

实现不等错误保护的最小发射功率 AM-OFDM 系统

张艳玲, 孙献璞, 李建东

(西安电子科技大学综合业务网理论和关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了在 OFDM 系统中实现数据不等错误保护传输的最小发射功率自适应调制算法. 利用 OFDM 系统各个子载波功率增益不相同的特点, 将子载波分组, 不同的子载波组满足不同的传输质量和传输速率要求, 传输不同重要性的数据, 并且通过自适应调制调整每个子载波的发射功率和调制阶数, 在实现数据不等错误保护传输的同时使得系统消耗的总发射功率最小. 仿真结果表明, 该算法能够根据输入数据的 QoS 要求, 为不同重要性的数据提供不同的传输质量, 并在保证传输质量和速率要求的前提下, 使系统的总发射功率最小.

关键词: 正交频分复用; 自适应调制; 不等错误保护; 最小发射功率

中图分类号: TN911.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 07-1314-05

A Minimum Transmission Power AM-OFDM System to Realize Unequal Error Protection

ZHANG Yarr ling, SUN Xiarr pu, LI Jiarr dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: This paper proposes a minimum transmission power adaptive modulation algorithm to realize unequal error protection for data transmission in OFDM system. The power gains of sub carriers in OFDM system are different, which is utilized to classify the sub carriers into groups. Different group provides different transmission rate and transmission quality, thus different group transmits different kind of data. In addition, the modulation order and transmission power of each sub carrier is adjusted by an adaptive modulation algorithm, so that the unequal error protection for data transmission is realized with minimal total transmission power. The simulation results indicate that the MTP AM-OFDM algorithm presented in this paper can provide different transmission quality for different kinds of data according to the QoS requirements of each data, as well as minimize the total transmission power.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); adaptive modulation (AM); unequal error protection (UEP); minimum transmission power (MTP)

1 引言

实现实时的多媒体移动通信是未来通信的主要目标之一, 其面临的一大问题是无线信道的误码率较高, 而多媒体数据对错误很敏感. 为了在无线环境下提高多媒体数据的传输质量, 可以采用不等错误保护 (Unequal Error Protection, UEP) 技术^[1], 给不同重要性的数据提供不同的传输质量.

目前研究无线环境下的不等错误保护技术主要基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 系统. 文献[2]采用基于前向纠错的方法来实现 UEP, 但是在多径环境下, 高优先级的数据依然可能会因深度衰落而具有较高的差错概率. 文献[3, 4]分别

利用训练符号信道估计方法中存在的信道估计误差差异, 导频符号辅助的信道估计方法中存在的泄漏效应, 通过调整视频数据的传输顺序来实现 UEP. 文献[5~8]提出了 OFDM 系统中利用子信道区分实现 UEP 的方案. 文献[9]在空时分组码 OFDM 系统中利用可变发射分集增益实现 UEP. 文献[10]提出了一种基于子载波功率控制的 UEP 实现方案, 所有子载波采用相同的调制阶数, 通过调整功率使得两组子载波具有不同的信噪比. 但是文献[2~9]有一个共同的局限, 即不能有效控制数据传输的差错概率, 只能保证不同等级的数据传输质量不同, 而不能保证每个等级数据的绝对传输质量. 文献[10]通过子载波功率控制保证了不同等级数据的绝对传输质量, 但是调制阶数不可调, 可利用的自由度较少,

收稿日期: 2006-12-12; 修回日期: 2008-03-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No. 60725105); 国家自然科学基金重大项目 (No. 60496316); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2007AA01Z288); 高等学校学科创新引智计划资助 (No. B08038); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室课题

系统消耗的总功率比较大。

自适应调制(Adaptive Modulation, AM)是充分利用信道容量的有效技术之一^[11],在 OFDM 系统中使用自适应调制技术是近年无线通信领域的一个研究重点。目前多数算法以平均频谱效率最大化为目标^[12,13],这种自适应调制方式不以用户需要为目标来优化系统,所以灵活性较差,且不能保证用户或网络层对传输质量和传输速率的要求。而以用户需求为目标的算法又通常不对数据的传输质量加以区分,不能实现不等错误保护^[14]。另外,多用户自适应调制算法都利用了以下条件:同一个子载波,对于不同的用户而言,其功率增益不同^[15]。而这一条件在单用户多速率的系统中并不成立,因此这些算法也不能用于实现不等错误保护。本文利用 OFDM 系统中各个子载波的功率增益不相同的特点,将子载波分组,在保证各个优先级数据的传输质量均满足要求的前提下,自适应地改变每个子载波的调制阶数和发射功率,使得系统的总发射功率最小。该算法能够有效控制各个等级数据的误比特率(Bit Error Rate, BER),实现数据传输的不等错误保护,同时消耗最小的发射功率,适合于工作在能量受限的无线环境中。

2 实现不等错误保护的最小发射功率 AM OFDM 系统模型

图 1 为最小发射功率自适应调制 OFDM 系统的原理图,发送端根据接收端反馈的信道状态信息(或者在时分双工方式下根据信道的互易性获得),按照 MTP AM-OFDM 算法的运算结果将输入的数据流分配到各个子载波上,并进行相应的星座点映射和功率调整。经过离散傅里叶反变换(IFFT)、并/串变换(P/S)、添加循环前缀(CP)后发送,各子载波调制方式作为信令信息也同时发送。接收端首先对接收信号进行 OFDM 解调,去掉 CP、进行并/串变换(S/P)和离散傅里叶变换(FFT),然后根据自适应调制的信令信息,对各个子载波做相应

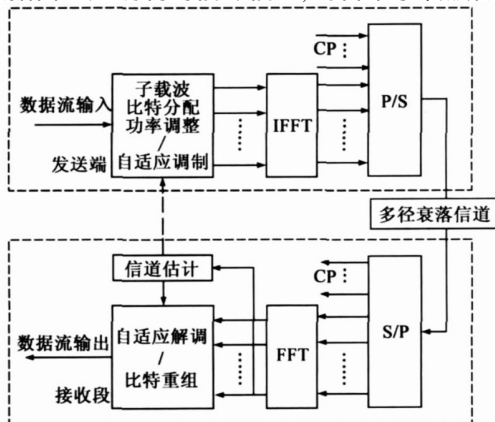


图 1 MTP AM-OFDM 系统原理图

的 QAM 解调,并将各个子载波上的数据比特进行重组,恢复原始的数据流。

由于多径效应的影响,OFDM 系统中不同的子载波具有不同的功率增益,可以利用这个特点实现不等错误保护传输。将子载波自适应分组,不同等级的数据分配给不同的子载波组,同时自适应地调整每个子载波的调制阶数和发射功率,在每个等级数据的误比特率和传输速率均满足要求的前提下,使得系统消耗的总发射功率最小。

假设 OFDM 系统具有理想信道估计,无符号间干扰(ISI)和子载波间干扰(ICI),各个子载波信道可看作是平坦衰落信道。根据输入数据的等级数 M 、每个数据等级的 BER 要求和传输速率要求以及各子载波的功率增益,将 OFDM 系统的 N 个子载波自适应地划分为 M 组,一组子载波传输一个等级的数据,通过对各个子载波进行自适应调制保证每个等级数据的 BER 和传输速率均满足要求,同时使得系统的总功率 P_{total} 最小。设第 i 组子载波包含的子载波数目为 N_i ,第 i 组子载波的目标传输速率和目标误比特率分别为 $B_{tgt,i}$ (bits/sample) 和 $BER_{tgt,i}$,第 i 组子载波中第 j 个子载波上的发射功率、调制阶数、子载波功率增益、加性高斯噪声等效到频域的平均功率、瞬时误比特率分别为 $P_{i,j}$ 、 $C_{i,j}$ 、 $g_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}^2$ 、 $BER_{i,j}$,则在上述定义的基础上,实现不等错误保护的最小发射功率自适应调制 OFDM 系统可以用如下一个非线性约束优化问题来描述:

$$\begin{aligned} \{P_{i,j}, C_{i,j}, N_i\}^{opt} = \arg \min_{P_{i,j}, C_{i,j}, N_i} & \left\{ P_{total} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} P_{i,j} \right\} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^{N_i} C_{i,j} = B_{tgt,i}, i = 1, 2, \dots, M \\ & BER_{i,j} \leq BER_{tgt,i}, i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N_i \\ & \sum_{i=1}^M N_i \leq N \\ & C_{i,j}, N_i \in Z^+, P_{i,j} \in C^+, i = 1, 2, \dots, M; \\ & \quad j = 1, 2, \dots, N_i \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)从数学的角度描述了这种算法的优化策略,在任意时刻,每个子载波组中各个子载波的瞬时误比特率 $BER_{i,j}$ 必须低于目标误比特率 $BER_{tgt,i}$,每个子载波组的实际传输速率 $\sum_{j=1}^{N_i} C_{i,j}$ 必须等于它的目标传输速率 $B_{tgt,i}$,同时满足 P_{total} 最小。其中 $C_{i,j}$ 、 N_i 为非负整数, $P_{i,j}$ 为非负实数。

3 实现不等错误保护(UEP)的最小发射功率自适应调制算法

式(1)给出了实现不等错误保护的最小发射功率自适应调制 OFDM 系统的数学模型,该数学模型的最优解

就是最佳的子载波分组方式, 以及最佳的比特、功率分配算法. 由文献[11]可知, 在一个受到加性高斯白噪声污染的平坦衰落单输入单输出(SISO)信道中使用未编码的方形正交幅度调制(QAM), 可以通过式(2)来估计该信道的误比特率:

$$BER = 0.2 \exp \left[\frac{-1.6SNR}{2^k - 1} \right] \quad (2)$$

式中, SNR 为接收端的信噪比; k 为 QAM 调制的调制阶数.

在 OFDM 系统中, 第 i 组子载波中第 j 个子载波的接收端信噪比可以表示为:

$$SNR_{i,j} = \frac{P_{i,j} \cdot g_{i,j}}{\sigma_{i,j}^2}, \quad i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N_i \quad (3)$$

这样由式(2)、(3)可得第 i 组子载波中第 j 个子载波的发射功率为:

$$P_{i,j} = \frac{(2^{C_{i,j}} - 1) \sigma_{i,j}^2 \ln(5BER_{i,j})}{-1.6g_{i,j}} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 当子载波的误比特率 $BER_{i,j}$ 和调制阶数 $C_{i,j}$ 确定时, 子载波的发射功率 $P_{i,j}$ 便可确定, 因此式(1)的未知量可由三个减少为两个, 式(1)可以写作式(5):

$$\{C_{i,j}, N_i\}^{opt} = \arg \min \left\{ P_{total} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \frac{(2^{C_{i,j}} - 1) \sigma_{i,j}^2 \ln(5BER_{i,j})}{-1.6g_{i,j}} \right\}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{N_i} C_{i,j} = B_{tgt,i}, \quad i = 1, 2, \dots, M \\ & BER_{i,j} \leq BER_{tgt,i}, \quad i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N_i \\ & \sum_{i=1}^M N_i \leq N \\ & C_{i,j}, N_i \in Z^+, \quad i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N_i \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中, 虽然每个子载波的功率增益是已知量, 但是由于子载波分组方式未知, 第 i 组子载波中第 j 个子载波的功率增益 $g_{i,j}$ 仍然是未知量, 同时第 i 组子载波包含的子载波数 N_i 也是一个未知量, 并且每个子载波的调制阶数 $C_{i,j}$ 还有非负整数的约束, 因此无法直接求得式(5)的闭式解, 需要将其合理优化. 首先放宽调制阶数为非负整数的限制, 使得调制阶数可以取任意实数, 这样就式(5)转化成连续可行域上具有约束条件的最优化问题, 然后再将该最优化问题的结果离散化, 使得子载波的调制阶数为非负整数. 另外由式(4)可以看出, 在子载波调制阶数不变的前提下, 要将子载波的误比特率由 $BER_{tgt,1}$ 调整为 $BER_{tgt,2}$ 只需要将发射功率调整为原来的 $\ln(5BER_{tgt,2})/\ln(5BER_{tgt,1})$ 倍即可. 因此为求得使发射功率最小的子载波分组以及比特、功率分配方案, 可以先假定所有数据的误比特率要求均相同, 均等于最低等级数据的误比特率要求, 也即先不对子载

波进行分组, 求得此时使发射功率为最小的比特、功率分配方案, 然后将该取值连续的闭式解离散化. 在此基础上增加某些子载波的发射功率, 在功率增量最小的前提下, 使得子载波的误比特率能够满足不同等级数据的要求, 此时具有相同误比特率的子载波组成一组, 而相应的比特、功率分配方案就是最优解.

假设输入的数据共有 M 个等级, 不同等级数据的误比特率要求满足以下关系: $BER_{tgt,1} > BER_{tgt,2} > \dots > BER_{tgt,M}$. 首先令所有数据等级的 BER 要求相同, 均为 $BER_{tgt,1}$, 则式(5)可以等价于:

$$\begin{aligned} \{C_m\}^{opt} &= \arg \min \left\{ \sum_{m=1}^N P_m = \frac{(2^{C_m} - 1) \sigma_m^2 \ln(5BER_m)}{-1.6g_m} \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{m=1}^N C_m = \sum_{i=1}^M B_{tgt,i} = B_{total}, \\ & BER_m \leq BER_{tgt,1}, \quad C_m \in C^+, \quad m = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

其中, m 表示未经分组的 OFDM 子载波的序号, P_m , C_m , g_m , σ_m^2 , BER_m 分别表示第 m 个子载波的发射功率、调制阶数、功率增益、噪声平均功率、误比特率, B_{total} 为所有等级数据的总目标比特数, 其余符号的含义同式(1). 式(6)是一个等式约束的最优化问题, 可用拉格朗日乘子法来求解, 定义拉格朗日乘子和拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L(C_1, C_2, \dots, C_N, \lambda) &= \sum_{m=1}^N \frac{(2^{C_m} - 1) \sigma_m^2 \ln(5BER_{tgt,1})}{-1.6g_m} \\ &\quad - \lambda \left(\sum_{m=1}^N C_m - B_{total} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

则可以得到式(6)最优解的闭式解为:

$$C_m^{opt} = \frac{1}{N} \log_2 \left[2^{B_{total}} \cdot \prod_{m=1}^N D_m \right] - \log_2(D_m) \quad (8)$$

其中

$$D_m = \frac{-\sigma_m^2 \ln(5BER_{tgt,1})}{1.6g_m} \quad (9)$$

相应的子载波的发射功率为:

$$P_m = \frac{(2^{C_m} - 1) \sigma_m^2 \ln(5BER_{tgt,1})}{-1.6g_m} \quad (10)$$

但是该闭式解中子载波的调制阶数取连续值, 不符合实际系统的要求, 需要对连续解进行离散化. 用符号集合 $\{\hat{C}_m\}$ 表示离散化后的子载波调制阶数, 则离散化问题可以归结为: 一个使实际的调制阶数 $\{\hat{C}_m\}$ 与理论最优解 $\{C_m\}^{opt}$ 之间的距离最小的约束优化问题, 即:

$$\begin{aligned} \min & \left(\sum_{m=1}^N (C_m^{opt} - \hat{C}_m)^2 \right) \\ \text{s.t.} \quad & \hat{C}_m \in Z^+ \end{aligned} \quad (11)$$

求解这一距离最小化问题, 首先对理论最优调制阶数进行取整, 并将取整后所能达到的传输速率与期望的传输速率进行比较. 若实际传输速率小, 则按最小距离

增量原则继续分配比特到各个子载波;若实际传输速率大,则按照最小距离增量原则降低各个子载波的调制阶数,直到二者相等为止,可以描述为以下几个主要步骤:

(1) 置初值: 令 $\hat{C}_m = \text{round}(C_m^{\text{opt}})$, 表示取整, 如果 $\hat{C}_m > B_{\text{total}}$, 则令 $\hat{C}_m = B_{\text{total}}$, 如果 $\hat{C}_m < 0$, 则令 $\hat{C}_m = 0$, 其中 $m = 1, \dots, N$.

(2) 如果 $B_{\text{total}} > \sum_{m=1}^N \hat{C}_m$, 则令 $\text{diff} = \hat{C} - C^{\text{opt}}$; 否则执行(4).

(3) 令 $k = \arg \min_m (\text{diff}(m))$, $m = 1, \dots, N$, 如果 $\hat{C}_k < B_{\text{total}}$, 则令 $\hat{C}_k = \hat{C}_k + 1$, 并且重新执行步骤(2); 否则令 $\text{diff}(k) = B_{\text{total}} + 1$, 并且重新执行步骤(3).

(4) 如果 $B_{\text{total}} < \sum_{m=1}^N \hat{C}_m$, 则令 $\text{diff} = C^{\text{opt}} - \hat{C}$; 否则执行(6).

(5) 令 $k = \arg \min_m (\text{diff}(m))$, $m = 1, \dots, N$, 如果 $\hat{C}_k > 0$, 则令 $\hat{C}_k = \hat{C}_k - 1$, 并且重新执行步骤(4); 否则令 $\text{diff}(k) = B_{\text{total}} + 1$, 并且重新执行步骤(5).

(6) 当 $B_{\text{total}} = \sum_{m=1}^N \hat{C}_m$ 时, 算法结束. 此时 $\{\hat{C}_m\}$ 即为离散条件下的最佳调制方案 $\{\hat{C}_m\}^{\text{opt}}$.

将离散化的最优解 $\{\hat{C}_m\}^{\text{opt}}$ 代入式(10), 即可求得此时各子载波上的发射功率 $\{\hat{P}_m\}^{\text{opt}}$. 在此基础上为了实现不等错误保护传输, 需要提高某些数据等级的传输质量, 也即增加某些子载波的发射功率, 将发射功率需要调整为原来的 $\ln(5BER_{\text{tgt}, i}) / \ln(5BER_{\text{tgt}, 1})$ 倍, $i = 2, \dots, M$. 由于不同等级数据的 BER 要求满足关系: $BER_{\text{tgt}, 1} > BER_{\text{tgt}, 2} > \dots > BER_{\text{tgt}, M}$, 则有不等式成立: $\ln(5BER_{\text{tgt}, i}) / \ln(5BER_{\text{tgt}, 1}) \geq 1$, 且有 BER 值越小, 功率增加的倍数越大. 因此按照功率增量最小的原则, 应该将 BER 值小的数据安排在功率效率高的子载波上传输, 而 BER 值大的数据安排在功率效率低的子载波上传输, 这里子载波的功率效率用传输一比特数据所需的功率值 $\{\hat{P}_m / \hat{C}_m\}^{\text{opt}}$ 来衡量, 该值越小, 说明功率效率越高.

实现子载波功率调整 and 不同等级的数据比特在各个子载波上分配的过程, 可由如下步骤来描述:

(1) 将所有子载波按照 $\{\hat{P}_m / \hat{C}_m\}^{\text{opt}}$ 值由低到高的顺序重新排列, 新的子载波序号为 r .

(2) 将排序后的子载波依次分为 M 组, 分组原则是该组子载波的调制阶数之和满足相应数据等级的目标比特数 $B_{\text{tgt}, i}$, $i = M, M-1, \dots, 1$ 的要求. 也即第一组子载波满足关系: $\sum_{r=1}^{\alpha} C_r = B_{\text{tgt}, M}$, 第二组子载波满足关系:

$\sum_{r=\alpha+1}^{\beta} C_r = B_{\text{tgt}, M-1}$, 依此类推. 但是由于每个子载波的调制

阶数已经固定, 上述等式不一定刚好成立, 因此只要在分组时满足如下关系即可: 第一组子载波满足关系:

$\sum_{r=1}^{\alpha} C_r \geq B_{\text{tgt}, M}$, 同时第一、二组子载波满足关系 $\sum_{r=1}^{\beta} C_r \geq B_{\text{tgt}, M} + B_{\text{tgt}, M-1}$, 同时第一、二、三组子载波满足关系

$\sum_{r=1}^{\gamma} C_r \geq B_{\text{tgt}, M} + B_{\text{tgt}, M-1} + B_{\text{tgt}, M-2}$, 依此类推. 分组之后

依次增加每组子载波的发射功率, 增加的倍数分别为 $\ln(5BER_{\text{tgt}, i}) / \ln(5BER_{\text{tgt}, 1})$, $i = M, \dots, 2$.

(3) 此时的子载波分组方式, 就是使得总发射功率最小的子载波分组方式, 相应的比特、功率分配方案就是最佳的比特、功率分配方案.

4 算法仿真及性能分析

不失一般性, 假设数据分为 $M = 2$ 个等级, 数据的误比特率要求满足关系 $BER_{\text{tgt}, 2} = BER_{\text{tgt}, 1} / 10$, 且误比特率为 $BER_{\text{tgt}, 1}$ 与 $BER_{\text{tgt}, 2}$ 的数据比例为 7:1. 符号速率为 0.5 MB/s, 采用 IEEE Std 802.16 SUF-5 信道模型^[16], 信道的多径时延特性为: $[0 \ 4 \ 10] \mu\text{s}$, 相应的功率强度为: $[0 \ -5 \ -10] \text{dB}$, 信道的等效频域复加性高斯白噪声平均功率为 1.

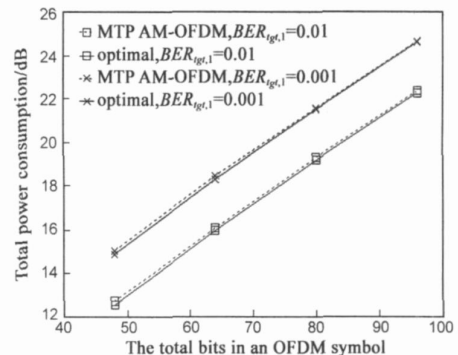


图 2 与理论最优解的总发射功率比较

首先将该算法与理论最优解进行比较. 理论最优解可以通过对式(5)的最优解进行直接搜索得到, 采用子载波数 $N = 16$, 符号速率为 0.5 MB/s. 在保证输入数据的传输速率和传输质量要求的前提下, 本算法与理论最优解所消耗的总发射功率如图 2 所示. 横坐标表示一个 OFDM 符号所包含的比特总数, 纵坐标表示总发送功率 (用各子载波的平均信噪比表示, 单位为 dB). 可以看出, 传输质量越高 (BER 值越小), 消耗的总功率越大, 传输速率越高, 消耗的总功率也越大. 在相同条件下, MTP AM-OFDM 算法(虚线)的总发射功率总是略高于最优解(实线), 但是二者非常接近. 此结果表明本文对最优算法的简化求解是合理且正确的.

另外, 本文将 MTP AM-OFDM 算法与文献[6, 10]中的算法进行了比较. 采用的子载波数 $N = 128$, 符号速率

为 2MB/s.

图 3 在传输质量和传输速率要求相同的前提下,与文献[10]所提算法的总功率进行比较,横坐标表示一个 OFDM 符号所包含的总比特数,纵坐标表示所消耗的总发射功率.结果显示在相同条件下 MTP AM-OFDM 算法的总功率比文献[10]算法低 6dB 以上,从图 3 还可以看出,MTP AM-OFDM 算法在传输质量优于文献[10]时,其功率依然比文献[10]低 3dB 左右.

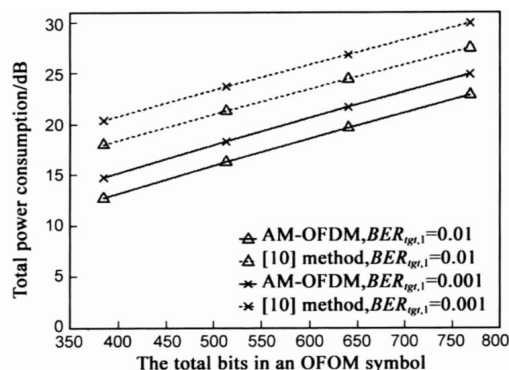


图 3 与文献[10]总发射功率的比较

图 4 在总发射功率相同的前提下,与文献[6]算法的传输质量进行比较.横坐标表示一个 OFDM 符号所包含的总比特数,纵坐标表示算法所能达到的传输质量,用误比特率表示.可见在总发射功率相同的前提下,MTP AM-OFDM 算法的误比特率明显低于文献[6].

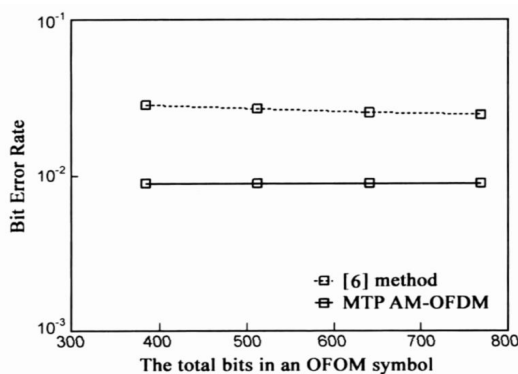


图 4 与文献[6]性能的比较

5 结论

本文提出了利用自适应调制实现数据传输不等错误保护(UEP)的 MTP AM-OFDM 算法.利用 OFDM 系统各个子载波的功率增益不相同的特点,在保证各个优先级数据的传输速率和传输质量均满足要求的前提下,通过自适应调制,调整每个子载波的发射功率和调制阶数,使得系统的总发射功率最小.同时将子载波分组,不同的子载波组满足不同的传输质量和传输速率要求,传输不同重要性的数据,实现对数据传输的不等错误保护.同理论最优解的比较结果表明,该算法的功率接近

理论最小值,同文献[6,10]的比较结果说明在相同条件下,该算法能够显著降低发射功率,提高数据传输质量.

作者简介:



张艳玲 女,1976 年 2 月生于山西,西安电子科技大学讲师,博士研究生.主要从事无线通信、无线 Ad Hoc 网络等领域的研究工作.

E-mail: ylzhang@mail.xidian.edu.cn

孙献璞 男,1963 年 12 月生于河南,西安电子科技大学教授,硕士生导师.主要从事无线通信、移动通信、无线 Ad Hoc 网络等领域的研究工作. E-mail: xpsun@xidian.edu.cn.

李建东 男,1962 年 10 月生于江苏,西安电子科技大学教授,博士生导师.从事宽带无线 IP 技术、移动通信、软件无线电、ad hoc 自组网等方面的研究. E-mail: jldi@mail.xidian.edu.cn

参考文献:

- [1] J Hagenauer, T Stockhammer. Channel coding and Transmission aspects for wireless multimedia [A]. Proceedings of the IEEE [C]. October 1999. 1764- 1777.
- [2] D G Daut, J W Modestino. Two dimensional DPCM image transmission over fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(3). 315- 328.
- [3] Y Sun, C Pandana, et al. A joint channel estimation and unequal error protection scheme for image transmission in wireless OFDM systems [A]. IEEE International Conference on Image Processing [C]. Rochester, NY, United States, 2002. 380- 383.
- [4] Y Sun, C Pandana, et al. Channel aware unequal error protection for image transmission over broadband wireless LAN [A]. IEEE International Conference on Image Processing [C]. Barcelona, Spain, 2003. 93- 96.
- [5] G H Yang, D X Shen, V O K Li. UEP for video transmission in space time coded OFDM Systems [A]. IEEE INFOCOM' 2004 [C]. Hongkong, China, 2004. 1200- 1210.
- [6] D Dardari, M G Martini, et al. Bit loading for unequal error protection of video streams in OFDM wireless systems [A]. 2004 IEEE International Conference on Communications [C]. Paris, France, 2004. 3076- 3080.
- [7] G H Yang, D X Shen, V O K Li. Adaptive sub channel allocation based UEP for video transmission in space time coded OFDM systems [A]. PIMRC 2004 [C]. Barcelona, Spain, 2004. 3054- 3058.
- [8] D Dardari, M G Martini, et al. Layered video transmission on adaptive OFDM wireless systems [J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2004, 2004(10), 1557- 1567.
- [9] Ren Guang-liang, Zhang Hui, Chang Yi-lin. A novel scheme for

(下转第 1354 页)

- aking schemes for image authentication and ownership verification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1593–1601.
- [5] M U Celik, G Sharma, E Saber, et al. Hierarchical watermarking for secure image authentication with localization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 585–595.
- [6] A H Ouda, M R El sakka. Localization and security enhancement of block based image authentication[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C]. vol. 1, 2005, 673–676.
- [7] 张宪海, 杨永田. 基于脆弱水印的图像认证算法研究[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 34–39.
Zhang Xian hai, Yang Yong tian. Image authentication scheme research based on fragile watermarking[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 34–39. (in Chinese)
- [8] 和红杰, 张家树, 田蕾. 能区分图像或水印篡改的脆弱水印方案[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1557–1561.
He Hong jie, Zhang Jia shu, Tian Lei. A fragile watermarking scheme with discrimination of tampers on image or watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1557–1561. (in Chinese)
- [9] 和红杰, 张家树. 基于混沌置乱的分块自嵌入水印算法. 通信学报, 2006, 27(7): 80–85.
He Hong jie, Zhang Jia shu. Chaos based scramble self-embedding watermarking algorithm[J]. Journal of China Institute of Communications, 2006, 27(7): 80–85. (in Chinese)
- [10] J Fridrich, M Goljan. Images with self correcting capabilities[A]. Proceedings of International Conference on Image Processing[C]. IEEE Press, Kobe, Japan, 1999. 25–28.
- [11] 刘钺, 张永强, 刘粉林. 一种新的数字化混沌扰动方案, 计算机科学[J], 2005, 32(4): 71–74.
Liu Bin, Zhang Yong qiang, Liu Fen lin. A new scheme on perturbing digital chaotic systems[J]. Chinese journal of computer science, 2005, 32(4): 71–74. (in Chinese)
- [12] S Samuel, W T Penzhom. Digital watermarking for copyright protection[A]. IEEE 7th AFRICON Conference in Africa[C]. Gaborone, Botswana, 2004, 2: 953–957.
- 作者简介:



王国栋 男, 1982 年生于河南三门峡. 解放军信息工程大学信息工程学院网络工程系硕士研究生, 主要研究方向为数字水印技术、信息隐藏技术等.
E-mail: wgdguodong2006@163.com



刘粉林 男, 解放军信息工程大学信息工程学院教授、博士生导师. 1964 年出生于江苏溧阳. 主要研究方向为网络安全、数字水印技术、信息隐藏技术等.

(上接第 1318 页)

- space time block coding with a variable transmit diversity gain in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(2): 478–483.
- [10] Y Hashimoto, S Sampei, N Morinaga. Channel monitor based unequal error protection with dynamic OFDM subcarrier assignment for video transmission[A]. IEEE Vehicular Technology Conference 2002[C]. Vancouver, BC, Canada, 2002. 913–917.
- [11] S T Chung, A J Goldsmith. Degree of freedom in adaptive modulation: a unified view[J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49(9): 1561–1571.
- [12] J Campello. Optimal discrete bit loading for multicarrier modulation systems[A]. IEEE International Symposium on Information Theory[C]. Cambridge, MA, USA, MA, 1998. 193.
- [13] J Jiho, B L Kwang, H L Yong. Transmit power and bit allocations for OFDM systems in a fading channel[A]. Proc IEEE Globecom[C]. San Francisco, CA, USA 2003. 858–862.
- [14] A Fasano. On the optimal discrete bit loading for multicarrier systems with constraints[A]. Proc IEEE VTC[C]. Jeju, South Korea, 2003. 915–919.
- [15] Y W Cheong, R S Cheng, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1999, 17(10): 1747–1758.
- [16] Channel models for fixed wireless applications, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group[OL]. http://ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c01_29r2.pdf, July, 2001.