Helbig, Marko; Witte, Herbert; Schack, Bärbel:

Zeitvariante Kreuzbispektralanalyse in der Biosignalanalyse

Zuerst erschienen in:	Biomedizinische Technik = Biomedical Engineering. - Berlin [u.a.] : de Gruyter. - 48 (2003), S1, S. 184-185. Jahrestagung der Deutschen, der Österreichischen und der Schweizerischen Gesellschaften für Biomedizinische Technik ; (Salzburg) : 2003.09.25-27
Erstveröffentlichung:	2003
Datum Digitalisierung:	2009-10-23
ISSN (online):	1862-278X
ISSN(print)	0013-5585
DOI:	10.1515/bmte.2003.48.s1.184
[*Zuletzt gesehen:*	2019-12-12]

ZEITVARIANTE KREUZBISPEKTRALANALYSE IN DER BIOSIGNALANALYSE

M. Helbig[1], H. Witte[2], B. Schack[2]

[1] Institut für Biomedizinische Technik und Informatik, TU Ilmenau, Deutschland
[2] Institut für Medizinische Statistik, Informatik und Dokumentation, FSU Jena, Deutschland
E-Mail: Marko.Helbig@tu-ilmenau.de

SUMMARY: An appropriate investigation of quadratic phase couplings (QPC) in non-stationary signals requires time-variant methods of bispectral analysis. The approach of time-variant bispectral analysis based on the adaptively recursively estimated 3rd-order cumulants is generalised as 3rd-order cross-cumulant estimation for time-variant cross-bispectral analysis. The aim of this study is the investigation of its functionality and its dynamical and statistical properties in comparison with the known properties of the (auto-)bispectral and bicoherence analysis.

EINLEITUNG

Mit Hilfe der Bispektralanalyse ist es möglich, quadratische Phasenkopplungen zwischen Frequenzkomponenten zu analysieren. Die auf ein festes Zeitintervall bezogene Bispektralanalyse setzt Signalanforderungen (vor allem Stationarität) voraus, denen reale Biosignale zumeist nicht genügen. In diesem Sinne sind für das Bispektrum besonders transient auftretende quadratische Phasenkopplungen bedeutsam. Daraus folgt, dass zur Analyse dieser sich zeitlich ändernden Phänomene auch eine zeitvariante Bispektralanalyse mit einer ausreichend hohen Auflösung im Spektralbereich erforderlich ist. Aus diesem Grunde wurde eine Methode der dynamischen Auto-Bispektralanalyse auf der Basis einer adaptiven rekursiven Schätzung der Kumulanten III. Ordnung entwickelt und in [1] vorgestellt.

In dieser Arbeit wird diese Methodik zur zeitvarianten Kreuz-Bispektralanalyse und ihrer normierten Form, der Kreuz-Bikohärenzanalyse erweitert und verallgemeinert. Ziel ist es, die Funktionsfähigkeit dieser erweiterten Methode zu testen und Erfahrungen zu sammeln, um sie in einer anschließenden Studie sicher anwenden zu können.

METHODEN

Es seien $X=\{x^{(i)}(k)\}_{k=0,1,2,\dots}$, $Y=\{y^{(i)}(k)\}_{k=0,1,2,\dots}$ und $Z=\{z^{(i)}(k)\}_{k=0,1,2,\dots}$ Zeitreihen dreier Signale. Der in [1] vorgestellte Algorithmus der adaptiven rekursiven Kumulantenschätzung III. Ordnung beinhaltet die adaptive rekursive Mittelwertschätzung einer momentanen Kumulantenfunktion. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit zur adaptiven rekursiven Mittelung einer momentanen Kreuz-Kumulantenfunktion ICCF (instantaneous cross-cumulant function) verallgemeinert (1,2). Die anschließende 2-dimensionale Fourier-transformation ergibt eine Sequenz zeitvarianter Bispektren (3). Im Falle getriggerter Datensätze können die zeitgleichen dynamischen Bispektren noch über alle Realisierungen gemittelt werden (4).

Um numerische Effekte bei der zeitvarianten Kreuz-Bikohärenzschätzung zu vermeiden und einen numerisch stabilen Wertebereich zwischen 0 und 1 zu garantieren, wird analog zur Auto-Bikohärenzanalyse der in [2] vorgestellte Normierungsalgorithmus verwendet.

$$\hat{b}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)=\frac{\left|\left\langle B^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)\right\rangle\right|}{\sqrt{\left\langle\left|B^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)\right|^2\right\rangle}} \tag{5}$$

Wird nur die reine Phasenbeziehung (Biphase) betrachtet, so resultiert die Kreuz-Phasenbikohärenz:

$$\hat{\Gamma}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)=\left|\left\langle\exp\left(j\varphi^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)\right)\right\rangle\right|$$

$$\text{mit: } \varphi^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)=\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}\left[B^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)\right]}{\mathrm{Re}\left[B^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)\right]}\right) \tag{6}$$

$$ICCF^{(i)}_{xyz}(\tau_1,\tau_2,k)=x^{(i)}(s)\cdot y^{(i)}(s+\tau_1)\cdot z^{(i)}(s+\tau_2) \tag{1}$$

$$CC^{(i)}_{xyz}(\tau_1,\tau_2,k)=CC^{(i)}_{xyz}(\tau_1,\tau_2,k-1)+c(k)\cdot\left[ICCF^{(i)}_{xyz}(\tau_1,\tau_2,k)-CC^{(i)}_{xyz}(\tau_1,\tau_2,k-1)\right] \tag{2}$$

$$B^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)=\sum_{\tau_1=-L}^{L}\sum_{\tau_2=-L}^{L}CC^{(i)}_{xyz}(\tau_1,\tau_2,k)\cdot\exp\{-j\cdot(\omega_1\tau_1+\omega_2\tau_2)\} \tag{3}$$

$$\hat{B}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k)=\frac{1}{N}\cdot\sum_{i=1}^{N}B^{(i)}_{xyz}(\omega_1,\omega_2,k) \tag{4}$$

mit $i=1,2,\dots,N$, $k=0,1,2,\dots,M-1$ und $s=\min\{k,k+\tau_1,k-\tau_2\}$

ERGEBNISSE

Die Untersuchungen zur Funktionalität der vorgestellten Methode zeigen identische dynamische und statistische Eigenschaften wie die der Auto-Bispektralanalyse.
Unterschiede bestehen lediglich im notwendigen Berechnungsaufwand und dem Interpretationsgehalt der resultierenden Matrizen. Bei der Kreuzbispektralanalyse kann nicht davon ausgegangen werden, dass die gekoppelten Frequenzkomponenten in allen drei Signalen gleichermaßen enthalten sind. Die bekannten Symmetrieeigenschaften des Auto-Bispektrums gelten deshalb beim Kreuz-Bispektrum nicht. Aus diesem Grunde müssen im Falle zweier Eingangssignale x, y mindestens drei der sechs in Abb. 1 gekennzeichneten Bereiche berechnet werden. Im Falle dreier Eingangssignale x, y, z müssen alle sechs Symmetriefelder berechnet werden, um über $B_{xyz}^{(i)}(\omega_1,\omega_2,k)=B_{xyz}^{*(i)}(-\omega_1,-\omega_2,k)$ auf die gesamte Bispektrum-Matrix schließen zu können.
Je nach dem, welche der quadratisch phasengekoppelten Frequenzen in x und / oder y und / oder z enthalten sind, wird die Kopplung als Peak in einem oder mehreren bestimmten Symmetriefeldern widergespiegelt. Somit kann auch umgekehrt aus der Position des/der Peaks im Kreuz-Bispektrum auf das die entsprechende(n) Frequenz(en) enthaltende Signal geschlossen werden: $\boxed{1}$, $\boxed{2}$: $f_x=f_1$, $f_y=f_2$, $f_z=f_1+f_2$; $\boxed{3}$, $\boxed{4}$: $f_x=f_1$, $f_y=-f_2$, $f_z=f_1+f_2$ und $\boxed{5}$, $\boxed{6}$: $f_x=f_1$, $f_y=-f_2$, $f_z=-f_1-f_2$. Für die Bikohärenz- und Phasenbikohärenzmatrizen gelten diese Symmetrien in analoger Weise. Somit ist wesentlich, in welcher Reihenfolge die Eingangssignale in den Berechnungsalgorithmus eingehen. Das folgende Simulationssignal verdeutlicht dies.

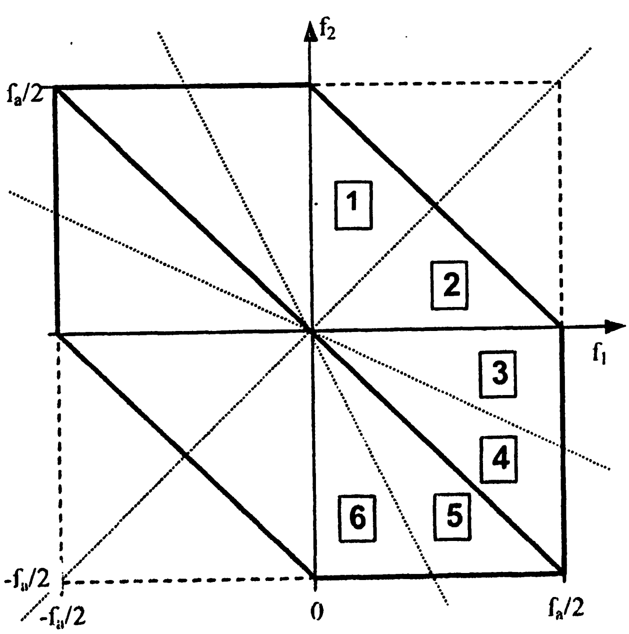

Abbildung 1: Symmetriebereiche des Kreuz-Bispektrums

Jedes der Signale x(k), y(k) und z(k) beinhalte u. a. die Frequenzkomponenten f_1=3Hz, f_2=7Hz und $f_3=f_1+f_2$=10Hz. Während alle drei Auto-Bikohärenzen keine signifikanten Werte liefern, zeigt die Kreuz-Bikohärenz $\hat{b}_{xyz}$ einen signifikanten Peak im Symmetriefeld $\boxed{3}$. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine quadratische Phasenkopplung zwischen f_1 von y(t), f_2 von z(k) und f_3 von x(k) besteht. Alle anderen Varianten möglicher quadratischer Phasenkopplungen zwischen x, y und z erweisen sich als nicht existent.

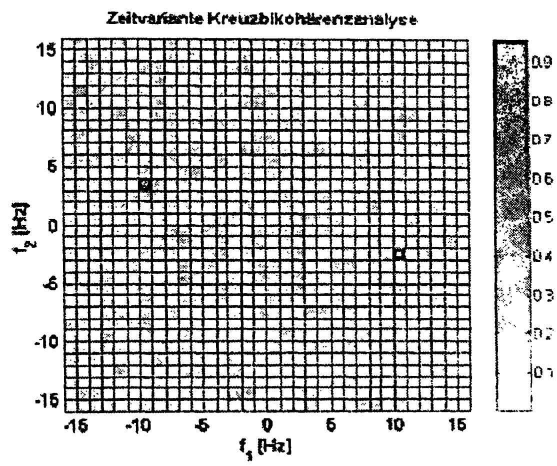

Abbildung 2: Kreuzbikohärenz des Simulationssignals

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die bewährte Methode der zeitvarianten Bispektralanalyse auf der Basis der adaptiven rekursiven Kumulantenschätzung konnte erfolgreich und ohne Einschränkungen auf die Kreuz-Bispektralanalyse ausgebaut werden. Die Effizienz des Einsatzes adaptiver rekursiver Schätzungen, insbesondere als Basisalgorithmus zur Analyse fortlaufender Signale, konnte auch anhand dieser komplexen Kenngrößen bestätigt werden.
Die hier vorgestellte und getestete Methode zur zeitvarianten Kreuz-Bispektral- und Bikohärenzanalyse wird in einer folgenden Studie angewendet, um Phasenkopplungsphänomene zwischen Frequenzkomponenten im EMG und MEG von Parkinson-Patienten mit Ruhe-Tremor hoch aufgelöst zu analysieren.

LITERATURHINWEISE

[1] Helbig, M., Grießbach, G., Schack, B., Witte, H. „Application of time-variant bispectrum in biosignal analysis", Med. & Biol. Eng. & Comput., 37, Supplement 2, 392-393, 1999

[2] Helbig, M., Grießbach, G., Witte, H., Schack, B. „Numerisch stabile Normierung des indirekt geschätzten Bispektrums", Biomedizinische Technik, 46 (Ergänzungsband 1), 318-319, 2001

Diese Arbeit wurde gefördert durch die DFG Projekte GR 1555/2-3 und WI 1166/2-3.