

一种改进的多天线 OFDM 系统及其性能分析

佟学俭，纪红，乐光新

(北京邮电大学电信工程学院，北京 100876)

摘要：提出一种改进的 OFDM 系统，把 N 点 FFT 分为 n 组，同时把空间分集应用于该系统中，利用正交设计理论安排发送数据符号，在接收端采用适当的合并方式最大限度地获得信号功率。通过分析及仿真计算可以看到，多天线分集可以显著地改善 OFDM 系统的性能。

关键词：频分复用；分集技术；快速傅里叶变换

中图分类号：TN914.3 文献标识码：A

正交频分复用(OFDM)^[1]在无线高速信息传输中已经受到了广泛的关注。空间分集技术是提高无线通信中通信质量的一种行之有效的方法^[2]。本文将天线空间分集应用于 OFDM 系统中，提出一种改进的多天线 OFDM 系统方案，从而提高系统在衰落信道中的传输性能。

1 改进的 OFDM 系统模型

图 1 给出改进 OFDM 系统发射机模型，其中 N 个数据符号 $a_m(m=0,1,\cdots,N-1)$ 经过交织。分为 n 组，每一组内的数据符号分别去调制 N/n 个对应序号的正交子载波。OFDM 符号长度仍然保持 $T=NT_0$ ，其中 T_0 为原始数据符号周期。

图 1 中第 $l(l=0,1,2,\cdots,n-1)$ 组数据正交调制的输出为

$$\begin{aligned} \tilde{y}_l(t) &= \sum_{i=0}^{N/n-1} a_{in+l} \exp(j2\pi f_{in+l}t) = \\ &\exp(j2\pi f_0t) \exp\left(\frac{j2\pi lt}{T}\right) \sum_{i=0}^{N/n-1} a_{in+l} \exp\left(\frac{j2\pi nti}{T}\right) \end{aligned} \tag{1}$$

其中， $f_{in+l}-f_0=(in+l)/T$ 。

$y_l(t)$ 表示 $\tilde{y}_l(t)$ 的复等效基带信号，并且对式(1)中的求和项抽样，取 $t=kT_0, k=0,1,\cdots,N/n-1$ ，可以看出，求和项是 N/n 点 IDFT 运算，因此

$$y_l(t) = W_l(t) \text{IDFT}_{N/n}[a_{in+l}]$$

其中， $W_l(t)=\exp(j2\pi lt/T)$ ，并且满足正交性。

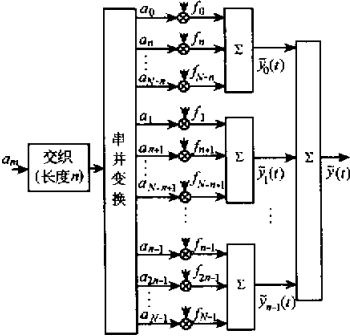


图 1 改进的 OFDM 系统的调制方案

$\tilde{y}(t) = \sum_{l=0}^{n-1} \tilde{y}_l(t)$ 的等效基带信号：

$$y(t) = \sum_{l=0}^{n-1} y_l(t) = \sum_{l=0}^{n-1} W_l(t) \text{IDFT}_{N/n}[a_{in+l}]$$

经过无线衰落信道后得到的接收信号 $r(t)$ 为

$$r(t) = h y(t - \tau) + z(t) = \sum_{l=0}^{n-1} h_l W_l(t - \tau) \text{IDFT}_{N/n}[a_{in+l}] + z(t) \quad (2)$$

假设每一组数据经过单一路径模型, 其中 τ 为时延; h_l 为第 l 组数据符号所经历的复衰落系数; $z(t)$ 为无线信道引入的加性白高斯噪声(AWGN)。

在接收端可以按照上述方法进行逆操作, 恢复出原始数据符号：

$$\hat{a}_{in+m} = T h_m \exp(-j2\pi m\tau/T) a_{in+m} + Z'(i) \quad (3)$$

其中, $Z'(i) = \text{DFT}_{N/n} \left[\int_0^T r(t) W_m^*(t) dt \right], i=0, 1, \dots, N/n-1, m=0, 1, \dots, n-1$ 。

2 多天线 OFDM 系统模型及其性能分析

在改进 OFDM 系统内可以通过多天线获得最佳的接收效果. 图 2 给出采用 n 副发送天线与 m 副接收天线的多天线 OFDM 模型. 其中, $M_l(l=0, 1, \dots, n-1)$ 操作包括 N/n 点的 IDFT 运算、与 $W_l(k)$ 相乘及并/串变换. 而 $D_l(l=0, 1, \dots, n-1)$ 操作是 M_l 的逆操作, 包括串/并变换、与 $W_l^*(k)$ 相乘以及 N/n 点的 DFT 运算。

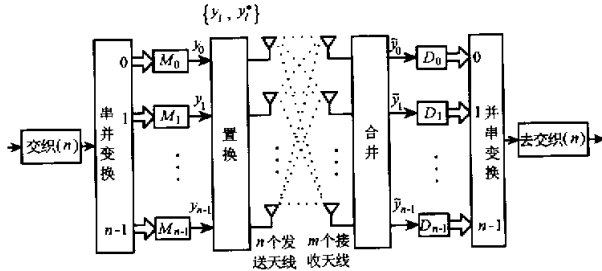


图 2 多天线 OFDM 模型框图

2.1 根据正交设计理论发送数据

在发送端的 n 副天线上发送的数据符号是由一个 $p \times n$ 的正交发送矩阵 $G_n^{[3]}$ 定义的, 其中, n 代表发送天线个数, p 代表发送完这一组数据所需要的时隙个数. 正交设计矩阵的列与列之间是两两正交的, 这样可以保证在接收端获得最大的分集增益^[3]。

根据图 2, 在第 $k(k=0, 1, \dots, N/n-1)$ 个抽样时刻, $M_l(l=0, 1, \dots, n-1)$ 的输出分别为 $y_0(k), \dots, y_{n-1}(k)$, 简称为 y_0, y_1, \dots, y_{n-1} , 并且满足：

$$y_l = y_l(k) = W_l(k) \text{IDFT}_{N/n}[a_{in+l}], \quad l=0, 1, \dots, n-1, \quad i=0, 1, \dots, N/n-1 \quad (4)$$

然后将这 n 个值送入置换装置内, 代入正交设计矩阵 G_n . 这样就得到了在第 k 个抽样时刻的 p 个时隙内要发送的 $p \times n$ 个数据符号, 由此完成发送端的正交设计. 令 c_l^t 表示第 l 个发送天线的第 t 个时隙中要发送的数据符号, 即对应正交发送矩阵中第 t 行第 l 列的元素, r_j^t 表示第 j

个接收天线的第 t 个时隙中接收到的数据符号,有 $r_j^t = \sum_{l=0}^{n-1} \alpha_{l,j} c_l^t + \eta_j^t$, 其中, $l = 0, 1, \dots, n-1$, $j = 0, 1, \dots, m-1$, $t = 1, 2, \dots, p$, $\alpha_{l,j}$ 表示从第 l 个发送天线到第 j 接收天线所经历的复衰落系数,假设无线信道是准静态平衰落的,即在 p 个时隙内保持不变. 该衰落系数是零均值的独立复高斯随机变量,每维方差是 0.5. η_j^t 是第 j 个接收天线在第 t 个时隙内接收到的复加性白高斯噪声,其均值为零,每维方差是 $N_0/2$.

2.2 接收模型与译码方法

下面以 $n=m=2$ 为例说明多天线 OFDM 模型的合并方法,根据 $G_2 = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 \\ -S_1^* & S_0^* \end{bmatrix}$, 即 $c_0^1 = y_0, c_1^1 = y_1, c_0^2 = -y_1^*, c_1^2 = y_0^*$, 可得第 j 个接收天线在第 t 个时隙所接收到的信号 r_j^t 为

$$\begin{cases} r_0^1 = \alpha_{0,0}y_0 + \alpha_{1,0}y_1 + \eta_0^1 & r_0^2 = \alpha_{0,0}(-y_1^*) + \alpha_{1,0}y_0^* + \eta_0^2 \\ r_1^1 = \alpha_{0,1}y_0 + \alpha_{1,1}y_1 + \eta_1^1 & r_1^2 = \alpha_{0,1}(-y_1^*) + \alpha_{1,1}y_0^* + \eta_1^2 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)选择合并方案为

$$\begin{aligned} \tilde{y}_0 &= \alpha_{0,0}^* r_0^1 + \alpha_{1,0} (r_0^2)^* + \alpha_{0,1}^* r_1^1 + \alpha_{1,1} (r_1^2)^* = \\ &(|\alpha_{0,0}|^2 + |\alpha_{0,1}|^2 + |\alpha_{1,0}|^2 + |\alpha_{1,1}|^2)y_0 + \alpha_{0,0}^* \eta_0^1 + \alpha_{1,0} (\eta_0^2)^* + \alpha_{0,1}^* \eta_1^1 + \alpha_{1,1} (\eta_1^2)^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= \alpha_{1,0}^* r_0^1 + \alpha_{0,0} (r_0^2)^* + \alpha_{1,1}^* r_1^1 + \alpha_{0,1} (r_1^2)^* = \\ &(|\alpha_{0,0}|^2 + |\alpha_{0,1}|^2 + |\alpha_{1,0}|^2 + |\alpha_{1,1}|^2)y_1 + \alpha_{1,0}^* \eta_0^1 - \alpha_{0,0} (\eta_0^2)^* + \alpha_{1,1}^* \eta_1^1 - \alpha_{0,1} (\eta_1^2)^* \end{aligned}$$

上式说明接收端通过采用适当的组合方式可有效地分离多个发送数据符号,推广得到^[3]

$$\tilde{y}_l = \left(\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |\alpha_{l,j}|^2 \right) y_l + I_l \quad (6)$$

其中, I_l 是所有接收天线在不同时隙内收到的加性白噪声 η_j^t 及其复共轭 $(\eta_j^t)^*$ 的线性组合,它

是零均值,每维方差为 $\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |\alpha_{l,j}|^2 N_0/2$ 的复高斯随机变量. 接收端经过 D_l 操作可以得到

$$\hat{a}_{in+l} = \text{DFT}_{N/n}[W_l^*(k) \tilde{y}_l] = \left(\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |\alpha_{l,j}|^2 \right) a_{in+l} + I_{\text{dft},l} \quad (7)$$

其中, $I_{\text{dft},l} = \text{DFT}_{N/n}[I_l W_l^*(k)]$.

在接收端可以采用极大似然判决,即令 $\left| \hat{a}_{in+l} - \left(\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |\alpha_{l,j}|^2 \right) a_{in+l} \right|^2 \rightarrow \min$, 则可以准确地恢复出原始发送信号 a_{in+l} .

2.3 系统的信噪比性能

假设发送的平均信号功率已经被归一化, \hat{a}_{in+l} 的功率可以表示为 $\left[\sum_{l=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |\alpha_{l,j}|^2 \right]^2$. 如果在多天线 OFDM 模型中采用 1 副发送天线与 mn 副接收天线,同时采用最大比合并的方式组合接收信号,则接收信号可以表示为 $\hat{s} = \sum_{j=0}^{mn-1} |\alpha_j|^2 s + I'$. 其中, α_j 表示第 j 个接收天线所经历的复衰落系数,其是零均值、方差为 1 的瑞利分布随机变量,这样可以得到信号的功率为 $\left[\sum_{j=0}^{mn-1} |\alpha_j|^2 \right]^2$, 噪声每维的方差是 $\left[\sum_{j=0}^{mn-1} |\alpha_j|^2 \right] N_0/2$.

由于 $\alpha_{l,j}$ 与 α_j 是独立同分布的随机变量,因此可以看到,采用 n 副发送天线与 m 副接收天

线在接收端所获得的信噪比与直接采用 mn 副接收天线得到的信噪比是等效的。

3 仿真与数值结果

图 3 给出多天线 OFDM 与常规 OFDM 系统的 BER 性能曲线图。曲线 1、2 和 3 分别为常规 OFDM 系统、采用 2 发与 1 收、采用 2 发与 2 收的 OFDM 系统的性能曲线，参数如下：bpsk 调制， $N = 1024$ ，衰落系数为零均值，方差为 1 的瑞利分布随机变量。从图中可以看到，多天线系统优于常规系统，这非常适用于无线通信下行链路，可以使移动终端在不增加成本与体积的情况下获得分集增益。曲线 4 与 5 是在 2 发和 2 收系统中，数据符号 a_m 分别采用 4 psk 和 8 psk 调制的性能曲线。可以看到，4 psk 调制的多天线系统性能要优于 bpsk 调制的常规系统性能，同时系统的信息传输速率还可以提高。在大信噪比条件下，8 psk 的多天线系统性能也优于 bpsk 的常规系统的性能。

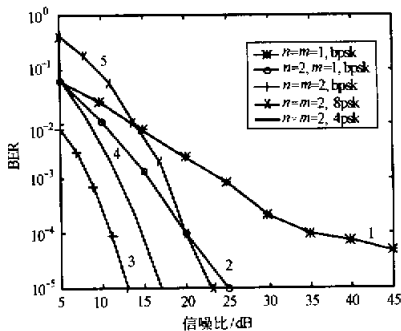


图 3 多天线 OFDM 模型误码率信噪比曲线图

参考文献：

- [1] Burr A G. Performance analysis of COFDM for broadband transmission on a fading multipath channel [J]. Wireless Personal Communication, 1998(10):3-17.
- [2] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1998, 16(8):1 451-1 458.
- [3] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block coding for wireless communications: performance results[J]. IEEE JSAC, 1999, 17(3):451-460.

Antenna Diversity for an Improved OFDM System

TONG Xue-jian, JI Hong, YUE Guang-xin

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

Abstract: An improved OFDM system is proposed: N -points-FFT is divided into n groups. The symbol is arranged according to orthogonal design theory at transmitter, and the multi-antenna can achieve the maximum signal power by appropriate combination method at receiver. The performance is improved greatly by analysis and numerical simulation.

Key words: FDM; diversity; FFT

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,一直致力和专注于微波、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>