

用于视频传输的自适应分级正交 幅度调制不等保护方法

李鹏, 常义林, 冯妮娜, 卢朝阳

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

摘要: 针对已有用于无线视频传输不等保护的分级正交幅度调制(HQAM)不能适应无线信道时变特性和频率选择性的问题,提出一种自适应 HQAM 不等保护方法(A-HQAM). 首先将视频码流按其恢复视频质量的重要性划分出不同的优先级,然后根据优先级不同数据允许的误码率上限和子载波信道质量,自适应确定对应的 HQAM 调制参数,最后将视频数据调制到各子载波上实现不等保护传输. 与已有同类方法相比,A-HQAM 方法可减小无线信道时变特性和频率选择性的影响,改善恢复视频质量. 仿真结果表明,相比基于 HQAM 的不等保护方法,A-HQAM 方法可使恢复视频质量平均提高 1 dB.

关键词: 视频传输;不等保护;分级正交幅度调制;无线信道

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0072-05

Unequal Error Protection Method for Video Transmission Using Adaptive Hierarchical Quadrature Amplitude Modulation

LI Peng, CHANG Yilin, FENG Nina, LU Zhaoyang

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

Abstract: An unequal error protection (UEP) method for video transmission using adaptive hierarchical quadrature amplitude modulation (A-HQAM) is proposed to reduce the impact of frequency-selective fading and the time-varying nature of wireless channels. Firstly, the video streams are divided into sub-streams with unequal priorities. Then, the HQAM modulation parameters of each sub-carrier are adaptively determined based on the channel quality of each sub-carrier and the upper limit of the bit error rate of the sub-streams with unequal priorities. Finally, UEP is implemented via modulating video streams onto sub-carriers. Simulation results show that the proposed A-HQAM method reduces the impact of frequency-selective fading and the time-varying nature of the wireless channels, and improves the quality of the reconstructed video by an average of 1 dB compared with HQAM-based methods.

Keywords: video transmission; unequal error protection; hierarchical quadrature amplitude modulation; wireless channel

视频码流中的头信息和差值信息对恢复视频质量的影响不同,带宽受限的无线环境中需对码流中重要性不同的部分提供不等保护(UEP),以保证恢

复视频质量^[1]. 已有用于无线视频传输不等保护的方法大致可以分为 3 类:①使用具有不同纠错能力的信道编码提供不等保护^[2-3],这类方法在提供不等

保护的同时引入了大量冗余,降低了传输的效率;②对码流中重要性不等的部分选择性重传^[4],这类方法需要引入额外的延迟来提供不等保护,对具有延迟约束的视频业务的恢复质量会造成严重影响;③基于分级正交幅度调制(HQAM)的不等保护方法^[5-7],这类方法通过调整调制星座点间的距离实现不等保护,在不引入时间延迟的基础上仅增加少量冗余,因而广泛用于为无线传输的视频业务提供不等保护。

然而,已有基于 HQAM 的不等保护方法所采用的星座点调整方案^[5-7],均未考虑无线信道时变特性和频率选择性对恢复视频质量的影响。因此,本文提出了一种自适应 HQAM 不等保护方法——A-HQAM,根据视频数据的重要性和子载波信道质量,自适应地调整星座点间的距离,实现对码流中重要性不同部分的不等保护,改善恢复视频的质量。

1 HQAM 原理

通信系统调制方式的选择通常是对功率效率、带宽效率和实现复杂度的折中^[8]。对于 HQAM,调制星座点数为

$$M = 2^L, \quad L \in \mathbf{Z}^+, \quad L \geq 3 \quad (1)$$

式中: L 为 HQAM 符号中包含的比特数。随着 M 的增大,带宽效率提高但功率效率降低,解调复杂度增大;反之,带宽效率降低但功率效率提高,解调复杂度减小。出于对功率效率、带宽效率和实现复杂度的考虑,本文选择 $M=16$ 的 HQAM。

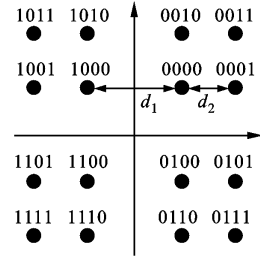
相邻星座点所代表的 HQAM 符号间的比特差异决定了星座点映射方式的抗噪声性能^[8]。对于 HQAM,可选的映射方式包括自然码映射和格雷(Gray)码映射。与自然码映射相比,采用 Gray 码映射使相邻符号之间仅存在 1 bit 的差异,解调时即使将当前符号判为相邻符号,也仅会造成 1 bit 错误,因而抗噪声性能更强。因此,本文选择 Gray 码实现 HQAM 的星座点映射。

当 $M=16$ 时采用 Gray 码映射的 HQAM 调制星座图如图 1 所示。定义 HQAM 调制参数为

$$\theta = \frac{d_1}{d_2} \quad (2)$$

通过调整式(2)中的 d_1 和 d_2 ,使得 $\theta > 1$,即可在降低 HQAM 符号低有效比特(LSB)抗噪声性能的同时,提高对应的高有效比特(MSB)的抗噪声性能。

在加性高斯白噪声信道中, HQAM 符号中不同位置比特的误码率是 θ 和平均比特信噪比 γ 的函



d_1 :不同象限星座点之间的最小距离; d_2 :同一象限中不同星座点之间的最小距离

图1 $M=16$ 时采用 Gray 码映射的 HQAM 调制星座图

数^[9]。HQAM 符号中 MSB 的误码率为

$$P_{\text{MSB}}(\theta, \gamma) = 0.5Q(2(\theta+2)^2\gamma/B)^{1/2} + 0.5Q(2\theta^2\gamma/B)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $B=A+1$, $A=(1+\theta)^2$; $Q(x)$ 为误差函数,其表达式为

$$Q(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt \quad (4)$$

HQAM 符号中 LSB 的误码率为

$$P_{\text{LSB}}(\theta, \gamma) = Q(2\gamma/B)^{1/2} + 0.5Q(4(2\theta^2 + 5\theta + 4)\gamma/B)^{1/2} - 0.5Q(4(2\theta^2 - 5\theta + 4)\gamma/A)^{1/2} \quad (5)$$

2 A-HQAM 不等保护方法

2.1 视频数据的优先级划分

目前, H. 264/AVC^[10] 以其高压缩效率和友好的网络适配成为无线视频传输首选的编码标准。数据分割(DP)是 H. 264/AVC 中重要的容错工具。DP 将码流中的每个片层(Slice)划分为 A、B、C 3 个部分:A 部分包含头信息和运动矢量信息;B 部分包含帧内预测差值;C 部分包含帧间预测差值。以图像分辨率为 176×144 像素、帧率为 15 帧/s 的标准序列 Foreman 为例,图 2 给出了在解码端仅 A 部分正确接收以及 A、B、C 均正确接收时每帧的平均峰值信噪比。由图 2 可知,相比 A、B、C 均正确接收,仅 A 部分正确接收时恢复视频质量的下降是有限的。对于解码端而言,若 A 部分出错,对应的 B 和 C 部分不能用于解码,恢复视频质量将受到严重影响。因此, A 部分的重要性大于 B 和 C 部分。根据其重要性,本文将视频码流划分为 2 个优先级,即每个 Slice 的 A 部分为高优先级(HP)数据, B 和 C 部分为低优先级(LP)数据。

2.2 分级编码无线传输的不等保护原理

分级编码无线传输的不等保护原理框图如图 3

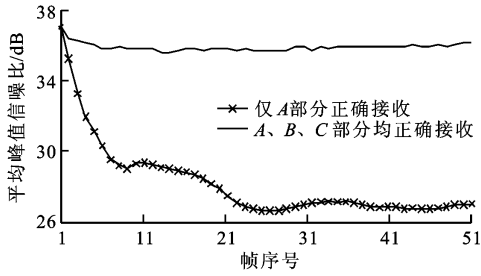


图2 视频序列 Foreman 采用 DP 时的恢复视频质量

所示。

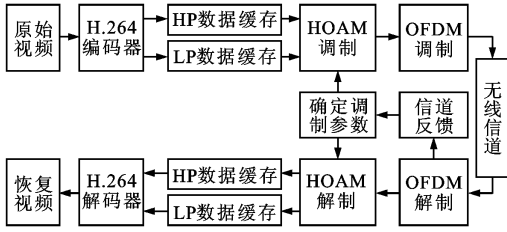


图3 分级编码无线传输的不等保护原理

视频码流中的 HP 和 LP 数据分别送入对应缓存,将缓存中的 HP 和 LP 数据分别调制到 HQAM 符号的 MSB 和 LSB,经正交频分复用 (OFDM) 调制后送入无线信道传输.接收端对接收到的数据进行 OFDM 解调,根据对应 HQAM 调制参数将各子载波上的 HQAM 符号解映射后送入对应缓存,经 H.264/AVC 解码器解码恢复视频信息.

设 DP 划分后码流中 HP 和 LP 数据的信源速率分别为 R_{HP} 和 R_{LP} .受带宽和调制方式的限制,信道所能提供的传输速率为 R_c ,存在如下约束

$$R_{HP} + R_{LP} \leq R_c \quad (6)$$

式(6)表明:为避免由信道拥塞导致的数据丢失,视频码流的信源速率应限制在信道所能提供的传输速率范围内.

实际中,常根据码流中数据重要性分别定义其允许的误码率上限.若 HP 和 LP 数据的误码率均低于其上限,即可获得较好的恢复视频质量^[1].若 R_c 受限,则传输中应首先保证 HP 数据满足其误码率限制,然后尽可能地降低 LP 数据的误码率.因此,本文所采用的不等保护方法可表示为

$$\min\{P_{LP}\}$$

$$\text{s. t. } P_{HP} \leq P'_{HP}, R_{HP} + R_{LP} \leq R_c \quad (7)$$

式中: P_{HP} 和 P_{LP} 分别表示码流中 HP 和 LP 数据实际的误码率; P'_{HP} 表示 HP 数据的误码率上限.

本文通过将码流中的 HP 和 LP 数据分别映射

到 HQAM 符号的 MSB 和 LSB 实现不等保护,因而式(7)中的 P_{HP} 对应于 HQAM 符号中 MSB 的误码率 P_{MSB} , P_{LP} 对应于 LSB 的误码率 P_{LSB} .由式(3)和式(5)可知, P_{HP} 和 P_{LP} 也是 θ 和 γ 的函数.令 $\mathbf{\Gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$ 表示 OFDM 各子载波的平均比特信噪比矢量, $\mathbf{\Theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$ 表示对应 HQAM 调制参数矢量,则式(7)中的不等保护方法可表示为

$$\begin{aligned} & \min\{P_{LP}(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Theta})\} \\ & \text{s. t. } \begin{cases} P_{HP}(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Theta}) \leq P'_{HP}, R_{HP} + R_{LP} \leq R_c \\ \mathbf{\Gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N] \\ \mathbf{\Theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N] \\ \theta_i \in [1, +\infty), i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知, $\mathbf{\Gamma}$ 和 $\mathbf{\Theta}$ 是实现不等保护的关键参数.

2.3 关键参数推导和确定

2.3.1 $\mathbf{\Gamma}$ 的推导 考虑包含 N 个子载波的点到点的 OFDM 无线传输系统, t 时刻第 i 个子载波的瞬时信噪比 $\eta_i(t)$ 可以表示为^[11]

$$\eta_i(t) = |H_i(t)|^2 \bar{\eta}(t) \quad (9)$$

式中: $H_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个子载波的信道频域传输函数; $\bar{\eta}(t)$ 表示 t 时刻接收到的 OFDM 符号的平均信噪比.实际中, $\bar{\eta}(t)$ 可通过盲估计或发送导频符号的方法获得^[12].由式(9)可知,对于给定的时刻 t ,若 $\bar{\eta}(t)$ 已知,则 $H_i(t)$ 可用于表征子载波的信道质量.给定子载波的调制方式,对应传输数据的误码率由 $\eta_i(t)$ 决定.以 $M=16$ 、采用 Gray 码映射的 QAM 为例,第 i 个子载波采用相干解调时的误码率为^[8]

$$P_e = 0.75Q((0.8\gamma_i(t))^{1/2}) \quad (10)$$

式中: $\gamma_i(t)$ 表示第 i 个子载波的平均比特信噪比, $\gamma_i(t)$ 与 $\eta_i(t)$ 之间的关系为

$$\gamma_i(t) = \eta_i(t) - 10\lg(\lg M) \quad (11)$$

由式(9)和式(11)可知,已知 $H_i(t)$ 和 $\bar{\eta}(t)$,即可求得 t 时刻各子载波的 $\gamma_i(t)$,进而得到 $\mathbf{\Gamma}$.

2.3.2 $\mathbf{\Theta}$ 的确定方法 本文采用如下方法确定各子载波的 HQAM 调制参数矢量 $\mathbf{\Theta}$.已知 $Q(x)$ 存在上界^[13]

$$Q(x) \leq 0.5\exp(-x^2/2) \quad x \geq 0 \quad (12)$$

将式(12)代入式(3),有

$$\begin{aligned} P_{MSB} & \leq \\ & 0.25(\exp(-(\theta+2)^2\gamma/B) + \exp(-\theta^2\gamma/B)) \end{aligned} \quad (13)$$

令 $X = \exp(-\gamma)$,代入式(13),有

$$\begin{aligned} 4P_{MSB} & \leq X^{(2+\theta)^2/B} + X^{\theta^2/B} \leq \\ & X^{(2+\theta)^2/B} (1 + X^{-4(\theta+1)/B}) \end{aligned} \quad (14)$$

由于 $X^{-4(\theta+1)/B} \gg 1$, 从而有

$$4P_{\text{MSB}} \leq X^{(2+\theta)^2/B} X^{-4(\theta+1)/B} = \exp(-\theta^2 \gamma/B)$$

(15)

式(15)两边取对数,可得

$$-\frac{\ln 4P_{\text{MSB}}}{\gamma} \geq \frac{\theta^2}{(1+\theta)^2 + 1}$$

(16)

当式(16)取等号时,方程大于 1 的解即为给定 γ 和误码率上限 P_{MSB} 条件下的调制参数 θ_{MSB} . 同理,可得对应 LSB 误码率上限的调制参数 θ_{LSB} ,则对应式(8)所示不等保护方法中第 i 个子载波的优化 HQAM 调制参数为

$$\theta_{\text{opt},i} = \max(\theta_{\text{MSB}}, \theta_{\text{LSB}})$$

(17)

由式(12)可知, $\theta_{\text{opt},i}$ 接近最优,从而优化的 HQAM 调制参数矢量可表示为 $\boldsymbol{\theta}_{\text{opt}} = [\theta_{\text{opt},1}, \theta_{\text{opt},2}, \dots, \theta_{\text{opt},N}]$.

2.4 A-HQAM 不等保护方法的实现

由接收端估计出各个子载波的 $H_i(t)$ 和 $\bar{\eta}(t)$,即可求出 $\mathbf{I}$,再结合视频码流中 HP 和 LP 数据的误码率上限,可自适应地确定 $\boldsymbol{\theta}_{\text{opt}}$,从而使式(8)所示的不等保护方法的目标函数最小,即

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_{\text{opt}} &= \underset{\boldsymbol{\theta}}{\operatorname{argmin}} \{P_{\text{LP}}(\boldsymbol{\theta})\} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} P_{\text{HP}}(\boldsymbol{\theta}) \leq P'_{\text{HP}} \\ R_{\text{HP}} + R_{\text{LP}} \leq R_c \\ \boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N] \end{cases} \end{aligned}$$

(18)

A-HQAM 不等保护方法的实现过程如下:

- (1)利用各子载波的 $H_i(t)$ 以及 $\bar{\eta}(t)$ 分别确定各子载波的平均比特信噪比 $\gamma_i(t)$;
- (2)根据所确定的 $\gamma_i(t)$ 和视频码流中 HP 和 LP 数据的误码率上限,求出对应的 HQAM 调制参数 $\theta_{\text{opt},i}$,并反馈给发送端;
- (3)发送端将视频码流中 HP 和 LP 数据分别映射到 HQAM 符号的 MSB 和 LSB,并使用过程(2)中求得的调制参数 $\theta_{\text{opt},i}$ 将 HQAM 符号调制到 OFDM 符号各子载波上,经无线信道进行传输;
- (4)当信道发生时变时,重复过程(1)~(3),直至码流发送完毕.

3 仿真实验及分析

本文采用 H. 264/AVC 参考软件 JM15.1^[14] 作为仿真实验平台. 选择 4 个 QCIF 格式的标准视频序列 Foreman、Mobile、Mother&Daughter (M&D)、News 进行仿真. 采用 IPPP 的预测结构,帧率为 15 帧/s,每个序列编码 100 帧,码流的平均

速率控制在 100 kb/s. 视频码流中 HP 和 LP 数据的误码率上限 P_{HP} 和 P_{LP} 分别设为 10^{-6} 和 10^{-4} ^[7],每个序列进行 50 次仿真,使用平均峰值信噪比评估恢复视频质量. 仿真实验中 OFDM 系统包含 $N=256$ 个子载波,信道传输速率 $R_c=100$ kb/s. 信道模型选用 SUI-3 无线信道模型^[15].

基于上述仿真条件,将本文提出的 A-HQAM 方法与 3 种已有方法——同等保护方法 (EEP)、固定 HQAM 调制参数的不等保护方法 (C-HQAM)^[5] 及采用训练机制确定 HQAM 调制参数的不等保护方法 (W-HQAM)^[7] 进行比较,仿真结果如图 4 所示.

图 4 所示结果表明,由于本文所提出的 A-HQAM 不等保护方法根据子载波的信道质量自适应地确定各子载波所使用的 HQAM 调制参数,充分考虑了不同子载波之间的由于无线信道的频率选择性和时变特性导致的信道质量差异,因而恢复视频质量在平均信噪比较低 (10~24 dB) 时优于已有的 EEP、C-HQAM 以及 W-HQAM 方法,而在信噪比较高 (24~28 dB) 时优于 W-HQAM 方法,与 EEP 和 C-HQAM 方法相当.

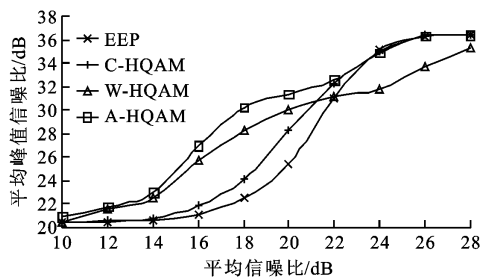
表 1 给出了 4 种方法在所仿真平均信噪比范围内恢复视频的平均峰值信噪比. 由表 1 可知,本文所提出的 A-HQAM 不等保护方法相比于现有方法均有显著的增益.

表 1 不同视频序列采用 4 种方法时的平均峰值信噪比

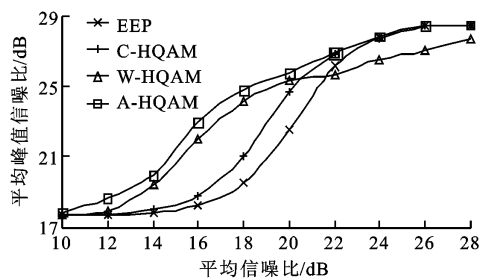
序列	平均峰值信噪比/dB			
	EEP	C-HQAM	W-HQAM	A-HQAM
Foreman	26.93	27.58	28.16	29.41
Mobile	22.42	22.93	23.35	24.15
M&D	30.90	31.24	30.90	32.09
News	31.78	32.05	31.41	32.79

4 结 论

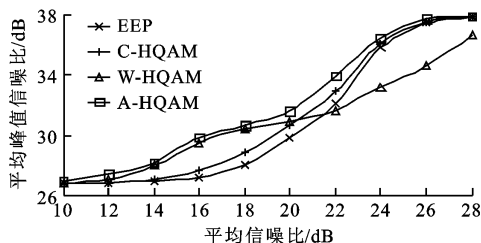
由于 H. 264/AVC 视频码流中不同部分对恢复视频质量具有不等重要性,因此在考虑带宽受限无线信道的频率选择性和时变特性基础上,提出了一种 A-HQAM 不等保护方法,根据子载波的信道质量和视频数据的重要性自适应地确定所使用的 HQAM 调制参数,为视频码流中重要性不等的部



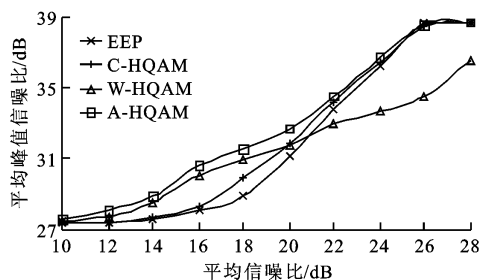
(a)Foreman 序列



(b)Mobile 序列



(c)M&D 序列



(d)News 序列

图4 不同视频序列采用4种方法的仿真结果比较

分提供不等保护。仿真结果表明,与已有方法相比,本文提出方法能够有效地降低无线信道频率选择性和时变特性的影响,改善恢复视频质量。

参考文献:

[1] STOCKHAMMER T, HANNUKSELA M M. H. 264/AVC video for wireless transmission [J].

IEEE Wireless Communications, 2005, 12(4):6-13.

- [2] WANG Yao, CHAU L P, YAP K H. Bit-rate allocation for broadcasting of scalable video over wireless networks [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2010, 56(3): 288-295.
- [3] GHANDI M M, BARMADA B, JONES E V, et al. Wireless video transmission using feedback-controlled adaptive H. 264 source and channel coding [J]. IET Communications, 2009, 3(2):172-184.
- [4] 宋彬,李子诺,秦浩. 视频通信中的选择性重传技术 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 82-87.
- SONG Bin, LI Zinuo, QIN Hao. Selective retransmission technology in video communications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 82-87.
- [5] BARMADA B, GHANDI M M, JONES E V, et al. Prioritized transmission of data partitioned H. 264 video with hierarchical QAM [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(8): 577-580.
- [6] YOONG C C, SZE W L, KOMIYA R. A low complexity hierarchical QAM symbol bits allocation algorithm for unequal error protection of wireless video transmission [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(3):1089-1097.
- [7] LIU Yongheng, HENEGHAN C. Optimization of hierarchical modulation for use of scalable media [EB/OL]. (2010-01-13)[2010-07-22]. <http://downloads.hindawi.com/journals/asp/2010/942638.pdf>.
- [8] ANDREA G. Wireless communications [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005: 127-180.
- [9] VITTHALADEVUNI P K, ALOUINI M S. Bit error probability of 4/M-QAM hierarchical constellations [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 47(3):228-239.
- [10] Telecommunication Standardization Sector. ITU-T recommendation H. 264 advanced video coding for generic audiovisual services [S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Standardization Sector, 2010.
- [11] KELLER T, HANZO L. Adaptive multicarrier modulation; a convenient framework for time-frequency processing in wireless communications [J]. Proceeding of the IEEE, 2000, 88(5):611-640.
- [12] REN Guangliang, ZHANG Huining, CHANG Yilin. SNR estimation algorithm based on the preamble for OFDM systems in frequency selective channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(8): 2230-2234.
- [13] CHIANI M, DARDARI D, SIMON M K. New expo-

nential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2 (4):840-845.

[14] Heinrich Hertz Institute. VCEG reference software version JM15.1 [CP/OL]. (2009-7-7) [2010-05-23]. http://iphone.hhi.de/suehring/tml/download/old_jm/jm15.1.zip.

[15] ERCEG V, HARI K V S, SMITH M S, et al. Channel model for fixed wireless applications [DB/OL]. (2003-06-27)[2010-05-23]. http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf.

(编辑 刘杨)