

Analiza chaotyczności sygnałów EEG dla potrzeb wspomagania diagnostyki epilepsji

Bartosz Świdorski¹, Andrzej Rysz³, Stanisław Osowski^{1,2}

¹Politechnika Warszawska, ²Wojskowa Akademia Techniczna, ³Akademia Medyczna w Warszawie

Streszczenie

Praca przedstawia zastosowanie teorii chaosu w analizie sygnałów EEG dla potrzeb wspomagania diagnostyki epilepsji. W szczególności główny nacisk jest położony na estymację największego wykładnika Lapunowa jako parametru charakteryzującego zmianę chaotyczności sygnałów EEG przy zbliżaniu się do ataku. Pokażemy, że analiza zmian wartości tego wykładnika pozwala na wyznaczenie chwili ataku jak również na predykcję ataku z wyprzedzeniem kilkuminutowym.

Wprowadzenie

Sygnały EEG należą do grupy sygnałów typu chaotycznego dla których można zastosować określone miary chaotyczności. W stanie normalnym pracy mózg jako nieliniowy system dynamiczny wykazuje duży poziom chaotyczności, natomiast w stanie ataku poziom chaotyczności zdecydowanie maleje. Ten fakt zostanie wykorzystany w pracy poprzez określanie wartości tzw. wykładnika Lapunowa charakteryzującego chaos.

Pokażemy, że wartości wykładnika Lapunowa są ściśle powiązane ze stanem pracy mózgu. W momencie zbliżania się do ataku wartość wykładnika gwałtownie maleje, co oznacza przejście sygnałów EEG do stanu zsynchronizowanego (mniej chaotycznego). Wartość minimalna wykładnika osiągnięta dla wielu kanałów na raz dobrze pokrywa się z momentem wystąpienia ataku. Zdefiniujemy również tzw. T-index dla wielu kanałów, który służyć będzie do predykcji ataku z wyprzedzeniem kilkuminutowym.

Metoda estymacji wykładnika Lapunowa

Zarejestrowany sygnał dyskretny EEG reprezentowany jest dla chwili czasowej t_i w postaci wektora x_i

$$x_i = [x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (p-1)\tau)]$$

gdzie τ – odstęp czasowy między elementami ciągu sygnałów EEG, p – wymiar przestrzeni stanu, t_i – chwila czasowa wybierana w przedziale obserwacji $[T-(p-1)\tau]$.

Estymacja wartości największego wykładnika Lapunowa L odbywa się według wzoru (L mierzone w bit/sec)

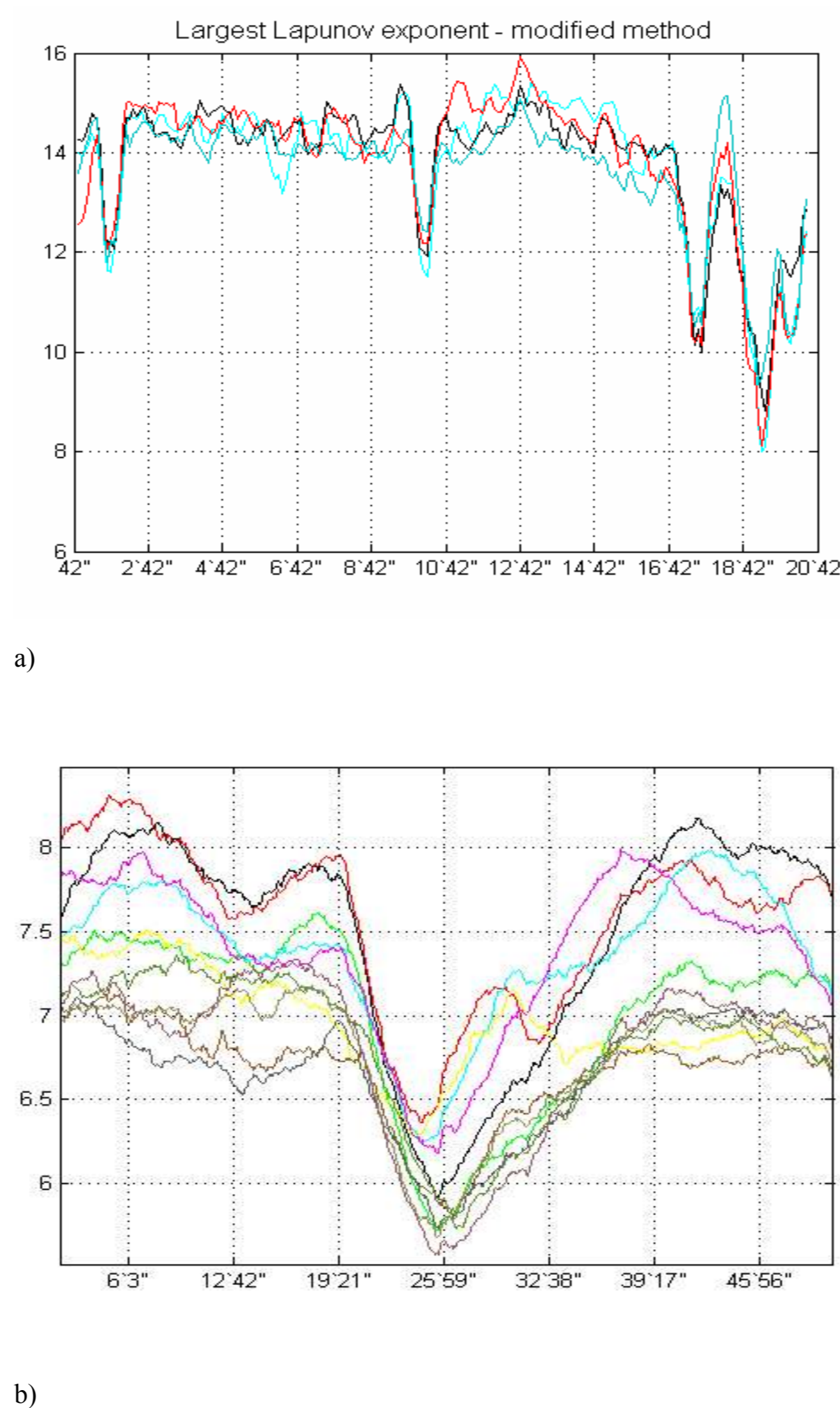
$$L = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{|\delta x_{ij}(\Delta t)|}{|\delta x_{ij}(0)|}$$

gdzie $\delta x_{ij}(0) = x(t_i) - x(t_j)$ jest wektorem przemieszczenia wektora x dla dwu chwil czasowych, t_i oraz t_j , natomiast $\delta x_{ij}(\Delta t) = x(t_i + \Delta t) - x(t_j + \Delta t)$ jest tym samym wektorem ale po upływie czasu Δt . Wektor $x(t_i)$ jest punktem na trajektorii fazowej dla $t=t_i$, a $x(t_j)$ punktem przyległym do niego dla czasu t_j . Δt jest czasem ewolucji sygnału w przestrzeni fazowej. N oznacza liczbę lokalnych estymacji wartości wykładnika wykonanych dla obserwowanego przedziału czasu T , przy czym $T=N\Delta t+(p-1)\tau$.

Aby uzyskać wiarygodną estymatę L wektor przyległy $x(t_j)$ powinien być wybrany w taki sposób, że ostatni przyrost $\delta x_{i-1,j}(\Delta t)$ jest prawie równoległy do następnego kandydata $\delta x_{ij}(0)$ oraz że $\delta x_{ij}(0)$ ma małą wartość absolutną.

Detekcja ataku epileptycznego

Analiza zmian wykładnika Lapunowa wskazuje, że w stanach normalnych pracy wykładnik ten przyjmuje wartości stosunkowo duże (sygnał EEG wykazuje cechy dużej chaotyczności). Przy zbliżaniu się do ataku epileptycznego następuje znaczna synchronizacja przebiegu we wszystkich kanałach i znaczne (kilkukrotne) zmniejszenie wartości tego współczynnika. Moment osiągnięcia minimum dobrze pokrywa się z momentem wystąpienia ataku epileptycznego. Przypadek ten dla 4 czterech kanałów (pacjent 1) oraz 11 kanałów (pacjent 2) przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1 Przebieg zmian największego wykładnika Lapunowa dla a) 4 kanałów (pacjent 1) oraz b) 11 kanałów (pacjent 2)

Ekspertyzy numeryczne przeprowadzone na sygnałach EEG 10 pacjentów dotkniętych chroniczną padaczką pokazały, że wykres zmian wykładnika Lapunowa z dobrą dokładnością jest w stanie przewidzieć moment ataku.

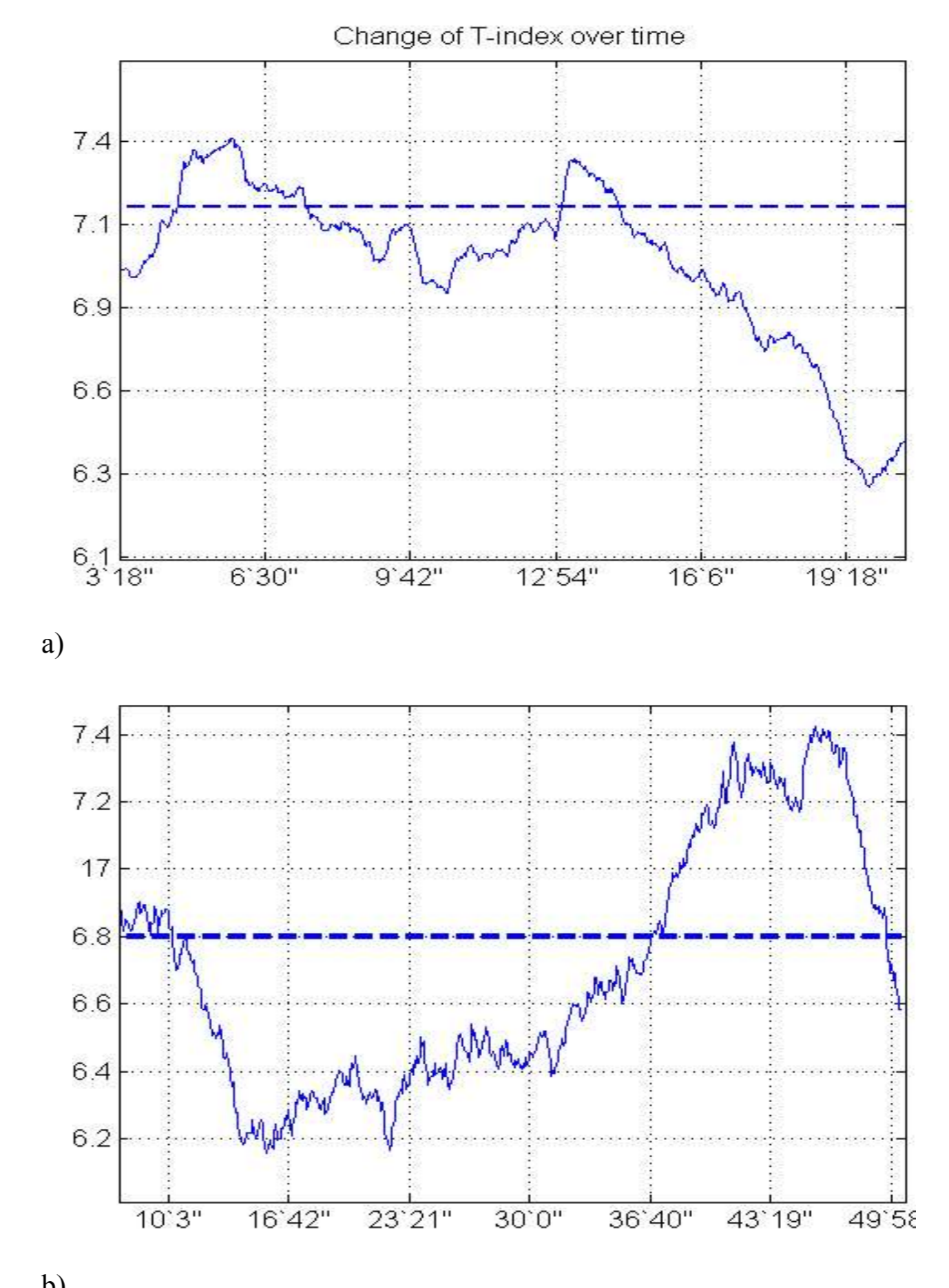
Predykcja ataku epileptycznego

Zbliżanie się do momentu wystąpienia ataku epileptycznego charakteryzuje się stopniową synchronizacją przebiegów EEG w różnych kanałach, co przejawia się synchronizacją

zmian wartości estymowanej wykładnika Lapunowa w poszczególnych kanałach. Przy predykcji nadchodzącego ataku ważną rolę odgrywa miara różnic wartości tego wykładnika dla różnych kanałów, tzw. T-index. Wartość tej miary w chwili czasowej t dla kanału i -tego oraz j -tego wyraża się wzorem

$$T_{ij}(t) = \frac{E\{|L_i(t) - L_j(t)|\}}{\sigma_{i,j}(t)/\sqrt{N}}$$

gdzie $E\{\}$ oznacza wartość oczekiwaną (średnią) $|L_i(t) - L_j(t)|$ w przesuwanym oknie pomiarowym. Wartość $\sigma_{ij}(t)$ oznacza standardowe odchylenie zmian różnic wartości L dla kanałów i, j natomiast N jest długością okna (w eksperymentach zastosowano $N=22$).



Rys. 2 Zmiany wartości T-index w czasie dla a) 4 kanałów (pacjent 1) oraz b) 11 kanałów (pacjent 2)

Spadek wielkości T-index poniżej wartości progowej świadczy o zbliżaniu się do ataku. Wartość progowa optymalna powinna być ustalana na podstawie badań wielu przypadków. Analizując przebiegi T-index dla wielu pacjentów można dla każdego z nich dobrać wartość progową, po przekroczeniu której następuje ostrzeżenie o zbliżającym się ataku. Dwa przypadki obrazujące predykcję dla pacjentów 1 i 2 przedstawiono na rys. 2. Odpowiedni dobór wartości progowej pozwala przewidzieć atak z wyprzedzeniem kilkuminutowym.

Konkluzja

Analiza EEG jako sygnału chaotycznego dostarcza wielu informacji użytecznych w diagnostyce epilepsji. Punkt minimalny wykładnika Lapunowa wskazuje na moment ataku a wykres T-index dla wielu kanałów pozwala dokonać predykcji ataku z wyprzedzeniem kilku minut.