

基于互信息量的 CMMB 系统物理层抽象算法^①

胡兰生^{②**} 张 超^{③*}

(* 西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

(** 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 211189)

摘 要 为了准确和高效地评估在构建下一代广播电视网(NGB)中起重要作用的中国移动多媒体广播(CMMB)系统的链路传输性能,根据 CMMB 协议标准,利用大量高斯信道下的仿真数据拟合出了接收比特互信息率(RBIR)与误帧率(FER)之间的一一对应关系,然后给出了基于互信息量的 CMMB 物理层抽象算法——能在解调的输入端计算平均互信息量的 RBIR 算法,并利用开发的 CMMB 物理链路仿真平台在巴西信道模型中验证了该抽象算法的准确性:能够精确地预测当前无线信道的质量。

关键词 中国移动多媒体广播(CMMB),物理层抽象,接收比特互信息率(RBIR),巴西信道

0 引 言

随着信息业务需求量的不断增长,我国广电和电信产业界正在积极推进频谱利用率和传输速率更高的下一代广播电视网(next generation broadcasting, NGB)^[1-3]。863 重大项目“三网融合演进技术与系统研究”的开展,重点是研究 NGB 技术。NGB 将充分利用特高频(UHF)频段的频谱资源,实现无线广播和双向通信的融合,满足用户的综合业务需求^[4],因而,建设 NGB 系统,将成为新的业务需求。中国移动多媒体广播(China mobile multimedia broadcasting, CMMB)系统将会在我国 NGB 的无线网建设中发挥重要作用。CMMB 系统成本低,并且能快速地在全国实现信号覆盖,因此,NGB 系统中的无线广播传输部分要以 CMMB 系统为主干网络^[5,6]。

建设 NGB 系统之前需要对系统性能进行仿真和评估。为了提高仿真的效率,一般分为链路级仿真和系统级仿真两部分。物理层链路仿真主要进行无线链路的性能统计。由于物理层技术较为复杂,计算量大,系统级仿真直接调用物理层仿真模块将

会产生巨大的计算开销和仿真延时。因此,需要对无线链路的物理层性能进行抽象,直接根据信道状态评估链路性能,避免大量的物理链路计算。物理层抽象算法能够精确地评估链路性能,易于实现,具有较好的适用性^[7]。目前,在多载波移动通信系统中常用的物理层抽象算法有指数有效信干噪比映射(exponential effective SINR mapping, EESM)算法和互信息有效信干噪比映射(mutual information based effective SINR mapping, MI-ESM)算法,其中 MI-ESM 算法包括每比特平均互信息(mean mutual information per bit, MMIB)算法和接收比特互信息率(received bit mutual information rate, RBIR)算法。EESM 算法简单,并且适合于信道编码采用 Turbo 码的系统,但缺点是参数与所使用的调制编码方式密切相关,且要求所有的子载波都必须使用相同的调制编码方式,这导致了算法的局限性^[8]。MMIB 算法在解调的输出端计算互信息量,需要调整的参数较多,计算起来较为复杂^[9]。EESM 算法和 MMIB 算法适合于最小均方误差检测器,在使用最大似然检测时,这两种算法对链路性能评估的准确性会有所下降^[10]。RBIR 算法在解调的输入端计算平均互信息量,此算法不仅具有较高的准确性,而且具有很

① 863 计划(2011AA01A105),国家自然科学基金(61102082),教育部博士点基金(20110201120011)和东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2011D14)资助项目。

② 男,1988 年生,硕士;研究方向:无线通信理论,三网融合;E-mail: cjhs8988@stu.xjtu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: chaozhang@mail.xjtu.edu.cn
(收稿日期:2013-12-04)

强的通用性。另外, CMMB 系统采用码长较长的低密度奇偶校验码(low density parity check code, LDPC), 基于互信息量的物理层抽象算法更加准确^[11,12]。基于上述分析, 本文以国家 863 项目课题“下一代广播电视网(NGB)无线宽带接入技术研究”为依托, 提出了一种适用于 CMMB 系统的基于互信息量的物理层抽象算法——接收比特互信息率(RBIR)算法。该抽象算法的准确性已通过仿真得到了验证。

1 CMMB 系统

CMMB 物理层发射与接收信号流程图如图 1 所示。

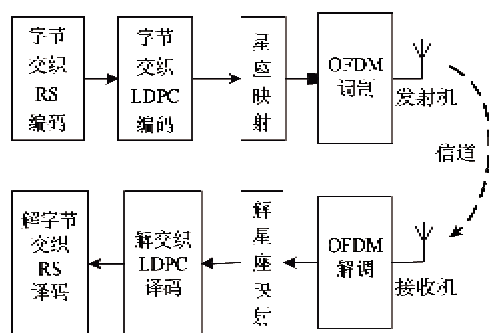


图 1 CMMB 发射机与接收机框图

CMMB 系统中物理层采用内外两级编码交织技术^[13]。外编码为里德-所罗门(Reed-Solomon, RS)码, 采用长度为 255 的系统码截短码, 可选用的编码方案为 RS(240, 176)、RS(240, 192)、RS(240, 224)、RS(240, 240)。数据经过 RS 编码之后进行字节交织。内编码采用低密度奇偶校验码(LDPC), 本系统采用的 LDPC 码有 1/2 和 3/4 两种码率可供选择。CMMB 系统有三种调制方式, LDPC 编码后的比特流经比特交织后映射为二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)或 16QAM(正交幅度调制)符号流发送。星座映射之后的数据流进行正交频分复用调制(OFDM), $N_c = 4096$ 为每个 OFDM 符号子载波的个数。星座映射之后的符号记为 $\{X(k)\}$, 由频域经逆快速傅立叶变换(IFFT)转换到时域, 时域信号记为 $\{x(n)\}$, 即

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N_c-1} X(k) e^{j2\pi kn/N_c}, \quad n = 0, 1, \dots, N_c - 1 \quad (1)$$

插入保护间隔(guard interval, GI)后, 信号可以表示为

$$x_g(n) = \begin{cases} x(N_c + n), & n = -N_g, -N_g + 1, \dots, -1 \\ x(n), & n = 0, 1, 2, N_c - 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $N_g = 512$ 为 GI 的长度, 信号经成形滤波后经过信道, 接收信号表示为

$$y_g(n) = h(n) * x_g(n) + \omega(n) \quad (3)$$

其中 $h(n)$ 为信道冲激响应, $\omega(n)$ 为加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN), $*$ 表示求卷积。在接收端, 去除保护间隔, 得到 $y(n)$, 然后进行快速傅立叶变换(FFT)得到 $Y(k)$, 则 $Y(k)$ 可以表示为

$$Y(k) = H(k)X(k) + W(k), \quad k = 0, 1, \dots, N_c - 1 \quad (4)$$

其中, $H(k)$ 为信道冲激响应在第 k 个子载波对应的频域响应, $W(k)$ 为 $\omega(n)$ 的傅立叶变换^[4]。接收到的信号经 OFDM 解调之后, 根据星座映射方式计算出似然比进行 LDPC 软判决译码, 本文采用的是最常见的置信传播(belief propagation, BP)算法^[15]; 经 LDPC 译码之后得到的数据进行 RS 译码, RS 译码算法采用复杂度较低的欧几里得算法^[16]。

2 用于物理层抽象的 RBIR 算法

2.1 接收比特互信息率(RBIR)的定义

略去式(4)中的下标号, 数据传输模型可表示为 $y = Hx + n$, 其中 n 为零均值的复高斯白噪声。根据信息论的知识, 对平均互信息进行讨论^[12]。假设发送信号先验等概, 得到接收信号 y , 根据贝叶斯公式可得发送信号被判定为 $x_i (i = 1, 2, \dots, M, M$ 为星座映射中星座点数目)的后验概率为

$$P(x_i | y) = \frac{P(y | x_i)}{\sum_{j=1}^M P(y | x_j)} \quad (5)$$

由 n 为零均值的复高斯白噪声, 可得

$$P(x_i | y) = \frac{\exp\left(-\frac{|D_i| |y|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{j=1}^M \exp\left(-\frac{|D_j| |y|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

其中 $D_i | y$ 为接收信号 y 经均衡后到星座点 x_i 的距离, σ^2 为噪声功率。

由平均互信息量的定义, 得每个子载波上传输信号的归一化平均信息量为

$$RI = \frac{1}{\log_2 M_{x,Y}} E(\log_2 MP(x_i | y)) \quad (7)$$

$E(\cdot)$ 表示求期望,将式(6)代入式(7)化简可以得到

$$\begin{aligned} RI &= \frac{1}{M \log_2 M} \sum_{i=1}^M E \left[\log_2 \frac{MP(y | x_i)}{\sum_{j=1}^M P(y | x_j)} \right] \\ &= \frac{1}{M \log_2 M} \sum_{i=1}^M E \left[\log_2 \frac{M \exp(-\frac{D_i | y}{\sigma^2})}{\sum_{j=1}^M \exp(-\frac{D_j | y}{\sigma^2})} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中 RI 代表某个子载波信道在给定的星座映射方式下,发送符号被正确检测的后验概率的归一化平均互信息量。

在多载波通信中,使用 OFDM 技术,各个子载波上可以并行传输多路信号,则所传输信号的平均互信息 RBIR 的计算公式如下:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} RI_i \\ &= \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{1}{M \log_2 M} \sum_{i=1}^M E \left[\log_2 \frac{M \exp(-\frac{D_i | y}{\sigma_i^2})}{\sum_{j=1}^M \exp(-\frac{D_j | y}{\sigma_j^2})} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(9)可以得出平均互信息 RBIR 与信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 之间的关系,但式(9)过于复杂,很难求出其期望值,在这里取大量数据求均值来代替期望值,进行仿真可得到归一化平均互信息量和信干噪比之间的关系如图 2 所示。从图可以看出,归一化平均互信息量与编码方式及码率无关,只和星座映射方式有关;在相同的信干噪比下,星座映射调制阶数越低,归一化平均互信息量越大;在相同星座映射方式下,信干噪比越大,归一化平均互信息量越大。

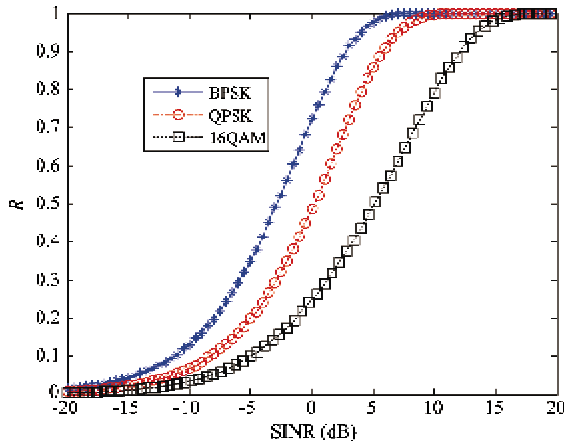


图 2 归一化平均互信息量和信干噪比的关系

2.2 RBIR 抽象算法

误帧率 (frame error rate, FER) 与 SINR 是一一对应的。由图 2 可知,接收比特互信息率 (RBIR) 与 SINR 也是一一对应的,则 FER 与 RBIR 也是一一对应的,所以可以找出一种映射方法,使得由 RBIR 能够直接映射出 FER。RBIR 和 FER 满足如下关系式^[17]:

$$FER = \left(\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{R - a}{b} \right) \right)^c \quad (10)$$

其中 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为余补误差函数, a, b, c 是与调制编码方式有关的参数,通过参数拟合可以得到其数值,本文后面部分将介绍如何进行参数拟合。

物理层抽象算法的目标是根据当前的无线信道响应及平均噪声功率对信道质量进行实时估计,即实时获得当前信道状态的误帧率。物理层抽象算法可以替代实际链路系统仿真中的编解码等过程,从而较快地得到当前信道质量状况。

在实际的无线通信系统中,无线信道质量状况由多个 OFDM 子载波的频率响应及平均噪声功率所决定,可以建立误帧率 (FER) 与无线信道频率响应的模型为

$$FER = FER_{\text{pre}}(H_1, H_2, \dots, H_{N_c}, \sigma^2) \quad (11)$$

其中 $H_i (i = 1, 2, \dots, N_c)$ 为无线信道频率响应, σ^2 为平均噪声功率。

然而,随着 N_c 的增大,式(11)会变得异常复杂,我们将很难找到这样的函数关系式。为了解决这个问题,物理层抽象算法被提了出来。设各个子载波上的信干噪比为

$$\gamma_i = \frac{|H_i|^2}{\sigma^2} \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (12)$$

转换成 dB 值为 $SINR_i$, 物理层抽象算法将 N_c 个子载波上的信干噪比 $SINR_i (i = 1, 2, \dots, N_c)$ 映射成有效信干噪比 $SINR_{\text{eff}}$, 然后根据 $SINR_{\text{eff}}$ 查找加性高斯白噪声 (AWGN) 链路级性能曲线,找到 FER 的估计值,即:

$$FER = FER_{\text{AWGN}}(SINR_{\text{eff}}) \quad (13)$$

AWGN 链路级性能曲线是在 AWGN 信道下通过链路级仿真得到的 FER 性能曲线^[7]。RBIR 算法将 N_c 个子载波上的信干噪比 $SINR_i (i = 1, 2, \dots, N_c)$ 直接映射成归一化平均信息量 RBIR, 然后代入式(10),即可得到误帧率 FER。

2.3 参数拟合

在使用物理层抽象算法时,可以由式(13)所示查找 AWGN 链路级性能曲线得到 FER,但是这种方

法复杂度较高,而用式(10)计算 FER 比较方便,并且可以简化 RBIR 算法流程。在使用 RBIR 算法之前,需要通过仿真拟合获得式(10)中的参数,使得由式(10)计算出的 FER 与查找 AWGN 链路级性能曲线得到的结果一致。按照图 3 所示流程图,通过仿真拟合可以获得这些参数^[18,19]。

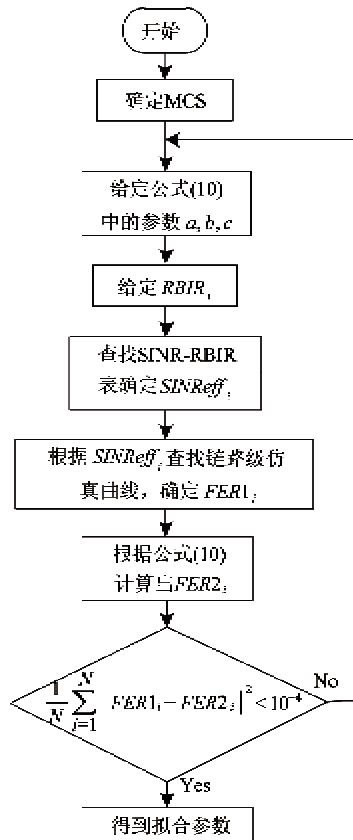


图 3 参数拟合流程

CMMB 系统中有 24 种调制编码方式(modulation and coding scheme, MCS)可供选择,本文从其中选取了具有代表性的 5 种 MCS,如表 1 所示。选取的 5 种 MCS 涵盖了不同的星座映射方式及码率。表 1 给出的是对 CMMB 进行仿真的各 MCS 的参数,表 2 给出的是在各 MCS 情况下通过拟合仿真得到的拟合参数。

表 1 CMMB 各 MCS 参数			
MCS	RS 码	LDPC 码	星座映射
MCS1	(240,176)	(9216,3,6)	BPSK
MCS12	(240,240)	(9216,3,6)	QPSK
MCS17	(240,176)	(9216,3,6)	16QAM
MCS20	(240,240)	(9216,3,6)	16QAM
MCS24	(240,240)	(9216,3,12)	16QAM

表 2 CMMB 各 MCS 拟合参数			
MCS	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
MCS1	0.5951	0.0043	7.04
MCS12	0.6305	0.0166	9.6
MCS17	0.6072	0.0037	7.04
MCS20	0.6458	0.0167	9.6
MCS24	0.8409	0.0100	14.4

图 4 给出了仿真拟合结果。观察此图可以看出,表 2 列出的参数可以很好地拟合 RBIR 和 FER 之间的映射关系。

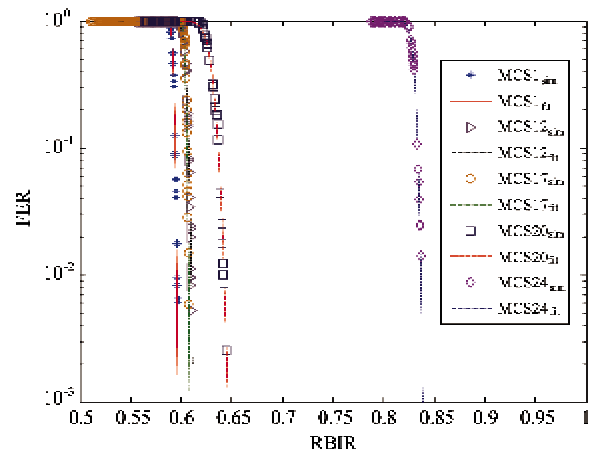


图 4 仿真拟合结果

2.4 RBIR 算法流程

总结 2.1-2.3 中的内容,我们将 RBIR 算法流程描述如下:

- (1) 由式(12)计算出各个子载波上的信干噪比 γ_i , 转换成 dB 值 $SINR_i$;
- (2) 查找图 2 中的 SINR-R 曲线,找出各子载波对应的归一化平均互信息量 RI_i ;
- (3) 由式(9)计算出 RBIR;
- (4) 由式(10)计算得到 FER。

3 仿真实验

3.1 仿真环境

基于中国移动多媒体广播(CMMB)技术标准中 8MHz 系统带宽场景下进行仿真。发射机接收机框图如图 1 所示。外编码采用 RS 码,内编码采用低密度奇偶校验码(LDPC),选取与 2.3 部分相同的调制编码方式(MCS)。无线信道模型采用巴西信道(Brazil channel)。巴西信道是巴西广播电视协会在

2000 年对面向数字电视地面广播的标准 DVB-T(数字电视广播)、ISDB-T(综合业务数字广播)及 AT-SC-T(高级电视系统委员会)进行场外实测得出的广播信道模型,是目前进行数字电视地面广播仿真的权威无线信道模型。巴西信道共有 A-E5 种模型,分别对应不同的信道环境,本文中使用的 A 类信道模型^[20]。CM-MB 链路仿真主要参数设置见表 3。

表 3 CM-MB 链路仿真参数

仿真参数	参数值
多天线设置	单天线系统
时隙长度	25ms
带宽	8MHz
OFDM 子载波数	4096
信道估计算法	理想信道估计
无线信道模型	Brazil A
移动速度	5km/h, 30km/h
MCS	MCS1, MCS12, MCS17, MCS20, MCS24
LDPC 译码算法	BP 算法

3.2 仿真结果

按照信道参数,随机生成大量的信道,对 CM-MB 系统进行链路级仿真,并同时根据 RBIR 算法流程对无线信道质量进行预测,得到的仿真结果如图 5 和图 6 所示。

在图 5 和图 6 中,曲线表示误帧率(FER)的预测值,离散点表示通过实际链路仿真得到的仿真值,可以看出,FER 随着信干噪比(SINR)的增大而降低,并且曲线很陡峭,这是因为 CM-MB 系统采用

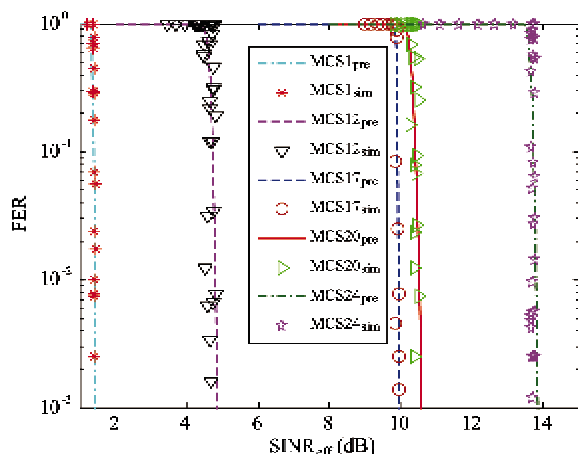


图 5 Brazil A 5kmph 信道 RBIR 算法仿真结果

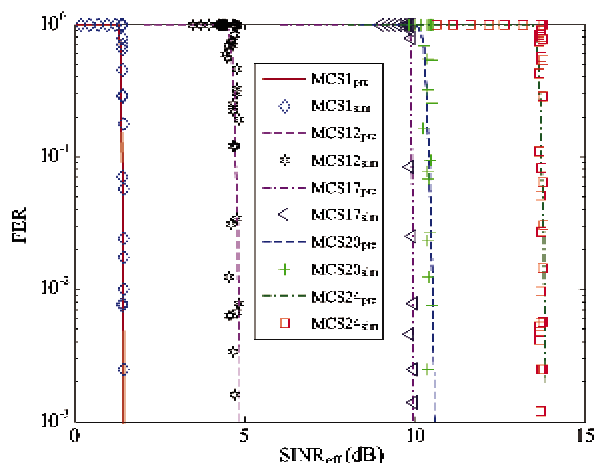


图 6 Brazil A 30kmph 信道 RBIR 算法仿真结果

的 LDPC 码编码长度较长,每个帧的数据量很大。另外,从图中可以看出,随着调制阶数的增加及码率的增大,误帧率曲线右移,系统的误帧率性能下降。由图 5 和图 6 两图可知,用 RBIR 物理层抽象算法对无线信道质量状况进行预测,其结果和通过实际仿真得到的误帧率非常接近。观察图 5 和图 6 中各条曲线可知,在各调制编码方式(MCS)条件下,RBIR 物理层抽象算法都能非常准确地对无线信道质量进行预测。比较图 5 和图 6,在移动速度较低的情况下,多普勒频移的干扰很小,不会对系统造成太大的影响。

4 结论

本文研究了基于接收比特互信息率(RBIR)物理层抽象算法,并利用中国移动多媒体广播(CM-MB)系统物理链路仿真平台对其进行了仿真验证。由仿真结果可以看出,此算法能够精确地预测当前信道质量状况。通过理论分析得出,RBIR 与 FER 是一一对应的,而且通过进行仿真拟合,确立了两者的映射关系。本文还给出了 RBIR 算法的具体流程,并基于中国移动多媒体广播 CM-MB 的技术标准中 8MHz 系统的带宽场景进行了仿真,仿真结果验证了 RBIR 算法能准确地对无线信道质量进行预测,还证明了该算法具有普遍适用性。进一步的研究会将 RBIR 算法应用于 NGB-W 系统中小区的场景下,推广 RBIR 算法在多天线系统中的应用,使得 RBIR 算法能较好地应用于 NGB-W 或其它的无线通信系统中。

参考文献

- [1] 赵子忠. 对于下一代广播电视网络建设的思考. 中国广播, 2011(12):15-17
- [2] 王汝言, 代琦, 吴大鹏. 中国下一代广播电视网. 数字通信, 2010(6):24-26
- [3] 李华. 下一代广播电视网络(NGB)技术融合及自主创新发展研究. 广播电视信息, 2013(3):33-37
- [4] 封松林, 解伟. 下一代广播电视网无线系统. 中兴通讯技术, 2011, 17(4):14-18
- [5] 杨庆华. 中国移动多媒体广播标准体系介绍. 现代电视技术, 2008(2):14-18
- [6] 王凤军. 对下一代广播电视网(NGB)构建方式和发展规划的探讨. 信息通信, 2011(4):173-174
- [7] 孟超, 衡伟, 王汗青. 异构网融合中基于 RBIR 的物理层抽象算法. 东南大学学报, 2012, 42(4):588-592
- [8] 汪海明, 艾萨·图玛拉. 多载波通信系统仿真中的 EESM 和 MI-ESM 方法. 电视技术, 2006, 32(3):49-54
- [9] 熊磊, 张金宝. 物理层抽象中平均互信息的精确计算方法. 重庆邮电大学学报, 2011, 23(3):271-275
- [10] Chen X, Wan L, Gao Z Y, et al. The application of the EESM and MI-based link quality models for rate compatible LDPC codes. In: Proceedings of the Vehicular Technology Conference, Baltimore, USA, 2007. 1288-1292
- [11] Chen X, Fei Z, Kuang J, et al. The application of the MI-based link quality model for link adaptation of rate compatible LDPC codes. In: Proceedings of the Vehicular Technology Conference, Baltimore, USA, 2008. 754-758
- [12] Zheng H M, Wu M, Choi Y S, et al. Link performance abstraction for ML receivers based on RBIR metrics. US Patent: 20100064185A1, 2010
- [13] GY/T 200.1-2006 移动多媒体广播 第一部分: 广播信道帧结构、信道编码和调制
- [14] 王文博, 郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术. 第二版. 北京: 人民邮电出版社, 2007. 48-49
- [15] Gallager R G. Low Density Parity Check Codes: [Ph. D Dissertation]. Cambridge: MIT Press, 1963. 30-35
- [16] 鲁清. RS 码硬判决迭代译码算法及其仿真. 通信与广播电视, 2011, 3:1-5
- [17] 张金宝, 郑洪明, 谈振辉. 基于平均互信息量的物理层抽象算法. 高技术通讯, 2009, 19(6):558-863
- [18] 聂永萍, 张林, 张忠培. 一种 MIMO 系统的链路到系统仿真映像方法. 数字通信, 2009, 36(1):56-59
- [19] 王琛琛, 薛新华, 唐苏文. EESM 中最佳 β 值的确定. 通信技术, 2009, 42(12):215-216
- [20] Hatae D L, Eisencraft M, Akamine C, et al. OFDM Systems for Brazilian Digital Television channels. In: Proceedings of the 10th OFDM Workshop, Hamburg, Germany, 2005

A mutual-information based algorithm for physical layer abstraction in CMMB

Hu Lansheng^{* **}, Zhang Chao^{*}

(^{*} School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(^{**} National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 211189)

Abstract

In order to accurately, efficiently evaluate the link transmission quality of the China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB) system which plays an important role in the construction of the Next Generation Broadcasting (NGB) in China, according to the standard of the CMMB protocol, the one-to-one correspondence between the received bit mutual information rate (RBIR) and the frame error rate (FER) was obtained through the fitting using a mass of Gaussian channel simulation data, and then, the mutual information-based algorithm for physical layer abstraction in CMMB, called the RBIR algorithm, was put forward. The accuracy of the proposed algorithm was verified by using the CMMB simulation platform under the Brazil channel, i. e. when using the algorithm, the transmission quality of a current wireless channel can be accurately predicted.

Key words: China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB), physical layer abstraction, received bit mutual information rate (RBIR), Brazil channel