计算机科学 2008Vol. 35No. 4

一种 OSTBC-OFDM 下行链路中的跨层自适应算法

刘 建¹ 朱光喜^{1,2} 李 黎¹ 郭 磊¹ 王 玲¹

(华中科技大学电子与信息工程系1 武汉光电国家实验室(筹)² 武汉 430074)

摘 要 本文从跨层目标出发,分析了 OSTBC-OFDM 下行链路中支持多业务混合传输的特性与质量要求,提出一种 兼顾媒体业务传输质量(QoS)保障及最大化传输效率的动态 BER/PER 目标调整算法。该算法根据无线传输系统的 容量和信道质量,调整传输手段,并根据媒体业务包的质量要求,为发送缓冲区的各个业务包指定不同等级的 BER/ PER 要求,并加载于各个子信道中,从而达到兼顾媒体业务传输质量和最大化传输效率的目的。 关键词 跨层自适应,动态 BER 调整,QoS 保障,传输效率

A Cross-layer Method for Multi-traffic QoS Guaranteed Transmission in OFDM-systems

LIU Jian¹ ZHU Guang-Xi^{1,2} LI Li¹ GUO Lei WANG Ling (Dept. of Electronics & Information Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract A cross-layer method with dynimic BER/PER required is developed for multi-traffic transmission with QoS guaranteed on downlink OSTBC-OFDM system. The wireless physical channel quality and the time-delay requirements of traffics are considered conjointly. When the power is allocated to all sub-carriers according to the water-filling algorithm based on OSTBC-OFDM downlink CQI for maximizing the capacity of the channel, the resource and transmission method is chosen to the most emergent packets. Analysis and simulation show that the method improves the performance of multi-traffic transmission for OSTBC-OFDM systems.

Keywords Cross-layer adaptive, Multi-traffic, QoS, Capacity

1 引言

目前,越来越多的无线通信标准倾向于向分组传输的方 向发展,如 3GPP 的 HSDPA/HSUPA 到 LTE 的发展, 3GPP2 的 EV-DO 到 AIE 的发展,以及与生俱来就支持无线 分组传输的 IEEE802.11 系列与 IEEE802.16 系列标准。在 无线分组传输系统中,越来越多的研究集中于兼顾媒体业务 质量保障(QoS)和最大化传输效率方面。文[1]提出了一种 QoS 认知的自适应技术,文[2]基于 IEEE 802.16 标准提出了 CD-EDD 算法;文[3]根据信道特性自适应调整编码调制方 案;文[4]则基于 MIMO-OFDM 给出了跨层自适应子载波算 法的分析与流程。在物理层方面,着眼于正交空时分组码 (Orthogonal Space Time Block Coding, OSTBC)技术,因其能 够获得最大满分集增益以及相对较低的实现复杂度而引起了 国内外研究者的广泛兴趣,Lu和Wang证明^[5],将OSTBC与 OFDM相结合,能使空时编码结构应用于频率选择性衰落信 道,同时避免了接收端复杂的均衡。鉴于OSTBC-OFDM的 传输方式已经列入了802.11a等国际标准,本文针对单用户 多业务场景下OSTBC-OFDM下行链路以兼顾媒体业务质量 保障(QoS)及最大化传输效率为目标,以固定发射功率为约 束,推导基于动态BER/PER(BER,误比特率;PER,误包率) 约束下的跨层自适应算法的子载波(带)加载算法,并给出算 法流程。





图 1 带有子载波自适应分配结构的多业务并发下行 OSTBC-OFDM 系统结构

*)国家"863"计划(编号 2003AA12331005)和国家自然科学基金(编号 60496315)。刘 建 讲师,博士研究生。

图1所示为基本的无线传输系统。考虑基于 OSTBC 的 频分复用的下行 OFDM 系统,每个 OFDM 符号包含 N_c 个子 载波,假设共有 K 个业务流并发。在几个连续 OFDM 符号 的相同子载波上,分别发送空时编码后所对应的不同时隙的 数据。基站端有 M_{BS} 根天线,每个移动台端有 M_{MS} 根天线。 $M_{MS} \times M_{BS}$ 维的矩阵 H。则代表了第 n 个子载波上发射-接收 天线对之间衰落信道的频率响应。系统结构如图1所示。

在用户接收端,子载波 n 上的 M_{MS} 根天线所接收到的信 号可以表示为

$$\mathbf{y}_n = \sum_{k=1}^{N} \sqrt{p_n^k} \delta_n^k \mathbf{H}_n^k \mathbf{s}_n + \mathbf{W}$$
(1)

为了简便,在上式中省略了 OFDM 符号的序号。其中, s_n 和 y_n 分别是 $M_{BS} \times 1$ 维和 $M_{MS} \times 1$ 维的发射和接收向量矩 阵;& 为布尔变量,表示子载波 n 被业务流 k 占有与否; k 是 子载波n上分配给业务流k的传输功率:W 代表噪声向量矩 阵,其每个元素是独立同分布的高斯随机变量,均值为零,方 差为σ²。

约定自适应子载波分配的目标是兼顾媒体业务质量保障 (QoS)及最大化传输效率。对于最大化传输效率,即是尽量 提高传输速率以最大化利用信道容量。经典 MIMO 信道容 量^[6]由公式(2)确定:

$$C_0 = \log_2 \det(I_r + \frac{E_a}{n_t * N_0} H H^*)$$
 (2)

该公式确定了在给定发送信噪比 E_a/N_0 下,Rayleigh 信 道多天线传输系统的信道容量。对于多载波的功率加载,则 可以采用注水算法[7],以达到容量最大化,但这仅仅解决了子 载波功率分配的合理性,但没有解决子载波加载和业务流层 面的 QoS 保障问题。

分析业务流传输 QoS 保障目标,不但要保障平均速率, 更为重要的是必须考虑对业务时延特性的保障。业务包的传 输时延,取决于发送队列拥塞情况和出错重传次数上。发送 窗口拥塞越厉害,出错重传越频繁,意味着传输时延越大目不 确定性越大,直接导致时延特性变差。

假设反馈过程是理想过程,根据每个包的传输统计特性, 可知媒体业务包的传输时延期望为:

$$E(\tau) = (\tau_{T1} + \tau_{T-R}) * \Lambda_1 + \sum_{i=2}^{\infty} (\sum_{j=1}^{i} \tau_{T_j} + i * \tau_{T-R}) * (\prod_{j=1}^{i-1} \lambda_j)$$

* Λ_i (3)

其中, τT 表示第 i 次发射时, 由于发射窗口拥塞而导致的发射 时延; τ_{T-R} 表示数据包从发射端到接收端的传播与处理时延; λ; 表示误包率 PER(Packet Error Rate), Λ; 表示正确包率 PSR(Packet Successful Rate),且有 $\Lambda_i = 1 - \lambda_i$ 。时延抖动与 时延方差 D(τ)值密切相关:

$$D(\tau) = E\{(\tau - E(\tau))^2\}$$
(4)

分析(4)式,若获得良好的时延特性,即获得较小的 $D(\tau)$ 值,则必须要求 Tr.小且A 大。但是对(4)式指标的过高保护, 会要求较高的 PSR 指标, 而高 PSR 意味着低 Pe, 根据上述分 析,系统为保证低 P。会使速率r 较低,从而导致系统效率降 低。

根据媒体业务质量要求($\tau_{a}, \tau_{ii}, \lambda_{b}$),可知媒体业务的 QoS保障为:

$$\begin{cases} E(\tau) < \tau_g \\ D(\tau) < \tau_{jit}^2 \\ \Lambda < \lambda_{di} \end{cases}$$
(5)

$$E(\tau) = \tau_{T_1} \Lambda_1 + \sum_{i=0}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^{i} \tau_{T_j} * \prod_{j=1}^{i=1} \lambda_j * \Lambda_i \right]$$

+ $\tau_{T-R} \Lambda_1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left[i * \tau_{T-R} * \prod_{j=1}^{i-1} \lambda_j * \Lambda_i \right] < \tau_g$ (6)
$$D(\tau) = E(\tau^2) = \overline{\tau^2} < \tau_{ii}$$
(7)

$$D(\tau) = E(\tau^2) = \overline{\tau}^2 < \tau_{jit}$$

其中, $\tau = E(\tau)$ 。简化(6)式,可以近似认为:

$$E(\tau) = \frac{\tau_T + \tau_{T-R}}{\overline{\Lambda}} < \tau_g \tag{8}$$

其中, $\overline{\tau_T}$ 为平均发射等待时间, $\overline{\Lambda}$ 为平均 PSR。为了得到(8) 式的简化结果,令:

$$\tau = k(\tau_T + \tau_{T-R}) \tag{9}$$

其中 k 为成功发送数据包的重传次数,假定每次传输时的 PSR 均相等目为 Λ ,有:

$$E(k^{2}) = \sum_{k=1}^{\infty} k^{2} * (1 - \Lambda)^{k-1} * \Lambda = \frac{2 - \Lambda}{\Lambda^{2}}$$
(10)

综合(7)~(10)式,有约束条件:

$$\sqrt{\frac{1-\Lambda}{\Lambda^2}} * (\bar{\tau}_T + \tau_{T-R}) < \tau_{jit}$$
(11)

根据(8)式和(11)式,可得系统对于 Λ 的指标要求:

$$\begin{cases} \Lambda > \frac{\sqrt{4A^2 + 1} - 1}{2A^2} \\ \Lambda > \frac{\overline{\tau_T} + \tau_{T-R}}{\tau_{\kappa}} \end{cases}$$
(12)

其中 $A = \frac{\tau_{ji}}{\tau_T + \tau_{T-R}}$,为时延抖动相对于一次传输时延的比值。 A 越大,则要求的 Λ 越小。此外,对于业务 QoS 要求的群时 延 τ_g 越大,则要求的 PSR 越小,也即 Λ 越小。

对于每个子载波(带),根据其衰落因子和功率加载,假设 在一次传输过程中每个比特的误码率相同,则包正确传输的 概率 PSR 和 BER 的关系如下:

$$\Lambda = (1 - P_e)^L \tag{13}$$

其中,P。为误比特率,L为包长。所以有效信息比特传输率 为:

$$R' = (R \star \Lambda) \star (L - l_{ax}) \tag{14}$$

其中,R表示包速率,R=r/L,r表示比特速率,与调制编码方 式密切相关; lor 为每个包 CRC 校验的长度。对于每个子载 波(带)而言,其误比特率 P。与该子带所配置的调制编码方式 以及信噪比 γ 密切相关。简化 P_{ρ} 的约束条件,可得:

$$P_e = f(r, \gamma) \tag{15}$$

当 OSTBC-OFDM 下行链路采用 Alamouti 编码方案时, 最大似然空时译码器输出端的信噪比可以写为[8]。

$$\gamma_n = \sum_{k=1}^{K} \delta_n^k \frac{p_n^k}{M_{\rm BS} \sigma^2} \parallel \mathbf{H}_n^k \parallel_F^2$$
(16)

其中 || H^t_n ||²_F = $\sum_{i=1}^{M_{RS}} \sum_{j=1}^{M_{AS}} |(H^t_n)_{i,j}|^2$,为信道 Frobenius 范数。因 此,自适应子载波分配的目的是使总的发射功率不变的情况 下,在子载波的 BER 和瞬时速率约束条件下,为尽可能多的 业务包分配资源,可描述成:

 \mathbf{P}_{-}

$$P = \underset{p}{\operatorname{argmax}} (C_0)$$
约束条件C1: $\sum_{k=1}^{K} \delta_n^k \leqslant 1 \quad \forall n, k$
C2: $e_n^k \leqslant \varepsilon_{hreshold}^k \quad \forall n, k$
C3: $r_n^k \geqslant \theta_{hreshold}^k \quad \forall n, k$
C4: $p_{hotal} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{N_c} \delta_n^k p_n^k = P_0$
(17)

其中, e_n 表示业务流 k 在子载波 n 上传输的 BER, 而 $\epsilon_{hreshold}^k$ 则 是业务流的 BER 约束,根据式(16)而定;rå 表示业务流 k 在

• 116 •

子载波 n 上传输的瞬时速率, 而 $G_{hreshold}$ 则是业务流 k 的速率 约束。因为系统下行是固定发射功率, 所以发射总功率 P_0 是固定值。

因此,对于在第 n 个子载波上传输数据的业务流 k 而言, 为了满足误码率的约束条件 C2 和速率约束条件 C3,所需的 功率 p^k 加载可以表示为函数形式

$$p_n^k = F(\theta_{hreshold}, e_{hreshold}^k, \|\mathbf{H}_n^k\|_F^2)$$
 (18)
可见,业务流 k 在子载波 n 上所需要的传输功率与比特速率
约束条件、误码率约束条件和信道 Frobenius 范数有关。

3 跨层自适应传输方法

根据 OSTBC-OFDM 的信道反馈,可以获知每个子载波 的衰落特性。另一方面,基站根据终端的链路层信息反馈或 者接收队列信息,从而为发送队列的每个业务包确定 PER 预 期。子载波的加载和 AMC(自适应调制编码)均需要考虑其 所要承载的业务要求,包括误包率要求和时延要求。保障媒 体业务的 QoS 需求,系统则必须在一定限度内提高包传输的 优先级和包传输的 PSR。

根据上节的分析,对于容量要求而言,A并不是越大越好,对于有一定 QoS 保障要求的媒体业务而言,A 有一个最小门限。因此需要实时计算每个包所要求的 PSR 门限,为其加载相应的子带,在保障媒体业务 QoS 的基础上,最大化传输效率。

算法概要描述如下,在发送端:

Step1:子载波信道特性获知

根据 OSTBC-OFDM 下行链路信道信息反馈,计算每个 子载波的信道衰落特性;

Step2:计算发送缓冲区中待发数据包的 φ 值

 φ 值是每个包的紧急程度的度量,与该包的产生时刻、时 延特性要求密切相关, $\varphi = \Phi(t, t_{Tag}, t_{T-R}, \tau_g, \tau_{jit})$,我们设定 一个简单的 φ 值表达式:

 τ_{g}

$$\varphi = \Phi(t, t_{Tag}, t_{T-R}, \tau_g, \tau_{jit}) = \frac{\iota - \iota_{Tag} + \iota_{T-R}}{-}$$

其中,t表示当前时间,t_{Tag}表示该数据包产生时的时间戳。该

值越大,表示该包越紧迫;

Step3:每个包的 BER/PER 需求计算

根据业务包的 φ 值以及该业务的 QoS 对时延抖动的预 期 τ_{jit} ,计算发送队列中数据包的 PSR 需求 Λ ,并根据 Λ 计算 $\varepsilon_{invehold}^{\delta}$,称之为动态 PSR 策略;

Step4:功率加载

根据对 $P = \underset{P}{\operatorname{argmax}(C_o)}$ 的求解,以 4.3 的 C1~C4 作为 约束条件,解得功率分配矢量 P,从而获得每个子载波的功率 加载值。再根据通过反馈得到的信道质量 CSI 值计算每个子 载波的信噪比 CINR;

Step5:子载波加载

根据 φ 值和(11)式的要求,计算每个业务包所需要的 PSR 要求,并从高到低排成队列 P_{TX} ;然后根据每个子载波的 功率加载后的 CINR 估计,以从高到低的次序为 P_{TX} 队列进 行分配。

接收端进行数据恢复与业务数据提交,同时收集物理层 状态信息和数据链路层队列信息,并反馈给发送端。

4 仿真分析

仿真采用以下环境与参数设置:FFT 子载波数目为 512, 带宽设定为 5MHz, 划分为 64 个子带, 采用 2 发 2 收经典 Alamouti 空时编码结构, 以 5ms 为一帧, 假设反馈过程为理 想过程,反馈时延为 5ms; TDD模式,上下行时隙比为 1:3; 调 制方式有 QPSK、16QAM 和 64QAM 三种, 编码方式为卷积 码,码率配置 1/3、1/2、2/3 以及 3/4 四种。业务层并发 5 个 业务,分别为四个不同等级速率的媒体业务和一个数据传输 业务,四个媒体业务的速率分别为:64kbps、128kbps、256kbps 以及 384kbps,且设置媒体业务的时延抖动门限为 1ms; 数据 传输业务为 FTP 文件传输, 信道为多径 Rayleigh 衰落信道, 根据 M-1225E 中的 Pedestrian A 模型设置多径参数。

图 2 所示为媒体业务的速率曲线。可以看到,是否采用 动态 PSR 策略,对媒体业务的平均速率没有实质性的影响。



图 2 四种媒体业务的速率曲线

图 3 所示为四种媒体业务的时延抖动。由于在仿真中设置了四种媒体业务的时延抖动门限为 1ms,当采用动态 PSR 策略时,媒体业务的时延抖动门限可以得到很好的满足;而采用固定 PSR 策略则不能满足时延抖动要求,其时延抖动在 10ms 附近。



图 4 FTP 业务速率曲线

图 4 所示为并发的 FTP 业务的速率曲线。由于 FTP 业 务对时延不敏感,因此没有为该业务设置时延抖动门限。由 于媒体业务采用了动态 PSR 策略,因此对资源有额外消耗, 但观察 FTP 业务的传输速率,这种代价与固定 PSR 策略相

(上接第101页)

该军械起爆系统实现了起爆控制方式的革新,在安全性、 精确性、可靠性和可配置性等方面进行了优化,有利于我国现 代化武器在精确打击和高效毁伤方面的综合性能提升。

参考文献

- Boucher C J, Novotney D B. Ensign-Bickford Aerospace & Defense Company Simsbury. Connecticut Performance evaluation of an addressable integrated ordnance system. AIAA 2001-3636
- 2 United States Patent, ORDNANCE FIRING SYSTEM, Patent No. ; US 6,584,907 B2
- 3 Novotney D B, Kochanek A. Ensign-Bickford Aerospace & Defense Company, Simsbury, CT, 06070. Intelligent Initiation Sys-

比相差甚少,基本上在 100kbps 左右,在信噪比较好的条件下,差异更小。

结论 本文提出的一种 OSTBC-OFDM 下行链路中的跨 层自适应算法,综合考虑 OSTBC-OFDM 系统中各个信道衰 落特性和业务传输的 QoS 要求,在传输过程中实时计算各个 业务数据包的 φ值,根据 φ值调整该数据包的传输 PSR 要 求,并以此指导 OSTBC-OFDM 系统的功率分配与编码调制 方式配置,从而在为各个业务传输 QoS 保障的情况下最大化 传输效率。仿真结果表明,该算法有效地满足了媒体业务 QoS 要求,同时对于最大化 OFDM 系统传输效率的弱化很 小,提高了空口的频谱资源利用率。

参考文献

- Ergen M, Coleri S, Varaiya P. QoS aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems. IEEE Transactions on Broadcasting, 2003,49(4)
- 2 孙卓,彭木根,王文博、保证混合业务质量的跨层 OFDMA 资源分 配方法.北京邮电大学学报,2006,29(6)
- 3 Koutsopoulos I, Tassiulas L. Channel state-adaptive techniques for throughput enhancement in wireless broadband networks. In: INFOCOM, 2001,2:757~766
- 4 卢小峰,朱光喜,宁国勤,等.一种自适应跨层空间子信道分配算 法.计算机科学,2006,33(11)
- 5 Lu B, Wang X. Space time code design in OFDM systems. In: IEEE Press, GLOBECOM. San Francisco, USA: IEEE Press, 2000.1000~1004
- 6 Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. AT&T Bell Labs, Internal Tech. Memo, 1995
- 7 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(6);585~595
- 8 Gore D, Paulraj A. MIMO antenna subset selection with space time coding. IEEE Trans. Signal Processing, 2002, 50: 2580~ 2588

tems for Divert and Attitude Control Applications, AIAA 2005-4502

- 4 徐衍海,惠蕾.火工系统新技术的发展动向.火工品,2001.1
- 5 章洪深. 美国军用标准 MIL—STD—1316D 引信安全性设计准则 [J]. 探测与控制学报, 1994(1)
- 6 赵振海.对 GJB373A-1997《引信安全性设计准则》的理解与探讨[J]. 国防技术基础, 2004(5)
- 7 MIL-STD-1553B Military Standard, Digital Time Division command/Response Multiplex Data Bus Notice 2 [S]
- 8 张娟,张雪兰,扩展的海明码及其在 FLASH/EEPROM 中的应 用[J],兵工自动化,2003(3)
- 9 Xilinx Spartan-3E Starter Kit Board User Guide, UG230 (v1. 0) March 2006