

MIMO SC-FDE 系统的时域信道估计新算法

李丹萍, 刘毅, 张海林

(西安电子科技大学 综合业务网与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 研究了循环正交训练序列的设计, 并提出了适用于多入多出单载波频域均衡系统的时域信道估计新算法。首先选取 Chu 序列作为基准序列, 并引入循环前缀与循环后缀构成循环正交序列, 从而在接收端通过相关运算得到多天线信道的时域冲激响应估计。进一步, 将长训练序列替换为多组连续重复且总长度相等的循环正交短训练序列, 并利用时域相关和时间分集达到与原有长序列法相同的性能。仿真结果表明, 所提时域信道估计算法不仅能够抑制天线间的干扰, 而且有效地降低了噪声的方差, 即使在低信噪比下也能获得较好的误比特率性能。

关键词: 循环正交序列; 时域信道估计; 时域相关; 多入多出单载波频域均衡

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)02-0144-06

Channel estimation for MIMO SC-FDE systems via time-domain based approaches

LI Dan-ping, LIU Yi, ZHANG Hai-lin

(State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Circularly orthogonal sequences were designed for the time-domain channel estimation in MIMO SC-FDE systems. Firstly, Chu sequences were chosen as the base sequences, which were added by cyclic prefix and cyclic postfix to construct circularly orthogonal training sequences. The channel impulse response can be estimated by calculating the cross-correlation between the received signal and the corresponding local sequence. Further, a new training sequence structure was presented, in which the original "long" training sequences were replaced by successive and identical "short" sequences. The corresponding estimation algorithm achieves the same performance as "long" sequences based method. Simulation results show that the proposed algorithms can offer good BER performance even at low SNR, due to the successful interference suppression between the antennas and the decrease in the noise variance.

Key words: circularly orthogonal sequences; time-domain channel estimation; time-domain correlation; MIMO SC-FDE

1 引言

多输入多输出 (MIMO) 技术充分利用空间资源, 可以在原有的频带内实现高速率的信息传输, 极大地提高系统的频谱利用率和链路可靠性^[1]。单

载波频域均衡 (SC-FDE) 利用了循环前缀与 FFT/IFFT, 能够以类似 OFDM 系统的低复杂度进行频域均衡。不仅具有良好的抗频率选择性衰落性能, 而且避免了 OFDM 系统中的峰均比过高和对频偏较敏感的缺点^[2]。将二者相结合起来的 MIMO

收稿日期: 2010-05-11; 修回日期: 2010-10-28

基金项目: 高等学校创新引智计划基金资助项目 (B08038); 国家自然科学基金资助项目 (61072069); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (72101855, 72105377)

Foundation Items: 111 Project of China (B08038); The National Natural Science Foundation of China (61072069); Fundamental Research Funds for the Central Universities (72101855, 72105377)

SC-FDE 技术能够克服无线信道的频率选择性衰落、提高系统的频谱利用率和信道容量,在宽带无线通信领域有着广阔的应用前景^[3]。

信道估计是 MIMO SC-FDE 系统中必不可少的部分,并且将直接影响整个系统的性能,其关键在于如何独立地估计出同一接收天线上来自多个发射天线上的各个信道。而使得各发射天线上的训练序列至少在一个信道长度内正交是解决此问题的方法之一。文献[4]中使用时域不重叠的前导符号保证了各训练序列的正交性,使各发射天线上的信道冲激响应分离,从而将 MIMO 系统信道估计简化为单天线系统信道估计。文献[5]中设计的训练序列在经过 FFT 之后构成了 STBC 编码符号,通过对各子载波信息进行线性处理即可获得相应频域信道冲激响应。但是这些算法均着重于各天线间的信道分离,主要考虑的是降低天线间的干扰而没有考虑到噪声的抑制问题,因此并不适用于接收信噪比较低的环境。另一方面,在常用的时域信道估计算法中,虽然可以选择 m 序列作为 MIMO 系统的训练序列,但是存在性能平台效应^[6]。

为了提高 MIMO SC-FDE 系统中信道估计的精度,本文提出了基于循环正交序列的时域信道估计新算法。根据 Chu 序列的理想周期自相关特性而设计出的时域循环正交序列不仅适用于多天线系统,而且可以有效地分离出各信道中的多径信息。在此基础上改进得到的连续重复循环正交短训练序列,不仅可以获得与长序列相同的信道估计性能,而且能进一步减少算法中的相关器长度以减少实际系统硬件处理时间。

2 MIMO SC-FDE 系统的训练序列设计

考虑一个采用循环正交训练序列进行信道估计的 N_t 发 N_r 收 MIMO SC-FDE 系统。为了精确地进行信道估计,各发射天线上的训练序列首先应该

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_i(0) & \bar{x}_i(1) & \cdots & \bar{x}_i(N-1) & \bar{x}_i(0) & \cdots & \bar{x}_i(P-1) \\ \bar{x}_i(N-1) & \bar{x}_i(0) & \cdots & \bar{x}_i(N-2) & \bar{x}_i(N-1) & \cdots & \bar{x}_i(P-2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \bar{x}_i(N-L+1) & \bar{x}_i(N-L+2) & \cdots & \bar{x}_i(N-L) & \bar{x}_i(N-L+1) & \cdots & \bar{x}_i(P-L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, $\bar{\mathbf{X}}_i$ 中第 p 行的第 q 列至第 $(q+N-1)$ 列元素构成的序列为

$$\bar{x}_i((n+q-p)_{\text{mod}N})$$

其中, $p=1\sim L$, $q=1\sim P$ 。

满足正交性。本文选取 Chu 序列^[7]作为循环正交训练序列的基准序列。Chu 序列具有理想周期自相关特性,即任意 Chu 序列移位 m 位后,只要 m 不是该序列周期的整数倍时,移位后的序列与原序列不相关。令 $x(n)$ 为长度为 N 的 Chu 序列,对 $x(n)$ 进行不同步长的循环移位得到本地序列集 $\mathbf{X} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{N_t}\}$, 令各本地序列之间的最小循环移位步长为 ϵ , 则第 i 根天线上的本地序列为 $\bar{x}_i(n) = x((n+(i-1)\epsilon)_{\text{mod}N})$ 。这些序列不仅自身具有理想的自相关性,而且各序列之间具有零相关性。在构造某个天线上的时域循环正交训练序列时,首先选取 \mathbf{X} 中的某个序列作为本地序列,在本地序列的前后分别加上长度均为 P 的循环前缀和循环后缀 (P 不小于各天线间信道最大多径时延 L), 则整个长度为 $N+2P$ 的序列构成了该天线上的时域循环正交训练序列,其结构如图 1 所示。继而用相同方法构造出其余天线上的训练序列。

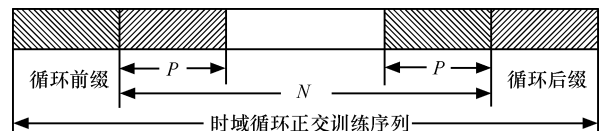


图 1 循环正交训练序列的结构

在接收端,假设理想同步的前提下,去掉循环前缀后第 j 根天线上的接收信号可表示为

$$y_j = \sum_{i=1}^{N_t} \bar{h}_{ji} \bar{\mathbf{X}}_i + \omega_j \quad (1)$$

其中, $\bar{h}_{ji} = [\bar{h}_{ji}(0) \ \bar{h}_{ji}(1) \ \cdots \ \bar{h}_{ji}(L_{ji}-1)]$ 表示第 i 根发射天线至第 j 根接收天线的多径衰落信道, ω_j 表示均值为零、方差为 σ^2 的复高斯白噪声; $\bar{\mathbf{X}}_i$ 表示第 i 根天线上训练序列对应的循环卷积矩阵,其具体形式表示如下:

3 信道估计算法

3.1 基于循环正交序列的时域信道估计

在 MIMO 系统中,接收天线上的信号为各发射

天线上的信号经过不同信道衰落后与加性噪声迭加而成。在信道估计中，不仅需要减少各发送天线上训练序列之间的干扰，同时也要考虑噪声对信道估计性能的影响。基于此，本节提出了基于循环正交序列的信道估计算法。令 N_t 发 N_r 收天线间所有信道的最大长度为 L ，时域训练序列长度为 N ，在多径 MIMO 信道环境下，一般令 $\varepsilon \geq P$ 即可。由于训练序列必须满足条件 $N \geq N_t \varepsilon$ ，因此训练序列的长度一定不能小于 $N_t P$ 。

根据矩阵 \bar{X}_i 中各行元素与 $\bar{x}_i (j \neq i)$ 的循环正交性，利用去循环前缀后的接收信号与本地序列的相关运算得到各天线上的信道估计^[8,9]。以第 j 根接收天线为例，其对应的第 i 根发射天线上的时域信道估计为 $\hat{h}_{ji}(n) (n=0 \sim P-1)$ ，如下所示：

$$\begin{aligned} \hat{h}_{ji}(n) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{x}_i^*(k) y_j(k+n) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{x}_i^*(k) \left(\sum_{l=0}^{L-1} \sum_{i=1}^{N_t} \bar{x}_i \left((k+(n-l))_{\text{mod} N} \right) \bar{h}_{ji}(l) + \omega_j(k+n) \right) \\ &= \frac{1}{N} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \bar{x}_i^*(k) \bar{x}_i(k) \bar{h}_{ji}(n) + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0, l \neq n}^{L-1} \bar{x}_i^*(k) \bar{x}_i \left((k+(n-l))_{\text{mod} N} \right) \right. \\ &\quad \left. \bar{h}_{ji}(l) + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{q=1, q \neq i}^{N_t} \sum_{l=0}^{L-1} \bar{x}_i^*(k) \bar{x}_q \left((k+(n-l))_{\text{mod} N} \right) \bar{h}_{jq}(l) \right\} + \psi_{ji}(n) \end{aligned} \quad (3)$$

根据 Chu 序列的周期自相关特性，可以得到如下 2 条性质：

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} \bar{x}_i^*(k) \bar{x}_i \left((k-l)_{\text{mod} N} \right) = \begin{cases} 1, & l=0 \\ 0, & l=1 \sim N-1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{q=1, q \neq i}^{N_t} \sum_{\lambda=-P+1}^{L-1} \bar{x}_i^*(k) \bar{x}_q \left((k-\lambda)_{\text{mod} N} \right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{q=1, q \neq i}^{N_t} \sum_{\lambda=-P+1}^{L-1} \bar{x}_i^*(k) \bar{x}_i \left((k-(q-i)\varepsilon - \lambda)_{\text{mod} N} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

将式(4)与式(5)代入式(3)中，可以得到消除天线间干扰与多径干扰后的时域信道估计：

$$\hat{h}_{ji}(n) = \bar{h}_{ji}(n) + \psi_{ji}(n) \quad (6)$$

其中， $\psi_{ji}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{x}_i^*(k) \omega_j(k+n)$ 表示相关器输出的噪声项。由于经过线性变换后的噪声仍然是高斯白噪声，因此归一化后的信道估计均方误差 (MSE) 为

$$\begin{aligned} \gamma_h &= \frac{1}{N_t N_t P} \sum_{n=0}^{P-1} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \mathbb{E} \left\{ \left| \bar{h}(n)_{ji} - \hat{h}(n)_{ji} \right|^2 \right\} \\ &= \frac{1}{N_t N_t P} \sum_{n=0}^{P-1} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \mathbb{E} \left\{ \left| \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{x}_i^*(k) \omega_j(k+n) \right|^2 \right\} = \frac{\sigma^2}{N} \end{aligned} \quad (7)$$

同时可见噪声项 ψ_{ji} 的方差减小为 σ^2 / N ，从而提高了信噪比(SNR)。根据上述内容可知，基于循环正交序列信道估计的均方误差将随着训练序列长度 N 的增加而减小，因此可以通过增加训练序列的长度来更好地消除噪声对它的影响，从而提高信道估计的精度。

3.2 基于连续重复循环正交短序列的时域信道估计

虽然由上述理论分析可知，增加训练序列的长度能获得更好的信道估计 MSE 性能，然而在实际系统中增加 N 将会对硬件提出更高的要求。在不影响性能的前提下，进一步设计一种新的循环正交“短”序列，它将原有的长度为 N 的训练序列替换成为 M 个连续重复但总长度相同的短训练序列。每个发射天线上选取 N/M 长的本地序列并连续重复 M 次，在第一个序列的前面和第 M 个序列的后面分别加上循环前缀与循环后缀，构成循环正交短序列组。令天线间所有信道的最大长度为 L ，循环前缀与循环后缀的长度均为 $P (P \geq L)$ ，各组循环移位为 $\varepsilon (\varepsilon \geq P)$ 。为了不破坏序列之间的循环正交性而导致信道估计的性能损失，则本地序列长度必须满足的条件为 $N \geq MN_t \varepsilon$ 。

以 $M=2$ 为例，设计如图 2 所示的循环正交短训练序列。首先选取长度为 $N/2$ 的 Chu 序列 $z(n)$ 作为基准序列，令第 i 根发射天线上的本地序列为 $\bar{z}_i(n) = z((n+(i-1)\varepsilon)_{\text{mod} N/2})$ ，将连续重复 $M=2$ 次的本地序列前后分别加上一个长度为 P 的循环前缀和循环后缀，此时总长度为 $(N+2P)$ 的序列构成了第 i 根发射天线上的训练序列，用相同方法构造出其余天线上的训练序列，得到连续重复循环正交短序列。当序列的最小长度满足条件 $N_{\min} \geq MN_t P$ 时，可以构造任意 $M > 2$ 的循环正交短序列组。

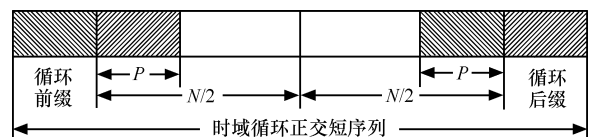


图 2 循环正交短训练序列结构

根据以上设计的训练序列, 本节提出一种基于循环正交短训练序列的信道估计算法。首先在接收端利用长度为 N/M 的本地序列与去掉循环前缀后的接收信号进行 M 组分段相关, 分别得到 M 组信道估计值; 再对 M 组信道估计值进行时域合并后, 即可得到对应天线上的信道估计值。当 $M=2$ 时, 第 i 根发射天线至第 j 根接收天线的信道估计为 $\hat{h}_{ji}(n) (n=0 \sim P-1)$, 如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \hat{h}_{ji}(n) &= \left(\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \bar{z}_i^*(k) y_j(k+n) + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \bar{z}_i^*(k) y_j(k+N/2+n) \right) / 2 \\ &= \frac{2}{N} \left\{ \sum_{k=0}^{N/2-1} \bar{z}_i^*(k) \bar{z}_i(k) \bar{h}_{ji}(n) + \sum_{k=0}^{N/2-1} \sum_{l=0, l \neq n}^{L-1} \bar{z}_i^*(k) \bar{z}_i(k) \left((k+(n-l))_{\text{mod} N/2} \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \bar{h}_{ji}(l) + \sum_{k=0}^{N/2-1} \sum_{q=1, q \neq i}^{N_i} \sum_{l=0}^{L-1} \bar{z}_i^*(k) \bar{z}_q \left((k+(n-l))_{\text{mod} N/2} \right) \bar{h}_{jq}(l) + \zeta_{ji}(n) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中第一项表示需要估计的信道信息, 第二项表示同一天线信道中其余多径对第 n 径信道的影 响, 第三项表示其余天线上的训练序列对第 i 根发射天线的信道估计的影响, 第四项为相关输出的噪声项。与式(4)、式(5)相似, 利用 Chu 序列的周期自相关特性可以得到如下性质:

$$\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \sum_{l=0}^{L-1} \bar{z}_i^*(k) \bar{z}_i \left((k-l)_{\text{mod} N/2} \right) = \begin{cases} 1, & l=0 \\ 0, & l \text{ 为其余值} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \sum_{q=1, q \neq i}^{N_i} \sum_{\lambda=-P+1}^{L-1} \bar{z}_i^*(k) \bar{z}_q \left((k-\lambda)_{\text{mod} N/2} \right) \\ &= \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \sum_{q=1, q \neq i}^{N_i} \sum_{\lambda=-P+1}^{L-1} \bar{z}_i^*(k) \bar{z}_i \left((k-(q-i)\varepsilon - \lambda)_{\text{mod} N/2} \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)与式(10)代入式(8)中, 可以看到式(8)中分别代表其余多径干扰和其余天线干扰的第二项和第三项均为零。可见序列的循环正交性不仅能够消除天线间的干扰, 而且能够保证多径信道的可辨识性。因此时域信道估计可简化为如下形式:

$$\hat{h}_{ji}(n) = \bar{h}_{ji}(n) + \zeta_{ji}(n) \quad (11)$$

$$\zeta_{ji}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \bar{z}_i^*(k) \left((\omega_j(k+n) + \omega_j(k+N/2+n)) \right) \quad (12)$$

则归一化后的基于循环正交短序列的信道估计 MSE 为

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{1}{N_r N_t P} \sum_{n=0}^{P-1} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \mathbb{E} \left\{ \left| \bar{h}(n)_{ji} - \hat{h}(n)_{ji} \right|^2 \right\} \\ &= \frac{1}{N_r N_t P} \sum_{n=0}^{P-1} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} \mathbb{E} \left\{ \left| \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} \bar{z}_i^*(k) \left((\omega_j(k+n) + \omega_j(k+N/2+n)) \right) \right|^2 \right\} \\ &= \frac{\sigma^2}{N} \end{aligned} \quad (13)$$

3.3 循环正交短序列的优点分析

对比式(7)与式(13)可见, 当 N 相同时, 采用 2 种训练序列的信道估计 MSE 相同, 因此利用循环正交短序列可以达到与同等长度的循环正交长序列相同的信道估计性能。不仅如此, 较之长序列, 循环正交短序列还具有以下的优势。

1) 由于采用了连续放置相同序列的方式来构造循环正交短序列, 每一个序列的后 P 个符号组成下一个序列的循环前缀, 而其前 P 个符号构成前一个序列的循环后缀。因此无论 M 取何值, 所有短序列只需要添加第一个循环前缀和最后一个循环后缀, 无需占用额外的频谱资源。

2) 正交循环短序列算法中需要的相关器长度为 $N/2$, 因此在实际硬件系统中利用 FIR 滤波器来实现信道估计中的相关运算时, 可以将相关器处理时间减少为原处理时间的一半。

3) 由于其重复放置的特性和良好的自相关特性, 短训练序列还可以用于时间同步和频偏估计算法中, 因此在不进行任何改动的前提下, 无需另外设计训练序列来完成时频同步。

在实际应用中, 需要根据信道条件与系统要求, 选择合适的参数 N 与 M 来设计连续重复循环正交短序列, 以实现高精度的时域信道估计。

4 实验仿真与分析

构建一个 N_t 与 N_r 均等于 3 的 MIMO 系统进行仿真实验验证。假设信号经过具有 20 径的 Rayleigh 衰落 MIMO 信道, 信道在一帧内保持不变, 帧与帧之间信道互不相关。对信道估计算法中的循环正交长训练序列参数进行设置时, 令循环正交长训练序列长度为 $N=1024$, 循环前缀与循环后缀长度 $P=64$, 序列间的循环移位 $\varepsilon_1=200$; 对循环正交短训练序列参数进行设置时, 取 $M=2$, 将循环正交短训练序列长度设置成为 $N/2=512$, 循环前缀与循环后缀长度

$P=64$, 序列间的循环移位 $\epsilon_2=100$ 。此时训练序列的长度满足 $N \geq N_t \epsilon_1$ 和 $N \geq MN_t \epsilon_2$ 这 2 个条件, 因此可以保证训练序列的循环正交性。

该系统设计中还包括发射端的调制与编码、接收端的信道估计、空时译码与解调等实际中常见的模块。在假设理想同步和频偏校正的条件下, 在接收端对各自对应天线上的信道进行估计后再利用得到的信道信息进行空时译码, 并统计其误比特率性能。令信号调制方式为 QPSK, 发射端对数据信息采用卷积编码、RS 编码和交织完成纠错编码, 在接收端将经过相对应的解交织、RS 译码和 Viterbi 译码完成数据信息的纠错译码。在发射端进行空时编码时, 数据信息首先在时域进行分块后再进行编码^[10], 以便接收端进行 FFT 之后在对应子载波上形成空时码。

该 3 发 3 收系统中各种信道估计算法的 MSE 性能如图 3 所示, 比较对象包括本文提出的基于循环正交长训练序列和循环正交短训练序列(以 $M=2$ 为例)的时域信道估计算法, 以及基于时域正交前导^[4]和基于 STBC 编码训练序列^[5]的频域信道估计算法。由图 3 可以看出, 基于循环正交长训练序列和基于循环正交短训练序列的信道估计算法具有相同的 MSE 性能, 证明了在满足序列长度条件下, 采用总长度相同的多个短序列和单个长训练序列可以获得同样的估计性能, 并且这 2 种时域信道估计算法具有明显较低的 MSE。

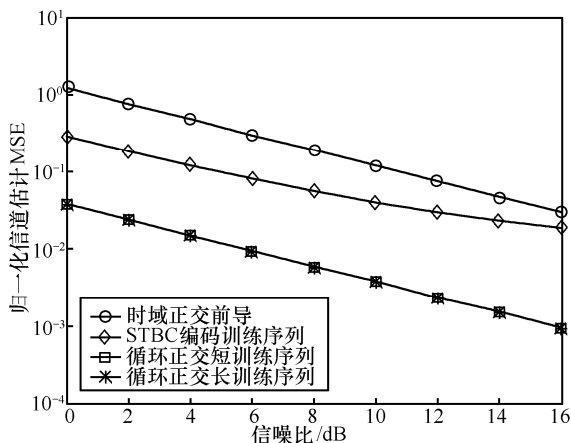


图 3 3 发 3 收 SC-FDE 系统中各信道估计算法的均方差性能比较

图 4 比较了各信道估计算法下 MIMO SC-FDE 系统的误比特率 (BER) 性能曲线, 同时给出了完全理想的信道状态信息(CSI)下的 BER 性能曲线。从图 4 中可看出: 1)系统无论是使用循环正交长序

列还是循环正交短序列, 均取得了非常接近理想 CSI 条件下的性能, 即使在低 SNR 条件下也能获得较低的 BER, 进一步验证了本文提出的信道估计算法的有效性; 2) 2 种循环正交序列的性能也几乎相同, 证明了使用短正交序列的信道估计算法不会造成性能损失; 3)在误比特率为 10^{-4} 时, 相对于本文提出的循环正交序列的信道估计法, 基于时域正交前导和 STBC 编码训练序列的信道估计算法分别有接近 4dB 和 2dB 的 SNR 增益损失。

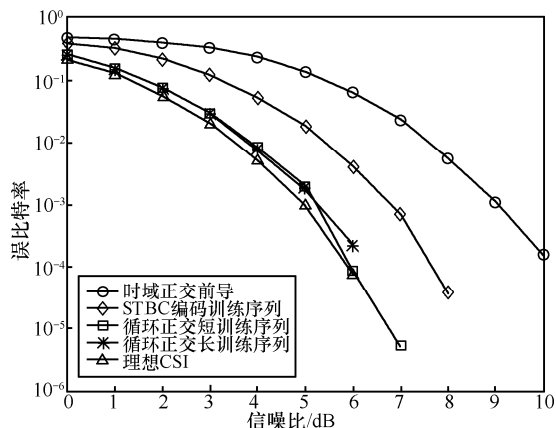


图 4 3 发 3 收 SC-FDE 系统的误比特率性能比较

5 结束语

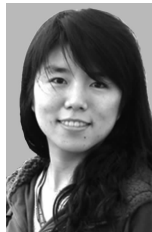
针对 MIMO SC-FDE 系统的时域信道估计, 本文设计了 2 种循环正交训练序列。前者利用互相正交的训练序列以消除天线间的干扰, 并加入循环前缀与循环后缀使其适用于多径信道环境; 后者在不影响性能的前提下将前者拆分成为多个连续重复但总长度相同的短训练序列。仿真结果表明相比传统的频域估计算法, 基于这 2 种序列的时域信道估计算法对于噪声均有明显的抑制作用, 从而提高了信道估计的准确度和整个系统的 BER 性能。特别是循环正交短序列算法, 不仅具有与相应的长序列法相同的信道估计 MSE 性能, 而且减小了相关器长度与实际系统的硬件处理时间。值得注意的是, 连续重复的循环正交短序列由于其周期性的特点, 不仅适用于信道估计, 还可推广至时间同步和频偏估计中, 这正是下一阶段的研究重点。

参考文献:

[1] MING J, HANZO L. Multiuser MIMO-OFDM for next-generation wireless systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(7): 1430-1469.

- [2] FALCONER D, ARIYAVISTAKUL S L, BENYAMIN-SEEYAR A, *et al.* Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(4): 58-66.
- [3] COON J, SIEW J, BEACH M, *et al.* A comparison of MIMO-OFDM and MIMO-SCFDE in WLAN environments[A]. GLOBECOM '03[C]. 2003. 3296-3301.
- [4] VAN Z A, SCHENK T C W. Implementation of a MIMO OFDM based wireless LAN system[J]. IEEE Trans Signal Process, 2002, 52(2): 483-494.
- [5] KYUNG S A, HEUNG K B. Training-based channel estimation and equalization for space-time block-coded systems over frequency-selective fading channels[A]. IEEE VTC'04-Fall[C]. Los Angeles, USA, 2004. 1748-1752.
- [6] REN S, GUO J, XIANG H. A PN-based channel estimation algorithm in MIMO-single carrier frequency-domain equalization system[A]. IEEE WiCom 2007[C]. Shanghai, China, 2007. 495-499.
- [7] CHU D. Polyphase codes with good periodic correlation properties[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1972, 18(4):531-532.
- [8] BARTSCH E K, WASSELL I J. Multiuser cross-correlation channel estimation for SDMA/TDMA systems[A]. The 35th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. Pacific Grove, USA, 2001. 1753-1757.
- [9] JIA M, GU X M, IM S B. Improved channel estimation method based on time-domain[A]. Processings for OFDM Systems IEEE WiCom 2007[C]. Shanghai, China, 2007. 13-16.
- [10] AL-DHAHIR N. Single-carrier frequency-domain equalization for space time block-coded transmissions over frequency-selective fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(7): 304-306.

作者简介:



李丹萍 (1981-), 女, 安徽广德人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为宽带无线通信中的信道估计与信号检测。



刘毅 (1978-), 男, 黑龙江集贤人, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为空时自适应信号处理、无线通信的时频同步技术等。



张海林 (1963-), 男, 陕西岐山人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信。

.....
(上接第 143 页)

- [8] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block coding for wireless communications: performance results[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(3): 451-460.
- [9] JAFARKHANI H. Space-time Coding Theory and Practice[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.79-108.



沈琼 (1986-), 女, 宁夏石嘴山人, 天津大学硕士生, 主要研究方向为移动通信中的空时分组编码。

作者简介:



王安国 (1958-), 男, 山西运城人, 天津大学教授, 主要研究方向为通信系统理论、天线理论与设计、射频电路分析与设计。



聂仲尔 (1986-), 男, 湖北通城人, 天津大学硕士生, 主要研究方向为空时编码。