

# OFDM无线通信系统中自适应频偏跟踪方法研究

杨 勇

华中科技大学

张越培

河南卫生职工学院

刘 淼 周建国

华中科技大学

【摘要】文章阐述了802.11a系统的基本构架，介绍了发射端基于OFDM的数据帧的生成原理，以及接收端的频偏估计、信道估计等基本功能模块。在此基础上，对系统提出了一种基于kalman自适应滤波器的频偏跟踪算法，然后基于802.11a系统进行了蒙特卡洛仿真，仿真结果表明采用自适应滤波跟踪后，系统的BER能有一定的改善。

【关键词】802.11a 频偏跟踪 蒙特卡洛仿真 OFDM

## 1 引言

随着IC技术的飞速发展，以及信号处理模块功能的不断提高，通信设备对数据传输速率的需求也与日俱增。OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用) 技术能够很好地满足数据高速率传输的需求，近年来这个领域的研究投入也不断加大。在目前商用的无线通信协议中，802.11a的物理层采用了OFDM技术，最高速率可以达到54Mbps。在实际的应用中，OFDM技术对频率偏移的敏感度很大，解决好这个问题是一个产品是否有竞争力的关键之一，本文以802.11a的OFDM帧结构为例，结合传统的频偏处理方案，对其原理进行了描述，并在此基础上提出了一种频偏自适应跟踪策略，对性能起到一定的提升。表1显示了802.11a帧的格式<sup>[1]</sup>。

表1 802.11a的帧结构

短训练序列	长训练序列	SIGNAL	DATA1	DATA2	.....	DATAN
8μs	8μs	4μs	4μs	4μs	.....	4μs

其中，短训练序列和长训练序列占用8μs时间，前者有10个周期，后者有2个周期以及半个周期的保护间隔；后面的SIGNAL字段包含一些速率和数据长度的信息，占用4μs时间；接着DATA1到DATAn为需要传输的数据的OFDM帧，每个帧与SIGNAL帧一样，占用4μs时间。

## 2 系统模型

### 2.1 传统的载波同步算法

如表1所示，802.11a帧前8μs包含16个周期的短训练序列。在此阶段，利用互相关的方式计算每个周期的相关信息，利用相关值之间的相位差来估算一个初步的频偏值。

假设利用到最后4个周期的段训练序列完成互相关的过程，则相关值的数学模型可以表示如下：

$$cor\_1 = h \cdot \exp(j \cdot \alpha) + n_0$$

$$cor\_2 = h \cdot \exp[j \cdot (\alpha + 16 \cdot \Delta)] + n_0$$

$$cor\_3 = h \cdot \exp[j \cdot (\alpha + 16 \cdot 2 \Delta)] + n_0$$

$$cor\_4 = h \cdot \exp[j \cdot (\alpha + 16 \cdot 3 \Delta)] + n_0$$

其中， $h$ 为互相关结果的幅值， $\alpha$ 为第一个相关值的初始相位， $\Delta$ 为需要初步估计的频偏值， $n_0$ 为白噪声，这样利用以上相关值可以粗略求出一个频偏估计值：

收稿日期：2012-01-06

责任编辑：袁 婷 yuanting@mbcom.cn

移动通信  
2012年第4期

71

$$\hat{\Delta}_1 = \frac{-(\angle cor\_4 - \angle cor\_1) - (\angle cor\_3 - \angle cor\_2)}{4 * 16} \quad (1)$$

接着利用估计出的  $\hat{\Delta}_1$  对长训练序列部分进行初步的纠偏, 得到两个长训练序列周期的信号分别为  $S\_L1$  和  $S\_L2$ , 都为  $1 \times 64$  的行向量, 对这两个周期的长训练序列做自相关运算:

$$G = S\_L2 \cdot S\_L1^H \quad (2)$$

$G$  为自相关的结果, 以其相位值进行第二次较精确的频偏估计:

$$\hat{\Delta}_2 = \frac{-\angle G}{64} \quad (3)$$

进入数据部分的处理后, 先用最初的估算结果  $\hat{\Delta}_1$  和  $\hat{\Delta}_2$  对数据部分的 OFDM 符号进行相位旋转, 接着利用 OFDM 符号中导频位置的相位信息对当前符号的 CPE (Common Phase Error, 公共相位偏差) 进行估计并纠偏, 接着利用  $\hat{\Delta}_1$ 、 $\hat{\Delta}_2$  以及当前的 CPE 对下一时刻进行相位旋转, 再估计下个 OFDM 符号的 CPE 并纠偏, 以此类推, 循环执行以上操作, 即可完成整个 OFDM 帧的载波同步。

## 2.2 自适应频偏跟踪算法

在传统的载波同步算法中, CPE 的估计是按照每个 OFDM 块的相位信息进行估计, 当噪声存在时, 每个 OFDM 块中的导频相位信息包含的噪声较多。针对此问题, 本文提出一种基于 Kalman 滤波器的自适应跟踪算法对每个 OFDM 块估计的 CPE 值进行平滑, 得到一组方差较小的估计值, 利用自适应平滑后估计的 CPE 进行纠偏会对整个系统的性能有一定的提升。

Kalman 自适应滤波的系统框架可以用如图 1 的模型表示<sup>[2]</sup>。

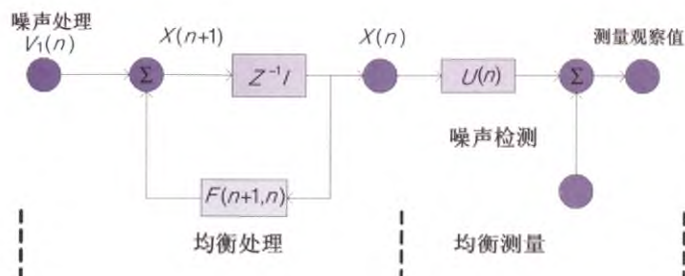


图1 Kalman滤波器的系统模型

对于本系统, CPE 是逐符号进行的, 假设第  $i$  块计算出的值为  $c\hat{P}E_i$ , 利用这个变量以及它在相邻 OFDM 块之间的差值构成过程方程中的输出状态。

$x(i) = [S\hat{T}O_i \quad \Delta_{STOI}]^T$ , 其状态转移矩阵为:

$$F(n+1, n) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

本系统中测量矩阵为:

$$U(n) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Kalman 滤波的主要流程如下:

- (1)  $\hat{M} = U(n) * \hat{x}(i-1)$ ,  $\hat{M}$  为测量估计值;
- (2)  $err = Y(i) - \hat{M}$ ,  $err$  为误差估计值;
- (3)  $x\_tmp = \hat{x}(i-1) + K * err$ , 计算并加载到状态向量上;
- (4)  $x(i) = F(n+1, n) * x\_tmp$ , 其中本次 CPE 的估计输出值即为  $x(i)$  的第一个元素;
- (5) 循环迭代以上过程。

## 3 仿真模型及仿真结果

针对以上的频偏跟踪算法, 本文设计了一个仿真系统考察其性能特性, 利用蒙特卡洛仿真验证自适应滤波算法的增益和跟踪效果。

其中, 仿真系统的框架图如图 2 所示。

仿真块数为 100 块, 一个数据帧的长度为 30 个 OFDM 符号, 频偏值设为 30 ppm, 802.11a 的载波频率设为 5 GHz。对比使用 Kalman 自适应平滑滤波前后的 CPE 估计值, 如图 3 所示, 可以看出经过 kalman 滤波后得到的估计值更加接近于真实值, 并且波动范围较小。

图 4 表示使用 Kalman 自适应平滑前后的系统的误码率 (BER) 对比效果, 其中系统使用的是 BPSK 调制方式。

## 4 结论

通过仿真结果可以看出, Kalman 自适应平滑能够比较好地消除噪声的影响, 有效提高了 OFDM 无线通信系统频偏的纠偏精度和动态性能, 使其对 CPE 的估计更加接近真实值, 从而改善整个系统的纠偏效果, 提升系

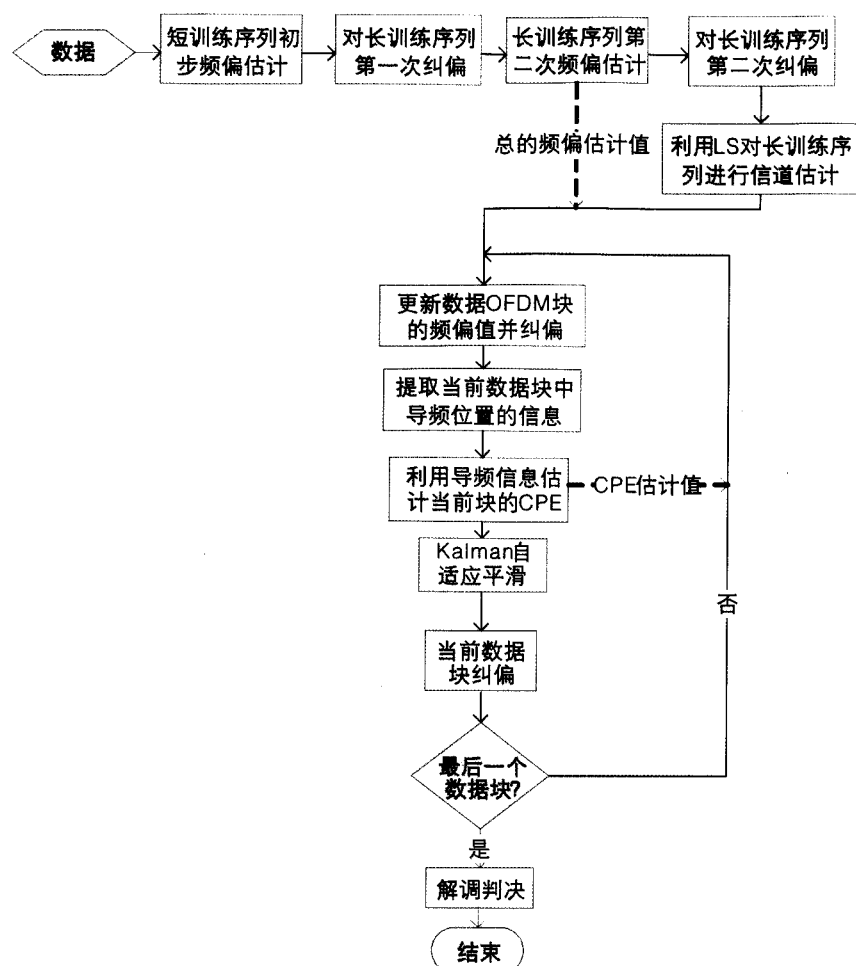


图2 仿真系统的框架结构

统的性能0.5dB。

本文的工作主要是以802.11a系统为例，对OFDM系统的频偏纠正算法进行了研究，提出了使用自适应滤波原理对噪声进行消除的思路。而对于一个需要产品化的OFDM系统接收算法，除了载波同步外，还有帧同步、时钟同步等方面需要进行进一步的探索，帧同步可以通过训练序列相关的方式进行估计，时钟同步可以纳入到频域的相位偏移中加以考虑，在利用导频信息估计CPE时再增加一个维度估计STO (Symbol Time Offset)，只有将这三者同时解决好，才能构成一个成熟的OFDM系统的同步体系。

即将到来的移动互联网时代会催生更多的上层应用，从而对底层的速率要求会不断提高，而OFDM技术以多载波的优势可以很好地满足这个要求，在未来的物理层技术中一定会大有作为。对

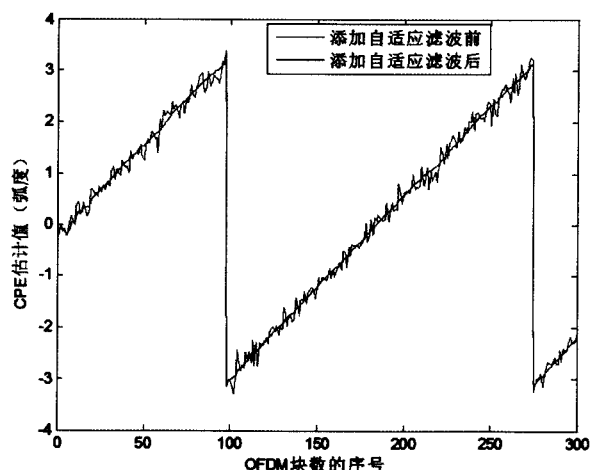


图3 CPE的估计图

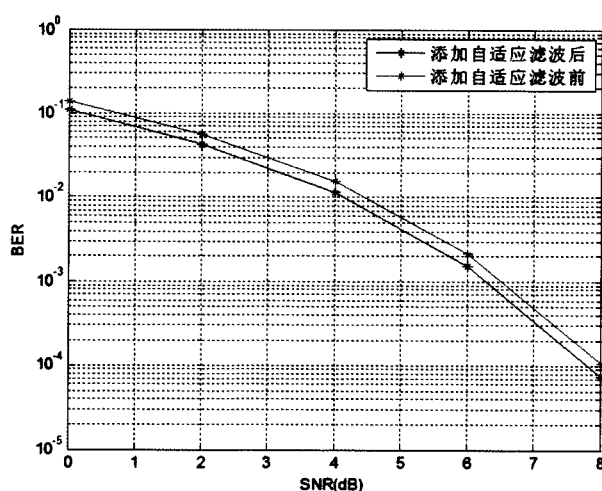


图4 系统性能对比图

于这样一个系统,性能的稳定性是重中之重,首当其冲的便是同步技术,因此,后续对同步技术展开的研究有比较重大的意义。

## 参考文献

- [1] 汪裕民. OFDM关键技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [2] Paulo S R Diniz. 自适应算法滤波与实现[M]. 北京:电子工业出版社,2004. ★

## 【作者简介】

**杨 勇:** 高级工程师,现任职于华中科技大学网络与计算中心,主要从事互联网网络应用研究、开发,参与多项211工程和985工程项目建设。

**张越培:** 副教授,现任职于河南卫生职工学院信息中心,主要从事计算机网络和信息化建设、规划。

**刘 森:** 华中科技大学电信系在读硕士研究生,从事无线通信系统和网络协议分析、研究。

# TDIA亮相2012 MWC 再现TD-LTE商用能力

由GSMA主办的2012年世界移动通信大会(2012 MWC)于2012年2月27日至3月1日在西班牙巴塞罗那举行,TD产业联盟(TDIA)将携手中广传播、美国Ixia、大普、创远、华域等企业共同参加2012 MWC,再现TD-LTE商用能力及国际化产业链最新发展成果。

TD-LTE展台位于2号馆,展位号为2A73。本次TD-LTE展台重点展示TD-LTE全球商用分布、TD-LTE国际化产业链构成及整体最新发展成果、TD-LTE标准及产品研发规划、TD-LTE测试解决方案,以及最新的TD-LTE终端和符合TD-LTE的高指标晶振方案等科研产品。

展会上,中广传播通过现场演示以及静态展示,以TD+CMMB在中国的成功商用案例,实质性地向国际市场展示CMMB产业链成熟度、CMMB产业链支撑能力以及规模商用的成本优势,为TD-LTE时代TD+CMMB在业务应用拓展等方面的进一步协同、推动CMMB标准的国际化创造有利的环境和条件。

美国Ixia与创远仪器两家测试解决方案企业将展出TD-LTE系列仪器。美国公司Ixia的积极参与,鲜明地体现了TD-LTE产业链的国际化特点。

华域将展出TD-LTE/TD-SCDMA Mobile Hotspot、TD-SCDMA数据卡及模块等产品和解决方案。

广东大普将主要展出可广泛应用于通信基站、终端、导航设备以及精密检测仪器等产品的高稳定晶振。

同时,TD-LTE展台上设立的“TD终端墙”展示了最新的TD-LTE/TD-SCDMA终端产品。TD-LTE展台的丰富展示将成功吸引海外政府通信监管机构和运营机构对TD-LTE的关注及了解,为TD的海外拓展创造良好的条件,促进TD的规模商用。

目前,TD产业联盟已经发展为国际知名的TD市场推广与产业推动的重要平台。此次TDIA再次华丽亮相于世界移动通信大会,将致力于展示TD-LTE国际化产业链的整体最新发展成果及TD-LTE海外市场的拓展前景,为TD产业开创有利的海外发展环境,进一步促进TD-LTE国际化产业链的发展,拓宽TD-LTE的国际合作和应用范围,推动TD在国内外的大规模商用,迎来TD-LTE全球化大规模商用的春天。