

Lineare Systemanalyse mit SIMPACK 7.1

Wenn ein System sowohl bezüglich seiner Kinematik als auch der Kraftelemente, beispielsweise Federn und Dämpfer, linear beschrieben wird, lassen sich wesentliche Aussagen über das Systemverhalten unkompliziert in der Handhabung und im Vergleich zur Zeitintegration extrem schnell auf der Basis linearer Berechnungsverfahren ermitteln. Gerade für die Vorauslegung von Fahrzeugen im Bereich Fahrkomfort sind diese Verfahren daher traditionell eine feste Größe. Wie gelingt es, daß an einem linearen Modell eine Spektral- oder Kovarianzanalyse dieselben Ergebnisse bringt wie eine Zeitintegration eines stochastisch angeregten Systems mit anschließender statistischer Auswertung der Ergebnisse?

Johannes Gerl, Dr. Lutz Mauer, INTEC GmbH

Problemstellung

Wenn die Anregung eines schwach nichtlinearen Systems z.B. durch eine Messung als Funktion der Zeit oder des Weges gegeben ist, und wenn von der Antwort des Systems nicht das Zeitsignal selbst, sondern seine stochastische Qualität interessiert, läßt sich die klassische Zeitintegration durch das Verfahren der Spektralanalyse am linearisierten Rechenmodell ersetzen. Bei linearen Systemen liefern beide Verfahren übertragbare Ergebnisse, jedoch ist bei der linearen Rechnung ein analytisches Ergebnis möglich – mit in der Regel wesentlich geringeren Rechenzeiten. Gerade wenn man am Anfang der Auslegung eines Systems steht, lassen sich umfangreiche Kombinationen von Parametern auf diese Art ausleuchten.

Systemerregung

Die stochastische Anregung muß für den Einsatz linearer Verfahren in eine im Frequenzbereich gültige Formulierung transformiert werden, wofür zwei Möglichkeiten in SIMPACK zur Verfügung stehen:

- Beschreibung der Anregungsfunktion durch sein Leistungsdichtespektrum (*Power Spectral Densities*, kurz PSD) der Form $S(\omega)$. In dieser Formulierung ist keine Information über die Phase enthalten.
- Beschreibung der Anregungsfunktion durch ein Formfilter $F(j\omega)$, welches aus weißem Eingangsrauschen ein Signal mit den gewünschten stochastischen Eigenschaften erzeugt.

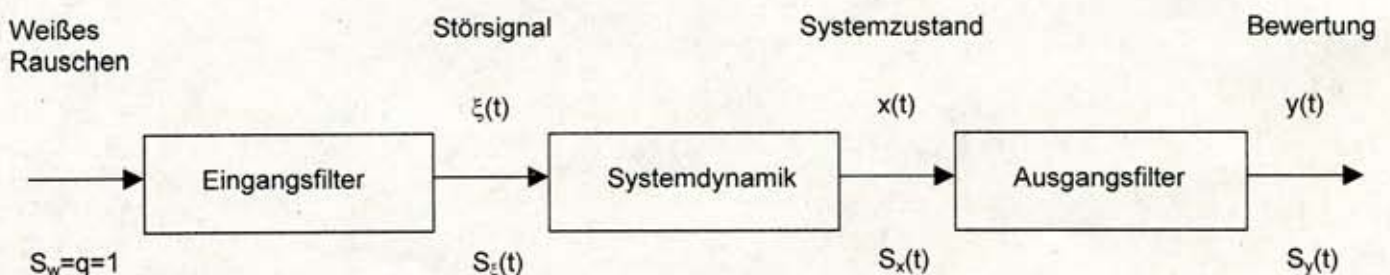
$$F(j\omega) = \frac{a_0 + a_1(j\omega) + a_2(j\omega)^2 + \dots}{b_0 + b_1(j\omega) + b_2(j\omega)^2 + \dots}$$

Eine spektrale Leistungsdichte als Systemanregung $S(\omega)$ kann demnach ersetzt werden durch ein Formfilter $F(j\omega)$ mit weißem Rauschen am Eingang. SIMPACK bietet eine Reihe genormter Anregungen dieses Typs. Für die Straßenfahrzeugtechnik liegen zehn Spektren für Straßenanregungen von der frisch geteerten Autobahn bis zum unbefestigten Feldweg vor. Für Schienenfahrzeuge gibt es eine seitens der ERRI B176 vorgeschlagene PSD für hohen und niedrigen Störpegel in analytischer Darstellung. Für die Fahrzeugtechnik ist wichtig, daß der Effekt des verschobe-

nen Auftreffens der Räder auf die gleiche Störung berücksichtigt wird. Weil die Fahrzeuggeschwindigkeit in SIMPACK ein im gesamten Modell gültiger Parameter ist, wird die Anregung der Räder, wenn sie wie allgemein üblich als Weganregung vorliegt, automatisch in eine entsprechende Totzeit umgerechnet.

Wenn von den mitgelieferten Leistungsspektren bzw. Formfilter keines geeignet ist, berechnet ein spezieller Preprozessor die Formfilter aus jeder beliebigen Messung, wobei der User einen sog. „Best-Fit-Modus“ verwenden oder die Ordnung von Zähler- und Nennerpolynom selbst festlegen kann. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Messung in der Form Amplitude - Phase oder Realteil - Imaginärteil vorliegt.

Eine Bemerkung am Rande: Mit demselben Preprozessor können Frequenzgänge (Zähler- und Nennerpolynome) nicht nur für Anregungen, sondern auch für Kraftelemente mit frequenzabhängigem Verhalten (z.B. Gummi) berechnet und im Zeit- und im Frequenzbereich verwendet werden.



Berechnungsverfahren und Qualität der Ergebnisse

Unter *Calculations* im SIMPACK-Main-Window erreicht man den Button *Linear System Analysis*. Hier sind insgesamt vier verschiedene Berechnungsverfahren zusammengefaßt, denen alleamt eine automatische Erzeugung der linearisierten Systemmatrizen aus dem allgemeinen System vorausgeht. Während sich die ersten beiden Verfahren für deterministische Anregungen mit harmonischen Weg- und Kraftfunktionen eignen, können die Spektralanalyse und die Kovarianzanalyse auch zur Systemanalyse bei stochastischer Erregung angewandt werden:

- Frequency Response Analysis

Unter der Voraussetzung einer harmonischen Anregung mit Einheitsamplitude wird für beliebige Lage-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Kraftsignale ein Frequenzgang (Amplitude und Phase) berechnet.

- Linear System Response

Im Gegensatz zur Frequency Response wird hier für ein Ensemble von periodischen Anregungen die (ebenfalls periodische) Systemantwort berechnet.

- Spectral Analysis

Am Eingang liegen beliebig viele stochastische Anregungen in Form von Leistungsdichtespektren der oben beschriebenen Form $S(\omega)$ als Beschreibung eines stochastisch bestimmten Anregungssignals an. Das Ergebnis ist ebenso ein Spektrum eines beliebigen Ausgangssignals des Systems, wobei allerdings die Phaseninformation des zeitabhängigen Signals komplett verloren geht. Aus den Spektren lassen sich gegebenenfalls auch frequenzbewertete RMS-Werte zur Komfortbeurteilung errechnen, die wiederum einen Vergleich

mit entsprechend ausgewerteten Ergebnissen im Zeitbereich zulassen.

- Covariance Analysis

Die im Frequenzbereich gegebene spektrale Leistungsdichte wird durch ein Formfilter $F(j\omega)$ mit weißem Rauschen als Eingang ersetzt. Für das Gesamtsystem, bestehend aus Formfilter und Fahrzeugdynamik wird eine Kovarianzanalyse durchgeführt (Gauß-Markov-Gleichung).

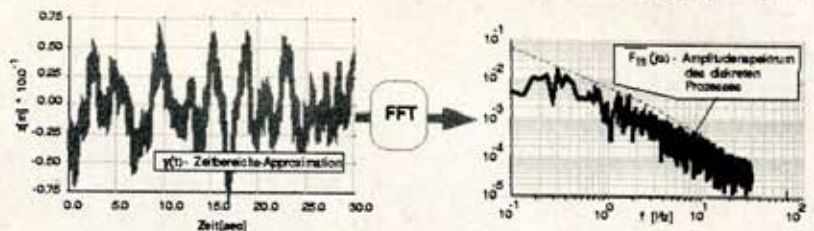
Vergleich mit Zeitbereichslösungen

Mit stochastischen Methoden lassen sich regellose Vorgänge mathematisch beschreiben. Wenn nun derart stochastische Signale wie die vermessene Oberfläche einer Straße als Anregung verwendet werden, so wird sich das Ergebnis ähnlich regellos darstellen. Um überhaupt eine Aussage über die Qualität des Antwortsignals treffen zu können, lassen sich FFT-Filter anwenden, welche Signale in ihre Frequenz-

können, hilft die lineare Systemanalyse weiter.

Zurück zur oben angesprochenen Vergleichbarkeit der Ergebnisse; durch das SIMPACK *Post Processing* schließt sich der Kreis. Filter werten Zeitsignale so aus, daß mit den Ergebnissen von Spektral- oder Kovarianzanalysen identische Darstellungen erreicht werden.

Eine Verbindung zwischen linearer und nichtlinearer Welt liefert SIMPACK auch mit der Transformation von im Frequenzbereich definierten Anregungen in den Zeitbereich. Wenn die Erregung nicht in Form einer zeit- oder wegabhängigen Messung vorliegt, sondern von Anfang an nur als Spektrum, kann eine Zeitbereichsrealisierung mit gleichen stochastischen Eigenschaften durch eine Inverse *Fast Fourier Transformation* mit zufallsgenerierten Phasenbeziehungen erzeugt werden. Diese Variante steht als allgemeine *Time Excitation* im SIMPACK *Pre Processing* zur Verfügung, kann aber auch als spezielle Gleislage- oder



anteile aufspalten und Komfortbewertungskriterien anlegen. Wichtig ist an dieser Stelle allerdings, daß dem System lange genug Zeit gegeben wird, um sich stochastisch repräsentativ zu verhalten (Monte Carlo Analyse). Genau hier ist der Knackpunkt, denn auch bei SIMPACK dauern Zeitintegrationen ihre Zeit. Wenn allerdings nichtlineare Kinematik und Kraftfunktionen (z.B. Anschläge) oder spezielle Problemstellungen wie der Kontakt von Rad und Schiene keine Rolle spielen, bzw. in eine äquivalente Linearisierung überführt werden

Straßenerrgung mit SIMPACK *Wheel/Rail* und *Automotive*[®] verwendet werden. Das verzögerte Auftreffen der vorderen und hinteren Räder auf dieselbe Störung wird wiederum automatisch organisiert. Dieser Weg der Monte Carlo Simulation ist immer dann zu gehen, wenn das zu untersuchende System mit all seinen Nichtlinearitäten analysiert werden soll.

Demjenigen, der in die geschilderte Problematik im Detail einsteigen möchte, sei das Buch *Kortüm, Lugner: Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen*, Springer Verlag, 1994 empfohlen.