

# 多参考运动补偿预测中的误码传播和编码效率

郁 杨, 朱雪龙

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 视频信号在基于运动补偿预测的混合编码后, 在不可靠信道中传输时会遇到严重的误码传播问题. 本文从理论上分析了一种广义的运动补偿预测技术——多参考运动补偿预测的误码传播和编码效率, 得到了由误码传播引起的失真和编码效率的理论极限, 并给出了某些假设条件下理论极限的值. 通过理论分析和对几种特定的基于多参考运动补偿预测的混合编码方案在 INTERNET 丢包环境中的仿真, 我们发现采用多参考运动补偿预测可以同时减小误码传播失真和提高编码效率.

**关键词:** 多参考运动补偿预测; 误码传播; 编码效率

**中图分类号:** TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)12A-1863-05

## Propagation Distortion and Coding Efficiency in Multi-hypothesis Motion Compensated Prediction

YU Yang, ZHU Xue-long

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** When hybrid coded video with motion compensated prediction (MCP) is transmitted over unreliable channels there exists the annoying problem of error propagation. In this paper we analyze the performance of coding efficiency and the distortion caused by propagation error, i. e., propagation distortion, in multi hypothesis MCP, and give its theoretical performance limit. Then the numerical results under some assumptions are given. Both the theoretical performance and the simulation results of some specific multi hypothesis MCP schemes under the typical packet loss environment of Internet show that with multi hypothesis MCP both the propagation distortion can be attenuated and the coding efficiency can be improved.

**Key words:** multi hypothesis motion compensated prediction; propagation distortion; coding efficiency

### 1 引言

运动补偿预测(Motion Compensated Prediction, MCP)技术有效地利用了视频信号的时间相关性, 几乎所有的视频编码标准都采用了这一技术. 但是, 基于这一技术进行编码后的视频信号在不可靠信道上传输时, 会遇到严重的误码传播问题. 这种误码传播对图象质量产生很大的影响, 误码传播经过几次累积, 图象质量就会变得令人无法忍受<sup>[1]</sup>.

目前, 针对 MCP 中的误码传播问题主要有三类技术<sup>[1,2]</sup>:

(1) 把预测限制在没有受到误码影响的图象区域; (2) 用帧内编码模式取代用前帧进行预测的帧间编码模式; (3) 通过泄漏预测(leaky prediction)来减小预测信号, 从而减小由预测引起的误码传播. 第一类技术往往需要一个反馈信道, 这对于多点应用或实时性应用是不适用的. 对于后两种技术, 虽然已经有了一些实用的技术方法<sup>[3~5]</sup>, 但是迄今为止还没有关于由误码传播所引起的失真(下简称传播失真)和编码效率的理论性能的分析.

本文从理论上分析了视频通信中基于 MCP 技术的视频

信号的传播失真和编码效率的性能. 这里的分析将不局限于只利用一个运动补偿块进行预测的 MCP, 而是针对一种广义的 MCP, 即采用多个运动补偿块的线性组合作为预测信号的多参考运动补偿预测(multi hypothesis motion compensated prediction)<sup>[6]</sup>. 理论分析的结果说明采用多参考 MCP 可以提高视频信号的抗误码能力. 我们提出了两种不同的多参考 MCP 技术, 并在 INTERNET 的丢包环境下进行仿真, 仿真结果和理论结果是一致的.

下一节将对所讨论的问题进行建模, 并得到传播失真和编码效率的理论极限. 第三节将给出在某些假设条件下的数值结果. 第四节给出基于两种不同的多参考 MCP 技术的编码算法的仿真结果. 最后给出有关结论.

### 2 问题的建模和解

图 1 给出了一个采用  $N$  个运动补偿信号进行预测即基于  $N$  参考 MCP 的视频编解码器. 设当前帧  $n$  中的采用帧间模式编码的宏块  $s(x, y, n)$  的预测块为  $p(x, y, n)$  (这里  $(x, y)$  定义在二维平面上相应块的采样点上), 如果利用运动补偿信

号的线性组合作为当前块的预测信号, 则

$$p(x, y, n) = f(x, y, n) \odot c(x, y, n) = \sum_{i=1}^N c_i(x, y, n) * f_i(x, y, n) \quad (1)$$

其中:  $c(x, y, n) = [c_1(x, y, n) \dots c_N(x, y, n)]^T$  为一列矢量,  $c_i(x, y, n)$  表示当前块的第  $i$  个运动补偿信号;  $f(x, y, n)$  为一行矢量  $f(x, y, n) = [f_1(x, y, n) \dots f_N(x, y, n)]$ ;  $f_i(x, y, n)$  表示作用于  $c_i(x, y, n)$  的空间滤波器;  $\odot$  表示矢量卷积运算, 即

$$[a_1 \ a_2] \odot [b_1 \ b_2]^T = a_1 * b_1 + a_2 * b_2$$

\* 表示二维空域上的卷积运算, 即

$$a_1(x, y) * a_2(x, y) = \sum_{u, v} a_1(u, v) \cdot a_2(x - u, y - v)$$

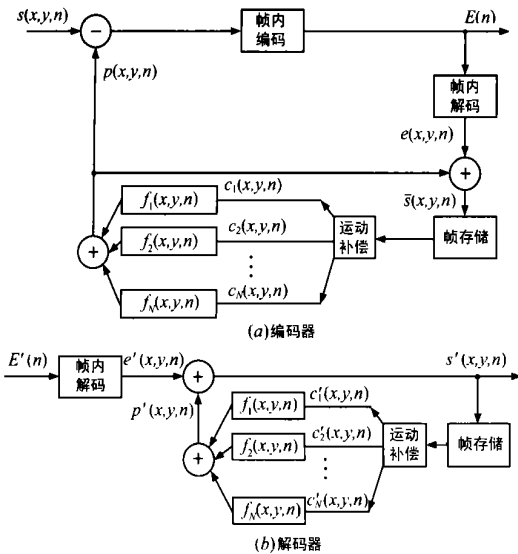


图 1 基于多参考运动补偿预测的视频编解码器

当编码后的视频信号在不可靠信道上传输时, 可能会受到传输差错的影响. 记  $\bar{s}(x, y, n)$  为编码端的重建信号,  $s'(x, y, n)$  为接收端的解码信号, 当前解码信号的传输失真为  $d_t(x, y, n)$ , 则

$$d_t(x, y, n) = s'(x, y, n) - \bar{s}(x, y, n)$$

如果当前的编码信息  $E'(n)$  以概率  $p$  发生传输差错, 且这时的误码掩盖信号为  $s_c(x, y, n)$ , 则  $d_s(x, y, n)$  以概率  $p$  取误码掩盖失真  $d_c(x, y, n)$ , 其中

$$d_c(x, y, n) = s_c(x, y, n) - \bar{s}(x, y, n)$$

如果接收到的信息  $E'(n)$  没有发生传输差错, 则  $d_s(x, y, n)$  完全由运动补偿信号  $c'_i(x, y, n) (1 \leq i \leq N)$  的传输失真决定. 记第  $i$  个运动补偿信号的传输失真为  $d_{tc,i}(x, y, n)$ , 即有

$$d_{tc,i}(x, y, n) = c'_i(x, y, n) - c_i(x, y, n)$$

成立. 所以  $d_t(x, y, n)$  以概率  $1-p$  满足

$$d_t(x, y, n) = f(x, y, n) \odot d_e(x, y, n)$$

其中  $d_e(x, y, n) = [d_{e,1}(x, y, n) \dots d_{e,N}(x, y, n)]^T$ .

总之, 传输失真  $d_t(x, y, n)$  为一随机信号, 且可以表示为如下形式:

$$d_t(x, y, n) = \begin{cases} d_c(x, y, n), & \text{以概率 } p \\ d_p(x, y, n), & \text{以概率 } 1-p \end{cases}$$

其中  $d_p(x, y, n) = f(x, y, n) \odot d_e(x, y, n)$  (2)

事实上  $d_p(x, y, n)$  即为传播失真, 它由滤波器  $f(x, y, n)$  所决定. 由上述分析可以看出, 传输失真由误码掩盖失真和传播失真两部分组成, 误码掩盖失真主要由误码掩盖的方法决定, 而传播失真主要由误码传播引起, 由滤波器  $f(x, y, n)$  决定.

我们希望通过合理地选取滤波器  $f(x, y, n)$  使得在满足一定的编码效率的条件下, 传播失真最小. 由于预测误差

$$e(x, y, n) = s(x, y, n) - p(x, y, n) \quad (3)$$

的方差  $\sigma_e^2(n)$  往往被用来衡量预测编码的效率, 所以问题可以简化为求解最优滤波器  $f_{opt}(x, y, n)$ , 使得在  $\sigma_e^2(n)$  一定的条件下, 传播失真  $d_p(x, y, n)$  的方差  $\sigma_{dp}^2(n)$  最小, 即

$$f_{opt}(x, y, n) = \text{Arg min}_f L(\lambda) \quad (4)$$

其中  $L(\lambda) = \sigma_{dp}^2(n) + \lambda \sigma_e^2(n) (\lambda \geq 0)$  (5)

在视频信号的理论分析中, 为简化分析往往把视频信号作为平稳信号处理[7, chapt. 4]. 所以这里也认为  $s(x, y, n)$  和  $c(x, y, n)$  都为平稳信号, 它们的功率谱密度分别为  $\Phi_{ss}(\omega_x, \omega_y, n)$  和  $\Phi_{cc}(\omega_x, \omega_y, n)$ , 且  $s(x, y, n)$  和  $c(x, y, n)$  联合平稳, 互谱密度为  $\Phi_{sc}(\omega_x, \omega_y, n)$ . 进一步, 可假定运动补偿信号的失真  $d_c(x, y, n)$  也是平稳的, 其功率谱密度为  $\Phi_{tc}(\omega_x, \omega_y, n)$ . 则由式(2)得传播失真的功率谱密度为

$$\Phi_{dp}(\omega_x, \omega_y, n) = F(\omega_x, \omega_y, n) \Phi_{tc}(\omega_x, \omega_y, n) F^H(\omega_x, \omega_y, n) \quad (6)$$

其中  $F(\omega_x, \omega_y, n)$  是  $f(x, y, n)$  在空间域上的二维傅立叶变换. 为书写简便, 在不会引起混淆的情况下, 下文中将省略变量  $(\omega_x, \omega_y, n)$ . 于是由式(1)和(3)得预测误差  $e(x, y, n)$  的功率谱密度为

$$\Phi_{ee} = \Phi_{ss} - \Phi_{sc} F^H - F \Phi_{cs} + F \Phi_{cc} F^H \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(5), 则有

$$L(\lambda) = \frac{1}{4\pi^2} \left[ \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (\Phi_{dp} + \lambda \Phi_{ee}) d\omega_x d\omega_y \right] \quad (8)$$

由式(6)、(7)和式(8), 解式(4)得

$$F_{opt} = \lambda \Phi_{sc} (\Phi_c + \lambda \Phi_{cc})^{-1} \quad (9)$$

于是由式(3)可得, 当  $F = F_{opt}$  时预测误差的方差为

$$\sigma_e^2(n) = \left( \frac{1}{4\pi^2} \right) \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (\Phi_{ss} - \Phi_{sc} F_{opt}^H - F_{opt} \Phi_{cs} + F_{opt} \Phi_{cc} F_{opt}^H) d\omega_x d\omega_y$$

为了能方便地看到编码码率的变化, 这里定义  $\Delta R = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log_2 \left( \frac{\Phi_{ee}}{\Phi_{ss}} \right) d\omega_x d\omega_y$  为编码效率. 事实上  $\Delta R$  表示了相同编码失真情况下, 采用预测编码和采用帧内编码的码率之差.

综上, 编码效率和传播失真的理论极限性能为

$$\Delta R = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log_2 \left[ 1 - \frac{\Phi_{sc} F_{opt}^H}{\Phi_{ss}} - \frac{F_{opt} \Phi_{cs}}{\Phi_{ss}} - \frac{F_{opt} \Phi_{cc} F_{opt}^H}{\Phi_{ss}} \right] d\omega_x d\omega_y \quad (10)$$

$$\sigma_{dp}^2 = \left( \frac{1}{4\pi^2} \right) \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F_{opt} \Phi_{tc} F_{opt}^H d\omega_x d\omega_y \quad (11)$$

为了得到对上述关系的直观了解, 下一节将给出编码效率和

传播失真在某些假设条件下的值。

### 3 某些假设条件下的值

为了方便计算式(10)和(11),我们将作一些假设。在这些假设下,一方面可以方便地获得编码效率和传播失真的值,另一方面这些假设也能合理地反映视频信号的统计特点,所得的结果对于编码器的设计仍然具有指导意义。

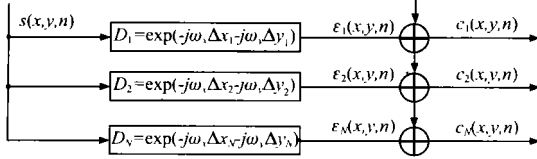


图2 源视频信号及其运动补偿信号的关系模型

首先对于源视频信号及其运动补偿信号,采用图2所示的模型<sup>[6]</sup>。图2中  $D_i = \exp(-j\omega_x \Delta x_i - j\omega_y \Delta y_i)$  表示在运动估计中所引入的估计误差,  $\varepsilon_i(x, y, n)$  表示源视频信号和运动补偿信号之间的差。然后作如下假设:(1)考虑到诸多统计独立的因素对运动估计误差的影响,假设运动估计误差  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  满足高斯分布

$$p(\Delta x_i, \Delta y_i) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}{2\sigma^2}\right]$$

且  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  和  $(\Delta x_j, \Delta y_j)$  ( $i \neq j$ ) 无关;(2)  $\varepsilon_i(x, y, n)$  与  $\varepsilon_j(x, y, n)$  ( $i \neq j$ ) 不相关,且  $\varepsilon_i(x, y, n)$  与  $c_j(x, y, n)$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ),  $s(x, y, n)$  不相关;(3)运动补偿信号的传输失真  $d_{e,i}(x, y, n)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 也互不相关;(4)图象信号的空间功率谱密度取如下形式<sup>[7, chapt. 4]</sup>

$$\Phi_s = \frac{2\pi}{\omega_0^2} \left(1 + \frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{\omega_0^2}\right)^{-3/2}$$

且其功率归一化为单位功率;(5)  $\varepsilon_i(x, y, n)$  和  $d_{e,i}(x, y, n)$  的功率谱都是平坦的,即  $\Phi_{\varepsilon_i} = \sigma_{\varepsilon_i}^2$ ,  $\Phi_{d_{e,i}} = \sigma_{d_{e,i}}^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

由此可得

$$\Delta R = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log_2 \left[ \frac{1 - E[\mathbf{D}^H] \mathbf{F}^H - \mathbf{F} E[\mathbf{D}]}{1 + \mathbf{F} \left( E[\mathbf{D} \mathbf{D}^H] + \frac{\Phi_{\varepsilon}}{\Phi_s} \right) \mathbf{F}^H} \right] d\omega_x d\omega_y \quad (12)$$

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \mathbf{F} \Phi_{\varepsilon} \mathbf{F}^H d\omega_x d\omega_y \quad (13)$$

其中  $\mathbf{D} = [D_1 \ D_2 \ \dots \ D_N]^T$ ,  $\Phi_{\varepsilon}$  为  $\varepsilon(x, y, n) = [\varepsilon_1(x, y, n) \ \varepsilon_2(x, y, n) \ \dots \ \varepsilon_N(x, y, n)]^T$  的功率谱密度,且

$$\mathbf{F} = \mathcal{N} E \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{\varepsilon_1}^2}{\Phi_s} \\ \frac{\sigma_{\varepsilon_2}^2}{\Phi_s} \\ \dots \\ \frac{\sigma_{\varepsilon_N}^2}{\Phi_s} \end{bmatrix}$$

$$+ \lambda \left[ E \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix}^H + \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{\varepsilon_1}^2}{\Phi_s} \\ \frac{\sigma_{\varepsilon_2}^2}{\Phi_s} \\ \dots \\ \frac{\sigma_{\varepsilon_N}^2}{\Phi_s} \end{bmatrix} \right]^{-1}$$

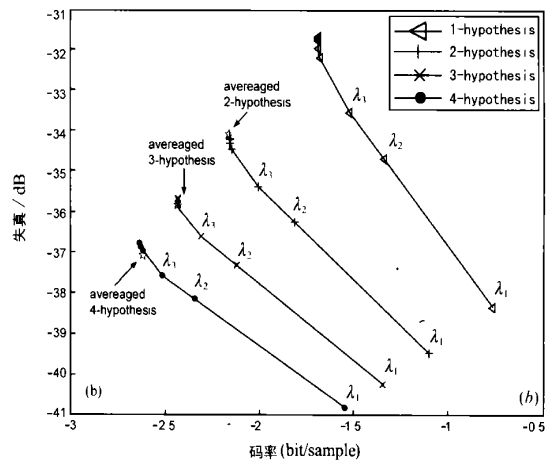
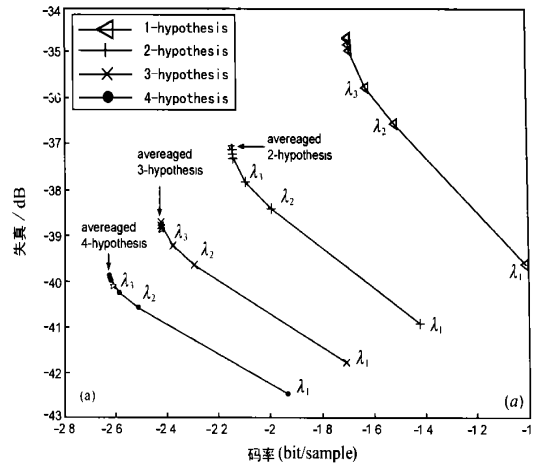


图3 当运动估计误差为半像素。(a)  $10\log_{10} \sigma_{\varepsilon}^2 = -40\text{dB}$ ,  $\sigma_{e_c}^2 / \sigma_{\varepsilon}^2 = 4$ , (b)  $10\log_{10} \sigma_{\varepsilon}^2 = -40\text{dB}$ ,  $\sigma_{e_c}^2 / \sigma_{\varepsilon}^2 = 8$ , 时传播失真和编码效率的理论极限,这里  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ 。

图3给出了根据式(12)和(13)得出的  $\sigma_{\varepsilon}^2$  和  $\sigma_{e_c}^2 / \sigma_{\varepsilon}^2$  取不同值的情况下  $N$  参考 MCP ( $N = 1, 2, 3, 4$ ) 在运动估计误差为半像素时(即相当于  $\sigma^2 \doteq 1/48$ )的传播失真和编码效率的数值关系。其中  $\sigma_{\varepsilon}^2$  的大小取决于当前编码信号及其运动补偿信号间的相关程度,  $\sigma_{e_c}^2 / \sigma_{\varepsilon}^2$  的大小取决于传输信道的状况。图3(a)和(b)所示是传播失真和编码效率的关系。

由图3可以得到如下的结论。

(1)合理地设计预测编码中的滤波器,在相同编码效率下,采用多参考MCP的传播失真要小于采用单参考MCP的传播失真。各种通过优化码率和传播失真来选择编码模式的技术(例如G. Côté<sup>[3]</sup>提出的算法),实际上就是选择恰当的采用 Intra 模式编码的图象区域,使得编码的性能接近这里得到的

传播失真和编码效率的理论性能极限:

(2) 图 3 也标出了多参考平均 MCP 即当  $F = \left[ \frac{1}{N} \quad \frac{1}{N} \quad \dots \quad \frac{1}{N} \right]$  时的传播失真和编码效率的性能. 可以看出, 在这种情况下, 随着  $N$  值的增加, 编码效率得到了提高, 同时传播失真也减小了. 另外, 可以看出, 多参考平均 MCP 的性能与理论性能极限十分接近, 是一种实际的接近理论性能极限的编码方案. 下一节, 我们将用基于多参考平均 MCP 的编码器对实际的视频信号进行编码, 并进行仿真;

(3) 采用多参考 MCP, 在相同传播失真下, 编码效率可以得到提高; 在相同编码效率下, 传播失真也得到减小; 在相同的  $\lambda$  值下, 即相同的码率和传播失真的折衷下, 随着参考数目的增加, 编码效率在提高, 传播失真在减小. 所以采用多参考 MCP, 可以同时提高编码效率和抗误码差错的能力. 当然, 这是以额外的存储量和运算复杂度为代价的.

### 4 仿真结果

通过修改 H. 263 编码器以实现基于多参考 MCP 的编码器. 然后, 比较了分别采用简单优化的二参考 MCP 方案和二参考平均 MCP 方案的视频编码器的性能, 最后比较了采用  $N$  ( $N = 2, 3, 4$ ) 参考平均 MCP 的编码器的性能.

首先, 这里将描述简单优化的二参考 MCP 实现方案, 此时

$$F_i(\omega_x, \omega_y, n) = C_i, i = 1, 2$$

这里  $C_i(i = 1, 2)$  为一常数. 进一步, 把  $C_i$  限制在集合  $S = \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$  上, 动态地选择  $C_i$  在  $S$  上的取值, 使得下述拉格朗日代价函数得到优化

$$C_i = \underset{C_i \in S}{\text{Arg min}} \sigma_{dp}^2(C_i) + \lambda R(C_i), i = 1, 2$$

其中  $R$  为编码的码率,  $\sigma_{dp}^2$  按下式进行估计

$$\sigma_{dp}^2 \doteq C_1^2 \sigma_{ic,1}^2 + C_2^2 \sigma_{ic,2}^2$$

为减小估计  $\sigma_{ic,i}^2(i = 1, 2)$  的复杂度, 在估计时只考虑了运动补偿信号的误码掩盖失真. 显然这样的简化会引起性能上一定的损失.

仿真中所用的测试序列是标准的 150 帧 QCIF 图象序列, 帧率为 10 帧/秒. 仿真在典型的 INTERNET 的丢包环境下进行, 丢包率取了 5%, 10%, 15% 和 20% 这几种情况. 对于每种丢包率, 进行 30 次仿真, 最后计算亮度分量的 PSNR 的平均值. 每帧的编码码流打在一个 RTP/UDP/IP 包中, 这样每丢一个包就意味着一帧编码信息的全部丢失. 发生丢包时, 将进行时间上的误码掩盖.

#### 4.1 简单优化二参考 MCP 和二参考平均 MCP 的仿真结果比较

图 4 为对 Foreman 序列分别采用二参考平均 MCP 和简单优化二参考 MCP 在丢包率为 5%, 10%, 15% 和 20% 时的性能比较. 图 4 显示, 采用二参考平均 MCP 的性能和简单优化二参考 MCP 的性能十分接近, 在丢包率较高时, 前者的 PSNR 甚至略高于后者. 这一方面是简单优化二参考 MCP 在优化时为减小运算复杂度进行的一系列的简化造成的, 另一方面是由

于需要对预测系数  $C_i(i = 1, 2)$  的额外编码造成的.

#### 4.2 $N$ 参考( $N = 2, 3, 4$ )平均 MCP 和标准编码的比较

图 5 是 Carphone 序列在采用了  $N(N = 2, 3, 4)$  参考平均 MCP 编码和 H. 263 标准(没有加入任何选项)编码下的性能比较. 其中 H. 263 标准编码可以看成是采用单参考 MCP 的编码方法. 如图 5 所示, 随着参考数目的增加, PSNR 得到了显著的提高. 但是当参考数目超过 2 时, PSNR 的提高开始变小, 而参考数目为 3 和 4 的性能几乎是相同的. 这是因为随着参考数目的增加, 多参考 MCP 的编码效率的提高速度变慢了, 同时所要编码的运动矢量的数目也增加了. 所以, 考虑到编码效率, 抗传播误码的能力和运算复杂度, 二参考平均 MCP 是实际应用中的一种理想的选择.

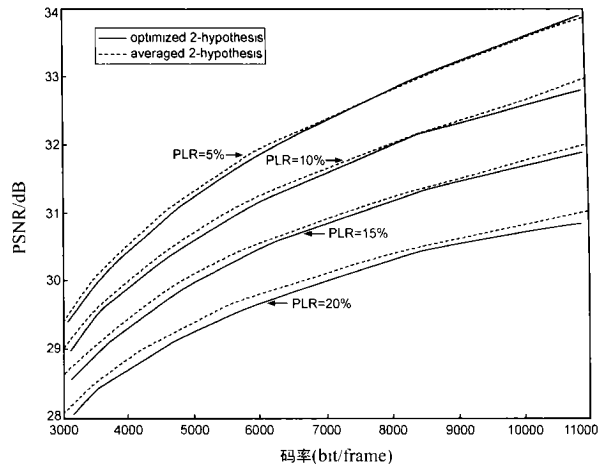


图 4 二参考平均 MCP 和优化二参考 MCP 性能比较 (Foreman 序列)

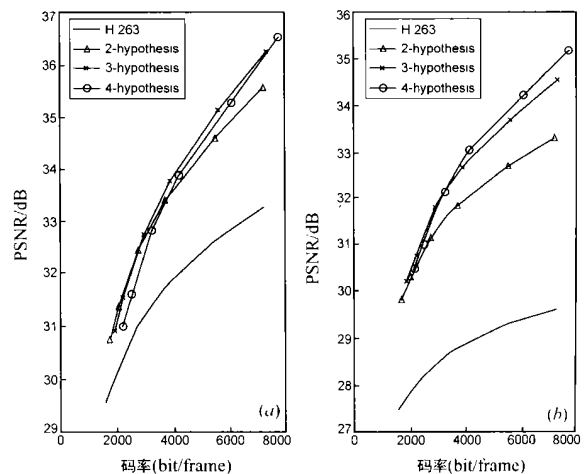


图 5 标准 H. 263 编码器和分别采用二参考平均 MCP, 三参考平均 MCP, 四参考平均 MCP 的编码器在 (a) PLR = 5%, (b) PLR = 15% 下的性能比较 (Carphone 序列)

### 5 结论

本文得到了多参考 MCP 的传播失真和编码效率的理论性能极限. 由理论极限在某些假设条件下的值我们发现采用多参考 MCP 编码在编码效率得到了提高的同时, 抗误码传

的能力也得到了提高. 我们对基于几种不同的多参考 MCP 方法的视频编码器进行了仿真, 仿真结果不仅和理论分析得到的结果一致, 而且表明二参考平均 MCP 是在综合考虑编码效率, 抗误码传播的能力和运算复杂度等诸因素下的一种较好的选择.

#### 参考文献:

- [ 1 ] B Girod, N Häber. Feedback based error control for mobile video transmission [J]. Proceedings of IEEE, 1999, 87( 10): 1707- 1723.
- [ 2 ] Ming-Ting Sun, Amy R Reibman. Compressed Video Over Networks [M]. Marcel Dekker, 2000.
- [ 3 ] G Côte, F Kossentini. Optimal intra coding of blocks for robust video communication over the internet [J]. Signal Processing: Image Communication, 1999, 15( F2): 25- 34.
- [ 4 ] Judy Y Liao, John Villasenor. Adaptive intra block update for robust transmission of H. 263 [J]. IEEE Trans. Circuit and Syst. for Video Tech., 2000, 10( 1): 30- 35.
- [ 5 ] P Haskell, D Messerschmitt. Resynchronization of motion compensated video affected by ATM cell loss [A]. Proc. IEEE Int. Conf. On Acoustics, Speech, and Signal Processing ( ICASSP ) [ C ], San Francisco, CA, USA, March 1992, 3: 545- 548.

[ 6 ] B Girod. Efficiency analysis of multi-hypothesis motion compensated prediction for video coding [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2000, 9( 2): 173- 183.

[ 7 ] V Bhaskaran, K Konstantinides. Image and Video Compression Standards Algorithms and Architectures [M]. Norwell, MA: Kluwer, 1995.

#### 作者简介:



郁 杨 女. 1975 年出生于上海市. 1997 年毕业于武汉华中理工大学( 现更名为华中科技大学) 电信系, 获学士学位. 现为清华大学电子工程系信号与信息处理专业博士研究生, 研究方向为视频编码和通信.

朱雪龙 1958 年毕业于清华大学无线电系, 毕业后留校工作, 于 1963 年获硕士学位. 自 1958 年参加工作起, 先后从事遥感、PCM、数据传输、差错控制编码、语音信号处理、调制理论、移动通信等领域的研究工作. 1985 到 1986 年, 去英国爱丁堡大学电气工程系作访问学者. 1995 年, 去韩国 KAIST 大学作客座教授. 目前为清华电子工程系教授. 研究兴趣包括数字信号处理及应用、语音和图象压缩和数字移动通信等领域.