

【Abstract】 This paper proposes a signal detection algorithm for the downlink of the Long Term Evolution(LTE) system. In this algorithm, a uniform structure of detector for different transmission scheme is derived to simplify the implementation of the receiver for the downlink of LTE system. The algorithm can carry out the functions of Maximum Ratio Combining(MRC), Zero Forcing(ZF) and Minimum Mean Square Error(MMSE) detectors. This design saves the hardware implementation of the receiver and simplifies the software control modules. Simulation results show the algorithm can achieve better performance than the conventional MRC, ZF and MMSE detectors.

【Key words】 Long Term Evolution(LTE); receiver; Maximum Ratio Combining(MRC); Minimum Mean Square Error(MMSE) detection; Zero Forcing(ZF) detection

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.03.080

1 概述

长期演进(Long Term Evolution, LTE)系统作为 3GPP 的新一代通信系统, 相对于之前的无线通信系统, 可以提供更高的数据传输速率、更好的无线覆盖以及更大的系统容量。为达到系统的设计目标, LTE 系统中定义多种传输模式, 在 Release 8 版本中包括单端口传输、发送分集、开环空间复用、闭环空间复用、多用户 MIMO、rank-1 预编码和波束成型等 7 种。

接收机的接收性能跟接收机所采用的检测算法关系密切^[1]。相关文献提出多种检测算法。最大似然(Maximum Likelihood, ML)检测是在误码性能准则上最优的检测算法。虽然 ML 检测算法可以在误码性能和容量方面取得最优的性能, 但是由于其复杂度非常高, 尤其在所用调制阶数和天线数较大时, 在实际应用中难以实现。ML 检测算法一般作为设计检测方法的基准。为了能在实际系统中使用, 文献[2]提出很多次优的 MIMO 检测算法。线性检测因为其在复杂度和性能方面的良好折中在实际系统中应用广泛。线性检测使用一个滤波矩阵对接收信号向量进行处理, 而滤波矩阵是通过一定的准则得到的。最常用的准则包括迫零(Zero Forcing, ZF)准则和最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)准则, 分别对应线性 ZF 检测和线性 MMSE 检测。

为对 LTE 系统中多种传输模式进行信号检测, 需要配备不同的检测结构。但是在接收端, 特别是在手持终端这种电

量受限的设备中, 复杂度在实现中是一个重要的考量。同时, 同一个接收机中多个检测结构在很大程度上增加了硬件的开销及软件控制的复杂度, 从而提升了产品的成本。本文提出一种可应用于 LTE 接收机的低复杂度检测算法, 以简化接收机的设计。

2 LTE 系统下行链路发送结构

图 1 给出了 LTE 系统物理层下行链路的发送框图, 用户数据经过信道编码后进入物理层处理阶段。首先编码后信息经过一个小区特定的随机码加扰, 加扰后的信息进行星座点符号的调制, 调制后的符号经过层映射模块映射到层, 然后再经过预编码后, 之后的信号映射到时频资源上, 最后进行 OFDM 的调制, 产生的信号在天线端口进行发送。具体处理流程见文献[3]。

假设发送端使用 N_t 个天线端口进行传输, 接收端使用 N_r 个天线进行接收, $H^k(i)$ 表示 i 时刻第 k 个子载波的频域信道响应矩阵。为简便起见, 下文将省略时间索引 i 。第 k 个

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03003-001-01, 2010ZX03003-001, 2009ZX03002-003-004)

作者简介: 朱 磊(1983—), 男, 博士研究生, 主研方向: 多天线技术, OFDM 技术; 熊 勇, 研究员; 杨秀梅, 助理研究员、博士研究生

收稿日期: 2011-07-05 **E-mail:** zhuxlei@gmail.com

子载波上的接收信号可以表示为:

$$r^k = H^k s^k + n^k \quad (1)$$

其中, s^k 和 n^k 分别表示第 k 个子载波上的发送信号向量和噪声向量。 n^k 是均值为 0, 方差为 $\sigma^2 I_{N_r}$ 的高斯白噪声向量。接收端检测装置就是要从接收信号 r^k 中恢复出发送信号 s^k 。为表达清晰, 下文将省略子载波索引 k 。

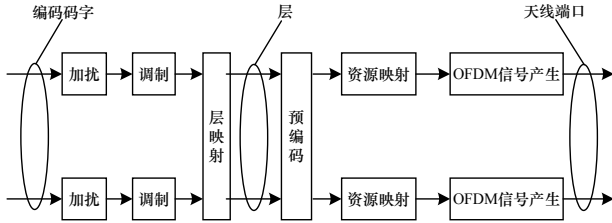


图1 LTE物理层下行链路发送框图

3 LTE下行链路接收机设计

针对上节给出的 LTE 下行链路的发送结构, 本节给出对应的接收机设计方案。首先针对不同的传输模式给出相应的检测算法, 然后针对检测算法给出一种统一的检测结构, 最后将从理论上分析所提出的检测方法的有效性和实现上的优点。

3.1 检测算法

在 LTE 系统中, 由于存在多种传输模式, 因此对不同的传输模式需要不同的检测算法来匹配。在单端口传输模式和波束成型传输模式中, 发送端使用一个天线端口进行信号的发送, 接收端配备了多个接收天线, 因此可以使用接收分集算法进行信号检测。最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)接收是信噪比最优的检测方法。因此, 对于单端口传输和波束成型传输模式, 接收端使用 MRC 检测方法进行信号检测, 检测后信号可以表示为:

$$\hat{s} = H^H r / \|H\|^2 \quad (2)$$

其中, 上标 H 表示转置共轭, $\|\cdot\|$ 表示范数。对于发送分集传输模式, 因为在正交空时码中, ZF 检测方法可以获得和最优检测方法 ML 一样的性能, 所以本文在发送分集传输模式中采用 ZF 检测方法, 检测后的信号可以表示为:

$$\hat{s} = (H^H H)^{-1} H^H r \quad (3)$$

因为 MMSE 检测方法在复杂度和性能上的良好折中, 在空间复用及 rank-1 预编码和多用户 MIMO 传输模式中选择 MMSE 检测方法, 检测后的信号可以表示为:

$$\hat{s} = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1} H^H r \quad (4)$$

3.2 检测结构

上节给出了对于不同传输模式的检测算法, 在产品中尤其是终端这种能量和体积受限的设备中, 复杂度和成本都是要考虑的因素。本节给出一种检测结构, 利用这个结构和若干可配置参数, 可以实现上节中给出的 3 种检测方法。该检测结构如图 2 所示。

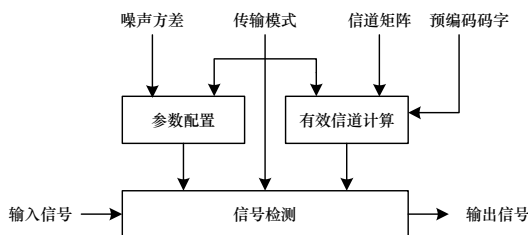


图2 接收机结构

从图 2 可以看到, 接收机包含 3 个模块: 参数配置模块, 有效信道计算模块和信号检测模块, 这 3 个模块根据输出的参数: 传输模式, 噪声方差, 信道估计得到的信道矩阵, 预编码码字以及输入信号进行信号检测, 得到检测后的信号。

(1) 参数配置模块

参数配置模块根据传输模式和噪声方差进行参数配置, 对于单端口传输、波束成型以及发送分集这 3 种传输模式, 参数配置模块将输出参数值 0, 对于其他传输模式, 参数配置模块输出参数值为噪声方差值。

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{单端口、波束成型及发送分集} \\ \sigma^2 & \text{其他传输模式} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 有效信道计算模块

有效信道计算模块根据传输模式, 利用信道估计模块得到的信道频域响应和控制信道中得到的预编码码字进行有效信道的计算。如果用 $\tilde{H}(i)$ 表示第 i 个等效信道, 对单端口和波束成型传输模式, 有效信道的计算式为:

$$\tilde{H}(i) = H(i) \quad (6)$$

对开环空间复用传输模式, 有效信道的计算式为:

$$\tilde{H}(i) = H(i)W(i)D(i)U \quad (7)$$

对闭环空间复用和 rank-1 预编码及多用户 MIMO 传输模式, 有效信道的计算为:

$$\tilde{H}(i) = H(i)W(i) \quad (8)$$

其中, $W(i)$ 为预编码矩阵; $D(i)$ 和 U 为实现循环延时分集的变换矩阵。对发送分集来说, 由于 Alamouti 码在 2 个相邻的子载波上进行, 因此在接收端进行检测的时候联合 2 个子载波上的接收信号进行, 假设 2 个相邻子载波的信道响应矩阵为 H^{2i} 和 H^{2i+1} , 则有效信道可以表示为:

$$\tilde{H}(i) = \begin{bmatrix} H_{00}^{2i} & H_{01}^{2i} \\ H_{10}^{2i} & H_{11}^{2i} \\ (H_{10}^{2i+1})^* & -(H_{00}^{2i+1})^* \\ (H_{11}^{2i+1})^* & -(H_{10}^{2i+1})^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

(3) 信号检测模块

在得到有效信道和检测参数后, 就可以进行信号检测, 信号检测的方法借鉴了 MMSE 检测形式。假设第 i 个有效信道矩阵为 $\tilde{H}(i)$, 则检测矩阵可以表示为:

$$G(i) = (\tilde{H}^H(i)\tilde{H}(i) + \gamma I)^{-1} \tilde{H}^H(i) \quad (10)$$

对发送分集传输模式, 首先得到信号向量 z 为:

$$z(i) = G(i) \begin{bmatrix} r(2i) \\ r^*(2i+1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $r(i)$ 表示第 i 个子载波上的接收信号向量。在 2 天线端口发送时, $z(i) = [z^0(i) \ z^1(i)]^T$, 在四端口发送时, $z(i) = [z^0(i) \ z^1(i) \ z^2(i) \ z^3(i)]^T$ 。2 端口和四端口发射时检测后信号可以表示为 $\hat{s}(i) = \begin{cases} [z^0(i) \ -(z^1(i))^*] \\ [z^0(i) \ -(z^1(i))^* \ z^2(i) \ -(z^3(i))^*] \end{cases}$ 对其他

的传输模式, 检测后的信号向量为:

$$\hat{s}(i) = G(i)r(i) \quad (12)$$

3.3 理论分析

本节在理论上分析上节提出的检测结构在性能和实现复杂度及能耗上的有效性。为便于说明, 本节除单端口传输模式和波束成型传输模式外, 假设发送端口数为 2, 同时接收天线数也设为 2。

对 MRC 检测, 此时信道矩阵可以写成 $H = [h_0 \ h_1]^T$, 按

照式(10),检测后的信号可以表示为:

$$\hat{s} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H r = \begin{bmatrix} h_0^* & h_1^* \\ h_0^* & h_1^* \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} h_0^* \\ h_1^* \end{bmatrix} r = \|\mathbf{H}\|^{-2} \mathbf{H}^H r = \mathbf{H}^H r / \|\mathbf{H}\|^2 \quad (13)$$

式(13)完全等价于原始的 MRC 检测方法,即式(2)。对其其他的传输模式,参数 γ 控制检测方法成为 MMSE 检测方法或者 ZF 检测方法。当传输模式为发送分集时, γ 值为 0,式(10)变为:

$$z = (\tilde{\mathbf{H}}^H(i) \tilde{\mathbf{H}}(i))^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^H(i) r(i) \quad (14)$$

本文提出的检测结构成为 ZF 检测机;当其他传输模式时, γ 值设置为噪声方差,本文提出的检测结构成为 MMSE 检测机。

4 实验结果与分析

本节给出数值结果并对结果进行分析。简单起见,仿真中没有加入信道编译码模块,把调制方式设置为 QPSK,并假设接收端可以进行理想信道估计。同时,因为 LTE 中四端口发送分集模式是把四端口分成 2 组,每组 2 个端口进行 Alamouti 编码,所以,仿真中对于发送分集模式只给出 2 天线的仿真结果。在空间复用传输模式中,为了简单并不失一般性,发送天线端口数目也设置为 2 个。同时在仿真中,接收天线数设为 2 根。仿真中比较传统的 MRC、ZF 和 MMSE 检测方法和本文提出的检测方法的误码率(Bit Error Rate, BER)性能。

图 3 给出瑞利衰落信道下 MRC 接收机的性能仿真结果,可以看到,同传统的 MRC 接收机相比较,本文提出的接收机可以达到相同的性能,也就是说在单端口传输模式下,本文提出的接收机同 MRC 接收机是等价的。

图 4 给出接收端使用 MMSE 接收机的仿真性能,仿真中使用的仍然是瑞利衰落信道,限于篇幅,本节只给出闭环空间复用的仿真结果。可以看出,在空间复用传输模式下,在接收端使用传统 MMSE 检测方法和本文中提出的检测方法可以得到相同的 BER 性能。因此,本文提出的检测结构和算法对 MMSE 检测算法是有效的。

图 5 给出在 LTE 发送分集模式中,使用 ZF 接收机得到的仿真性能。因为 LTE 系统中发送分集使用相邻子载波进行 Alamouti 编码的方式,相邻子载波信道响应的相似程度会影响其性能。仿真中使用国际电信联盟的 PB 信道模型,载频设为 2 GHz。可以看出,使用传统的 ZF 检测方法和使用本文提出的检测方法,可以得到相同的性能,因此本文提出的接收机可以实现 ZF 接收机的功能。

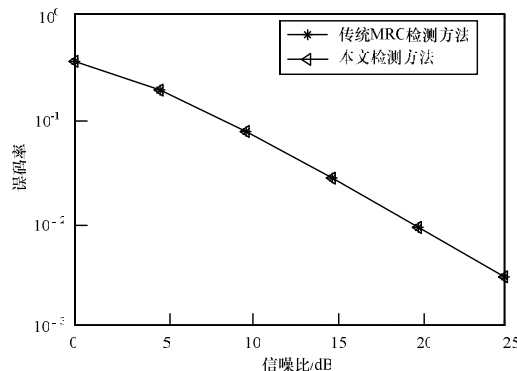


图3 MRC接收机性能

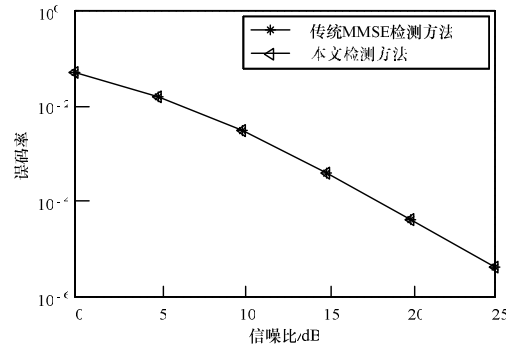


图4 开环空间复用MMSE接收机性能

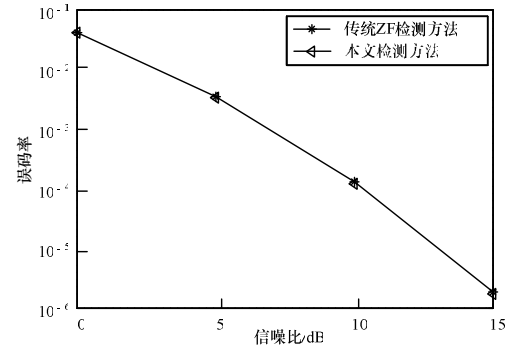


图5 发送分集模式ZF接收机性能

假设单个乘法器的面积和功耗为 A 和 P 。图 6 给出本文检测方法和传统检测方法所占面积的比较。仿真中使用检测机所需要的乘法器的个数来衡量其芯片硬件面积^[4-5]并使用主要操作乘法的数目的功耗来衡量检测器的功耗。在传统方法中,一种传输模式所对应的检测方法在工作时,其他模式对应的检测方法处于等待状态,假设其功耗是工作状态的 50%^[6]。可以看出,本文提出的检测方法占用的面积只有传统方法的 40%。

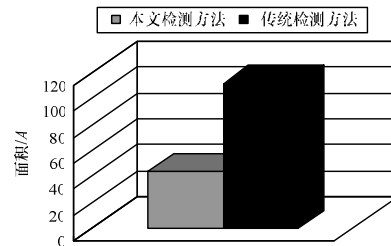


图6 芯片所占面积示意图

图 7 给出本文检测方法和传统检测方法消耗的功率比较结果,简单起见,假设检测器之间的切换时不消耗能量的。可以看到,本文方法消耗的功率只有传统方法的 44%。

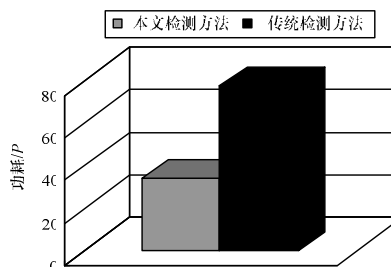


图7 消耗功率示意图

5 结束语

为降低 LTE 系统下行链路接收端信号检测的复杂度,本 (下转第 257 页)