

# cdma2000 中基于分形滤波的信道估计方法

胡 刚,朱世华,谢 波

(西安交通大学电子与信息工程学院,陕西西安 710049)

**摘 要:** 第三代移动通信标准 cdma2000 采用了基于平行连续导频信道辅助的信道估计体制. 本文将分形理论引入多径衰落信道的描述,提出了一种利用分形滤波进行最小均方误差意义下信道参数估计的方法. 仿真结果表明,本方法不仅对不同运动速度下的信道都能得到比较准确的估计,从而显著地改善 Rake 接收机的性能,而且可以自适应跟踪信道衰落的快慢变化. 研究同时表明,与传统的随机模型相比,新的分形信道模型能更好地刻画多径衰落的行为.

**关键词:** 信道估计; 分形滤波; 多径衰落; cdma2000; 分形; 移动通信

**中图分类号:** TN914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-0219-04

## Channel Estimation Based on Fractal Filter for cdma2000

HU Gang, ZHU Shi-hua, XIE Bo

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** Channel estimation using the parallel pilot channel in cdma2000 systems was investigated. The fractal theory was applied to describe multipath fading channels, and a novel channel estimation scheme using fractal filter in the sense of minimum mean square error (MMSE) was presented. It is demonstrated by computer simulations that the proposed method can estimate the channel parameters more accurately and track the changes of channel conditions self-adaptively in both rapid and slow terminal moving cases. The performance of the Rake receiver is improved notably. The results also show that the fractal model can describe multipath fading more effectively compared to the conventional statistical models.

**Key words:** channel estimation; fractal filter; multipath fading; cdma2000; fractal; mobile communications

### 1 引言

多径衰落是移动信道的主要特征,它严重地影响了信号的传输质量. 在 CDMA 系统中, Rake 接收机是抗多径衰落的核心部件,其性能受信道的很大影响. 第三代移动通信系统支持移动台的运动速度范围为 0 - 500 公里/小时,这使多径信道的变化具有很大差异. 所以如何在慢变和快变衰落环境下都能实现准确的信道估计就成为一个迫切需要解决的问题.

在连续导频信道体制的 cdma2000 系统中,信道估计采用的经典方法是对 Rake 接收机的每一分支利用导频信号估计出的连续多个信道数据的采样值进行平均以抑制噪声<sup>[1]</sup>. 平均区间越大,噪声所带来的干扰越小. 文[2]提出一种多时隙加权平均法(WMSA),对采样值进行线性加权平均. 这两种方法是建立在信道参数在平均区间内平缓变化的假设前提下,无法有效地应用于快变信道.

有效的信道估计算法必然建立在对衰落信道准确描述的基础上. 分形理论是非线性科学中的一个活跃数学分支,为描述自然界中普遍存在的复杂物理现象及其变化规律提供了有

力的工具,得到了广泛应用. 与线性近似处理方法不同,分形是直接从事非线性复杂系统的本身入手,从未经简化和抽象的研究对象本身去认识其内在的规律性. 近年来,利用分形理论来研究电磁波在复杂环境中的传播和相互作用越来越受到重视. 文[3]研究了复杂地环境中电磁波散射的分形特征,文[4]应用分形模型讨论了周围物体对电波散射的影响. 文[5]初步探讨了多径信号的分形特性,建立了信道衰落的分数布朗运动模型. 文[6]利用模糊系统建立数据信道模型,并提出非线性信道估计的方法.

基于多径衰落信道的分形特征,本文提出了一种利用分形滤波进行最小均方误差意义下信道参数估计的方法. 该方法较好地解决了慢变和快变信道衰落环境下的估计问题. 同时由于采用了能够衡量多径衰落快慢的参数作为滤波器性能的动态设计参量,使得该算法可以自适应地跟踪信道衰落变化的快慢.

### 2 多径衰落与分形

多径衰落对数字通信的影响表现为幅度衰落、时延扩展和多普勒频展. 其中根据 Clarke 经典散射模型,通常认为幅度

收稿日期:2002-09-23;修回日期:2003-11-06

基金项目:国家自然科学基金(No. 60072040);国家 863 计划(No. 2001AA123041)

衰落是服从 Rayleigh、Rice 分布的随机过程。但近年来许多研究<sup>[7,8]</sup>已指出许多微小区的实测数据偏离这两种分布,甚至超出了可以勉强接受的程度。究其原因,主要是散射模型的理论假设有别于实际:其一,同一延时的多径信号分量之间并不是相互独立的,而是存在着空间和时间相关性<sup>[7]</sup>;其二,复杂环境对电波传播的影响增强<sup>[8]</sup>,对于高速运动的情况,信道近似平稳的假设难以成立;其三,同一延时的多径数目足够多的假设并未得到验证。后来人们又陆续提出了 Nakagami<sup>[7]</sup>、Suzuki<sup>[8]</sup>等复合统计分布的信道模型,但仍都未能实现准确的描述。实际中,移动台的运动和周围环境的变化都是随机和无规则的,各种传播机理的综合作用使得幅度衰落表现出极为复杂的不规则性和较强的非线性特点。因此,本文将分形理论用于衰落信道的研究,对多径信道的分形模型初步设想为:幅度衰落是由非线性动力系统产生的分形过程,同时认为时延扩展和多普勒频展保持传统的随机分布特征。

分数布朗运动 (fBm: fractal Brownian motion) 是研究分形运动的一种常用数学模型。它是具有统计自相似性和长程相关性的非平稳过程,类似微小区多径衰落的上述三个特征。所以文[5]认为其能够比随机过程更好地描述幅度衰落。fBm 的广义功率谱具有幂函数的形式<sup>[9]</sup>,即

$$S(f) = \frac{2}{|f|^{2D}} \quad (1)$$

其中  $\alpha$  是功率谱指数,与分形维数  $D$  满足

$$\alpha = 5 - 2D \quad (2)$$

幅度衰落的分数布朗运动模型具有分形维数  $D$  和方差<sup>2</sup> 两个模型参数。一方面,传统的随机模型仅采用一个参数——方差来描述幅度衰落。方差量化地表示了信道衰落的深度,其值越大,表明信道衰落变化越深,越剧烈。但显然对于信道衰落变化的快慢和复杂度,方差的描述是不足的。另一方面,分形维数是描述分形对象的一个主要参数。对于幅度衰落,其分维量化地表示了多径信号变化的复杂度和自相似性。多径衰落蕴含着大量移动通信信道的信息,不同的环境和移动速度具有不同的传播特性,接收信号的幅度也就表现出不同的变化趋势。因此,分形维数体现出信道传播环境对接收信号幅度的影响,其值越大,表明信道衰落变化越快,越复杂。总之,幅度衰落的分形维数和方差是更加全面地描述信道衰落变化快慢的有效参数。

### 3 系统模型

cdma2000 系统的上、下行链路均采用了相似的连续导频信道,所以本文以上行链路为例。系统中导频数据和信息数据是同时并行发送的,并以不同的信道码及扰码扩频,形成导频信道和数据信道。假定为单用户系统,并且只有一条数据信道。图 1 为 cdma2000 系统中 Rake 接收机的框图。接收信号经匹配滤波器解扩后分为通过不同传播路径的基带复信号,这些路径使传输信号具有不同的增益和相位变化。用信道估计器估计出的信道参数复共轭乘以数据符号并与其它路径的信号进行最大比合并,合并输出的数据经过解交织及软判决维特比译码后恢复出发送数据。

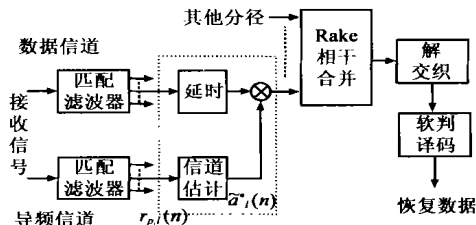


图 1 Rake 接收机模型

这里需要指出的是,由于多径衰落信道的新型模型并未改变对时延扩展的经典理论假设,所以分形模型的引入将不会改变通信系统中 Rake 接收机的结构框架。只是基于幅度衰落的分形特征,可以研究新型的信道估计技术。

假设在匹配滤波器中,每径的相关器理想同步于相应径的时延。那么第  $l$  径分支中,接收导频信道信号经过相关解扩后所得到的第  $n$  个符号位置上的输出为

$$r_{p,l}(n) = a_l(n) d_p(n) + w_{p,l}(n) \quad (3)$$

其中  $d_p(n)$  是导频信道的发送符号,  $a_l(n)$  是第  $l$  径第  $n$  个符号位置上的信道参数,  $w_{p,l}(n)$  为数据信道的多址干扰和背景噪声构成的独立复加性高斯白噪声。在系统中,导频符号  $d_p(n)$  通常是已知的定值  $d_p$ , 这样在第  $l$  径第  $n$  个符号位置上的瞬时信道估计值为

$$x_l(n) = r_{p,l}(n) / d_p = a_l(n) + w_l(n) \quad (4)$$

其中  $w_l(n)$  是  $w_{p,l}(n)$  引入的独立白噪声。

信道估计器的目的是在高斯白噪声中根据观察值  $x_l(n)$  来估计信道参数  $a_l(n)$ 。那么基于最小均方误差准则的最优滤波器的传递函数可表示为

$$H(f) = \frac{S_{xa}(f)}{S_{xx}(f)} = \frac{S_{aa}(f)}{S_{aa}(f) + S_{ww}(f)} \quad (5)$$

其中  $S_{aa}(f)$ 、 $S_{ww}(f)$  分别是信道参数  $a_l(n)$  和噪声  $w_l(n)$  的功率谱。这是一个典型的维纳滤波器系统,具有低通的性质。但是其要求信道特性的先验知识,并假设在估计期间信道参数  $a_l(n)$  和观察值  $x_l(n)$  是近似平稳随机过程。显然,这限制了它的实用性。

经典的区间平均<sup>[1]</sup>和线性加权平均方法<sup>[2]</sup>实质上是通过设计低通 FIR 滤波器来近似最优的维纳滤波器特性,逼近效果必然不够完善。同时又由于加权系数和区间长度都是固定取值,无法自适应跟踪信道衰落变化的快慢,因而限制了它们在不同衰落环境下的适用性。

### 4 基于分形滤波的信道估计

按照多径信道的分形模型设想,本文认为信道参数  $a_l(n)$  是一个分数布朗运动。这样根据式(4),信道估计转变成从高斯白噪声中提取 fBm 的分形滤波问题。与传统的随机模型相比,由于 fBm 能更好地刻画幅度衰落,所以分形滤波估计器有可能获得更好的估计性能。

#### 4.1 分形滤波器

分形滤波器对信道参数的实部和虚部分别进行估计,下面以实部为例。由式(4)可得

$$x_l^R(n) = \text{Re}[x_l(n)] = a_l^R(n) + w_l^R(n) \quad (6)$$

其中  $a_i^R(n) = \text{Re}[a_i(n)]$ ,  $w_i^R(n) = \text{Re}[w_i(n)]$  (7)

分形滤波器的结构如图 2 所示. 取与待估计的第  $n$  个符号位置相邻的连续  $N$  个符号作为估计区间, 即分形滤波器的输入为  $\{x_i^R(i), i = n - \frac{N}{2} + 1, \dots, n + \frac{N}{2}\}$ . 经过  $M$  级离散小波变换后, 尺度  $m$  时刻  $k$  处的小波系数为

$$x_k^{(m)} = \text{DWT}[x_i^R(i)] = a_k^{(m)} + w_k^{(m)}, m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

其中  $a_k^{(m)} = \text{DWT}[a_i^R(i)]$ ,  $w_k^{(m)} = \text{DWT}[w_i^R(i)]$  (9)

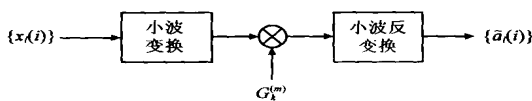


图 2 分形滤波器的结构

对于 fBm 信道参数  $a_i^R(i)$ , 设其方差为  $\sigma_a^2$ , 功率谱指数为  $\alpha$ . 那么它在尺度  $m$  上小波系数的方差满足乘幂率<sup>[10]</sup>, 即

$$\text{Var}[a_k^{(m)}] = \sigma_a^2 2^{2m}, \quad \sigma_a^2 = B^{-2} \quad (10)$$

其中  $B$  是一个与正交小波基函数有关的常数. 对于高斯白噪声  $w_i^R(n)$ , 则满足

$$\text{Var}[w_k^{(m)}] = \text{Var}[w_i^R(i)] = \sigma_w^2 \quad (11)$$

分形滤波器采用了 Wornell 提出的一种基于最小均方误差准则的算法<sup>[10]</sup>, 即取权值

$$G_k^{(m)} = \frac{\sigma_a^2 2^{2m}}{\sigma_a^2 2^{2m} + \sigma_w^2} \quad (12)$$

最后经过小波反变换, 分形滤波器的输出就是对信道参数的估计值, 可表示为

$$\hat{a}_i^R(i) = \text{IDWT}[x_k^{(m)} G_k^{(m)}], i = n - \frac{N}{2} + 1, \dots, n + \frac{N}{2} \quad (13)$$

从式 (12)、(13) 可以看出, 在大尺度下,  $m$  大, 观察值的小波系数  $x_k^{(m)}$  基本得到保留, 在小尺度下, 小波系数被衰减. 实际上分形滤波器算法的思想与第 3 节中提到的维纳滤波器相似, 它实现了尺度(或者说频域)滤波. 对于大尺度下的小波系数, 观察频率低, fBm 信道衰落是主要成分, 所以小波系数得到保留; 与之相反, 对于小尺度下的小波系数, 观察频率高, 高斯白噪是主要成分, 所以小波系数被抑制. 因此借助于小波变换具有多分辨率分析的能力, 该算法具有一个低通滤波器的特点, 滤波器的形状和截止频率自适应地由 fBm 信道衰落和高斯噪声的参数决定. 所以分形滤波器能够对信道衰落进行更加准确的估计.

另一方面, 分形滤波器的形状和带宽直接由 fBm 信道衰落的小波系数参数  $(\sigma_a^2, \alpha)$  决定. 根据式 (2)、(10) 可以看出, 实际上也就是由 fBm 信道幅度衰落的方差  $\sigma_a^2$  和分形维数  $D$  自适应决定的. 第 2 节中提到幅度衰落的分形维数和方差是衡量信道衰落变化快慢的有效参数, 这样分形滤波器的性能将由信道衰落变化的快慢所决定. 所以本算法适用范围广, 能够应用于各种运动速度下的信道.

#### 4.2 参量计算

为了计算 fBm 信道衰落  $a_i^R(n)$  的功率谱指数  $\alpha$ , 采用了一种抗噪能力强的分形维数估计方法——二阶增量矩法<sup>[9]</sup>.

所以下面直接从观察值  $\{x_i^R(i), i = n - \frac{N}{2} + 1, \dots, n + \frac{N}{2}\}$  的

集合中进行计算, 认为两者的分形维数近似相等. 观察值的二阶增量矩满足

$$E[|x_i^R(i + \Delta) - x_i^R(i)|^2] = C |\Delta|^{2(2-D)} \quad (14)$$

其中  $C$  为常数. 写成对数的形式

$$\lg E[|x_i^R(i + \Delta) - x_i^R(i)|^2] = (2 - D) \lg |\Delta| + \lg C \quad (15)$$

这样在一定的观测尺度  $\Delta$  范围内, 观察值的  $\lg E[|x_i^R(i + \Delta) - x_i^R(i)|^2]$  是一条以  $2 - D$  为斜率的直线. 利用线性最小二乘拟合可以得到  $D$  的估计值, 再根据式 (2), 就可得到功率谱指数  $\alpha$ . 在估计出功率谱指数  $\alpha$  后, 对于信道衰落和高斯噪声的方差, 可以根据观察值的小波系数  $\{x_k^{(m)}, m = 1, 2, \dots, M\}$  进行计算. 具体算法可以参考文献<sup>[10, 11]</sup>, 这里只给出结论.

设  $N(m)$  是尺度  $m$  下小波系数的个数,  $\sigma_{m1}^2 = \frac{1}{N(m)}$

$\sigma_{m2}^2$  是每一个尺度下小波系数方差,  $m_1$  和  $m_2$  是两个不同尺度, 信道衰落和高斯噪声方差的近似最大似然估计为

$$\sigma_{aML}^2 = \frac{\sigma_{m_1}^2 - \sigma_{m_2}^2}{2^{m_1 r} - 2^{m_2 r}}, \quad \sigma_{wML}^2 = \sigma_{m_1}^2 - \sigma_{aML}^2 2^{m_1 r} \quad (16)$$

由上述参量的计算过程可看出, 分形滤波器的性能参量

$\sigma_a^2$  及  $\sigma_w^2$  是随着估计区间中符号序列  $\{x_i^R(i), i = n - \frac{N}{2} + 1, \dots, n + \frac{N}{2}\}$  的改变而自动更新的. 所以本算法具有自适应性能, 能自动地跟踪移动台实际传播条件和移动速度的变化.

#### 5 仿真结果与分析

在 Cadence SPW2000 通信系统仿真平台上, 我们对上述信道估计方法进行了数据仿真. 信号调制方式为 QPSK, 码片速率为 3.686Mb/s. 信道模型为 IMT2000 (Vehicular A) 衰落信道模型, Rake 合并径数为 6. 在做 Rake 接收性能分析时, 数据信道传输速率为 115kb/s, 数据帧长 5ms. 系统理想功放, 导频信道信号功率比数据信道信号功率高 6dB. 仿真时假设在接收端码片、符号及帧已经完全同步. 对于分形滤波的估计方法, 估计区间的长度为 128 个连续符号, 即进行  $N = 128$  点的小波变换, 小波分解级数  $M = 2$ .

图 3 示出  $f_D = 500\text{Hz}$  (载频为 2GHz 时对应于移动速度 270 公里/小时) 时分别应用基于区间平均<sup>[1]</sup>、多时隙加权平均<sup>[2]</sup>和分形滤波信道估计方法得到的不同信噪比下信道参数估计误差曲线. 其中,  $f_D$  为最大多普勒频移, 纵坐标的均方误差 (MSE) 是对信道参数估计误差的平方求平均计算得出. 从图中可以看出, 相比另外两种方法, 本文提出的方法能更准确地估计出信道参数. 而且信噪比越大, 估计精度越高, 从而这种方法能够适用于快变衰落信道的估计.

图 4 为在  $f_D = 30\text{Hz}$  (移动速度为 16.2 公里/小时) 时应用上述三种方法的 Rake 接收机的接收误码率性能曲线. 由于在低速移动环境中, 信道参数变化相对平缓, 利用区间平均和 WMSA 方法就已经能够有效地跟踪信道参数的时变. 所以在图中, 虽然分形滤波的方法性能较优, 但三种估计方法的接收

机性能差别并不明显。

图 5 为在  $f_D = 500\text{Hz}$  时应用这三种方法的接收误码率性能曲线。此时,随着信噪比的提高,采用区间平均和 WMSA 方法的接收机性能提高不明显。采用分形滤波的 RAKE 接收机性能则较好,尤其在高信噪比的情况下,性能得到明显的改善。这说明在信道变化剧烈时,前两种信道估计方法已经不能

有效跟踪信道的时变,产生较大的信道估计误差,从而限制了接收机性能随信噪比的提高而改善的程度。对于分形滤波的方法,由于建立在多径衰落更准确描述的基础上,通过分形参数充分利用了信道衰落的固有变化规律,所以即使在信道参数变化剧烈的情况下也能较好地估计出多径衰落信道的参数,提高 Rake 接收机的性能。

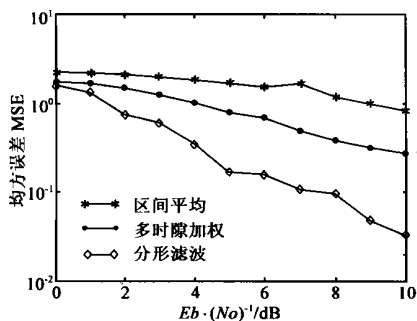


图 3  $f_D = 500\text{Hz}$  时的信道参数估计误差

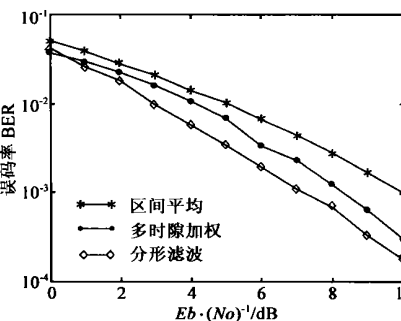


图 4  $f_D = 30\text{Hz}$  时的接收误码率性能曲线

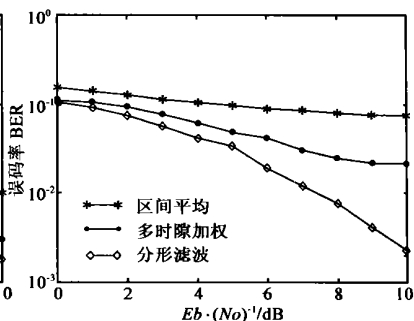


图 5  $f_D = 500\text{Hz}$  时的接收误码率性能曲线

通过以上的分析可以看出,基于分形滤波的信道估计方法在慢变衰落和快变衰落的环境下都能对信道参数进行准确的估计。采用该算法的 Rake 接收机的性能优于采用传统的区间平均和多时隙加权平均方法的接收机,在高速运动的情况下性能提高更为明显。

## 6 结论

在多径衰落信道新型分形模型的基础上,本文提出了一种利用分形滤波进行最小均方误差意义下信道参数估计的方法。由于该算法充分利用了多径衰落的分形特性,所以在慢变和快变衰落环境中都能准确估计出信道参数,对高速运动情况下接收机性能的改善更为明显。同时,多径衰落的分形维数和方差是衡量信道衰落变化快慢的有效参数,本算法利用它们作为滤波器性能的设计参量,从而保证了在不同的传播环境中,及时有效地跟踪信道的变化,扩展了接收机正常工作的运动速度范围。

研究结果进一步表明,与传统的随机模型相比,新的分形信道模型能更好地刻划多径衰落的行为。

## 参考文献:

- [1] Benthin M, Kammeyer K D. Influence of channel estimation on the performance of a coherent DS-CDMA system [J]. IEEE Trans. Vehicle Technology, 1997, 46(2): 262 - 268.
- [2] Abeta S, Sawahashi M, Adachi F. Performance comparison between time-multiplexed pilot channel and parallel pilot channel for coherent rake combining in DS-CDMA mobile radio [J]. IEICE Trans. Communications, 1998, E81-B (7): 1417 - 1425.
- [3] Jaggard D L, Sun X. Scattering from fractally corrugated surfaces [J]. Optical Society of America Journal (A): Optics and Image Sciences, 1990, 7(6): 1131 - 1139.
- [4] 王显德, 罗贤云, 等. 基于倾斜地面上分形树的电磁散射研究 [J]. 电子学报, 1999, 27(9): 48 - 51.

- [5] 胡刚, 朱世华, 谢波. 多径衰落信道的分数布朗运动模型 [J]. 电子学报, 2003, 31(1): 8 - 12.
- [6] 周雷, 周小波, 张贤达. 一种基于模糊系统的信道估计新方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(9): 29 - 32.
- [7] Hashemi H. The indoor propagation channel [J]. IEEE Proceedings, 1993, 81(7): 943 - 968.
- [8] Suzuki H. A statistical model for urban radio propagation [J]. IEEE Trans. Communications, 1977, COM-25(7): 673 - 680.
- [9] 李后强, 汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 164 - 178.
- [10] Wornell G W, Oppenheim A V. Estimation of fractal signals from noisy measurements using wavelets [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1992, 40(3): 611 - 623.
- [11] 谢文录. 雷达信号处理中的分形模型与方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 1997.

## 作者简介:



胡刚 男, 1974 年 4 月生于湖北省荆门市, 新加坡南洋理工大学博士后, 2002 年获西安交通大学信息与通信工程博士学位, 现主要从事扩频移动通信及信号处理等方面的研究。



朱世华 男, 1950 年 1 月生于上海市, 西安交通大学教授、博导, 1987 年获英国 ESSEX 大学电子系统工程博士学位, 现主要从事移动通信、数字传输和程控交换等方面的研究。