

Operational Transfer Path Analysis mit Randbedingungen

Bernd Philippen

HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: Bernd.Philippen@HEAD-acoustics.de

Einleitung

Die Operational Transfer Path Analysis (OTPA) ist eine schnelle Methode zur Identifizierung von Geräuschpfaden ohne aufwändige Bestimmung von Transferfunktionen [1]. Wenn die Quellsignale jedoch sehr kohärent sind, werden die Pfadbeiträge oft deutlich überschätzt und trotzdem stimmt die Summe aller Pfade sehr gut mit dem gemessenen Empfängergeräusch überein. Damit ist aber eine korrekte Identifizierung der einzelnen Transferpfade nicht mehr gewährleistet. Durch eine mathematische Regularisierung wird häufig versucht, diese Überschätzung zu reduzieren. In diesem Beitrag wird der OTPA Least-Squares-Ansatz mit Regularisierung einem iterativen Optimierungsverfahren unter Berücksichtigung von Randbedingungen für die Transferfunktionen gegenübergestellt.

Operational Transfer Path Analysis

Für die OTPA werden nur Betriebsdaten benötigt, d. h. im Betrieb werden Luftschallabstrahlung und Schwingungen an den Geräuschquellen und simultan an der Empfängerposition aufgezeichnet.

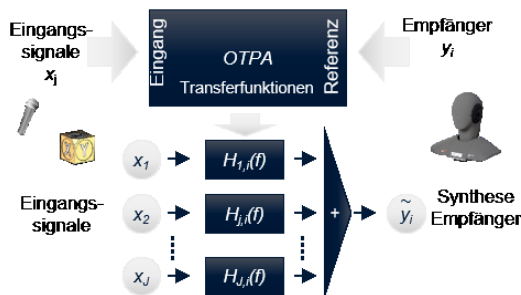


Abbildung 1: OTPA Modell

Aus diesen Signalen berechnet die OTPA die erforderlichen Transferfunktionen unter Auswertung der Korrelationen zwischen den Eingangssignalen und dem Empfängersignal des OTPA Modells (Abbildung 1). Im nächsten Schritt werden die Eingangssignale gefiltert, um die Zeitsignale der Pfadbeiträge zu bestimmen. Alle Pfadbeiträge aufsummiert ergeben die Synthese des Empfängergeräusches. Die OTPA lässt sich als Least-Squares Optimierung (LSQ) formulieren:

$$\min \| \mathbf{Y}(f) - \mathbf{H}(f)\mathbf{X}(f) \|_2. \quad (1)$$

Im Frequenzbereich werden die Transferfunktionen H so bestimmt, dass sich die geringste Abweichung zum gemessenen Empfängergeräusch Y ergibt, wenn sie mit den Eingangsdaten X verknüpft werden. Mathematisch wird für jede Frequenz ein überbestimmtes Gleichungssystem mittels Pseudoinverse der Matrix X gelöst. Wenn die Kohärenz der Eingangsdaten hoch ist, führt dies zu einer schlechten Kondition der Matrix X , deren Inversion dazu führt, dass selbst kleine Störungen am Empfänger Y zu sehr großen Fehlern in H führen können. Übertragen auf die OTPA bedeutet dieser Sachverhalt i. d. R. eine Überschätzung der einzelnen Pfadbeiträge

aufgrund viel zu großer Beträge der Transferfunktionen. Die Überschätzungen werden durch tendenziell gegensätzliche Phasen der Teilpfade in der Summe wieder ausgeglichen. Somit ist das einzige Optimierungskriterium, die geringstmögliche Abweichung zwischen Synthese und gemessenen Empfängergeräusch, erfüllt. In der Mathematik wird bei schlecht konditionierten Gleichungssystemen oft eine Regularisierung durchgeführt, indem eine zusätzliche Randbedingung hinzugefügt wird.

$$\min \| \mathbf{Y}(f) - \mathbf{H}(f)\mathbf{X}(f) \|_2 \wedge \min \| \mathbf{H}(f) \|_2 \quad (2)$$

Der Grad der Regularisierung bestimmt den Kompromiss zwischen zwei Bedingungen: Minimierung der Abweichung zwischen Synthese und Messung auf der einen Seite und auf der anderen Seite minimaler Betrag des Transferfunktionsvektors. Mathematisch kann die Regularisierung beispielsweise dadurch erreicht werden, dass bei der Inversion die kleinen Singulärwerte weggelassen werden, die ansonsten die Ursache für eine Überschätzung wären (Truncated Singular Value Decomposition, kurz TSVD). Regularisierung bedeutet aber nicht, dass in jedem Fall die korrekten Transferfunktionen berechnet werden, sondern meist plausible. Die Problematik besteht unter anderem darin, den Grad der Regularisierung für den konkreten Anwendungsfall geeignet festzulegen.

Beispiel: OTPA mit hoch kohärenten Testdaten

An einem Beispiel mit synthetischen Testdaten sollen die Auswirkungen hoch kohärenter Eingangssignale auf die OTPA demonstriert werden. Dazu werden zehn Luftschallsignale eines PKW-Verbrennungsmotors verwendet, die während eines Vollasthochlaufs auf einem Rollenprüfstand gemessen wurden. Diese Signale werden mit gemessenen Luftschallempfindlichkeiten einer konventionellen TPA verknüpft, um daraus das Empfängergeräusch zu berechnen. Im Gegensatz zu einem realen Anwendungsfall, bei dem das Empfängergeräusch nur gemessen werden kann, wird es hier synthetisiert. Für verschiedene OTPA Berechnungen werden im Folgenden nur die Eingangssignale und das synthetische Empfängergeräusch verwendet. Dieses Vorgehen erlaubt eine quantitative Bewertung der Pfadbeiträge, da hier die tatsächlichen Werte als Referenz bekannt sind.

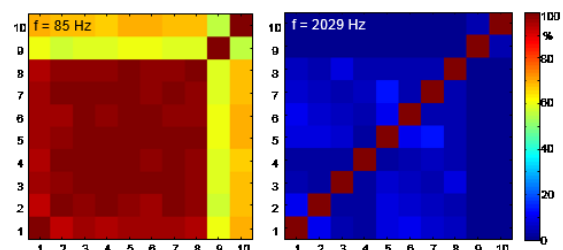


Abbildung 2: Kohärenzmatrix für 85 Hz und 2029 Hz

Zunächst wird die Kohärenz zwischen allen Eingangssignalen des Beispiels ausgewertet. In Abbildung 1 werden die Kohärenzwerte für zwei ausgewählte Frequenzen als farbkodierte

Matrix dargestellt. Besonders im Bereich der Hauptmotorordnung, z. B. bei 85 Hz, ist eine sehr hohe Kohärenz sichtbar. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Kohärenz ab und beispielsweise bei 2 kHz sind die Signale inkohärent.

Für das synthetische Beispiel werden vier OTPA Berechnungen mit verschiedenen Einstellungen für die Regularisierung betrachtet. Für die Ergebnisse ist beispielhaft der Pegel der zweiten Motorordnung über der Drehzahl in Abbildung 3 dargestellt. Die Regularisierung hat in diesem Beispiel keinen Einfluss auf die Gesamtsynthese (Summe aller Pfadbeiträge), denn sie ist in allen Fällen deckungsgleich mit der Referenz.

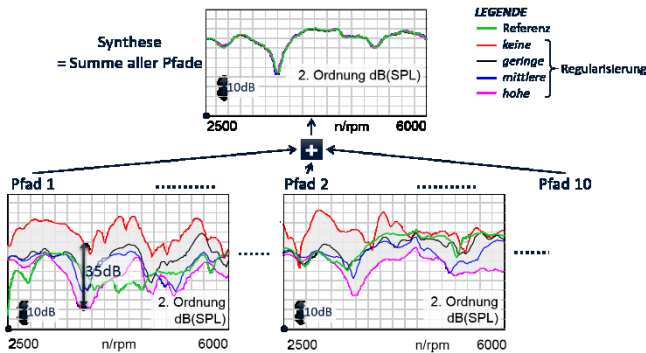


Abbildung 3: OTPA Ergebnisse mit variierendem Grad der Regularisierung

Die einzelnen Pfadbeiträge sind jedoch je nach Berechnung sehr unterschiedlich. Mit dem Least-Squares Ansatz erfolgt eine deutliche Überschätzung. Die Ergebnisse lassen sich durch eine Regularisierung im Prinzip verbessern, aber die Abweichung zur Referenz ist teilweise immer noch zu hoch. Zudem ist in der Praxis die Referenz nicht bekannt und daher kann die Auswahl der Regularisierung unter Umständen sehr willkürlich sein. Für den Verlauf der Konditionszahl über der Frequenz ergibt sich folgender Zusammenhang. Bei tiefen Frequenzen ist die Konditionszahl sehr groß, was gleichbedeutend mit einer hohen Kohärenz ist. Das führt zu einer Überschätzung der Ergebnisse bzw. zu einer großen Abhängigkeit der Pfadbeiträge von dem gewählten Grad der Regularisierung. Kohärenz und Konditionszahl sind oberhalb von 500 Hz gering und in diesem Bereich sind die OTPA Ergebnisse auch deckungsgleich mit der Referenz.

OTPA mit Randbedingungen

Die wesentliche Überschätzung der Transferfunktionen und die mehr oder weniger willkürliche Wahl der Regularisierung war die Motivation, um zusätzliche Randbedingungen für die Transferfunktionen in die Optimierung einzubringen. Der Least-Squares Ansatz wird durch einen Levenberg-Marquard-Algorithmus mit Randbedingungen ersetzt (LMA-B) [2]. Folgendes Optimierungskriterium wird zur Berechnung der Transferfunktionen verwendet:

$$\min \| \mathbf{Y}(f) - \mathbf{H}(f)\mathbf{X}(f) \|_2 \wedge \mathbf{a} \leq \mathbf{H} \leq \mathbf{b}. \quad (3)$$

Durch zusätzliches Vorwissen in Form von Streubändern oder individuellen Unter- und Obergrenzen für die Transferfunktionen soll eine höhere Validität der OTPA Ergebnisse erreicht werden. Als Grundlage für die Optimierung können gemessene Transferfunktionen einer konventionellen TPA, die Prinzip bedingte Mess- und Verfahrensungenauigkeiten enthalten,

verwendet werden. Für das oben genannte Beispiel wurden die vorgegebenen Transferfunktionen um +/-3 dB verändert, um gemessene, fehlerbehaftete Transferfunktionen zu simulieren. Eine Synthese mit diesen Transferfunktionen führt zu einer Abweichung in der Gesamtsynthese. Nach der Optimierung mit dem neuen Verfahren ist die Abweichung zur Referenz wieder sehr gering (Abbildung 4) und die einzelnen Pfadbeiträge liegen im vorgegebenen Toleranzbereich.

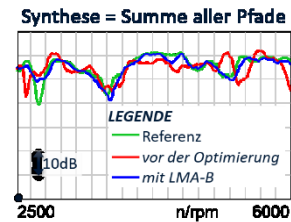


Abbildung 4: Pegel der 2. Motorordnung der Synthese vor und nach der Optimierung durch den OTPA Algorithmus mit Randbedingungen (LMA-B).

Zusammenfassung und Ausblick

Die Kohärenz der Eingangssignale und die Konditionszahl der Eingangsdatenmatrix können dazu verwendet werden, die Zuverlässigkeit der OTPA Ergebnisse abzuschätzen. Für gering kohärente Signale und einem gemessenen Empfängergeräusch, das eine geringe Störung enthält, eignet sich der LSQ Algorithmus sehr gut. Bei höherer Kohärenz und größerer Störung würde damit jedoch eine deutliche Überschätzung der Pfadbeiträge erfolgen. Mit dem TSVD Ansatz können je nach Grad der Regularisierung die Pfadbeiträge und deren Relevanz trotz gleichbleibender Gesamtsynthese sehr unterschiedlich sein. Generell eignen sich die Verfahren nicht für sehr kohärente Eingangssignale. In einigen Fällen ist es dann sinnvoll, nur Gruppen von Pfaden zu betrachten, die untereinander gering kohärent sind. Zusätzlich kann unter Umständen die Kohärenz der Eingangssignale durch Hinzunahme weiterer Betriebsbedingungen für die Berechnung verringert werden. Dabei muss jedoch einerseits beachtet werden, dass das Übertragungsverhalten über die Betriebsbedingungen hinweg als unveränderlich angenommen werden kann. Andererseits ist nicht zwangsläufig sichergestellt, dass dadurch auch tatsächlich die Variabilität in den Eingangsdaten zunimmt. Bei gering kohärenten Eingangssignalen und hoher Störung am Empfänger liefert der LMA-B Algorithmus im Vergleich bessere Ergebnisse, da bei den Verfahren LSQ und TSVD die Fehlerverstärkung durch eine große Empfängerstörung trotz moderater Kondition zu hoch sein kann. Dann können zusätzliche Randbedingungen für die Optimierung die Qualität der berechneten Pfadbeiträge verbessern. In zukünftigen Arbeiten soll der LMA-B Algorithmus an weiteren, realen Daten getestet werden, um das Verfahren mit anderen Optimierungsalgorithmen oder -strategien weiter zu verbessern.

Literatur

- [1] Noumura, K. und Yoshida, J.: Method of Transfer Path Analysis for Vehicle Interior Sound with no Excitation Experiment. FISITA 2006, 2006
- [2] Implementierung Levmar URL: <http://users.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/>