

地面数字电视广播系统中的视频传输容错算法

李楚翔, 王章磊, 陆建华

(清华大学电子工程系, 微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 本文提出了一套针对 MPEG-2 视频压缩数据传输的自适应容错机制, 用于支持地面数字电视广播系统中的可靠电视传输. 具体地, 本文首先提出了一种基于时域隐藏和块匹配的差错隐藏算法, 在保持较好隐藏效果的同时, 通过有效地减小搜索窗口而显著降低了算法复杂度. 同时, 针对独立 I 帧图像还提出了独特的差错隐藏方法. 将这两种差错隐藏算法与低运算复杂度的空域/时域运动检测方法相结合, 又衍生出一种自适应空/时域结合差错隐藏算法. 仿真结果表明, 本文提出的算法即使在很高的数据差错率情况下, 仍然可以实现地面数字电视广播系统中可靠而高效的视频传输.

关键词: 差错隐藏; MPEG-2; 地面数字电视广播 (DTTB)

中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1812-04

Digital Terrestrial TV Broadcasting System with Enhanced Robustness

LI Churxiang, WANG Zhang lei, LU Jiannhua

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

Abstract: In this paper, an error concealment scheme is developed to enhance the robustness of digital terrestrial TV broadcasting (DTTB). This scheme includes a low complexity error concealment algorithm, an effective reception for isolated I pictures, and an efficient detection of spatial/temporal activity. Specifically, the error concealment algorithm combines temporal motion compensation with block matching methodology to achieve effective concealment while keeping low complexity with small size of search window for block matching. Extensive simulations have verified that, even with high packet error rate, the proposed scheme may achieve efficient and robust video broadcasting over DTTB systems.

Key words: error concealment; MPEG-2; DTTB

1 引言

美国、欧洲和日本已经制订了相应的地面数字电视广播 (Digital Terrestrial TV Broadcasting: DTTB) 标准^[1-3], 中国也在积极组织制订适合于中国国情的地面数字电视广播协议. 在地面数字广播中, 阴影效应、多径衰落、多普勒频移以及各种噪声和干扰会使接收信号功率产生很大的波动, 其波动幅度可以达到 10dB 甚至更高^[4], 这将严重影响数字视频信号传输的可靠性. 地面数字电视广播中的视频信源采用 MPEG-2 压缩标准, 然而现行标准中并没有包含对抗地面传播差错的信源编译码方法的有关细节. 因此, MPEG-2 容错传输算法成为 DTTB 系统的一个热点研究方向^[4, 5].

已有的研究论文中提出了一些视频容错传输算法. 零向量补偿与时域运动补偿是两种简单而有效的差错隐藏算法, 对于低码率视频压缩数据有较好的差错隐藏效果^[6], 但并不适用于 MPEG-2 高码率视频图像的场景^[4]. 块匹配差错隐藏算法可以达到很好的差错恢复效果, 但其实用性由于高运算复杂度而受到限制^[5]. 此外, 对于独立 I 帧图像 (指图像序列第一帧或场景变化后的第一个 I 帧) 通常难以应用时域差错隐藏而只能采用空域差错隐藏技术, 而这一技术在细节较多

的图像部分往往会产生明显的“块效应”^[4-7].

在本文中, 我们针对地面数字电视广播系统的具体应用引入了一种自适应视频传输容错机制. 首先, 在时域差错隐藏与块匹配方法的基础上提出了一种有效的低复杂度差错隐藏算法, 它通过有效地减小搜索窗口来降低算法复杂度, 并结合时域补偿来达到很好的隐藏效果; 同时, 根据视频压缩数据的特性, 提出了针对独立 I 帧图像的传输差错隐藏方法. 进一步结合以上两种差错隐藏算法、空域内插算法^[11]以及空域/时域运动检测方法, 提出了一种空域/时域相结合的自适应差错隐藏机制. 采用 MPEG-2 标准测试图像序列的仿真结果表明, 本文提出的算法可以在保持低实现复杂度的同时, 显著提高实时视频传输的可靠性.

本文的其余部分安排如下: 第二节给出基于 MPEG-2 的视频容错传输系统框架; 第三节描述了两种新的差错隐藏算法; 第四节提出空/时域相结合的自适应差错隐藏方法; 第五节给出仿真结果; 第六节总结全文.

2 视频容错接收系统框架

为了与各种地面数字电视广播系统相兼容, 本文提出的视频传输容错算法仅仅与信源解码器和信道解码器有关. 图 1

是本文提出的视频容错接收系统框架,其中包含三个主要部分:差错检测、再同步和差错隐藏。差错检测是容错传输的基础与先决条件,只有及时准确地发现差错,才能进行有效的容错处理。本系统结合里德-所罗门(RS)信道解码器和 MPEG-2 信源解码器来实现尽可能准确的差错检测^[4,9]。在检测到差错时,MPEG-2 信源解码器很可能已经处于解码失步状态,尽快地恢复解码同步才能够正确地继续进行图像解码,并防止误码扩散。为与 MPEG-2 标准完全兼容,我们采用一种简单的再同步方法,即将每个片(Slice)^[4]作为最小同步单位。但是,在这种简单的再同步机制下,即使 1 比特的误码也可能造成整个 Slice 图像解码的失步^[5,9]。这时为了进行图像重建,需要进行有效的差错隐藏。本文将基于图 1 所示的接收系统重点讨论差错隐藏算法。

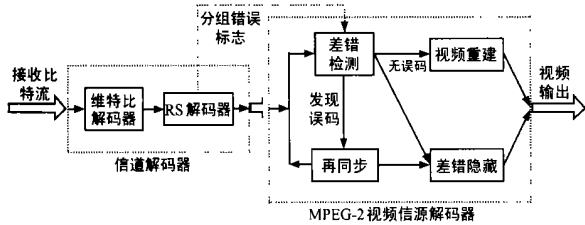


图 1 DTTB 视频容错接收系统

3 差错隐藏算法

本节中,首先结合时域运动补偿和块匹配方法,提出一种针对预测帧及非独立 I 帧的差错隐藏算法,然后介绍一种针对独立 I 帧图像的差错隐藏方法。

3.1 块匹配/运动补偿时域差错隐藏算法

BMMG-TEC (Block Matching and Motion Compensation Temporal Error Concealment) 是基于时域运动补偿与块匹配算法的针对预测帧和非独立 I 帧(图像序列的第一帧以及场景切换后的第一帧称为独立 I 帧)的差错隐藏算法,包括以下两个步骤:

- (1) 当前帧运动补偿,根据当前帧中周围宏块的运动预测信息来估计错误宏块的运动补偿矢量^[4,9];
- (2) 参考帧块匹配搜索,将运动补偿得到的补偿位置作为搜索的起点在参考帧中进行块运动搜索,找到匹配位置后隐藏错误宏块^[5]。

当前帧运动补偿根据周围宏块运动预测矢量的平均值来得到错误宏块运动补偿矢量,如式(1)所示。

$$MV_{EMB} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k MV_i \quad (1)$$

其中: k 为错误宏块周围预测宏块的个数; MV_i 为错误宏块(Erreous Macro block, EMB)周围第 i 个宏块的运动预测矢量。若已知错误宏块采用预测编码时, MV_i 选用当前帧内错误宏块周围宏块的预测矢量;若已知错误宏块采用帧内编码时, MV_i 选取参考帧内包含当前位置及周围宏块的预测矢量。常规时域运动补偿算法直接利用运动补偿矢量 MV_{EMB} 指向的参考帧宏块来隐藏错误宏块^[4,9]。BMMG-TEC 算法则进一步用块匹配搜索来改善隐藏效果。图

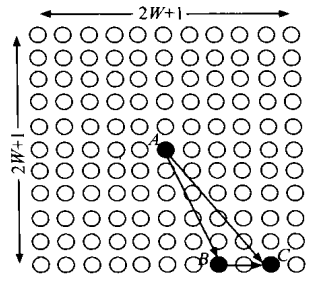


图 2 参考帧块匹配搜索示意图

图 2 为块匹配搜索步骤的示意图,其中 A 假定为当前错误宏块的位置, B 为由当前帧运动补偿得到的位置, MV_{EMB} (AB)表示运动预测步骤得到的补偿矢量。块匹配将以 B 为起始位置,在以 B 为中心的上、下、左、右 W 个像素点组成的搜索窗内,按平均绝对值误差准则(Mean Absolute Difference, MAD)对各位置进行匹配检测。MAD 的定义如式(2)所示,

$$MAD(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |F_c(k+i, l+j) - F_p(k+x+i, l+y+j)| \quad (2)$$

其中: $F_c(\dots)$ 表示当前帧位于错误宏块上方或下方的宏块(以下称当前检测块)的像素值; $F_p(\dots)$ 表示参考帧中以 B 为中心的搜索区域中的宏块上方或下方宏块(以下称搜索块)的像素值; (k, l) 代表当前检测块左上角像素的坐标; (x, y) 表示搜索块相对于搜索起始位置的偏移, N 为宏块的边长(像素个数)。通过计算搜索范围内的全部位置的 MAD,可以得到具有最小 MAD 值的位置(C)及相应的匹配矢量 $MV_{BM}(BC)$ ^[5],并用位置 C 上的宏块对错误宏块进行隐藏。

差错隐藏的效果可以根据补偿位置与最佳补偿位置间的偏差(即补偿矢量与最佳补偿矢量间的偏差)来衡量。本文中,我们采用全屏搜索匹配算法得到的匹配矢量作为最佳补偿矢量。对于运动剧烈的图像,用常规时域运动补偿算法得到的补偿矢量 $MV_{EMB}(AB)$ 与最佳补偿矢量之间偏差较大;而 BMMG-TEC 算法通过匹配矢量 $MV_{BM}(BC)$ 对 $MV_{EMB}(AB)$ 作进一步修



图 3 常规时域补偿算法效果



图 4 矢量替代时域补偿算法效果



图 5 BMMG-TEC 的差错隐藏效果

正,得到的补偿矢量, $MV_{BM}(BC) + MV_{EMB}(AB)$, 与最佳补偿矢量十分接近. 图 3~ 5 显示了不同差错隐藏算法对“Flower”序列进行差错隐藏恢复后其中一帧的效果, 信道误码造成的分组丢失率(Packet Error Rate, PER)为 3×10^{-2} . 图 3 为采用常规时域补偿的效果. 图 4 为采用文[4]中的矢量替代时域补偿的效果. 图 5 为本文提出的 BMMG-TEC 的效果. 通过对比发现, BMMG-TEC 算法有效地消除了常规时域补偿和矢量替代时域补偿算法重建后出现的明显的错乱现象.

块匹配搜索算法的优劣的另一个衡量尺度是运算复杂度. 如果采用全搜索算法, 设搜索窗口为距搜索中心上、下、左、右 W 个像素的正方形, 则搜索点数为:

$$SS = (2 * W + 1)^2 \quad (3)$$

由于 MPEG-2 主要应用于具有快速运动的图像的高质量压缩, 使得需要搜索的范围通常较大, 因而为了直接得到最佳匹配矢量, 其搜索窗口往往较大. 而 BMMG-TEC 由于先进行了当前帧时域运动补偿, 为在参考帧得到修正的匹配矢量 MV_{BM} , 搜索窗口要小得多, 因而其运算复杂度也大大降低了. 表 1 举例比较了两种算法的搜索点数, 可以看出, BMMG-TEC 具有很低的运算复杂度.

表 1 BMMG-TEC 与常规搜索算法的算法复杂度比较

	BMMG-TEC	常规搜索
搜索窗口参数 W	2	7
搜索点数 SS	25	255

3.2 反向时域差错隐藏

BMMG-TEC 算法可以适用于帧内编码帧 (I picture) 和帧间预测编码帧 (P/B picture), 但是对于图像序列的第一帧以及场景切换后的第一帧, 即独立 I 帧, 无法利用帧间时域相关性. 另一方面, 如果采用空域差错隐藏算法^[5, 10], 在细节较多的图像部分会产生明显的“块效应”^[4].

值得注意的是, 对于独立 I 帧, 虽然与前面帧的时域相关性很小, 但与后面帧的时域相关性可能较大. 利用这一特点, 可以进行反向时域隐藏. 具体方法如下: 将错误的帧暂时存下来, 待接收到下一个 I 帧时, 进行时域反方向的差错隐藏, 即根据后面的帧来恢复前面的帧, 其具体恢复方法与前面提到的正方向差错隐藏方法类似. 需要指出的是, 这种反方向差错隐藏方法会带来一定的延时, 但是由于 MPEG-2 中每 12 帧插入一个 I 帧, 且 DTTB 系统要求的帧速率为每秒 25~ 30 帧, 因此这种延时很小, 不会影响正常的收视效果.

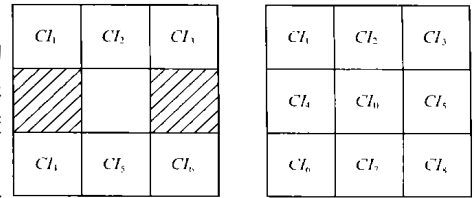
4 自适应空/时域结合差错隐藏机制

在本节中, 首先介绍一种新的空/时域运动检测方法. 然后在此基础上, 提出一种自适应空/时域结合差错隐藏机制来进一步提高差错隐藏效果.

4.1 空/时域运动预测方法: 帧内/帧间编码预测

空/时域运动检测是一种用于判断图像空域和时域相关性的有效方法^[4, 11], 并可以以此为依据来选择正确的差错隐藏算法, 提高差错图像恢复的有效性. 文[11]中提出了一种有效的空/时域运动检测方法, 但其算法复杂度较高. 下面提出一种低复杂度的空/时域运动检测方法, 即帧内/帧间编码检测方法.

如图 6 所示, 帧内/帧间编码预测根据宏块的编码方式来对空域和时域的相关性进行判断. 如果一个宏块采用帧间预测编码,



(a)当前帧中对 EMB 进行检测 (b)参考帧中对相同位置宏块进行检测

图 6 帧内/帧间编码方式估计

那么它的空间相关性相应较大; 相反, 如果宏块采用帧内编码, 它的空间相关性较小. 编码标识用来指示一个宏块的编码方式, 用 CI 表示. 如果 $CI = 0$, 则表示宏块采用帧内编码, 如果 $CI = 1$, 则表示宏块采用帧间编码. 对于预测编码帧, 帧内/帧间编码预测利用错误宏块周围的 6 个宏块来对错误宏块进行预测. 如图 6(a) 中所示, 错误宏块为 EMB, $CI_1 \sim CI_6$ 为周围 6 个宏块的编码标识. 具体预测算法如下:

$$CI_{EMB} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{i=1}^6 A_i \geq 4 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

由于在 MPEG-2 中错误宏块左右两边的宏块一般也会丢失, 所以这两个宏块不加以利用. 这种预测方法对于 P 或 B 帧十分有效. 对于非预测帧, 又非独立 I 帧, 虽然所有宏块都是帧内编码方式, 但可以利用前一帧相同位置及其周围的 9 个宏块对当前宏块进行预测. 如图 6(b) 所示, A_0 为前一帧内与错误宏块相同位置的宏块的编码标识, $A_1 \sim A_8$ 为其周围 8 个宏块的编码标识. 具体预测算法如下:

$$CI_{EMB} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{i=0}^8 A_i \geq 6 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

4.2 空/时域相结合的自适应差错隐藏机制

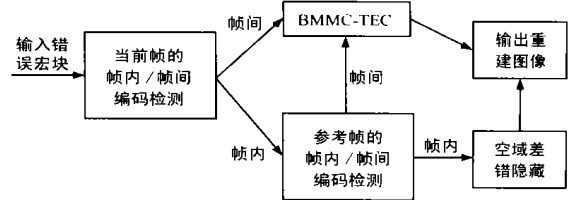


图 7 空/时域相结合的自适应差错隐藏

图 7 为空/时域相结合的自适应差错隐藏算法流程图. 其简要步骤如下:

- (1) 首先利用帧内/帧间编码检测来预测错误宏块的编码方式;
- (2) 如果错误宏块为帧间编码, 则用 BMMG-TEC 算法对错误宏块进行差错隐藏;
- (3) 如果错误宏块为帧内编码, 则对参考帧中与错误宏块相同位置的宏块进行帧内/帧间编码检测:
 - a. 如果其采用帧间编码, 同样用 BMMG-TEC 算法隐藏错误宏块;
 - b. 如果其采用帧内编码, 则应用多向内插^[10]、分割匹配^[5]等空域差错隐藏算法对错误宏块进行恢复.

5 仿真结果

本文的仿真条件如下: 视频信源采用“Flower”序列; MPEG-2 编码比特率为 5M bps; 平均分组丢失率(PER) 为 3×10^{-2} , 平均误比特率约为 5×10^{-4} 。

图 8 为经过差错信道传输的重建视频序列峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio: PSNR/dB) 性能对比。其中, 最上面的曲线(点线) 是无误传输结果; 最下面的曲线(点划线) 为不采用容错算法的结果; 中间的曲线(实线) 为采用本文容错算法的结果。三种情况下的平均 PSNR 约为 27.6dB、26.9dB 和 24.0dB。可以看出, 本文提出的容错算法可以显著改善重建视频图像的效果。

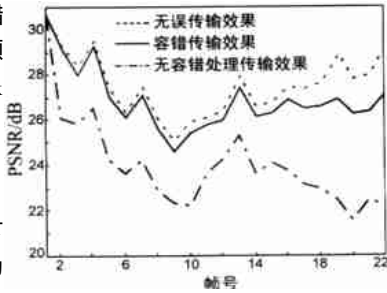


图 8 无误传输、容错传输与差错传输的重建图像效果对比

图 9 为应用不同差错隐藏算法后得到的重建图像 PSNR 对比。最上面的曲线(点线) 为采用全搜索匹配差错隐藏算法^[5]得到的重建结果, 可以看出它的隐藏效果是最好的; 最下面的曲线(点划线) 是采用常规时域补偿和矢量替代时域补偿差错隐藏算法^[4]得到的结果; 中间的曲线(实线) 是采用本文提出的 BMMG-TEC 算法得到的结果。三种情况下的平均 PSNR 约为 27.1dB、26.9dB 和 25.4dB。不难看出, 本文提出的 BMMG-TEC 算法的差错隐藏效果明显好于常规运动补偿算法, 非常接近全搜索匹配算法的性能。进一步, 我们对第二帧采用常规全搜索匹配算法与 BMMG-TEC 算法时的平均搜索步数进行对比, 常规全搜索匹配算法的平均搜索步数为 80, 而 BMMG-TEC 仅为 8。换言之, BMMG-TEC 的复杂度要大大低于常规 MPEG-2 全搜索算法, 这十分有利于实时视频容错传输的实现。

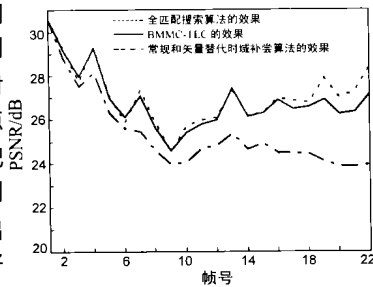


图 9 不同差错隐藏算法的差错隐藏效果对比

6 结论

本文提出了针对地面数字电视广播系统基于 MPEG-2 视频压缩标准的容错传输算法, 其中包括基于运动补偿和块匹配方法的差错隐藏算法, 针对图像序列独立 I 帧的差错隐藏方法, 以及低复杂度的空域/时域运动检测算法。在此基础上本文还提出了空/时域相结合的自适应差错隐藏机制, 在差错隐藏的有效性与实现复杂度之间实现了合理有效的折衷。仿真结果表明, 本文提出的算法可以在地面数字电视广播系统上实现可靠的视频传输, 同时保持很低的实现复杂度。

参考文献:

- [1] ATSC Digital Television Standard [S]. ATSC Standard A/53, September 16, 1995.
- [2] ETS 300 744, Digital broadcasting systems for television, sound and data services; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television [S], ETSI Draft EN 300 744 V1.2.1, 1999-1.
- [3] ARIB, Terrestrial integrated services digital broadcasting (ISDB-T)- Specifications of channel coding, framing structure, and modulation [S], September 28, 1998.
- [4] S Kaiser, K Fazel. Comparison of error concealment techniques for an MPEG-2 video decoder in terrestrial TV-broadcasting [J]. Signal Processing: Image Communication, 1999, 14(6-8): 655-676.
- [5] S Tserkidou, I Pitas. MPEG-2 error concealment based on block-matching principles [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2000, 10(4): 646-658.
- [6] J D Villaseñor, Ya Qin Zhang, Jiangtao Wen. Robust video coding algorithms and systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(10): 1724-1733.
- [7] S Aign. Error concealment, early resynchronization, and iterative decoding for MPEG-2 [A]. Proc. IEEE ICC'97 [C], 1997: 1654-1658.
- [8] S Aign, K Fazel. Error detection & concealment measures in MPEG-2 video decoder [A]. Proc. International Workshop on HDTV'94 [C], 1995: 169-181.
- [9] Jianhua Lu, K B Letaief, Ming L Liou. Robust video transmission over correlated mobile fading channels [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech., 1999, 9(5): 737-751.
- [10] W Kwok, H Sun. Multi-directional interpolation for spatial error concealment [J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 1993, 39(3): 455-460.
- [11] H Sun, J Zdepiski. Adaptive error concealment algorithm for MPEG compressed video [A]. Proc. SPIE'92 on Visual Communication and Image Processing [C], 1992: 814-824.

作者简介:



李楚翔 男, 1975 年 10 月出生于北京。1999 年从清华大学电子工程系毕业, 获工学学士学位。从 1999 年起在清华大学电子工程系攻读工学硕士学位, 硕士论文课题为无线视频容错传输, 研究方向包括图像处理技术、视频编码技术、以及无线视频容错传输技术等。



王章磊 男, 1979 年 3 月出生于江苏。2001 年从清华大学电子工程系毕业, 获工学学士学位。他的研究方向为视频编码与容错技术。

陆建华 (见本期第 1806 页)