

# UPOTREBA SPEKTRALNE ANALIZE U OBRADI KINEMATIČKIH SIGNALA GIBANJA

Mladen Mejovšek

Fakultet za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu

## Stručni članak

UDK: 577.3:796.012

Primljeno: 1.10.1994.

Prihvaćeno: 18.11.1994.

## Sažetak

Kinematičko mjerenje sportskih gibanja realizira se nekom tehnikom koja omogućuje kinematički zapis gibanja (npr. filmski ili video zapis), i digitalizatorom čime se vrši prelazak iz kontinuirane amplitude i kontinuiranog vremena u diskretan oblik. Pri takvom procesu javljaju se problemi vezani uz vremensku rezoluciju u kolekciji signala i slučajnu pogrešku mjerenja koja nastaje vizualnom identifikacijom i manuelnim mapiranjem anatomskih lokacija pri digitalizaciji. Kako nedovoljno uzorkovanje (vremenska rezolucija), i pogreška mjerenja imaju drastičan utjecaj na rezultate diferenciranja (derivacije linearnih i kutnih pomaka), potrebno je izvršiti analizu amplitudnog i faznog spektra signala pomoću diskretne Fourierove transformacije (DFT). Rezultati spektralne analize daju podatke o dovoljnom uzorkovanju (teorem uzorkovanja), i graničnoj frekvenciji kinematičkih signala koja služi za odabir značajnih spektralnih komponenata (razdvajanje informacije signala od pogreške mjerenja). Uz poznati dio spektra koji se odnosi na pogreške mjerenja, inverznim Fourierovim transformiranjem (IDFT) vrši se rekonstrukcija kinematičkog signala pri čemu se sumiraju samo frekvencijske komponente koje su niže od granične. To znači da će inverzno transformiranje filtrirati originalni signal s niskim propustom, te da će rekonstruirani signal biti pročišćen od pogrešaka mjerenja. Tek tako pripremljeni signal biti će pogodan za diferenciranje u vremenskoj domeni signala, dakle za računanje zahtjevanih kinematičkih veličina.

**Ključne riječi:** biomehanika, spektralna analiza, kinematičko mjerenje gibanja.

## Abstract

### APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS IN PROCESSING OF KINEMATIC SIGNALS OF MOVEMENT

Kinematic measurement of sport movements is realized by a particular technique that makes it possible to record this movement kinematically (e. g. video, film), and by a digitizer, thus attaining the transition from the continuous amplitude and the continuous time into the discrete form. Different problems appear during such a process. These problems are connected to the time resolution in the collection of signals and to the accidental error in measurement - this error appears because of the visual identification and manual mapping of anatomy locations during digitalization. Because the insufficient sampling (time resolution) and measurement error have drastic influence on the results of differentiation (derivations of linear and angular displacements) it is necessary to analyze the amplitude and phase spectrum of signals by means of the Discrete Fourier Transform (DFT). The results of the spectral analysis provide data about sufficient sampling (sampling theorem) and about the cut-off frequency of kinematic signals, that is used in order to select significant spectral components (separating the information of the signal from the measurement error). Together with the known part of the spectra, that is connected to the measurement errors, the reconstruction of the kinematic signal is being done by means of the Inverse Discrete Fourier Transformation (IDFT), summing up only the frequency components that are lower than the cut-off frequency. This means

## Zusammenfassung

### DIE ANWENDUNG DER SPEKTRALANALYSE IN DER BEARBEITUNG DER KINEMATISCHEN BEWEGUNGSSIGNALE

Die kinematische Messung der Bewegungen im Sport wird durch eine bestimmte Technik realisiert, die die kinematische Aufzeichnung der Bewegung (z.B. auf Film oder Video) ermöglicht, oder die mit Hilfe des Digitalisators durchgeführt wird, womit der Übergang aus der kontinuierlichen Amplitude und der kontinuierlichen Zeit in die diskrete Form erfolgt. Bei einem solchen Prozeß entstehen die Probleme, die sowohl mit der Zeitresolution in einer Gruppe von Signalen verbunden sind, als auch mit dem Meßfehler, der durch die visuelle Identifikation und das manuelle Kartieren von anatomischen Referenzpunkten bei der Digitalisierung entsteht. Da das nicht ausreichende Stichprobenverfahren (die Zeitresolution) und der Meßfehler einen drastischen Einfluß auf die Resultate der Differenzierung haben (die Derivationen von Linear- und Winkeländerungen), ist es notwendig, die Analyse der des Amplituden- und Phasenspektrums der Signale durchzuführen, und zwar mit Hilfe von der diskreten Fourier'schen Transformation (DFT). Die Resultate der Spektralanalyse liefern die Daten über das ausreichende Stichprobenverfahren (das Theorem des Stichprobenverfahrens) und über die Grenzfrequenz der kinematischen Signale, die zur Auswahl von wichtigen Spektralkomponenten (die Absonderung der Signalinformation vom Meßfehler) geeignet ist. Neben dem bekannten Teil der Spektren, der sich auf die Meßfehler bezieht, wird mittels der inversen

that the inverse transformation is going to low-pass filter the original signal, and that the reconstructed signal will be freed from measurement errors. Only the signal that has been prepared in such a way will be suitable for differentiating in the time domain, i.e. for calculating the required kinematic values.

**Key words:** biomechanics, spectral analysis, kinematic measurement of movements

Fourierschen Transformierung (IDFT) die Rekonstruktion des kinematischen Signals durchgeführt, wobei nur diejenigen Frequenzen summiert werden, die niedriger als Grenzfrequenz sind. Das bedeutet, daß die inverse Transformation das originale Signal mit dem niedrigen Durchlaßgrad filtern wird, und daß das rekonstruierte Signal von den Meßfehlern gesäubert wird. Nur das auf diese Weise vorbereitete Signal ist für die Differenzierung in der Zeitdomäne des Signals, d.h. für die Berechnung der verlangten kinematischen Werte adequat.

**Schlüsselwörter:** Biomechanik, Spektralanalyse, kinematische Messung der Bewegung

## 1. Uvod

Mjerenje kinematičkih signala se u biomehanici vrši zbog računanja kinematičkih ili dinamičkih veličina gibanja (inverznim dinamičkim pristupom), kada direktno mjerenje nije moguće (pravila natjecanja, ometanja sportaša, nemogućnosti tehničkog rješenja mjerenja i sl.). Prikupljanje i obradu kinematičkih signala nazivamo procesiranje, koje se sastoji od kolekcije i akvizicije signala, redukcije šuma mjerenja i diferenciranja podataka mjerenja sa svrhom dobivanja kinematičkih veličina. Originalni podaci dobiveni kolekcijom i digitalizacijom signala nisu pogodni za daljnje procesiranje jer pogreške mjerenja (šum), drastično utječu na rezultate diferenciranja (derivacije linearnih i kutnih pomaka). Iz razumljivih razloga, takvi podaci su nepodesni za upotrebu, pa prema tome, i za interpretaciju dobivenih veličina. Stoga je nužno upotrijebiti neku tehniku koja reducira slučajne greške mjerenja (tehnikе "pogađanja" ili filtriranja signala). Kod kinematičkog mjerenja pojavljuje se i jedan drugi problem koji se odnosi na dovoljnu zastupljenost uzimanja uzoraka iz pojave koja se mjeri, tj. da li je kinematički signal gibanja registriran tako, da nismo od njega ništa izgubili, odnosno dali je vremensko uzorkovanje pri kolekciji bilo dovoljno. Budući da je spektralna analiza vrlo efikasno sredstvo za rješavanje ovih problema, opisati ćemo njenu upotrebu u analizi i obradi kinematičkih signala gibanja.

## 2. Obrada signala spektralnom analizom

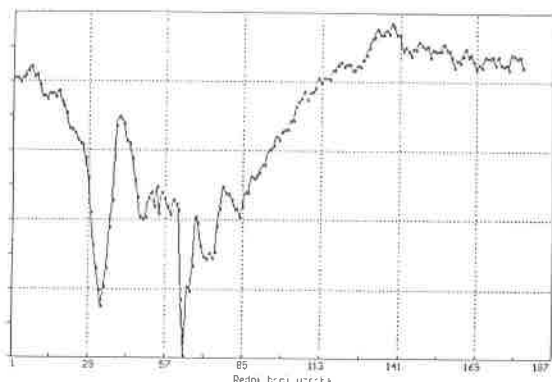
Za kinematičko mjerenje sportskih gibanja najčešće se koristi tehnika brzog filmskog snimanja, kojom se uz pomoć digitalizatora vrši prevodenje analognih signala u digitalni oblik, tj. prelazak iz kontinuiranog vremena u diskretno, i kvantiziranje uzoraka u cilju pretvaranja kontinuiranih amplituda u diskretne. Kako se ta operacija ostvaruje vizualnom identifikacijom i manuelnim lociranjem referentnih točaka na uvećanom filmskom zapisu, neminovno dolazi do unosa slučajnog šuma mjerenja. U svrhu redukcije takvog šuma mogu se koristiti tehnike digitalnog filtriranja ili tehnike "pogađanja" signala (polinom n-tog reda, prirodne splajn funkcije i inverzno diskretno Fourierovo transformiranje (Schwartz i Shaw 1975, Bajić i sur. 1980, Baskakov 1986, Valko i Vajda 1989). Kinematički signali dozvoljavaju opisivanje, procesiranje i manipuliranje metodama, tehnikama i algoritmima spektralne analize, pa ta činjenica sugerira upotrebu te metode kao vrlo pogodnog sredstva za izgladivanje eksperimentalnih podataka (re-

dukcija pogrešaka mjerenja), i dobivanja drugih informacija koje su presudne u analizi karakteristika registriranih signala (Cappozzo i Gazzani 1983; Mejovšek i Pavičić 1988; i dr.).

Za analizu i operiranje nad sekvencom diskretnih kinematičkih podataka koristi se sistem ortogonalnih funkcija, uređenih tako da čine Fourierov red (DFT ili FFT), koji se aproksimira Fourierovim koeficijentima dobivenim po kriteriju sume najmanjih kvadrata odstupanja od originalnih podataka izmjerene signala. Fourierov red je upotrebljiv i za neperiodične, po vremenu ograničene signale, a takvi su gotovo svi kinematički signali kod acikličkih kinezioloških gibanja, pa čak i kod onih cikličkih gibanja, kojima samo repetitivni karakter skriva njihovu pseudoperiodičku funkciju. Obzirom na to, kinematički signal podvrgnut analizi, zadan u nekom vremenskom intervalu, zamijeni se periodičnim, koji se sa stvarnim podudara unutar zadanog intervala, a van njega se nastavlja periodično. Ovakav signal razvijen u Fourierov red ispravno opisuje nadomjesni periodični signal bilo kojeg vremenskog intervala, pa dakle i stvarni kinematički signal u zadanom intervalu.

Vrlo efikasan postupak redukcije slučajnog šuma je omogućen rekonstrukcijom dekomponiranog signala, i to tako, da se izvrši odbacivanje viših spektralnih komponenata Fourierovog reda. Naime, u nekoj sekvenci kinematičkih podataka koja opisuju ovisnost dviju veličina, jedna je nezavisna varijabla (vrijeme), a o njoj izmjerena ovisnost predstavlja vremensku seriju (koordinata). Kada izračunamo Fourierov red (ili transformat) te serije, u niskofrekventnom dijelu red će sadržavati komponente određene vezom među podacima (koja je dana prirodom procesa što se mjeri), a u visokofrekventnom, uglavnom samo komponente određene slučajnom pogreškom mjerenja. Odbacivanjem visokofrekventnih doprinosa i inverznim Fourierovim transformiranjem (IDFT), dobivaju se izgladeni podaci kojima su uklonjene slučajne pogreške mjerenja. Ovakav postupak imati će karakteristike filtriranja originalnih podataka s niskim propustom. Dakle, inverznim diskretnim Fourierovim transformiranjem sumira se konačan broj članova reda koji korespondiraju sadržaju spektra originalnog valnog oblika. Naime, jednom kada su nam poznati diskretni Fourierovi koeficijenti neke kolekcije uzoraka realnog kinematičkog signala, možemo uvijek rekonstruirati originalni valni oblik, pod pretpostavkom da nismo učinili grešku nedovoljnim uzorkovanjem.

Diferenciranje (derivacije linearnih i kutnih pomaka), dobiva se jednostavnim multipliciranjem spektralnog sadržaja. Međutim, treba biti vrlo oprezan u odabiru



Slika 1. Originalni digitalni signal

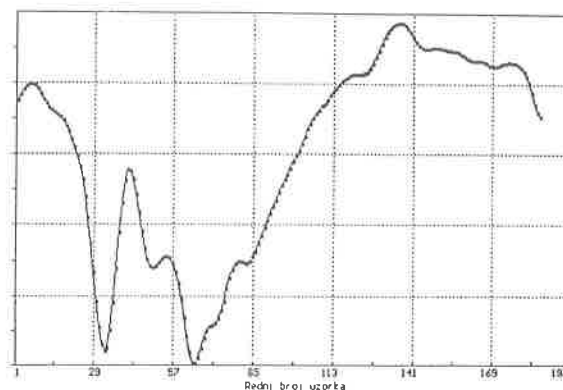
Figure 1. Original digital signal

granične frekvencije. Razlog je u tome što amplituda svake spektralne komponente kod diferenciranja raste s njenim harmonijskim brojem. Tako je kod prve derivacije (brzina), porast linearan, a kod druge (ubrzanje), proporcionalan kvadratu harmonijskog broja. To znači da će kod druge derivacije harmonijske komponente viših frekvencija (koje sadrže šum), usprkos malim amplitudama vršiti vrlo velike distorzije druge derivacije.

Postupak uzimanja uzoraka iz kontinuiranog signala (stvarno gibanje referentnih točaka sportaša), određen je fizičkim mogućnostima kolekcije signala i teoremom uzorkovanja. Dakle vremenske udaljenosti između pojedinih uzoraka definirane su tzv. Nyquistovim odnosom (teorem uzorkovanja), što znači da kod pojasno ograničenog signala, najviša frekvencijska komponenta određuje i najmanju frekvenciju uzorkovanja. Samo u tom slučaju za dati period uzorkovanja možemo originalni signal kompletno rekonstruirati s datom verzijom uzorkovanja pomoću niskopropusnog filtriranja. Odabiremo li interval koji ne zadovoljava uvjet teorema tj. kada je frekvencija uzorkovanja manja od Nyquistovog odnosa, prouzročiti ćemo pogrešku poznatu pod nazivom "aliasing", kojom se više spektralne komponente preslikavaju u niže. Nasuprot, ako upotrijebimo dvostruku frekvenciju uzorkovanja (ili višu) od najviše frekvencijske komponente, signal ćemo u potpunosti moći rekonstruirati. Dakle, maksimalna frekvencija uzorkovanja kinematičkog signala (npr. broj kvadrata/s), ograničava za polovinu svoje vrijednosti maksimalnu frekvenciju zastupljenu u spektru analiziranog signala. Praktično to znači da nakon provedene analize, kada

#### 4. Literatura

1. Bajić, B., I. Jovanović i A. Džubur (1980): *Spektralna i korelacijska analiza: Koncepti, metode, primjene, škola mjerenja automatike i kibernetike*, JUREMA, Zagreb.
2. Baskakov, S.I. (1986): *Signals and Circuits*, Moskva: Mir Publishers.
3. Cappozzo, A. i F. Gazzani (1983): Comparative evaluation of techniques for the harmonics analysis of human motion data. *Journal of Biomechanics* 16:767-776.
4. Mejovšek, M. i L. Pavičić (1988): Neke mogućnosti otklanjanja šumova iz podataka gibanja u sportskoj biomehanici, *Kineziologija*, 20, (1):35-46.
5. Schwartz, M., i L. Shaw (1975): *Signal processing*, New York: McGraw-Hill.
6. Valko, P. i S. Vajda (1989): *Advanced scientific computing in BASIC with applications in chemistry, biology and pharmacology, Data handling in science and technology, vol. 4*, Amsterdam: Elsevier.



Slika 2. Izgladeni signal sa slike 1.

Figure 2. Smoothed signal from the figure 1.

odredimo graničnu frekvenciju, vremenska kolekcija mora biti sprovedena barem dvostruko višom frekvencijom.

Odmah je uočljivo da vrlo značajnu ulogu ima odabir granične frekvencije. Nažalost ne postoji egzaktan kriterij za njeno određivanje. Kako u pojasu viših frekvencija ne postoji jasno razgraničenje između šuma i dijela signala koji nosi informaciju (prepravljaju se), odabire se kompromisno rješenje izbora granične frekvencije. Naime, ako odaberemo nižu propusnost, zacijelo ćemo izbaci šum, ali i dio informacije signala. U suprotnom slučaju, uz više spektralne komponente koje još posjeduju informaciju propustit ćemo i izvjesnu količinu slučajnog šuma mjerenja. Konačan odabir granične frekvencije vrši se pregledom amplitudnog i faznog spektra signala i analizom doprinosa opisivanja originalnog signala.

### 3. Zaključak

Opisan je pojednostavljeni postupak upotrebe spektralne analize u obradi kinematičkih, ali i drugih biomehaničkih signala. Kao što je opisano, dekompozicija signala u spektralne komponente (amplituda, faza i frekvencija), i njegova analiza može poslužiti za više namjena kao što su: određivanje granične frekvencije, rekonstrukcija signala u svrhu njegovog izgladivanja (redukcija pogreške mjerenja), optimalno uzorkovanje signala i deriviranje podataka gibanja. Rezultati spektralne analize, također, mogu poslužiti i za druge namjene, od kojih je možda najznačajnija odabir koeficijentata niskopropusnog rekurzivnog digitalnog filtera, u Butterworthovoj realizaciji.