EEG Sinyallerinde Gamma Tepkisinin Tespiti

Detection of Gamma Responses in EEG Signals

D. İlhan Tüfekçi¹, Sirel Karakaş², Orhan Arıkan¹

¹ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi, Ankara
ilhant@bilkent.edu.tr
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

² Deneysel Psikoloji Uzmanlık Alanı
Hacettepe Üniversitesi, Beytepe-Ankara
skarakas@hacettepe.edu.tr

Özetçe

Erken gamma tepkisinin varlığının tespit edilmesinde özel yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, EEG sinyalinin gamma frekans bandındaki zaman – frekans gösteriminden elde edilen öznitelikler kullanılarak otomatik gamma tepkisi tespiti gerçekleştiren bir teknik geliştirilmiştir. Üretilen sentetik veriler incelendiğinde, tekniğin ürettiği öznitelikler kullanılarak gamma olan ve olmayan durumların birbirlerinden kolayca ayırt edilebildiği gözlemlenmiştir. Gerçek EEG verileri üzerinde, tekniğin ve uzman görüşünün sınıflandırmaları arasındaki uyum %77 olarak gerçekleşmiştir.

Abstract

In the detection of the existence of the early gamma response, subjective methods have been used. In this study, an automated gamma detection technique is developed based on the features obtained from the time – frequency representation of the EEG signal in the gamma frequency band. The technique easily discriminates the gamma response existing and non-existing cases for the generated synthetic data. The classification of the technique and that of the expert opinion coincide %77 for real EEG data.

1. Giriş

Beyindeki nöro-elektriksel aktivitenin göstergesi olan elektroensefalogram (EEG) sinyalinin salımsal bileşenlerden oluştuğu düşünülmektedir [1]. Değişik frekans bandlarını kaplayan bu salımsal bileşenlerden gamma bileşeninin beyin bilişsel ve kavrayışsal fonksiyonları ile ilintili olduğu belirtilmektedir [1, 3]. EEG sinyallerinde, uyarıcıdan hemen sonra (150 milisaniyeye kadar) oluşan gamma tepkisine erken, 150 ile 400 milisaniye arasında oluşan tepkiye de geç gamma tepkisi adı verilmektedir [5]. Bu çalışmada sadece erken gamma tepkisi analiz edilecek ve ‘erken’ ibaresi bundan sonra kullanılmayacaktır.

Bazı deneklerin EEG sinyallerinde gamma bileşeni gözlemlenirken, bazı deneklerde gamma bileşenine rastlanmamaktadır [5]. Gamma tepkisinin varlığına genelde, gamma frekans bandındaki salımsal sinyalin genliğinin uyarıcıdan sonra artma miktarına bakılarak karar verilmektedir. Bu çalışmada, gamma tepkisinin varlığının tespiti amacıyla kullanılan özel yöntemler yerine kullanılabilecek otomatik bir gamma tespit tekniği (OGT) geliştirilmiştir.

Geliştirilen tespit tekniği, gamma tepkisinin aşağıda listelenen genel olarak kabul görmüş karakteristiklerine dayanmaktadır:

- Gamma tepkisi, 26 – 48 Hz frekans bandında oluşmaktadır [2 – 4].
- Gamma tepkisi, uyarıcıdan sonraki 150 milisaniyelik zaman diliminde kendini göstermektedir [2 – 4].
- Uyarıcı sonrası EEG sinyali, gamma tepkisinin varlığında uyarıcı öncesine göre iyileşme göstermektedir.

Gamma tepkisinin zaman – frekans (ZF) gösteriminden elde edilen öznitelikler kullanılarak EEG sinyalindeki gamma varlığına karar verilmektedir.

Bölüm 2’de gamma tepkisi tespit tekniği, yaratılan sentetik bir EEG sinyali üzerinden adım adım anlatılmaktadır. Bölüm 3’de tekniğin sentetik sinyaller üzerindeki başarımı, Bölüm 4’te ise gerçek EEG verileri üzerindeki başarımı sınanmıştır.

2. Gamma Tepkisi Tespit Tekniği

Gamma tepkisinin önceki bölümde belirtilen özellikleri kullanılarak geliştirilmiş olan OGT’nin ana adımları aşağıda listelenmiştir:

1. Tespitin kolaylaştırılması için ön işleme. Ön işleme, EEG sinyalinin 26 – 48 Hz bandını geçiren süzgeç ile süzgeçlenmesini ve süzgeçlenmiş bu sinyali gamma tepkisinin oluşmasını beklediğimiz bir pencere ile ağırlıklandırmayı kapsamaktadır.
2. Ön işleme gerçekleştirilmiş EEG sinyalinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü’nün (KZFD) alınması
3. Potansiyel gamma tepkisi varlığında oluşacak ZF düzlemindeki dorukların yerlerinin belirlenmesi.
4. Tespit edilen her doruğun frekans aralığının eşikleme ile belirlenmesi
5. EEG sinyalini, 4. adımda belirlenen frekans aralığında süzgeçleme
6. Aşağıda belirtilen KZFD’lerin alınması
  - 5. adımda elde edilen sinyalin KZFD’si: $S_{y_i}(t, f)$
  - 5. adımda elde edilen sinyalin, arama bölgesindeki KZFD özniteliklerini vurgulamak amacıyla zamandaki pencere ile ağırlıklandırılması sonrası oluşan sinyalin KZFD’si: $S_{g_i}(t, f)$

7. Watershed imge bölütleme algoritması ([6]) kullanılarak $S_{g_i}(t, f)$ 'den potansiyel gamma desteği işaretleyicisinin (marker) $I_{g_i}(t, f)$ çıkartılması
8. $I_{g_i}(t, f)$ ve uyarıcı öncesi bölge sınırları kullanılarak $S_{y_i}(t, f)$ için destek işaretleyicisinin oluşturulması
9. Gamma tespitinde kullanılacak ZF alanı nicel öznelitliklerinin çıkartılması
10. Gamma tepkisinin var olup olmadığının bir önceki adımda çıkartılan öznelitlikler kullanılarak tespit edilmesi

Geliştirilen gamma tespit tekniğinin sınanması amacıyla sentetik gamma sinyalleri yaratılmış ve algoritmanın adımları bu sinyaller üzerinden aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

2.1. Sentetik Gamma Sinyali Oluşturulması

Gamma tepkisinin olmadığı sentetik sinyaller, yaratılan Gauss gürültüsünün 26 – 48 Hz frekans bandında süzgeçlenmesi ile oluşturulmuştur. Gammanın olduğu sinyalleri elde edebilmek amacıyla, süzgeçlenen gürültüye merkezi 90 milisaniyede bulunan tabanlı kosinüs pencere ile ağırlıklandırılmış, frekansı 30-45 Hz arasında rasgele seçilen bir sinüs dalgası eklenmiştir. Bu şekilde, eşit sayıda (19'ar adet) gamma tepkisinin var olduğu ve olmadığı sentetik sinyaller üretilmiştir. Bu sinyallerden gamma tepkisinin var olduğu bir tanesi teknik anlatılırken kullanılmış, diğerleri ile elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te sunulmuştur.

2.2. Ön işleme

OGT'de kullanılan ön işleme, EEG sinyalinin ($x(t)$) [26 - 48] Hz bandında süzgeçlenmesi ($y(t)$) ve daha sonra tabanlı kosinüs pencere ($w(t)$) ile çarpılması ile elde edilmektedir:

$$g(t) = w(t) \times y(t) \quad (1)$$

Uyarıcı öncesi ve sonrası tepkilerle ilgili öznelitliklerin çıkartılabilmesi amacıyla tabanlı kosinüs pencerenin desteği – 50 ile 300 milisaniye arasında seçilmiştir.

2.3. Öznelitlik Çıkartımı

Önerilen yöntem; potansiyel gamma tepkisini, ön işlemesi tamamlanmış sinyalin KZFD'sinin genliğinde aramaktır:

$$S_g(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) h(t - \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \right| \quad (2)$$

KZFD penceresini belirten $h(t)$, bu çalışmada

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

olarak alınmış; pencerenin genişliği, σ , 57 milisaniye seçilmiştir.

Süzgeçten geçirilmiş sentetik EEG sinyali ve bu sinyalin KZFD genliği sırasıyla Şekil 1a ve b'de gösterilmiştir. Ön işlenmiş sinyal, KZFD genliğiyle beraber Şekil 1c ve d'de verilmiştir. Ön işlenmiş sinyalin KZFD'sindeki her yerel enerji adacığ potansiyel bir gamma tepkisini işaret etmektedir. Şekil 1d'den de anlaşılacağı gibi gösterilen

sentetik sinyal için iki adet potansiyel gamma tepkisi tespit edilmiştir.

EEG sinyali, her bir potansiyel gamma tepkisi için belirlenen (Şekil 1d) [37.7 – 46.4] ve [26 – 34.5] Hz frekans bandlarında süzgeçlenmektedir. Algoritmanın her bir potansiyel gamma tepkisi için aynı olan bundan sonraki adımları sadece birinci (frekans bandı [37.7 – 46.4] Hz olan) potansiyel gamma tepkisi ($y_1(t)$) üzerinden anlatılacaktır.

Şekil 1: (a) $y(t)$, süzgeçten geçirilmiş sentetik EEG sinyali, (b) $y(t)$ 'nin KZFD genliği. (c) $g(t)$, ön işlenmiş EEG sinyali (d) Ön işlenmiş sinyalin KZFD genliği, $S_g(t, f)$. Tespit edilen doruklara ait frekans aralıkları da şekilde çizilmiştir.

$y_1(t)$ 'nin KZFD genliği $S_{y_1}(t, f)$ Şekil 2a'da, benzer şekilde ön işlenmiş sinyalin KZFD genliği $S_{g_1}(t, f)$, Şekil 2b'de gösterilmektedir. Watershed imge bölütleme algoritması kullanılarak $g_1(t)$ 'nin ZF desteği belirlenmektedir. Watershed algoritması, KZFD genliğindeki yüksek enerjili kısımları belirleyen bir ikili (binary) matris, $I_{g_1}(t, f)$, üretmektedir (Şekil 2d). Belirlenen bu işaretleyici $S_{g_1}(t, f)$ ile çarpılınca, gamma tepkisi adayı için maskelenmiş ZF gösterimi ortaya çıkmaktadır (Şekil 2f):

$$M_{g_1}(t, f) = S_{g_1}(t, f) \times I_{g_1}(t, f) \quad (4)$$

Benzer şekilde, uyarıcı öncesi sinyalin maskelenmiş ZF gösterimi $M_{y_1}(t, f)$,

$$M_{y_1}(t, f) = S_{y_1}(t, f) \times I_{y_1}(t, f) \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki uyarıcı öncesi işaretleyici, $I_{y_1}(t, f)$, gamma işaretleyicisinin ($I_{g_1}(t, f)$) uyarıcı öncesi sınırları da göz önüne alınarak genişletilmesi (dilation) ile elde edilmektedir. Uyarıcı öncesi işaretleyicisi ve maskelenmiş ZF gösterimi sırasıyla Şekil 2c ve e'de verilmiştir.

Gamma tepkisinin varlığında, uyarıcı öncesi ve sonrası sinyallerin birbirinden ayrt edilebilmesi için çok sayıdaki alternatif öznelitliklerden aşağıdakiler seçilmiştir:

En belirgin ayırımı sağlayan, normalize iyileşme oranı olarak adlandırılan ve

Şekil 2: Birinci potansiyel gamma tepkisinin (a) ve ön işlenmiş sinyalin (b) KZFD genlikleri: $S_{y_1}(t, f)$, $S_{g_1}(t, f)$. Uyarıcı öncesi (c) ve gamma tepkisi (d) işaretleyicileri: $I_{y_1}(t, f)$, $I_{g_1}(t, f)$ (e) Uyarıcı öncesi sinyalin (e) ve potansiyel gamma tepkisinin (f) maskelenmiş ZF gösterimleri: $M_{y_1}(t, f)$, $M_{g_1}(t, f)$.

$$\gamma_e = \frac{p_g - \mu_p}{\sigma_p} \quad (6)$$

denklemlerle verilen özneliktir. Denklemlerde; p_g , $M_{g_1}(t, f)$ 'nin tepe değerini, μ_p ve σ_p ise $M_{y_1}(t, f)$ 'in sırasıyla ortalama ve standard sapma değerlerini belirtmektedir.

Tepe oranı, γ_e , gamma tepkisi adayı ile uyarıcı öncesi sinyalin maskelenmiş ZF gösterimlerinin tepe değerlerinin oranı olarak seçilmiştir:

$$\gamma_p = \frac{p_g}{p_p} \quad (7)$$

Denklemlerde, p_p , uyarıcı öncesi sinyalin maskelenmiş ZF gösteriminin tepe değerini göstermektedir.

Kullanılan üçüncü öznelik, maskelenmiş ZF gösterimlerinin enerjilerinin oranıdır:

$$E_r = \frac{\int M_{g_1}(t, f)^2 dt df}{\int I_{g_1}(t, f) dt df} \left[\frac{\int M_{y_1}(t, f)^2 dt df}{\int I_{y_1}(t, f) dt df} \right]^{-1} \quad (8)$$

Tekniğin anlatılmasında kullanılan sentetik sinyal için hesaplanan öznelikler Tablo 1'de listelenmiştir. Seçilen bu sentetik sinyalde, sadece birinci potansiyel gamma gerçek bir gamma tepkisidir. Tablo 1'den de anlaşılacağı gibi gamma tepkisi olan birinci potansiyel sinyal için öznelik değerleri, gamma tepkisi olmayan diğerine göre daha yüksektir.

Tablo 1: Potansiyel gamma tepkileri öznelikleri.

Potansiyel Gamma Tepkisi #	γ_e	γ_p	E_r
1	6.84	1.5	15.34

2	3.97	0.89	9.03

2.4. Sinir Ağı ile Sınıflandırma

Çıkarılan öznelikler kullanılarak bir sinir ağı sınıflandırıcısı (SAS) tasarlanmıştır. Sinir ağı sınıflandırıcısı, girdi olarak anlatılan üç özneliği almakta, çıktı olarak da gamma tepkisinin var olup olmadığını belirlemektedir. Tasarlanan sinir ağının sırasıyla 30 ve 15 nörona sahip iki adet saklı katmanı bulunmaktadır. Tüm ara katmanlarda hiperbolik teğet aktarım fonksiyonları, çıktı katmanında ise +1 ve -1'de doyuma ulaşmış doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Çıktı değerinin 0.75'ten büyük olduğu durumlarda gamma tepkisinin var olduğu, -0.75'ten küçük olduğu durumlarda ise gamma tepkisinin var olmadığı değerlendirilmiştir.

3. Sentetik Veri Sonuçları

Üretilen sentetik verilerin yarısında gamma tepkisi var (G+) iken diğer yarısında gamma tepkisi bulunmamaktadır (G-). Şekil 3'te sentetik veriler için OGT'nin bulduğu öznelikler üç boyutlu (3B) olarak sunulmuştur. 'artı' işareti ile gösterilen öznelikler gamma tepkisi olmayan, 'karo' biçiminde gösterilenler ise gamma tepkisi olan sentetik sinyallere aittir. Gamma tepkisinin var olduğu durumla karşılaştırıldığında, gamma tepkisi olmayan sinyallere ait her üç özneliğin de daha küçük değerler aldığı gözlemlenmektedir. Özneliklerin iki durum için doğrusal ayrılabilir olduğu açıktır, dolayısıyla önerilen teknik, gamma tepkisinin varlığını tespit edebilmektedir.

Şekil 3: Sentetik veriler için normalize iyileşme, tepe ve enerji oranlarını gösterir 3B öznelik saçılım diyagramı.

4. Gerçek EEG Sinyal Sonuçları

OGT; Hacettepe Üniversitesi Deneysel Psikoloji Laboratuvarında, seyrek uyarıcı paradigması altında kaydedilen EEG sinyalleri üzerinde sınanmıştır.

4.1. Denek Sonuçları

İki farklı denekten alınmış gerçek EEG sinyalleri OGT ile analiz edilmiştir. EEG sinyallerinin birinde gamma tepkisi (G+) tespit edilirken diğerinde gamma tepkisi bulunmamıştır (G-). Tespit sonuçları uzman tarafından da onaylanmıştır. Şekil 4'te; sol sütunda G+, sağ sütunda da G- denek için

sırasıyla gerçek EEG sinyalleri (a ve b), 26 – 48 Hz frekans bandında süzgeçlenmiş sinyaller (c ve d) ve KZFD'leri (e ve f), OGT tarafından bulunan potansiyel gamma tepkilerinin maskelenmiş ZF gösterimleri (g ve h) verilmiştir.

Şekil 4: (a) Gamma tepkisi olan (G+) EEG sinyali (b) Gamma tepkisi olmayan (G-) EEG sinyali. (c, d) [26-48]Hz frekans bandında süzgeçlenmiş sırasıyla G+ ve G- sinyaller. (e, f) OGT'nin sırasıyla G+ ve G- için elde ettiği KZFD'ler, (g-h) OGT'nin sırasıyla G+ ve G- için bulduğu potansiyel gamma tepkilerinin maskelenmiş ZF gösterimleri.

Gamma tepkisi olan (G+) denek için [26 – 48] Hz bandında süzgeçlenmiş sinyalin uyarıcıdan sonra uyarıcı öncesi düzeye göre yüksek genlikli olarak elde edildiği Şekil 4c'den anlaşılmaktadır. Bu durum sinyalin KZFD'sinde de belirgin olarak görülmektedir. KZFD'deki uyarıcı sonrası enerji yoğunluğu uyarıcı öncesine göre G- durumunda elde edilen KZFD'den farklı olarak belirgin bir artış göstermektedir (Şekil 4e ve f).

OGT'nin potansiyel gamma tepkisi ve uyarıcı öncesi sinyalin maskelenmiş ZF gösterimlerini (sırasıyla Şekil 4g ve h) kullanarak hesapladığı öznelitliklerin (Tablo 2) G+ EEG sinyali için G- duruma göre daha yüksek değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 2: G+ ve G- EEG sinyalleri için OGT'nin hesapladığı öznelitlikler.

	γ_e	γ_p	E_r
G+	6.94	1.87	21.21
G-	3.11	0.96	5.83

4.2. Sinir Ağı Sınıflandırıcısı Sonuçları

22 adet gamma tepkisi olan (G+) ve 20 adet gamma tepkisi olmayan (G-) toplam 42 adetlik EEG sinyali, sinir ağı sınıflandırıcısını eğitmek için kullanılmıştır. 102 adet EEG

sinyalinden oluşan test kümesi, OGT'ye sokulmuş ve sonuç olarak uzman sınıflandırması ile %77 oranında bir uyum sağlanmıştır.

Uzmanın bazı EEG sinyallerinde gamma tepkisinin varlığıyla ilgili görüşü, OGT'nin kullandığı KZFD'leri gözlemleyince değişmiştir. Uzmanın ve tekniğin sınıflandırmaları, Tablo 3'te gösterilmiştir. Uzmanın gamma var dediği 16 denek için teknik, gamma yok sonucu üretmiştir. Benzer şekilde uzmanın gamma yok dediği 8 denek için teknik, gamma var kararına varmıştır. OGT'nin – 0.75 ile 0.75 arasında çıktı değerleri üreterek tereddüte düştüğü 9 adet denek için uzman desteği alınmıştır.

Tablo 3: EEG verileri üzerinde, OGT ve uzmanın G+ ve G- sınıflandırması yaptığı denek sayıları.

		UZMAN GÖRÜŞÜ	
		G+	G-
OGT	G+	48	8
	G-	16	30

5. Sonuç

EEG sinyalinin ZF gösteriminden elde edilen öznelitlikler kullanılarak otomatik gamma tepkisi tespiti gerçekleştiren bir teknik geliştirilmiştir. Gerçek EEG verileri üzerinde yapılan bir kıyaslamada, otomatik tespit yöntemi uzman görüşleriyle %77 oranında uyumuştur.

Sınıflandırmada kullanılabilecek farklı öznelitlikler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Farklı öznelitliklerin geliştirilmesiyle, OGT ile uzman görüşleri arasındaki uyumun daha da artacağı beklenmektedir.

Geliştirilen teknik bu çalışmada sadece erken gamma tepkisine uygulanmıştır. Uyarıcı öncesi bölgenin ayarlanması durumunda, aynı yöntem geç gamma bölgesine de uygulanabilir.

6. Kaynakça

- [1] Başar E., *Brain Function and Oscillations*, Vol 1-2, Springer-Verlag, Heidelberg, 1998.
- [2] Gurtubay, A. M., Labura, A., Malanda, A., Iriarte, J., Artieda, J., "Gamma band activity in an auditory oddball paradigm studied with the wavelet transform", *Clin. Neurophysiol.*, Vol. 112, 1219-1228, 2001
- [3] Karakaş, S., Başar-Eroğlu, C., Özemesi, Ç., Kafadar, H., Erzenin Ö. U., "Gamma response of the brain: a multifunctional oscillation that represents a bottom-up with top-down processing", *Int. J. Psychophysiol.*, Vol. 39, 137 – 150, 2001.
- [4] Karakaş, S., Başar, E., "Early gamma response is sensory in origin: a conclusion based on cross-comparison of results from multiple experimental paradigms", *Int. J. Psychophysiol.*, Vol. 31, 13 – 31, 1998.
- [5] Karakaş, S., Tüfekçi, İ., Bekçi, B., Çakmak, E. D., Doğutepe, E., Erzenin Ö. U., Özkan, A., Arkan O., "Early time-locked gamma response and gender specificity", *Int. J. Psychophysiol.*, in press.
- [6] Vincent, L. and Soille P., "Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations," *IEEE Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 6, 1991, 583-598.