

Super Resolution для сжатого видео

Моисейцев Алексей

*Video Group
CS MSU Graphics & Media Lab*



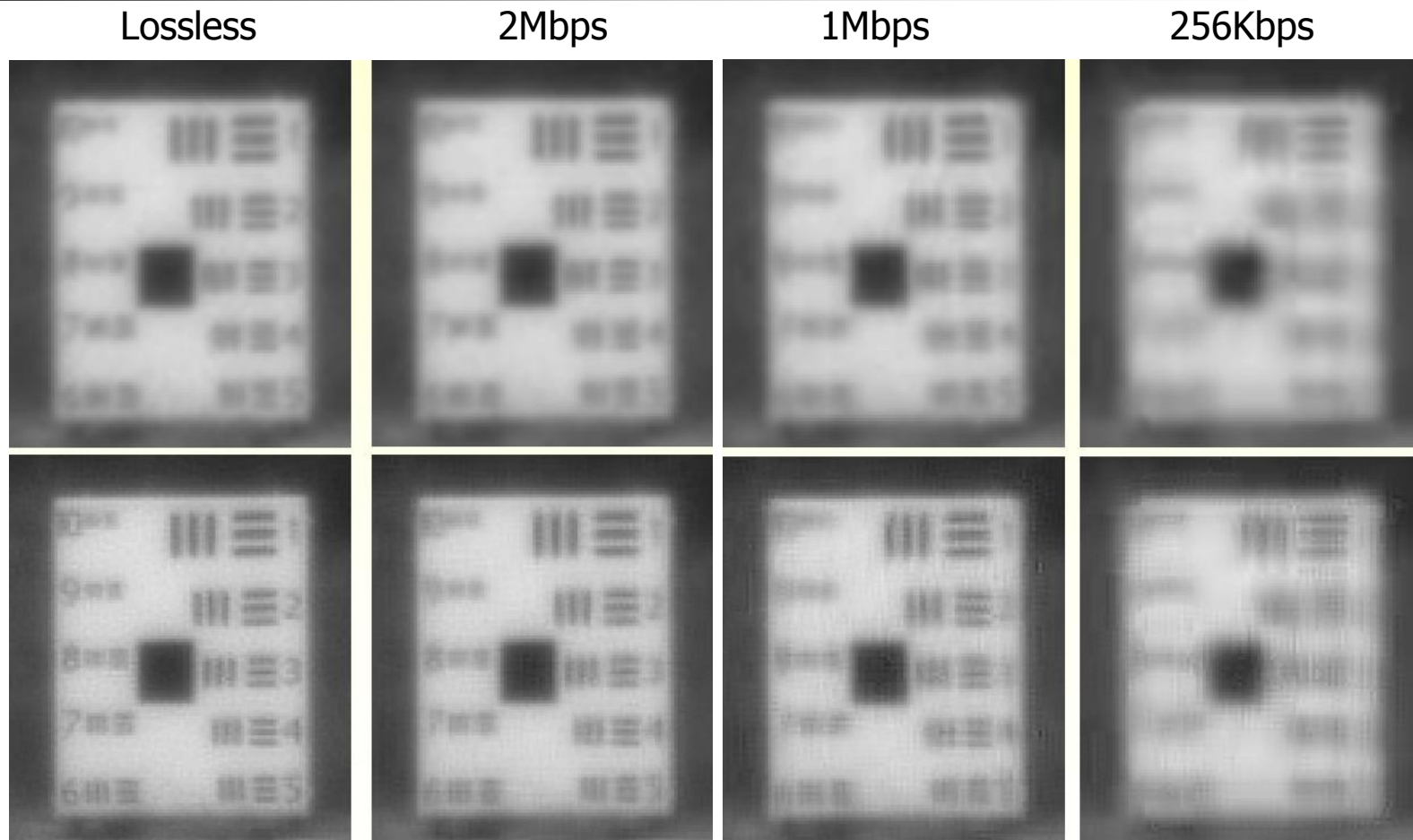
Содержание

- **Введение**
- Example-based SR
- SRME
- HMRF SR

Введение



Введение





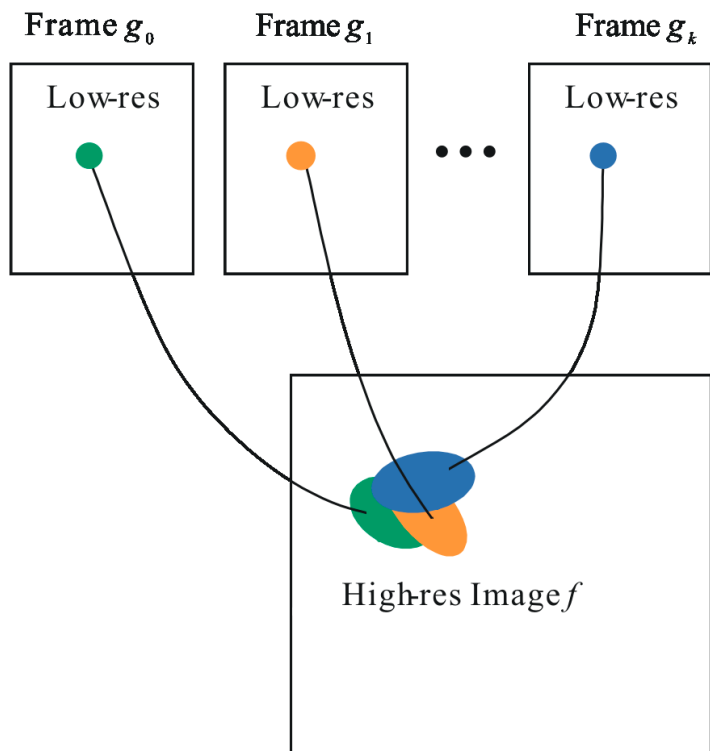
Введение

Алгоритмы SR:

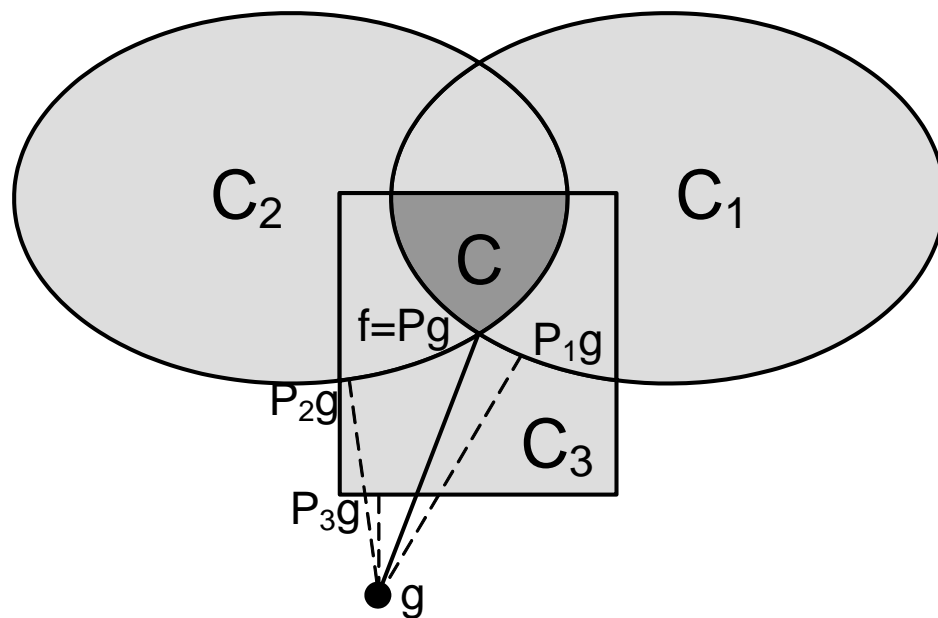
- Iterative Backprojection (IBP)
- Projection Onto Convex Sets (POCS)
- Probabilistic Methods
 - Maximum a posteriori (MAP)
- Model-based approach (MBSR)
 - Example-based

Введение

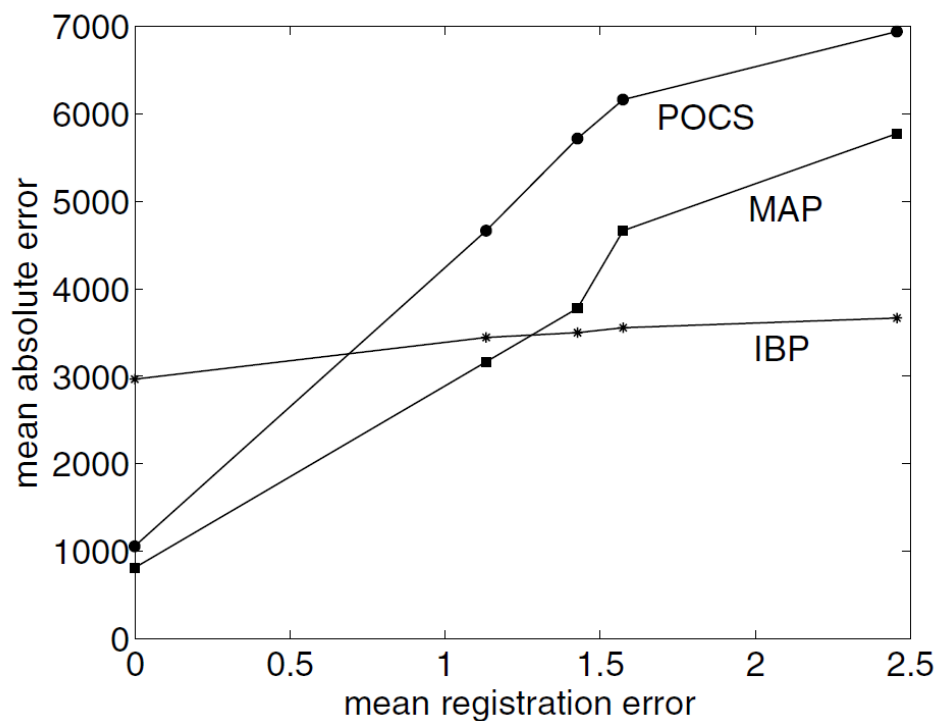
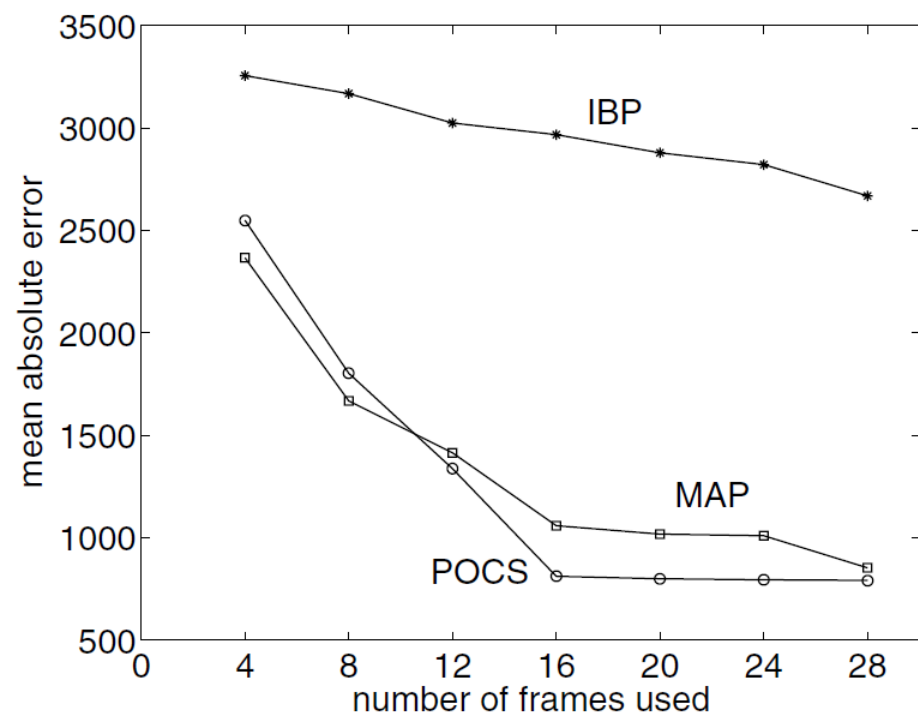
IBP



POCS



Введение





Введение

Method	MSE of the reconstructed image for different quantization factors					
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
Bilinear intepolation	143.5	154.9	167.8	179.9	192.0	206.2
Spatial-domain POCS	17.1	42.5	67.1	89.1	109.6	129.6
Spatial-domain MAP	17.1	43.4	68.3	89.7	108.4	126.3
DCT-domain MAP	16.4	38.6	60.8	81.4	101.7	119.1

Типичная скорость работы: 0.15-0.4 fps

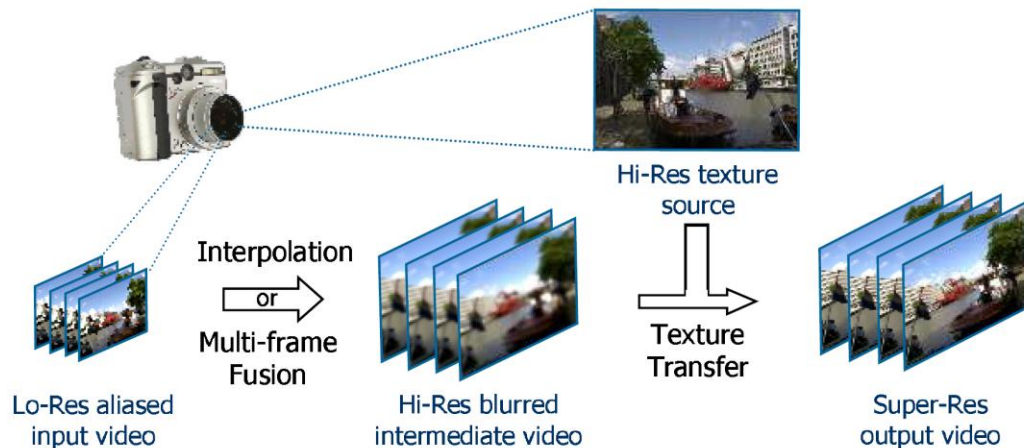


Содержание

- Введение
- **Example-based SR**
- SRME
- HMRF SR

Example-based SR

- В SR только по LR-кадрам существует теоретический предел качества
- Иногда есть доступ и к отдельным кадрам в высоком разрешении



Example-based SR

Registration



Для компенсации движения
используется алгоритм Lucas-Kanade:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_S I_x I_t \\ -\sum_S I_y I_t \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \sum_S I_x^2 & \sum_S I_x I_y \\ \sum_S I_x I_y & \sum_S I_y^2 \end{bmatrix}$$

$$I_x = \frac{\partial}{\partial x} (I_1 + I_2)$$

$$I_y = \frac{\partial}{\partial y} (I_1 + I_2)$$

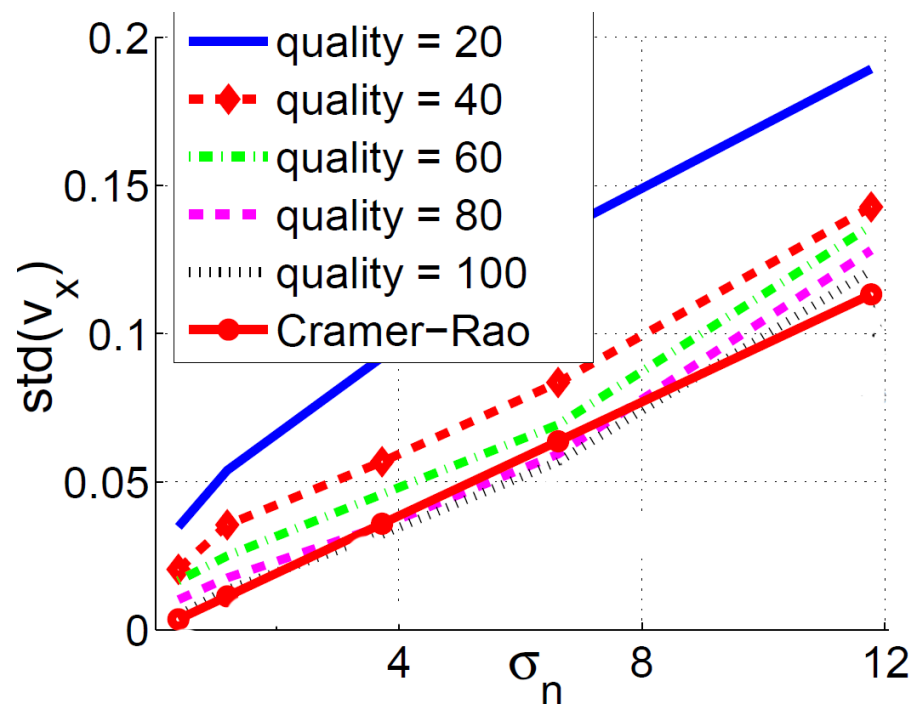
$$I_t = I_1 - I_2 \quad I_1, I_2 \text{ — два последовательных кадра видео}$$

Example-based SR Registration

$$\text{var}(v_x) \geq \sigma^2 \sum_S I_x^2 / \det T$$

$$\text{var}(v_y) \geq \sigma^2 \sum_S I_y^2 / \det T$$

$$T = \begin{bmatrix} \sum_S I_x^2 & \sum_S I_x I_y \\ \sum_S I_x I_y & \sum_S I_y^2 \end{bmatrix}$$



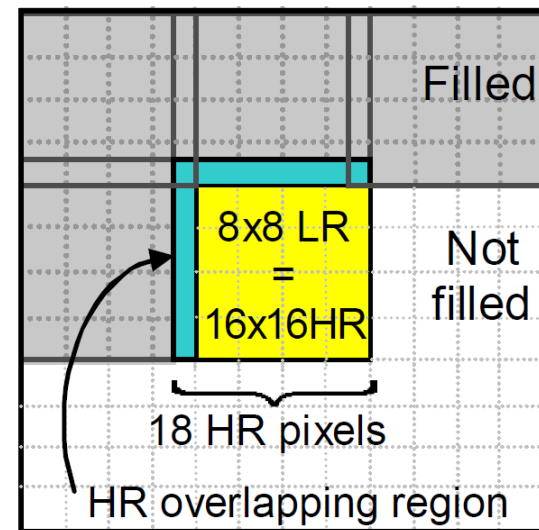
В 99% случаев ошибка не превышает 0.15 LR-пикселя и 0.45 HR-пикселя

Example-based SR

Построение пар HR-LR

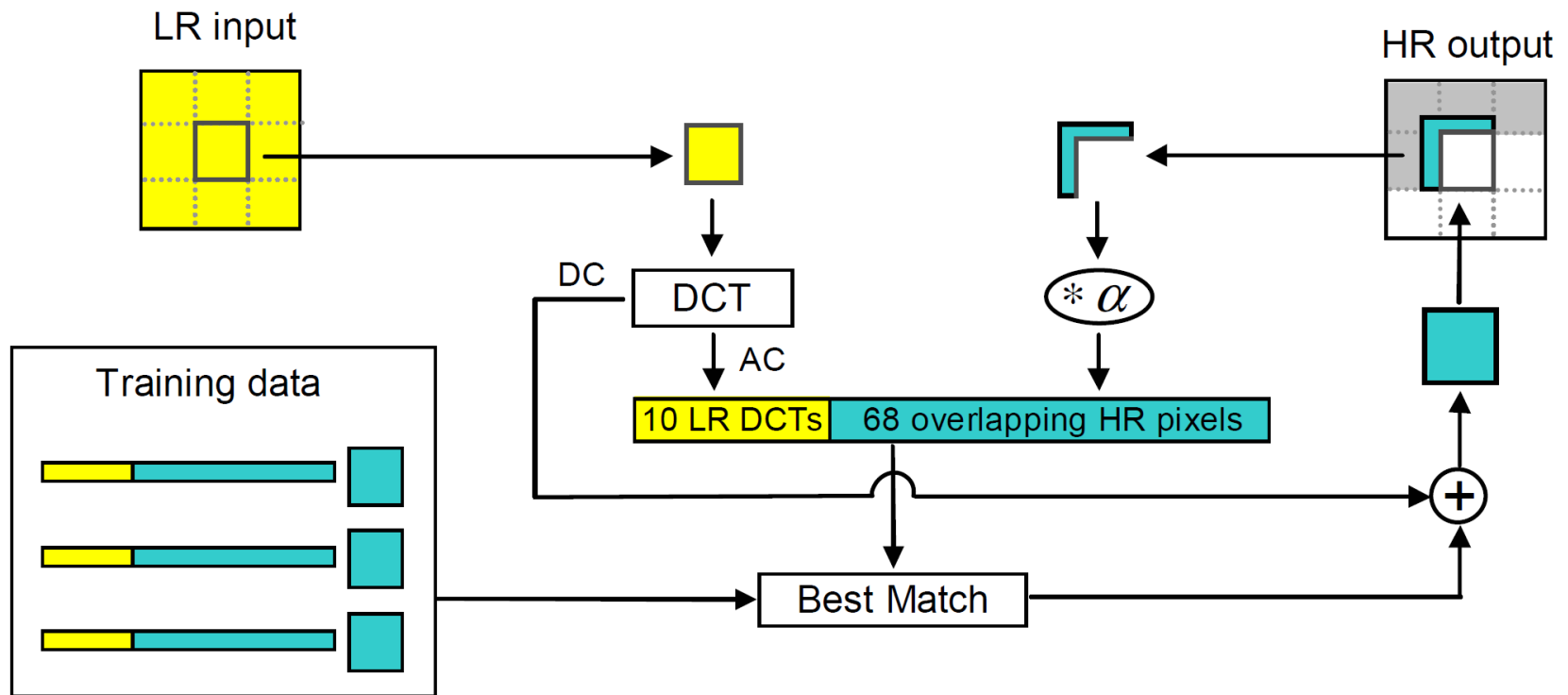


- Используются LR-блоки 8x8
- Рассматриваются повороты блоков
- Ключ —
10 AC-коэффициентов LR-блока и 68 граничных пикселей HR-блока



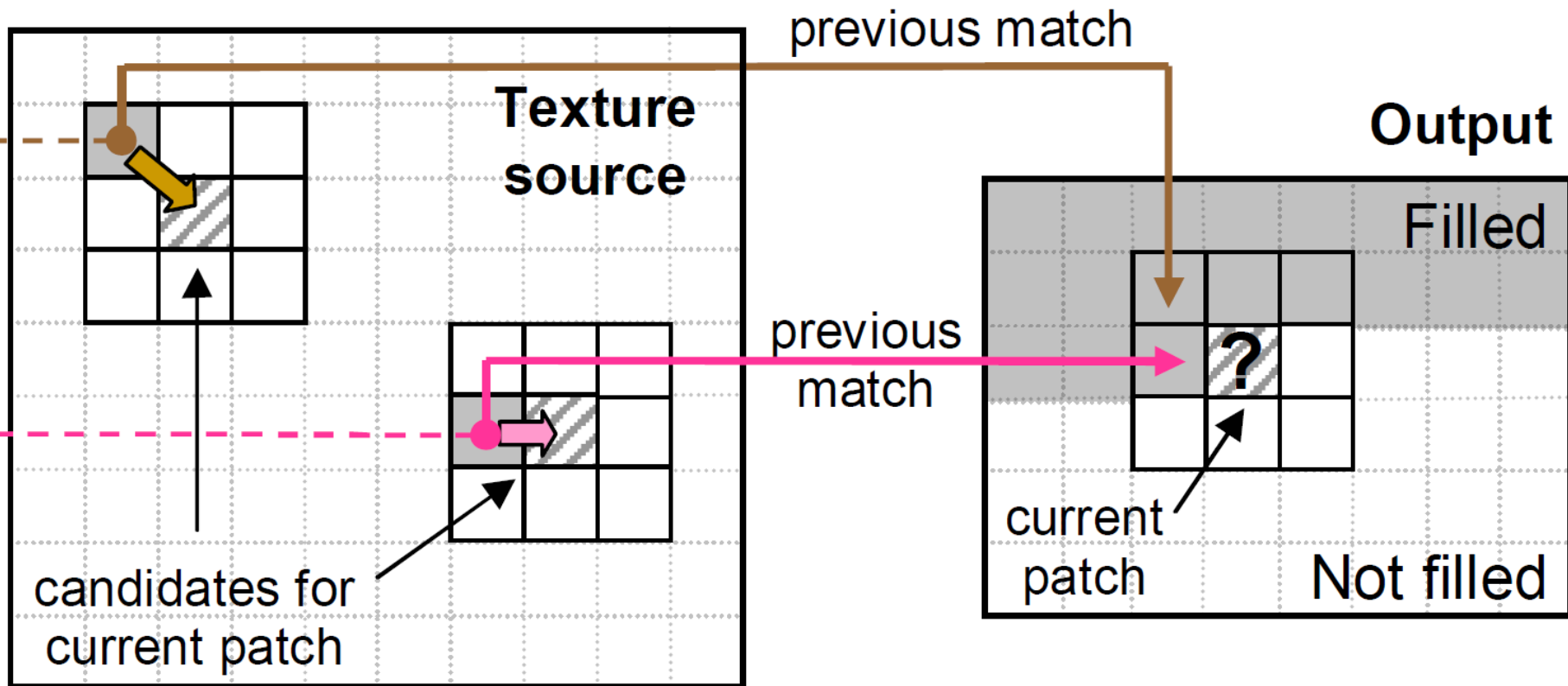
Example-based SR

Восстановление



Example-based SR

Восстановление



Example-based SR

Результат



source, frame 0



compressed frame 20



SR, frame 20

- MJPEG, Q=50
- Обучение на первом кадре
- Восстановление двадцатого кадра

Example-based SR

Результат



compressed frame 20



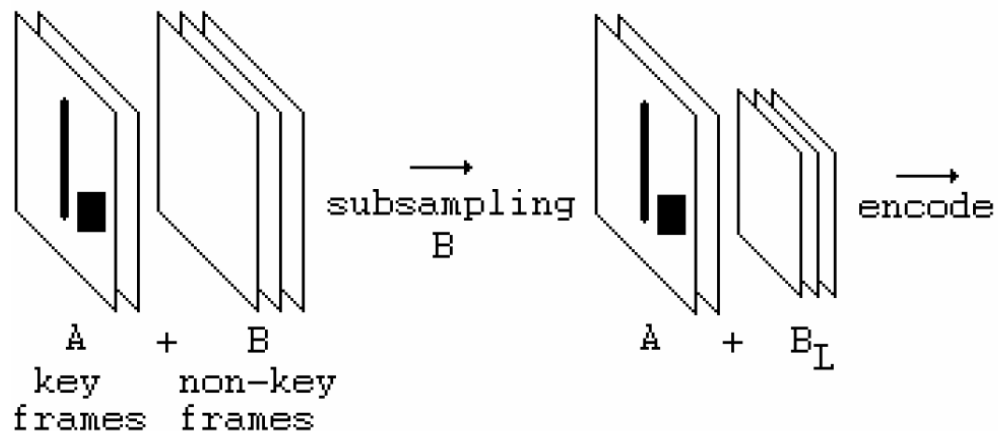
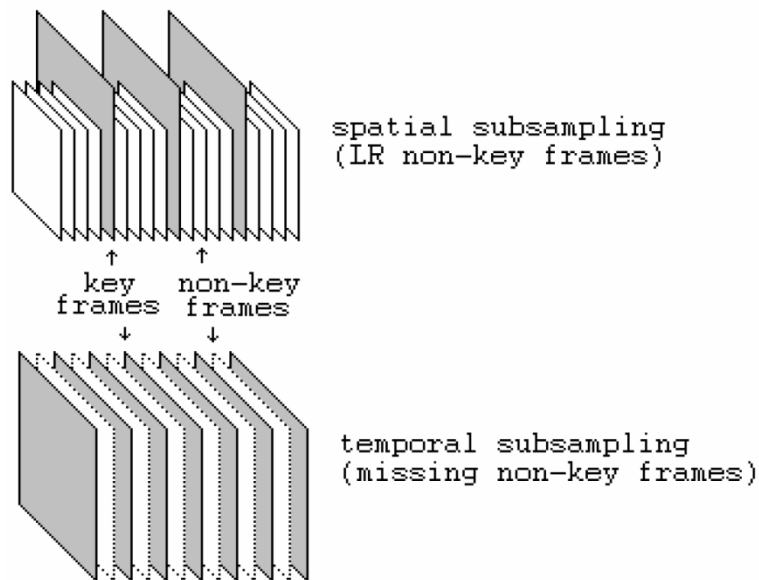
SR, frame 20



Spatial example-based SR,
frame 20

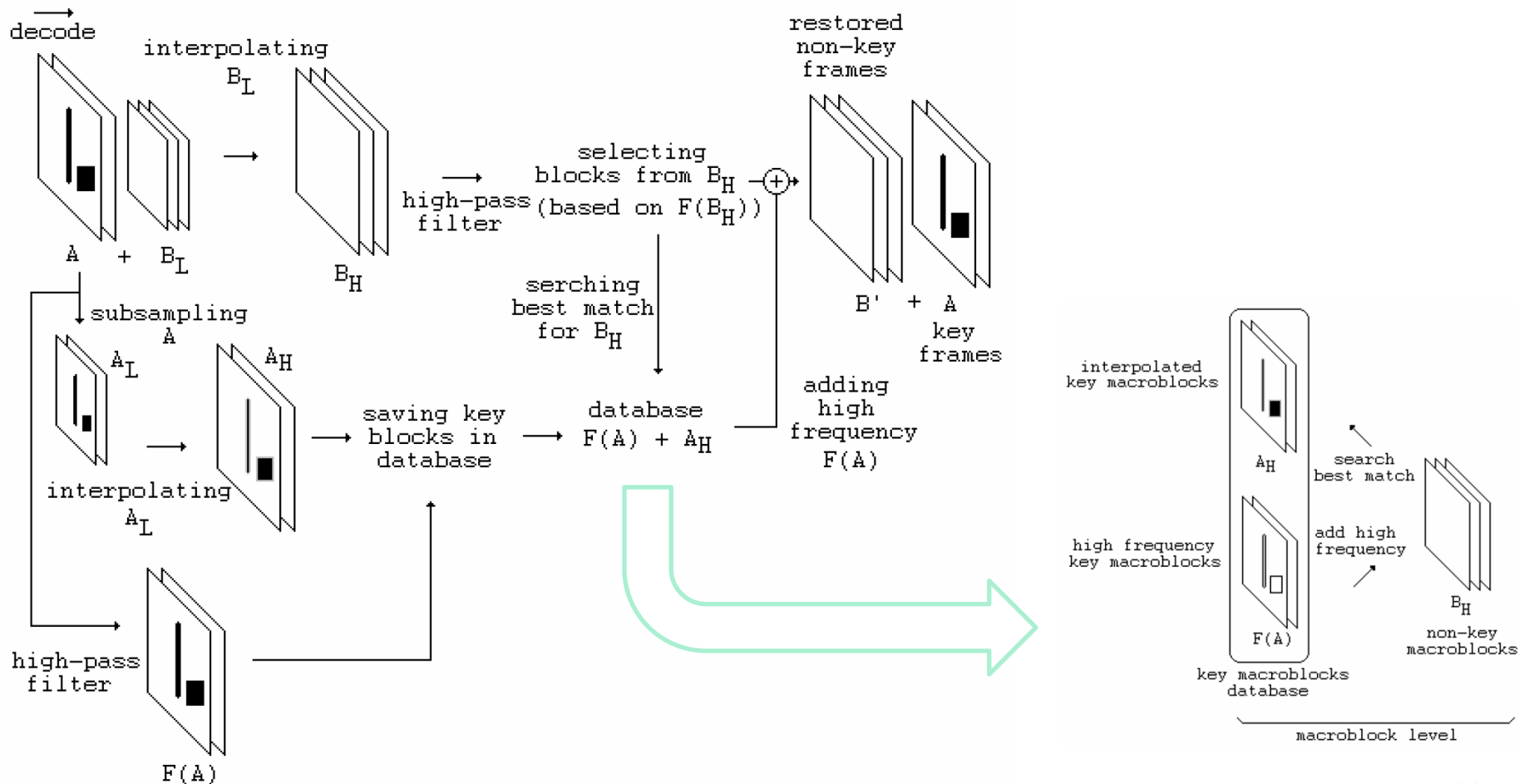
Key-frame based SR

Идея: использовать HR ключевые кадры



Key-frame based SR

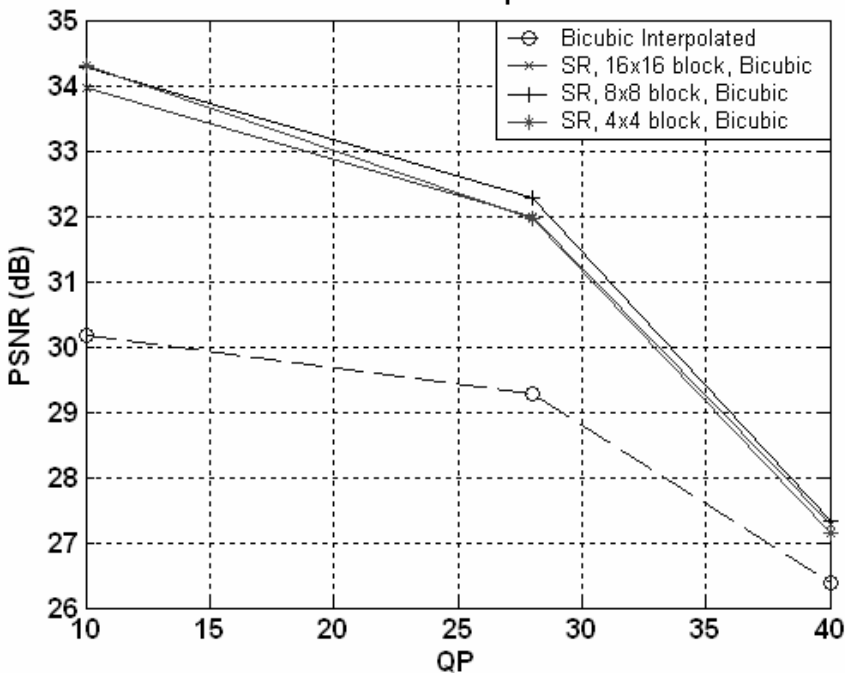
Восстановление



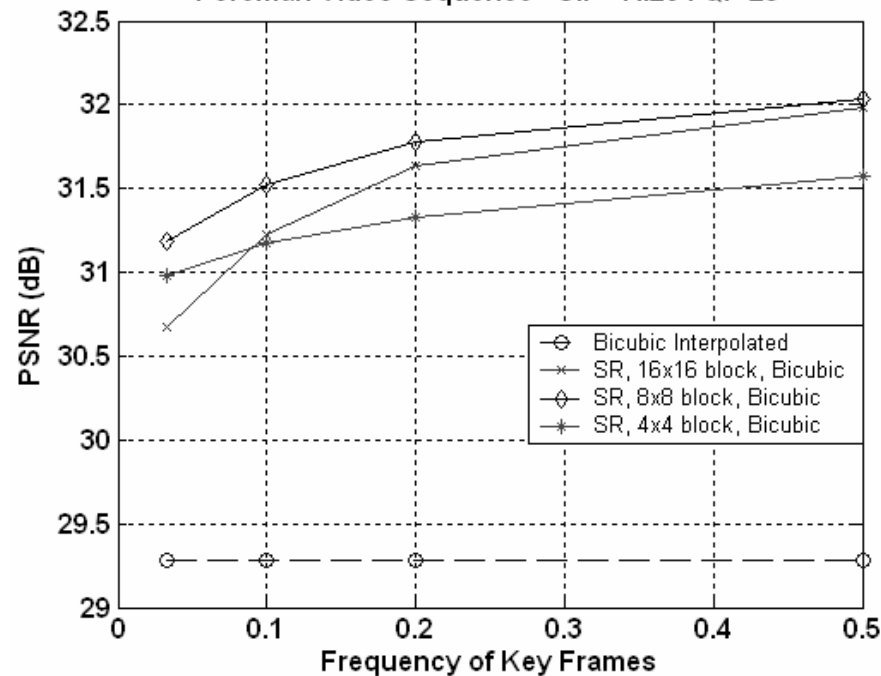
Key-frame based SR

Результаты

Foreman Video Sequence - CIF



Foreman Video Sequence - CIF - H.264 QP 28



Key-frame based SR

Результаты



Key-frame based SR

Результаты





Example-based SR

- Слабая обоснованность метода
- Требуется наличие специфичного видеопотока
- Зависимость от обучающей выборки



Содержание

- Введение
- Example-based SR
- **SRME**
- HMRF SR

SRME

\mathbf{f}_k – k -й кадр

$$\mathbf{f}_{k-i}(r) = \mathbf{f}_k(r + \mathbf{d}_{k,k-i}(r))$$

$$\mathbf{f}_{k-i} = C(\mathbf{d}_{k,k-i})\mathbf{f}_k$$

$$\mathbf{g}_k(r) = (\mathbf{A}\mathbf{f}_k)(r) + \mathbf{n}_k(r)$$

$$\mathbf{g}_{k-i}(r) = \mathbf{A}C(\mathbf{d}_{k,k-i})\mathbf{f}_k + \mathbf{n}_{k-i}$$

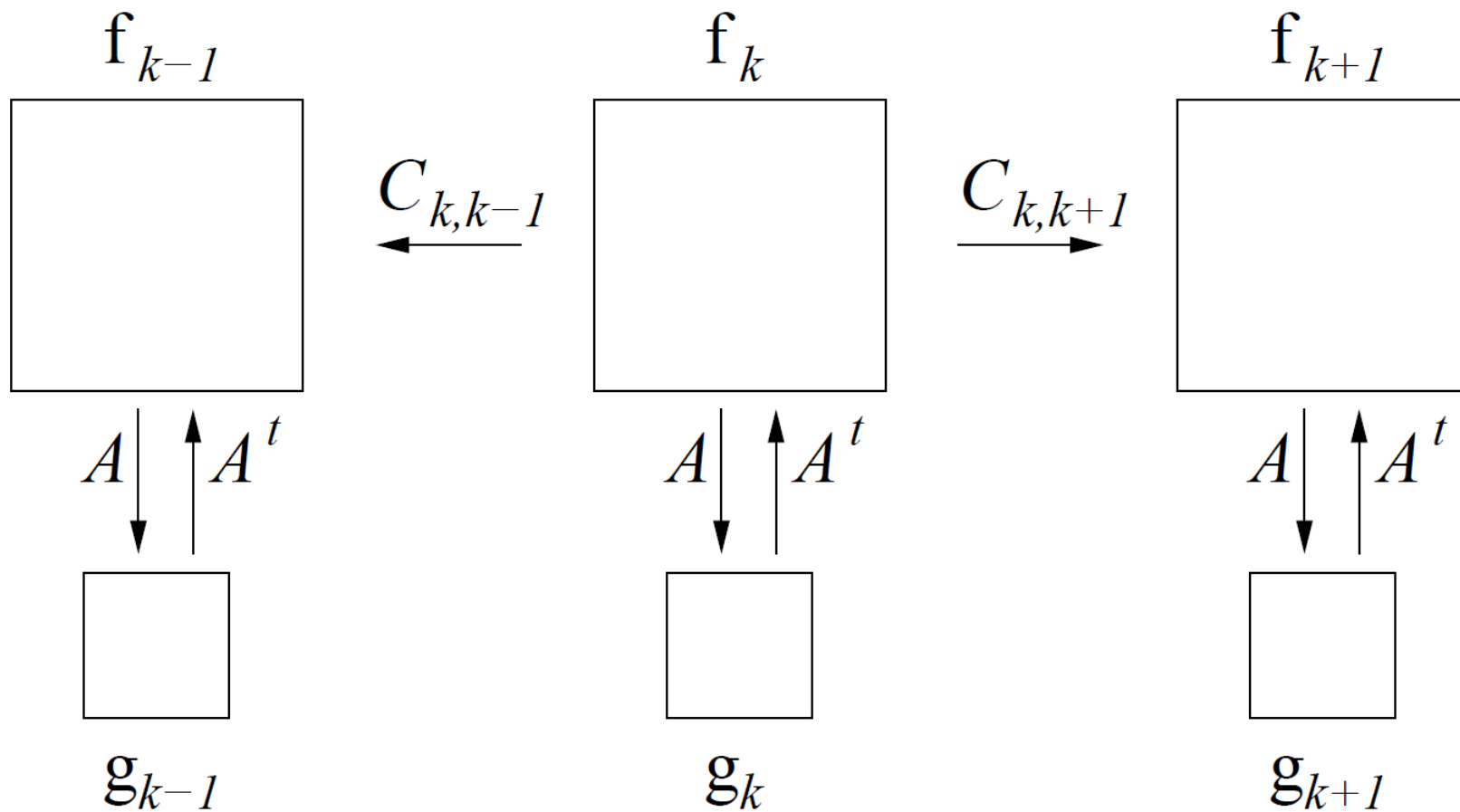
$\mathbf{d}_{k,k-i}(r)$ – вектор движения

\mathbf{g}_k – k -й кадр низкого разрешения

$C(\mathbf{d}_{k,k-i})$ – оператор компенсации движения

\mathbf{n}_k – нормальный аддитивный шум с дисперсией σ_n^2

SRME



SRME

Дано:

$$\mathbf{g} = (\mathbf{g}_{k,k-M1}^t, \dots, \mathbf{g}_{k,k+M2}^t)^t$$

Необходимо найти:

$$\mathbf{d} = (\mathbf{d}_{k,k-M1}^t, \dots, \mathbf{d}_{k,k+M2}^t)^t, \mathbf{f}_k$$

$$p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d} | \mathbf{g}) = \frac{p(\mathbf{g} | \mathbf{f}_k, \mathbf{d}) p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d})}{p(\mathbf{g})} \quad \text{— апостериорная вероятность}$$

$$\propto p(\mathbf{g} | \mathbf{f}_k, \mathbf{d}) p(\mathbf{f}_k) p(\mathbf{d})$$

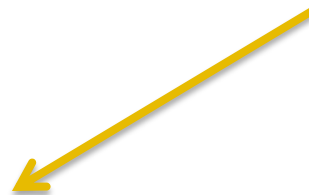
$$\hat{\mathbf{f}}_k, \hat{\mathbf{d}} = \arg \max_{\mathbf{f}_k, \mathbf{d}} \{p(\mathbf{g} | \mathbf{f}_k, \mathbf{d}) p(\mathbf{f}_k) p(\mathbf{d})\} \quad \text{— интересующее решение}$$

SRME

Задание вероятностей (1)

$$p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d}|\mathbf{g}) = \frac{p(\mathbf{g}|\mathbf{f}_k, \mathbf{d})p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d})}{p(\mathbf{g})}$$

$$\propto p(\mathbf{g}|\mathbf{f}_k, \mathbf{d})p(\mathbf{f}_k)p(\mathbf{d})$$



$$p(\mathbf{g}|\mathbf{f}_k, \mathbf{d}) \propto$$

$$\exp \left\{ -\frac{1}{2}\beta \sum_{i=-M2}^{M1} \| AC(\mathbf{d}_{k,k-i})\mathbf{f}_k - \mathbf{g}_{k-i} \|^2 \right\}$$

$$\beta = 1/\sigma_n^2$$

$$\begin{aligned} p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d} | \mathbf{g}) &= \frac{p(\mathbf{g} | \mathbf{f}_k, \mathbf{d}) p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d})}{p(\mathbf{g})} \\ &\propto p(\mathbf{g} | \mathbf{f}_k, \mathbf{d}) p(\mathbf{f}_k) p(\mathbf{d}) \end{aligned}$$



$$p(\mathbf{f}_k) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\lambda_1 \| Q_1 \mathbf{f}_k \|^2 + \lambda_2 \| Q_2 \mathbf{f}_k \|^2) \right\}$$

Q_1 – фильтр гладкости внутри блока

Q_2 – фильтр гладкости между блоками

$$\begin{aligned} p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d}|\mathbf{g}) &= \frac{p(\mathbf{g}|\mathbf{f}_k, \mathbf{d})p(\mathbf{f}_k, \mathbf{d})}{p(\mathbf{g})} \\ &\propto p(\mathbf{g}|\mathbf{f}_k, \mathbf{d})p(\mathbf{f}_k)p(\mathbf{d}) \end{aligned}$$



$$p(\mathbf{d}) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} \gamma \|\mathbf{d} - \mathbf{d}^{enc}\|^2 \right\}$$

\mathbf{d}^{enc} – вектора движения, полученные от декодера

γ – мера доверия векторам движения

SRME

Решение (1)



$$\hat{\mathbf{f}}_k, \hat{\mathbf{d}} = \arg \min_{\mathbf{f}_k, \mathbf{d}} L(\mathbf{f}_k, \mathbf{d})$$

$$\begin{aligned} L(\mathbf{f}_k, \mathbf{d}) = & \beta \sum_{i=-M2}^{M1} \left\| AC(\mathbf{d}_{k,k-i}) \mathbf{f}_k - \mathbf{g}_{k-i} \right\|^2 \\ & + \lambda_1 \left\| Q_1 \mathbf{f}_k \right\|^2 + \lambda_2 \left\| Q_2 \mathbf{f}_k \right\|^2 \\ & + \gamma \left\| \mathbf{d} - \mathbf{d}^{enc} \right\|^2 . \end{aligned}$$

SRME

Решение (2)

Две итерации:

- Компенсация движения

$$\hat{\mathbf{d}} = \arg \min_{\mathbf{d}} \left\{ \beta \sum_{i=-M2}^{M1} \| AC(\mathbf{d}_{k,k-i}) \mathbf{f}_k - \mathbf{g}_{k-i} \|^2 + \gamma \| \mathbf{d} - \mathbf{d}^{enc} \|^2 \right\},$$

- Построение улучшенного кадра

$$\mathbf{f}_k^{l+1} = \mathbf{f}_k^l + \epsilon \left[\lambda_1 Q_1^t Q_1 \mathbf{f}_k^l + \lambda_2 Q_2^t Q_2 \mathbf{f}_k^l + \beta \sum_{i=-M2}^{M1} C^t(\mathbf{d}_{k,k-i}) A^t (AC(\mathbf{d}_{k,k-i}) \mathbf{f}_k^l - \mathbf{g}_{k-i}) \right]$$



SRME

source



Y-PSNR = 20.44dB

Simultaneous motion estimation and resolution enhancement of
compressed low resolution video.

Javier Mateos, A. K. Katsaggelos, Rafael Molina, ICIP, 2000



SRME

bilinear



Y-PSNR = 21.98dB

Simultaneous motion estimation and resolution enhancement of
compressed low resolution video.

Javier Mateos, A. K. Katsaggelos, Rafael Molina, ICIP, 2000



SRME

proposed SR



Y-PSNR = 25.64dB

Simultaneous motion estimation and resolution enhancement of
compressed low resolution video.

Javier Mateos, A. K. Katsaggelos, Rafael Molina, ICIP, 2000



Содержание

- Введение
- Example-based SR
- SRME
- **HMRF SR**



HMRF SR



Standard decompression



Smoothed image



Sharpened image

HMRP SR

$$\mathbf{z}_q^l = \mathbf{z}^l + \mathbf{n}_q^l$$

$$\mathbf{y}^l = \mathcal{D}(\mathbf{z}^l - \mathbf{z}_{mc}^l)$$

$$\mathbf{y}_q^l = Q_l[\mathbf{y}^l]$$

$$\mathbf{z}_q^l = \mathcal{D}^T \mathbf{y}_q^l + \mathbf{z}_{mc}^l$$

\mathbf{z}^l – исходный кадр

\mathbf{z}_q^l – кадр с шумом квантования

\mathcal{D} – оператор DCT

\mathbf{z}_{mc}^l – скомпенсированный кадр

$Q_l[\cdot]$ – оператор квантования

HMRF SR

Шум квантования (1)

$$\mathbf{n}_q^l = \mathbf{z}_q^l - \mathbf{z}^l = \mathcal{D}^T (\mathbf{y}_q^l - \mathbf{y}^l)$$

\mathbf{n}_q^l – шум квантования

$$\mathbf{K}_z^l = E \left[\mathbf{n}_q^l \mathbf{n}_q^{lT} \right] = \mathcal{D}^T \mathbf{K}_y^l \mathcal{D}$$

\mathbf{K}^l – автоковариационная матрица шума

$$\mathbf{K}_y^l \approx \text{diag} \left(\frac{1}{12} (q_{i+1}^l[k] - q_i^l[k])^2 \right)$$

Матрицу \mathbf{K}_y^l можно считать диагональной из-за декорреляционных свойств DCT

HMRF SR

Шум квантования (2)

\mathbf{n}_z – пространственный шум квантования
с ковариационной матрицей \mathbf{K}_z^l

$$\mathbf{K}_z^l = E \left[\mathbf{n}_q^l \mathbf{n}_q^{lT} \right] = \mathcal{D}^T \mathbf{K}_y^l \mathcal{D}$$

$$p(\mathbf{z}_q^l | \mathbf{z}^l) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |\mathbf{K}_z^l|^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{z}_q^l - \mathbf{z}^l)^T \mathbf{K}_z^{l-1} (\mathbf{z}_q^l - \mathbf{z}^l) \right\}$$

Матрица \mathbf{K}_z^l уже не является диагональной

HMRF SR

Шум компенсации (1)

$$\mathbf{z}^k = \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l + \mathbf{n}_A^{k,l}, \quad k \neq l$$

$\mathbf{A}^{k,l}$ – оптический поток

$\mathbf{n}_A^{k,l}$ – ошибка компенсации

Области открытия/закрытия объектов характеризуются большими значениями $n_A^{k,l}$.

HMRF SR

Шум компенсации (2)

$$\mathbf{z}_q^k = \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l + \mathbf{n}_A^{k,l} + \mathbf{n}_q^k, \quad k \neq l. \quad \text{— общее выражение}$$

$$\mathbf{K}^{k,l} = \mathbf{K}_A^{k,l} + \mathbf{K}_z^k \quad \text{— независимость шума}$$

$$p(\mathbf{z}_q^k | \mathbf{z}^l, k \neq l) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |\mathbf{K}^{k,l}|^{\frac{1}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l)^T \mathbf{K}^{k,l-1} (\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l) \right\}$$

$$p(\mathbf{z}_q^k, k = l - m, \dots, l + m | \mathbf{z}^l) = \prod_{k=l-m}^{l+m} p(\mathbf{z}_q^k | \mathbf{z}^l)$$

HMRf SR

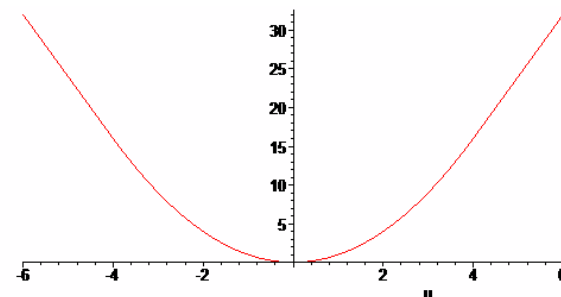
Условие гладкости

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{z}}^l &= \arg \max_{\mathbf{z}^l} p(\mathbf{z}^l | \mathbf{z}_q^k, k = l - m, \dots, l + m), \\ &= \arg \max_{\mathbf{z}^l} p(\mathbf{z}^l) p(\mathbf{z}_q^k, k = l - m, \dots, l + m | \mathbf{z}^l)\end{aligned}$$

$$p(\mathbf{z}^l) = \frac{1}{G} \exp \left\{ -\lambda \sum_{c \in \mathcal{C}} \rho_T(\mathbf{d}_c^T \mathbf{z}^l) \right\}$$

$$p(\mathbf{z}^l) = \frac{1}{G} \exp \left\{ -\lambda \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{N}_n} \rho_T(z^l[n] - z^l[k]) \right\}$$

$$\rho_T(u) = \begin{cases} u^2, & |u| \leq T, \\ T^2 + 2T(|u| - T), & |u| > T. \end{cases}$$



HMRP SR

$$\hat{\mathbf{z}}^l = \arg \min_{\mathbf{z}^l} [\lambda r(\mathbf{z}^l) + s(\mathbf{z}^l) + t(\mathbf{z}^l)]$$

$$r(\mathbf{z}^l) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \rho_T(\mathbf{d}_c^T \mathbf{z}^l), \quad \text{— гладкость}$$

$$s(\mathbf{z}^l) = \frac{1}{2}(\mathbf{z}_q^l - \mathbf{z}^l)^T \mathbf{K}_z^{l-1}(\mathbf{z}_q^l - \mathbf{z}^l), \quad \text{— квантование}$$

$$t(\mathbf{z}^l) = \sum_{\substack{k=l-m, \\ k \neq l}}^{l+m} \frac{1}{2}(\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l)^T \mathbf{K}^{k,l-1}(\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l). \quad \text{— компенсация}$$

HMRFSR

Решение



Градиент:

$$g^l(\mathbf{z}^l) = \lambda \nabla r(\mathbf{z}^l) + \nabla s(\mathbf{z}^l) + \nabla t(\mathbf{z}^l)$$

$$\nabla r(\mathbf{z}^l) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \mathbf{d}_c \rho'_T(\mathbf{d}_c^T \mathbf{z}^l),$$

$$\nabla s(\mathbf{z}^l) = \mathcal{D}^T \mathbf{K}_y^l{}^{-1} \mathcal{D}(\mathbf{z}_q^l - \mathbf{z}^l),$$

$$\nabla t(\mathbf{z}^l) = \sum_{\substack{k=l-m, \\ k \neq l}}^{l+m} \mathbf{A}^{k,lT} \left(\mathbf{K}_A^{k,l} + \mathcal{D}^T \mathbf{K}_y^k \mathcal{D} \right)^{-1} (\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l).$$

HMRF SR

Решение



Упрощение:

$$t(\mathbf{z}^l) = \sum_{\substack{k=l-m, \\ k \neq l}}^{l+m} \frac{1}{2} (\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l)^T \left(\text{diag} \left[\mathbf{K}_A^{k,l} + \mathcal{D}^T \mathbf{K}_y^k \mathcal{D} \right] \right)^{-1} (\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l),$$

$$\nabla t(\mathbf{z}^l) = \sum_{\substack{k=l-m, \\ k \neq l}}^{l+m} \mathbf{A}^{k,lT} \left(\text{diag} \left[\mathbf{K}_A^{k,l} + \mathcal{D}^T \mathbf{K}_y^k \mathcal{D} \right] \right)^{-1} (\mathbf{z}_q^k - \mathbf{A}^{k,l} \mathbf{z}^l).$$

Градиентный спуск:

$$\mathbf{z}^{l(k+1)} = \mathbf{z}^{l(k)} - \alpha \mathbf{g}^l \left(\mathbf{z}^{l(k)} \right)$$

HMRF SR

Результаты



HMRF SR

Результаты



HMRF SR

Результаты



Sequence	Size	Frames	QP ¹	λ	Δ PSNR, dB ²		
					proposed ³	O'Rourke ³	Annex J
<i>foreman</i>	176 × 144	0–275	16	0.00075	+1.12	+0.33	+0.38
<i>foreman</i>	176 × 144	0–275	12	0.00075	+1.01	+0.03	+0.34
<i>claire</i>	320 × 272	0–167	16	0.00075	+0.83	+0.05	+0.56
<i>claire</i>	320 × 272	0–167	12	0.00075	+0.60	−0.24	+0.51
<i>missa</i>	352 × 288	0–149	18	0.00075	+0.60	+0.28	+0.56
<i>missa</i>	352 × 288	0–149	14	0.00075	+0.38	+0.11	+0.46



Заключение

- Рассмотрены Example-based и MAP методы
- Многие методы используют информацию из потока или требуют дополнительные данные для работы
- Прямые реализации алгоритмов сложны, но тем не менее многие из них возможно распараллелить (например, с использованием CUDA)

Литература

- Simultaneous motion estimation and resolution enhancement of compressed low resolution video. Javier Mateos, A. K. Katsaggelos, Rafael Molina, ICIP, 2000
- Restoration of Compressed Video using Temporal Information, Mark A. Robertson and Robert L. Stevenson, SPIE 2001
- DCT Quantization Noise in Compressed Images, Mark A. Robertson and Robert L. Stevenson, 2004
- Super-Resolving Compressed Video with Large Artifacts, Wen-Yi Zhao, ICPR 2004
- Z. Lin and H-Y. Shum. Fundamental limits of reconstruction-based superresolution algorithms under local translation. PAMI, 2004
- Resolution enhancement of low quality videos using a high-resolution frame, Tuan Phama, Lucas van Vlieta, Klamer Schutte, SPIE 2006
- T.Q. Pham, M. Bezuijen, L.J. van Vliet, K. Schutte, and C.L. Luengo Hendriks. Performance of optimal registration estimators, SPIE 2005
- Super resolution: an overview, C Papathanassiou and M Petrou, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005
- Super Resolution of Video Using Key Frames, Fernanda Brandi, Ricardo de Queiroz, Debargha Mukherjee, ISCAS 2008



Вопросы

