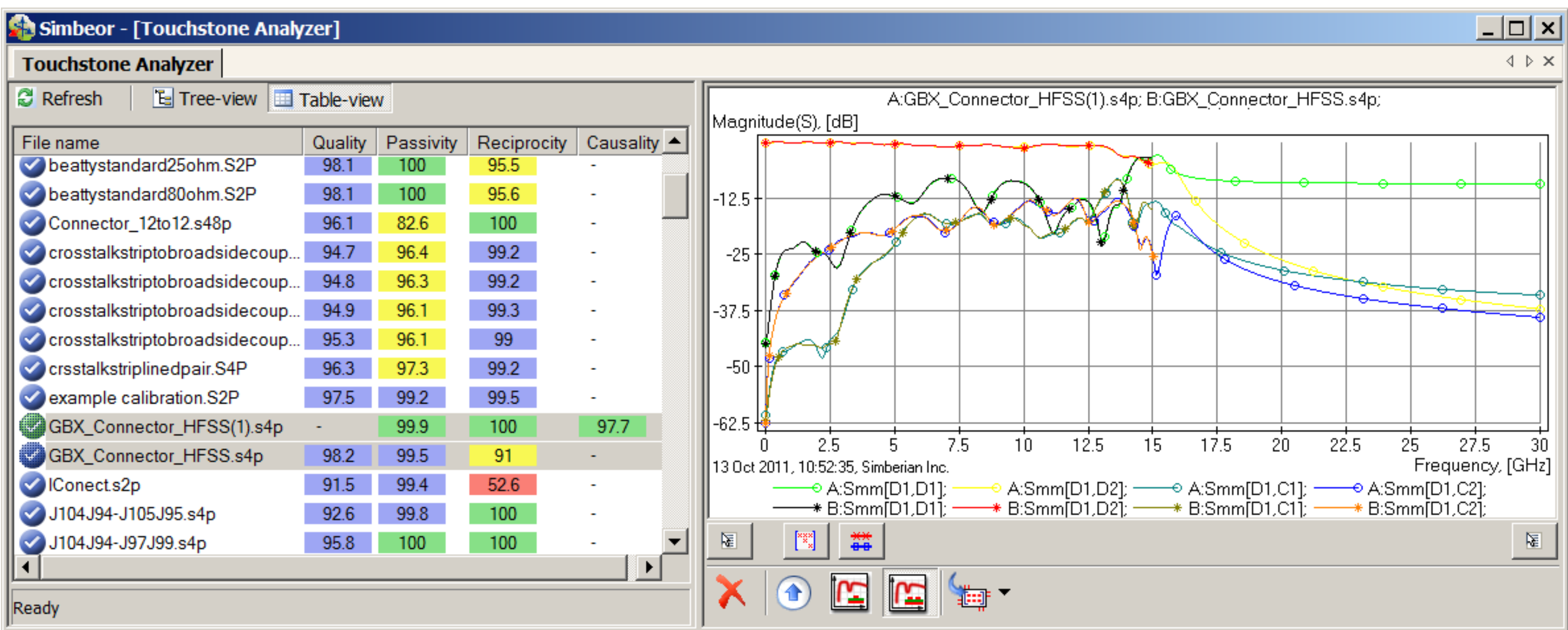
Simberian
Electromagnetic Solutions

Sパラメータモデルの品質

Asian IBIS Summit, Yokohama, November 18, 2011

Yuriy Shlepnev
shlepnev@simberian.com



概要

- はじめに
- 周波数とタイムドメインにおけるSパラメータ
- 周波数ドメインのSパラメータの制約条件
- Reciprocity, Passivity, Causalityにおける品質基準
- 有理関数近似と最終的な品質基準
- まとめ
- 連絡先とリソース

Sパラメータモデル

- Sパラメータモデルは数ギガビットのインターコネクト設計のユビキタスになりつつあります
  - コネクタ、ケーブル、基板、パッケージ、バックプレーンなど全てのLTI-systemはDCから最高周波数(daylight)までのSパラメータで表現できます
- 電磁界解析や測定ではSパラメータTouchstoneモデルが使用されています
- かなりの確率でそれらのモデルは下の問題を抱えています:
  - Reciprocity (対称性)の逸脱(violations)
  - Passivity (受動性)と Causality(因果性)の逸脱
  - 一般的な誤差
- そしてそれらのモデルは別々のソルバーで周波数ドメイン、タイムドメインの両方で異なった応答結果が出てしまう場合があります

システム応答の計算はDCから無限大までの連続したSパラメータ情報が必要です

$$S(i\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} S(t)\cdot e^{-i\omega t}\cdot dt,\quad S(i\omega)\in C^{N\times N}$$

FD

$\bar{a}(i\omega)$

励振
（stimulus）

$S(i\omega)$

Sマトリックス

$$\bar{b}(i\omega)=S(i\omega)\cdot\bar{a}(i\omega)$$

システム応答 – 周波数ドメイン（FD）

Fourier Transforms

TD

励振
（stimulus）

$\bar{a}(t)$

インパルス応答マトリックス

$S(t)$

システム応答 – タイムドメイン（TD）

$$\bar{b}(t)=\int_{-\infty}^{\infty} S(t-\tau)\cdot\bar{a}(\tau)\cdot d\tau$$

$$S(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S(i\omega)\cdot e^{i\omega t}\cdot d\omega,\quad S(t)\in R^{N\times N}$$

離散(discrete)モデルで可能な近似

- 離散フーリエ変換(DFT) と畳み込み積分
  - これは低速な方法でSパラメータのテーブルモデルを作成するには外挿、内挿の近似が必要になる可能性がある(制御不能のエラー)
- 有理関数により近似された離散Sパラメータ(RMSエラー)
  - 正確性は定義された周波数帯域のみ担保されます
  - 連続した周波数の因果性の関数は解析的なインパルス応答から得られたDCから無限大のデータで定義されます
  - 高速再帰畳み込み積分のアルゴリズムがTD応答で使用されます
  - 結果の一貫性は周波数とタイムドメインの両方で担保されます
- すべての実存のTouchstoneモデルが上の2つに適用できるわけではありません

一般的なSパラメータの欠陥

- モデルの 狭い帯域
  - Sパラメータモデルはソルバーや測定装置の能力の問題から帯域が制限されています
  - モデルにはDCデータが含まれているか外挿が許されるべきで、高周波は信号のスペクトラムで定義されるべきです
- モデルの離散性
  - Touchstoneモデルは有限な周波数の行列要素です
  - テーブルマトリックス要素の近似あるいは外挿は時間、周波数ドメイン解析の両方で必要になる可能性があります
- モデルの 誤差（distortions）
  - 測定やシミュレーションに由来するもの
  - Passivity（受動性）の逸脱と局所的な“強制”
  - Causality（因果性）の逸脱と“強制”
- モデル作成者やユーザーによる人為的ミス
- どうやってモデルの品質レベルを評価するのか？

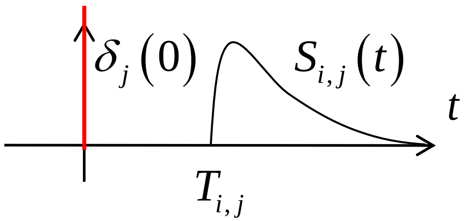
LTIシステムのCausality因果性 (TD & FD)

- タイムドメインにおいては以下の条件の時因果性があると言えます:
  全ての要素が

$$S_{i,j}(t)=0 \ at \ t<0$$

  遅延された因果性が:(インターコネクトの場合)

$$S_{i,j}(t)=0 \ at \ t<T_{i,j},\ T_{i,j}>0$$



- この関係からは周波数ドメインでのKramers–Kronigの関係を導けます:

$$S(i\omega)=\frac{1}{i\pi}PV\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S(i\omega')}{\omega-\omega'}\cdot d\omega',\ \ PV=\lim_{\varepsilon\to 0}\left(\int_{-\infty}^{\omega-\varepsilon}+\int_{\omega+\varepsilon}^{+\infty}\right)$$

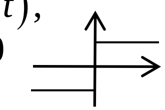
$$S_r(\omega)=\frac{1}{\pi}PV\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S_i(\omega')}{\omega-\omega'}\cdot d\omega',\ \ S_i(\omega)=\frac{-1}{\pi}PV\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S_r(\omega')}{\omega-\omega'}\cdot d\omega'$$

Kramers, H.A., Nature, v 117, 1926 p. 775..
Kronig, R. de L., J. Opt. Soc. Am. N12, 1926, p 547.

derivation

$$S(t)=sign(t)\cdot S(t),$$

$$sign(t)=\begin{vmatrix}-1,\ t<0\\ 1,\ t>0\end{vmatrix}$$



$$S(i\omega)=F\{S(t)\}=$$

$$=\frac{1}{2\pi}F\{sign(t)\}*F\{S(t)\}$$

$$F\{sign(t)\}=\frac{2}{i\omega}$$

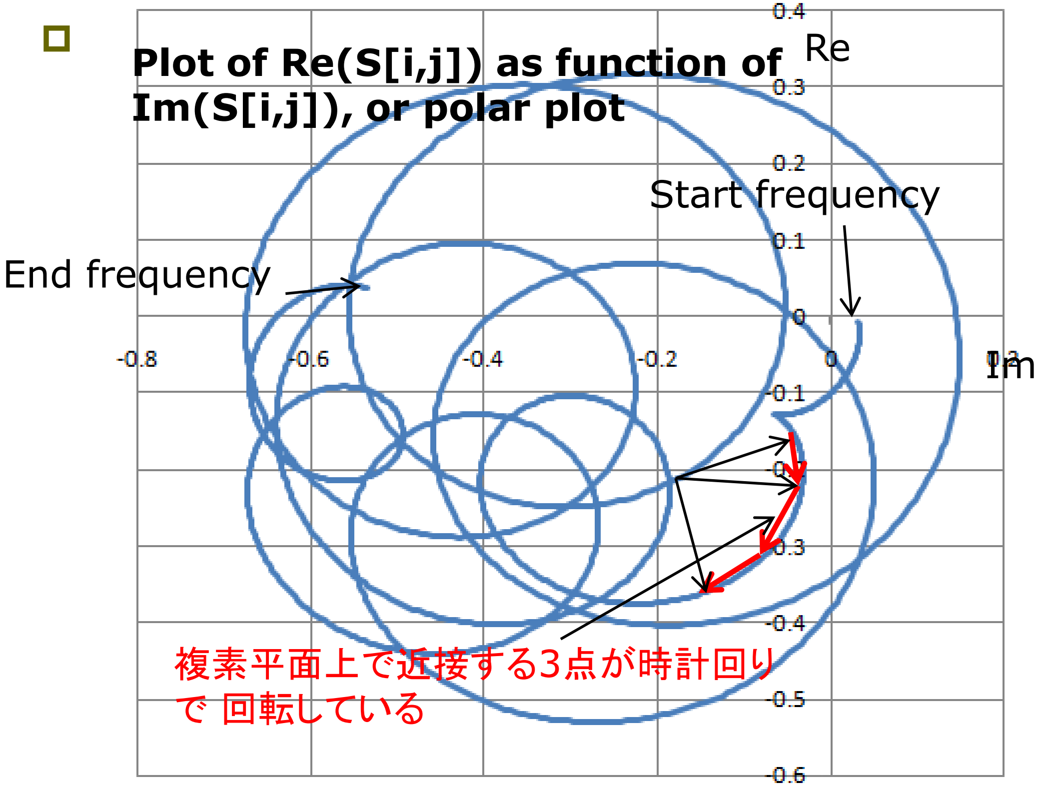
Causality(因果性)の評価 – 難度の高い方法

- 周波数ドメイン応答がいくつかの箇所で帯域に制限がある場合Kramers–Kronigの関係は直接Causality(因果性)の評価には使えません
- 因果性境界値は帯域の制限されたテーブルモデルのデータセットを評価するために導入されます
  - Milton, G.W., Eyre, D.J. and Mantese, J.V, *Finite Frequency Range Kramers Kronig Relations: Bounds on the Dispersion,* Phys. Rev. Lett. 79, 1997, p. 3062-3064
  - Triverio, P. Grivet-Talocia S., *Robust Causality Characterization via Generalized Dispersion Relations*, IEEE Trans. on Adv. Packaging, N 3, 2008, p. 579-593.

もしテストにパスしても、帯域の制限による多く未知の問題が残ります

Causality（因果性）の評価　- 簡単な方法

- “Heuristic” 法（必ず正しい答えが導けるわけではないですが、ある程度のレベルで正解に近い解を得ることが出来る方法）は、因果性の評価方法の１つで、極座標上で因果性のあるシステムはほとんどが時計回りに回転していることを観測する方法です（ V. Dmitriev-Zdorovの提案）



因果性の評価（CM）は時計回りのデータが全体の何％かで評価します

もしこの値が80％以下である場合は、因果性の逸脱の可能性があると見なします

このアルゴリズムは数式的モデルにはよく合うが、測定されたデータのノイズのために合わない場合があります

タイムドメインにおける安定性と受動性

- もし全ての有界な入力に対し出力が有界ならばシステムは安定と見なされます

$$\left|a(t)\right| < K \Rightarrow \left|b(t)\right| < M,\ \forall t \qquad \text{(BIBO)}$$

- もしマルチポートがすべての可能性のある入射、反射波に対してエネルギーを発生

$$E(t) = \int_{-\infty}^{t} \left[\bar{a}^{t}(\tau)\cdot\bar{a}(\tau) - \bar{b}^{t}(\tau)\cdot\bar{b}(\tau)\right]\cdot d\tau \geq 0,\ \forall t \qquad \text{(エネルギーを発生しない)}$$

発生しないならマルチポートネットワークは受動性と言えます

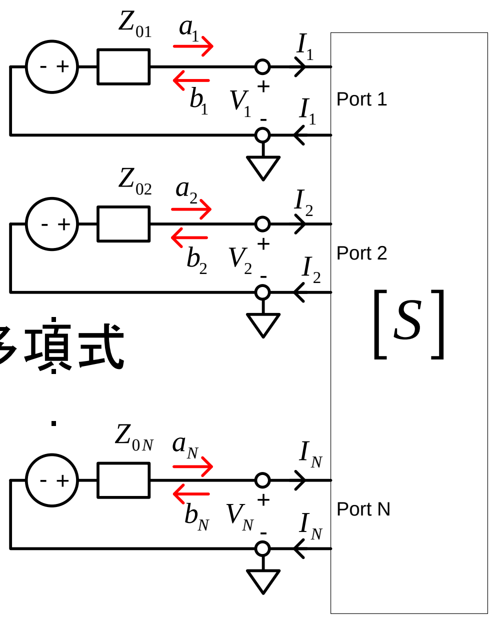
- 上の定義に従ってシステムが受動性があれば因果性も保たれています

$$\bar{a}(t) = 0,\ \forall t < t_0 \Rightarrow \int_{-\infty}^{t} \left[\bar{b}^{t}(\tau)\cdot\bar{b}(\tau)\right]\cdot d\tau \leq 0 \Rightarrow \bar{b}(t) = 0,\ \forall t < t_0$$

- したがって、受動性のチェックはインターコネクトシステムに必須です

P. Triverio S. Grivet-Talocia, M.S. Nakhla, F.G. Canavero, R. Achar, Stability, Causality, and Passivity in Electrical Interconnect Models, IEEE Trans. on Advanced Packaging, vol. 30. 2007, N4, p. 795-808.

周波数ドメインにおける受動性



- Power transmitted to multiport is a difference of power transmitted by incident and reflected waves: $$P_{in} = \sum_{n=1}^{N} |a_n|^2 - |b_n|^2 = \left[\bar{a}^* \cdot \bar{a} - \bar{b}^* \cdot \bar{b}\right]$$

  or $$P_{in} = \bar{a}^* \cdot \bar{a} - \bar{a}^* \cdot S^* S \cdot \bar{a} = \bar{a}^* \cdot \left[U - S^* S\right] \cdot \bar{a}$$

- もしマトリックスの固有値が負でないなら、その2次の多項式（Quadratic form）も負ではない：

$$eigenvals\left[U - S^* \cdot S\right] \geq 0 \Rightarrow eigenvals\left[S^* \cdot S\right] \leq 1$$

（U は単位マトリックス）

Sufficient condition only if verified from DC to infinity (impossible for discrete Touchstone models)

インターコネクトにとっての良いTouchstoneモデル

- 信号のスペクトラムに整合した十分な帯域を持つこと
- 共振点を再現するためには十分なサンプリングが必須です
- Reciprocal（対称性）が必須です「線形の非対称性の材料？

$$S_{i,j} = S_{j,i} \quad or \quad S = S^t$$

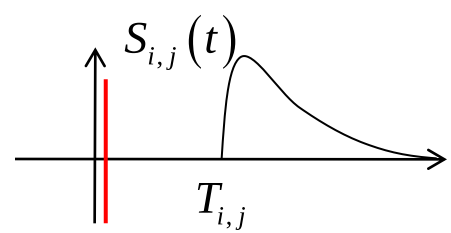
- 受動部品であることが必須です

$$P_{in} = \overline{a}^* \cdot \left[U - S^* S \right] \cdot \overline{a} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad eigenvals\left[S^* \cdot S \right] \leq 1$$

DCから無限大まで ！

- 因果性のあるステップ応答/インパルス応答を持つこと（応答は全て励振の後に発生する）

$$S_{i,j}(t) = 0, \;\; t < T_{ij}$$



品質基準(0-100%)が良いことの定義

DesignCon 2010のIBISフォーラムで初めて紹介しました

- 受動性(Passivity)の品質評価：

$$PQM = \max\left[\frac{100}{N_{total}}\left(N_{total} - \sum_{n=1}^{N_{total}} PW_n\right), 0\right]\%$$

$$PW_n = 0 \ if \ \ PM_n < 1.00001; \ otherwise \ PW_n = \frac{PM_n - 1.00001}{0.1}$$

$$PM_n = \sqrt{\max\left[eigenvals\left(S^*(f_n)\cdot S(f_n)\right)\right]}$$

99%以上であるべき

- 対称性(Reciprocity)の品質評価：

$$RQM = \max\left[\frac{100}{N_{total}}\left(N_{total} - \sum_{n=1}^{N_{total}} RW_n\right), 0\right]\%$$

$$RW_n = 0 \ if \ \ RM_n < 10^{-6}; \ otherwise \ RW_n = \frac{RM_n - 10^{-6}}{0.1}$$

$$RM_n = \frac{1}{N_s}\sum_{i,j}\left|S_{i,j}(f_n) - S_{j,i}(f_n)\right|$$

99%以上であるべき

- 因果性(Causality)の品質評価：時計回りのデータが全体の何%かで評価します（数式モデルの場合は80%以上であるべき）

予備的な品質評価基準

- 予備的なTouchstoneモデルの品質は受動性(Passivity)，対称性(Reciprocity)， 因果性(Causality)の基準で評価できます (PQM, RQM, CQM)

	Metric/Model Icon	良い - good	可 - acceptable	不明 - inconclusive	悪い - bad
受動性	Passivity	[100, 99.9]	(99.9, 99]	(99, 80]	(80, 0]
対称性	Reciprocity	[100, 99.9]	(99.9, 99]	(99, 80]	(80, 0]
因果性	Causality	[100, 80]	(80, 50]	(50, 0]	-----

	Color code	受動性 Passivity (PQM)	対称性 Reciprocity (RQM)	因果性 Causality (CQM)
良い	Green – good	[99.9, 100]	[99.9, 100]	[80, 100]
可	Blue – acceptable	[99, 99.9)	[99, 99.9)	[50, 80)
結論でない	Yellow – inconclusive	[80, 99)	[80, 99)	[20, 50)
悪い	Red - bad	[0, 80)	[0, 80)	[0, 20)

予備的な品質評価の例

ほとんどのモデルで受動性と対称性の逸脱が見られます
因果性の悪いスコアは高周波領域のノイズの影響でいくつかのモデルに見られます

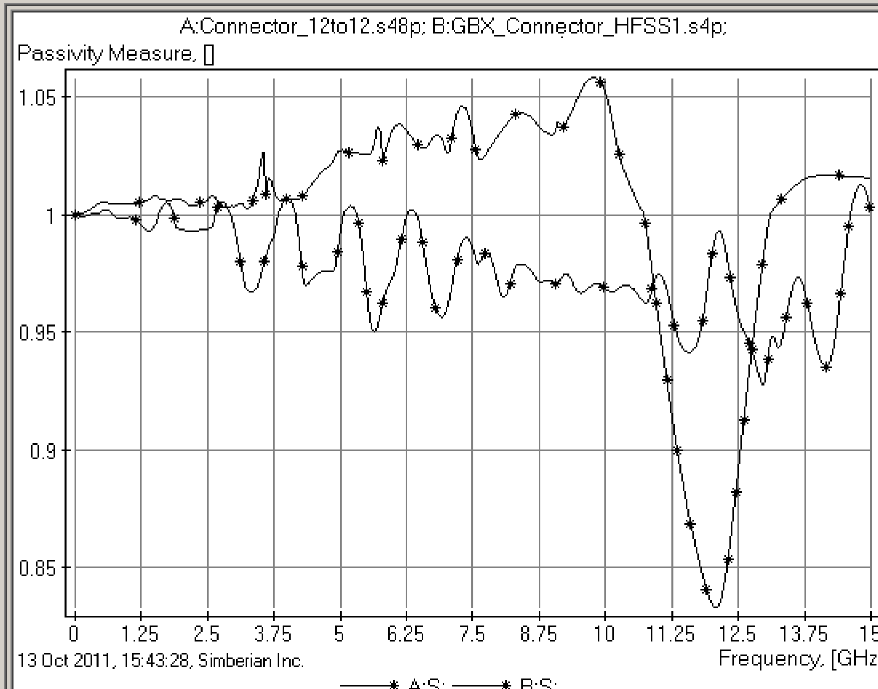
Simbeor - [Touchstone Analyzer]

Touchstone Analyzer

Refresh | Tree-view | Table-view

File name	Quality	Passivity	Reciprocity	Causality
3coupleddiffpairJ74J76toJ7...	-	95.9	99.3	0
3coupleddiffpairJ74J76toJ8...	-	96	99.2	0
beattystandard25ohm.S2P	-	100	95.5	12.7
beattystandard80ohm.S2P	-	100	95.6	0
Connector_12to12.s48p	-	82.6	100	80.5
crosstalkstriptobroadsidec...	-	96.4	99.2	0
crosstalkstriptobroadsidec...	-	96.3	99.2	0
crosstalkstriptobroadsidec...	-	96.1	99.3	0
crosstalkstriptobroadsidec...	-	96.1	99	0
crsstalkstriplinedpair.S4P	-	97.3	99.2	35.2
example calibration.S2P	-	99.2	99.5	0
GBX_Connector_HFSS1.s4p	-	99.5	91	96.2
IConect.s2p	-	99.4	52.6	73.4
J104J94-J105J95.s4p	-	99.8	100	97.7
J104J94-J97J99.s4p	-	100	100	98
J20J24-J21J25-6in.s4p	-	99.4	100	94.3
J20J24-J21J25.s4p	-	99.4	100	94.3
J26J30-J27J31-3in.s4p	-	99.5	99.9	92.7
J26J30-J27J31.s4p	-	99.5	99.9	92.7

Ready



Sパラメータの連続周波数モデルとしての有理関数近似

$$\bar{b} = S \cdot \bar{a},\quad S_{i,j} = \left.\frac{b_i}{a_j}\right|_{a_k=0\ k\neq j} \Rightarrow S_{i,j}(i\omega) = \left[d_{ij} + \sum_{n=1}^{N_{ij}} \left(\frac{r_{ij,n}}{i\omega - p_{ij,n}} + \frac{r^*_{ij,n}}{i\omega - p^*_{ij,n}} \right) \right] \cdot e^{-s\cdot T_{ij}}$$

$$s = i\omega,\ d_{ij} - values\,at\,\infty,\ N_{ij} - number\,of\ poles,$$

$$r_{ij,n} - residues,\ p_{ij,n} - poles\,(real\,or\,complex), T_{ij} - optional\,delay$$

DCから無限大までの周波数で定義された連続関数

- パルス応答は解析的な手法で、実数値と遅延が因果性がある:

$$S_{i,j}(t) = 0,\ t < T_{ij}$$

$$S_{i,j}(t) = d_{ij}\delta(t - T_{ij}) + \sum_{n=1}^{N_{ij}} \left[r_{ij,n} \cdot \exp\left(p_{ij,n} \cdot (t - T_{ij})\right) + r^*_{ij,n} \cdot \exp\left(p^*_{ij,n} \cdot (t - T_{ij})\right) \right],\ t \geq T_{ij}$$

- 安定 $\mathrm{Re}\left(p_{ij,n}\right) < 0$
- 受動性 if $eigenvals\left[S(\omega) \cdot S^*(\omega) \right] \leq 1\ \forall\omega,\ from\,0\,to\,\infty$
- 対称性 if $S_{i,j}(\omega) = S_{j,i}(\omega)$

強制が必要な場合があります

有理関数近似の使い方

- 最速再帰畳み込み積分アルゴリズム(PWL信号用の正確なソリューション)を用いたチャネルのタイムドメイン応答の計算用
- Touchstoneモデルのテーブルデータの品質改善
  - 受動性及び因果性の逸脱の修正
  - 受動性を担保した上での内挿、外挿
- 広帯域SPICEマクロモデルの生成
  - より小さなサイズのモデルで安定した解析
  - どんなソルバーでも一貫した周波数及びタイムドメイン解析ができる
- 元のモデルの品質評価

最終的な品質評価

- 周波数連続なマクロモデルによるDCから無限大までの受動的な離散Sパラメータ近似の精度は次の式で示されます

$$RMSE = \max_{i,j}\left[\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|S_{ij}(n) - S_{ij}(\omega_n)\right|^2}\right]$$

- これにより元のデータの品質評価が出来ます

$$Q = 100 \cdot \max\left(1 - RMSE, 0\right)\%$$

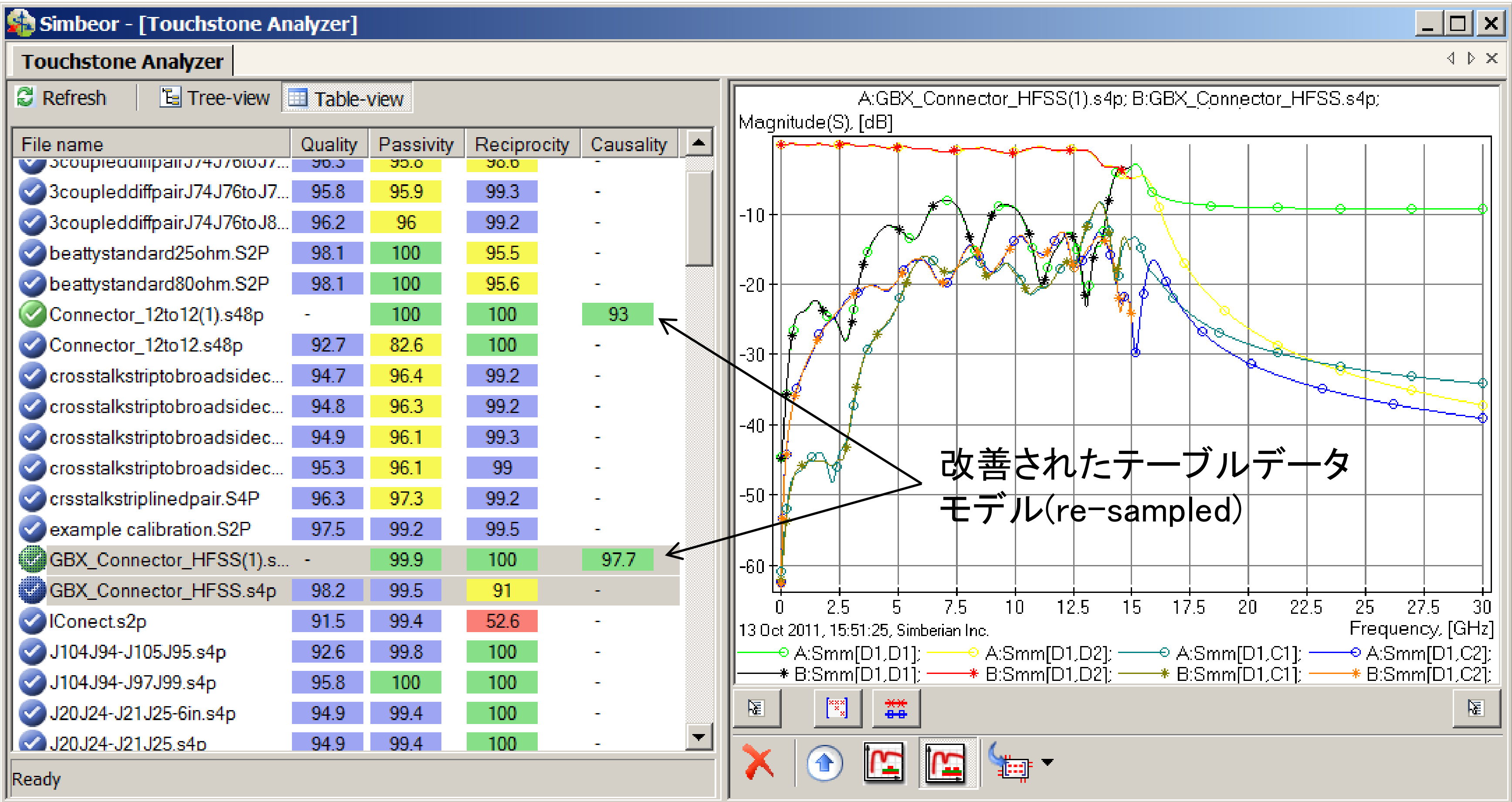
品質基準

	Model Icon/Quality	Quality Metric	RMSE
良い	- good	[99, 100]	[0, 0.01]
可	- acceptable	[90, 99)	(0.01, 0.1]
結論でない	- inconclusive	[50, 90)	(0.1, 0.5]
悪い	- bad	[0, 50)	> 0.5
不明	- uncertain	[0,100], not passive or not reciprocal	

悪非湯堂性か非対称性の可能性有

最終的な品質評価の例

全ての有理関数マクロモデルは受動的で、対称性があり、因果性が確保され許容できる精度のテーブルデータがあります（元のモデルの許容品質の確保）



まとめ：どのようにしてSパラメータモデルの問題を避けるか？

- 予備解析としてReciprocity（対称性）, Passivity（受動性） とCausality(因果性）の品質評価を行う
  - RQM とPQMの基準は99%以上 （許容レベル）
  - CQM は因果性のある数式モデルに関しては80%以上
- 有理関数モデルの精度を最終的な品質評価とする
  - QM は90%以上 （許容レベル）
- 低いスコアのRQM,PQM,QMのデータは使わない！
  - そうするべき主な理由は何をすべきかが判らないからです
- 品質基準にパスしたSパラメータモデルであってもシステムのシミュレーションでは使えない可能性があります
  - 理由は帯域、離散度、強制などが 悪いことが考えられます
- 一貫した周波数及びタイムドメイン解析を行うには有理関数か広帯域SPICEマクロモデルをTouchstoneモデルの代わりに使う必要があります

連絡先とリソース and resources

- Yuriy Shlepnev, Simberian Inc.

  shlepnev@simberian.com

  Tel: 206-409-2368（米国）
- Sパラメータの品質についてもっと知りたい場合は下記のプレゼンテーションを見て下さい（リクエストがあれば差し上げます）:
  - Y. Shlepnev, Quality Metrics for S-parameter Models, DesignCon 2010 IBIS Summit, Santa Clara, February 4, 2010
  - H. Barnes, Y. Shlepnev, J. Nadolny, T. Dagostino, S. McMorrow, Quality of High Frequency Measurements: Practical Examples, Theoretical Foundations, and Successful Techniques that Work Past the 40GHz Realm, DesignCon 2010, Santa Clara, February 1, 2010.
  - E. Bogatin, B. Kirk, M. Jenkins, Y. Shlepnev, M. Steinberger, How to Avoid Butchering S-Parameters, DesignCon 2011
  - Y. Shlepnev, Reflections on S-parameter quality, DesignCon 2011 IBIS Summit, Santa Clara, February 3, 2011