

다중 성분의 저표본화된 AM, FM 및 AM-FM 신호들의 복조와 성능

論 文
49D-7-8

Demodulation and Performance of Multicomponent Undersampled AM, FM and AM-FM Signals

孫 泰 鎬* · 黃 義 天**
(Tae-Ho Sohn · Eui-Cheon Hwang)

Abstract - We propose a nonlinear demodulation algorithm for undersampled multicomponent AM(Amplitude Modulation), FM(Frequency Modulation) and AM-FM signals. First, we derive respectively undersampling frequency of the AM, FM and AM-FM using undersampling scheme, and separate respectively monocomponent signals from multicomponent signals using periodic algebraic separation algorithm. In this case augmented separation matrix is very regular and sparse, it has a special structure. The proposed demodulation algorithm detects respectively message signals of the IA(Instantaneous Amplitude) and IF(Instantaneous Frequency) from discrete monocomponent AM, FM and AM-FM signals with an undersampling frequency to be controllable. Verifying the RMS(Root Mean Squares) errors of the detected signals, we show that the performance is excellent.

Key Words : Nonlinear demodulation, Multicomponent signals, Augmented separation matrix, Undersampling frequency

1. 서 론

다중 성분의 이산적인 AM, FM, 그리고 AM-FM 신호들은 다음의 식들로 각각 정의한다.

$$x_{AM}(n) \equiv \sum_{i=1}^L a_i(n) \cdot \cos(\Omega_{ci}n + \theta_i) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_{FM}(n) &\equiv \sum_{i=1}^L \cos\left(\int_0^n \Omega_i(m)dm + \theta_i\right) \\ &\equiv \sum_{i=1}^L \cos(\Omega_{ci}n + \beta_i \sin(\Omega_{mi}n) + \theta_i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_{AM-FM}(n) &\equiv \sum_{i=1}^L a_i(n) \cdot \cos\left(\int_0^n \Omega_i(n)dn + \theta_i\right) \\ &\equiv \sum_{i=1}^L A_{ci}(1 + m_i \cdot \cos(\Omega_{m1i}n)) \\ &\quad \cdot \cos(\Omega_{ci}n + \beta_i \sin(\Omega_{m2i}n) + \theta_i) \end{aligned} \quad (3)$$

식(1)~(3)에서 $a_i(n)$ 및 $\Omega_i(n)$ 은

$$a_i(n) = A_{ci}(1 + m_i \cdot s_{1i}(n)), \quad (i=1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

$$\Omega_i(n) = \Omega_{ci} + \beta_i \cdot \Omega_{mi} \cdot s_{2i}(n), \quad (i=1, 2, \dots, L) \quad (5)$$

이며, 식(4)는 순시 크기(IA)이며 식(5)는 순시 주파수(IF) 신호들이다. 여기에서 우리는 다중 성분을 포함한 이산신호들인 식(1)~(3)에서의 정보신호인 $s(n) = \cos(\Omega_m(n))$ 들을 각각 검파해야 한다. 식(3)의 AM-FM 신호에서는 두 개의 정보신호, 즉 IA 및 IF의 정보신호가 포함되어 있다.

최근의 연구에서, 두 성분의 AM-FM 신호들에 대한 복조 알고리즘[1]은 혼성 신호에 대한 분리행렬을 정방행렬로 사용하여 네 성분 이상의 신호들에 대해서는 복조가 어려웠다. PASSED 알고리즘[2]은 두 성분 및 다섯 성분의 AM-FM 신호들에 대한 것으로 신호들에 대한 저표본화의 개념이 없으며, 이 신호들에 백색 가우시안 잡음 및 직류 성분이 섞인 변조신호에 대하여 검파가 어렵다.

본 논문에서는 세 종류의 다중성분을 가진 변조신호들로부터 정보신호들을 얻기 위해 먼저 에너지 연산자[3,4]와 저표본화 기법[5]을 사용하여 다중성분의 AM, FM 및 AM-FM의 각각에 대하여 이에 대응되는 표본화 주파수를 유도한다. 이 표본화 주파수는 정수인수에 의해서 임의로 조절이 가능하다[1,5]. 그리고 혼성의 어떠한 주기신호들도 대수적으로 분리할 수 있는 주기신호의 대수적인 분리 알고리즘[6,7]을 적용하여 다중 성분의 저표본화된 AM, FM 및 AM-FM 신호들을 단일 성분의 신호들로 각각 분리한다. 여기에서 사용한 계수행렬은 확장된 분리행렬로 매우 규칙적이고 '0'이 많이 할당되어 sparse하며, 단순한 구조를 가진다. 제안된 알고리즘은 세 종류의 다중 성분의 변조신호들 중 여섯 성분의 신호들로 예를 들었으며, 단일 성분으로 분리된 AM, FM 및 AM-FM 신호들로부터 정보신호들이 효율적으

* 正 會 員 : 江 原 大 工 大 電 氣 工 學 科 · 博 士 修 了
** 正 會 員 : 春 川 技 能 大 學 電 氣 技 術 科 教 授 · 工 博
接 受 日 字 : 2000年 4 月 28日
最 終 完 了 : 2000年 6 月 13日

로 각각 검파됨을 보인다. 이 알고리즘을 검증하기 위해서, 식(4), (5)의 원 정보신호들과 제안된 알고리즘에서 각각 검파된 신호들의 RMS 오차를 구한다. 여기에서 입력신호에 잡음 및 DC 성분이 없을 때와 이들이 섞였을 때를 표본화 주파수에 따라서 각각 수치 해석한 결과, 제안된 복조기들의 성능이 우수함을 보인다.

2. 다중 성분의 복조

식(1)~(3)과 같이 어떤 L 개의 변조신호들이 주어지면 우리가 원하는 정보신호들을 검파하기 위해서는 각각 하나로 독립된 단일 성분의 변조신호들로 분리시켜야 한다. 이 방법으로 주기신호의 대수적 분리 알고리즘[6,7]을 사용하여 이 분리 시스템으로부터, 어떤 조건을 부가하여 분리행렬을 확장시킨다. 이 확장된 분리 시스템으로부터 최소자승 해를 구한다. 이 해로부터 한 주기를 가진 독립된 변조신호들이 L 개로 구성된 연속적으로 이어진 일련의 변조신호를 얻는다. 이 신호를 가지고 한 주기를 가진 변조신호로 각각 나눌 수 있으며, 이 신호는 어떤 주기를 가진 변조신호들로 각각 독립된다. 독립된 신호는 에너지 연산자(Teager-Kaiser 연산자)[3]를 이용한 에너지 복조 알고리즘[1,5]을 통해 원하는 정보신호로 검파된다. 여기에서 에너지 연산자에 의해 얻은 결과식에 어떤 가정을 하므로써 가변이 가능한 표본화 주파수 [1,5]가 유도된다. 다중 성분으로 확장시킨 표본화 주파수를 기반으로 식(1)~(3)의 L 성분의 세 종류의 변조신호(AM, FM 및 AM-FM)로부터 IA 또는 IF의 정보신호들을 추정하는 것이다.

2.1 다중 성분의 변조신호들에 대한 저표본화 주파수

다중 성분의 AM 및 FM 신호들인 식(1)과 (2)에서 단일 성분의 AM 및 FM 신호에 대한 표본화 주파수는 각각 다음과 같다.[5]

$$f_s = \frac{4f_c}{(2n+1)} \tag{6}$$

$$f_s = \frac{4(f_c + \beta \cdot f_m)}{(2n+1)} \tag{7}$$

여기에서 f_c 는 반송 주파수, β 는 FM의 변조지수, f_m 는 정보 주파수이며, $(2n+1)$ 은 임의의 저표본화 정수 인자이다. 단일 성분의 AM 및 FM 신호를 각각 다중 성분의 신호들로 확장시키면 식(6) 및 (7)은 각각

$$f_{s_i} = \frac{4f_{c_i}}{(2n_i+1)} \tag{8}$$

$$f_{s_i} = \frac{4(f_{c_i} + \beta_i \cdot f_{m_i})}{(2n_i+1)} \tag{9}$$

이며, 여기에서 $i=1, 2, \dots, L$ 이다. 같은 방법으로 다중 성분의 AM-FM 신호들에 대한 저표본화 주파수는 [1]에서의 두 성분을 다중 성분으로 확장시키면

$$f_{s_i} = \frac{4(f_{c_i} + \beta_i \cdot f_{m_{2i}})}{(2n_i+1)}, \quad (i=1, 2, \dots, L) \tag{10}$$

이다. 여기에서 $f_{m_{2i}}$ 는 순시주파수의 정보 주파수이다. 다중 성분의 AM, FM 및 AM-FM 신호들에 대한 각각의 표본화 주파수인 식(8)~(10)들은 저표본화 정수 인자에 의하여 조절이 가능하다. 그리고 완전 표본화($n=0$)의 경우에 식(8)~(10)에서 $f_c \gg \beta \cdot f_m$ 이므로 모두 반송 주파수의 거의 4 배임을 알 수 있다.

2.2 다중 성분의 대수적 분리

다중 성분의 변조신호들인 식(1)~(3)은 단일 성분의 신호들의 합으로 $x(n) = x_1(n) + x_2(n) + \dots + x_L(n)$ 라고 쓸 수 있다. 여기에서 $x_1(n), x_2(n), \dots, x_L(n)$ 은 단일 성분의 변조신호들이다. 이들 각각에 대한 주기가 N_1, N_2, \dots, N_L 일 때, $C \cdot y = x$ 의 형태로 구성될 수 있으며, 길이가 K 개인 다중 성분의 변조신호 $x(n)$ 은 $(K \times 1)$ 의 행벡터로

$$\begin{pmatrix} I_{N_1} & I_{N_2} & \dots & I_{N_L} \\ I_{N_1} & I_{N_2} & \dots & I_{N_L} \\ I_{N_1} & I_{N_2} & \dots & I_{N_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ \vdots \\ x_1(N_1-1) \\ x_2(0) \\ x_2(1) \\ \vdots \\ x_2(N_2-1) \\ \vdots \\ x_L(0) \\ x_L(1) \\ \vdots \\ x_L(N_L-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(K-1) \end{pmatrix} \tag{11}$$

$(K \times M) \qquad (M \times 1) \qquad (K \times 1)$

과 같다. 여기에서 주기들의 합을 $M = N_1 + N_2 + \dots + N_L$ 이라고 한다면, 단일 성분으로의 분리 행렬 C 는 $(K \times M)$ 계수 행렬로 구성된다.(단, $K \geq M$) 행렬 C 내의 $I_{N_1}, I_{N_2}, \dots, I_{N_L}$ 은 단위 행렬들로 각각 차수가 N_1, N_2, \dots, N_L 이다. 행 벡터 y 는 단일 성분의 변조신호들로 이루어진 $(M \times 1)$ 행렬이다. 이러한 분리 체계를 가진 식(11)의 $C \cdot y = x$ 에 대한 최소자승 해는

$$y = (C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \cdot x \tag{12}$$

이다. 그러나 식(12)의 분리 시스템은 해를 갖기 위한 전제조

간[6,7]이 필요하다. 이 경우에 첫째로, 주기들 간에는 서로 소(coprime)가 되어야 한다. 둘째는 분리 행렬 C 의 rank는 full rank를 가져야 한다. 이것은 역행렬이 존재해야 되기 때문이다. 이것을 해결하는 방법으로 zero DC 조건[6,7]을 식(11)에 적용하면 식(13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1(0) + x_1(1) + \dots + x_1(N_1 - 1) &= 0, \\ x_2(0) + x_2(1) + \dots + x_2(N_2 - 1) &= 0, \\ x_3(0) + x_3(1) + \dots + x_3(N_3 - 1) &= 0, \\ &\vdots \\ x_p(0) + x_p(1) + \dots + x_p(N_p - 1) &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서 $p=L-1$ 이다. 예를 들어 여섯 성분의 변조신호라면 $p=5$ 가 된다. 식(13)의 조건을 추가로 식(11)인 $C \cdot y = x$ 를 다시 쓰면 다음의 형태로 놓을 수 있다.

$$C_0 \cdot y = x_0 \quad (14)$$

식(11)에서 계수 행렬인 분리 행렬 C 를 식(13)의 조건에 의해 확장된 분리 행렬 C_0 는 식(15)와 같이 구성된다.

$$C_0 = \begin{pmatrix} \begin{array}{c|c|c|c|c|c} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & \dots & N_L \\ \hline 11 \dots 1 & 00 \dots 0 & 00 \dots 0 & 00 \dots 0 & \dots & 00 \dots 0 \\ 00 \dots 0 & 11 \dots 1 & 00 \dots 0 & 00 \dots 0 & \dots & 00 \dots 0 \\ 00 \dots 0 & 00 \dots 0 & 11 \dots 1 & 00 \dots 0 & \dots & 00 \dots 0 \\ 00 \dots 0 & 00 \dots 0 & 00 \dots 0 & 11 \dots 1 & \dots & 00 \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{N_1} & I_{N_2} & I_{N_3} & I_{N_4} & \dots & I_{N_L} \\ I_{N_1} & I_{N_2} & I_{N_3} & I_{N_4} & \dots & I_{N_L} \\ I_{N_1} & I_{N_2} & I_{N_3} & I_{N_4} & \vdots & I_{N_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \\ \hline (K+L-1) \times (N_1+N_2+\dots+N_L) \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기에서 분리 행렬 C_0 의 열의 길이는 M 이고, 행의 길이가 $M_c = K+L-1 \geq M$ 인 $(M_c \times M)$ 계수 행렬이다. 또한 이 분리행렬은 0의 할당율이 높으므로 sparse 하고, 규칙적인 체계로 구성되어 있다.

식(14)에서 다중 성분의 변조신호 $x(n)$ 의 확장된 열 벡터 x_0 는 0이 $(L-1)$ 개를 포함하여 길이가 $K+L-1$ 인 식(16)과 같이 표현된다.

$$x_0 = [0, 0, \dots, 0, x(0), x(1), \dots, x(K-1)]^T \quad (16)$$

여기에서 변조신호 $x(n)$ 의 길이는 K 이다.

그래서 다중 성분을 포함한 변조신호들을 단일 성분의 신호로 분리하는 것은 식(15)와 (16)과 같이 확장시켜 그 해를 얻을 수 있으며, 이에 대한 최소자승 해는

$$\begin{aligned} y &= (C_0^T \cdot C_0)^{-1} \cdot C_0^T \cdot x_0 \\ &= [x_1(0), \dots, x_1(N_1-1), x_2(0), \dots, x_L(N_L-1)]^T \end{aligned} \quad (17)$$

이며, 이 해는 각각 한 주기를 가진 독립된 단일 성분의 변

조신호로 분리할 수 있음을 보인다. 그러므로 우리는 다중 성분의 AM, FM 및 AM-FM 신호들을 이 대수분리 알고리즘으로 각각 분리할 수 있으며, 이로부터 식(8)~(10)의 각기 다른 저표본화 주파수와 더불어 원하는 정보신호들을 각각 검파해야 한다.

2.3 정보신호들의 검파

다중 성분의 변조신호들은 식(17)을 사용하여 각각의 한 주기의 단일 성분의 변조신호로 독립적으로 분리되어, 저표본화 기법에 의한 에너지 복조 알고리즘[1,5]을 통해 IA와 IF의 정보신호를 입력의 변조신호에 따라 검파되는 제안된 알고리즘을 그림 1의 블록도에 나타내었다.

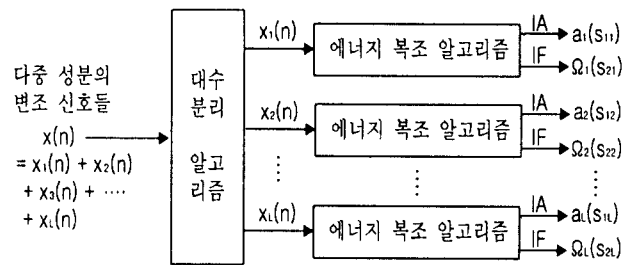


그림 1 다중 성분의 변조신호들의 복조 알고리즘의 블록도
Fig. 1 Block diagram of the demodulation algorithm of multicomponent modulation signals

제안된 다중 성분에 대한 복조 알고리즘은 저표본화된 입력신호가 다중 성분의 AM 신호들일 경우에, 주기신호의 대수 분리 알고리즘에 의해 독립된 단일 성분의 AM 신호들로 각각 분리된다. 각각 분리된 신호들로부터 에너지 복조 알고리즘을 거쳐 IA 신호인 a_i 로부터 정보신호들을 각각 검파함을 보여 준다. 또한 다중 성분의 FM 신호일 때는 IF 신호인 Ω_i 로부터, 다중 성분의 AM-FM 입력신호들이면 a_i 와 Ω_i 로부터 각각 정보신호들을 검파한다.

단일 성분의 AM 및 FM 신호에 대한 에너지 복조 알고리즘[5]과 두 성분의 AM-FM 신호들로부터의 복조 알고리즘[1]을 토대로 다중 성분의 세 종류(AM, FM 및 AM-FM)의 신호들에 대한 정보신호들($s_{y_i}(n)$)을 다섯 종류의 디지털 복조기별로 유도하여 표 1에 정리하였다. 여기에서 $y=1,2$ 이며, $i=1,2,\dots,L$ 이다.

그림 1 및 표 1에서 $s_{1i}(n)$ 은 다중 성분의 AM을, $s_{2i}(n)$ 은 다중 성분의 FM을 입력신호로 했을 때의 정보신호들이다. 다중 성분의 AM-FM 일 경우의 정보신호들은 IA의 추정에서의 $s_{1i}(n)$ 및 IF의 추정에서의 $s_{2i}(n)$ 이 된다. 예로써 식(1)의 AM 신호에 대한 비선형 에너지 추적 연산자[4], $\Psi(x_{AM}(n))$ 은 표 1에서 QF1의 복조기라면 다음의 식(18)과 같이 쓸 수 있다.

표 1 다중 성분의 AM, FM, 및 AM-FM 신호들로부터 검파된 정보신호들
Table 1 Message signals detected from multicomponent AM, FM, and AM-FM signals

($i = 1, 2, 3, \dots, L$)

다중 성분의 신호들 디지털 복조기들 ($y=1, 2$) $x_k = x(n-k), k=0, 1, \dots, 8$		AM $a_i(n) = A_{ci}(1 + m_i \cdot s_{1i}(n))$	FM $\Omega_i(n) = \Omega_{ci} + \beta_i \Omega_{mi} \cdot s_{1i}(n)$	AM-FM $a_i(n) = A_{ci}(1 + m_i \cdot s_{1i}(n))$ $\Omega_i(n) = \Omega_{ci} + \beta_i \Omega_{mi} \cdot s_{2i}(n)$
QF1 $x_1^2 - x_0 \cdot x_2$	$\Psi(\cdot)$	$g_{1i}(n) = a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_{ci})$	$g_{fmi}(n) = \sin^2(\Omega_i(n))$	$g_{afn}(n) = a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_i(n))$
HPF-QF1 $(x_1 - x_2)^2 - (x_0 - x_1) \cdot (x_2 - x_3)$	$\Psi(\cdot)$	$g_{hi}(n) = \sin^2(\Omega_{ci}) \cdot 2a_i^2(n) \cdot (1 - \cos(\Omega_{ci}))$	$g_{h_fmi}(n) = 2 \sin^2(\Omega_i(n)) \cdot (1 - \cos(\Omega_i(n)))$	$g_{h_afn}(n) = 2a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_i(n)) \cdot (1 - \cos(\Omega_i(n)))$
	$s_{yi}(n)$	$\frac{\sqrt{g_{hi}(n)} - 2 \sin(\Omega_{ci})}{2m_i \cdot \sin(\Omega_{ci})}$	$\frac{\sin^{-1}(\sqrt{g_{h_fmi}(n)}/2) - \Omega_{ci}}{\beta_i \Omega_{mi}}$	$\frac{\sqrt{g_{h_afn}(n)} \cdot g_{fmi}(n) / g_{h_fmi}(n) - 1}{2 \sin^{-1}(\sqrt{g_{h_fmi}(n)} / (4g_{fmi}(n))) - \Omega_{ci}} \cdot \beta_i \Omega_{mi}$
HPF-QF1-LPF $(x_1 - x_2)^2 - (x_0 - x_1) \cdot (x_2 - x_3) + (x_2 - x_3)^2 - (x_1 - x_2) \cdot (x_3 - x_4)$	$\Psi(\cdot)$	$g_{hl}(n) = \sin^2(\Omega_{ci}) \cdot 4a_i^2(n) \cdot (1 - \cos(\Omega_{ci}))$	$g_{hl_fmi}(n) = 4 \sin^2(\Omega_i(n)) \cdot (1 - \cos(\Omega_i(n)))$	$g_{hl_afn}(n) = 4a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_i(n)) \cdot (1 - \cos(\Omega_i(n)))$
	$s_{yi}(n)$	$\frac{\sqrt{g_{hl}(n)}/2 - 2 \sin(\Omega_{ci})}{2m_i \cdot \sin(\Omega_{ci})}$	$\frac{\sin^{-1}(\sqrt{g_{hl_fmi}(n)}/2\sqrt{2}) - \Omega_{ci}}{\beta_i \Omega_{mi}}$	$\frac{\sqrt{g_{hl_afn}(n)} \cdot g_{fmi}(n) / g_{hl_fmi}(n) - 1}{2 \sin^{-1}(\sqrt{g_{hl_fmi}(n)} / (8g_{fmi}(n))) - \Omega_{ci}} \cdot \beta_i \Omega_{mi}$
BPF-QF1 $(x_1 - x_3)^2 - (x_0 - x_2) \cdot (x_2 - x_4)$	$\Psi(\cdot)$	$g_{bi}(n) = 4a_i^2(n) \cdot \sin^4(\Omega_{ci})$	$g_{b_fmi}(n) = 4 \sin^4(\Omega_i(n))$	$g_{b_afn}(n) = 4a_i^2(n) \cdot \sin^4(\Omega_i(n))$
	$s_{yi}(n)$	$\frac{\sqrt{g_{bi}(n)} - 2}{2m_i}$	$\frac{\sin^{-1}(\sqrt{g_{b_fmi}(n)}/2) - \Omega_{ci}}{\beta_i \Omega_{mi}}$	$\frac{\sqrt{g_{b_afn}(n)} / g_{fmi}(n) - 2}{2 \sin^{-1}(\sqrt{g_{b_afn}(n)} / (2g_{afn}(n))) - \Omega_{ci}} \cdot \beta_i \Omega_{mi}$
QF3 $x_3^2 - x_0 \cdot x_6$	$\Psi(\cdot)$	$g_{3i}(n) = a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_{ci}) \cdot (\cos^2(\Omega_{ci}) - 0.25)^2$	$g_{3_fmi}(n) = \sin^2(\Omega_i(n)) \cdot (\cos^2(\Omega_i(n)) - 0.25)^2$	$g_{3_afn}(n) = a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_i(n)) \cdot (\cos^2(\Omega_i(n)) - 0.25)^2$
HPF-QF3-LPF $(x_3 - x_4)^2 - (x_0 - x_1) \cdot (x_6 - x_7) + (x_4 - x_5)^2 - (x_1 - x_2) \cdot (x_7 - x_8)$	$\Psi(\cdot)$	$g_{k3i}(n) = \frac{\sin^4(\Omega_{ci})}{1 + \cos(\Omega_{ci})} \cdot 4a_i^2(n) \cdot (\cos^2(\Omega_{ci}) - 0.25)^2$	$g_{k3_fmi}(n) = \frac{4 \sin^4(\Omega_i(n))}{1 + \cos(\Omega_i(n))} \cdot (\cos^2(\Omega_i(n)) - 0.25)^2$	$g_{k3_afn}(n) = \frac{\sin^4(\Omega_i(n))}{1 + \cos(\Omega_i(n))} \cdot 4a_i^2(n) \cdot (\cos^2(\Omega_i(n)) - 0.25)^2$
	$s_{yi}(n)$	$\frac{\sqrt{\frac{g_{k3i}(n)}{1 - \cos(\Omega_{ci})}} - 2(\cos^2(\Omega_{ci}) - \frac{1}{4})}{2m_i \cdot (\cos^2(\Omega_{ci}) - \frac{1}{4})}$	$\frac{2 \sin^{-1}(\sqrt{\frac{g_{k3_fmi}(n)}{8g_{3_fmi}(n)}}) - \Omega_{ci}}{\beta_i \Omega_{mi}}$	$\frac{\sqrt{\frac{g_{k3_afn}(n)}{g_{3_afn}(n)}} - 2}{2 \sin^{-1}(\sqrt{g_{k3_fmi}(n)} / (2g_{3_fmi}(n))) - \Omega_{ci}} \cdot \beta_i \Omega_{mi}$
BPF-QF3 $(x_3 - x_5)^2 - (x_0 - x_2) \cdot (x_6 - x_8)$	$\Psi(\cdot)$	$g_{k3i}(n) = \sin^4(\Omega_{ci}) \cdot 4a_i^2(n) \cdot (\cos^2(\Omega_{ci}) - 0.25)^2$	$g_{k3_fmi}(n) = 4 \sin^4(\Omega_i(n)) \cdot (\cos^2(\Omega_i(n)) - 0.25)^2$	$g_{k3_afn}(n) = 4a_i^2(n) \cdot \sin^4(\Omega_i(n)) \cdot (\cos^2(\Omega_i(n)) - 0.25)^2$
	$s_{yi}(n)$	$\frac{\sqrt{g_{k3i}(n)} - 2(\cos^2(\Omega_{ci}) - \frac{1}{4})}{2m_i \cdot (\cos^2(\Omega_{ci}) - \frac{1}{4})}$	$\frac{\cos^{-1}(\sqrt{\frac{g_{k3_fmi}(n)}{4} + \frac{1}{4}}) - \Omega_{ci}}{\beta_i \Omega_{mi}}$	$\frac{\sqrt{g_{k3_afn}(n)} / (4g_{3_fmi}(n)) - 1}{2 \sin^{-1}(\sqrt{g_{k3_afn}(n)} / (2g_{3_afn}(n))) - \Omega_{ci}} \cdot \beta_i \Omega_{mi}$
표본화 주파수 f_{Si} [Hz]		$\frac{4f_{ci}}{2n_i + 1}$	$\frac{4(f_{ci} + \beta_i \cdot f_{mi})}{2n_i + 1}$	$\frac{4(f_{ci} + \beta_i \cdot f_{mi})}{2n_i + 1}$

$$g_{1i}(n) = \Psi(x_{AM}(n)) = a_i^2(n) \cdot \sin^2(\Omega_{ci}), (i = 1, 2, \dots, L) \quad (18)$$

식(4)에서 $A_{ci} = 1$ 이라면, 식(4)와 식(18)로부터 IA에서 검파된 정보신호 $s_{1i}(n)$ 은 식(19)와 같이 유도할 수 있다.

$$s_{1i}(n) = \frac{\sqrt{g_{1i}(n)}}{\sin(\Omega_{ci})} - 1, (i = 1, 2, \dots, L) \quad (19)$$

같은 방법으로 표 1의 QF1 복조기에서 식(2)의 FM 신호에

대한 에너지 연산자에 의한 결과 식은

$$g_{fmi}(n) = \Psi(x_{FM}(n)) = \sin^2(\Omega_i(n)), (i = 1, 2, \dots, L) \quad (20)$$

와 같고, 식(5)와 식(20)으로부터 IF에서 검파된 정보신호 $s_{2i}(n)$ 을 유도하면 식(21)과 같다.

$$s_{2i}(n) = \frac{\sin^{-1}(\sqrt{g_{fmi}(n)}) - \Omega_{ci}}{\beta_i \cdot \Omega_{mi}}, (i = 1, 2, \dots, L) \quad (21)$$

3. 여섯 성분의 복조 예

세 종류의 다중 성분의 변조신호들, 식(1)~(3)에서 $L=6$ ($i=1, 2, \dots, 6$)인 여섯 성분의 변조신호들에 대한 검토를 보인다. 식(1)~(3)에서 변수들 (A_{ci} , m_i , f_{ci} , β_i , f_{mi} , f_{m1i} , f_{m2i} 및 행의 길이 M_c)을 각각 임의로 결정하면, 식(8)~(10)의 정수 n_i 값에 의해서 저표본화 주파수들이 각각 결정된다. 주기는 AM과 FM 신호의 경우에 식(8)과 (9)에 의해 각각 $N_i = f_{si}/f_{mi}$ 이고, AM-FM 신호의 경우에 식(10)으로부터 $N_i = f_{si}/f_{m1i}$ 를 구할 수 있다. 이들에 대한 예로써 변수 값들을 임의로 정하여 표 2에 정리하였다.

표 2의 변수들로부터 식(1)~(3)의 L 이 6 인 여섯 성분들의 AM, FM 및 AM-FM 신호들은 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 세 종류의 변조신호들의 길이 K 는 식(11), (16)에서 $M_c - L + 1$ 이다. 그러므로 AM은 길이가 995, FM은 895 이며, AM-FM의 경우는 1795 이다. 이 혼성신호들은 독립된 한 개의 신호로 각각 분리해야 한다. 이것은 식(15)의 분리행렬을 사용하여 식(17)의 최소자승 해로부터 얻은 세 종류의 일련의 여섯 신호를 가진 변조신호들은 그림 3에 나타내었다. 이들은 각각 한 주기를 가진 신호가 연속적으로 연결된 여섯 개의 변조신호들로 각각 구성되어 있다. 이 신

호들의 길이는 식(15)의 분리행렬 C_0 에서의 열의 길이와 같으며 표 2에 나타나 있다.

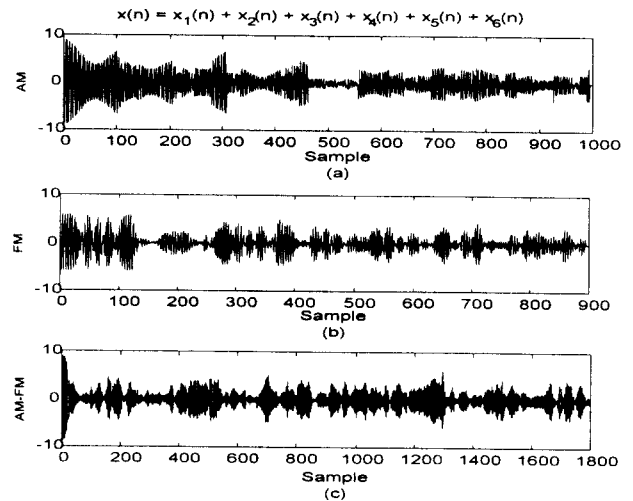


그림 2 여섯 성분의 변조신호들

(a) AM 신호들 (b) FM 신호들 (c) AM-FM 신호들

Fig. 2 Six component modulation signals

(a) AM signals (b) FM signals (c) AM-FM signals

표 2 여섯 성분의 변조 신호들에 사용된 여러 변수들

Table 2 Various variables used in 6-component modulation signals

($i=1, 2, 3, \dots, 6$)

여섯 성분의 변조 신호들		AM			FM			AM-FM			
		n_i	N_i	f_{Si}	n_i	N_i	f_{Si}	n_i	N_i	f_{Si}	
반송파 진폭	A_{Ci}										
변조지수	m_i	1			-			1			
	β_i	0.5			-			0.5			
반송 주파수 (MHz)	f_{ci}	-			2			2			
		0.71			90			90			
정보 주파수 (KHz)	f_{m1i}	0.5			-			0.5			
	f_{m2i}	-			1			1			
정수	주기	표본화주파수 (KHz)	n_i	N_i	f_{Si}	n_i	N_i	f_{Si}	n_i	N_i	f_{Si}
n_1	N_1	f_{S1}	11	247	123	1310	137	137	950	379	189
n_2	N_2	f_{S2}	18	154	77	1350	133	133	1150	313	156
n_3	N_3	f_{S3}	20	139	69	1370	131	131	1400	257	129
n_4	N_4	f_{S4}	25	111	56	1415	127	127	1700	212	106
n_5	N_5	f_{S5}	26	107	54	1435	125	125	2150	167	84
n_6	N_6	f_{S6}	27	103	52	1470	122	122	2700	133	67
행의 길이 (M_c)			1000			900			1800		
열의 길이 (M)			861			775			1461		
행열 C_0 의 rank			861			775			1461		
사용된 디지털 복조기			HPF-QF3-LPF			HPF-QF1-LPF			BPF-QF1		

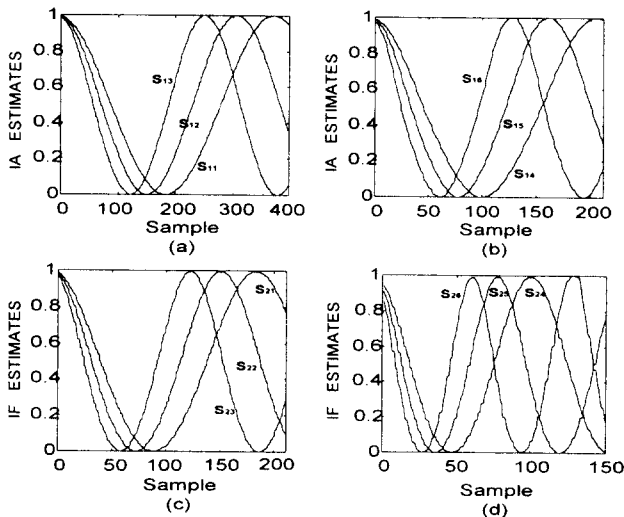


그림 5 AM-FM 신호로부터 검파된 정보신호들
 (a),(b) 순시크기의 정보신호들
 (c),(d) 순시주파수의 정보신호들
Fig. 5 Message signals detected from AM-FM signals
 (a),(b) Message signals of instantaneous amplitude
 (c),(d) Message signals of instantaneous frequency

그림 5는 여섯 성분으로 혼성된 AM-FM 신호로부터 표 1의 디지털 복조기 BPF-QF1를 통해 복조된 여섯 개의 서로 다른 정보신호들이다. 식(4)에서 여섯 개의 검파된 정보신호들을 그림 5(a),(b)에, 그림 5의 (c),(d)는 식(5)에서 각각 검파된 여섯 정보신호들이다.

제안된 복조알고리즘을 통해 검파된 표 1에서의 정보신호들에 대한 오차를 검증하기 위해 식(1)~(3)에서의 원 신호들과의 RMS 오차를 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

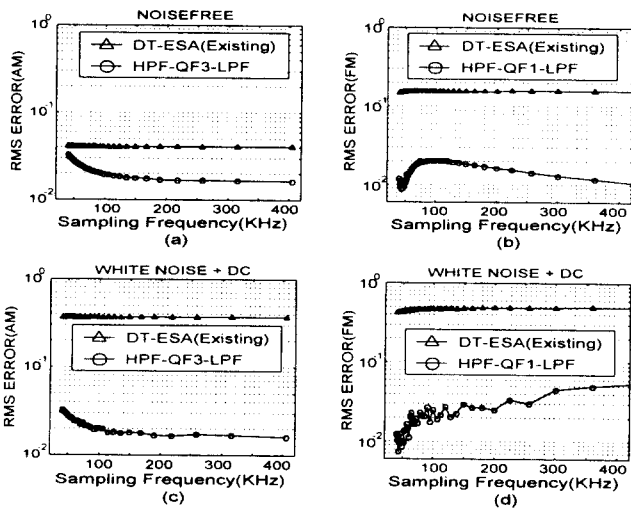


그림 6 AM 및 FM의 정보신호에 대한 RMS 오차
 (a),(b) 잡음이 없을 때 RMS 오차
 (c),(d) 백색잡음 및 DC 성분의 혼합시 RMS 오차
Fig. 6 RMS error of message signal of AM and FM
 (a),(b) Error in case of noisefree
 (c),(d) Error in case of mixing white noise and DC

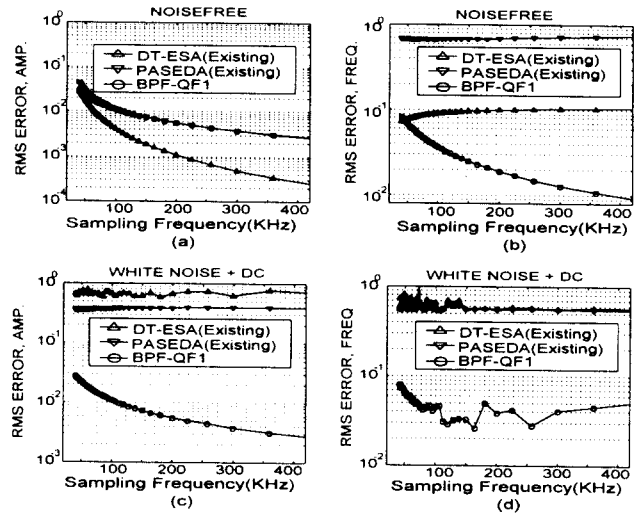


그림 7 AM-FM의 정보신호에 대한 RMS 오차
 (a),(b) 잡음이 없을 때 IA와 IF 추정에서의 RMS 오차
 (c),(d) 백색잡음 및 DC 성분의 혼합시 IA와 IF추정에서의 RMS 오차
Fig. 7 RMS error of message signal of AM-FM
 (a),(b) Error in IA and IF estimation in case of noisefree
 (c),(d) Error in IA and IF estimation in case of mixing white noise and DC

이것은 표 1에서 AM 신호에서는 HPF-QF3-LPF, FM의 경우는 HPF-QF1-LPF의 구조를, 그리고 AM-FM 신호일 때는 BPF-QF1의 복조기를 이용하였다. 또한 표 2에서의 변수들을 사용하여 식(8)~(10)의 표분화 주파수의 값을 각각 변화시키면서 원 신호와의 오차를 구했다. 여기에서 표분화 주파수는 세 종류의 변조신호들에 대하여 모두 40 K~400 KHz의 범위로 하여 RMS 오차를 수치 해석한 결과이다. 그림 6(a)와 (b)는 입력신호에 잡음 및 DC 성분이 없을 때, AM 및 FM의 정보신호에 대한 RMS 오차를 표시하였다. 그림 6(c)와 (d)는 신호의 최대 크기의 0.5%의 백색 가우시안 잡음과 크기가 1인 직류 성분을 입력신호에 혼합하였을 때의 오차를 AM, FM에 대하여 각각 나타내었다. 그림 7은 그림 6과 같은 조건이며, 단지 AM-FM의 경우이다. 그림 6의 경우 기존의 [4]에서의 이산적인 AM 및 FM의 에너지 복조 알고리즘(DT-ESA) 연구와 비교하였고, 그림 7의 결과는 AM-FM의 에너지 복조 알고리즘(DT-ESA)[4] 및 주기신호의 대수분리와 에너지 복조 알고리즘(PASEDA)[2]을 제안된 알고리즘과 비교하였다. 이 결과로 그림 6에서는 입력에 백색 잡음과 DC 성분이 섞였을 때에도 AM의 경우, (a)와 (c)에서 3%이하로, FM에서는 (b)와 (d)에서 5%이하의 오차를 보인다.

그림 7의 AM-FM의 경우, (a)와 (c)의 순시 크기(IA)의 정보신호에서는 4%이하의 오차를, 순시 주파수(IF)의 정보신호의 오차인 (b)와 (d)에서 7%이하의 RMS 오차를 보여준다. 결국, 세 종류의 제안된 복조 알고리즘은 입력신호에 백색 잡음과 DC 성분의 유무에 따라서 오차의 범위가 0.02 ~ 7% 내로 우수한 성능을 볼 수 있다. 표 1의 나머지 디지털 복조기들도 이와 유사한 성능을 가질 것으로 우리는 예측한다.

4. 결 론

본 연구에서는 저표본화된 다중 성분의 세 종류(AM, FM 및 AM-FM)의 신호들에 대한 비선형 복조 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 먼저 저표본화 기법을 사용하여 다중 성분에 대한 세 종류의 저표본화 주파수를 각각 유도하였다. 이 표본화 주파수는 가변이 용이하다. 둘째로, 주기신호의 대수분리 알고리즘을 이용하여 최소자승 해로부터 세 종류의 다중 성분의 신호들을 한 주기를 갖고 단일 성분으로된 일련의 신호들로 각각 분리하였다. 이 분리 시스템에서 사용한 확장된 분리 행렬은 매우 규칙적이고 sparse 하며 체계적인 구조를 가진다. 셋째로, 에너지 복조 알고리즘을 사용하여 각각 독립적으로 분리된 이산적인 단일 성분의 AM, FM 및 AM-FM 신호들은 각각 조절이 가능한 저표본화 주파수를 가지고 각각 순시 크기 및 순시 주파수의 정보신호들을 각각 유도하였다. 예로써 여섯 성분의 변조신호들로부터 정보신호들을 검파하는 과정을 보였으며, 이에 대한 검증으로 백색 잡음과 직류 성분을 입력신호에 혼합하여 RMS 오차들을 표본화 주파수 별로 수치 해석하였다. 이 결과, 제안된 알고리즘은 백색 가우시안 잡음과 직류 성분을 혼합했을 때에도 세 종류 변조신호들로부터 각각 검파된 정보신호들이 본래의 신호들에 대하여 0.02 ~ 7 % 내의 RMS 오차를 나타냄으로써 성능이 우수함을 보였다.

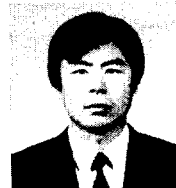
참 고 문 헌

- [1] 손태호, 이민호, "저표본화된 두 성분의 AM-FM 신호들로부터 대수적 분리와 에너지 연산자를 사용한 복조기 설계 및 특성", 대한전기학회지, vol.48A, No.5, pp. 643-649, MAY, 1999.
- [2] B. Santhanam, P. Maragos, "Demodulation of Discrete Multicomponent AM-FM Signals Using Periodic Algebraic Separation and Energy Demodulation", Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Process., Vol. III, pp. 2409-2412, 1997.
- [3] J. F. Kaiser, "On a Simple Algorithm to Calculate the 'Energy' of a Signal", Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Albuquerque, NM, pp. 381-384, Apr. 1990.
- [4] P. Maragos and J. Kaiser, T. F. Quatieri, "On Amplitude and Frequency Demodulation Using Energy Operators", IEEE Trans. Sig. Proc., Vol. 41, No. 4, pp. 1532-1552, April, 1993.
- [5] 손태호, 박종연, "Undersampling 기법에 의한 AM 및 FM 신호의 디지털 복조기 설계와 특성", 한국통신학회지, Vol. 22, No. 1, pp. 116-126, Jan. 1997.
- [6] Mou-yan. Zou and R. Unbehauen, "An Algebraic Theory for Separation of Periodic Signals", Archiv fur Elektronik und Uebertragungstechnik, Vol. 45, pp. 351-358, Nov-Dec 1991.
- [7] Mou-yan. Zou and Chai Zhenming and R. Unbehauen, "Separation of Periodic Signals by Using an Algebraic Method", in Proc. ISCAS91, Vol. 5, pp. 2427-2430, 1991.

저 자 소 개



손 태 호 (孫 泰 鎬)
 1960년 1월 2일생. 1991년 강원대 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 박사수료
 Tel : 033-261-3130



황 의 천 (黃 義 天)
 1956년 2월 3일생. 1988년 대전산업대 전기공학과 졸업(학사). 1992년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2000년 강원대 전기공학과 졸업(공박). 1996년-현재 춘천 기능대학 전기기술과 교수
 Tel : 033-240-7653
 E-mail : echwang@chunchon.ac.kr