

KARIŞIK MODLU KAOTİK DEVRE MODELİ KULLANILARAK GÜVENİLİR HABERLEŞME AMAÇLI SİSTEM TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

Recai KILIÇ, Mustafa ALÇI

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri
e-posta: kili@erciyes.edu.tr

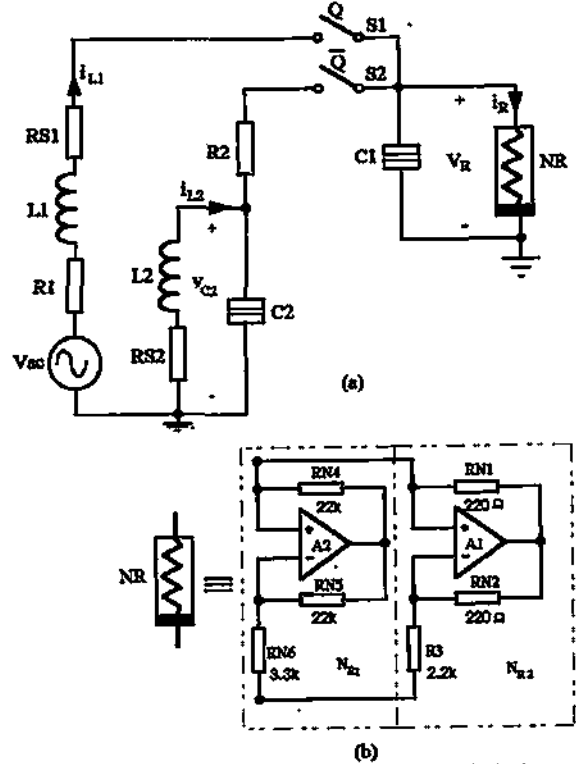
Abstract- This paper presents a mixed-mode chaotic circuit which has both autonomous and nonautonomous chaotic circuit dynamics and it shows that how this circuit can be utilized in a chaotic communication system for transmitting analog signals. For this purpose, using this circuit, a chaotic communication system has been designed and implemented. Results of computer simulations and laboratory experiments verify our approach.

Keywords: Chaos, Chaotic Communications, Mixed-Mode Chaotic Circuit

1. GİRİŞ

Kaos tabanlı güvenilir haberleşme sistemleri, iletilcek bildiri işaretlerinin spektrumunu geniş bir sahaya yayabilmeleri, eş zamanlı olarak bildiri işaretlerini kodlayabilmeleri ve bu işlemleri basit ve pahalı olmayan kaotik devre düzenekleriyle gerçekleştirebilmeleri sebebiyle, literatürdeki standart yayılı spektrumlu haberleşme sistemlerine alternatif olmuştur. Geçen on yıl içerisinde kaos tabanlı birçok haberleşme sistemi geliştirilmiş olup, bu tip haberleşme sistemlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan çok sayıda kaotik devre tasarımı yapılmıştır. Literatürde bu kaotik sistemler, ya otonom kaotik devre modelleri ya da otonom olmayan kaotik devre modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Genelde en çok kullanılan ve tercih edilen kaotik devre modeli ise basit bir yapıya sahip olan ve zengin kaotik davranış sergileyen otonom Chua devresi olmuştur [1-9].

Güvenilir haberleşme amaçlı kaotik haberleşme sistemlerinde kaos üretici olarak kullanılacak devrenin tasarımı sistem donanımında önemli bir rol oynar. Kullanılacak kaos üreticinin çok karmaşık olmayan donanım yapısına sahip olması en çok arzu edilen durumdur. Fakat kaotik haberleşme sistemlerinde yüksek güvenilirlik ve gizliliğin sağlanabilmesi için kaotik işaret üreticilerinin basit donanımlarına ilaveten zengin ve geniş kaotik parametre değişimleri ile ekstra güvenilirlik anahtarlarına sahip olmaları gerekmektedir. Bu çalışmada, böyle özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanan yeni bir kaotik devre modeli ve bu model kullanılarak tasarımı ve gerçekleştirimi yapılan analog



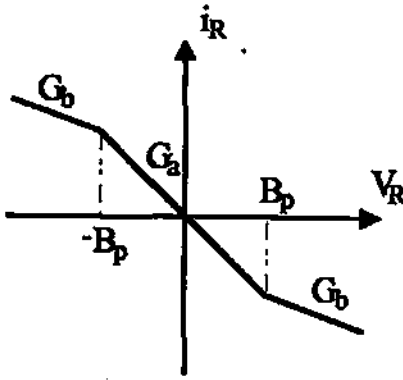
Şekil-1. (a) Karışık modlu kaotik devre modeli, (b) devredeki nonlineer direnç yapısı.

bilgi iletim amaçlı kaotik haberleşme sistemi tanımlanacak olup, sistem performansı bilgisayar simülasyonları ve laboratuvar deneyleri ile değerlendirilecektir.

2. KARIŞIK MODLU KAOTİK DEVRE MODELİ

Yapısında tek bir nonlineer direnç kullanılarak basit bir donanımla tasarlanan karışık modlu kaotik devre modeli Şekil-1'de görülmektedir. Devre yapısındaki nonlineer direncin i-v karakteristiği Şekil-2'de verilmiş olup,

$$i_R = f(V_R) = G_b V_R + 0.5 \cdot (G_a - G_b) \times (|V_R + B_p| - |V_R - B_p|) \quad (1)$$



Şekil-2. Şekil-1'deki nonlineer direncin i-v karakteristiği.

denklemleri ile tanımlanmaktadır. Şekilden de görüleceği gibi G_a , G_b karakteristiğin iç ve dış bölgelerindeki iletkenliklerini, B_p ise kırılma noktalarını temsil etmekte olup, bu parametrelerin istenen değerleri sırasıyla -0.76 mS , -0.41 mS ve 1 V 'tur.

Şekil-1'deki karışık modlu kaotik devre modeli, anahtar komutlarına bağlı olarak hem otonom hem de otonom olmayan kaotik davranış sergileyebilmektedir. Anahtar komutları S1-ON ve S2-OFF iken Şekil-1'deki devre otonom olmayan MLC devresine dönüşür ve otonom olmayan kaotik davranış sergiler [10]. Bu durumda karışık modlu kaotik devre modeli aşağıda verilen iki birinci dereceden otonom olmayan diferansiyel denklemle tanımlanmaktadır.

$$C_1 \frac{dV_R}{dt} = I_{L1} - f(V_R) \quad (2)$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = -i_{L1}(R_1 + R_{S1}) - V_R + A \sin(\omega t) \quad (3)$$

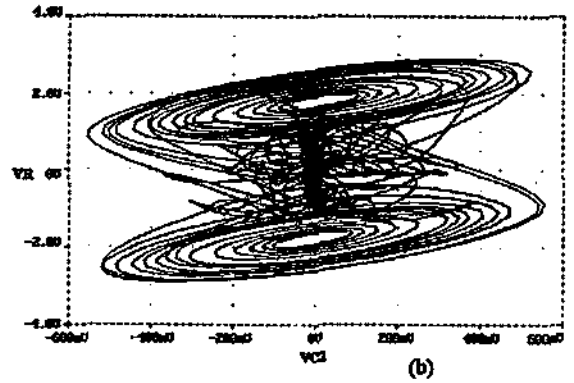
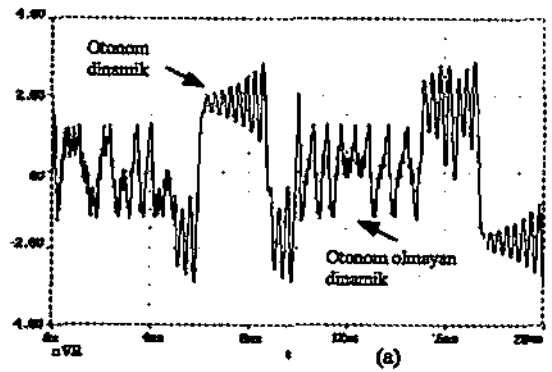
Burada A , şekildedeki V_{ac} kaynağının genliğini ve (ω) ise açısal frekansını temsil etmektedir. V_{ac} kaynağının genliği A , kaotik değişim parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu genlik değerinin sıfırdan yukarıya doğru artırılmasıyla sistem değişik dallanma ve kaos sergiler.

Şekil-1'deki anahtar komutları S1-OFF ve S2-ON olduğunda şekildedeki devre, otonom Chua devresine dönüşmekte ve otonom kaotik davranış sergilemektedir [10]. Bu durumda devre aşağıda verilen üç birinci dereceden otonom diferansiyel denklemle tanımlanır.

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = -V_{C2} - i_{L2} \cdot R_{S2} \quad (4)$$

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = i_{L2} - \frac{1}{R_2} (V_{C2} - V_R) \quad (5)$$

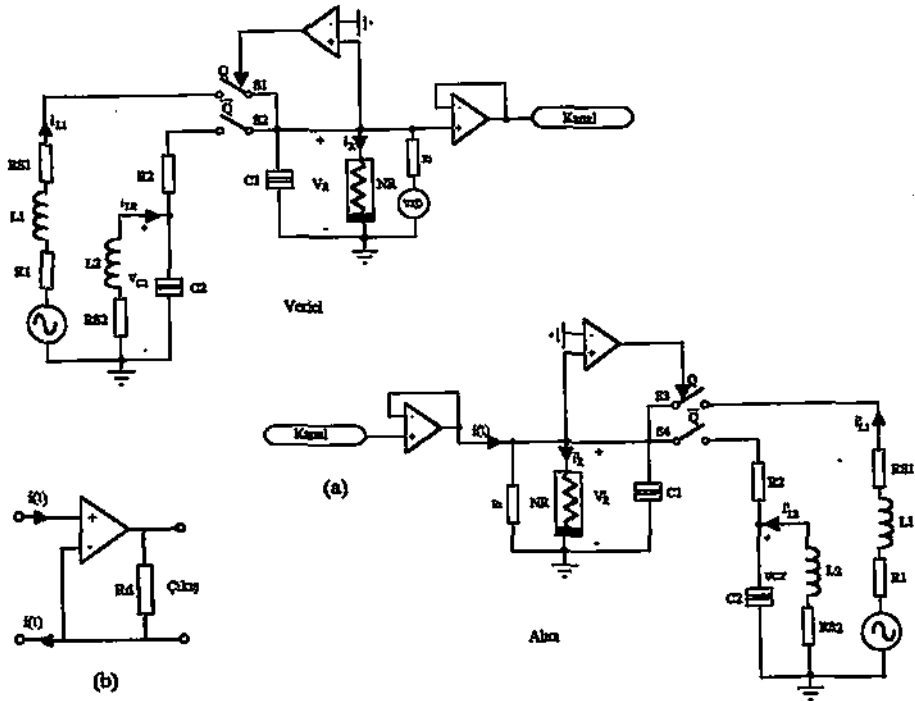
$$C_1 \frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{R_2} (V_{C2} - V_R) - f(V_R) \quad (6)$$



Şekil-3. (a) Karışık modlu kaotik devre dinamiği, (b) devrenin kaotik çekir yapısı.

Devredeki R_2 direnç değeri kaotik değişim parametresi olarak belirlenmiş olup, bu direnç değerinin 2000Ω 'dan sıfıra doğru azaltılmasıyla devre yapısı değişik dallanma ve kaos olayı sergilemektedir.

Şekil-1'deki anahtarların komutları statik olarak değil sürekli değişen bir kontrol işaretine bağlı yani dinamik olarak değiştirildiğinde, C_1 dinamiği üzerinde uygulanan kontrol işaretinin darbe süresine bağlı olarak hem otonom hem de otonom olmayan bir özellik taşıyan karışık modlu kaotik davranış sergilenmektedir [10]. Şekil-1'deki devrede anahtarların kontrol işaretleri olarak darbe süreleri 5 msn ve periyotları 10 msn olan iki eşlenik karedalga işareti $V(\varphi)$ ve $V(\bar{\varphi})$ kullanılmıştır. Elde edilen karışık modlu kaotik davranış ve devreye ait kaotik çekir yapısı Şekil-3(a) ve (b)'de verilmiştir. Burada karışık modlu işaretin elde edilmesinde anahtarların kontrolü periyodik işaretlerle sağlanmış olsa da, bu kontrol periyodik olmayan işaretlerle hatta harici işaret kullanmadan devrenin kendi dinamiklerinden sağlanabilir. Böyle bir kontrol metodu bu devre modeli kullanılarak tasarlanan ve bir sonraki bölümde tanıtılacak olan kaotik haberleşme sisteminde kullanılacaktır.



Şekil-4. (a) Karışık modlu kaotik devre modeli tasarlanan kaotik haberleşme sistemi, (b) akım dedektörü.

3. TASARLANAN KAOTİK HABERLEŞME SİSTEM YAPISI

Karışık modlu kaotik devre modeli analog işaretlerin kaotik ortamda güvenilir bir şekilde iletilmesinde etkili olarak kullanılabilir. Bu devre sahip olduğu hem otonom hem de otonom olmayan kaotik devre parametreleri ve yapısındaki anahtarlama özelliği ile kullanıldığı haberleşme sisteminde yüksek güvenilirlik ve gizlilik sağlayabilir. Bunu göstermek amacıyla karışık modlu kaotik devre modeli kullanılarak kaotik modülasyon tekniğine dayalı bir kaotik haberleşme sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan sistem yapısı Şekil-4(a)'da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi verici ve alıcı modüldeki anahtarlar periyodik bir işaret ile değil devrenin kendi kaotik dinamiği ile kontrol edilmiştir. Verici modüldeki anahtarlama işlemini kontrol eden $V_R(t)$ işaretine bağlı olarak verici modül,

$V_R > 0$ için,

$$C_1 \frac{dV_R}{dt} = i_{L1} - f(V_R) + \frac{V_i(t) - V_R}{R_i} \quad (7)$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = -i_{L1} (R_i + R_{S1}) - V_R + A \sin(\omega t)$$

ve $V_R < 0$ için,

$$\begin{aligned} L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= -V_{C2} - i_{L2} \cdot R_{S2} \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} &= i_{L2} - \frac{1}{R_2} (V_{C2} - V_R) \\ C_1 \frac{dV_R}{dt} &= \frac{1}{R_2} (V_{C2} - V_R) - f(V_R) + \frac{V_i(t) - V_R}{R_i} \end{aligned} \quad (8)$$

denklemleriyle tanımlanır. Burada $V_i(t)$ iletimi düşünülen analog bildiri işareti ve $V_R(t)$ ise iletim ortamına verilen kaotik işarettir. Denk.(7) ve (8)'deki her iki anahtarlama durumunda yani $V_R > 0$ ve $V_R < 0$

durumlarında ortak dinamik olan $C_1 \frac{dV_R}{dt}$ dinamiği aşağıdaki birleşik formda yazılabilir.

$$C_1 \frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & (1 + \text{sgn}(V_R)) \cdot (i_{L1} - f(V_R)) + \\ & (1 - \text{sgn}(V_R)) \cdot \left(\frac{V_{C2} - V_R}{R_2} - f(V_R) \right) \end{aligned} \right] + \frac{V_i(t) - V_R}{R_i} \quad (9)$$

Alıcı modüle ait durum denklemleri de yine kendi yapısındaki anahtarlama konumlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

$V'_R > 0$ için,

$$C_1 \frac{dV'_R}{dt} = i'_{L1} - f(V'_R) - \frac{V'_R}{R_1} \quad (10)$$

$$L_1 \frac{di'_{L1}}{dt} = -i'_{L1} (R_1 + R_{S1}) - V'_R + A \sin(\omega t)$$

ve

$$V'_R < 0 \text{ için,}$$

$$L_2 \frac{di'_{L2}}{dt} = -V'_{C2} - i'_{L2} \cdot R_{S2}$$

$$C_2 \frac{dV'_{C2}}{dt} = i'_{L2} - \frac{1}{R_2} (V'_{C2} - V'_R) \quad (11)$$

$$C_1 \frac{dV'_R}{dt} = \frac{1}{R_2} (V'_{C2} - V'_R) - f(V'_R) - \frac{V'_R}{R_1}$$

Verici sistemdekine benzer bir şekilde her iki anahtarlama komutundaki ortak dinamik $C_1 \frac{dV'_R}{dt}$,

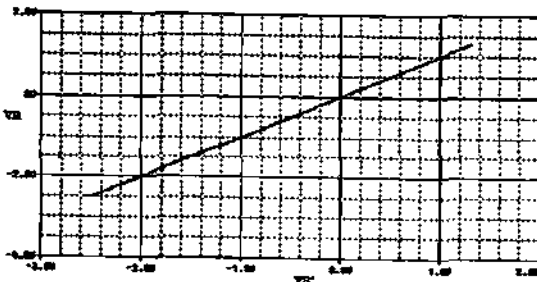
$$C_1 \frac{dV'_R}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1 + \text{sgn}(V'_R)) \cdot (i'_{L1} - f(V'_R)) + (1 - \text{sgn}(V'_R)) \cdot \left(\frac{V'_{C2} - V'_R}{R_2} - f(V'_R) \right)}{1} \right] - \frac{V'_R}{R_1} \quad (12)$$

olarak ifade edilebilir. İletim ortamındaki voltaj takipçisinden dolayı $V_R(t) = V'_R(t)$ eşitliği sözkonusudur. Bu aşamada, alıcı sistemde $V_i(t)$ analog bildiri işaretinin yeniden nasıl elde edilebileceği gösterilecektir. Denk.(9)'dan,

$$V_i(t) = R_1 \left[C_1 \frac{dV'_R}{dt} - \frac{1}{2} \left[\frac{(1 + \text{sgn}(V'_R)) \cdot (i'_{L1} - f(V'_R)) + (1 - \text{sgn}(V'_R)) \cdot \left(\frac{V'_{C2} - V'_R}{R_2} - f(V'_R) \right)}{1} \right] + \frac{V'_R}{R_1} \right] \quad (13)$$

olarak elde edilirken, benzer olarak Şekil 4(a)'daki $i(t)$ akımı da,

$$i(t) = \left[C_1 \frac{dV'_R}{dt} - \frac{1}{2} \left[\frac{(1 + \text{sgn}(V'_R)) \cdot (i'_{L1} - f(V'_R)) + (1 - \text{sgn}(V'_R)) \cdot \left(\frac{V'_{C2} - V'_R}{R_2} - f(V'_R) \right)}{1} \right] + \frac{V'_R}{R_1} \right] \quad (14)$$



Şekil-6. Tasarlanan sistemin senkronizasyon eğrisi.

denklemleri ifade edilecektir. Verici ve alıcı modüllerdeki devre dinamikleri arasında $p(t) = v_{C2}(t) - v'_{C2}(t)$, $q(t) = i_{L2}(t) - i'_{L2}(t)$ ve $r(t) = i_{L1}(t) - i'_{L1}(t)$ fark tanımlamaları yapılır ve bunlar diferansiyel denklem formunda yazılırsa,

$$C_2 \frac{dp}{dt} = -\frac{p}{R_2} + q$$

$$L_2 \frac{dq}{dt} = -p - R_{S2} \cdot q \quad (15)$$

$$L_1 \frac{dr}{dt} = -(R_1 + R_{S1}) \cdot r$$

ifadeleri elde edilir. Denk.(15)'in orijini asimptotik olarak kararlı olduğu için $t \rightarrow \infty$ iken $|p| = |v_{C2} - v'_{C2}| \rightarrow 0$, $|q| = |i_{L2} - i'_{L2}| \rightarrow 0$ ve $|r| = |i_{L1} - i'_{L1}| \rightarrow 0$ olacaktır. Bu da verici ve alıcı modüllerin senkronize olacağı anlamına gelmektedir. Böylece Denk.(14)'teki $i(t)$ akım ifadesinde $v_R(t) = v'_R(t)$, $v_{C2}(t) = v'_{C2}(t)$ ve $i_{L1}(t) = i'_{L1}(t)$ eşitlikleri kullanılırsa,

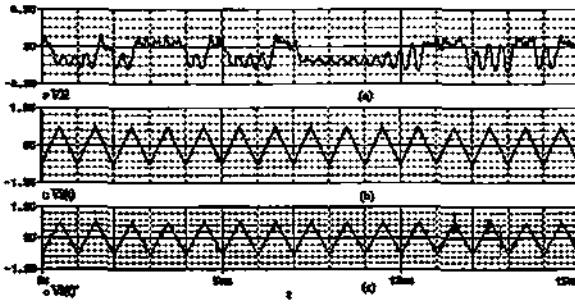
$$i(t) = \left[C_1 \frac{dV'_R}{dt} - \frac{1}{2} \left[\frac{(1 + \text{sgn}(V'_R)) \cdot (i'_{L1} - f(V'_R)) + (1 - \text{sgn}(V'_R)) \cdot \left(\frac{V'_{C2} - V'_R}{R_2} - f(V'_R) \right)}{1} \right] + \frac{V'_R}{R_1} \right] \rightarrow \frac{V_i(t)}{R_1} \quad (16)$$

elde edilir. Denk.(16)'dan $i(t)$ akımının $V_i(t)$ bildiri işaretine orantılı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Böylece Şekil-4(b)'deki akım dedektörü kullanılarak analog bildiri işareti $V_i(t)$ alıcı sistemde tekrar elde edilebilmektedir.

4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ANALİZ SONUÇLARI

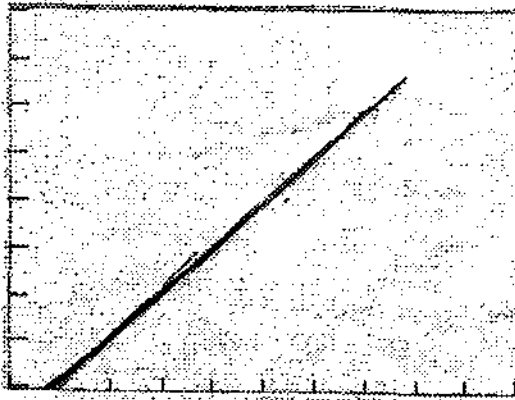
Şekil-4(a)'daki kaotik modlu kaotik devre modeli ile tasarlanan kaotik haberleşme sistemi önce Pspice simülasyonları ile incelenmiş ve tasarım mantığının doğruluğu kanıtlanmıştır. Şekil-4(a)'da görüldüğü gibi sistemin verici ve alıcı modülleri ve bu modüllerdeki anahtarlama mekanizmaları eşdeğer elemanlardan kurulmuştur. Bu her iki modül arasındaki senkronizasyonun sağlanması için gereklidir. Verici ve alıcı modüller arasında kaotik senkronizasyonun sağlandığı Şekil-6'daki simülasyon sonucundan görülmektedir. Şekil-7'de ise analog bildiri işaretinin üçgen dalga formunda olduğu durumdaki sistem dinamiklerini gösteren simülasyon sonuçları verilmiştir.

Bilgisayar simülasyonları ile tasarım mantığı doğrulanan Şekil-4'deki haberleşme sistemi laboratuvar ortamında deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, bu gerçekleştirmede simülasyon denemelerinde olduğu gibi verici ve alıcı



Şekil-7. Şekil-4(a)'daki sisteme ait simülasyon sonucu, (a) iletim ortamına verilen kaotik işaret, (b) bildiri işareti, (c) alıcıda elde edilen işaret.

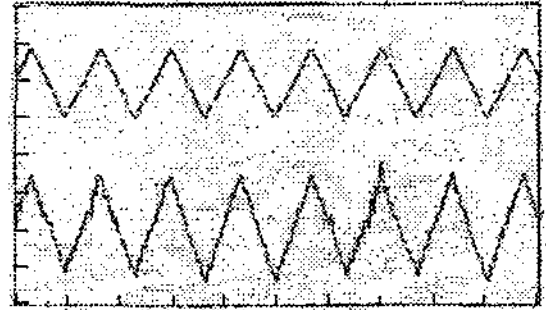
modüller arasında kaotik senkronizasyonun başarılı bir şekilde sağlandığını göstermiştir. Deneysel olarak elde edilen senkronizasyon eğrisi Şekil-8'de verilmiştir. Deneysel analizde de üçgen dalga formundaki bildiri işareti kullanılmış ve alıcı modülde başarılı bir şekilde algılanmıştır (Şekil-9). Deneysel kaotik senkronizasyonun sağlanması için bildiri işaret seviyesinin kaotik işaret seviyesinden oldukça küçük olması gibi bir zorunluluğun olmadığı da tespit edilmiştir.



Şekil-8. Şekil 4(a)'daki kaotik haberleşme sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi sırasında kaotik senkronizasyonun sağlanması (kanal-x (V_R): 0.5 V/div, 10 μ s/div, kanal-y (V_R): 0.5 V/div, 10 μ s/div).

5. SONUÇLAR

Geliştirilen karışık modlu kaotik devre modeli basit bir donanım arz etmekte ve sadece tek bir nonlineer direnç içermektedir. Bu devre ile tasarlanan kaotik haberleşme sisteminde karışık modlu kaotik devre modelinin zengin otonom ve otonom olmayan kaotik parametre değişimleri sisteme daha fazla güvenilirlik katmakta ve devredeki anahtarlama mekanizması da ilave bir güvenlik parametresini oluşturmaktadır. Çünkü böyle bir sistemde dışarıdan istenilmeyen müdahalelerde sistemdeki kaotikliğin çözülmesi ve kaotik senkronizasyonun sağlanması için verici modüldeki tüm parametrelerin bilinmesinin yanı sıra



Şekil-9. Şekil 4(a)'daki haberleşme sisteminin üçgen dalga formunda bir işaret iletimi arasındaki deneysel sonucu. Üstteki işaret bildiri işareti, alttaki işaret ise alıcıda elde edilen işareti göstermektedir (Osiloskop ayarları, üstteki işaret için kanal-1: 2 V/div, 0.1 ms/div, alttaki işaret için kanal-2: 0.1 V/div, 0.1 ms/div).

verici modülde kullanılan anahtarlama mekanizması ve anahtarlama işaretlerinin özelliklerinin de bilinmesi zorunludur. Bu özellikler sistemi daha güvenli kılmakta ve dışarıdan müdahaleleri zorlaştırmaktadır.

Karışık modlu kaotik devre modeli analog bildiri işaretlerinin iletimi amaçlı sistem tasarımında kullanılabildiği gibi dijital yani ikili formdaki işaretlerin iletimi amaçlı sistem tasarımında da kullanılabilir. Devre yapısındaki anahtarlama işaretleri $V(\phi)$ ya da $V(\bar{\phi})$ düşümilecek bir kaotik anahtarlama sisteminde iletilecek bildiri işareti olarak kullanılabilir. Böyle bir tasarım ile ilgili sonuçların takip eden ayrı bir çalışmada sunulması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] L. Kocarev, K.S. Halle, K. Eckert, L.O. Chua, U. Parlitz, Experimental Demonstration of Secure Communications via Chaotic Synchronization, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 2, 709-713, (1992).
- [2] K.S. Halle, C.W. Wu, M. Itoh, L.O. Chua, Spread Spectrum Communication Through Modulation of Chaos, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 3, 469-477, (1993).
- [3] L.O. Chua, M. Itoh, L. Kocarev, K. Eckert, Chaos Synchronization in Chua's Circuit, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 3, 93-108, (1993).
- [4] M. Itoh, H. Murakami, L.O. Chua, Communication Systems via Chaotic Modulations, *IEICE Trans. Fundamentals*, E77-A, 1000-1006, (1994).
- [5] M. Alçı, R. Kılıç, Simetrik Bağlantılı Chua Devre Modelinde Kaotik Etkileşim, *SIU'97*, 5. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, 8.850-854, 1997, Kırşehir.
- [6] M. Hasler, Synchronization of Chaotic Systems and Transmission of Information, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 8, 647-655, (1998).
- [7] M. Itoh, Spread Spectrum Communication via Chaos, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 9, 155-213, (1999).
- [8] A.I. Panaz, T. Yang, L.O. Chua, Experimental Results of Impulsive Synchronization Between Two Chua's Circuits, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 8, 639-644, (1998).
- [9] A.S. Dmitriev, A.I. Panaz, S.O. Starkov, Experiments on Speech and Music Signals Transmission Using Chaos, *International J. of Bifurcation&Chaos*, 5, 1249-1254, (1995).
- [10] R. Kılıç, M. Alçı, M. Tokmakçı, Mixed-Mode Chaotic Circuit, *Electronics Letters*, 36, 103-104, (2000).