

그릴 분광계를 사용하여 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계

論 文

48A-12-8

Triply-Encoded Hadamard Transform Imaging Spectrometer using the Grill Spectrometer

郭 大 淵* · 朴 珍 培** · 朴 永 在***

(Dae-Yun Kwak · Jin-Bae Park · Yeong-Jae Park)

Abstract - In this paper, a triply-encoded Hadamard transform imaging spectrometer is proposed by applying the grill spectrometer to the Hadamard transform imaging spectrometer. The proposed system encodes the input radiation triply ; once through the input image mask and twice through the two masks in the grill spectrometer. We use an electro-optical mask in the grill spectrometer which is controlled by a left-cyclic simplex matrix. Then we modeled the system using D^{-1} method. In this paper, the average mean square error associated with a recovered estimate is considered for performance evaluation. The relative performance is compared with those of the other conventional systems.

Key Words : HTIS(Hadamard transform imaging spectrometer), Grill spectrometer, Average mean square error, left-cyclic simplex matrix, D^{-1} method

1. 서 론

광학시스템은 사용 가능한 주파수의 대역이 매우 넓고 고속처리가 가능하다는 장점을 지니고 있어 계측기기, 통신등 다양한 응용분야에서 최근 활발한 연구가 진행되고 있다[1]. 하다마드 변환을 이용한 광 스펙트럼 측정장치에는 하다마드 변환 분광계(HTS; Hadamard transform spectrometer)가 대표적인 예이다. 하다마드 변환 분광계는 다중화기법(multiplexing)을 이용하여 측정 잡음의 영향을 줄이고 개선된 스펙트럼을 얻는 장치이다[2,3,4]. 다중화를 위해 사용되는 마스크에는 기계식 이동 마스크와 고정형 전자광학 마스크(EOM; electro-optical mask)가 있다[5]. 기계식 이동 마스크는 투과율 특성은 좋지만 조정불량(misalignment)이나 재밍(jamming)등 기계적인 문제점이 있다. 반면 고정형 전자광학 마스크는 전기신호로 마스크의 셀을 제어하므로 기계적 문제점이 없다. 고정형 전자광학 마스크는 전기신호의 인가여부에 따라 마스크 셀이 투과 상태 또는 비투과 상태를 나타내도록 고안되어 있다[6]. 전자광학 마스크의 셀은 비이상적인 투과율 특성을 지니고 있다. 이러한 비이상적인 마스크의 특성은 D^{-1} 기법이나 T^{-1} 기법을 통하여 보정이 가능하므로 현재 고정형 전자광학 마스크가 주로 사용된다[3,5]. 일반적으로 광 측정 시스템은 양성시스템(positive

system)[4]이므로 '-1'을 원소로 갖는 하다마드 행렬(H-matrix; Hadamard matrix)로 직접 마스크를 제어할 수 없다. 따라서 이를 변형한 S행렬(S-matrix; simplex matrix)을 사용하여 마스크를 제어한다[2]. 마스크를 통한 부호화는 다중화기법을 이용하여 측정잡음의 오차를 감소시키므로 2번의 부호화는 더욱 감소된 스펙트럼 오차를 얻게 한다. 그릴 분광계(grill spectrometer)는 입·출력부에서 각각 1번 부호화를 수행하여 2번의 부호화를 행하는 시스템이다[2]. 기존의 그릴 분광계에 대해서는 고정형 전자광학마스크를 사용한 시스템이 개발되어 있지 않을 뿐만 아니라 우순환 S행렬을 사용하여 마스크를 제어하므로 좌순환 S행렬로 마스크를 제어하는 기존의 여타 시스템과 양립하지 않는다. 즉, 마스크 특성 보정과 스펙트럼 회복을 수행하는 D^{-1} 또는 T^{-1} 기법을 적용할 수 없게 된다[6,7]. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 그릴 분광계의 마스크를 좌순환 S행렬로 제어하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 좌순환 S행렬은 $S=S^T$ 를 만족하므로 복원과정의 후처리과정이 간단하다는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 이를 위해 전자광학 마스크를 그릴 분광계에 적용하였고 좌순환 S행렬로 제어되는 그릴 분광계를 제안하였다.

본 연구에서는 1차원의 스펙트럼만을 측정하는 것이 아니라 2차원의 스펙트럼정보를 측정하는 하다마드 변환 영상 분광계(HTIS; Hadamard transform imaging spectrometer)[2]의 출력부에 그릴 분광계를 적용한다. 하다마드 변환 영상 분광계는 입력부와 출력부에 각각 하나씩의 마스크를 설치하여 입력부에서 공간정보를 출력부에서 스펙트럼 정보를 획득하는 이미지 스펙트럼 측정장치이다. 제안된 전체 시스템은 입력 마스크에서는 공간정보를 1번 부호화하고 출력부에서 그릴 분광계의 2개의 마스크를 통하여 스펙트럼 정보를

* 正會員 : 大宇電子 디지털情報通信研究2팀 研究員

** 正會員 : 延世大 電氣 및 컴퓨터工學科 副教授 · 工博

*** 準會員 : 延世大 電氣 및 컴퓨터工學科 碩士課程

接受日字 : 1999年 10月 1日

最終完了 : 1999年 11月 9日

2번 부호화한다. 따라서 전체적으로는 3번의 부호화를 수행한다. 이와 같이 부호화한 공간-스펙트럼 정보는 스펙트럼 회복기법을 통하여 개선된 공간-스펙트럼 추정치를 얻게 된다. 개발된 시스템에 대하여 D^{-1} 기법을 적용하여 시스템을 모델링하고 이를 근거로 한 스펙트럼 회복 기법에 의한 스펙트럼 추정치의 평균 MSE(mean square error)를 기준의 하다마드 변환 분광계와 하다마드 변환 영상 분광계에서 얻은 스펙트럼 추정치의 평균 MSE와 비교한다.

2. 그릴 분광계와 하다마드 변환 영상 분광계

2.1 전자광학마스크 제어행렬과 비이상적인 마스크 투과율 특성

제안한 전체 시스템은 출력부에 그릴 분광계를 적용하므로 기준의 하다마드 변환 분광계나 하다마드 변환 영상 분광계의 스펙트럼 복원기법과 양립하기 위해 좌순환 S행렬로 마스크를 제어하는 그릴 분광계를 제시한다. 완전한 투과 또는 비투과 상태를 갖는 이상적인 마스크는 하다마드 행렬을 변형한 S행렬을 사용하여 제어한다. 하다마드 행렬은 식 (1)과 같이 정의되는 2의 거듭제곱의 차원을 갖는 행렬이다.

$$H_N = \begin{bmatrix} H_{N/2} & H_{N/2} \\ H_{N/2} & -H_{N/2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $H_1 = 1$ 이다.

다음은 정의를 통하여 얻을 수 있는 하다마드 행렬의 예이다.

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

하다마드 행렬은 각 행과 열들이 서로 직교성(orthogonality)을 띠는 특징이 있는데 이는 식 (2)로 표현된다.

$$H_N \cdot H_N = N I_N \quad (2)$$

여기서 I_N 은 $N \times N$ 단위행렬이다.

양성광학 시스템은 투과 또는 비투과 상태를 나타내는 '1'과 '0'만을 원소로 하므로 하다마드 행렬은 마스크 제어행렬로는 부적합하다. S행렬은 하다마드 행렬의 첫행과 첫열을 없애고 하다마드 행렬의 '-1'은 '1'로 '1'은 '0'으로 바꿈으로서 양성 시스템에 적합하다[2]. 다음은 8×8 하다마드 행렬과 그로부터 얻어진 7×7 S행렬을 보여준다.

$$H_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \rightarrow S_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

투과 또는 비투과 상태에서 100%, 0%의 투과율을 갖는 이상적인 마스크의 경우에는 S행렬로 제어된다. 전자광학 마스크는 투명, 불투명 상태에서 각각 100%, 0%의 투과율을 갖지 못한다. 즉, 비이상적인 투과율 특성을 나타내는 마스크의 제어행렬을 \tilde{W} 와 같이 가정하면 이 행렬의 원소 $\tilde{w}(i, j)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{w}(i, j) = \begin{cases} \tau_{ij}, & i\text{번째 측정에서 } j\text{번째 마스크가 불투명할 때} \\ \tau_{ij}, & i\text{번째 측정에서 } j\text{번째 마스크가 투명할 때} \end{cases}$$

$$\text{즉, } S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{이라 할 때 } \tilde{W} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{01} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{03} \end{bmatrix} \text{이 된}$$

다. 그림 1은 전자광학 마스크로 사용되는 전형적인 PDLC (polymer dispersed liquid crystal)마스크의 투과율 특성을 나타낸다. 그림 1에서 τ_{ij} 값들은 대략 0.8 정도의 값을 갖고 τ_{ij} 값들은 0에서 0.1까지의 값을 갖는다.

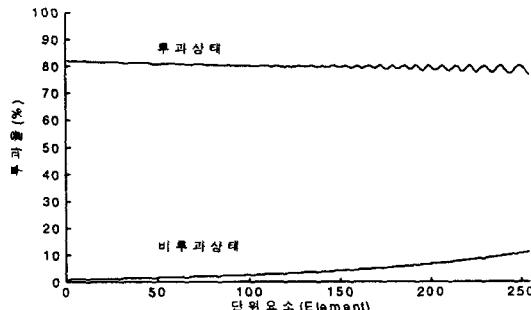


그림 1 전형적인 PDLC 마스크의 투과율 특성

Fig. 1 The transmission characteristic curve of the conventional PDLC mask

2.2 좌순환 S행렬로 제어되는 그릴 분광계

그릴 분광계는 일반적인 하다마드 변환 분광계가 한번의 부호화를 수행하는 것과는 달리 2번의 부호화를 통하여 신호대 잡음비(SNR: signal to noise ratio)를 증가시키는 개선된 분광계이다. N개의 스펙트럼 정보를 얻기 위해 N개의 슬릿을 갖는 1차원 입력마스크와 $2N-1$ 개의 슬릿을 갖는 1차원 출력마스크가 필요하다. 입력마스크는 전자광학 마스크를 사용하여 동질화된 병렬신호(homogenized signal)를 부호화하고 이를 분산시켜 기계식 이동 마스크를 사용하는 출력마스크에서 다시 부호화를 수행하여 전체적으로 2번의 부호화를 통한 개선된 스펙트럼 복원 특징을 나타낸다. 기존의 마스크 제어행렬로 우순환 S행렬을 사용하는 그릴 분광계의 i 번째 측정값은 식 (3)과 같다[2,8].

$$\begin{aligned} \eta_i &= \sum_{r=0}^{n-1} \sum_{s=0}^{2n-2} v_{r-i} \psi_{r-s} w_s + e_i \\ &= \sum_{r=0}^{n-1} \sum_{t=0}^{n-1} v_{r-i} \psi_t w_{r-t} + e_i \\ &= \sum_{r=0}^{n-1} \sum_{t=0}^{n-1} v_{r-i} w_{r-t} \psi_t + e_i \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 첫 번째 수식에서 $t = r - s$ 로 치환하면 두 번째 수식을 얻는다. 식 (3)에서 ψ_i 는 스펙트럼의 실제치이고 v_i, w_i 는 그릴 분광계의 i 번째 측정시 각각 입·출력 마스크의 i 번째 행과 i 번째 열의 값을 나타낸다. 측정잡음의 오차 e_i 의 평균은 0, 분산은 σ^2 라는 통계적 특성을 지니고 있다. 측정치는 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \hat{\mathbf{V}} \mathbf{W}^T \phi + e \quad (4)$$

여기서 $\hat{\mathbf{V}}, \mathbf{W}$ 는 각각 입·출력 마스크의 패턴을 결정하는 행렬이다. 출력마스크의 제어행렬은 기계식 이동 마스크이므로 이상적인 투과율 특성을 지녀 $\hat{\mathbf{W}}$ 가 아닌 \mathbf{W} 로 나타낸다.

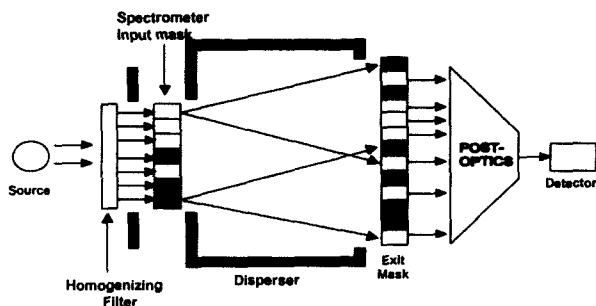


그림 2 그릴 분광계의 개요도

Fig. 2 The schematic of grill spectrometer

측정치로부터 얻어지는 스펙트럼 추정치는 식 (5)과 같이 정의된다.

$$\hat{\phi} = (\hat{\mathbf{V}} \mathbf{W}^T)^{-1} \eta \quad (5)$$

입력 마스크가 이상적이라 가정할 때 평균 MSE는 식(6)과 같다[2].

$$\varepsilon = \frac{16N^2\sigma^2}{(N+1)^4} \quad (6)$$

좌순환 S행렬은 기존의 하다마드 변환 영상 분광계의 스펙트럼 복원법과 양립하며 $S = S^T$ 만족하므로 복원과정의 후처리과정이 간단하는 장점을 지니고 있다. 따라서 기존의 우순환 S행렬로 마스크를 제어하는 방식대신 좌순환 S행렬로 제어되는 그릴 분광계를 제안하였다. 제안된 방식의 i 번째 측정치는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_i &= \sum_{r=0}^{t-1} \sum_{s=r}^{t-1} v_{r+i} \psi_{s-r} w_s + e_i \\ &= \sum_{r=0}^{t-1} \sum_{i=0}^{t-1} v_{r+i} \psi_i w_{r+i} + e_i, \quad (t=s-r \text{로 치환}) \\ &= \sum_{r=0}^{t-1} \sum_{i=0}^{t-1} v_{r+i} w_{r+i} \psi_i + e_i \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ψ_i 는 실제치, v_i, w_i 는 그릴 분광계의 i 번째 측정시 각각 입·출력 마스크의 설정을 나타내는 행렬의 i 번째 행과 i 번째 열을 나타낸다.

측정치는 다음과 같이 나타낸다.

$$\eta = \hat{\mathbf{V}}_N \mathbf{W}_N^T \phi + e \quad (8)$$

여기서 η, ϕ, e 의 차원은 $(n \times 1)$ 벡터이고 $\hat{\mathbf{V}}_N, \mathbf{W}_N$ 의 차원은 $(n \times n)$ 좌순환 S행렬을 나타낸다. 식 (4)의 우순환 S행렬을 사용한 경우에는 실제 입·출력마스크가 모두 기계식 이동 마스크를 사용하므로 제어행렬 $\hat{\mathbf{V}}, \mathbf{W}$ 는 우순환 S행렬을 나타내지만 좌순환 S행렬로 제어되는 그릴 분광계는 입력마스크는 고정형 전자광학마스크를 사용하므로 비이상적인 마스크 투과율 특성을 나타내기위해 $\hat{\mathbf{V}}_N$ 와 같이 나타낸다.

2.3 하다마드 변환 영상 분광계

하다마드 변환 영상 분광계는 하다마드 변환 분광계가 1차원의 스펙트럼 정보만을 측정하는 것과는 달리 2차원 광원의 각 공간영역에 대한 스펙트럼을 측정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 하다마드 변환 영상 분광계는 그릴 분광계나 하다마드 변환 분광계와는 다르게 실제치나 측정치등을 1차원적인 성격을 띠는 벡터로서 나타낼 수 없고 2차원적인 성격을 띠는 행렬을 사용해야 한다. 여기서는 M 개의 위치정보와 N 개의 스펙트럼정보를 위해 $(M \times N)$ 행렬을 택하여 그 행이 공간영역 정보를 열이 스펙트럼영역 정보를 나타내도록 설정한다. 따라서 η, ϕ, e 는 $(M \times N)$ 행렬이 된다.

하다마드 변환 영상 분광계의 구동원리는 일반적인 하다마드 변환 분광계와 유사하나 그림 3과 같이 입력부에 2차원 이미지 마스크가 있어서 공간정보를 부호화하고 부호화된 빛을 모은 후 다시 grating 등 분광장치를 통해 분광시켜 출력 마스크를 통과한 빛은 다시 모아져서 측정잡음을 가지고 검파기에서 측정된다. 그림 3은 일반적인 하다마드 변환 영상 분광계의 개요도를 나타낸다.

식 (8)로부터 검파기의 측정치와 광원의 실제치사이의 행렬 관계식은 식 (9)와 같다.

$$\eta = \hat{\mathbf{V}}_M \phi \hat{\mathbf{W}}_N + e \quad (9)$$

여기서 식 (8)의 행렬식과 순서가 바뀐 것은 차원을 맞추기 위해서이다. 이때 회복된 스펙트럼은 공간 영역별로 각기 다른 스펙트럼을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 한 영역에 대해서도 더 뛰어난 회복 스펙트럼을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 복원된 스펙트럼 추정치는 다음의 수식으로 정의된다.

$$\hat{\phi} = \hat{\mathbf{V}}_M^{-1} \eta \hat{\mathbf{W}}_N^{-1} \quad (10)$$

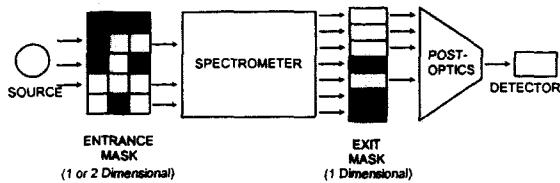


그림 3 하다마드 변환 영상 분광계의 개요도
Fig. 3 The schematic of Hadamard transform imaging spectrometer

전자광학 마스크의 특성에 따라 하다마드 변환 영상 분광계의 스펙트럼 회복기법에는 이상적인 경우의 S^{-1} 기법과 비이상적인 경우의 D^{-1} 기법이 있다[6]. 이상적인 투과율 특성을 나타낼 때 하다마드 변환 영상 분광계에 S^{-1} 기법을 적용하면 측정치와 스펙트럼 추정치는 식 (11)과 같이 S 행렬과 그의 역행렬을 이용하여 나타낸다.

$$\begin{aligned}\eta &= S_M \phi S_N + e \\ \hat{\psi} &= (S_M)^{-1} \eta (S_N)^{-1}\end{aligned}\quad (11)$$

식 (6)으로부터 식(11)의 하다마드 변환 영상 분광계의 스펙트럼 추정치의 평균 MSE는 공가산 횟수가 L일 때 식 (12)와 같다.

$$\epsilon = \frac{16MN\sigma^2}{L(M+1)^2(N+1)^2} \quad (12)$$

비이상적인 마스크의 특성을 나타낼 경우 스펙트럼 복원법에 사용되는 입·출력 마스크를 제어하는 행렬들은 식 (13)과 같이 S 행렬을 사용하여 표현할 수 있다[6].

$$\begin{aligned}\hat{V}_M &= S_M D_M + 1_M \tau_{oM}^T \\ \hat{W}_N &= S_N D_N + 1_N \tau_{oN}^T\end{aligned}\quad (13)$$

여기서 $D_M, D_N, 1, \tau_{oM}, \tau_{oN}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}D_M &= \text{diag}(d_{M_{11}}, d_{M_{22}}, \dots, d_{M_{MM}}) \\ &= \text{diag}(\tau_{oM_1} - \tau_{oM_1}, \tau_{oM_2} - \tau_{oM_2}, \dots, \tau_{oM_M} - \tau_{oM_M}) \\ D_N &= \text{diag}(d_{N_{11}}, d_{N_{22}}, \dots, d_{N_{NN}}) \\ &= \text{diag}(\tau_{oN_1} - \tau_{oN_1}, \tau_{oN_2} - \tau_{oN_2}, \dots, \tau_{oN_N} - \tau_{oN_N}) \\ 1 &= [1, 1, \dots, 1]^T \\ \tau_{oM} &= [\tau_{oM_1}, \tau_{oM_2}, \dots, \tau_{oM_M}]^T \\ \tau_{oN} &= [\tau_{oN_1}, \tau_{oN_2}, \dots, \tau_{oN_N}]^T\end{aligned}$$

하다마드 변환 영상 분광계의 스펙트럼 복원법으로 D^{-1}

기법을 사용하게 되면 측정치 η 를 얻기위해서 식 (14)와 같은 3종류의 b 값을 측정하는 부측정의 과정이 필요하다[7].

$$\begin{aligned}b_t &= 1_M \tau_{oM}^T \phi \tau_{oN} 1_N^T \\ b_M &= 1_M \tau_{oM}^T \phi \tau_{oN} 1_N^T + 1_M \tau_{oM}^T \phi D_N^T S_N^T \\ &= b_t + 1_M \tau_{oM}^T \phi D_N^T S_N^T \\ b_N &= 1_M \tau_{oM}^T \phi \tau_{oN} 1_N^T + S_M D_M \phi \tau_{oN} 1_N^T \\ &= b_t + S_M D_M \phi \tau_{oN} 1_N^T\end{aligned}\quad (14)$$

그리고 측정된 값은 하다마드 변환 분광계보다 복잡한 후 처리과정을 통하여 스펙트럼을 회복하게 된다. 여기에 D^{-1} 기법을 적용하기 위해 η' 를 다음과 같이 정의한다.

$$\eta' = \eta - \hat{b}_M - \hat{b}_N + \hat{b}_t \quad (15)$$

여기서 $\hat{b}_i (i = M, N, t)$ 는 각 측정을 통해 얻어진 추정치이다.

식 (15)의 변형된 측정치를 이용하여 식 (16)과 같이 스펙트럼의 추정치를 얻어낸다.

$$\hat{\psi} = (S_M D_M)^{-1} \eta' (S_N D_N)^{-1} \quad (16)$$

하다마드 변환 영상 분광계에 D^{-1} 기법을 적용하고 주 측정 L번, 부측정 N_0 번의 공가산(coaddition)[6]을 수행하여 스펙트럼을 회복하였을 때 그에 해당하는 평균 MSE는 식 (17)과 같다.

$$\epsilon = \frac{16\sigma^2}{(M+1)^2(N+1)^2} \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{N_0} \right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=0}^{N_0} \frac{1}{d_{ii}^2 d_{jj}^2} \quad (17)$$

여기서 d_{ii} 는 D_M 의 (i, i) 번째 원소이고 d_{jj} 는 D_N 의 (j, j) 번째 원소이다.

3. 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계

그릴 분광계를 하다마드 변환 영상 분광계에 적용하여 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계를 제안한다. 여기서는 3중 부호화를 수행하여 스펙트럼 추정치의 오차를 줄이고 신호대 잡음비를 증가시킴을 보인다. 그림 4는 제안된 시스템의 개요도이다.

하다마드 변환 영상 분광계의 입력 마스크를 제어하는 행렬을 \hat{P}_M 출력마스크를 제어하는 행렬을 \hat{N}_N 이라고 하면 그림 4와 식 (9)로부터 식 (18)을 얻을 수 있다.

$$\eta = \hat{P}_M \phi \hat{N}_N^T + e \quad (18)$$

여기서 $(M \times N)$ 행렬 ϕ 의 행은 공간정보를 열은 스펙트럼 정보를 나타낸다.

식 (18)의 출력마스크를 대신하여 그릴 분광계를 사용하면 출력마스크를 제어행렬 $\tilde{\mathbf{N}}_N = \tilde{\mathbf{V}}_N \mathbf{W}_N^T$ 로 표현할 수 있다.

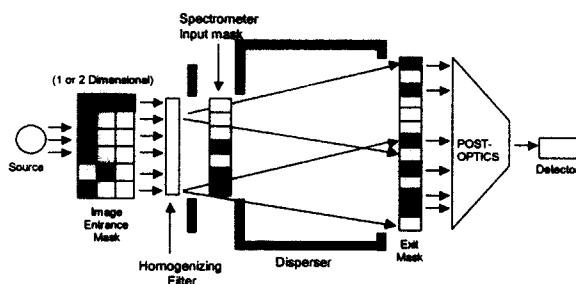


그림 4 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계

Fig. 4 The schematic of triply-encoded Hadamard transform imaging spectrometer

출력 마스크 제어행렬을 식 (18)에 대입하면 식 (19)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \eta &= \tilde{\mathbf{P}}_M \phi \mathbf{W}_N \tilde{\mathbf{V}}_N^T + e \\ &= \tilde{\mathbf{P}}_M (\tilde{\mathbf{V}}_N \mathbf{W}_N^T \phi^T)^T + e \end{aligned} \quad (19)$$

식 (5)의 스펙트럼 추정치의 정의로부터 식 (19)에 대응하는 스펙트럼의 추정치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi} &= \tilde{\mathbf{P}}_M^{-1} \eta (\tilde{\mathbf{V}}_N^T)^{-1} \mathbf{W}_N^{-1} \\ &= \tilde{\mathbf{P}}_M^{-1} \{ (\mathbf{W}_N^{-1})^T \tilde{\mathbf{V}}_N^{-1} \eta^T \}^T \end{aligned} \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)에 의한 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계의 부호화와 추정치를 구하는 복원과정은 그림 5와 같다.

오차행렬은 식 (21)과 같이 정의한다.

$$\hat{\psi} - \phi = \zeta = \tilde{\mathbf{P}}_M^{-1} e (\tilde{\mathbf{V}}_N^T)^{-1} \mathbf{W}_N^{-1} \quad (21)$$

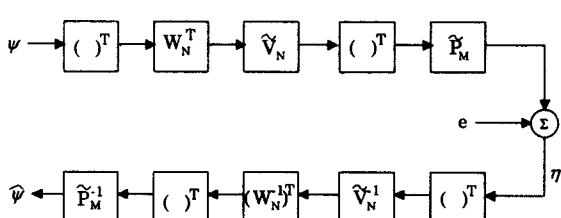


그림 5 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계의 개요도
Fig. 5 The block diagram of triply-encoded Hadamard transform imaging spectrometer

마스크의 투과율 특성에 따라 제안된 시스템의 스펙트럼 복원법의 모델링과 복원기법에 따른 평균 MSE를 다음의 두 가지 경우에 대해 살펴보자.

3.1 마스크가 이상적일 경우

식 (19)의 마스크가 이상적이라고 가정하면 제어행렬 $\tilde{\mathbf{P}}_M$, $\tilde{\mathbf{V}}_N$, \mathbf{W}_N 은 모두 최적인 좌순환 \mathbf{S} 행렬로 대체한다. 따라서 측정치와 스펙트럼 추정치를 나타내는 식 (19)와 식 (20)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= \mathbf{S}_M \phi \mathbf{S}_N \mathbf{S}_N^T + e \\ \hat{\phi} &= \mathbf{S}_M^{-1} \eta (\mathbf{S}_N^T)^{-1} \mathbf{S}_N^{-1} \end{aligned} \quad (22)$$

식 (21)에서 정의된 오차행렬에 적용한 평균 MSE는 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{1}{MN^2} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \zeta_{ij}^2 \\ &= \frac{\sigma^2}{MN^2} Tr[\mathbf{S}_M^{-1}(\mathbf{S}_M^{-1})^T] \cdot Tr[(\mathbf{S}_N^{-1})^T \mathbf{S}_N^{-1} (\mathbf{S}_N^{-1})^T \mathbf{S}_N^{-1}] \\ &= \frac{64MN^2\sigma^2}{(M+1)^2(N+1)^4} \\ &\approx \frac{64\sigma^2}{MN^2}, \quad M, N \gg 1 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 ζ_{ij} 는 오차행렬 ζ 의 (i, j) 원소이다.

같은 조건에서 기존의 하다마드 변환 영상 분광계의 평균 MSE는 $\frac{16\sigma^2}{MN}$ 이므로 제안된 시스템의 오차가 작음을 알 수 있다.

L 번의 공가산을 수행시에는 식 (24)와 같이 평균 MSE가 감소한다.

$$\begin{aligned} \epsilon(L) &= \frac{64MN^2\sigma^2}{L(M+1)^2(N+1)^4} \\ &\approx \frac{64\sigma^2}{LMN^2}, \quad M, N \gg 1 \end{aligned} \quad (24)$$

그림 6은 S^{-1} 기법에 근거한 시스템 모델링과 그 스펙트럼 추정치의 복원과정의 개요도이다.

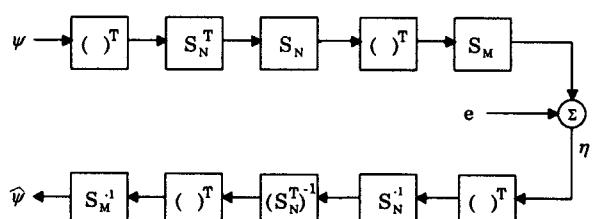


그림 6 S^{-1} 기법에 근거한 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계의 개요도

Fig. 6 The block diagram of triply-encoded Hadamard transform imaging spectrometer using S^{-1} method.

3.2 마스크가 비이상적일 경우

마스크가 비이상적일 경우에 제안된 시스템은 좌순환 S 행렬로 제어되는 마스크 패턴행렬 \tilde{P}_M , \tilde{V}_N , W_N 들은 각각 P_M 은 전체시스템의 입력부의 비이상적인 2차원 영상 마스크, \tilde{V}_N 은 시스템의 출력부에 적용된 그릴 분광계의 비이상적인 입력마스크, W_N 은 그릴 분광계의 출력 마스크로 기계식 이동 마스크의 패턴 행렬이다. 따라서 좌순환 S 행렬로 마스크를 제어하는 제안된 시스템의 스펙트럼 복원법으로 D^{-1} 기법을 이용하면 P_M , \tilde{V}_N , W_N 는 다음과 같이 나타낸다[7].

$$\begin{aligned} \tilde{P}_M &= S_M D_M + 1_M \tau_o M^T \\ W_N &= S_N \end{aligned} \quad (25)$$

$$\tilde{V}_N = S_N D_N + 1_N \tau_o N^T$$

식 (19)에 식 (25)를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= (S_M D_M + 1_M \tau_o M^T) \cdot \phi \cdot S_N \cdot (S_N D_N + 1_N \tau_o N^T)^T + e \\ &= S_M D_M \phi S_N D_N^T S_N^T + 1_M \tau_o M^T \phi S_N (S_N D_N + 1_N \tau_o N^T)^T \\ &\quad + (S_M D_M + 1_M \tau_o M^T) \phi S_N \tau_o N 1_N^T - 1_M \tau_o M^T \phi S_N \tau_o N 1_N^T + e \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 다음과 같이 3개의 행렬들을 정의하자.

$b_w = 1_M \tau_o M^T \phi W_N \tau_o N 1_N^T$: 이미지 입력마스크와 그릴 분광계의 입력마스크를 off하고 그릴 분광계의 출력마스크만을 순환하여 측정한다.

$b_{pw} = \tilde{P}_M \phi W_N \tau_o N 1_N^T$: 그릴 분광계의 입력마스크를 모두 off한 후, 나머지 마스크들을 각 패턴에 따라 순환하여 측정한다.

$b_{wv} = 1_M \tau_o M^T \phi W_N \tilde{V}_N^T$: 이미지마스크를 모두 off한 후, 그릴 분광계의 각 마스크를 정해진 패턴에 따라 순환하여 측정한다.

위에서 정의된 행렬을 이용하면 식 (26)은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned} \eta &= S_M D_M \phi S_N D_N^T S_N^T + b_{wv} + b_{pw} - b_w + e \\ &= S_M D_M (S_N D_N S_N^T \phi^T)^T + b_{wv} + b_{pw} - b_w + e \end{aligned} \quad (27)$$

그림 7은 식 (27)의 수정된 D^{-1} 기법에 기반한 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계 모델링을 나타낸다.

수정된 D^{-1} 기법에 의한 스펙트럼 복원법은 식(27)의 부측정시에도 겹파기에 의한 잡음이 발생하게 된다. 따라서 식 (28)과 같이 각각의 부측정에 대한 측정치는 실제값에 측정잡음이 포함된 형태로 얻어진다.

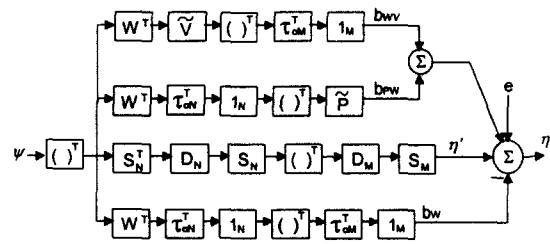


그림 7 D^{-1} 기법의 시스템 모델링

Fig. 7 The system modeling for D^{-1} method

$$\tilde{b}_{wv} = b_{wv} + e_{wv}$$

$$\tilde{b}_{pw} = b_{pw} + e_{pw}$$

$$\tilde{b}_w = b_w + e_w$$

이와같은 부측정들은 η 를 측정하는 주측정에서와 같은 환경에서 측정이 되므로 통계적 특성이 같은 겹파기 잡음을 나타낸다. 식 (28)의 각 측정값을 N_0 번 측정하고 이들에 대하여 동일 횟수의 공가산을 수행하여 얻어진 값들을 각각 \tilde{b}_{wv} , \tilde{b}_{pw} , \tilde{b}_w 라고 하자.

이와 같이 얻어진 부측정의 추정치들을 이용하여 다음과 같이 η' 을 정의한다.

$$\begin{aligned} \eta' &= \eta - \tilde{b}_{wv} - \tilde{b}_{pw} + \tilde{b}_w \\ &= S_M D_M \phi S_N D_N^T S_N^T + e' \end{aligned} \quad (29)$$

여기서 e' 는 별도 측정값에 측정잡음이 고려된 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e' = e - e_{wv} - e_{pw} + e_w \quad (30)$$

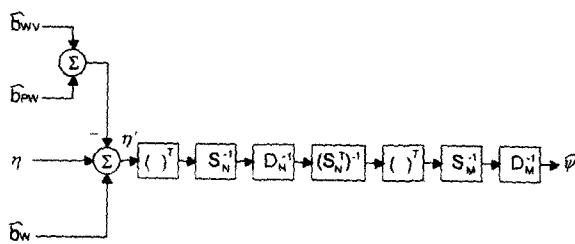
각 측정에서 발생하는 잡음은 주측정에서와 통계적 특성이 같으므로 측정잡음의 분산은 σ^2 로 주어진다. N_0 번의 공가산을 통하여 각각의 측정에 대한 분산은 다음과 같다.

$$E[e_{wv}^2] = E[e_{pw}^2] = E[e_w^2] = \frac{\sigma^2}{N_0}$$

식 (29)로부터 스펙트럼의 실제치와 추정치는 각각 식 (31)과 식 (32)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \phi &= D_M^{-1} S_M^{-1} \eta' (S_N^T)^{-1} (D_N^T)^{-1} S_N^{-1} \\ &\quad + D_M^{-1} S_M^{-1} e' (S_N^T)^{-1} (D_N^T)^{-1} S_N^{-1} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi} &= D_M^{-1} S_M^{-1} \eta' (S_N^T)^{-1} (D_N^T)^{-1} S_N^{-1} \\ &= D_M^{-1} S_M^{-1} \{(S_N^T)^{-1} D_N^{-1} S_N^{-1} (\eta')^T\}^T \end{aligned} \quad (32)$$

그림 8 D^{-1} 기법의 처리모델링Fig. 8 The recovery process modeling for D^{-1} method

제안된 전체 시스템은 기존의 하다마드 변환 영상 분광계와 같이 1가지의 주측정과 3가지의 부측정을 행한다. 이와 같이 얻어진 측정값들은 η' 을 얻는데 사용되고 이를 이용하여 식 (32)과 같은 방법으로 스펙트럼 추정치를 얻어내게 된다. 그림 8은 식 (32)로부터 D^{-1} 기법에 의한 스펙트럼 추정치의 블록 다이어그램이다.

오차행렬은 식 (31)과 식 (32)를 이용하면 다음과 같다.

$$\xi = \phi - \hat{\phi} = D_M^{-1} S_M^{-1} e' (S_N^T)^{-1} (D_N^T)^{-1} D_N^{-1} S_N^{-1} \quad (33)$$

식 (33)의 오차행렬에 따른 평균 MSE는 다음과 같은 일련의 과정을 통하여 얻어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{1}{MN^2} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \xi_{ij}^2 \\ &= \frac{4\sigma^2}{MN^2} Tr[D_M^{-1} S_M^{-1} (S_M^{-1})^T (D_M^{-1})^T] \\ &\quad \cdot Tr[(S_N^{-1})^T (D_N^{-1})^T S_N^{-1} (S_N^{-1})^T D_N^{-1} S_N^{-1}] (1 + \frac{3}{N_0}) \\ &= \frac{256\sigma^2}{(M+1)^2(N+1)^4} [1 + \frac{3}{N_0}] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{1}{d_{M_i}^{-2} d_{N_j}^{-2}} \end{aligned} \quad (34)$$

주측정에 대한 L번의 공가산을 수행하면 평균 MSE는 다음과 같다.

$$\epsilon(L) = \frac{256\sigma^2}{(M+1)^2(N+1)^4} [\frac{1}{L} + \frac{3}{N_0}] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{1}{d_{M_i}^{-2} d_{N_j}^{-2}} \quad (35)$$

4. 컴퓨터 모의실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 공간영역에 따라 다른 스펙트럼정보를 갖는 시료를 대상으로 하다마드 변환 영상 분광계와 제안된 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계의 복원된 스펙트럼 추정치의 평균 MSE를 비교하여 제안한 시스템의 우수성을 보이고자 한다. 모의실험에서는 공간영역 요소수(spatial position element)와 스펙트럼영역 요소수(spectrum element)를 바꾸어 가면서 평균 MSE의 변화를 각 시스템에 대하여 실험하여 제시하고 주측정 공가산과 부측정 공가산의 횟수를 변화시켜 가면서 얻어진 평균 MSE를 비교한다. 이상의 모든 스펙트럼 회복을 위한 회복기법으로는 수정된 D^{-1} 기

법을 적용하였다. 한편 비이상적인 마스크의 투과율 특성은 그림 1의 PDLC마스크의 투과율 특성을 사용하였다.

첫 번째 모의실험에서 입력스펙트럼으로 사용하는 가상시료는 그림 9와 같이 공간영역에 따른 다른 스펙트럼정보를 지니며 가우시안 함수로 표현된다. 가상시료의 공간영역은 63개, 스펙트럼 영역의 수는 127개로 정하였다. 입력 스펙트럼에 대해 하다마드 변환 영상 분광계와 본 논문에서 제안한 시스템의 복원 결과를 비교해 본다. 주측정과 부측정에서의 공가산의 횟수는 각각 1회와 10회로 정하였고 잡음의 평균은 0, 분산은 0.1로 하였다. 그림 10은 하다마드 변환 영상 분광계에 D^{-1} 기법을 적용하여 얻은 스펙트럼 추정치이다. 그림에서 알 수 있듯이 잡음의 영향이 많이 감소하여 대략적인 스펙트럼의 형상을 알아볼 수 있다. 이때 회복된 스펙트럼의 평균 MSE는 6.2427×10^{-4} 이었다. 그림 11은 본 논문에서 제안한 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계에 수정된 D^{-1} 기법을 이용하여 복원된 스펙트럼의 추정치이다. 이때의 평균MSE는 기존의 하다마드 변환 영상 분광계의 약 1/32에 해당하는 1.9356×10^{-5} 의 값을 얻었다.

두 번째 실험에서는 공간-스펙트럼영역 요소수를 바꾸어 가면서 측정하여 얻은 각 시스템에서의 평균 MSE를 구하여 제시하였다. 그리고 주측정의 공가산과 부측정의 공가산을 바꾸어 가며 실험을 하여 얻어지는 각 시스템에서의 평균 MSE를 제시하였다.

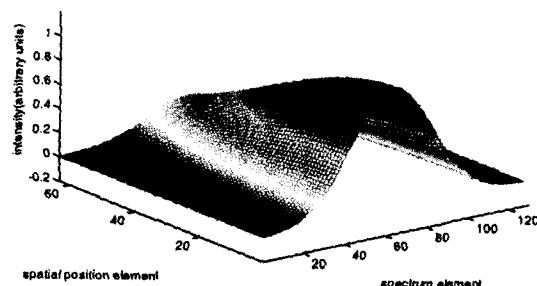


그림 9 입력스펙트럼의 3차원 그래프

Fig. 9 Three dimensional graph of the input spectrum

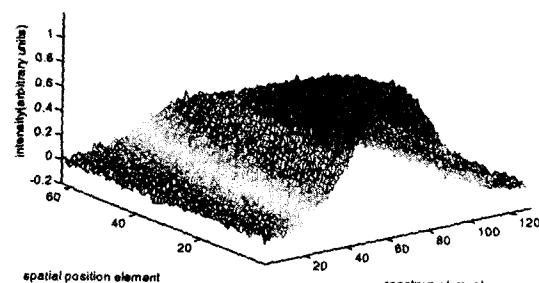


그림 10 하다마드 변환 영상 분광계를 통해 회복된 스펙트럼 추정치

Fig. 10 Spectrum estimate recovered from the triply encoded HTIS

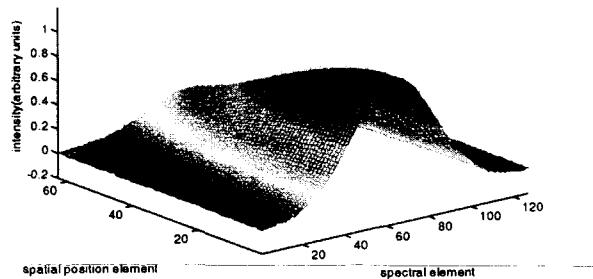


그림 11 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계의 회복된 스펙트럼 추정치

Fig. 11 spectrum estimate recovered from the triply encoded HTIS

표 1은 공간 스펙트럼 영역 요소수의 변화에 따른 평균 MSE를 나타내 준다. 표 1(a)는 스펙트럼 영역 요소수를 255로 고정시키고 공간영역 요소수를 바꾸어 가면서 실험을 하였다. 이때 주축정과 부축정에 있어서의 공가산 횟수를 1회로 정하고 측정잡음의 분산은 0.1로 정하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 기존의 하다마드 변환 영상 분광계와 제안된 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계는 M값이 증가함에 따라 평균 MSE는 감소함을 알 수 있다. 또한 M값이 증가함에 따라 두 시스템이 동일하게 약 1/2의 감소율을 보임을 알수 있다.

표 1(b)는 공간영역 요소수를 255로 고정시키고 스펙트럼 영역 요소수를 바꾸어 가면서 실험을 하였다. 공가산횟수와 측정잡음의 분산등의 조건은 표 1(a)에서와 동일하게 설정하였다. 표 1(a)의 실험과는 달리 공간영역 요소수를 일정하게 한 상태에서 스펙트럼 영역요소수를 증가시키면 하다마드 변환 영상 분광계는 스펙트럼 영역요소수 변화 단계마다 약 1/2정도 감소율을 가졌지만 제안된 시스템에 대해서는 약 1/4로 그 감소정도가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 제안한 시스템은 출력부의 스펙트럼영역에서 2번의 부호화를 수행하는 그릴 분광계를 적용하여 시스템을 구성하였기 때문이다. 즉, 스펙트럼영역에서의 2번의 부호화 과정에서 스펙트럼 영역 요소수 N의 증가에 따라 다중화의 효과가 더욱 증가하여 평균 MSE는 감소하게 된다. 표 2(a)는 공간영역수를 63, 스펙트럼 영역수를 255, 부축정의 공가산 횟수를 1로 고정시키고 주축정시의 공가산 변화에 대한 측정시 얻어지는 평균 MSE를 보여준다. 그리고 (b)는 같은 조건에서 반대로 주축정 공가산횟수를 1로 고정시키고 부축정 공가산 변화에 대한 측정시 얻어지는 결과를 보여준다. 두 경우 모두에서 측정잡음의 분산은 0.1로 정하였다. 표 2(a), (b)를 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 공가산 횟수를 10배씩 증가함에 따라 모든 시스템에서 평균 MSE의 감소정도가 1/2~2/3에 지나지 않는다는 것이다.

이는 고정시킨 공가산 횟수 즉 첫 번째의 경우 부축정 공가산 횟수, 두번째의 경우 주축정 공가산 횟수를 1이라는 매우 작은 값으로 정하였기 때문이다. HTIS와 제안한 3-HTIS시스템에 D^{-1} 기법을 적용하였을 경우 얻어지는 평균 MSE의 식 (17), (34)을 통하여 그 이유를 알 수 있다.

표 1 공간영역-스펙트럼 영역 요소수의 변화에 따른 평균 MSE

Table 1 Average MSE according to the spectrum and spatial element

시스템 M \ N	HTS	HTIS	3-HTIS
31	5.4621×10^{-3}	2.0406×10^{-3}	3.1759×10^{-5}
63	5.4621×10^{-3}	1.0504×10^{-3}	1.6349×10^{-5}
127	5.4621×10^{-3}	5.4510×10^{-4}	8.4840×10^{-6}
255	5.4621×10^{-3}	2.9609×10^{-4}	4.6083×10^{-6}

(a) 공간영역 요소수(M)의 변화에 따른 각 시스템의 평균 MSE

시스템 N \ L	HTS	HTIS	3-HTIS
31	3.7360×10^{-2}	2.0252×10^{-3}	2.4524×10^{-4}
63	1.9234×10^{-2}	1.0426×10^{-3}	6.4147×10^{-5}
127	9.9881×10^{-3}	5.4143×10^{-4}	1.6787×10^{-5}
255	5.4621×10^{-3}	2.9609×10^{-4}	4.6083×10^{-6}

(b) 스펙트럼영역 요소수(N)의 변화에 따른 각 시스템의 평균 MSE

* HTS : 하다마드 트랜스폼 스펙트로미터
HTIS : 하다마드 트랜스폼 이미징 스펙트로미터
3-HTIS : 3중 부호화한 하다마드 트랜스폼 스펙트로미터

표 2 공가산의 변화에 따른 평균 MSE

Table 2 Average MSE according to the coaddition

시스템 L \ N _o	HTS	HTIS	3-HTIS
1	5.4621×10^{-3}	1.0504×10^{-3}	1.6349×10^{-5}
10	3.0042×10^{-3}	8.1408×10^{-4}	1.2670×10^{-5}
100	2.7584×10^{-3}	7.9045×10^{-4}	1.2303×10^{-5}

(a) 주축정의 공가산(L)을 변화시킬 때

시스템 N _o \ L	HTS	HTIS	3-HTIS
1	5.4621×10^{-3}	1.0504×10^{-3}	1.6349×10^{-5}
10	3.0042×10^{-3}	3.4139×10^{-4}	5.3134×10^{-6}
100	2.7584×10^{-3}	2.7049×10^{-4}	4.2098×10^{-6}

(b) 부축정의 공가산(N_o)을 변화시킬 때

즉 기존의 하다마드 변환 분광계의 평균 MSE의 $(\frac{1}{L} + \frac{1}{N_o})$ 부분이나 식 (17), (34)의 $(\frac{1}{L} + \frac{3}{N_o})$ 부분에서 어느 한쪽이 1이라는 값을 갖게 되면 다른 한 쪽이 작더라고 전체적으로 볼 때에는 작아지지 않는 것이 그 원인이다.

표 3은 이와 같은 이유 때문에 부공가산의 횟수를 100으로 고정시키고 주공가산의 횟수를 1, 10, 100으로 바꾸어 가면서 실험을 한 결과이다. 위의 다른 실험들과 마찬가지로 공간영역 요소수는 63, 스펙트럼 영역 요소수는 255로 정하고 측정잡음의 분산은 0.1로 정하였다.

표 3 공가산의 변화에 따른 평균 MSE

Table 3 Average MSE according to the coaddition

L \ 시스템	HTS	HTIS	3-HTIS
1	2.7584×10^{-3}	2.7049×10^{-4}	4.2908×10^{-6}
10	3.0042×10^{-4}	3.4139×10^{-5}	5.3134×10^{-7}
100	5.4621×10^{-5}	1.0504×10^{-5}	1.6349×10^{-7}

표 3과 표 2(a)의 비교에서 부측정 공가산 횟수가 주측정 공가산 횟수보다 상대적으로 클 경우에는 주측정 공가산의 변화에 민감함을 알 수 있다. 즉 표 2(a)에서 주측정 공가산 횟수가 1에서 10으로 증가함에 따라 평균 MSE는 1/10정도 감소하였지만 표 3의 경우에는 같은 경우에서 1/10정도의 감소율을 보였다. 하지만 10에서 100으로 증가하게 되면 부측정 공가산 횟수와 같아져 그 감소정도가 완화된다. 표 3에서는 약 1/3정도 감소하였는데 이는 부측정 공가산 횟수에 비해 상대적으로 더 영향을 끼칠 수 없게 되었음을 나타내 주는 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 우순환 S행렬로 제어되는 그릴 분광계를 하다마드 변환 영상 분광계의 스펙트럼 복원법과 양립을 위해 좌순환 S행렬로 제어되는 시스템을 제안하여 이를 하다마드 변환 영상 분광계의 출력부에 적용하여 전체적으로 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계를 제안하였다. 제안한 전체 시스템의 스펙트럼 복원법으로 비이상적인 마스크를 사용할 경우의 수정된 D^{-1} 기법을 모델링하여 기존의 하다마드 변환 영상 분광계와 비교하여 제안한 시스템의 우수성을 보였다. 전체 시스템은 1번의 주측정과 3번의 부측정을 수행하여 기존의 하다마드 변환 영상 분광계와 같다. 제안된 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계는 출력부에 있는 그릴 분광계의 출력마스크가 전자광학마스크가 아닌 기계식 고정마스크이므로 기존의 하다마드 변환 영상 분광계에 비해 제작에 소용되는 비용의 증가가 매우 작다.

첫 번째 모의실험에서는 제안한 시스템의 공간정보 획득 능력, 두 번째 모의실험에서는 공간영역 요소수와 스펙트럼 영역 요소수의 증가에 따른 각 시스템의 평균 MSE를 비교하여 제안한 시스템의 평균 MSE의 감소가 기존의 다른 시스템에 비해 월등함을 입증하였다. 하다마드 변환 영상 분광계와 제안한 3중 부호화한 하다마드 변환 영상 분광계는 공간영역 요소수와 스펙트럼 영역 요소수의 영향을 동시에 받는다. 그리고 공간영역 요소수의 증가를 통해서는 제안한 시스템과 기존의 하다마드 변환 영상 분광계에서의 평균

MSE의 감소정도가 같게 나타났다. 반면 스펙트럼영역 요소수를 증가시키면 제안한 시스템의 평균 MSE감소가 더 커짐을 알 수 있었다. 이는 제안한 시스템이 스펙트럼 영역에서 2번의 다중화를 취하기 때문에 스펙트럼 영역 요소수의 증가를 통해 제안한 시스템의 성능이 증가할 수 있음을 보인다. 마지막으로 공가산의 변화에 따른 평균 MSE의 변화를 각 시스템에 대하여 살펴 보았다. 하다마드 변환 영상 분광계와 제안된 시스템의 스펙트럼 복원법에 D^{-1} 기법을 적용할 경우 주측정 공가산과 부측정 공가산의 영향을 동시에 받는다. 표 2와 표 3을 통하여 주측정 공가산에 의한 평균 MSE 감소효과를 보기 위해서는 부측정 공가산의 횟수를 주측정 공가산에 비해 충분히 크게 해 주어야 함을 알 수 있다.

제안한 시스템은 기존의 하다마드 변환 영상 분광계의 출력부에 그릴 분광계를 적용함으로서 전체적으로 3중 부호화를 수행하여 평균 MSE를 감소시켜 신호대 잡음비를 증가시킴으로서 개선된 성능을 지니지만 기존 시스템에 비해 모델링이 복잡하다는 단점을 지니고 있다.

감사의 글

본 논문은 1997년 한국학술진흥재단 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음(과제번호: 1997-001-E00223)

참 고 문 헌

- [1] B. Moslehi, J. W. Goodman, M. Tur, and H. J. Shaw, "Fiber-optic lattice signal processing," Special Issues on Optical Computing, *Proc. IEEE*, pp. 909-930, July, 1984.
- [2] M. Harwit and N. J. A. Sloane, *Hadamard Transform Optics*, Academic Press, New York, 1979.
- [3] S. A. Dyer, B. K. Harms, J. B. Park, T. W. Johnson and R. A. Dyer, "A Fast Spectrum-Recovery Method for Hadamard Transform Spectrometers Having Nonideal Masks", *Applied Spectroscopy*, Vol. 43, No. 3, pp. 435-440, March/April 1989.
- [4] B. K. Harms, R. A. Dyer, S. A. Dyer, T. W. Johnson and J. B. Park "An Introduction to Hadamard spectroscopy and the multiplex advantage," in *IEEE IMTC/89 Conference Record*, pp 434-438 1989.
- [5] Ruth A. Dyer, Stephen A. Dyer, Brian K. Harms, Timouthy W. Johnson and Jin Bae Park, "Implementation Problems in Hadamard Transform Spectrometry", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 39, No. 1, pp. 163-167, February, 1990.
- [6] J. B. Park, T. W. Johnson, S. A. Dyer, B. K. Harms, and R. A. Dyer, "On the Mean Square Error of Various Spectrum-Recovery Techniques in Hadamard Transform Spectrometry", *Applied Spectroscopy*, Vol 44, No. 2, pp. 219-228, 1990.
- [7] B. K. Harms, J. B. Park and S. A. Dyer, "On the Use of

Fast Hadamard Transform for Spectrum-Recovery in Hadamard Transform Spectroscopy", *Applied Spectroscopy*, Vol. 46, No. 9, pp. 1358-1361, Nov., 1992.

[8] 박진배, 곽대연, 진승희, 주진만, "하다마드 트랜스폼 이미징 스펙트로미터에 관한 연구", *대한전기학회지*, Vol. 48A, No 5, May 1999.

저자 소개



곽 대 연(郭 大 淵)

1972년 8월 28일생. 1996년 연세대 전기 공학과 졸업(학사). 1998년 동대학원 전 기공학과 졸업(석사). 현재 대우전자 디지털 정보통신연구2팀 연구원.

Tel : 751-1366

E-mail : dykwak@dit.dwe.co.kr



박 영 재(朴 永 在)

1974년 5월 15일생. 1998년 연세대 전기공 학과 졸업(학사). 현재 동대학원 전기 및 컴퓨터공학과 석사과정.

Tel : 361-2773

E-mail : yeongjae@control.yonsei.ac.kr



박 진 배(朴 珍 培)

1954년 8월 7일생. 1977년 연세대 전기 공학과 졸업(학사). 1985년 미국 Kansas State Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 졸업 (석사). 1990년 미국 Kansas State Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공 박). 현재 연세대학교 전기 및 컴퓨터공

학과 부교수.

Tel : 361-2773

E-mail : jbpark@control.yonsei.ac.kr