

基于完备互补正交序列的多天线多载波系统导频设计方法

曾立旋 刘栋 李道本

(北京邮电大学信息工程学院 100876)

摘要: 介绍了一种新的基于完备互补正交序列的多天线多载波系统导频设计方法, 新的导频结构能够有效地消除传统多天线系统导频序列的干扰, 有效地提高多天线系统信道估计的准确度。具体分析了导频设计原理及其相关性能, 在多天线多载波系统下的信道估计仿真结果表明, 在低车速时能达到接近理想信道估计的性能, 在中高车速时和理想信道估计性能也只相差 1~2dB。

关键词: 互补序列; 导频; 多载波; 多天线

A Pilot Design Method Based on Complete Complementary Orthogonal Code in the Multi-antenna and Multi-carrier System

Zeng Lixuan Liu Dong Li Daoben

(Beijing University of Posts and Telecommunications, School of Information and Engineering, 100876)

Abstract: This paper introduced a new method of pilot design using in the Multi-antenna and Multi-carrier system, which is based on Complete Complementary Orthogonal Code. The new pilot structure can eliminate the traditional pilot sequence interference efficiently, and improve the accuracy of the channel estimation greatly in the Multi-antenna system. It was analyzed the pilot design principle and correlation, and the Multi-antenna and Multi-carrier system simulation results showed that the performance is almost the same with the ideal channel estimation at lower velocity. When at higher velocity, it just became worse 1~2dB than ideal channel estimation.

Keywords: Complementary Sequence \ Pilot \ Multi-Carrier \ Multi-Antenna

1 引言

完备互补正交的定义是指两个同类运算叠加(即互相补充)后的结果满足某种正交性。则完备互补正交码的自相关函数与互相关函数在互补的意义上是完全理想的。对于码 $\tilde{b}_k = C_k [+] S_k, k = 0, 1$, 若其自相关函数与互相关函数在互补的意义上是完全理想的,(其中, C 和 S 两分量码是分别进行运算的。) 则称码 \tilde{b}_k 是完备互补正交对偶码^[2]。

基于导频序列辅助的信道估计方法是实际系统中常采用的信道估计方法。对于多天线多载波系统, 常用的导频序列主要基于频分, 时分和码分。其中时分和频分可以采用相同的导频序列, 但由于需要保证不同天线间的导频不能有干扰, 因此会占用较多的系统资源, 降低频谱效率。码分的方法是通过在不同的天线上使用不同的正交码字来区分天线, 传统的码字通常不能同时满足自相关和互相关完全理想, 因此做多天线系统信道估计时会由于导频序列之间的干扰带来一定的性能损失^[3]。

本文主要介绍了基于完备互补正交序列的多天线多载波系统中的导频序列设计方法, 新的方法能够有效地消除多天线多载波分析了导频设计原理及其相关性能, 并给出了多天线多载波系统下的信道估计仿真性能。

2 基于完备互补正交序列的导频设计

本文导频序列选取的是完美的 20 位的 DBL-LS 码。它并不需要在中频而可以在基带作相关检测。针对不同空间信道的各个导频所得到的信道信息应统一处理，以便经过内插得到全部时间，全部频率的不同空间信道特性。

在四发两收的多天线方案中，我们选取的是两组完备广义互补正交码组，其自相关函数与互相关函数在广义互补的意义上是完全理想的。

上一节提到的完备互补正交对偶码 $\tilde{\mathbf{b}}_k$ 是 $K = 2$ 的情况，而对于不同长度 $K > 2$ 重的完备广义正交互补码组也可以从完备正交互补码对偶生成。

例如： $\{C_k, S_k\}, k = 0, 1$ 是一个完备正交互补码对偶 ($K = 2$)，即 $\mathbf{B}_2 \triangleq \begin{bmatrix} C_0 & S_0 \\ C_1 & S_1 \end{bmatrix}$ ，则 $K = 4$ 重的完备广义正交互补码组则由以下方式产生： $\mathbf{B}_4 = \mathbf{B}_2 \otimes \begin{bmatrix} + & + \\ + & - \end{bmatrix}$ ，以此类推可以生成更高重的完备广义正交互补码组^[2]。

则选取的两组 20 位的 DBL-LS 码结构为：

表 1 20 位 DBL-LS 码

C_1	+---+---++---++++++-
S_1	+-----++-+----++--+
C_2	+---+---++-+----++-
S_2	+-----++-+----++--+

各天线的导频序列结构如图 1 所示。

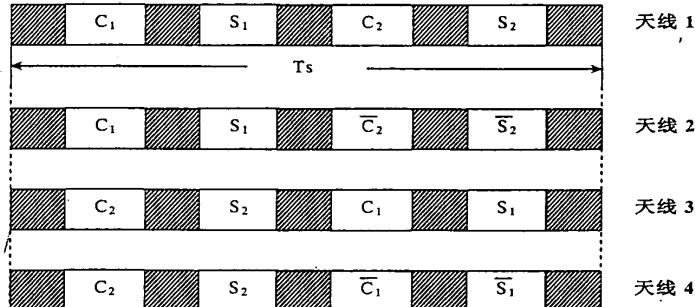


图 1 各天线上的导频结构

各天线上的导频序列的相关性是分别计算 C 部和 S 部的自相关和互相关，然后叠加得到的，各天线上的码字之间的相关函数（归一化后）如图 2。

其中， a_{11}, \dots, a_{44} 表示的是天线 1~4 之间的自相关和互相关特性。

从图 2 中可以看到，各天线上的导频序列间自相关性和互相关性完全理想。这种导频序列的设计方法避免了以往在多天线系统信道估计中的导频序列之间的干扰，提高了系统的性能。

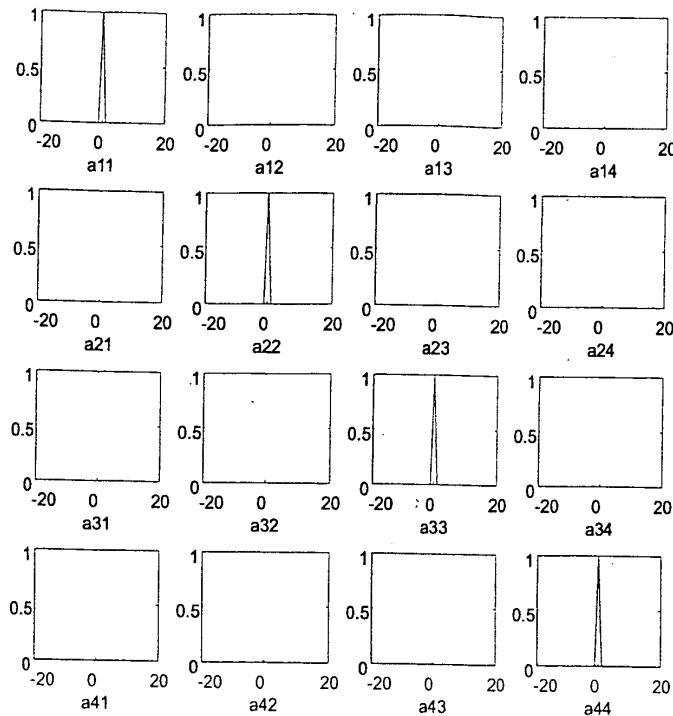


图 2 导频序列的相关性

3 信道估计方法

在此多天线多载波系统中，我们采用的是基于时域导频序列辅助的信道估计方法。图 3 给出了具体的信道估计方法，由于每个接收天线采用的信道估计算法相同，则以其中一个天线为例说明。在数据符号经过 IFFT 变换后的时域信号中周期性的插入导频序列，利用码字完美相关特性，准确的估计出时域的多径信道冲击响应，做 FFT 变换后即可得到导频时刻频域的复频率响应。然后利用相邻导频的复频域相应通过内插的方法得到数据部分的信道复频率响应。



图 3 时域内插值估计

图 4 给出了具体的帧结构。

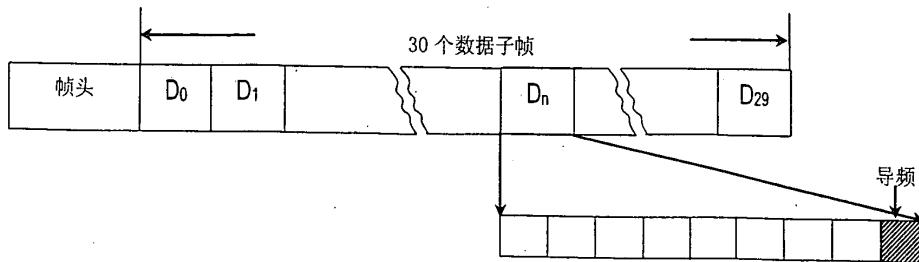


图 4 系统帧结构

对于各个导频位置的信道值计算，采用的是最小二乘法（LS）估计。

$$\tilde{\mathbf{H}} = \left[\tilde{H}_0 \tilde{H}_1 \dots \tilde{H}_{M-1} \right]^T = \begin{bmatrix} Y_0 & Y_1 & \dots & Y_{M-1} \\ X_0 & X_1 & \dots & X_{M-1} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中， M 表示一帧内导频的个数。在计算数据位置的信道值时选用插值信道估计方法。其优点有计算复杂度低，稳定度高，计算时延小，性能良好等。仿真中采用了二次插值的方法。

$$\tilde{H}(l) = \frac{\Delta \tilde{H}_k - \Delta \tilde{H}_{k-1}}{2L} \cdot l^2 + \frac{\Delta \tilde{H}_k + \Delta \tilde{H}_{k-1}}{2} \cdot l + \tilde{H}_k \quad (2)$$

其中， $\Delta \tilde{H}_k = \frac{\tilde{H}_{k+1} - \tilde{H}_k}{L}$ ， $\tilde{H}(0) = \tilde{H}_k$, $\tilde{H}(-L) = \tilde{H}_{k-1}$, $\tilde{H}(L) = \tilde{H}_{k+1}$ ， L 表示的是导频间隔。

4 仿真结果及分析

仿真验证了本文设计的导频序列在多径衰落信道的性能，信道模型采用 ITU-VA 模型^[4]。噪声为均值为 0，方差为 δ^2 的高斯白噪声。仿真系统采用加编码的多载波多天线系统。作为参照，也仿真了理想信道估计的系统性能。仿真参数列于表 2。

表 2 多载波参数

载波频率	2.0GHz	系统带宽 B	5MHz
子载波间隔	30KHz	FFT 点数	512
数据子载波数	151	窗函数	矩形窗
多天线	4 发 2 收	用户数	1
车速	3km/h; 120km/h; 250km/h		

图 5 给出了不同车速下的仿真结果，从图中可以看出，在低车速（3km/h）的情况下，采用新的导频序列和二次插值信道估计方法的系统性能已经非常接近理想信道估计的性能，在信噪比 13dB 以后，几乎重合；在中车速（120km/h），误比特率为 1.00E-03 时，实际信道估计比理想信道估计下的系统差 1dB 左右；在高车速（250km/h），误比特率为 1.00E-03 时，实际信道估计比理想信道估计下的系统也仅差 2dB 左右。

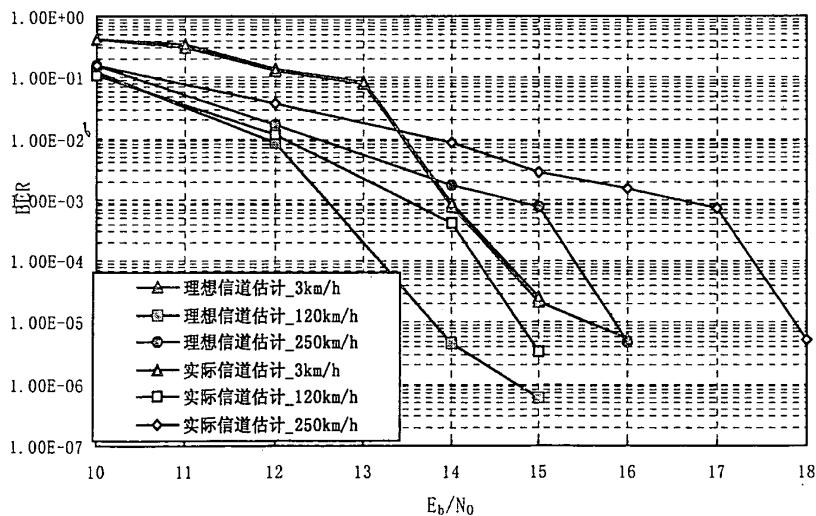


图 5 多天线多载波系统实际信道估计和理想信道估计下系统性能比较

5 结论

本文利用完备互补正交码设计了一种适用于多天线多载波系统的导频结构和信道估计方法。该导频设计可以完全消除天线之间的干扰，以及多径衰落信道造成的符号间干扰。仿真结果表明，新的导频序列结合简单的二次插值的信道估计方法的系统性能在低车速时达到接近理想信道估计的性能，在中高车速时，和理想信道估计系统性能比也只差 1-2dB。

参考文献

- [1] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004
- [2] ITU-R M.1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, 1998
- [3] D. Li, The perspectives of large area synchronous CDMA technology for the fourth-generation mobile radio, IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 3, pp. 114–118, 2003
- [4] D. Li, A high spectral efficient multiple access code, Chinese Journal of Electronics, vol. 8, no. 7, pp. 221-226, 1999
- [5] Qinfang Sun, Effect of channel estimation error on MIMO systems and CDMA systems with multiuser detection, 2001
- [6] 李道本, 一种分组时间、空间、频率多址编码方法, 国际专利申请号: PCT/CN2006/000947

作者简介

曾立旋, 女, 1984 年生, 江西吉安人, 北京邮电大学信息处理与智能技术重点实验室, 硕士, 主要研究方向为未来移动通信。

刘栋, 男, 1980 年生, 山西太原人, 北京邮电大学信息处理与智能技术重点实验室, 博士, 主要研究方向为未来移动通信。

李道本, 男, 1939 年生, 河南邓州人, 北京邮电大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为未来移动通信。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>