

基于硬件行为的 TD-LTE 关键技术仿真方案

梁学俊¹, 杨夏喜¹, 吴伟民², 吴 震¹

(1 国家信息网络产品质量监督检验中心, 江苏 苏州 215104; 2 华中科技大学 电子信息与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 提出一种基于硬件行为的 TD-LTE 关键技术仿真方案, 为算法设计和硬件实现之间建立起衔接. 该方案采用时间驱动, 实现定点仿真功能, 即可为产品研发提供可靠的参考数据, 也可准确评估产品的最终性能, 从而保障了仿真结果和产品性能的一致性.

关键词: 硬件行为; 时分长期演进; 波束成形

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)11-0072-04

A Simulation Scheme for TD-LTE Key Technology Based on Hardware Behavior

LIANG Xue-jun¹, YANG Xia-xi¹, WU Wei-min², WU Zhen¹

(1 National Quality Supervision and Testing Center for Information Network Product, Suzhou 215104, China;

2 Department of Electronics and Information Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To establish a convergence between algorithm design and hardware implementation, this paper studies a simulation scheme for TD-LTE key technology based on hardware behavior. By means of time-driving and fixed-point simulating, this scheme can not only provide reliable reference data for product design, but also give accurate assessment to the properties of final product. Based on the advantages, the scheme could ensure the simulation results being in accordance with the performance of final product.

Key words: hardware behavior; TD-LTE; beamforming

1 引言

产品研发是一个循序渐进的过程, 任何对初始设计的改变, 都可能影响到开发效率和最终产品的性能. 采用精确而高效的仿真方案, 不仅能够纠正产品设计中可能存在的错误和发现产品开发中潜在的瓶颈, 还能获得可靠的数据来评估产品的性能, 对产品研发起到至关重要的作用.

当前, 国内外通信厂商正加紧时分长期演进 (TD-LTE) 试验及商用产品的研发. 作为高数据传输率、低时延和基于全分组的移动通信系统, TD-LTE 采用了多载波调制、多天线传输等先进技术来提高频谱效率, 还采用扁平化结构来简化网络和减小延迟, 将无线网络控制器节点和基站节点合并, 由

单一设备完成信号处理、调度、接入控制、承载控制和移动性管理等功能^[1-2]. 可以预见, 针对 TD-LTE 产品的研发, 其算法设计和硬件实现将会更加复杂, 也对仿真方案提出了更高的要求.

传统的浮点仿真方案大都是在理论级, 很少涉及到硬件实现方面的细节, 而传统的定点仿真虽然考虑了数值量化问题, 但其运行是由事件驱动, 这与实际硬件实现中的时间驱动特性并不一致. 这有可能导致硬件实现人员对算法设计人员制定的技术文档产生误解, 如果这种误解反映到产品开发中, 将使得错误很难发现, 或者需要进行大量的修改, 会大大延长产品研发周期.

因此, 本文给出一种承上启下的基于硬件行为的仿真方案, 为 TD-LTE 产品的浮点仿真和硬件实

现之间建立衔接.该仿真方案一方面执行定点仿真功能,用来验证信号处理算法的正确性;另一方面模拟硬件实体的运行,采用时间驱动方式,确保定点仿真结果和硬件实现结果相匹配,从而保障最终产品性能和仿真性能相一致.

2 基于硬件行为的仿真方案

针对 TD-LTE 产品的研发,首先是根据标准规范和性能需求,选择合适的信号处理算法,并通过数学分析和浮点仿真进行评估和优化.然后,把浮点仿真中的所有数据结构进行定点量化,找到合理的字长配置,并保证可容忍的性能回退.最后根据产品的硬件架构,将信号处理功能合理分配给各个硬件实现.

为了能够模拟硬件行为,本文提出的仿真方案采用由时间驱动的动态仿真方法,以一定的时间间隔 Slot 为单位,按照硬件工作时序运行仿真功能,并对连续变化的硬件处理过程中的关键数据进行采样和存储.在仿真程序中,每个硬件实体被封装成一个对象,将硬件行为即信号处理功能定义为函数,并对每个函数配置有一个时间标识.例如:将数字信号处理芯片封装成一个对象,用标识符“DspA”表示,该芯片被分配完成下行波束成形矢量的生成功能,则在对象 DspA 下定义 BeamformingVector 函数,并按照硬件工作时序配置时间标识,如 Slot 设为 15,时间标识的设置要严格按照 TD-LTE 帧结构及硬件工作时序来确定.

在设定的时间内,仿真程序进入一个循环,只有在当前运行的时间与硬件行为的时间标识相一致的情况下,仿真程序才会执行相应信号处理功能.在每个 Slot 时刻,仿真程序将在所有定义的硬件对象中检测与当前时刻相一致的时间标识,并执行相应的信号处理功能.整个仿真系统的运行流程如图 1 所示.例如:在仿真过程中,当 Slot 为 15 时,程序检测到对象 DspA 中 BeamformingVector 函数的时间标识与当前时间相符,于是执行下行波束成形矢量生成功能.要特别强调的是,所有函数执行的信号处理功能均为定点算法.在仿真过程中,程序会对关键的仿真数据进行采样保存,为硬件实现时的参考数据.

3 TD-LTE 关键技术的仿真

通过对 TD-LTE 波束成形技术的仿真,可验证上述方案的准确性及可靠性.已有的理论研究表明,多天线设备在发送端已知信道状态信息的情况下,

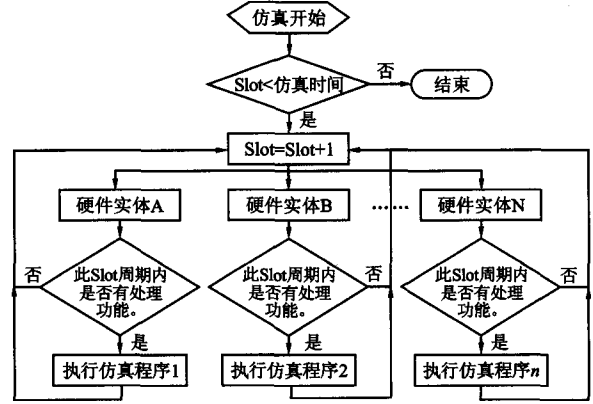


图 1 基于硬件行为的仿真流程

采用波束成形或预编码,可提升频谱效率或传输可靠性^[3].TD-LTE 由于上下行信号同频异时隙,发送端根据上下行信道互易性原理通过上行信道估计结果便可获得信道状态信息^[4-5].因此,在 TD-LTE 产品中应用波束成形技术更具优势.

基于信道特征矩阵分解(EBB)的波束成形算法,是将等效频域信道矩阵进行分解来消除子信道之间的干扰,常用的分解方法有奇异值分解(SVD)^[6-7].典型的 TD-LTE 8 天线配置见图 2,天线间距为 $\lambda/2$,相同极化方向天线组成天线组,各天线组的上行信道估计表示为

$$\begin{aligned} h^{(SA1,k)} &= [h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, h_3^{(k)}, h_4^{(k)}], \\ h^{(SA2,k)} &= [h_5^{(k)}, h_6^{(k)}, h_7^{(k)}, h_8^{(k)}], \end{aligned}$$

式中, k 为资源块序号,通常由 7 个时域符号和 12 个频域子载波组成.

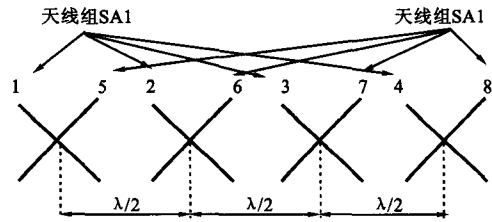


图 2 八天线配置方式示意图

资源块 k 的空间相关矩阵为

$$C^{(SAp,k)} = [h^{(SAp,k)} h^{(SAp,k)H}], p = 1, 2$$

在实际应用中,频域波束成形的操作是以每个资源块为单位,还是以一定数目的资源块为一簇进行操作,这取决于资源块间频率选择性衰落的情况.假设簇 S 内的所有资源块都采用相同的波束成形矢量,则对空间相关矩阵求平均得

$$C^{(SAp)} = \frac{1}{K_{S, RB}} \sum_{k \in S} C^{(SAp,k)}, p = 1, 2$$

式中, $K_{S, RB}$ 为簇 S 中资源块的数量.

对空间相关矩阵的 SVD 分解,由于硬件限制,

采用迭代逼近的方法,将单位矢量 e_{init} 作为初始值,按照如下过程计算,假设迭代次数为 N :

```

 $W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)} = e_{\text{init}};$ 
for  $k = 1:N$ 
 $W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)} = C^{(\text{SA}p)} * W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)}, p = 1, 2$ 
end
 $W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)} = W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)} / |W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)}|$ 
 $W_{\text{EBB}}^{(\text{SA}p)}$  即是基于 EBB 的波束成形矢量.

```

另一种基于到达方向(DoA)的波束成形算法,通过控制信号的相位叠加来调整信号的辐射方向,将信号功率集中在期望的方向上,同时抑制其他方向上的功率泄漏^[8-9].对于资源块 k ,首先需要获得相邻天线接收信号之间的相位信息,具体的计算步骤如下:

```

for  $n = 1:3$ 
 $A^{(\text{SA}p,k)} = A^{(\text{SA}p,k)} + h_{n+1}^{\text{SA}p,k} * \text{conj}(h_n^{\text{SA}p,k}) \quad p = 1, 2$ 
end

```

同样,假设簇 S 内的所有资源块都采用相同的波束成形矢量,则可得

$$A^{(\text{SA}p)} = \frac{1}{K_{S, \text{RB}}} \sum_{k \in S} A^{(\text{SA}p,k)}, p = 1, 2.$$

提取相位信息:

$$\varphi^{(\text{SA}p)} = -\text{angle}(A^{(\text{SA}p)}) / \pi * 180 \quad p = 1, 2.$$

获得相邻天线接收信号的相位信息后,便可计算出到达相邻天线的电波传输路径差距:

$$x = \varphi^{(\text{SA}p)} / 360 * \lambda \quad p = 1, 2,$$

则 DoA 即可表示为

$$\begin{aligned} D^{(\text{SA}p)} &= \sin^{-1}(x/d) \\ &= \sin^{-1}((\varphi^{(\text{SA}p)} / 360) * \lambda / d), \end{aligned}$$

$p = 1, 2.$

则波束成形矢量可表示为

$$\begin{aligned} W_{\text{DoA}}^{(\text{SA}p)} &= \\ [1, e^{j\frac{1d}{\lambda}2\pi\sin(D^{(\text{SA}p)})}, e^{j\frac{2d}{\lambda}2\pi\sin(D^{(\text{SA}p)})}, e^{j\frac{3d}{\lambda}2\pi\sin(D^{(\text{SA}p)})}] , \end{aligned}$$

$$p = 1, 2,$$

式中, $W_{\text{DoA}}^{(\text{SA}p)}$ 即是基于 DoA 的波束成形矢量.

整个波束成形过程分为上行信道估计、波束成形矢量生成和波束成形三个信号处理部分,按照仿真方案的设计,分别定义三个函数来实现上述功能,并按硬件实现的时序给各个函数加上时间标识.

4 仿真结果

仿真中假设 TD-LTE 的带宽为 10 MHz,全频域资源均采用相同的波束成形矢量,信道估计来自

周期为 10 ms 的上行探测信号,移动速度为 3.6 km/h. 仿真结果及实际试验结果如图 3 所示.

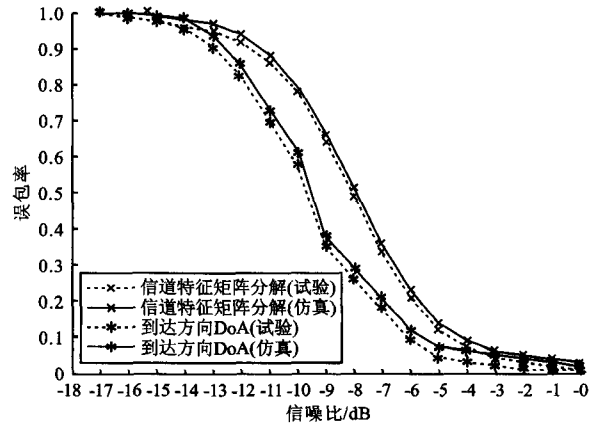


图3 基于硬件行为的波束成形仿真结果

图中显示为信噪比和误包率的关系曲线,可见,随着信噪比的增加,误包率成指数下降趋势,其中基于 DoA 的波束成形算法性能要好于基于 EBB 的波束成形算法,在相同的误包率下,均有 1 dB 左右的增益.更为重要的是,基于硬件行为的波束成形仿真曲线与样机在真实环境下的试验结果曲线基本吻合,这进一步说明该仿真方案不仅能为产品研发提供有价值的参考数据,也能较真实地评估最终产品的性能.

5 结束语

在 TD-LTE 设备的研发过程中采用基于硬件行为的仿真方案,可获得如下好处:软件仿真的精确度较高,能为硬件实现提供准确的参考数据;能灵活调整信号处理算法和配置参数,具有广泛的适应性;能够按照硬件时序完成信号处理功能,有助于真实全面地评估产品最终性能.另外,该仿真方案开发周期短、成本低、效率高,利于推广应用.

参考文献:

- [1] 3GPP TS 36.913 V10.0.0. Requirements for further advancements for evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) (Release 10) [S]. France: Sophia-Antipolis, 2011.
- [2] 3GPP TS 36.211 V10.4.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation (Release 10) [S]. France: Sophia-Antipolis, 2011.
- [3] Zhou Shengli, Giannakis G B. Optimal transmitter eigen beamforming and space time block coding based on channel correlation[J]. IEEE Transactions on Information Theo-

- ry, 2003, 49(7):1673-1690.
- [4] 王映民,孙韶辉. TD-LTE 技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [5] 王映民,孙韶辉. TD-LTE-Advanced 移动通信系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [6] Seijoon Shim, Jin Kwak, Heath R, et al. Block diagonalization for multi user MIMO with other cell interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7):2671-2681.
- [7] Jia Liu, Krzymien W A. A novel nonlinear joint transmitter receiver processing algorithm for the downlink of multiuser MIMO system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4):2189-2204.
- [8] Zhang Jun, Chen Runhua, Andrews J G, et al. Coordinated multi cell MIMO systems with cellular block diagonalization[C]//Asilomar Conference on Conference Record of the Forty-First Signals, Systems and Computers. New Orleans, 2007:1669-1673.
- [9] Hadisusanto Y, Thiele L, Jungnickel V. Distributed

base station cooperation via block diagonalization and dual decomposition[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, New York, 2008:1-5.

作者简介:



梁学俊 男, (1979-), 博士. 研究方向为宽带移动通信、天线和电磁辐射.

杨夏喜 女, (1982-), 博士. 研究方向为无线通信测试技术.

吴伟民 男, (1970-), 副教授. 研究方向为移动通信协议、无线传感网络协议.

吴震 男, (1967-), 高级工程师. 研究方向为虚拟化测试技术、电磁兼容.

(上接第 71 页)

- [4] 唐成波. 红外热成像系统性能评估技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005.
- [5] 曹华梁. 全天候户外景象长波红外成像建模与合成[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
- [6] 江照意. 典型目标场景的红外成像仿真研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
- [7] 徐洪涛. 非正交联合对角化的罚函数粒子群算法[J].

控制与决策, 2011, 27(2):317-320.

- [8] FLIR systems. User's manual of FLIR reporter[M]. New York: FLIR corporation, 2008.

作者简介:

陈霞 女, 博士研究生. 研究方向为红外辐射特性.