

チュートリアル\_33.01:

# VirtualLab™における超短パルスのモデリング

VirtualLab™ では光学系に超短パルスを伝播するモデリングが可能です。本書では基本技術を紹介します。

キーワード: fs pulses、material dispersion、pulse propagation、ultrafast optics、ultrashort pulses

必須ツールボックス: Starter Toolbox

関連チュートリアル: Tutorial 41.01



はじめに

VirtualLab™ におけるパルスモデリングの  
コンセプト

# パルス伝播

- 全電磁フィールドにおいて、パルスは電界と磁界  $E(\mathbf{r}, t)$  と  $H(\mathbf{r}, t)$  からなる、6つの実値コンポーネントを含んでおります。LightTransではこれらのコンポーネントを  $U(\mathbf{r}, t)$  と示しております。
- VirtualLab<sup>TM</sup> ではパルスの伝播シミュレーションが可能です。パルスは入射面において  $\bar{\Omega}_{\text{in}}$  と定義されます。パルスは、光学系を伝播され出射面にて  $\bar{\Omega}_{\text{out}}$  として定義されます。数学的には下記のように示されます:

$$U(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{\text{in}}, t) \longrightarrow U(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{\text{out}}, t) \quad (1)$$

# 複素フィールド

- ・ 伝播時間は  $\hat{t}$  として示されます
- ・ パルスの持続時間は  $\Delta\hat{t}$  として示されます。一般的に、持続時間はラテラル位置と、伝播による変化となります。
- ・ パルスはキャリア一周波数  $\bar{\omega}$  を含みます
- ・ 光学系に一般的ですが、VirtualLab™ でも、複素フィールド  $U_c$  を実フィールド・コンポーネント  $U$  に代わり採用しております。  
数式は下記の通りです：

$$U(\mathbf{r}, t) = 2\Re(U_c(\mathbf{r}, t)) \quad (2)$$



# 時間的フーリエ変換

- あらゆる点  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  において、タイムドメインにおけるフィールドコンポーネントは、フーリエ変換の周波数ドメインにおけるカウンターパートの関係となります:

$$\begin{aligned} U(\mathbf{r}, t) &= \mathcal{F}_{\omega}^{-1} \tilde{U}(\mathbf{r}, \omega) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}(\mathbf{r}, \omega) &= \mathcal{F}_{\omega} U(\mathbf{r}, t) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} E(\mathbf{r}, t) \exp(i\omega t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

- 複素フィールド・コンポーネント  $\tilde{U}_c$  は、アナログ定義が保たれます

# 包括機能

- VirtualLab<sup>TM</sup> では、シミュレーションに 包括機能  $U_e$  コンセプトを用いております。包括機能は、位置  $\hat{t}$  周辺にて、キャリアーファクターを持たないタイムドメイン  $e^{-i\bar{\omega}t}$  を持つパルスとして示されます。定義は下記となります：

$$U_c(\mathbf{r}, t) =: U_e(\mathbf{r}, t - \hat{t}) e^{-i\bar{\omega}t} \quad (5)$$

これに、スペクトル情報を加味し

$$\tilde{U}_c(\mathbf{r}, \omega) = \tilde{U}_e(\mathbf{r}, \omega - \bar{\omega}) e^{i\omega\hat{t}} \quad (6)$$

# VirtualLab™によるシミュレーション 1

- VirtualLab™ は (6) の  $\tilde{U}_c(r \in \bar{\Omega}_{out}, \omega)$  をハーモニックフィールドセットとしております
- 周波数サンプリングは、入射面において  $\bar{\Omega}_{in}$  として光源ダイアログで定義されます。これにより、幾つのハーモニックフィールドを伝播するか定義されます。
- サンプリング負荷を軽減するために、VirtualLab は、適正な周波数サンプリング  $\tilde{U}_e$  を (6) にのみ適用します
- (6) の位相ファクター  $e^{i\omega t}$  は、タイムドメインにフーリエ変換する前に解説的に扱われます。ここで  $e^{i\omega t}$  は、Optical Path Length (OPL) Analyzerにて、算出されます。

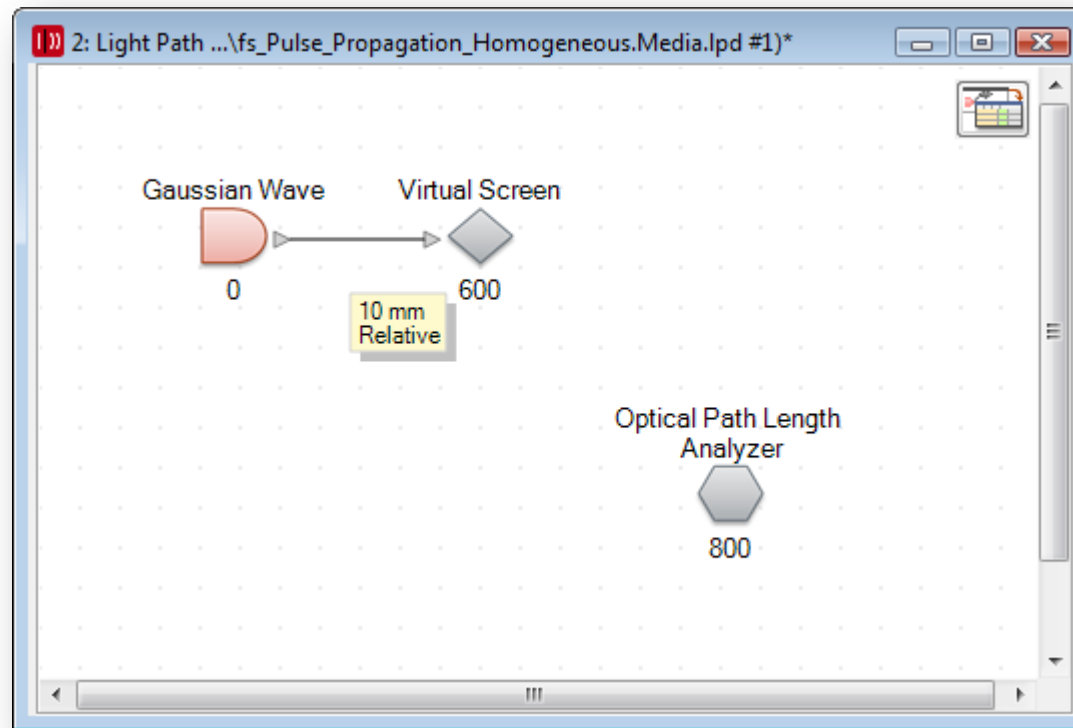
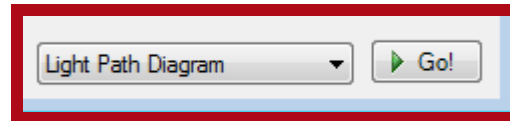
# 均質媒体内のパルス伝播

# VirtualLab™によるシミュレーション: 例

- 例には、空気中のフェムト秒パルスの伝播を採用します
- サンプルファイル:  
Tutorial\_33.01\_VLF1\_free\_space\_propagation.lpd
- 光源は、10 fs パルス、キャリアー波長 800 nmです。 29のハーモニックフィールドからなります。
- パルスの伝播距離: 10 mm

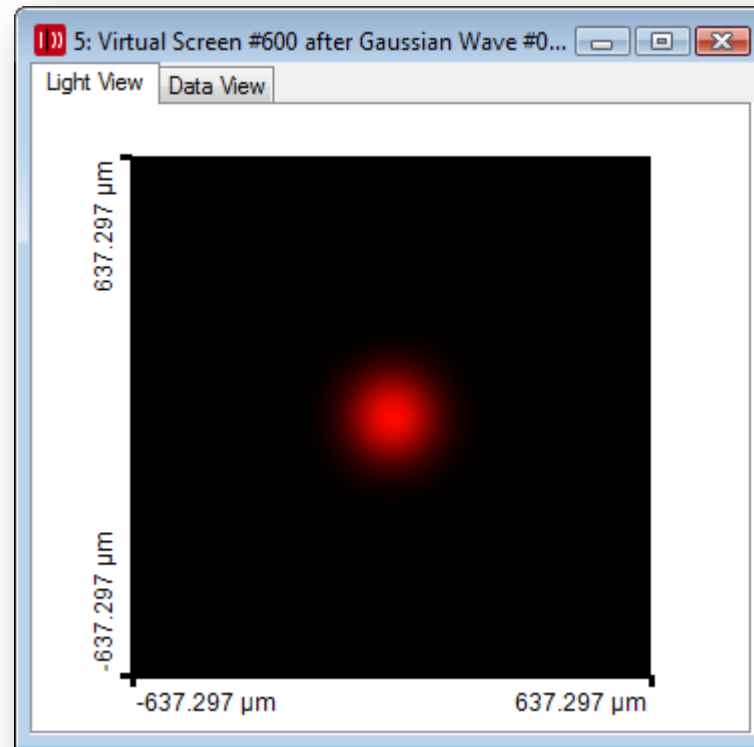
# VirtualLab™によるシミュレーション：例

- LPDを起動



# VirtualLab™によるシミュレーション：例

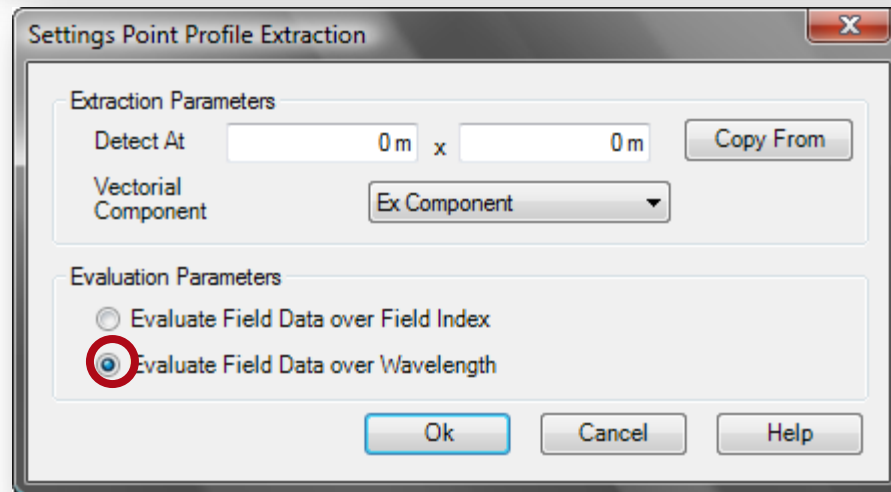
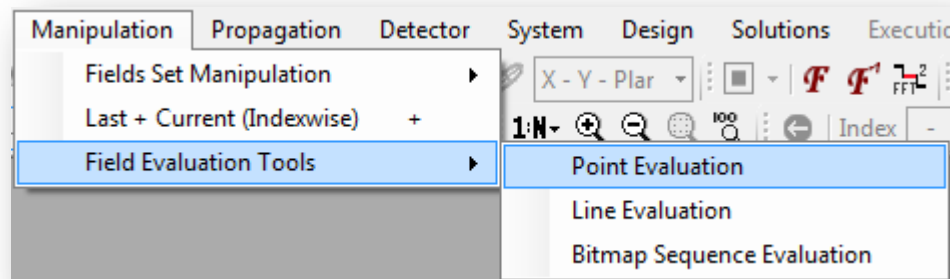
- ハーモニックフィールドセット(HFS)の結果



$$\tilde{U}_c(r \in \bar{\Omega}_{\text{out}}, \omega) = \tilde{U}_e(r \in \bar{\Omega}_{\text{out}}, \omega - \bar{\omega}) e^{i\omega \hat{t}}$$

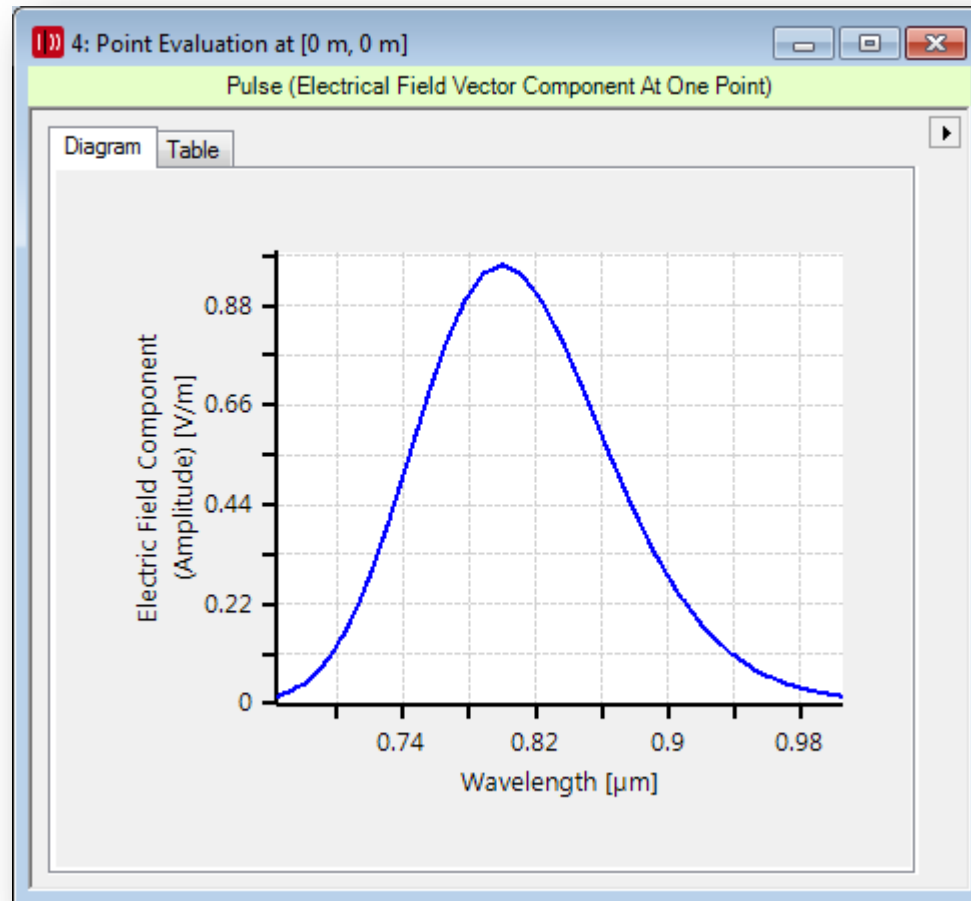
# Field Evaluation Tools

- VirtualLab™ 4.5 以降のバージョンでは、パルスのタイムドメインをField Evaluation Toolsで解析可能です





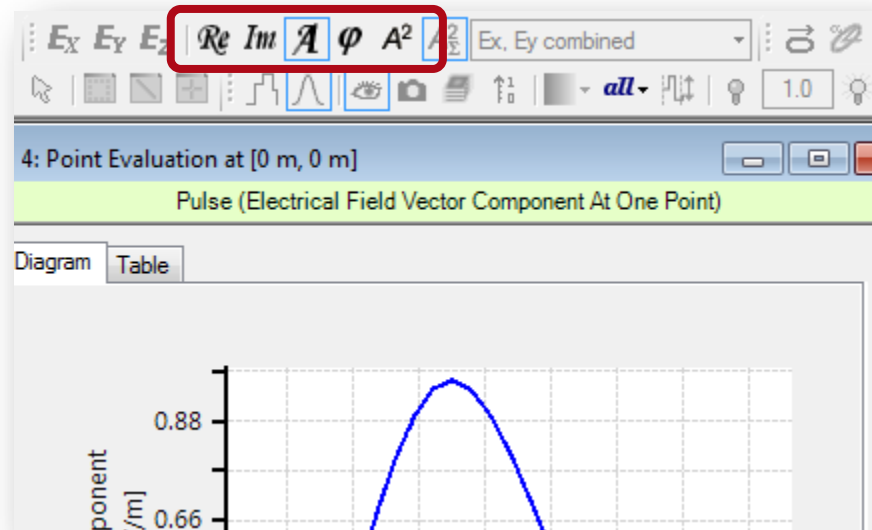
# VirtualLab™によるシミュレーション：例



$$\tilde{U}_c(0, 0, z_{\text{out}}, \omega) = \tilde{U}_e(0, 0, z_{\text{out}}, \omega - \bar{\omega}) e^{i\omega \hat{t}}$$

# VirtualLab™によるシミュレーション: 例

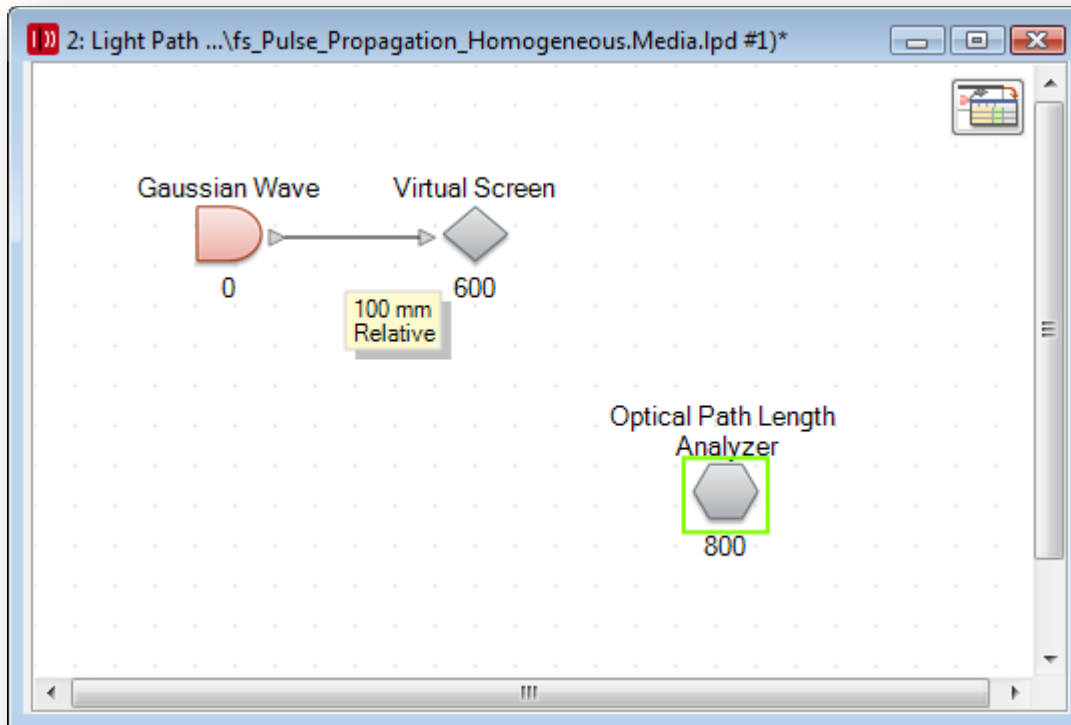
- For pulse modeling a new diagram type has been introduced.
- It allows investigation of amplitude, phase, ...



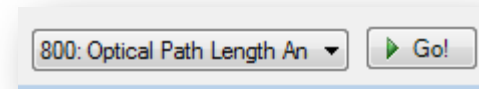
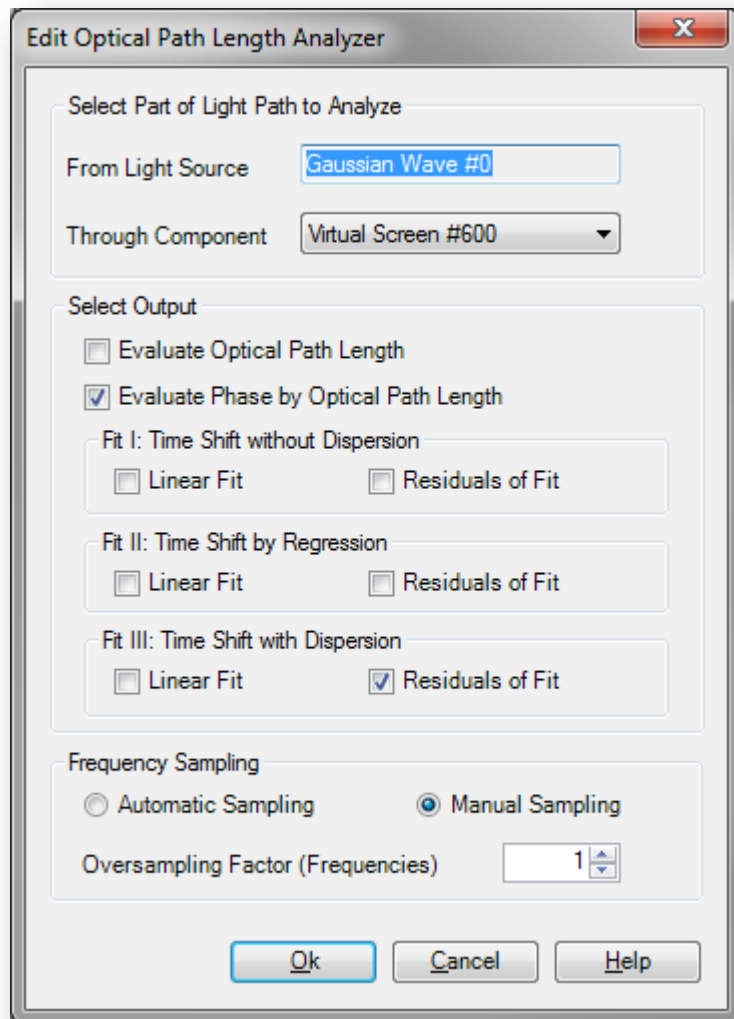
- In particular it allows the temporal Fourier transformation

# Optical Path Length (OPL) Analyzer

- フーリエ変換前に、タイムシフトをOPL Analyzerにて計算する必要があります



# VirtualLab™によるシミュレーション：例



# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

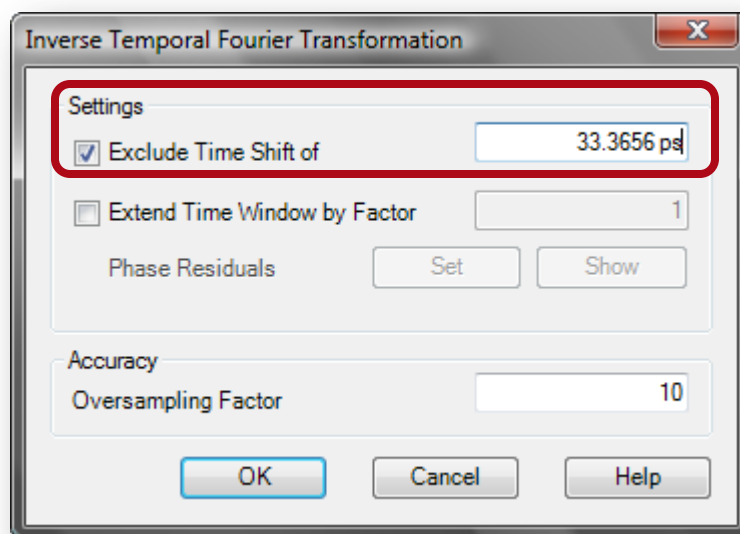
Detector Results

Result
33.366 ps

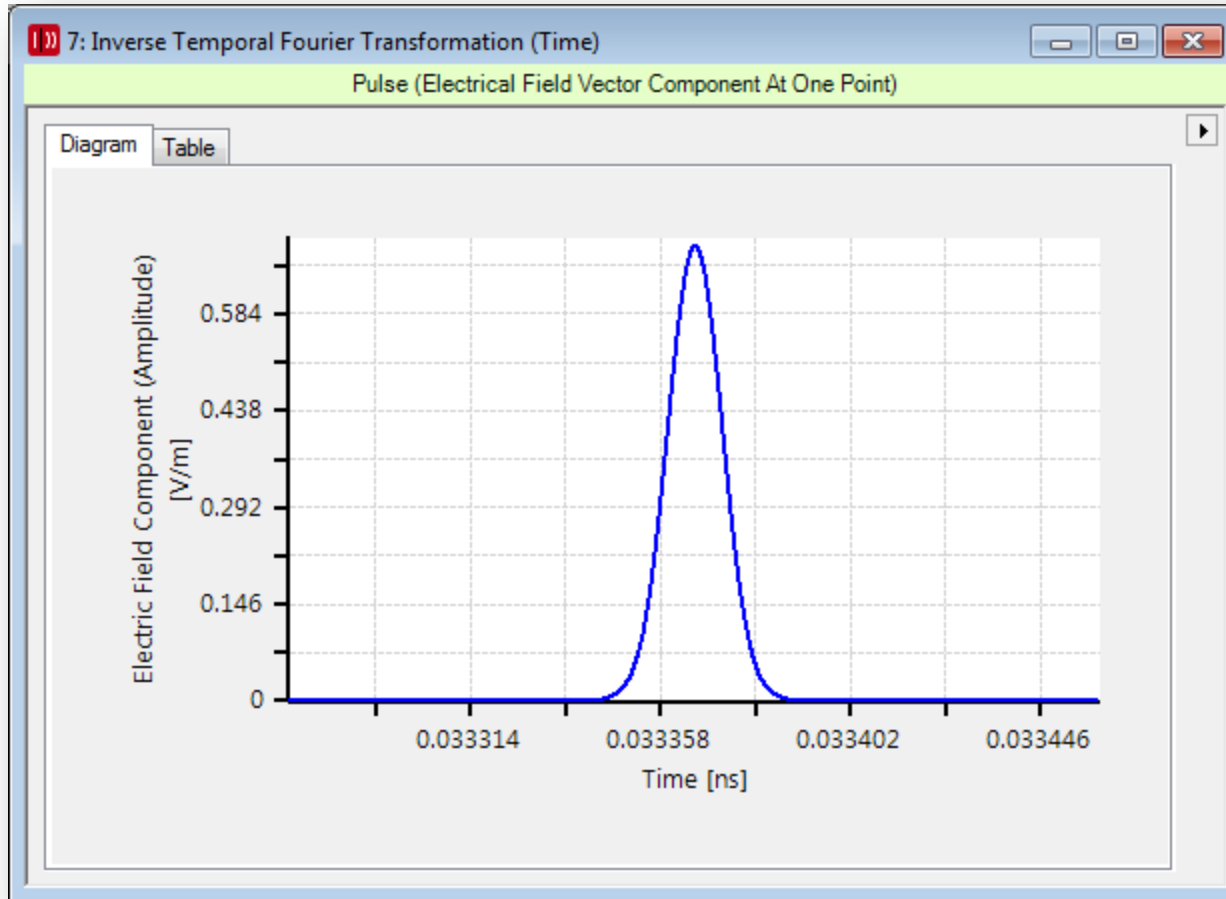
- タイムシフト: 33.366 ps
- コピー＆ペーストにて、フーリエ変換に加えます



# 時間的フーリエ変換



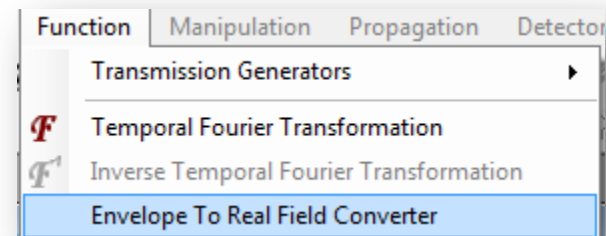
# VirtualLab™におけるシミュレーション：例



$$U_e(0, 0, z_{\text{out}}, t - \hat{t})$$

# Real Field Converter のEnvelope

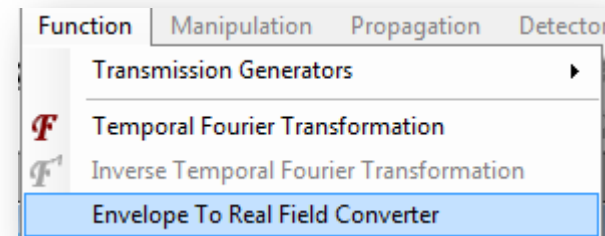
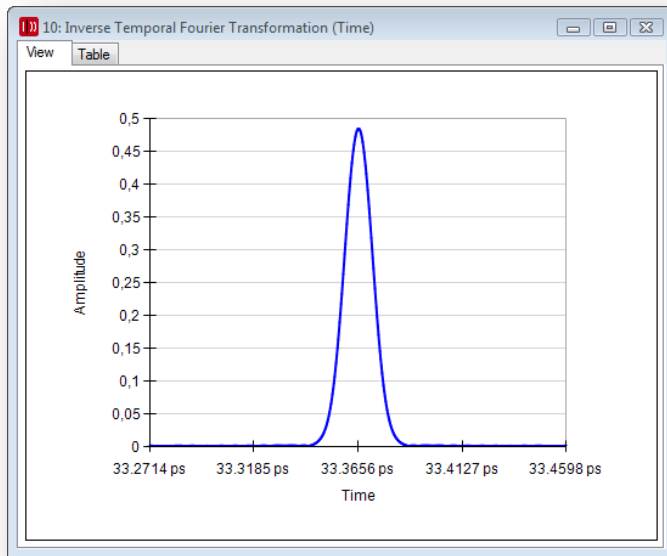
- 反転時間的フーリエ変換は、タイムドメインの包括機能を生みます
- Envelope to Real Field Converterにより、 $e^{-i\omega t}$  を包括機能に掛け算します。これにはキャリア一周波数が含まれます。数式(2)は、"Real Field Component"に混合されます。
- 高いキャリア一周波数により、タイムドメインにおけるオーバーサンプリングをFactor 10またはそれ以上とする事で、最適な結果を得る事ができます





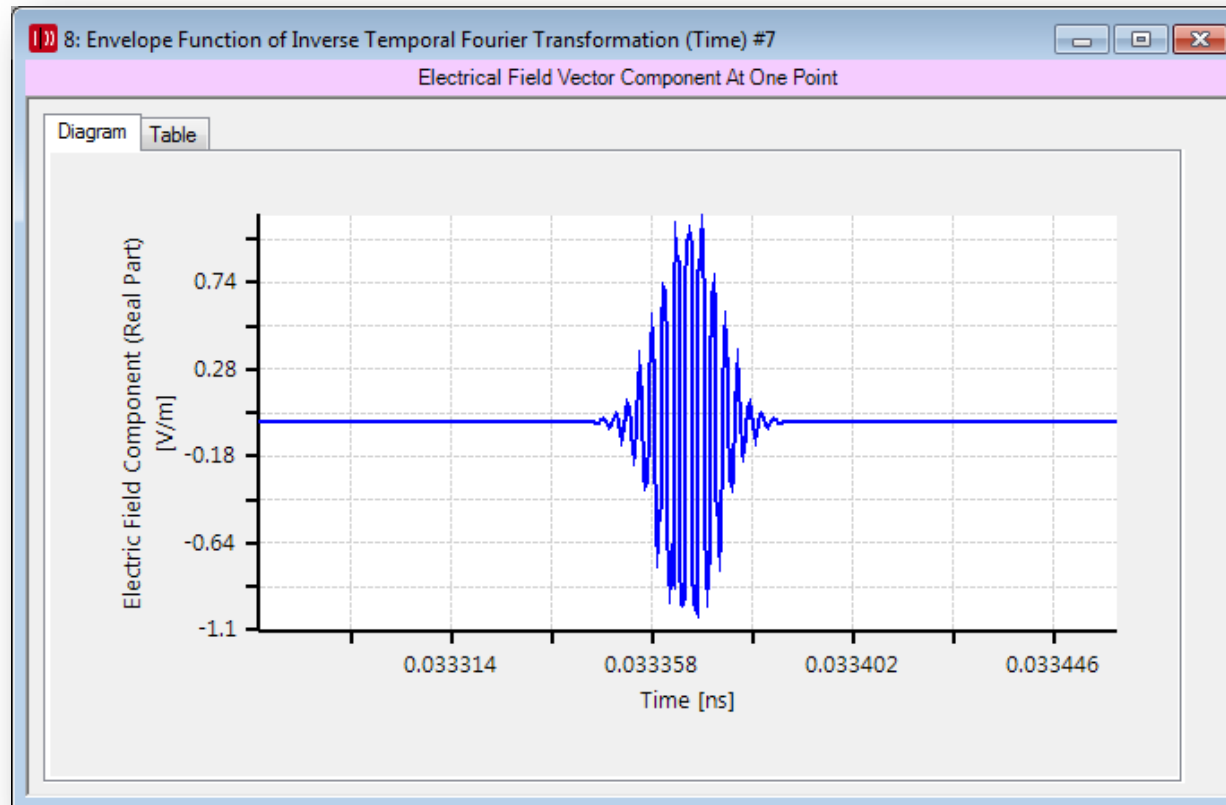
# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

- オーバーサンプリングをFactor 20とし反転フーリエ変換にて、包括機能を計算します



$$U_e(0, 0, z_{\text{out}}, t - \hat{t})$$

# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

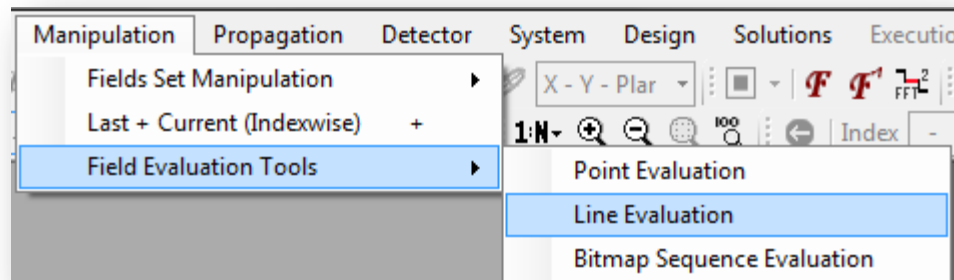


$$U(0, 0, z_{\text{out}}, t)$$

# Line Evaluation Tool

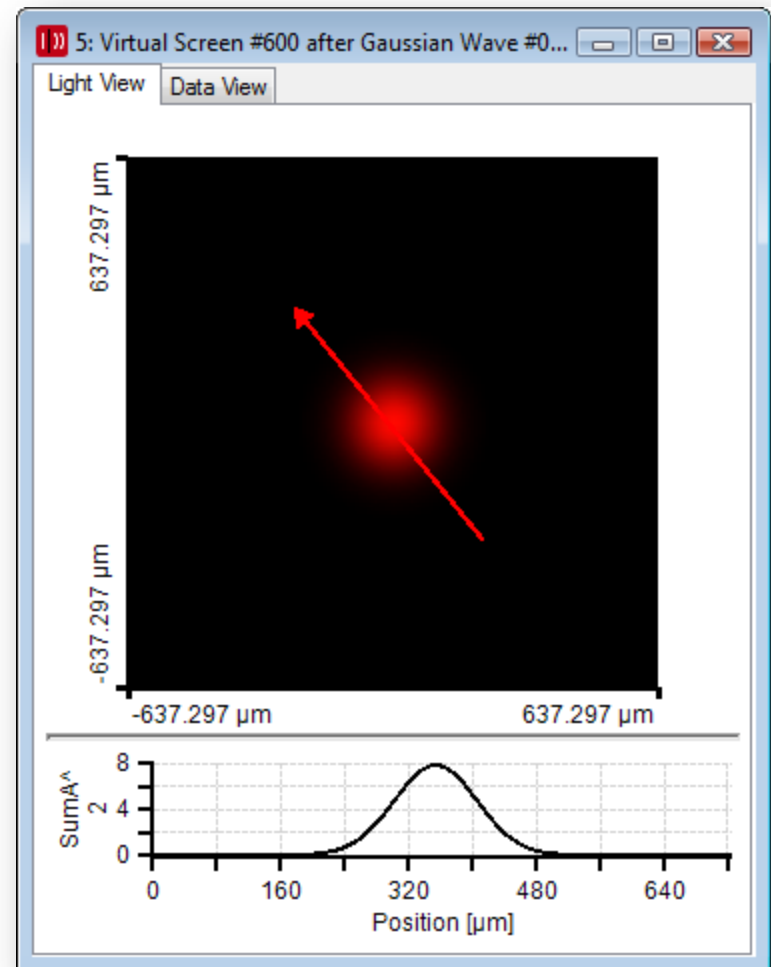
- "Point Evaluation"や"Line Evaluation"により面上のライン沿いに下記を得る事が可能です:

$$\tilde{U}_c(r \in \bar{\Omega}_{\text{out}}, \omega) = \tilde{U}_e(r \in \bar{\Omega}_{\text{out}}, \omega - \bar{\omega}) e^{i\omega \hat{t}}$$

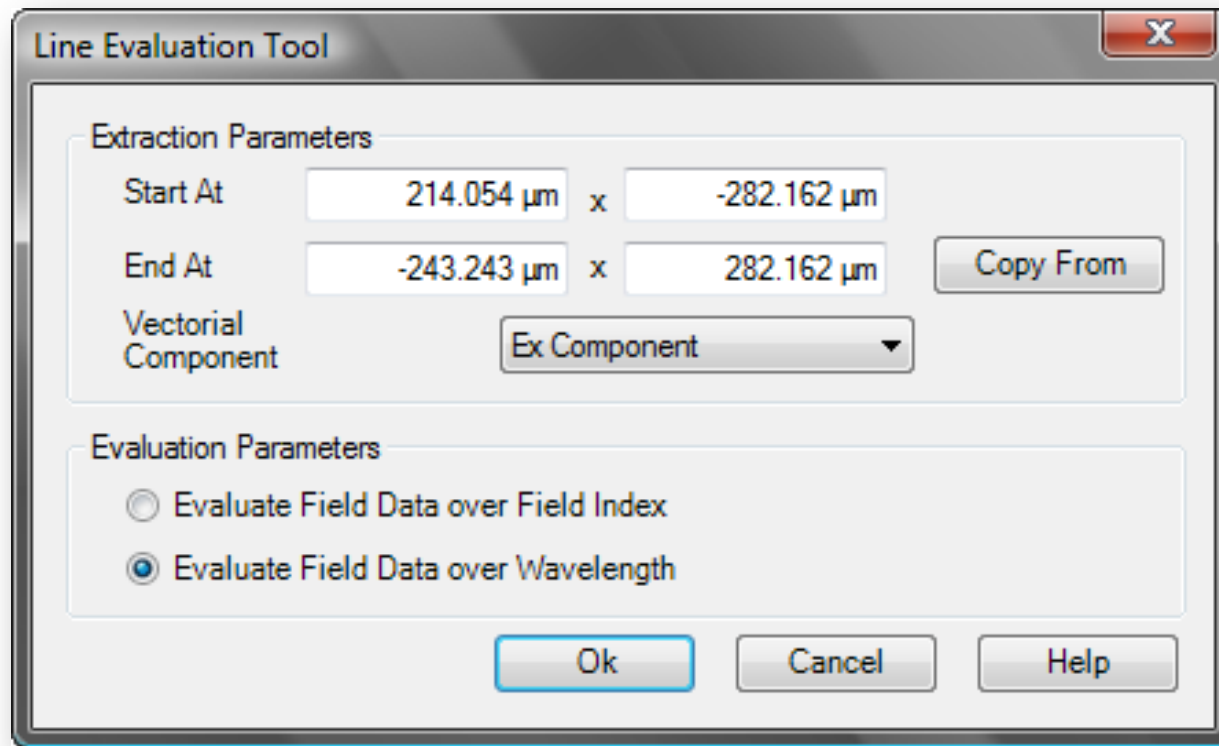


# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

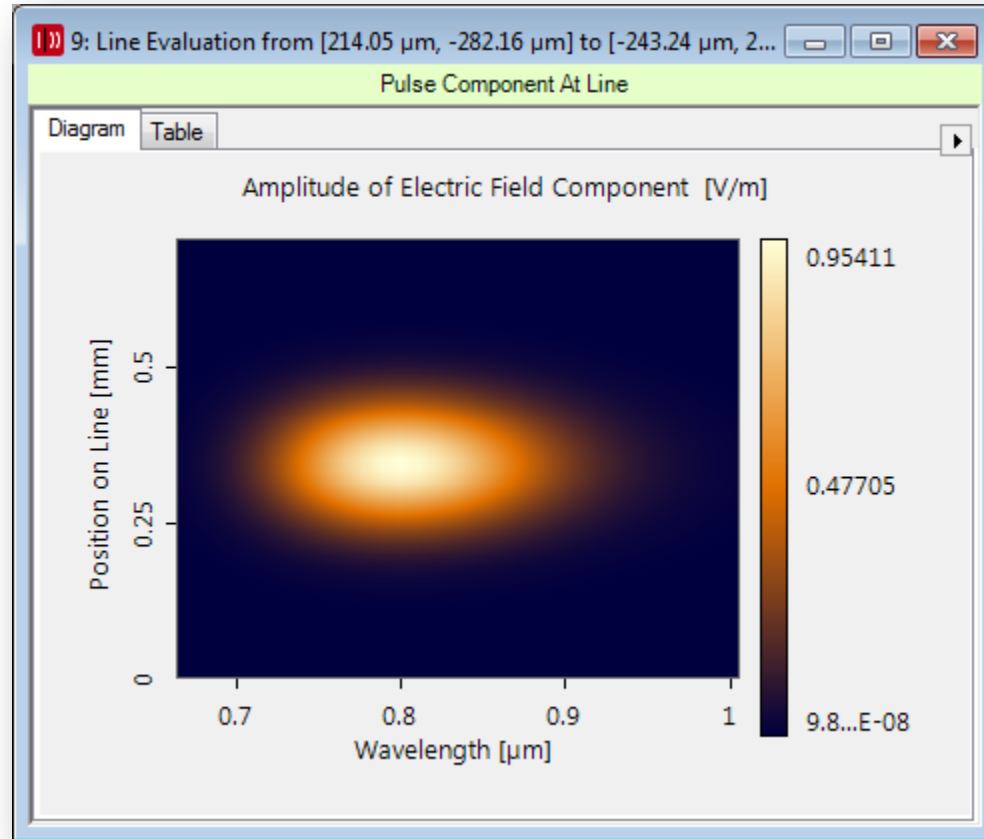
- シミュレーションされたHFSにおける、ライン表示
- Line Evaluation Tool の活用



# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

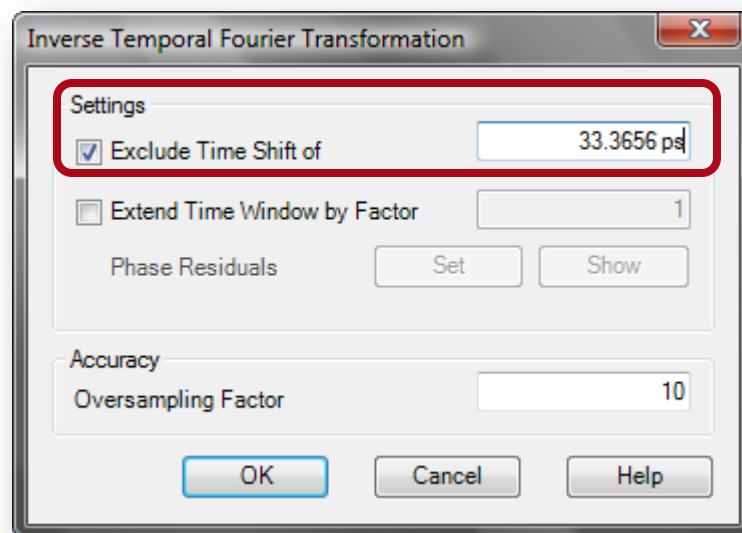


# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

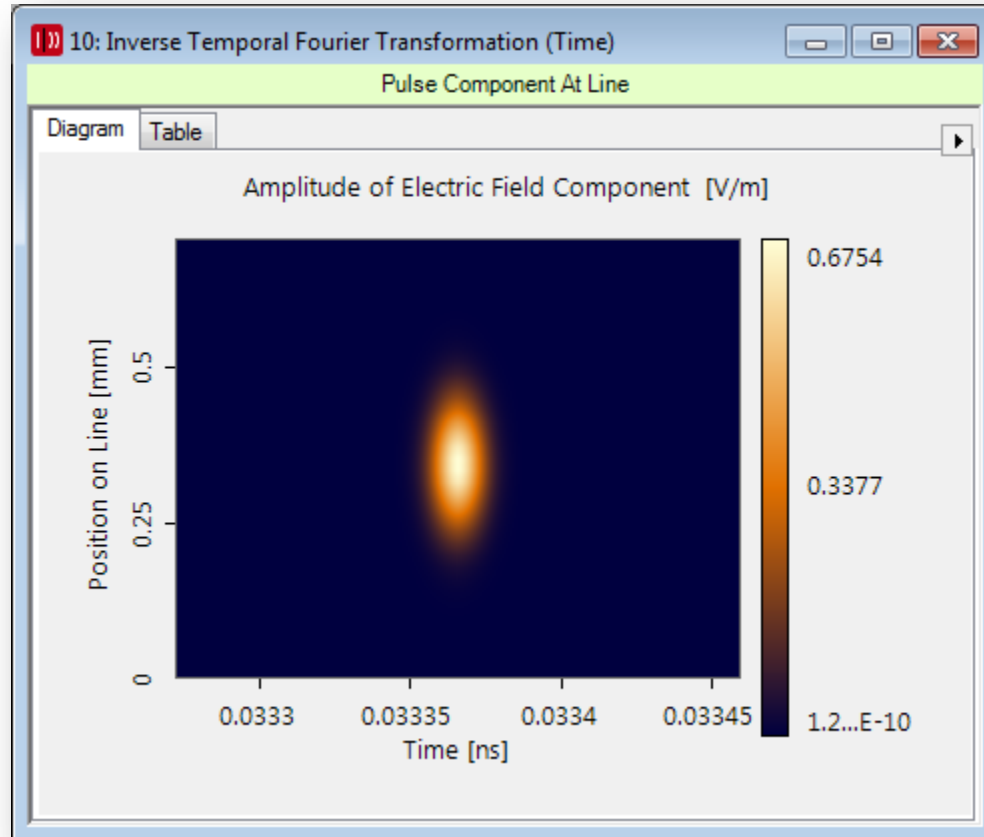


$$\tilde{U}_c(r \in \text{Line}, \omega) = \tilde{U}_e(r \in \text{Line}, \omega - \bar{\omega}) e^{i\omega \hat{t}}$$

# VirtualLab™におけるシミュレーション：例



# VirtualLab™におけるシミュレーション：例



$$U_e(r \in \text{Line}, t - \hat{t})$$



# フェムト秒パルス光源の仕様

# フィールドを時間と空間に分離

- パルスモデリングにおいて、入射面を分離してアプローチする手法は広く知られております:

$$U_c(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{in}, t) = T(t) U_c(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{in})$$

- 包括機能のコンセプトを用います

$$U_c(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{in}, t) = T_e(t) U_c(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{in}) e^{-i\bar{\omega}t}$$

$\hat{t} = 0$  が入射面にあると想定

- スペクトルの結果は下記となります:

$$\tilde{U}_c(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{in}, \omega) = \tilde{T}_e(\omega - \bar{\omega}) U_c(\mathbf{r} \in \bar{\Omega}_{in})$$

# ガウシアンタイプの包括機能

- ・ 注目すべきは、ガウシアンタイプの包括機能に分割フォームのパルス

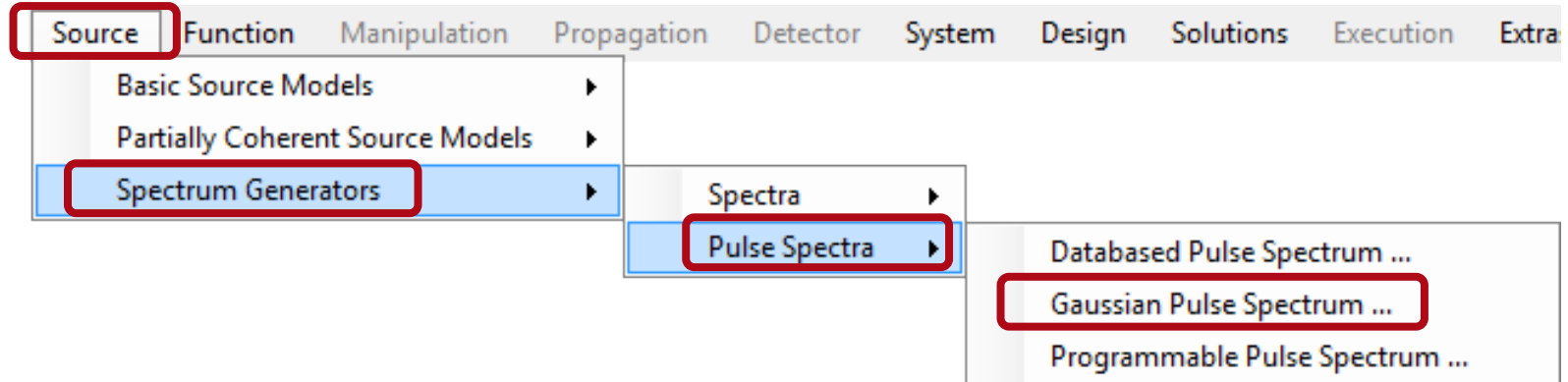
$$T_e(t) = \exp[-a t^2]$$

- ・ 時間的なガウシアンタイプの包括機能において、周波数スペクトラムは、解析的にガウシアンとしても計算可能です:

$$\tilde{T}_e(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2a}} \exp\left[-\frac{\omega^2}{4a}\right]$$

# ガウシアンタイプの包括機能

- VirtualLab™ において、ガウシアン・パルス・スペクトラムは、パルス持続をFWHMまたは、 $1/e$  値（インテンシティーに対し）、キャリア波長、ガウシアン of 時間と周波数ドメインの切り捨てなどから定義されます



# ガウシアンタイプの包括機能

Gaussian Pulse Spectrum

Pulse Specification

☒ Definition by FWHM ☐ Definition by 1/e Diameter

Pulse Duration 10 fs

Carrier Wavelength 800 nm

Carrier Frequency 374.741 THz

Estimated Increase of Time Window 5

Numerical Settings

Squared Amplitude Truncation (Frequency Domain) 0.01 %

Resulting Size of Angular Frequency Window 1.01067 PHz

Squared Amplitude Truncation (Time Domain) 0.01 %

Resulting Size of Time Window 182.262 fs

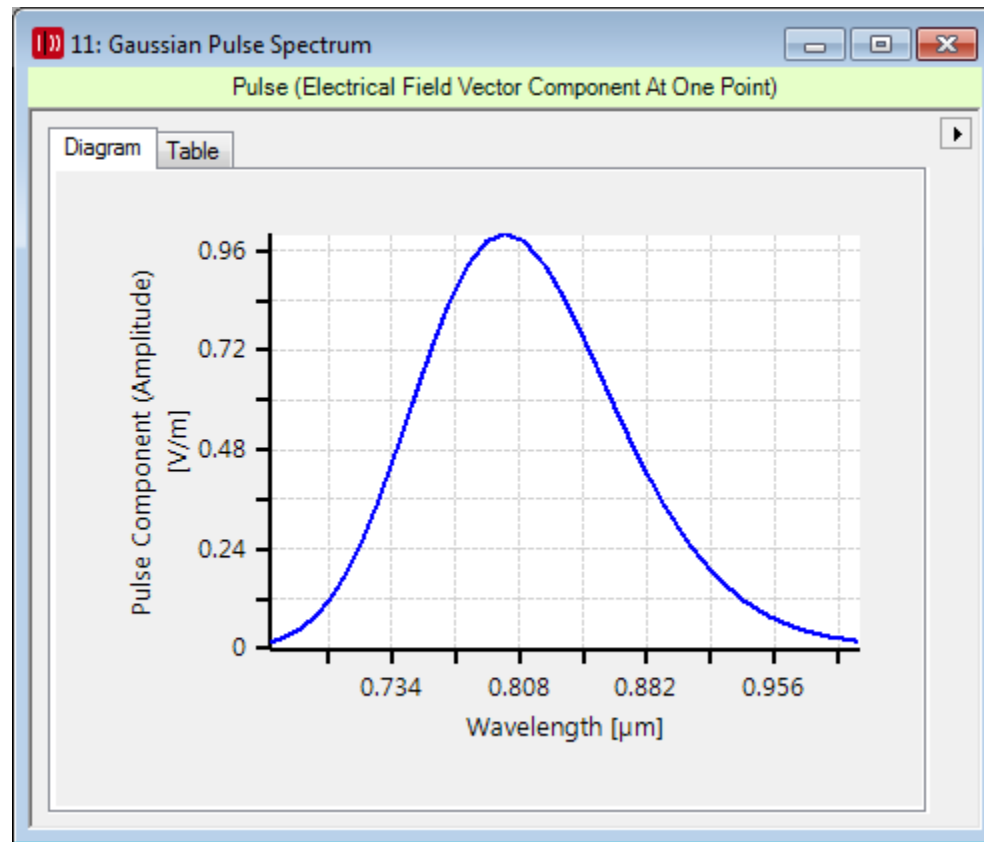
Resulting Samples 29

OK Cancel Help



一般的に、持続中に伝播パルスは増加します。 Time windowはこれに従い決定します。

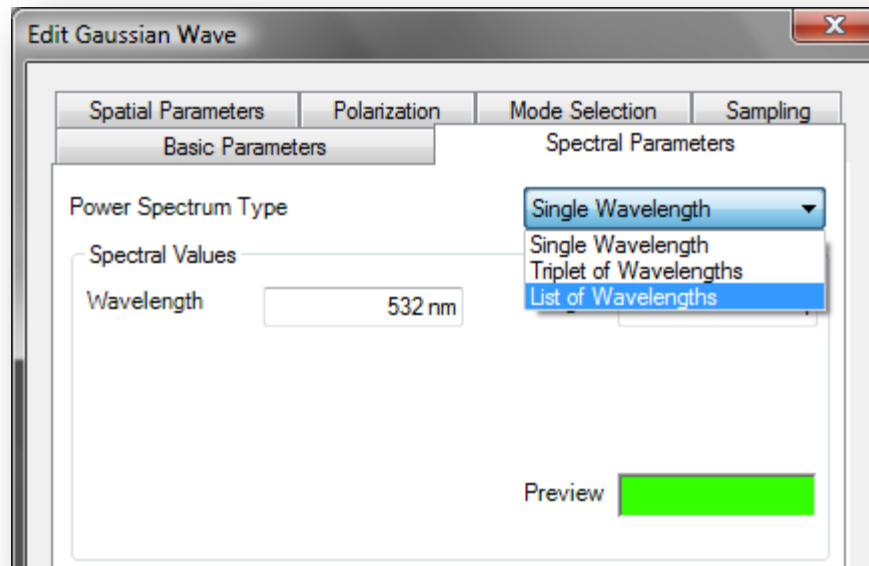
# ガウシアンタイプの包括機能



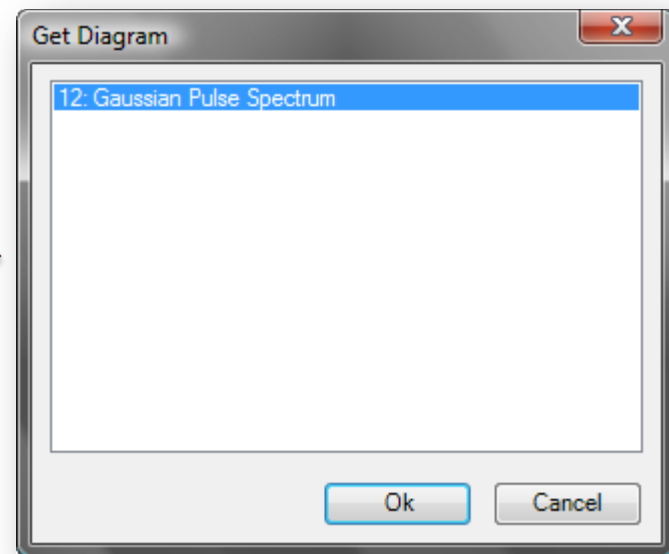
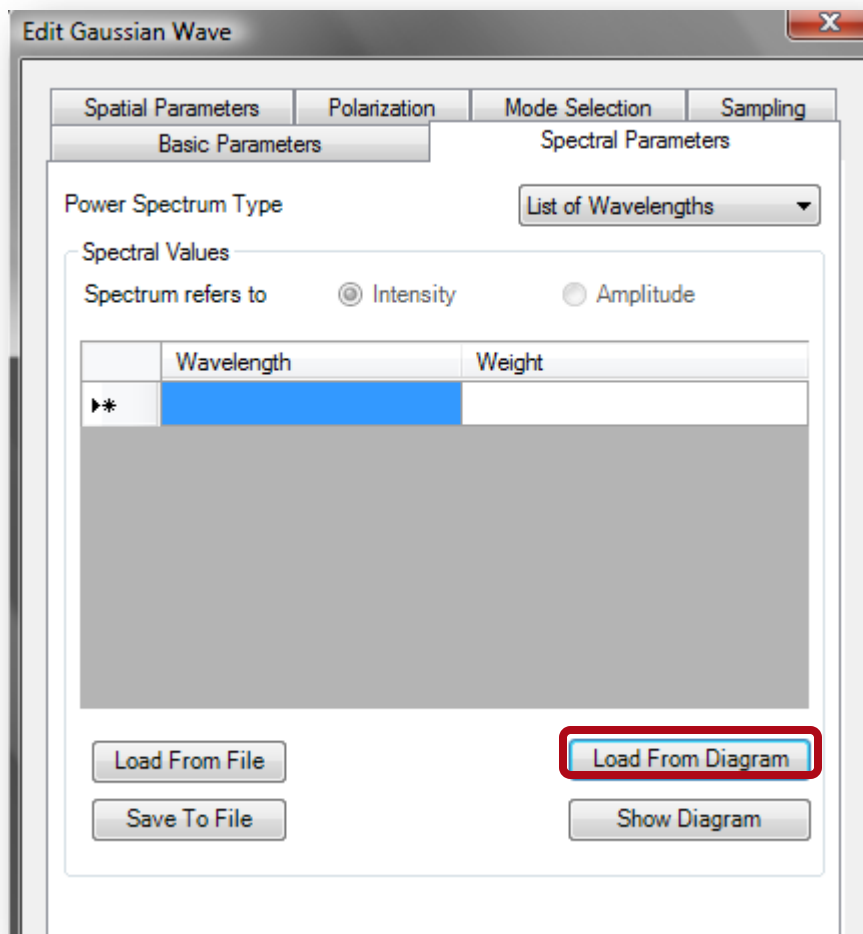
$$\tilde{T}_e(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2a}} \exp \left[ -\frac{\omega^2}{4a} \right]$$

# パルス仕様

- 包括スペクトラムは、VirtualLab™ におけるあらゆる光源に”Spectral Parameters Tab”を用いて採用する事が可能です

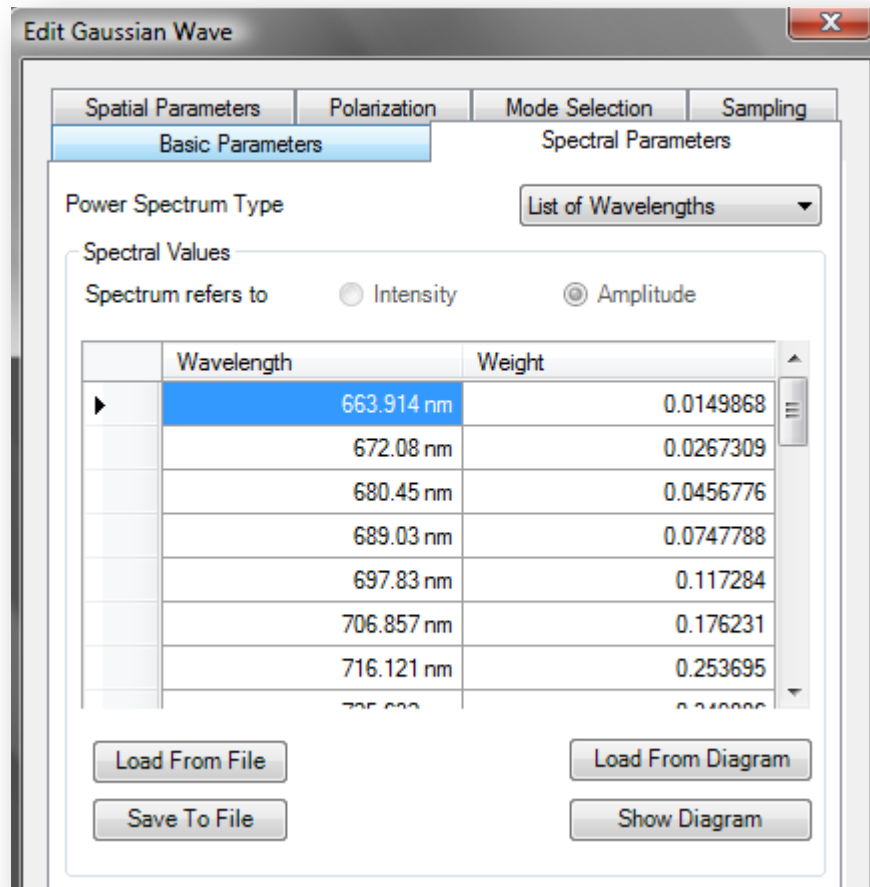


# パルス仕様





# パルス仕様

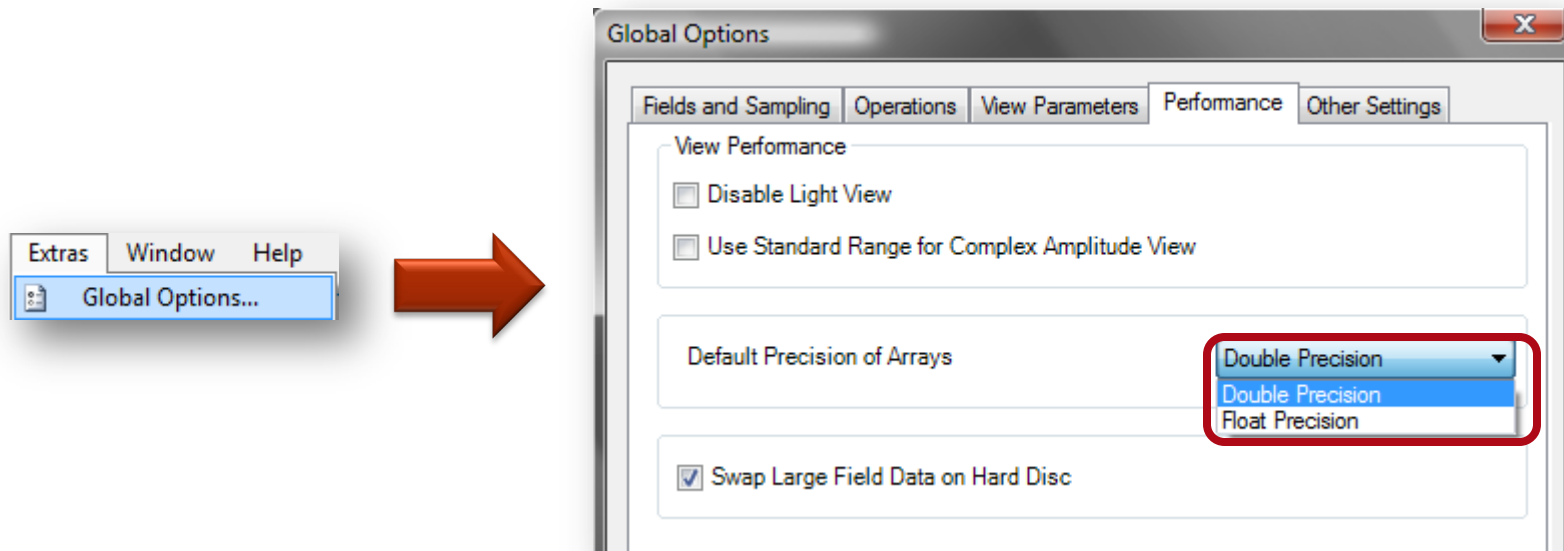


パルス光源が  
シミュレーション可能な  
状態となりました！

# 素材ディスパージョンのための Smart Sampling Reduction

# Double Precision が必須

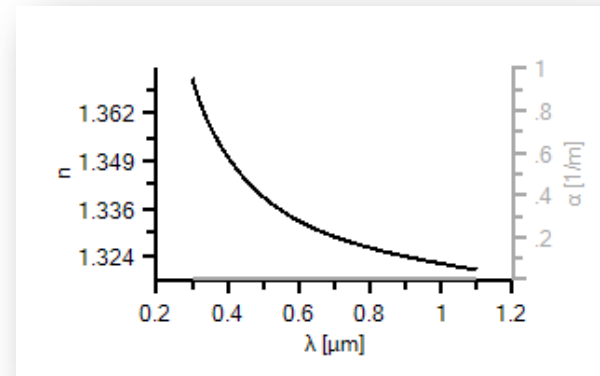
- 素材のディスパージョンの影響を加味したフェムト秒パルスモデリングには、LightTrans社では、VirtualLab™ のシミュレーションにおいて、演算精度を Double Precisionに向上する事をお奨めします



- この時点で、この作業を行って下さい!!!

# VirtualLab™におけるシミュレーション: 例

- ・ ここでの例では、フェムト秒パルスの中伝播を考慮します
- ・ サンプルファイル:  
Tutorial\_33.01\_VLF2\_material\_dispersion.lpd
- ・ 光源の仕様: キャリアーありの10フェムト秒パルス、波長: 800nm、  
ハーモニックフィールド数: 29
- ・ パルス伝播距離: 100 mm
- ・ 水のディスパージョンデータ:



# Initial Time Window

- ”Envelope spectrum”の設定画面

Gaussian Pulse Spectrum

Pulse Specification

☒ Definition by FWHM ☐ Definition by 1/e Diameter

Pulse Duration: 10 fs

Carrier Wavelength: 800 nm

Carrier Frequency: 374.74 THz

Estimated Increase of Time Window: 5

Numerical Settings

Squared Amplitude Truncation (Frequency Domain): 0.01 %

Resulting Size of Angular Frequency Window: 1.0107 PHz

Squared Amplitude Truncation (Time Domain): 0.01 %

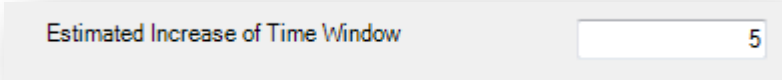
Resulting Size of Time Window: 182.26 fs

Resulting Samples: 29

OK Cancel Help

Time window : 182.3 fs

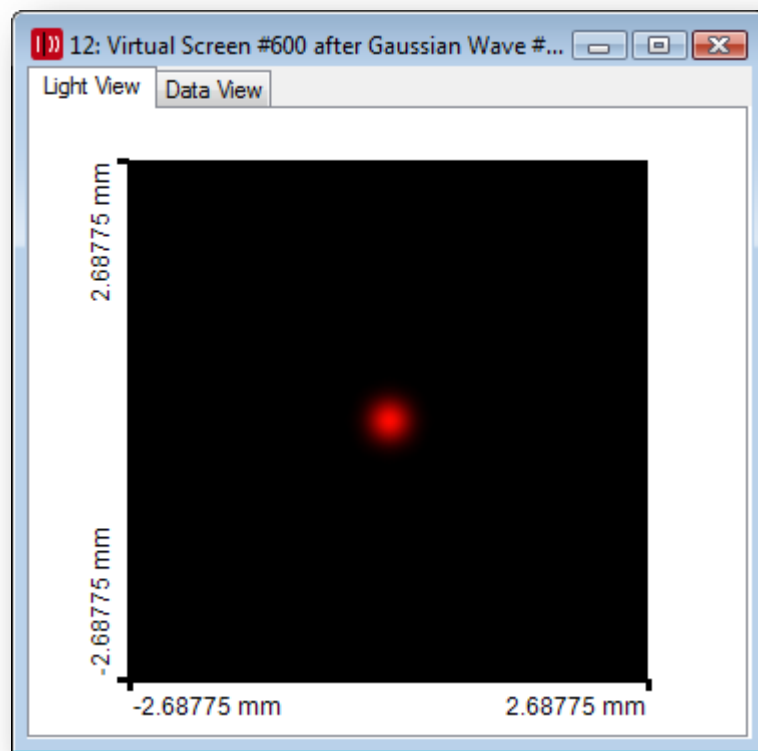
# Initial Time Window

- ・ パルス包括機能の仕様は、シミュレーションに採用可能なタイムウィンドウが含まれます
- ・ タイムウィンドウは、下記にてオーダーとして増やす事が可能です  


The screenshot shows a software interface with a label 'Estimated Increase of Time Window' and a numeric input field containing the value '5'.
- ・ しかし、伝播されるハーモニックフィールド数も増加します
- ・ 問題点：素材ディスパージョンは一般的に、パルスの著しい拡大に直結します。結果としてパルスは、タイムウィンドウがAliasing(偽信号)を避けるように調整される必要があります。
- ・ この問題点の例を次頁以降に説明します

# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

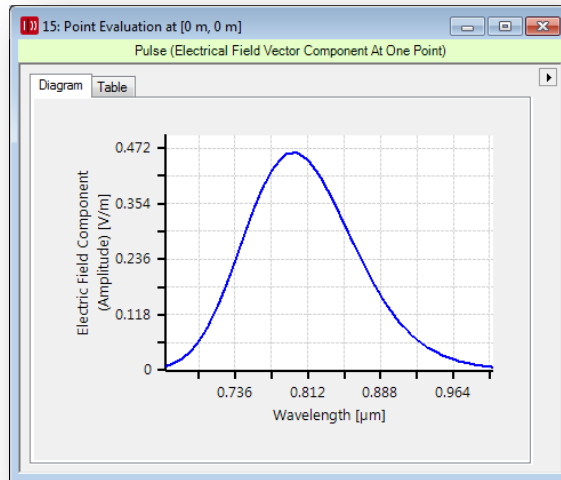
- サンプルファイルの結果



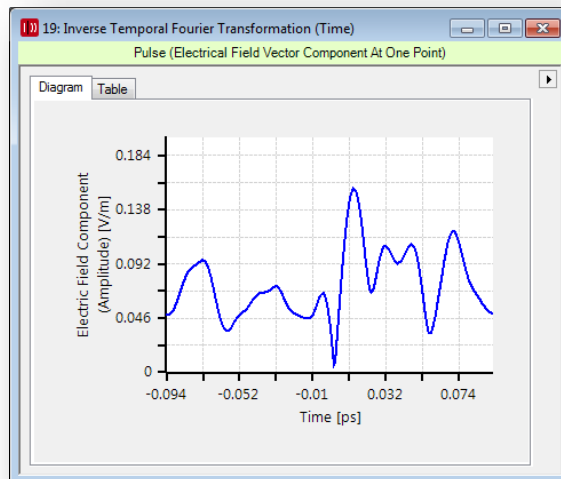
Point evaluation (0,0)



# VirtualLab™におけるシミュレーション：例



- 包括波長の倍率

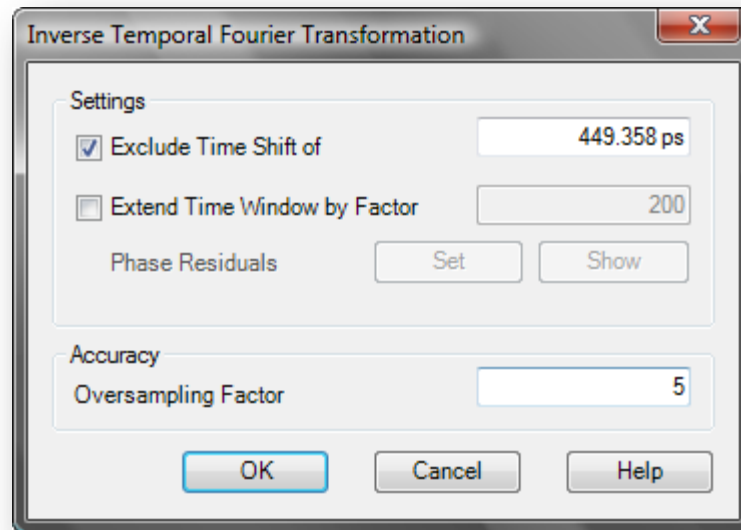


- 包括波長の位相
- ランダム上に固定
- 推理：低サンプリング



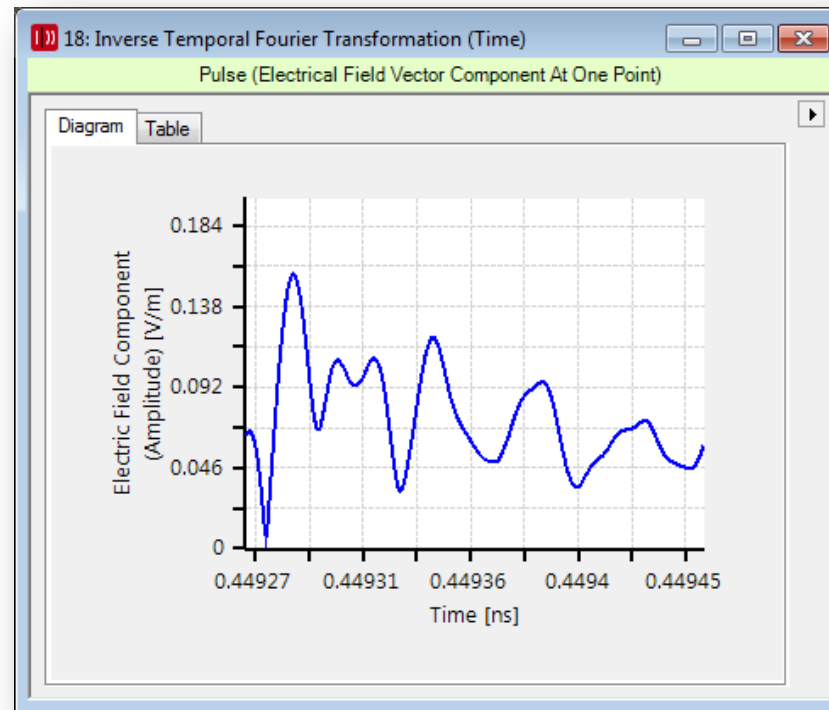
# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

- OPL Analyzer の実行
- タイムシフトの計算：449.358 ps
- 反転フーリエ変換の実行



# VirtualLab™におけるシミュレーション: 例

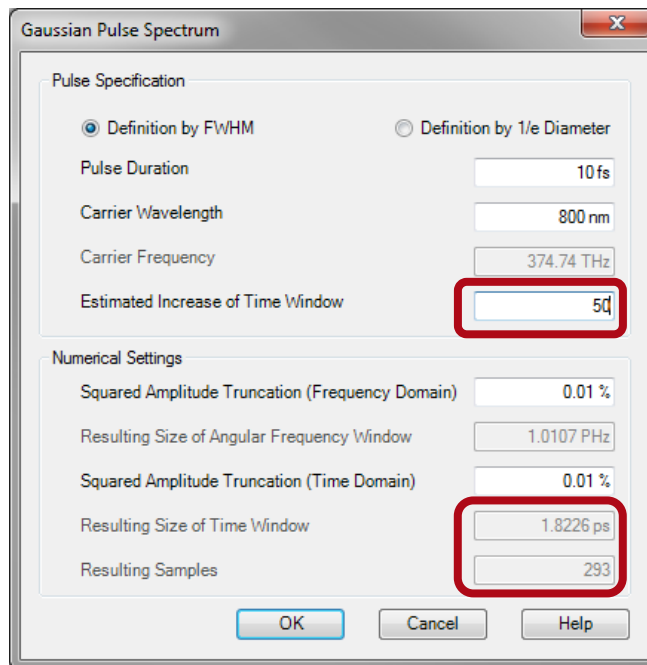
- ・ 包括Envelopeの結果:



- ・ 結果には物理的な意味がありません。タイムウィンドウはハウスパルスに対し、小さ過ぎます。

# 初期タイムウィンドウのサイズ？

- 本例では、結果として得られたパルスは数psのサイズとなりました
- 初期タイムウィンドウの準備には、250 ハーモニックフィールドが必要です！

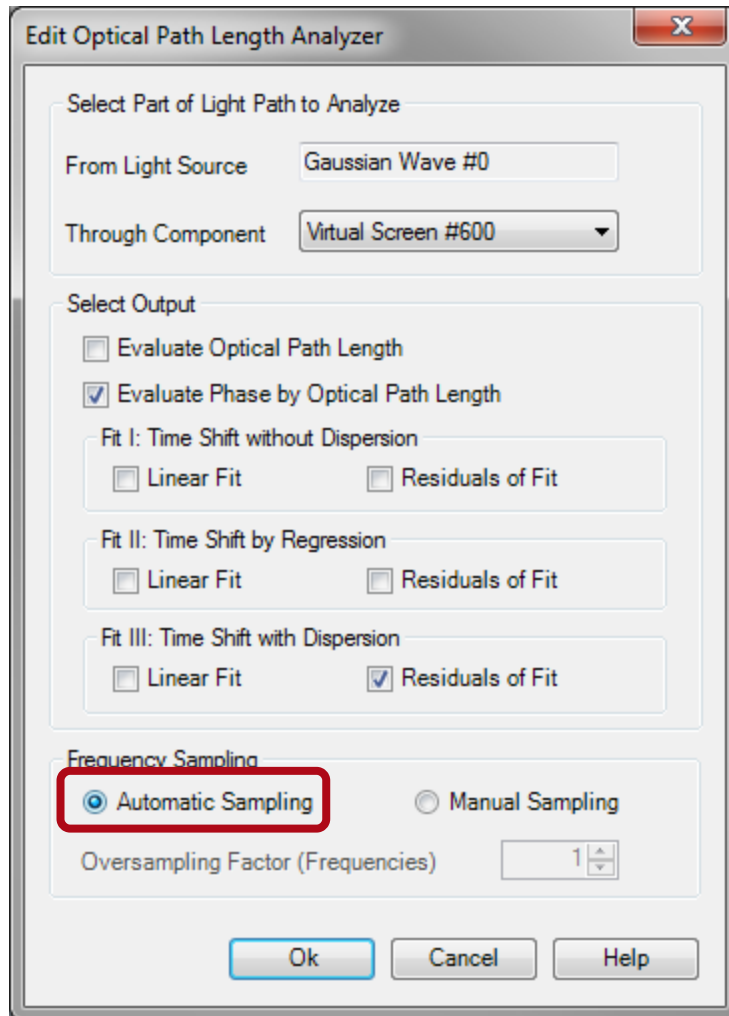


迅速なシミュレーションとしては  
有効ではありません！

# 素材ディスパージョンの”Smart Inclusion”

- VirtualLab™ では、この問題に、スマートな解決策を用意しております
- OPL analyzerは、素材ディスパージョンにより位相に変化を来します:  
Phase residual
- 任意の微小周波数サンプリングに対し計算する事が可能です
- スマートな処理により、ハウスパルスが初期値より増加する事から  
タイムウィンドウの増加を可能としております
- 次頁にこの手法をデモンストレートします

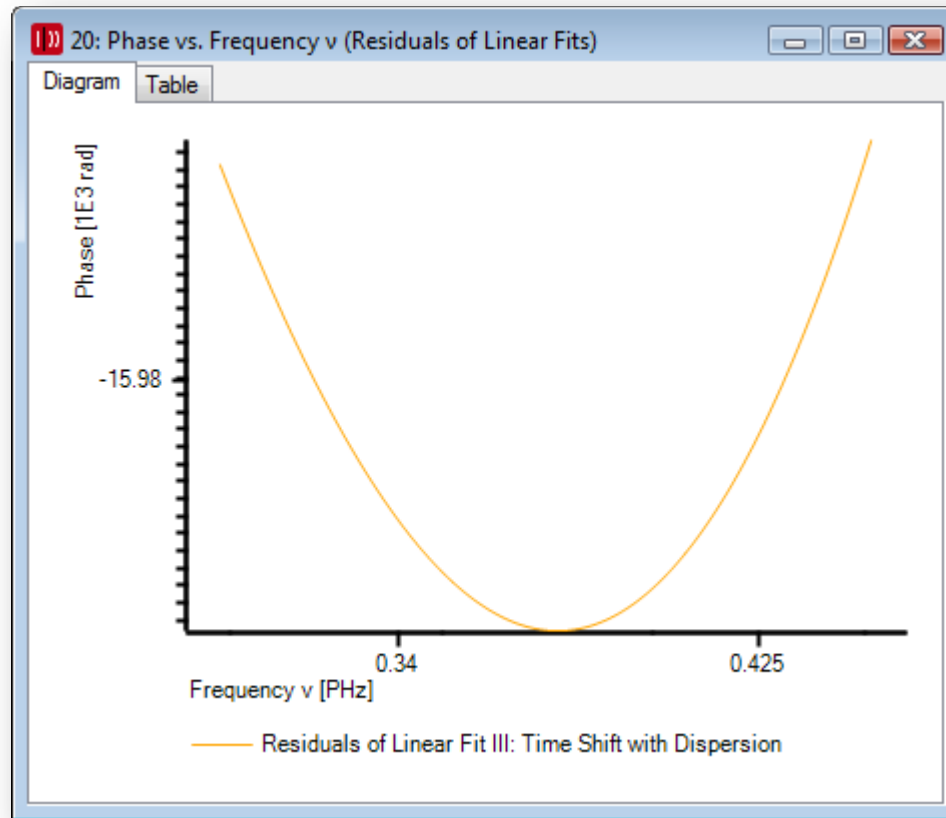
# OPL Analyzerによる位相残余の計算



- 周波数サンプリングを”Automatic”モードに設定します
- OPL Analyzerを開始します



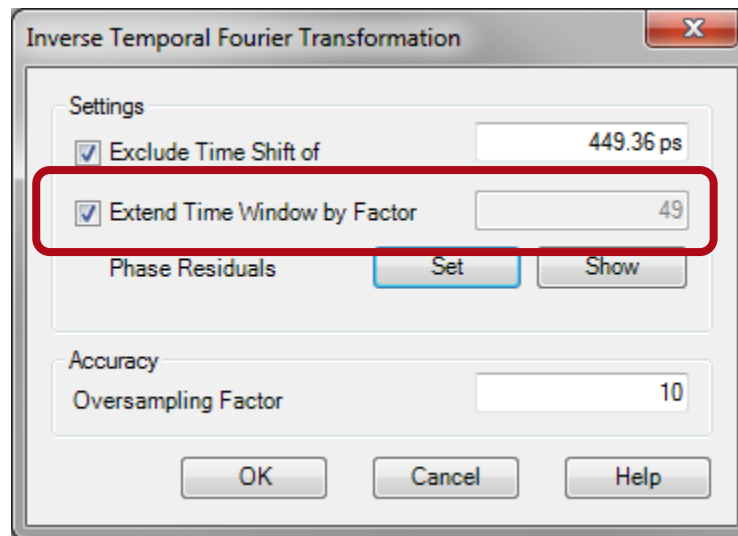
# VirtualLab™におけるシミュレーション：例



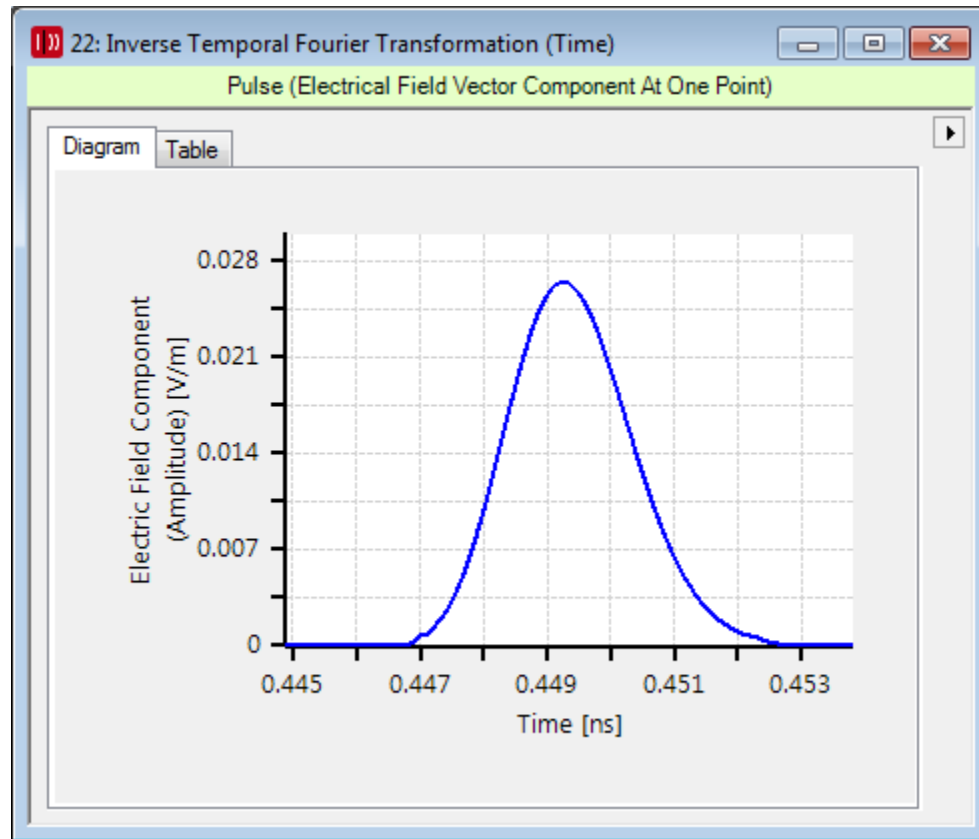
素材ディスパージョンによる、位相残余

# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

- 反転フーリエ変換の実行
- 計算された位相残余ダイアグラムを含める



# VirtualLab™におけるシミュレーション：例

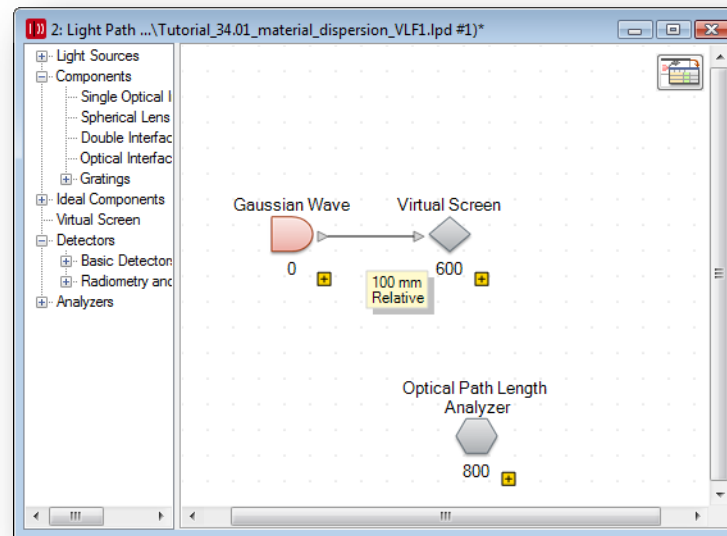


結果として得られたタイムドメインにおけるパルスEnvelope



# VirtualLab™: におけるシミュレーション: 例

- 位相残余を含む事により、タイムウィンドウの増加を、1000ものハーモニックフィールドの伝播無しで可能となりました！
- パルスのモデリングにおいて、非常に有効なテクニックです



# まとめ

- 近日中に発表予定のアプリケーション・ドキュメント：
  - ー フェムト秒パルスのアパチャーに対する回折現象
  - ー フェムト秒パルスのグレーティングによる回折現象
- フェムト秒パルスのモデリング機能をVirtualLab™に採用する上で、ユーザーの皆さまのご協力をお願いしております。 現行の機能を向上するために必要な新たな機能に対する、ご意見、ご要望を是非お聞かせ下さい。
- VirtualLab™にご興味をお持ちいただき、ありがとうございます