

基于分形的多径衰落信道估计¹

谢 波 朱世华 胡 刚

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘 要 该文研究了多径衰落的分形性质,提出了一种利用分形维数和小波重构来改进最小均方误差方法的新型多径衰落信道估计算法。该算法改进了衰落信道参数估计的准确度,并消除了判决方法的错误传递性。仿真结果表明该算法能较准确地估计出多径衰落信道的参数,显著提高快衰落条件下接收机的误码性能。

关键词 多径衰落,信道估计,分形,小波重构

中图分类号 TN911.22, O157.3

1 引 言

在移动通信中,微波信号的传播经地面和周围环境物体的反射、散射和绕射,到达接收机的信号往往是多个信号的叠加。这种多径传播引起的接收信号的幅度、相位和到达时间的随机变化,会引起多径衰落,从而严重影响信号的传输质量。在第三代移动通信系统中,由于采用了宽带 CDMA 技术,可以利用 RAKE 接收机实现分集接收,从而有效地克服多径衰落的影响。但是在快衰落及衰落深度较大的情况下,必须有理想的信道估计方法以实现相干 RAKE 接收^[1]。

在第三代移动通信的空中接口标准 WCDMA 中,上、下行链路均采用了导频码,用于对衰落信道参数进行估计。由于导频码与信道数据是时分复用的,有关数据码时隙期间的信道参数,就只能根据对导频码期间信道参数的估计值,再通过某种算法来估算。虽然可以利用线性内插方法^[2]或自适应滤波器^[3]进行这种估算,但对于快衰落信道,这些方法的准确度较差,效果不理想。

理论分析和实地测量均表明^[4],无线电波信号在移动通信信道中的传播是一个复杂的过程。该过程中既包括电波的散射、反射及绕射,还包括复杂的环境及移动台移动对电波传输的影响。这些因素的综合作用,使得电波传播在不同的条件下表现出一种动态差异,性质变化很大,无法找到准确的线性关系,却显现出极为复杂的不规则性和较强的非线性。接收机接收到的是从多条路径传播来的多个信号的叠加。多径衰落导致接收信号的幅度、相位和到达时间的剧烈变化。如果发射机、接收机或周围环境物体之一或全部都在快速运动,接收信号将变得极其复杂。多径衰落信道的一些特性可以用概率或统计的方法来描述,然而,由于多径衰落的复杂性,无线电波信号在多径衰落信道中的传播是一个具有高度不确定性的过程,难以用一般的数学方法准确描述和分析它。许多研究表明,分形现象广泛存在于自然界及其变化规律中,利用分形理论来研究无线电波传播越来越受到重视。文献 [5,6] 运用分形理论研究了复杂地形及表面环境中无线电波的传播,分析并指出了电波传播的分形特性。文献 [7] 将分形理论应用于调制技术。文献 [8] 应用分形模型分析了传播环境中的物体对无线电波传播的影响。文献 [9] 从多径衰落信号产生的动力学机制出发,分析了多径衰落信号的分形特性。

基于上述移动通信中无线信号传输的分形特性,本文提出了一种新的信道估计算法。该算法利用了多径衰落信号的分形性质,有效地提高了衰落信道参数估计准确度,并消除了判决方法的错误传递性,从而改善了接收机的性能。

¹ 2001-02-11 收到, 2001-07-05 定稿

国家自然科学基金 (60072040)、博士点基金 (9569823) 资助课题

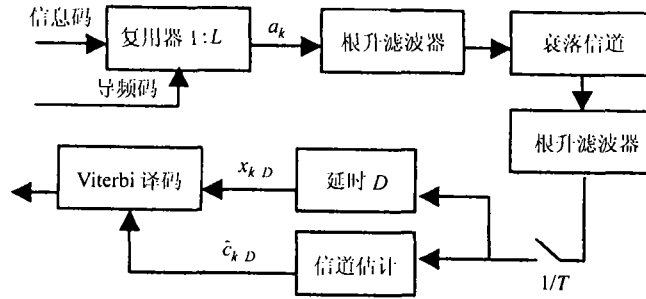


图 1 通信系统框图

2 系统模型及信道估计问题

通信系统框图如图 1 所示. 信息码元序列首先经过一个复用器, 复用器按 $1:L$ 的比例将导频码加入信息码元序列, 即复用器输出的序列中, 每 L 个码元中有一个导频码和 $L-1$ 个信息码. 复用器的输出序列 $\{a_k\}$ 经过根升余弦滤波器后再送往发射机. 发送信号经过一个有加性高斯白噪声的衰落信道 $c(t)$ 后到达接收机. 因此,

$$x(t) = c(t)a(t) + n(t) \quad (1)$$

在接收端, 接收信号经过一个根升滤波器, 再采样后 (采样速率与码元发送速率相同) 得到采样序列 $\{x_k\}$. 假设信道衰落 $c(t)$ 足够慢, 即在一个码元周期 T 内 $c(t)$ 近似为常数, 则采样序列 $\{x_k\}$ 可表示为

$$x_k = c_k a_k + n_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, k-1 \quad (2)$$

这里, a_k 是接收到的第 k 个码元, c_k 是 $c(t)$ 的第 k 个采样, $\{n_k\}$ 是一组均值为零方差为 σ_n^2 且相互独立的高斯随机变量. 信道估计模块根据采样序列 $\{x_k\}$ 计算出信道衰落 c_k 的估计值 $\hat{c}_k$ (信道估计的计算将引起时延 D). 最后, 维特比译码器根据输入 $\{x_{k-D}, \hat{c}_{k-D}\}$ 计算出发送的信息码元.

用 $\tilde{A}$ 表示 $A = (a_0, a_1, \dots, a_{k-1})$ 的推测值, 并定义 $C \otimes \tilde{A} = (c_0 \tilde{a}_0, c_1 \tilde{a}_1, \dots, c_{k-1} \tilde{a}_{k-1})$, 如果能够知道信道衰落 C , 利用最大似然检测准则就可以判决出接收到的信息码元, 即 $\hat{a}_k \leftarrow \min\{|x_k - c_k \tilde{a}_k|^2\}$, $k = 0, 1, \dots, k-1$. 但在实际中, 信道衰落 C 无法确切知道, 只能应用估计的方法取得其近似值. 一种可行的方法是利用最小均方差法. 假设在 $t = kT$ 时刻, 已经得到对接收到的码元的判决值 $\hat{A}_k = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k)$, 由 (2) 式可得

$$x_{k-i} \hat{a}_{k-i}^* = c_{k-i} a_{k-i} \hat{a}_{k-i}^* + n_{k-i} \hat{a}_{k-i}^*, \quad i = 0, 1, \dots, k \quad (3)$$

其中 $(*)$ 表示复共轭. 假设发送码元 a_{k-i} 的功率为 1, 从 (3) 式可得

$$x_{k-i} \hat{a}_{k-i}^* = c_{k-i} + v_{k-i} \quad (4)$$

从 (4) 式可以看出, 利用线性预测的方法可以从 $\{x_{k-i} \hat{a}_{k-i}^*\}$ 估计 c_{k+1} , 即

$$\hat{c}_{k+1} = \sum_{i=0}^{N-1} r_i x_{k-i} \hat{a}_{k-i}^* \quad (5)$$

由最小均方误差准则可以确定系数 r_i

$$\sum_{i=0}^{N-1} r_i p(m-i) + 2\sigma_n^2 r_m = p(m+1) \quad (6)$$

其中 $p(m-i) = R_c[(m-i)T]$, $R_c(\tau)$ 是 $c(t)$ 的自相关函数, 可以由 $c(t)$ 时间相关近似或假设 $c(t)$ 是一个通过带宽为多普勒频率的低通滤波器的高斯过程而推导出^[3]. 因此 (5) 式可以写为

$$\hat{c}_{k+1} = f(\hat{A}_k) \quad (7)$$

从以上可以看出, 在已知接收码元过去和当前的判决值的基础上, 能够预测下一时刻的信道衰落值. 在 $t = kT$ 时刻, 接收码元的判决值 $\hat{A}_k$ 是已知的, 从 (7) 式可以计算出 $\hat{c}_{k+1}$. 在 $t = (k+1)T$ 时刻, 如果接收到的是导频码元, 则此时接收码元的判决值 $\hat{a}_{k+1}$ 就是 a_{k+1} ; 否则, 按下式计算 $\hat{a}_{k+1}$

$$\hat{a}_{k+1} \leftarrow \min\{|x_{k+1} - f(\hat{A}_k)\hat{a}_{k+1}|^2\} \quad (8)$$

如果信道衰落估计准确, 利用上式即可得到最佳的判决结果. 然而, 仿真实验及实际系统都表明, 这种方法在衰落情况严重的环境中性能并不理想^[1]. 其主要原因一方面是衰落信道参数的估计不可能完全准确, 例如在 CDMA 系统中由多径衰落引起的码间串扰、各个用户之间的多址干扰、以及高斯白噪声等都会影响到估计的准确性; 另一方面是 (8) 式的判决方法具有错误传递性, 即当前码元的判决受以前码元判决结果的影响. 若前面码元的判决结果错误, 根据 (7) 式, 将使得当前信道估计错误, 进而根据 (8) 式, 将极可能导致当前码元判决出错. 类似地, 当前的错误也将导致后继码元的判决结果出错, 由此产生判决错误的传播现象.

3 改进的信道估计算法

针对上述问题, 我们从提高衰落信道参数估计的准确度及消除判决方法错误传递性两个方面来改进判决方法.

3.1 消除判决方法错误传递性

根据 PSP(Per-Survivor Processing) 原理^[1], 以 QPSK 调制方式为例, 假设在 $t = kT$ 时刻已经有 $M = 4$ 个序列, 即 $\hat{A}_k(i)$, $i = 1, 2, 3, 4$, 它们代表该时刻对接收序列的估计. $\hat{C}_k(i)$ 是对应序列 $\hat{A}_k(i)$ 的衰落信道参数估计, 且 $\hat{C}_k(i) = [\hat{c}_0(i), \hat{c}_1(i), \dots, \hat{c}_k(i)]$. $\hat{A}_k(i)$ 的量为

$$\varphi[\hat{A}_k(i)] = \sum_{j=0}^k |x_j - \hat{c}_j(i)\hat{a}_j(i)|^2 \quad (9)$$

在 $t = (k+1)T$ 时刻, 接收到的码元可能是信息码元或者是导频码元. 如果是信息码元, 考虑在 $t = (k+1)T$ 时刻有 M 个候选码元, 每个候选码元都对应着来自 $t = kT$ 时刻 M 个估计码元出发的 M 条路径. 对于每个候选码元, 从这 M 条路径中选择量度最小的一条路径. 例如, 考虑 $t = (k+1)T$ 时刻的第 m 个候选码元 $\tilde{a}_{k+1}(m)$, 到达此码元的幸存路径所对应的序列为

$$\hat{A}_k(i) = \min_{j=1,2,\dots,M} \{\varphi[\hat{A}_k(j)] + |x_{k+1} - f[\hat{A}_k(j)]\tilde{a}_{k+1}(m)|^2\} \quad (10)$$

因此, 经过 (10) 式的选择后, 在 $t = (k+1)T$ 时刻将剩下 M 条幸存路径.

如果是导频码元, 则在 $t = (k+1)T$ 时刻只有唯一的候选码元, 对这个码元选择 M 条路径中量度最小的路径。例如, 接收到的导频码元是 a_{k+1} , 则到达此码元的幸存路径所对应序列为

$$\hat{A}_k(i) = \min_{j=1,2,\dots,M} \{ \varphi[\hat{A}_k(j)] + |x_{k+1} - f[\hat{A}_k(j)]a_{k+1}|^2 \} \quad (11)$$

经过 (11) 式的选择后, 在 $t = (k+1)T$ 时仅剩下一条幸存路径。

从以上的分析可知, 因为每隔 L 个接收码元, 就只有唯一一条路径幸存, 所以每经过 LT 时间就可以对此期间的接收码元做出确定的判决。

3.2 提高信道估计准确度

从 (7) 式虽然可以计算出衰落信道估计, 但估计值与实际值存在一定的偏差。此外, 估计算法中没有充分利用衰落信道的一些先验知识, 例如, 在一般条件下我们知道衰落信道符合 Rice 或 Rayleigh 分布等。如果能充分利用衰落信道的先验知识, 就有可能进一步提高信道参数估计值的准确度。理论分析和实地测量均表明, 无线电波信号在移动通信信道中的传播是一个复杂的过程, 显现出极为复杂的不规则性和较强的非线性。文献 [5-9] 指出了多径衰落信号具有分形特征。以下我们利用这一分形特征提出一种改进信道估计准确度的方法。

影响估计结果的关键因素是接收信号中的系统干扰噪声, 从而造成计算出的信道估计值是信道实际值上叠加一个噪声项, 即

$$\hat{c}_k = cr_k + \xi_k \quad (12)$$

其中 $\hat{c}_k$ 是信道参数的估计值, cr_k 是实际值, ξ_k 是高斯随机变量。提高信道估计的准确度就需要进一步从 $\hat{c}_k$ 中计算出 cr_k 。考虑 (1) 式, $a(t)$, $n(t)$ 分别是发送信号及白噪声, 都不具有分形性质, 而 $x(t)$ 是接收到的具有分形性质的多径衰落信号且 $x(t) = c(t)a(t) + n(t)$ 。由分形理论中的积和原理^[10]可知, 当不具有分形性质的信号与某未知信号相乘, 若其乘积具有分形性质, 则未知信号具有分形性质。因此, (1) 式中的衰落信道响应 $c(t)$ 应具有分形特性。具有分形性质的信号可以用小波函数来表示^[11]:

$$w(a, b) = a^{-1/2} \int_R c(t) \psi^*\left(\frac{x-a}{b}\right) dt \quad (13)$$

$$c(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} w(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{da db}{a^2}, \quad c_\psi = \int_0^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad (14)$$

$$c_k = c(t = kT) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} w(a, b) \psi_{ab}(kT) \frac{da db}{a^2} \quad (15)$$

对具有分形结构的信号 $c(t)$, 根据其标度不变性, 有 $c(\lambda t) = \lambda^H c(t)$, $\lambda > 0$, H 是信号的自相似参数。经过小波变换后,

$$\begin{aligned} w(\lambda a, \lambda b) &= (\lambda a)^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} c(t) \psi^*\left(\frac{t - \lambda b}{\lambda a}\right) dt \\ &= (\lambda a)^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda^H c(x) \psi^*\left(\frac{\lambda x - \lambda b}{\lambda a}\right) d(\lambda x) = \lambda^{1/2+H} w(a, b) \end{aligned} \quad (16)$$

根据 (16) 式, 具有分形结构的信号其小波变换在一定尺度范围内同样具有标度不变性, 其自相似参数为 $(H + 1/2)$ 。此外, 高斯噪声的小波变换仍然为高斯过程, 不具有标度不变性, 而且高

斯噪声的平均功率与尺度无关。在小波重构信号时, 仅利用某一个固定尺度范围内的小波变换信息来重构的信号一方面可以除去其它尺度范围内的噪声, 从而非常有效地抑制噪声的影响; 另一方面由于标度不变性, 所以其分形维数与没有叠加噪声的真实信号的分形维数近似相等。考察具有分形结构的信号时, 标度越小, 观察结果就将揭示信号更多的精细结构 (即观察结果更准确地描述分形信号)。同时, 当标度越来越小时 (即标度变化的范围越来越大), 观察结果也将包括进更多的噪声, 这将导致观察结果的不准确。

根据前述对衰落信道分形特性及分形维数性质的分析, 我们提出了从信道估计值 $\hat{c}_k$ 中计算出信道实际值 cr_k 的一种自适应方法, 如图 2 所示。 $\hat{c}_k$ 分为两路做离散小波分解及重构。下面一路只取某一级的小波系数做重构, 对重构后的信号计算分形维数 d_1 。通过前面的分析, 由多径衰落信道信号的标度不变性可知, d_1 与信道真实值 cr_k 的分形维数基本相等。上面一路, 则对含有噪声的 $\hat{c}_k$ 进行小波分解与重构, 计算重构信号 $c\tilde{r}_k$ 的分形维数 d_2 , 并利用分形维数的差 $\Delta d = |d_1 - d_2|$ 控制上面一路小波重构的级数, 直到 $\Delta d \approx 0$ 为止。此时的输出信号 $c\tilde{r}_k$ 与信道真实值 cr_k 的分形维数近似相等, 因而 $c\tilde{r}_k$ 与 cr_k 更近似。这样, 在信号 $c\tilde{r}_k$ 中有效抑制了信道估计值 $\hat{c}_k$ 中的噪声, 能更准确估计出信道实际值。

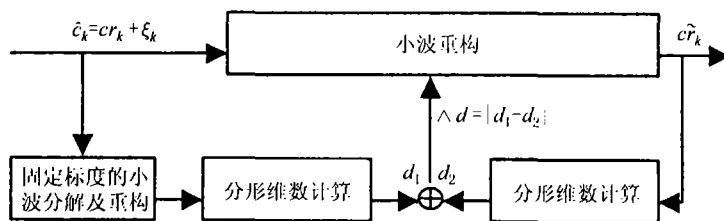


图 2 自适应小波重构框图

4 仿真结果

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仿真, 结果如图 3 及图 4 所示。信号调制方式为 QPSK, 信息码与导频码的复用比 $1:L = 1:5$, 被测信道模型为 Rayleigh 衰落信道。

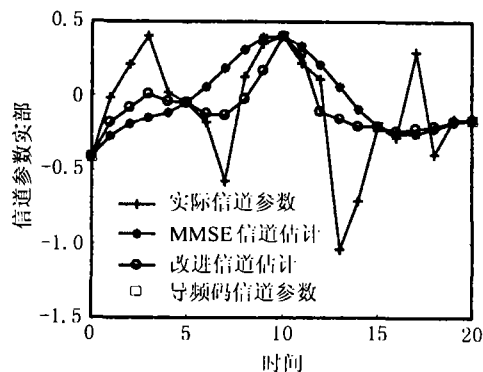
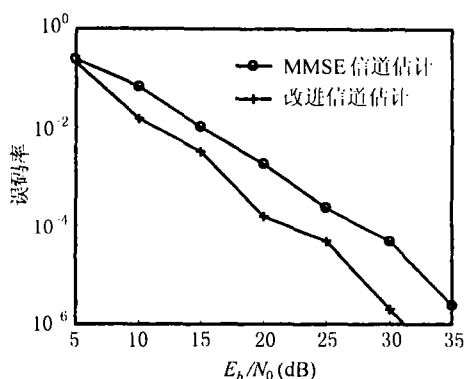
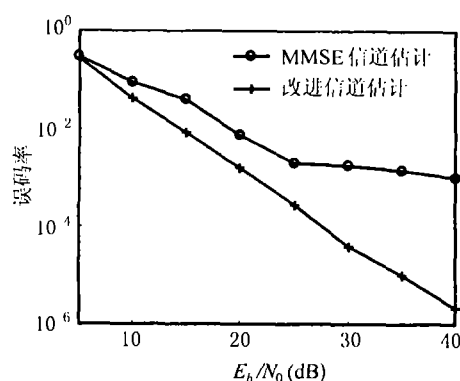


图 3 信道参数估计结果

图 3 给出了 $F_d T = 0.01$ 时, 采用传统信道估计方法及用本文信道估计方法估计出的连续 4 个导频时的信道参数实部, 其中 F_d 为最大多普勒频移, T 为发送码元周期。横坐标是接收码元宽度为单位的时间, 纵坐标为信道参数的实部。从图中可以看出, 基于本文的信道估计算法能较好地跟踪信道的变化, 并较准确地估计出信道参数, 从而在相同信噪比下, 接收误码率能得到较大的改善。

图 4 给出了 $F_d T = 0.01$ 时, 采用传统信道估计方法及用本文信道估计方法接收机的接收误码率性能曲线。图 5 给出了 $F_d T = 0.05$ 时的误码率性能曲线。从图 4, 图 5 可以看出, 在快速变化的信道环境中, 基于传统信道估计的接收机在信噪比大于一定值 (图 5 中为 25dB) 时, 再提高信噪比对接收误码率的改善作用不大, 说明传统信道估计方法在快衰落环境中不能有效跟踪信道。而基于改进信道估计的接收机在大信噪比时, 误码性能的改善仍十分明显。这说明本文的信道估计方法即使在快衰落环境, 信道参数变化剧烈的情况下也能准确估计出衰落信道参数, 因而能较好地跟踪快速变化的信道, 从而适用于传输速率高, 移动速度快的通信环境, 能有效地克服多径衰落的影响, 提高系统的接收性能。

图 4 $F_d T = 0.01$ 时的接收误码率性能曲线图 5 $F_d T = 0.05$ 时的接收误码率性能曲线

5 结 论

在多径衰落分形性质的基础上, 本文提出了基于分形维数及小波重构的改进型信道估计算法。该算法能较准确地估计出衰落信道参数, 从而改善了信道参数的估计准确性, 在此基础上结合导频码, 能够有效消除判决方法的错误传递性, 因而提高了接收机的误码率性能。由前述的分析及仿真结果可以看出, 与 MMSE 方法相比, 由于该算法充分利用了衰落信道的分形特性, 能较准确地估计出衰落信道的参数, 在传输速率高和移动速度快的恶劣衰落环境下, 对接收机性能有明显的改善。

参 考 文 献

- [1] J. G. Proakis, Digital Communications, 3rd Edit., New York, McGraw-Hill, 1996, 758-833.
- [2] S. Sanpei, T. Sunaga, Rayleigh fading compensation for AQM in land mobile radio communications, IEEE Trans. on Veh. Technol., 1983, 42(2), 137-147.
- [3] J. K. Cavers, An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels, IEEE Trans. on Veh. Technol., 1991, 40(4), 689-693.
- [4] T. S. Rappaport, Wireless Communications, NJ, Prentice Hall, 1996, 69-189.
- [5] D. L. Jaggard, X. Sun, Scattering from fractally corrugated surfaces, Journal of Optical Society of America (J.Opt.Soc.Am.A), 1990, 7(6), 1131-1139.
- [6] D. L. Jaggard, X. Sun, Scattering from bandlimited fractal fibers, IEEE Trans. on Antennas Propag., 1989, 37(12), 1591-1597.
- [7] G. W. Wornell, A. V. Oppenheim, Wavelet-based representations for a class of self-similar signals with application to fractal modulation, IEEE Trans. on IT, 1992, 38(2), 785-800.
- [8] 王显德等, 基于倾斜地面上分形树的电磁散射研究, 电子学报, 1999, 27(9), 48-51.

- [9] 谢波, 朱世华, 胡刚, 多径衰落信号的分形时序特性研究, 西安交通大学学报, 1999, 33(9), 18-21.
- [10] 李后强, 汪富泉, 分形理论及其在分子科学中的应用, 北京, 科学出版社, 1993, 269-319.
- [11] S. Mallat, H. Wenliang, Singularity detection and processing with wavelets, IEEE Trans. on IT, 1992, 38(2), 211-223.

FRACTAL BASED MULTIPATH FADING CHANNEL ESTIMATION

Xie Bo Zhu Shihua Hu Gang

(School of Electron. and Info. Eng., Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract This paper studies the fractal characteristics of multipath fading channels and proposes a novel algorithm for the channel estimation, which is basically an MMSE estimation algorithm modified by employing fractal dimension and wavelet reconstruction analyses. The algorithm can improve the estimation accuracy of multipath fading channel parameters and avoid the error propagation problem of conventional approaches. Simulation results show that the new algorithm can estimate the channel parameters more accurately compared to the MMSE method, and significantly improve the receiver bit error rate (BER) in the fast fading environment.

Key words Multipath fading, Channel estimation, Fractal, Wavelet reconstruction

谢 波: 男, 1973 年生, 博士生, 主要从事 CDMA 系统中信道模型及信道估计技术研究.

朱世华: 男, 1950 年生, 教授, 博士生导师, 1987 年获英国 ESSEX 大学电子工程系工程博士学位, 现从事移动通信、数字传输和交换方面的研究.

胡 刚: 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事移动通信信道的非线性模型研究.