

論文96-33B-7-10

## 결합동기와 구동동기를 이용한 카오스 주파수 천이 변·복조 회로

## (Modulation and Demodulation Circuits of Chaos Frequency Shift Keying using Coupled Synchronization and Drive Synchronization)

鄭鍾激\*, 朴鎭秀\*

(Chong Eun Chung and Jin Soo Park)

## 요 약

카오스 주파수 천이 변·복조회로를 Chua 회로를 사용하여 구현하였다. 변조회로에서는 결합동기에 의해 주파수가 채배되도록 설계하여 카오스 고유특성이 변하지 않는 두 개의 카오스 신호를 발생시켜 디지털 입력신호를 변조하였으며, 복조회로는 반송파로부터 구동동기에 의해 디지털 신호를 검출하였다. 디지털 입력신호의 크기에 무관하고 간단한 변·복조회로에 의해 카오스 주파수천이 변·복조가 수행되었다.

## Abstract

Modulation and demodulation circuits of chaos frequency shift keying have been implemented using Chua's circuits. The modulation circuit, which is designed to perform the frequency-doubling by coupled synchronization without changing the intrinsic characteristics of its two chaos signals generated, modulates the digital input signals. The demodulation circuit detects the digital input signals from carrier by drive synchronization. These circuits, which are simplest until now and have no restriction to their digital input amplitudes, perform the aimed functions.

## I. 서 론

동기를 허용치 않을 것처럼 보였던 카오스 계통들(chaotic systems)이 Afraimovich et al.<sup>[11]</sup>이 고찰한 선형확산결합 파라미터(linear diffusion coupling parameter)의 적절한 선정에 의해 동기되어지거나 같은 카오스 특성을 갖는다는 것이 밝혀졌으며, Pecora and Carrol<sup>[12]-[14]</sup>에 의해서는 카오스 계통들이 동기할 필요·충분조건으로, 동기되어질 카오스 계통의 Lyapunov exponent 들 - Lyapunov exponent 들

은 CLEs(Conditional Lyapunov exponents)라 불리워지고 있다 - 이 음(negative)이어야 한다는 것이 밝혀졌다.

이 논문에서는 선형확산결합 파라미터를 이용한 동기인 결합동기(coupled synchronization)와 CLEs를 이용한 구동동기(drive synchronization)를 사용하여, 기존의 주파수천이 변·복조 개념과 엄밀히 같은 카오스 주파수천이 변·복조회로(modulation and demodulation circuits of chaos frequency shift keying)를 구현하고자 카오스 신호들을 반송파로 사용하는 아주 간단한 카오스 주파수천이 변·복조회로를 설계하고 실험하였다. 사용된 기본 카오스 회로로는 물리적으로 분석되고<sup>[5]</sup>, 수학적으로 증명되었으며<sup>[6]</sup>, 상용화된 전자부품으로 제작이 가능한 Chua 회로(Chua's circuit)<sup>[7]</sup>를 이용하였다. II 장에서는 Chua

\* 正會員, 韓國原子力研究所

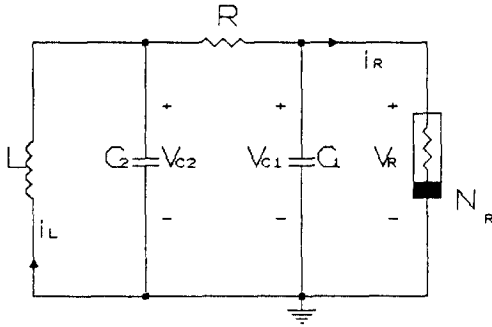
(Korea Atomic Energy Research Institute)

\*\* 正會員, 淸州大學校 電子工學科

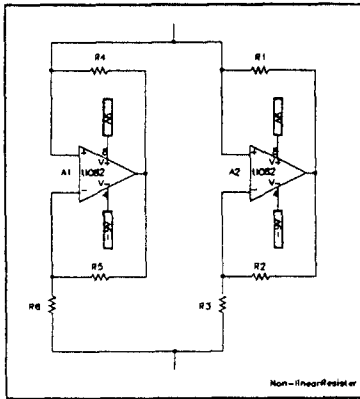
(Chongju University, Electronic Eng. Dept.)

接受日字:1995年6月11日, 수정완료일:1996年6月20日

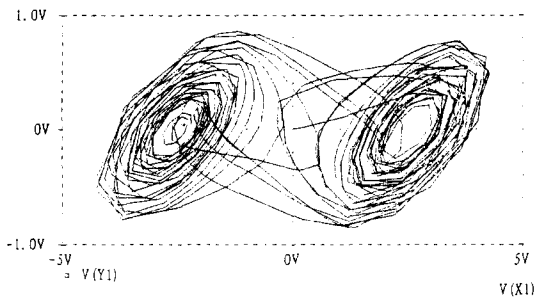
회로의 특성과 두 가지 동기이론에 관한 요점을 기술하였고, III 장에서는 설계된 카오스 주파수천이 변·복조회로의 이론적인 분석과 모의실험 결과를 보이며, 끝으로 IV 장에서는 결론과 앞으로의 연구방향을 제시한다.



(a) Chua 회로



(b) Op-amp를 사용한 비선형저항 NR



(c) 이상한 끌개로서의 더블스크롤

그림 1. (a) Chua 회로  
 (b) Op-amp를 사용한 비선형저항 NR  
 (c) 이상한 끌개로서의 더블스크롤  
 Fig. 1. (a) Chua's circuit  
 (b) Nonlinear resistor using op-amp.  
 (c) Double scroll as a strange attractor.

## II. Chua 회로와 두 동기이론

### 1. Chua 회로

Chua 회로는 대표적인 “이상한 끌개(strange attractor)”로서 더블스크롤(double scroll)을 갖는 카오스 회로이다<sup>[6]</sup>. 이 회로의 구성은 그림 1과 같으며, 비선형저항 NR의 특성은 그림 2와 같다.

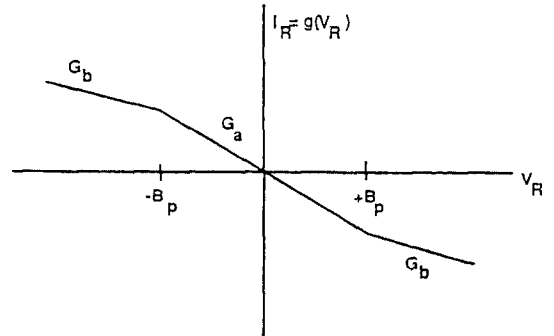


그림 2. 비선형저항 NR의 v-i 특성  
 Fig. 2. v-i characteristic of nonlinear resistor NR.

Chua 회로의 방정식들은 절점해석법(node analysis method)으로 다음과 같이 구해진다.

$$C_1 \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{1}{R} (v_{c2} - v_{c1}) - g(v_{c1})$$

$$C_2 \frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{1}{R} (v_{c1} - v_{c2}) + i_L$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_{c2}$$

여기서,  $g(\cdot)$ 는 구분적 선형함수(piecewise-linear function)이며  $g(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b)[|v_R + B_p| - |v_R - B_p|]$  로 정의되고,  $B_p$ 는 breakpoint,  $G_a$ 와  $G_b$ 는 각각 바깥쪽과 안쪽 영역의 기울기이다.(그림 2 참조)

상태방정식들(state equations)을 구하기 위해 식 (1)의 변수와 파라미터들을 재조정하여 무차원 형태(dimensionless form)로 변환한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y-x-f(x)) \\ \dot{y} &= x-y+z \\ \dot{z} &= -\beta y \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)[|x+1| - |x-1|]$ 이며, 변수와 파라미터들은 다음과 같이 재조정되었다.

$$x = \frac{v_{c1}}{B_p}, y = \frac{v_{c2}}{B_p}, z = \frac{i_L}{B_p G}, \tau = \frac{tG}{C_2}, a = RG_a, b = RG_b,$$

$$a = \frac{C_2}{C_1}, \beta = \frac{C_2 R^2}{L}, \dot{x} = \frac{dx}{dt}, \dot{y} = \frac{dy}{dt}, \dot{z} = \frac{dz}{dt}.$$

2. 결합동기

V.S. Afraimovich, et al.<sup>[11]</sup>에 의해 선형확산결합으로 연결되어진 두 개의 같은 카오스 회로들은 양쪽 모두 똑같은 카오스적인 움직임을 갖는다는 것이 고찰되었다.

두 개의 같은 카오스 회로들로서 두 개의 Chua 회로를 이용하여, X 변수가 결합된 X 결합 회로들(X-coupled circuits)을 그림 3에서 보이고, 그림 3의 결합회로들이 선형확산결합 소자인 결합저항  $R_x$ 에 의해 동기됨을 그림 4에서와 같이 파형 형태로 보인다.

선형확산결합 파라미터에 의해 결합되는 Chua 회로들을 다음 식으로 정의하고 있다<sup>[8] [9]</sup>.

(왼쪽 Chua 회로)  $\dot{x} = a(y-x-f(x)) + \delta_x(x'-x)$   
 $\dot{y} = x-y+z + \delta_y(y'-y)$   
 $\dot{z} = -\beta y + \delta_z(z'-z)$  (3)

(오른쪽 Chua 회로)  $\dot{x}' = a(y'-x'-f(x')) + \delta_x(x-x')$   
 $\dot{y}' = x'-y'+z' + \delta_y(y-y')$   
 $\dot{z}' = -\beta y' + \delta_z(z-z')$

여기서,  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 는 각각 x, y, z 결합에서의 결합파라미터를 의미한다.

식 (3)에서 정의한 두 Chua 회로의 차이를 시스템  $\xi(\tau) = P(\tau), q(\tau), r(\tau)$ 라 놓으면, 식 (4)의 관계가 구해지고,

$$\begin{aligned} P(\tau) &= x(\tau) - x'(\tau) \\ q(\tau) &= y(\tau) - y'(\tau) \\ r(\tau) &= z(\tau) - z'(\tau) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 식 (5)와 같은 차에 관한 일반식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{P} &= aq - aP - a(f(x) - f(x')) - 2\delta_x P \\ \dot{q} &= P - q + r - 2\delta_y q \\ \dot{r} &= -\beta q - 2\delta_z r \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는, 구분적 선형특성(piecewise linear characteristic)을 갖기 때문에 식 (6)과 같은 행렬식으로 줄여질 수 있지만,  $f(x)-f(x')=f'(n)(x-x')$ 이고  $f'(n)$ 은 두 개의 값  $a(=RG_a)$ 와  $b(=RG_b)$ 를 가지므로 식 (6)안의 행렬 A는 두 가지의 표현을 갖는다.

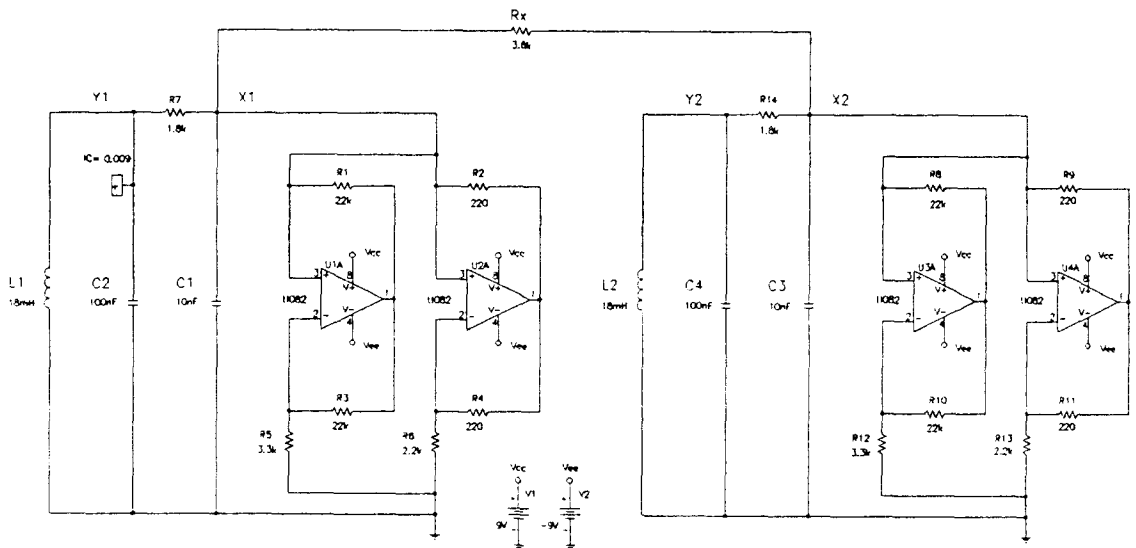


그림 3. 두 개의 Chua 회로로 구성된 X 변수 결합회로  
 Fig. 3. X-coupled circuits using two Chua's circuits.

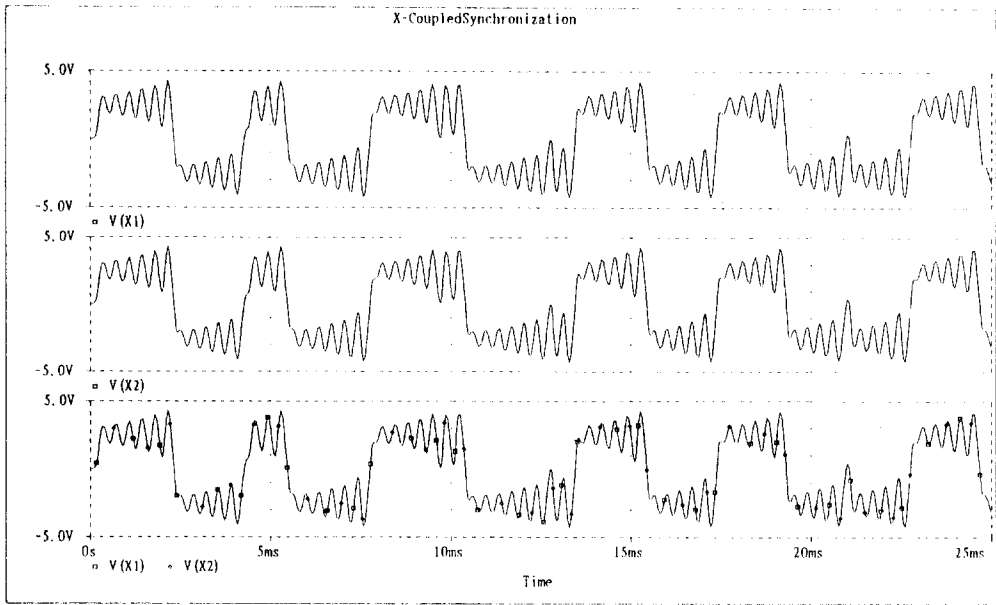


그림 4. X 결합동기  
Fig. 4. X-coupled synchronization.

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 행렬 A는 다음 두 행렬 중의 하나이다.

$$\begin{bmatrix} -a - \alpha\alpha - 2\delta_x & \alpha & 0 \\ 1 & -1 - 2\delta_y & 1 \\ 0 & -\beta & -2\delta_z \end{bmatrix}$$

이나 혹은,

$$\begin{bmatrix} -a - \beta\alpha - 2\delta_x & \alpha & 0 \\ 1 & -1 - 2\delta_y & 1 \\ 0 & -\beta & -2\delta_z \end{bmatrix}$$

위 두 행렬들의 모든 고유값(eigenvalue)들의 실수부가 음(-)이면 식 (6)의 평형(equilibrium)은 안정하다는 것을 의미한다.

### 3. 구동동기

L.M. Pecora와 T.L. Carrol에 의해서 한 쌍의 카오스적인 회로나 계통들이 구동동기되어질 수 있다는 것이 확인되었다. 결합동기의 연구 중에서 떠오른 구동동기 이론은 다음의 방법으로 카오스 회로를 동기시킬 수 있다는 이론과 실험을 발표하였다<sup>[2] [3] [4]</sup>.

[구동동기 개념]

동기되어질 한 쌍의 카오스 계통들 중에서 첫 번째

카오스 계통을 구동계통(drive system)이라 하고 두 번째 카오스 계통을 반응계통(response system)이라 한다면, 구동계통이라 불리는 첫 번째 카오스 계통에서, 반응계통이라 불리는 두 번째 카오스 계통에, 구동계통이 갖는 상태변수들 중의 몇 개만을 전송하면, 전송된 몇 개의 상태변수들에 의해 전송되지 않은 나머지 상태변수들도 반응계통에서 발생됨으로써 구동동기를 이룩한다.

이 방법을 자주적 n차원 역학시스템(autonomous n-dimensional dynamical system)으로 먼저 살펴보고 이 논문에서 사용한 Chua 회로에 적용시켜 본다.

자주적 n차원 역학시스템은 일반적으로 아래 식으로 표현되고

$$\frac{du}{dt} = F(u) \quad (7)$$

위 시스템을 두 개의 부시스템(subsystem)으로 나누면 다음 식과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= (v, w) \\ \frac{dv}{dt} &= G(v, w), \quad \frac{dw}{dt} = H(v, w) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $v = (u_1, \dots, u_m)$ ,  $G = (F_1, \dots, F_m)$ ,

$w = (u_{m+1}, \dots, u_n)$ ,  $H = (F_{m+1}, \dots, F_n)$ .

새로운 부시스템  $w'$ 를 생각하여, 식 (8) 안에 있는 부 시스템들과 함께 아래와 같이 다시 쓰자.

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= G(v, w), & \frac{dw}{dt} &= H(v, w) &< \text{구동계통} > \\ \frac{dw'}{dt} &= H(v, w') &&&< \text{반응계통} > \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서  $w'(t)$ 의 궤적(trajjectory)이  $w(t)$ 의 궤적에 점근적으로 수렴하고 수렴 후에는 같은 궤적을 유지한다면, 즉 반응계통의 CLEs(Conditional Lyapunov Exponents)가 모두 음이라면 두 개의 계통  $w$ 와  $w'$ 는 구동동기한다.

그림 5에서, X 구동동기에 관한 동기회로를 두 개의 Chua 회로로 구성하였으며 그림 6에서는 이 구동동기 회로의 변수들이 동기됨을 파형 형태로 보인다.

그림 5에 보인 두 개의 Chua 회로들에 대한 X 구동 동기를 수식적으로 증명해 본다.

두 Chua 회로의 상태방정식은 식 (10)으로 표현되고,

$$\begin{aligned} (\text{왼쪽 Chua 회로}) \quad \dot{x} &= \alpha(y-x-F(x)) \\ \dot{y} &= x-y+z \\ \dot{z} &= -\beta y \end{aligned} \quad (10)$$

(오른쪽 Chua 회로의 일부분)

$$\begin{aligned} \dot{y}' &= x'-y'+z' \\ \dot{z}' &= -\beta y' \end{aligned}$$

차 시스템  $\xi(t)$ 는,

$$\dot{\xi}(t) = \dot{w}(t) - \dot{w}'(t) = h(v, w) - h(v, w') \quad (11)$$

으로 기술할 수 있고, Chua 회로는 구분적 선형이므로,

$$\dot{\xi}(t) = A\xi(t) \quad (12)$$

여기서, A는  $(n-m) \times (n-m)$ 인 상수행렬이고, 행렬 A의 고유값들의 실수부가 CLE이며, CLE가 모두 음이면 동기<sup>[2]-[4]</sup>

으로 표현된다.

따라서 그림 5에서 보여지는 X 구동동기의 두 Chua 회로의 차 시스템  $\xi(t)$ 는 식 (13)의 행렬식으로 정의되고,

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ r \end{bmatrix} \quad (13)$$

위식의 고유값들은  $-\frac{1}{2} \pm j\sqrt{4\beta-1}$  이므로, CLE는  $(-0.5, -0.5)$ 이고, 그림 5의 반응시스템은 구동시스템과 동기한다.

### III. 카오스 주파수 천이 변·복조회로 설계와 실험결과

#### 1. 카오스 주파수 천이 변·복조회로 설계 가. 변조회로의 설계

"변조회로는 결합동기를 이용하여 서로에 대해 n배

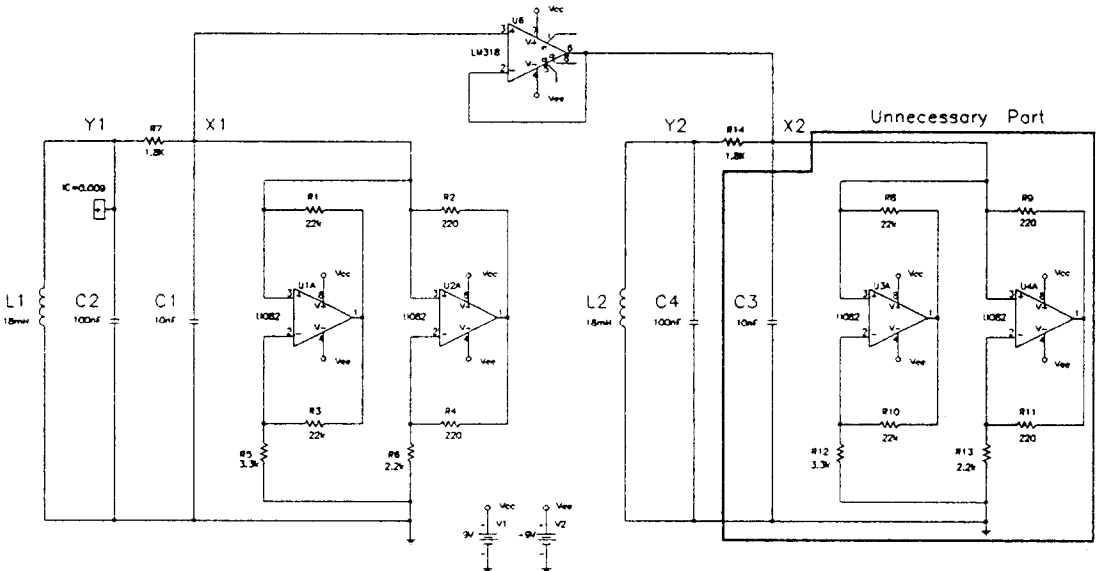


그림 5. 두 개의 Chua 회로로 구성된 X 변수 구동회로  
Fig. 5. X-variable drive circuits using two Chua's circuits.

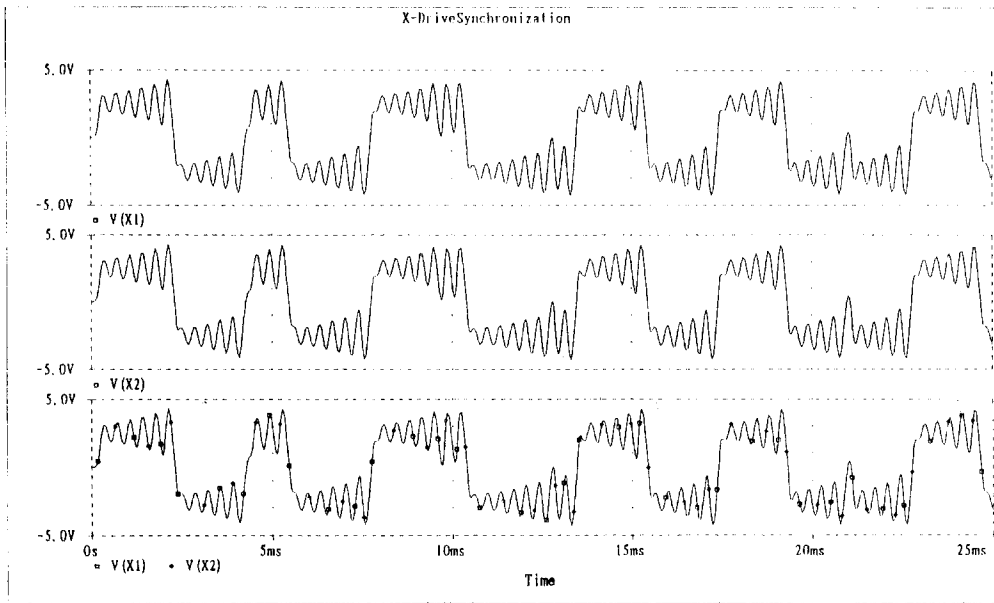


그림 6. X 구동동기  
Fig. 6. X-drive synchronization.

(또는 1/n 배)의 L과 C들을 갖는 두 개의 Chua 회로를 선형확산결합함으로써, 카오스 고유특성은 변함이 없고 주파수만 체배되는 두 가지 카오스 신호를 발생시켰다.”

위 사실을 먼저 II장의 그림 3에서 보여지는 두 개의 Chua 회로로 구성된 X-결합회로를 이용하여 수식적으로 증명하고 나서 실험결과를 보이겠다.

그림 3에서 보여지는 두 개의 Chua 회로에 의해 X 변수가 결합된 회로들은 아래와 같은 상태방정식으로 정의된다.

$$\begin{aligned}
 \text{(왼쪽 Chua 회로)} \quad & \dot{x} = \alpha(y-x-f(x)) + \delta_x(x'-x) \\
 & \dot{y} = x-y+z \\
 & \dot{z} = -\beta y
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \text{(오른쪽 Chua 회로)} \quad & \dot{x}' = \alpha(y'-x'-f(x')) + \delta_x(x-x') \\
 & \dot{y}' = x'-y'+z' \\
 & \dot{z}' = -\beta y'
 \end{aligned}$$

앞식에서, II장에서 정의된 차에 관한 일반식인 식 (5)에 의해, X 결합된 차 시스템  $\xi(\tau)$ 로 식 (15)가 구해진다.

$$\begin{aligned}
 \dot{P} &= \alpha q - \alpha P - S_x \alpha P - 2\delta_x P \\
 \dot{q} &= P - q + r \\
 \dot{r} &= -\beta q
 \end{aligned} \tag{15}$$

혹은 행렬식으로

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha - S_x \alpha - 2\delta_x & \alpha & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

여기서,  $S_i = a, b (i=1,2)$

으로 표현할 수 있으며, 이 식의 특성방정식은 식 (16)으로 구해진다.

$$\lambda^3 + (\alpha + S_x \alpha + 2\delta_x + 1)\lambda^2 + (S_x \alpha + 2\delta_x + \beta)\lambda + \beta(\alpha + S_x \alpha + 2\delta_x) = 0 \tag{16}$$

여기서,

$$\alpha = \frac{C_2}{C_1} = \frac{C_4}{C_3}, \quad \beta = C_2 \frac{R_7^2}{L_1} = C_4 \frac{R_{14}^2}{L_2}, \quad a = R_7 G_a, \quad b = R_7 G_b.$$

식 (16)의  $\alpha$  파라미터와  $\beta$  파라미터 값은, 선형확산결합된 한 쌍의 카오스 회로들 중의 한 카오스 회로에 대해 나머지 다른 카오스 회로의 인덕터 L이나 캐패시터 C들의 값을 한꺼번에 동일한 비율로 변화시킨다면, 변하지 않음을 알 수 있고, 특성방정식에는 아무런 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

식 (16)에서 구해지는 X 결합동기를 위한 결합파라미터  $\delta_x$ 의 값은 이 논문에서 제시한 Chua 회로의 경우 ( $\alpha=10.0, \beta=18.0, a=-1.36, b=-0.77$ ), 즉  $a=-1.36$ 인 경우  $\delta_x > 1.8, \delta_x > -2.2, \delta_x > 5.8, \delta_x > 2.3$  이 구

해지고,  $b=-0.77$ 인 경우  $\delta_x > 1.15$ ,  $\delta_x > -5.15$ ,  $\delta_x > 2.85$ ,  $\delta_x > -0.65$  가 구해져서 8개의 값이 찾아지고, 가장 큰 값이며 충분조건으로서  $\delta_x > 5.8$  이 얻어지나 실험적으로는  $\delta_x=0.5$  에서 동기가 이루어졌다.

동기시의 결합저항  $R_x$ 의 실험값은 Chua 회로에서  $R_7$ 이  $1.8k\Omega$ 으로 고정되어 있으므로  $\delta_x = \frac{R_7}{R_x} = \frac{R_{14}}{R_x} = \frac{R_7(=R_{14})}{R_x}$ 의 관계식에 의해  $3.6k\Omega$ 으로 계산된다. 충분조건만을 만족시키는 이론값은 실험값과의 오차때문에 결합저항  $R_x$ 의 값은 실험에 의하여 적절한 값으로 선정함이 타당한 것으로 발표되어 있다<sup>[8]-[10]</sup>.

이 논문에서 제시된 카오스 주파수천이 변조회로는 그림 7과 같이 아래쪽 Chua 회로의 L과 C들의 값을 모두 1/2 배 ( $\frac{L_2}{L_1} = \frac{9mH}{18mH}$ ,  $\frac{C_3}{C_1} = \frac{5nF}{10nF}$ ,  $\frac{C_4}{C_2} = \frac{50nF}{100nF}$ )하고, 결합저항  $R_x$ 를 실험적으로 약  $150k\Omega$ 으로 선정함으로써,  $\alpha$ 와  $\beta$ 파라미터 값을 변하지 않게 하여 특성방정식에는 영향을 주지 않도록 하고, 2배의 주파수를 갖는 카오스신호를 아래쪽 회로에서 발생시켰다(그림 11 참조).

이렇게 발생된 두 가지 주파수를 갖는 두 개의 카오스신호를 그림 7에 보인 변조회로의 스위치 부분에서

Modulation Circuit using Coupled Synchronization

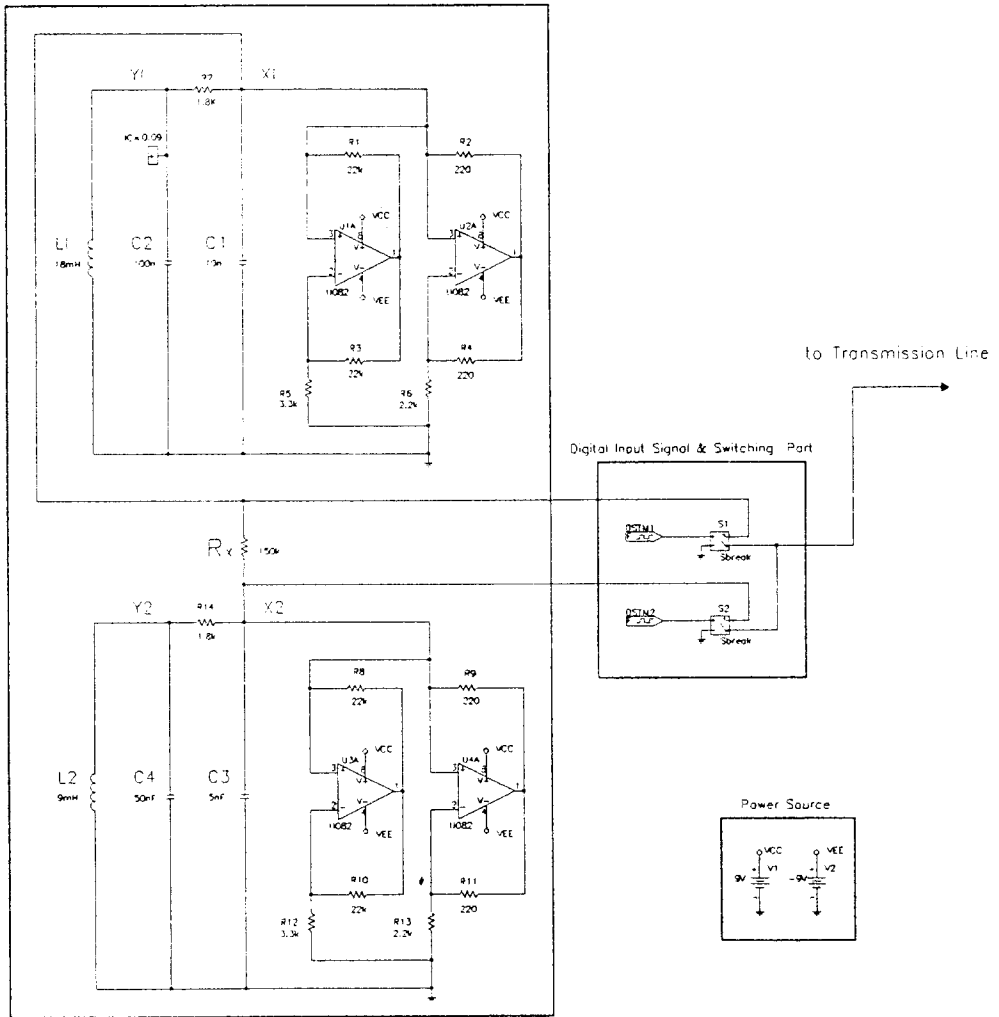


그림 7. 카오스 주파수 천이 변조회로

Fig. 7. Modulation circuit of chaos frequency shift keying.

디지털 정보신호를 전압제어절환소자로 스위칭하여 로직 값 1과 0에 의해 그림 8과 같이 변조된 반송파가 전송선로를 통해 복조회로로 전송된다. 실험용 디지털 정보신호로는 시인성이 좋도록 주기 2.5ms인 클럭펄스(digital stimulus)를 사용하였다. 위쪽 Chua 회로에서 발생하는 X 변수 카오스신호(X1)를 디지털 값 "1"에 지정하였고 아래쪽 Chua 회로에서 발생하는 X 변수 카오스신호(X2)를 디지털 값 "0"에 지정하였다.

나. 복조회로의 설계

복조회로(수신회로)는 구동동기를 이용하여 신호를 검출함으로써, 변조회로의 아래쪽 Chua 회로의 일부분으로도 전송된 디지털 정보 0의 값을 정확히 검출할 수 있게 하였다(위쪽 Chua 회로의 일부분을 복조회로로 사용하다면 전송된 디지털 정보 1의 값이 검출된다). 그림 9에 해독키(decryption key)의 역할을 하는 복조회로를 보인다. 디지털 값 0의 검출출력신호로는 Y 변수 카오스신호를 이용하였다(그림 13 참조). 이것은 II장에서 설명된 구동동기의 개념과 구동동기의 구동시스템과 반응시스템에 관한 식(10)~(13)에 의해, 구동동기가 이루어지지 않을 경우 X 변수 신호에 의해 Y 변수 신호가 구동되지 않기 때문이다. 끝으로, 그림 10에서는 앞에서 설계된 변조회로와 복조회로가 합쳐진 카오스 주파수천이 변·복조 회로를 보인다.

그림에서 알 수 있듯이 기존의 전자부품으로 꾸며지는 두 개의 Chua 회로와 비선형저항  $N_R$  부분을 뺀 나머지 부분으로 구성된 간단한 복조회로를 갖는 카오스 주파수천이 변·복조회로를 구현하였다.

2. 실험결과(results of simulation)

본 논문에서 제시한 카오스 주파수천이 변·복조회로는 MicroSim사의 pSPICE인 Design Center 6.0을 이용하여 설계와 실험을 수행하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 결합동기와 구동동기를 동시에 이용함으로써, 최근까지 발표된 비밀신호통신회로 주요 논문들<sup>[11]~[20]</sup>에서 제시한 복조회로에 비해 복조알고리즘과 회로구성(그림 9 참조)이 가장 간단하고 정확한 출력신호를 갖는다.

- 기존의 주파수천이 변·복조회로와 같은 카오스 주파수천이 변·복조회로를 구현하였고, 카오스신호 대 입력정보신호의 크기의 비와는 무관한, 즉 입력신호의 크기를 고려할 필요가 없는 변·복조회로이므로 지금까지의 카오스 비밀통신회로들 중에서 가장 S/N 비가 우수하다<sup>[12] [16] [18] [19]</sup>.

그리고 세세한 실험결과들은 다음 그림들에 나타난다.

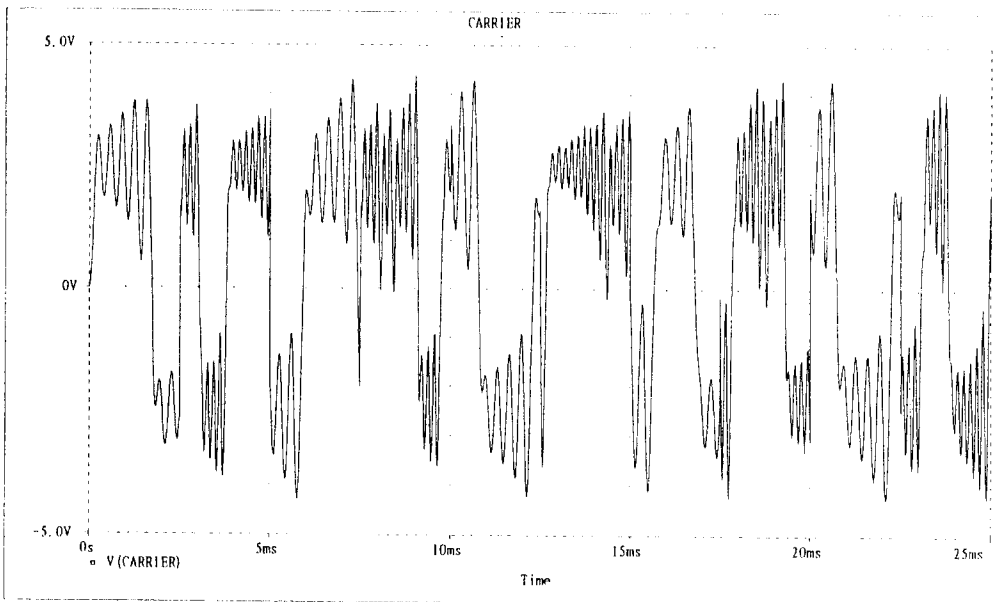


그림 8. 반송파  
Fig. 8. Carrier.



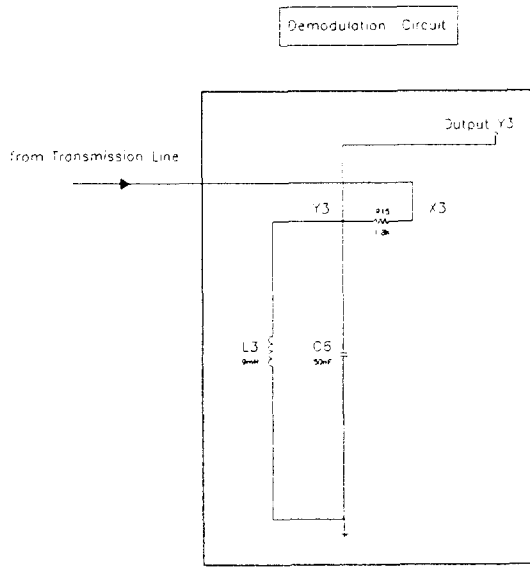


그림 9. 복조회로  
Fig. 9. Demodulation circuit.

그림 11에서 위쪽 Chua 회로에서 발생하는 기본 주파수의 카오스신호와 아래쪽 Chua 회로에서 발생하는 2체배 주파수의 카오스신호를 보인다.

카오스신호의 특성상, 정현파의 경우처럼 완벽한 규칙성을 보일 수 있는 방법은 현재까지 없으나, 1차원의 상태변수(여기서는 X 변수) 신호만으로도 거의 2배의 주파수가 발생됨을 살펴볼 수 있다. 2체배 주파수의 카오스신호를 발생시킨 이유는 그림 8에서 보여지는 전송선 상의 반송파에서 디지털 값 1과 0에 해당하는 카오스신호들을 좀더 명확히 살펴볼 수 있도록 하기 위함이다. 따라서, 체배율을 낮춘다면, 1과 0에 해당하는 두 가지의 카오스신호를 구별하기가 더 어려워진다.

그림 12에서는, 그림 7의 회로에서 결합저항  $R_x \approx 150k\Omega$  대신에  $3.6k\Omega$ 을 사용하면 X 변수신호가 동기됨을 보인다<sup>[10]</sup>. 이 실험으로 L과 C들의 값이 한꺼번에 똑같이 체배되는 경우,  $\alpha$ 와  $\beta$ 파라미터 값이 변하지 않으므로 특성방정식이 변하지 않고 서로 동기됨을 알 수 있다.

그림 13에, 전송된 카오스 반송파에서 검출되는 Y 변수 카오스 출력신호를 보인다. 이 출력신호는 여러가지의 검파회로에 의해 쉽게 디지털 값으로 바뀔 수 있을 것이다.

그림 14에서는 그림 10에서 발생된 여러 X 신호들 ( $X_1, X_2$ )과 반송파, 그리고 검출출력신호 Y3를 보인다.

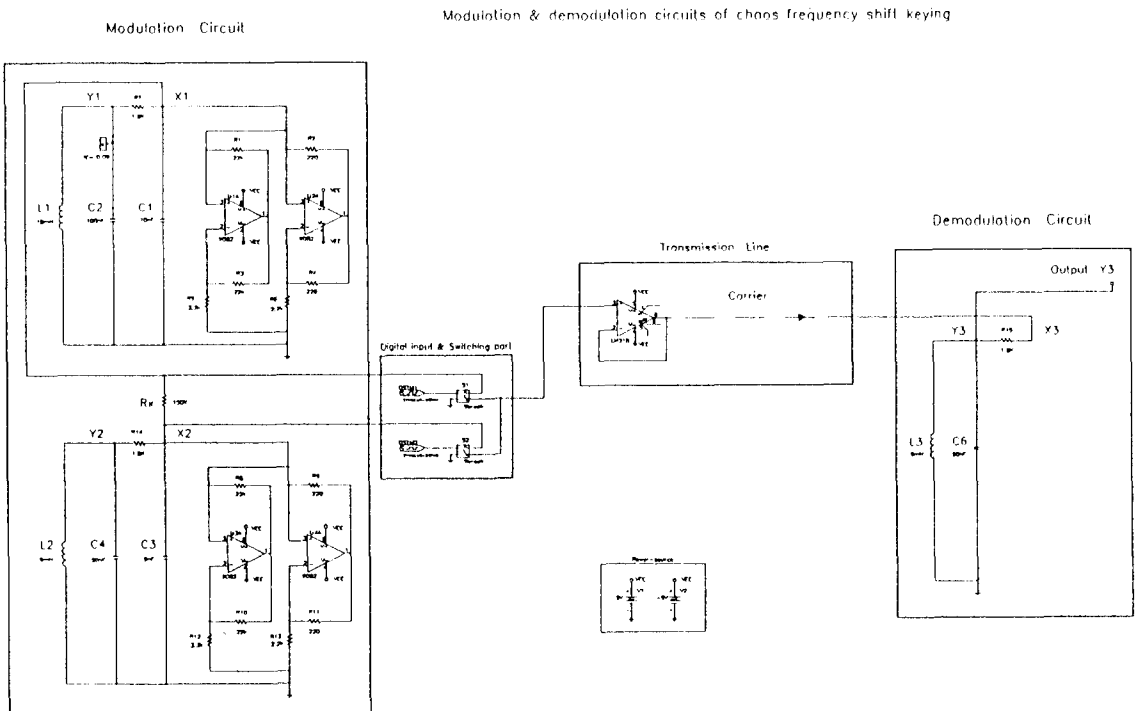


그림 10. 카오스 주파수 천이 변·복조회로  
Fig. 10. Modulation and demodulation circuits of chaos frequency shift keying.

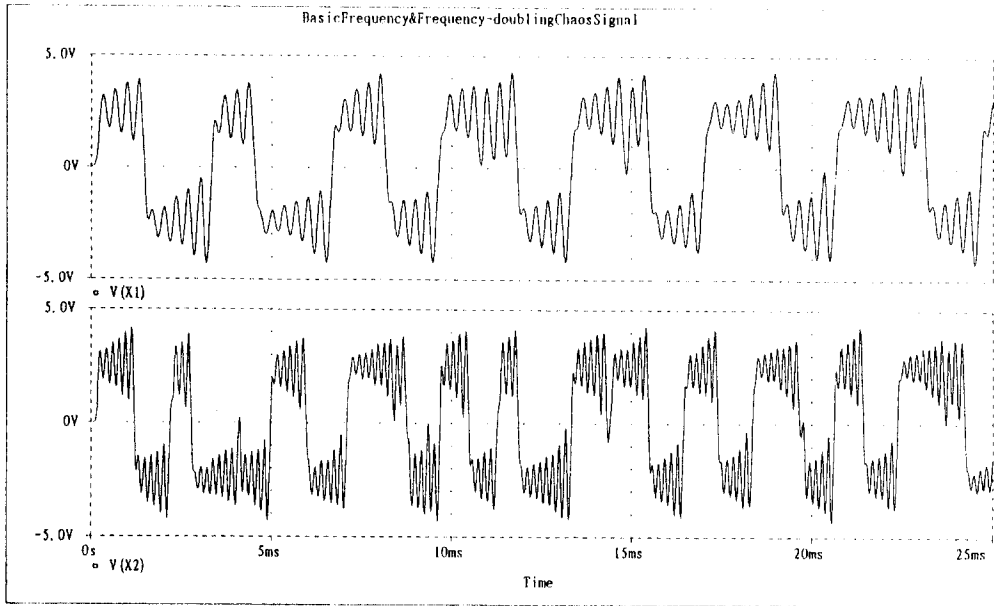


그림 11. 기본주파수 카오스신호와 2배 카오스신호  
 Fig. 11. Basic frequency and frequency-doubling chaos signal.

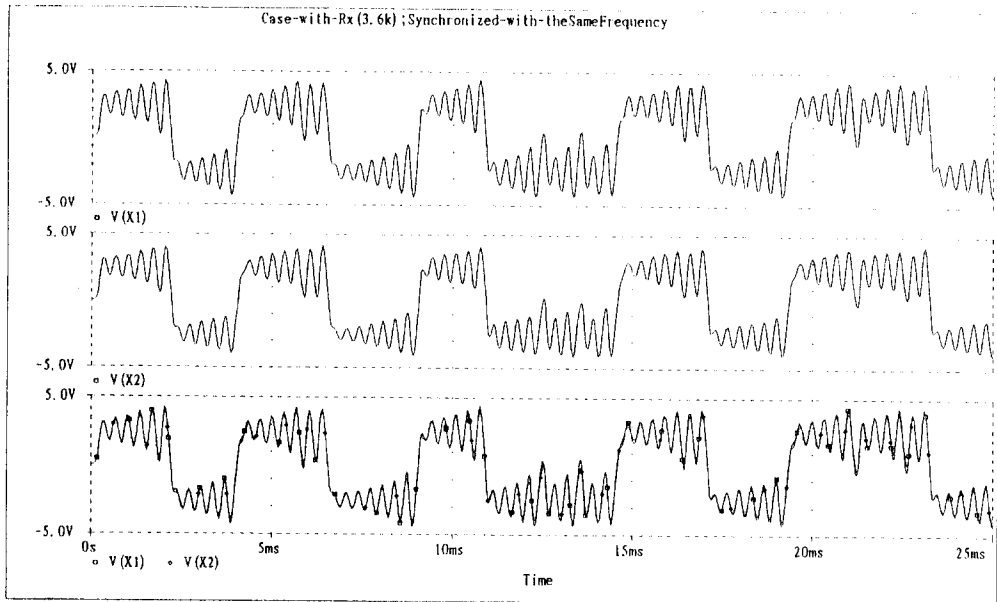


그림 12. 결합저항( $R_x$ ) 3.6k $\Omega$ 을 사용한 경우; 같은 주파수로 동기  
 Fig. 12. Case with ( $R_x$ ) 3.6k $\Omega$ ; synchronized with the same frequency.

#### IV. 결론

기존의 주파수 천이 변·복조의 개념과 엄밀히 같은 카오스 주파수천이 변·복조를 수행할 수 있는 간단한

카오스 주파수 변·복조회로를 구현코자, 결합동기에 의해 두 가지의 체배관계가 있는 카오스 주파수 신호들(그림 8 참조)을 발생시켰고 해독키(decryption key)의 역할을 하는 복조회로(그림 11 참조)의 디지털

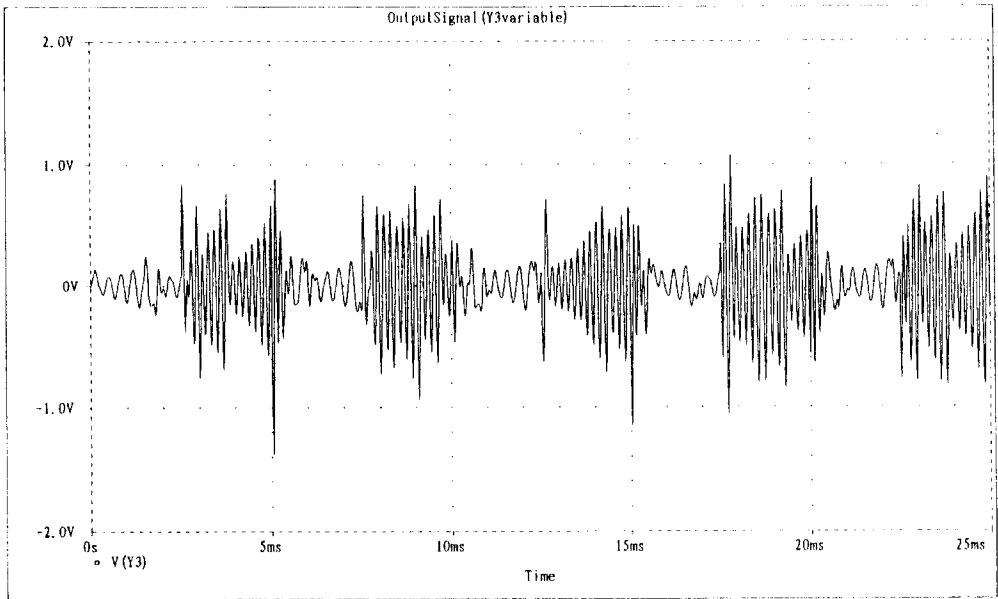


그림 13. 출력신호(Y3 변수)  
 Fig. 13. Output signal(Y3 variable).

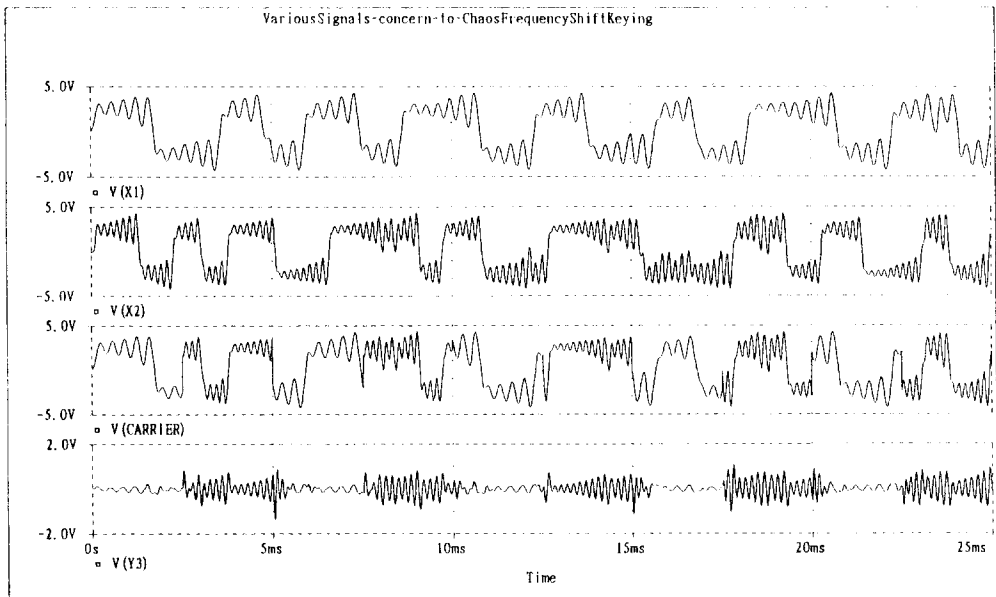


그림 14. 카오스 주파수 천이에 관련된 여러 신호들(X1,X2,Carrier,Y3)  
 Fig. 14. Various signals(X1,X2,Carrier,Y3) concern to chaos frequency shift keying.

신호검출 알고리즘은 오직 한 줄의 “Y 신호만의 사용”으로 기술할 수 있게 하였으며, 알고리즘에 상응하는 간단한 복조회로를 설계·실험하였다.

결합동기와 구동동기를 동시에 이용함으로써, 최근까

지 발표된 비밀신호통신회로 관련 주요 논문들에서 제시한 복조회로들에 비해 복조알고리즘과 회로구성이 간단하고 정확한 출력신호를 갖는 카오스 주파수천이 변·복조회로를 구현하였다. 또한, 카오스신호 대 입력

정보신호의 크기의 비와는 무관한, 즉 입력신호의 크기를 고려할 필요가 없는 변·복조회로이므로 우수한 성능의 신호 대 잡음비 특성을 얻을 수 있었다.

변조회로에서 고유특성이 똑같은 두 가지 주파수의 카오스신호를 발생시키거나 같은 주파수로 동기시키기 위한 결합동기의 결합파라미터  $\delta$  (coupling parameter)의 이론값과 실험값의 차이는, 사용부품이나 시험 방법 및 측정장비에 따라 차이가 있을 수 밖에 없으나, 아직은 결합파라미터  $\delta$ 에 관한 충분조건만이 찾아질 수 있다는 점이 가장 큰 요인일 것이다.

결합파라미터의 이론값과 실험값의 차이를 줄일 수 있도록 결합파라미터  $\delta$ 에 관한 필요·충분조건이 존재하고 찾아질 수 있어, 카오스 주파수 변·복조 회로의 설계기술이 더 진보되어가는 것은 추후의 연구과제로 남는다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V.S. Afraimovich, N.N. Verichev, and M.I. Rabinovich, "Stochastic synchronization of oscillations in dissipative systems", *Izv. VUZ. Rasiofiz. RPQAE.*, 29, pp. 795-803, 1986.
- [2] L.M. Pecora and T.L. Carroll, "Synchronization in Chaotic Systems", *Physical Rev Letters*, Vol. 64, No. 8, pp. 821-824, Feb. 1990.
- [3] L.M. Pecora and T.L. Carrol, "Synchronized chaotic signal and systems", in *Proc. 1992 IEEE ICASSP*.
- [4] L.M. Pecora and T.L. Carrol, "Driving systems with chaotic signals", *Physical Rev. Lett.*, Vol. 44, pp. 2374-2383, 1990.
- [5] T.Matsumoto, "A chaotic attractor from Chua's circuit", *IEEE Trans. Circuit Syst.*, Vol. CAS-31, no. 1, pp. 69-87, Jan. 1984.
- [6] L.O. Chua, M.Komura, and T.Matsumoto, "The double scroll family, Parts I and II", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Vol. CAS-33, no.11, pp. 1073-1118, 1986.
- [7] M.P. Kennedy, "Robust OP Amp Realization of Chua's Circuit", *Frequenz*, Vol. 46, 3-4, 1992.
- [8] L.O. Chua, M.Itoh, L.Kocarev, and K. Eckert, "Chaos synchronization in Chua's circuit", *J. of circuits, Syst. and comput.*, Vol. 3, No. 1, pp. 93-108, 1993.
- [9] L.O. Chua, L.Kocarev, K.Eckert, and M.Itoh, "Experimental Chaos Synchronization in Chua's Circuit", *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 2, No. 3, pp. 705-708, 1992.
- [10] M.Ding and E.Ott, "Enhancing synchronization of chaotic systems", *Physical Rev. E*, Vol. 49, No. 2, pp. 945-948, Feb. 1994.
- [11] M.Itoh, H.Murakami, and L.O.Chua, "Communication Systems via Chaotic Modulations", *IEICE Trans. Fundamentals, (JTC-CSCC '93)*, Vol. E77-A, No. 6, June 1994.
- [12] R.Lozi and L.O.Chua, "Secure Communications via Chaotic Synchronization II: Noise Reduction by Cascading Two Identical Receivers", *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 3, No. 5, pp. 1319-1325, 1993.
- [13] H.Dedieu, M.P.Kennedy, and M.Hasler, "Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier Using Self-Synchronizing Chua's Circuits", *IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, Vol. 40, No. 10, pp. 634-642, Oct. 1993.
- [14] U.Parlitz, L.O. Chua, Lj.Kocarev, K.S. Halle, and A.Shang, "Transmission of Digital Signals By Chaotic Synchronization", *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 2, No. 4, 973-977, 1992.
- [15] A.L. Oppenheim, G.W. Wornell, S.H. Isabelle, and K.M.Cuomo, "Signal processing in the context of chaotic signals", *Proc. 1992, IEE ICASSP.IV*, pp. 117-120, 1992.
- [16] Lj.Kocarev, K.S. Halle, K.Eckert, L.O. Chua, and U.Parlitz, "Experimental Demonstration of Secure Communications Via Chaotic Synchronization", *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 2, No. 3, 709-713, 1992.
- [17] M.Itoh, H.Murakami, K.S. Halle, and L.O.Chua, "Transmission of Signals by Chaos Synchronization", *Technical Report*

- of *IEICE*, CAS93-39, NLP 93-27, pp. 89-96, Jun. 1993.
- [18] K.S. Halle, C.W. Wu, M.Itoh, and L.O. Chua, "Spread Spectrum Communication Through Modulation of Chaos", *Int'l J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 3, No. 2, 469-477, 1993.
- [19] C.W. Wu and L.O. Chua, "A Simple Way to Synchronize Chaotic Systems with Applications to Secure Communication Systems", *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 3, No. 6, pp. 1619-1627, 1993.
- [20] K.M. Cuomo, A.V. Oppenheim, and S.H. Strogatz, "Synchronization of Lorenz-Based Chaotic Circuits with Applications to Communications", *IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, Vol. 40, No. 10, pp. 626-633, Oct. 1993.

---

 저 자 소 개
 

---



鄭鍾濂(正會員)

1954년 2월 12일생. 1977년 2월  
 한양대학교 전자공학과 졸업.  
 1983년 8월 연세대학교 대학원  
 전자공학과 공학석사 학위 취득.  
 1979년 2월 ~ 현재 한국원자력  
 연구소 계장기술실 책임연원으로

재직중. 주관심분야는 카오스(chaos) 관련 비선형역학  
 회로 설계 및 응용

朴鎭秀(正會員) 第31卷 A編 第5號 參照

현재 청주대학교 전자공학과 교수