Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Dipl. Wirtsch.-Ing. Andreea Violeta Röthig,
Frankfurt am Main

Nr. 1252

Nicht-konservative weiche strukturvariable Regelungen und Methoden zur Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen

Berichte aus dem

Institut für
Automatisierungstechnik
und Mechatronik
der TU Darmstadt

Nicht-konservative weiche strukturvariable Regelungen und Methoden zur Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen

Dem Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades
einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

von

Dipl. Wirtsch.-Ing. Andreea Violeta Röthig

geboren am 21. Dezember 1980 in Bukarest, Rumänien

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Tag der Einreichung:	9. März 2016
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Juli 2016

D17

Darmstadt 2016

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Dipl. Wirtsch.-Ing.
Andreea Violeta Röthig,
Frankfurt am Main

Nr. 1252

Nicht-konservative weiche strukturvariable Regelungen und Methoden zur Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen

Berichte aus dem

Institut für
Automatisierungstechnik
und Mechatronik
der TU Darmstadt

Röthig, Andreea Violeta
Nicht-konservative weiche strukturvariable Regelungen und Methoden zur Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 1252. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.
220 Seiten, 21 Bilder, 10 Tabellen.
ISBN 978-3-18-525208-2, ISSN 0178-9546,
€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

Für die Dokumentation: Reglerentwurf – Stellgrößenbeschränkungen – Nichtlineare Systeme – Lineare Matrixungleichung – Konvexe Optimierung – Ljapunov – Polynomiale Implizite Regelung – Computerexperimente

Die vorliegende Dissertation wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Regelungstechnik. Sie befasst sich mit der Synthese nichtlinearer Regelungen für lineare Systeme mit Stellgrößenbeschränkungen. Im ersten Teil der Arbeit wird die Regelung solcher Systeme durch nicht-konservative weiche strukturvariable Regelungen vorgestellt. Die Nichtkonservativität bezieht sich auf die Eigenschaft der Stabilitätsbedingungen, sowohl notwendig als auch hinreichend zu sein. Im zweiten Teil der Arbeit wird die Performance-Analyse solcher Regelkreise mithilfe des Konzepts der Computerexperimente durchgeführt. Mittels Bayes'scher Interpolationsmethoden wird die Performance-Prädiktion eines Regelstreckenensembles ermöglicht. Damit ist es möglich, die erwartete Performance einer Regelmethode für eine bestimmte Strecke anzugeben. In diesem Zusammenhang wird auch eine Sensitivitätsanalyse vorgestellt, die Aussagen darüber zulässt, welchen Einfluss einzelne Streckenparameter auf die Performance einer Regelmethode erwartungsgemäß haben.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter http://dnb.ddb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek
(German National Library)
The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at http://dnb.ddb.de.

D 17

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-525208-2

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik des Instituts für Automatisierungstechnik und Mechatronik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Adamy für seine Motivation, Betreuung und stets positive Einstellung bezüglich aller meiner wissenschaftlichen Bemühungen.

Die vorangegangenen Dissertationen meiner Kollegen Dr.-Ing. Boris Fischer (geb. Jasniewicz), Dr.-Ing. Hendrik Lens und Dr.-Ing. Dilyana Domont-Yankulova haben mir durch deren klare Struktur einen sehr guten Einstieg in das Thema ermöglicht. Zudem möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Dieter Lens, Kalina Olhofer-Karova, Dr.-Ing. Thomas Gußner, Dr.-Ing. Andreas Ortseifen, Dr.-Ing. Klaus Kefferpütz, Dr.-Ing. Arne Wahrburg, Dr.-Ing. Stefan Gering, Kerstin Groß, Dr.-Ing. Dilyana Domont-Yankulova, Dr.-Ing. Volker Willert, Saman Khodaverdian, Tatiana Tatarenko und Dimitri Chayka für viele spannende Diskussionen sehr bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen, vor allem bei Andrea Schnall, Benjamin Reichhard, Martin Buczko, Nicolai Schweizer, Ivan Popov, Moritz Schneider, Florian Damerow, Diego Madeira, Dr.-Ing. Matthias Schreier, Birgit Heid, Susanne Muntermann und Sylvia Gelman, für die angenehme und freundschaftliche Atmosphäre am Fachgebiet bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Konigorski für die Übernahme des Korreferats und an Herrn Professor Dr. Carl Chiarella für seine freundschaftliche und sehr lehrreiche Betreuung während meines Forschungsaufenthaltes an der Technischen Universität Sydney.

Ferner möchte ich mich bei meinem Ehemann Andreas für seine unermüdliche Unterstützung und Motivation sowie für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Frankfurt am Main, September 2016 — Andreea Röthig

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Funktionen

Symbole	
$\exists$	es existiert
$\exists!$	es existiert und ist eindeutig
$\forall$	für alle
$:=$	definiert als
$\overline{1,n}$	$1,\ldots,n$
$\lceil m \rceil$	die kleinste ganze Zahl, die größer oder gleich $m \in \mathbb{R}$ ist
$\partial_t g(\mathbf{x}(t),v)$	$\Leftrightarrow \dfrac{\partial g(\mathbf{x},v)}{\partial \mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}}$
$\partial_v g(\mathbf{x},v)$	$\Leftrightarrow \dfrac{\partial g(\mathbf{x},v)}{\partial v}$
Mengen	
$\mathcal{B}_\epsilon(\mathbf{x})$	offene Kugel um $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ mit Radius ϵ, vgl. Def. 5 (Anhang)
$\mathbb{R}^n$	$n \times 1$ Spaltenvektoren
$\mathbb{R}^n_*$	von null verschiedene Spaltenvektoren, d.h. $\mathbb{R}^n \backslash \{\mathbf{0}\}$
$\mathbb{R}^{n\times m}$	$n \times m$ reelle Matrizen
$\mathbb{F}^{n\times m}$	$n \times m$ reelle oder komplexe Matrizen
$\mathbb{H}^n$	$n \times n$ hermitesche Matrizen
Sym^n , Skew^n	$n \times n$ reelle symmetrische, schiefsymmetrische Matrizen
$\mathbb{P}^n(\mathbb{N}^n)$	$n \times n$ symmetrische und positiv definite (semidefinite) Matrizen
$\varnothing$	die leere Menge
$\mathcal{N}(\mathbf{A})$	Kern (Nullraum) einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $\mathcal{N}(\mathbf{A}) := \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \vert \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{0}\}$
$\mathcal{G}_\star(v)$	Gebiet $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \vert g_\star(\mathbf{x},v) < 0\}$
$\mathcal{E}_\star(v)$	Ellipsoid $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \vert \mathbf{x}^\top \mathbf{P}(v)\mathbf{x} < 0\}$
$\partial\mathcal{G}$	Rand einer Menge $\mathcal{G}$, vgl. Def. 8 (Anhang)

$\operatorname{co}\mathcal{M}$	bezeichnet die konvexe Hülle einer Menge $\mathcal{M}$, vgl. Def. 12 (Anhang)
$\dim\mathcal{M}$	Dimension einer Menge
$\mathcal{L}(u,\beta)$	das Gebiet $\mathcal{L}(u,\beta) := \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \,\|\, \|u(\mathbf{x})\| \leq \beta\}$ wo die Stellgrößenbegrenzung β eingehalten wird

<u>Spezielle Matrizen</u>

$\mathbf{0}_{m,n}$	$m \times n$ Nullmatrix
$\mathbf{I}_n$	$n \times n$ Einheitsmatrix
$\mathbf{E}_n$	$n \times n$ Elementarmatrix
$\mathbf{A}^+$	Pseudoinverse einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m\times n}$, auch Moore-Penrose-Inverse genannt, vgl. [8, S. 397]
$\tilde{\mathbf{A}}_{(i,j)}$	der Kofaktor zum Element $a_{(i,j)}$ der Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, d.h. die Matrix, die entsteht, wenn bei der Matrix $\mathbf{A}$ die i-te Zeile und j-te Spalte gestrichen werden
$\operatorname{adj}(\mathbf{A}), \mathbf{A}^A$	die adjungierte Matrix zu $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, d.h. $\mathbf{A}^A = \mathbf{C}^\top$, mit $c_{(i,j)} = (-1)^{i+j}\det(\tilde{\mathbf{A}}_{(i,j)})$
$x_{(i)}$	Element (i) eines Vektors $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$
$a_{(i,j)}$	Element (i,j) einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$
$\mathbf{x}_\lambda \in \mathbb{R}^n$	zum Eigenwert λ gehörender Rechtseigenvektor $\mathbf{x}_\lambda$
$\mathbf{z}^{[k]} \in \mathbb{R}^k$	$\begin{bmatrix} 1 & z & z^2 & \cdots & z^{k-1} \end{bmatrix}^\top$
$\mathbf{A}\|\mathcal{A}$	Schur-Komplement der Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$ bzgl. der Blockmatrix $\mathcal{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}$, definiert als $\mathbf{A}\|\mathcal{A} = \mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$, $\mathbf{A}$ nichtsingulär

<u>Matrixfunktionen</u>

$\operatorname{Rang}(\mathbf{A})$	Rang einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$
$\operatorname{sr}(\mathbf{A})$	Spaltenrang einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$
$\operatorname{zr}(\mathbf{A})$	Zeilenrang einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$
$\operatorname{Spec}(\mathbf{A})$	Spektrum einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, d.h. die Menge aller Eigenwerte bei Nichtbeachtung der Vielfachheit
$\lambda(\mathbf{A}) \in \mathbb{C}$	Eigenwert einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$

$\kappa(\mathbf{A})$	Konditionszahl einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, definiert als $\kappa(\mathbf{A}) := \lambda_{\max}(\mathbf{A})/\lambda_{\min}(\mathbf{A})$
$\operatorname{Re} \lambda(\mathbf{A})$	Realteil des Eigenwertes $\lambda \in \operatorname{Spec}(\mathbf{A})$
$\operatorname{Im} \lambda(\mathbf{A})$	Imaginärteil des Eigenwertes $\lambda \in \operatorname{Spec}(\mathbf{A})$
$\lambda_i(\mathbf{A}) \in \operatorname{Spec}(\mathbf{A}) \subset \mathbb{R}$	i.-größter Eigenwert einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ mit reellen Eigenwerten
$\lambda_{\max}(\mathbf{A}) \in \operatorname{Spec}(\mathbf{A}) \subset \mathbb{R}$	größter Eigenwert einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ mit reellen Eigenwerten
$\lambda_{\min}(\mathbf{A}) \in \operatorname{Spec}(\mathbf{A}) \subset \mathbb{R}$	kleinster Eigenwert einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ mit reellen Eigenwerten
$\operatorname{vec}(\mathbf{A})$	Spalten-Vektorisierung einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$, vgl. Def. 22 (Anhang)
$\lVert\mathbf{x}\rVert = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{(i)}^2}$	Euklidische Norm eines Vektors $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, vgl. Def. 23 (Anhang)
$\lVert\mathbf{A}\rVert_\infty := \max_{\substack{i\in\{1,\dots,n\}\\ j\in\{1,\dots,m\}}} \lvert\mathbf{A}_{(i,j)}\rvert$	Maximum Norm einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times m}$, vgl. Def. 24 (Anhang)
$\lVert\mathbf{A}\rVert_{\sigma\infty} := \sigma_{\max}(\mathbf{A})$	Spektralnorm einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times m}$, vgl. Def. 24 (Anhang)
$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$	Kronecker Produkt, d.h. Multiplikation jedes Elements der Matrix $\mathbf{A}$ mit der Matrix $\mathbf{B}$, vgl. [74] für verschiedene Eigenschaften
$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}$	Kronecker Summe, vgl. Def. 21 (Anhang)
$\mathbf{A}^\top$	Transponierte einer Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$
$\mathbf{C}^H$	konjugiert komplexe und transponierte Matrix $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{m\times n}$
$\mathbf{X}_v$	von $v \in \mathbb{R}$ abhängige Matrix $\mathbf{X}(v) \in \mathbb{R}^{m\times n}$

<u>Matrixrelationen</u>

$\mathbf{A} \succ \mathbf{B}\,(\mathbf{A} \succeq \mathbf{B})$	$\mathbf{A} - \mathbf{B} \in \mathbb{P}^n$ ($\mathbf{A} - \mathbf{B} \in \mathbb{N}^n$)
$\mathbf{A} \sim \mathbf{B}$	die Matrizen $\mathbf{A}$ und $\mathbf{B}$ sind *ähnlich*, vgl. Def. 18 (Anhang)

<u>Stochastik</u>

$\mathcal{H}(\,\cdot\,)$, $\mathcal{Z}(\,\cdot\,)$	skalare Zufallsfelder
$h(\,\cdot\,)$, $z(\,\cdot\,)$	Realisierungen (Pfade) der skalaren Zufallsfelder $\mathcal{H}(\,\cdot\,)$ bzw. $\mathcal{Z}(\,\cdot\,)$
$\boldsymbol{\mathcal{C}}(\,\cdot\,)$	mehrdimensionales Zufallsfeld

$\mathbf{c}(\cdot)$	Realisierung (Pfad) eines mehrdimensionalen Zufallsfeldes $\boldsymbol{\mathcal{C}}(\cdot)$
H, $\mathbf{H}$	Zufallsvariable, Zufallsvektor
η, $\boldsymbol{\eta}$	Realisierung einer Zufallsvariable bzw. eines Zufallsvektors
$[\cdot]$	Wahrscheinlichkeitsverteilung (kurz: Verteilung), die durch ihre Wahrscheinlichkeitsdichte (oder kurz Dichte) gegeben ist
$[X]\cdot[Y]$	Multiplikation von zwei Dichten, d.h. $f_X(x)\cdot f_Y(y)$
$\propto$	proportionale Verteilungen
$\mathcal{D}_{\boldsymbol{\zeta}_x}$	Definitionsbereich der Variable $\boldsymbol{\zeta}_x$
$\mathcal{N}_m(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})$	m-dimensionale multivariate Normalverteilung mit Erwartungswertvektor $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^m$ und positiv-definiter Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma} \in \mathrm{Sym}^m$, vgl. Abschnitt B.1 (Anhang)
χ_n^2	eindimensionale Chi-Quadrat Verteilung mit n Freiheitsgraden, vgl. Abschnitt B.2 (Anhang)
χ_n^{-2}	eindimensionale Inverse-Chi-Quadrat Verteilung mit n Freiheitsgraden, vgl. Abschnitt B.2 (Anhang)
$\mathcal{T}_1(\nu,\mu,\sigma^2)$	eindimensionale nicht-zentrale t-Verteilung mit ν Freiheitsgraden, Nichtzentralitätsparameter μ und Skalierungsparameter σ^2, vgl. Abschnitt B.3 (Anhang)

Abkürzungen

o.B.d.A.	ohne Beschränkung der Allgemeinheit
WSVR	weiche strukturvariable Regelung
iLF	implizite Ljapunov-Funktion
PPDQ Funktion	polynomiell parameterabhängige quadratische Funktion
LTI System	lineares zeitinvariantes System
LHS	*Latin-Hypercube-Sampling*
ERMSPE	***E**mpirical **R**oot **M**ean **S**quared **P**rediction **E**rror*
AC	***A**chieved **C**overage*

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Synthese weicher strukturvariabler Regelungen (WSVR) zur Stabilisierung linearer zeitinvarianten Systemen (LTI-Systeme) mit Stellgrößenbeschränkung und einer neuen Methode zur Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen. Im Rahmen der Regelsynthese werden zum ersten Mal notwendige und hinreichende Stabilisierbarkeitsbedingungen solcher Strecken durch WSVRs mittels impliziter Ljapunov-Funktionen (iLF) vorgestellt. Die erzielte Regelung ist also nicht-konservativ. Aus der Notwendigkeit der Bedingungen folgt, dass im Fall deren Nichterfüllung überhaupt kein Regler aus der untersuchten Klasse existiert. Die Notwendigkeit stellt eine wesentliche Erweiterung gegenüber bereits existierenden Stabilitätsbedingungen dar. Eine zweite Erweiterung der WSVR auf solche Regelungen mittels *invers-polynomialer* Selektionsstrategien wird ebenfalls vorgestellt. Darüber hinaus werden die nicht-konservativen Regler bezüglich der Konvergenzrate optimiert. Es wird gezeigt, dass der konvergenzoptimale Regler ein Zweipunktregler mit einer parameterabhängigen Umschaltstrategie ist, der ein sehr schnelles Ausregelverhalten aufweist. Die Formulierung der Bedingungen mittels äquivalenter linearer Matrixungleichungen (LMIs) wird ebenfalls vorgestellt. Dies erlaubt einen numerisch effizienten Entwurf der Regler für Strecken beliebiger Ordnung. Die Reglersynthese endet mit den Stabilisierbarkeitsbedingungen solcher Regler für Regelstreckenensembles, die durch parametrische LTI-Systeme beschrieben sind.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen. Während für lineare Regelkreise exakte (auch frequenzbasierte) Methoden zur Performance-Analyse existieren, bezieht sich die kleine Menge an Analysemethoden für nichtlineare Regelkreise meistens auf experimentelle Aussagen über das dynamische Verhalten eines einzelnen Regelkreises. In dieser Arbeit wird zum ersten Mal das in der Praxis weitverbreitete Konzept der *Computerexperimente* auf die Performance-Analyse in nichtlinearen Regelkreisen angewandt. Mittels Bayes'scher Interpolationsmethoden wird die Performance-Prädiktion eines gesamten Streckenensembles ermöglicht. Sehr wichtig sind dabei die angegebenen Konfidenzintervalle der Prädiktion. Damit ist es möglich, die erwartete Performance einer Regelmethode für eine bestimmte Strecke anzugeben, ohne dabei einen Regler entwerfen zu müssen. In diesem Zusammenhang wird auch eine Sensitivitätsanalyse vorgestellt, die Aussagen darüber zuläßt, welchen Einfluß einzelne Streckenparameter auf die Performance einer Regelmethode erwartungsgemäß haben. Die Arbeit endet mit einem empirischen Vergleich verschiedener Prädiktoren anhand mehrerer Streckenensembles. Es wird gezeigt, dass die Prädiktionsgenauigkeit abhängig von der Wahl der prädiktiven *A-posteriori*-Verteilung, von der Wahl der Korrelationsfunktion zwischen verschiedenen Strecken, sowie von der Wahl der empirischen Schätzmethode für die Parameter der Korrelationsfunktion ist.

Abstract

The thesis deals with the non-conservative synthesis of soft variable structure controls (SVSC) for stabilizing linear time invariant systems (LTI-systems) with input saturation, and with a new method for the performance analysis in nonlinear control systems. The non-conservative control synthesis yields some necessary and sufficient stability conditions for these plants, employing implicit Lyapunov-functions (iLF). From the necessity of the conditions follows that if they are not fulfilled, then there exists no control from this class which stabilizes the given plant. This is an essential benefit of the proposed controls relative to the already existing SVSC employing iLFs. Furthermore, an extension of the SVSC to ones that employ inverse-polynomial selection strategies is presented. In addition, both (non-conservative) controls are being optimized relative to the convergence rate. The maximal convergence control is a bang-bang type control with a parameter-dependent switching scheme, that achieves very short settling times. The formulation of the stability conditions in form of equivalent linear matrix inequalities (LMI) is also a benefit of the proposed control methods. This allows for an efficient numerical control design for plants of any given order. The control synthesis part of the thesis ends with the (non-conservative) design of SVSC for a plant ensemble, that is described by a parameter dependent LTI-System.

The second part of the thesis deals with the performance analysis in nonlinear control systems. While for linear systems there exists a large number of exact (also frequency-based) methods for the performance-analysis, the number of methods for the performance analysis of nonlinear systems is very small, and deals mainly with the analysis of a single plant for a given control. In this thesis the concept of the design and analysis of computer experiments is applied to the performance analysis of nonlinear control systems. By employing Bayesian interpolation methods, one can make a prediction of the performance of the nonlinear control method for an ensemble of nonlinear closed-loop systems. An important benefit of employing this statistical framework is that the prediction is given together with some confidence bounds on the expected performance. Consequently, it is possible to make a prediction of the performance of a control method without designing the control. In this context we present also a sensitivity analysis, which gives some insight on how the expected performance of the control method changes, if one changes the parameters of the plant. The thesis ends with an empirical comparison of some predictors, which shows that the prediction depends on the *a-posteriori* distribution of the model, on the correlation function employed and on its parameters, respectively on the empirical estimation method for these unknown parameters.