



Э.В. Семенов

**ОСНОВЫ
КОМПЬЮТЕРНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РЭС**

**Раздел 4. Синтез и оптимизация
электрических цепей
и структур**

Разновидности синтеза цепей

- Синтез цепей подразделяется на:
 - **структурный синтез**, т.е. автоматизированный или автоматический синтез структурной или принципиальной схемы цепи или устройства. Встречает на своем пути чрезвычайно большие затруднения и в настоящее время автоматически можно синтезировать лишь схемы в целом уже predetermined вида (например, LC-фильтр конкретного порядка при заранее выбранном типе топологии, например лестничного вида).
 - **параметрический синтез**, т.е. автоматизированный или автоматический выбор параметров цепи, обеспечивающих выполнение технических требований к ней.

Автоматизированный параметрический синтез цепей

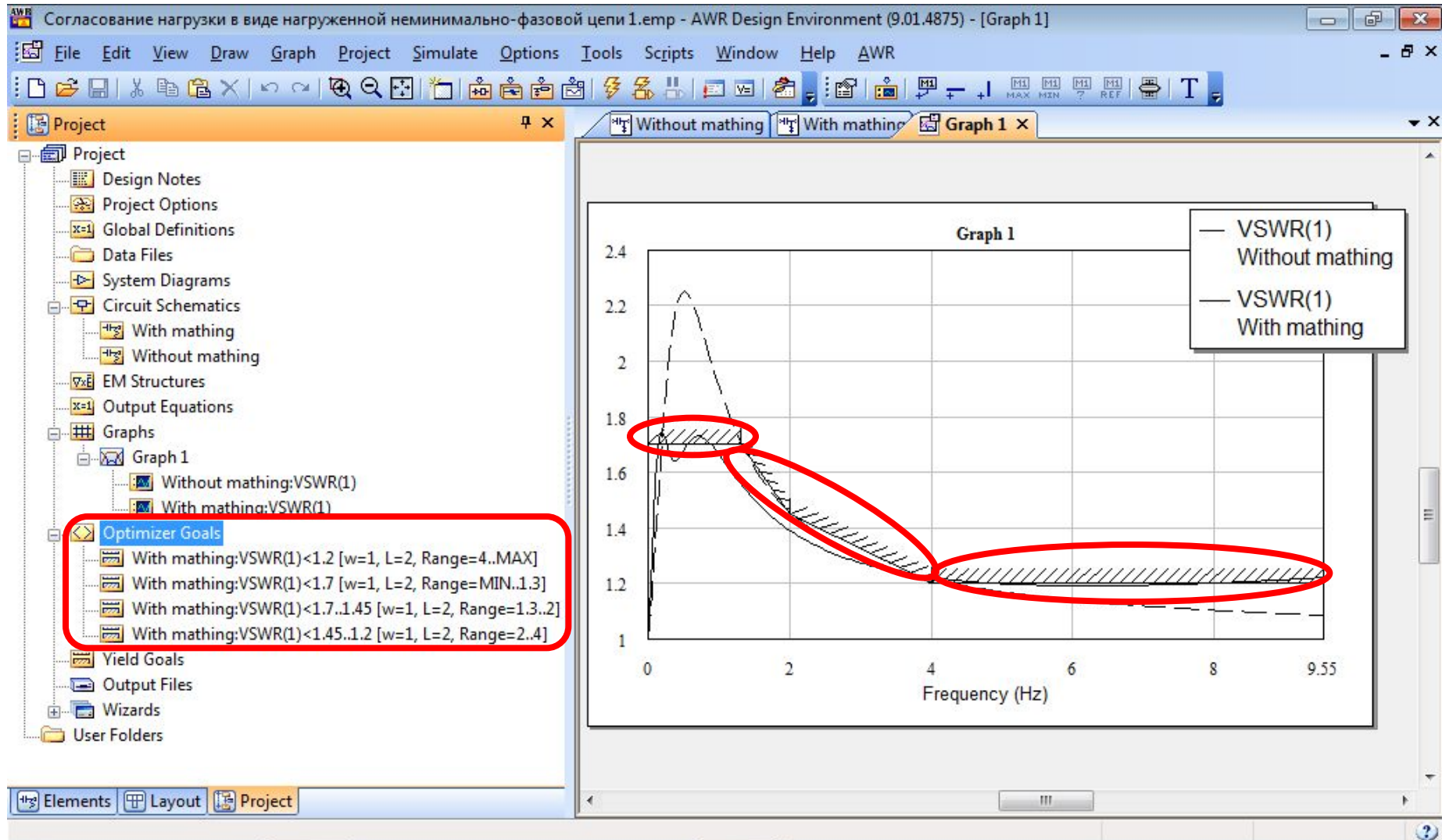
- В современных САПР (в том числе в AWR DE) выполняется в основном методами оптимизации.
- Для того, чтобы полностью поставить задачу оптимизации, необходимо определиться со следующим:
 - целевые параметры и характеристики цепи. Это те требования к цепи, которые определены в ТЗ; мы должны обеспечить их выполнение в результате оптимизации.
 - варьируемые параметры – параметры отдельных элементов или узлов РЭС, доступные для непосредственного изменения разработчиком (сопротивления, емкости, длины линий и т.д.).
 - граничные условия – диапазоны значений варьируемых параметров, выход за которые в процессе оптимизации запрещается.

Формирование целей оптимизации

- Оптимизация бывает:
 - однокритериальная;
 - многокритериальная.
- Формирование и достижение цели при однокритериальной оптимизации обычно выглядит достаточно просто: нужно максимально приблизить критерий оптимизации к заданному значению. Решение однозначно.
- При наличии нескольких критериев классическая постановка задачи оптимизации в принципе некорректна. Паллиативных подходов при этом два:
 - формирование одного суперкритерия (метакритерия);
 - формирование множества **недоминируемых** альтернатив (множества Парето).
- В AWR DE используется формирование суперкритерия:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{Q_n} \frac{W_n}{Q_n} |G_n(f_q) - M_n(f_q)|^{L_n}$$

Формирование целей оптимизации в AWR DE



Формирование целей оптимизации в AWR DE

Modify Optimization Goal

Measurement

- With mathing:VSWR(1)
- With mathing:VSWR(1)**
- Without mathing:VSWR(1)

New/Edit Meas...

Goal Type

- Meas > Goal
- Meas < Goal
- Meas = Goal

Range

Start Min 4 Hz Stop Max MAX Hz

Enable goal

OK

Cancel

Help

Cost= $Weight * |Meas - Goal|^L$

Sloped Goal 1.2 unitless Weight 1

Use default L 2

Варьируемые параметры

- В принципе варьируемым может быть любой параметр элемента или узла на структурной или принципиальной схеме. Однако чем больше варьируемых параметров, тем более сложным и длительным становится решение задачи оптимизации.
- Поэтому включать в оптимизационную процедуру следует только необходимый минимум параметров – те которые оказывают существенное влияние на значение целевой функции. Установить это можно либо из физических соображений, либо используя так называемую теорию чувствительности.

О варьировании параметров многопараметрических элементов

- Далее нужно учитывать, что не всякий параметр, доступный для формального варьирования, можно изменить в рамках принятой технологии проектирования РЭС. Например, вполне можно включить в число варьируемых параметров ток насыщения I_S биполярного транзистора. Однако при проектировании схем на дискретных элементах можно лишь выбрать другой экземпляр транзистора, у которого отличается не только I_S , но и вся совокупность других параметров.
- Эти сложности приводят к тому, что наиболее эффективен параметрический синтез тех схем, где технологически можно поменять все параметры. Например:
 - пассивные схемы фильтров и согласующих цепей;
 - различные устройства на полосковых линиях;
 - твердотельные полупроводниковые схемы.
- Параметрический синтез схем с такими элементами как, например, дискретные транзисторы, выглядит как формирование требований по выбору новых элементов, выбор подходящих элементов из производящихся на текущий момент и повторная оптимизация с новыми элементами.

Выбор варьируемых параметров в AWR DE

Свойства: Element Options: CAP - Capacitor (Closed Form)

Parameters Statistics Display Symbol Layout Model Options Vector

Name	Value	Unit	Tune	Opt	Limit	Lower	Upper	Description
ID	C2							Name
C	0.000695	F	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0	10	Capacitance

Name

Enable element Part Number Hide Secondary

OK Отмена Справка Element Help Vendor Help

Свойства: Element Options: GBJT3 - Gummel-Poon 3 terminal BJT

Parameters Statistics Display Symbol Layout Model Options Vector

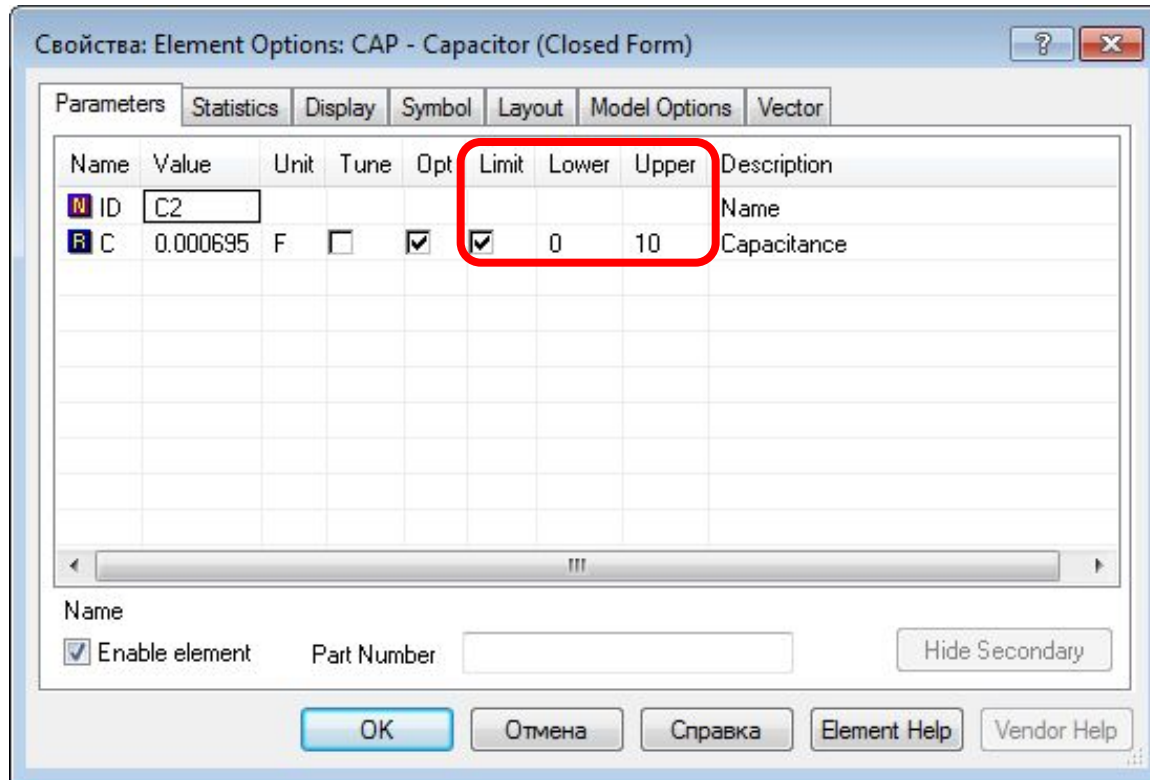
Name	Value	Unit	Tune	Opt	Limit	Lower	Upper	Description
ID	GP1							Device ID
IS	1e-16	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Saturation c
IBE		A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Reverse BE
IBC		A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Reverse BC
BF	100		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Fwd current
NF	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Fwd ideality
VAF	1000000000	V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Fwd Early v
IKF	1000000000000	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Fwd current
ISE	0	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	BE leakage
NE	1.5		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	BE leakage
BR	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Rev current
NR	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Rev ideality
VAR	1000000000	V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Rev Early v
IKR	1000000000000	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Rev current
ISC	0	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	BC leakage
NC	2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	BC leakage
RB	0.01	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Base resista
IRB	0	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Current whe
RBM	0.01	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Minimum hig
RE	0.01	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Emitter resis
RC	0.01	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Collector re:
CJE	0	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	CJO for BE j
VJE	0.75	V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	BE built-in p
MJE	0.33		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	BE grading
TF	0	s	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Fwd transit
XTF	0		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Coef for bia
VTF	1000000000	V	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	Voltage for
ITF	0	A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	0	High-curren

Device ID

Enable element Part Number Hide Secondary

OK Отмена Справка Element Help Vendor Help

Выбор граничных условий оптимизации в AWR DE



- Полезно иметь в виду недокументированную возможность AWR DE – эта САПР одинаково хорошо работает с физически нереальными значениями элементов (например, отрицательными емкостями и индуктивностями).

Основные оптимизационные алгоритмы

■ Simulate/Optimize (F7)

Согласование нагрузки в виде нагруженной неминимально-фазовой цепи 1.emp - AWR Design Environment (9.01.4875) - [Optimizer]

File Edit View Project Simulate Options Tools Scripts Window Help AWR

Project

Optimization Methods

- Pointer - Robust Optimization
- Pointer - Robust Optimization
- Pointer - Train an Optimizer
- Pointer - Run Trained Optimizer
- Pointer - Gradient Optimization
- Random (Local)
- Gradient Optimization
- Conjugate Gradient
- Simplex Optimizer
- Genetic (Uniform Mutation)
- Genetic (Gaussian Mutation)
- Simulated Annealing (Simplex)
- Simulated Annealing (Local)
- Random (Global)
- Direction Set Method

Relative Goal Cost

Cost History

Equalize Goals

Simulator Iter. = 0
Optimizer Iter. = 0
Cost = 0.000322355

Show all iterations
 Stop at minimum error
 Stop on simulation errors

Start Stop Reset Save Revert Help

Optimizer Variables Goals

Основные оптимизационные алгоритмы

AWR DE

- Существует большое число различных алгоритмов поиска решения оптимизационным способом.
- Одна из основных альтернатив при их разработке:
 - следует ли на каждой итерации делать хороший прогноз направления поиска затрачивая на это много времени;
 - или следует упрощать и ускорять итерации достигая хорошего решения за счет большого количества итераций.
- Другое различие оптимизационных алгоритмов:
 - алгоритмы глобального поиска (отделения корня);
 - алгоритмы уточнения решения в окрестности локального экстремума целевой функции.
- На какие методы следует обратить внимание в AWR DE:
 - Robust Optimization
 - Gradient Optimization
 - Random
 - Simplex Optimizer
 - Genetic
 - Direction Set Method

Оптимизатор Random

- Выполняет случайные шаги от начального приближения в пространстве поиска.
- Предпочтителен при большом количестве варьируемых переменных, поскольку вычислительные затраты при увеличении числа переменных возрастают не так сильно, как у других оптимизаторов.
- Количество симуляций схемы за одну итерацию минимально. Это простейший оптимизатор, но он работает в целом хорошо.

Gradient Optimization

- Ньютоновский градиентный метод.
- Хорошо предсказывает направление на оптимум и требует поэтому меньшего числа итераций, но сами итерации медленные – требуют много раз симулировать схему.
- Позволяет быстро получить решение хорошего качества, однако в непосредственной близости оптимума сходится крайне медленно.
- Хорошо подходит для простых схем и простых целевых функций. При большом количестве переменных работает медленно.
- Принято считать, что для симуляции пассивных цепей предпочтительней Simplex Optimizer, чем градиентный.

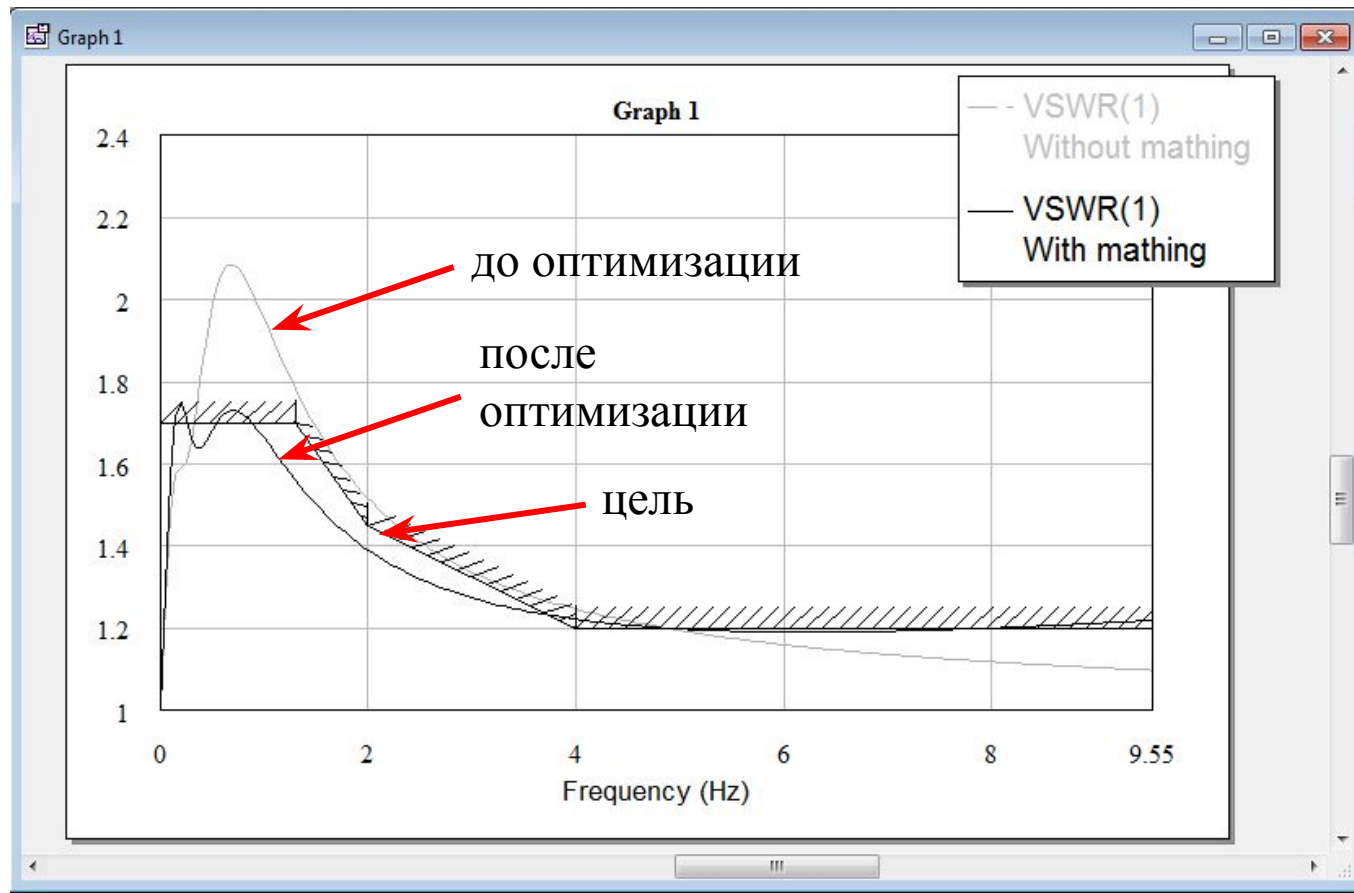
Simplex Optimization

- Первоначально создает созвездие из $N + 1$ точек на поверхности ошибок (N – число варьируемых переменных). Эти точки определяют «симплекс».
- Отыскивает лучшее, чем градиентный метод локальное решение. Поэтому может использоваться для «доводки» предварительно найденного решения.

Genetic

- Генетические алгоритмы. Разработчиков воодушевила скорость и эффективность приспособления свойств живых организмов под условия окружающей среды.
- Идея состоит в том, чтобы от двух точек в пространстве поиска (родителей) получить по определенному правилу новую точку (потомка). Потомок получается при помощи операций скрещивания и мутации (как в живой природе).
- Скрещиваются и мутируют так называемые хромосомы (фактически векторы значений признаков). Первоначально генетические алгоритмы использовались для решения комбинаторных задач, когда каждый элемент (ген) хромосомы бинарно определяет наличие или отсутствие какого либо признака.
- Генетические алгоритмы, используемые в AWRDE, отличаются от стандартных генетических алгоритмов – модифицированы для решения для задач оптимизации с непрерывным изменением значений переменных.
- Модификация состоит в способе генерирования числа (ген потомка) от двух других чисел (гены родителей) с добавлением элемента случайности. Здесь есть разные варианты; например гауссовская мутация и т.д.
- Качество работы генетических алгоритмов сильно зависит от их многочисленных настроек.

Пример результатов оптимизации согласующей цепи



Автоматизированный структурный синтез цепей

- Структурный синтез цепи – синтез схемы (структурной или принципиальной).
- Основные подходы к структурному синтезу цепей:
 - синтез цепей заранее преопределенного класса и структуры;
 - полностью автоматический синтез структурной или принципиальной схемы (в научных разработках).
- Успешность решения задачи структурного синтеза зависит от степени формализованности соответствующей задачи. Лучше всего в настоящее время формализованы две задачи синтеза:
 - синтез линейных частотных фильтров;
 - синтез согласующих цепей.

Автоматизированный структурный синтез цепей заранее определенного класса

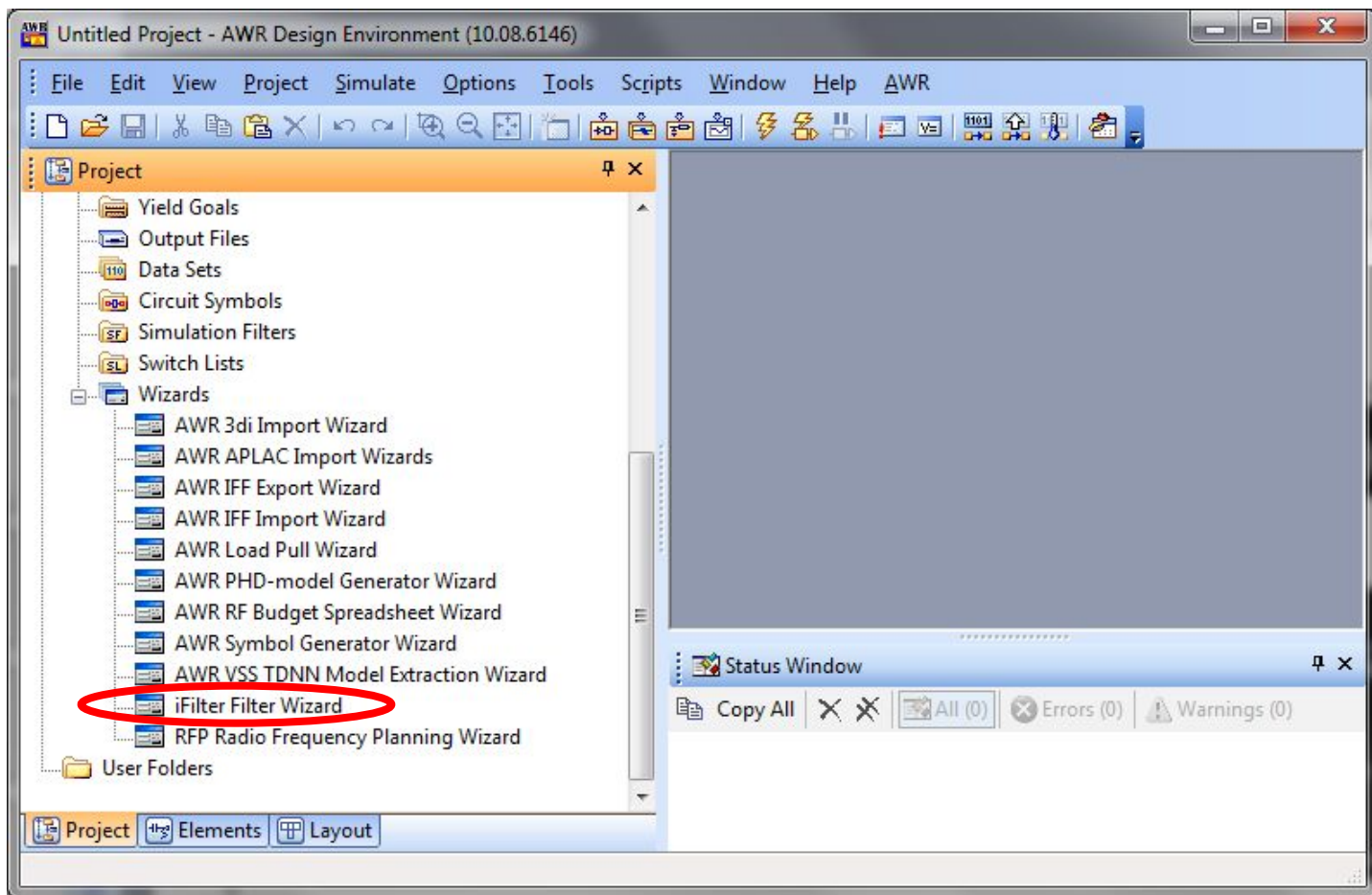
- Данный вариант уже реализован в коммерческих САПР и, в частности, в AWR DE.
- В AWR DE данный вид синтеза реализуется в «мастерах» (Wizards).
- Алгоритм структурного синтеза цепей при использовании мастеров пошаговый:
 - выбор мастера, соответствующего нужному классу цепи (например, фильтрам);
 - выбор общего вида используемой схемы цепи (например, лестничная) и используемых элементов (например, LC-элементы);
 - определение технических требований к цепи (например, частоты среза и т.д.).
- Собственно процесс синтеза обычно состоит в следующем:
 - определение «размерности» прототипа цепи (например, количества ступеней в лестничной схеме);
 - расчет параметров элементов схемы (параметрический синтез; по расчетным соотношениям или оптимизационными методами).
- При указании всех требуемых мастером параметров схема синтезируется быстро и однозначно.

Имеющиеся в AWR DE мастера для автоматизированного синтеза

- iFilter – синтез линейных частотных фильтров;
- iMatch – синтез линейных согласующих цепей;
- PHD (Poly-Harmonic Distortion) Model Generator Wizard – генератор нелинейных моделей на основе X-параметров.

Структурный синтез линейных частотных фильтров в iFilter

- Для всех типов фильтров используется единый интерфейс.
- Мастер можно использовать либо для синтеза новых фильтров, либо для модификации существующих.



Доступные для синтеза в iFilter разновидности фильтров

- С «монотонными» (без нулей коэффициента пропускания) передаточными функциями:
 - Chebyshev (Чебышева);
 - Maximally Flat (с максимально плоской АЧХ);
 - Bessel (Бесселя);
 - Linear Phase (с линейной ФЧХ);
 - Gaussian (Гаусса);
 - Transitional Gaussian (фильтр Гаусса с задаваемой точкой перехода от гауссовской частотной характеристики к линейному в логарифмической шкале спаду);
 - Legendre (Лежандра; фильтр с большей прямоугольностью АЧХ, чем у Баттерворта, но без осцилляций передаточной функции).
- С нулями коэффициента пропускания в области задерживания:
 - Elliptic (эллиптические);
 - Generalized Chebyshev (обобщенные Чебышева).

iFilter - LPF - Lumped Element Filter

Type - Approximation

Lumped Element

Chebyshev

Ripple[dB]

Specifications

Degree

Fp[MHz]

RSource

RLoad

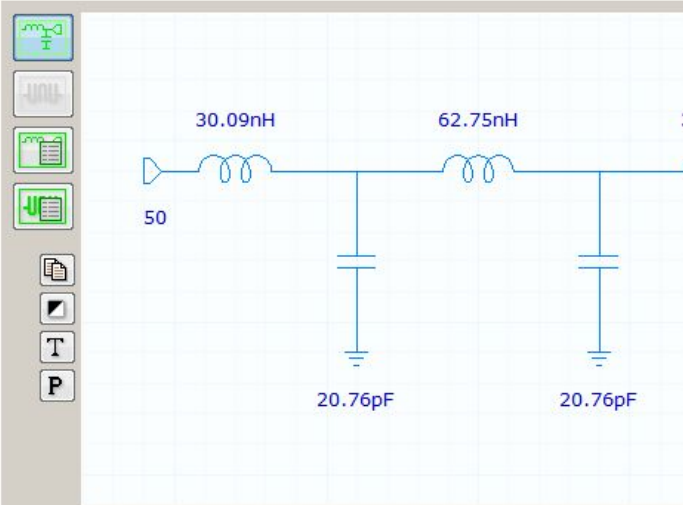
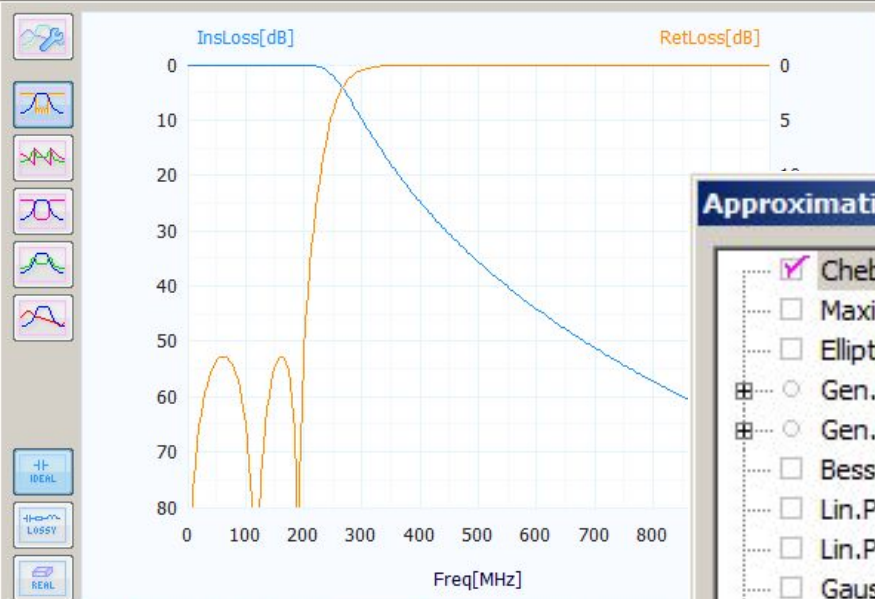
Parasitics

QL (ind)

QC (cap)

Att[dB/cm]

Design Control



Approximation Function

- Chebyshev
- Maximally Flat
- Elliptic
- Gen. Cheby type-1
- Gen. Cheby type-3
- Bessel
- Lin. Phase 0.05dB
- Lin. Phase 0.5dB
- Gaussian
- Trans. Gauss 6-dB
- Trans. Gauss 12-dB
- Legendre

Алгоритм синтеза фильтра

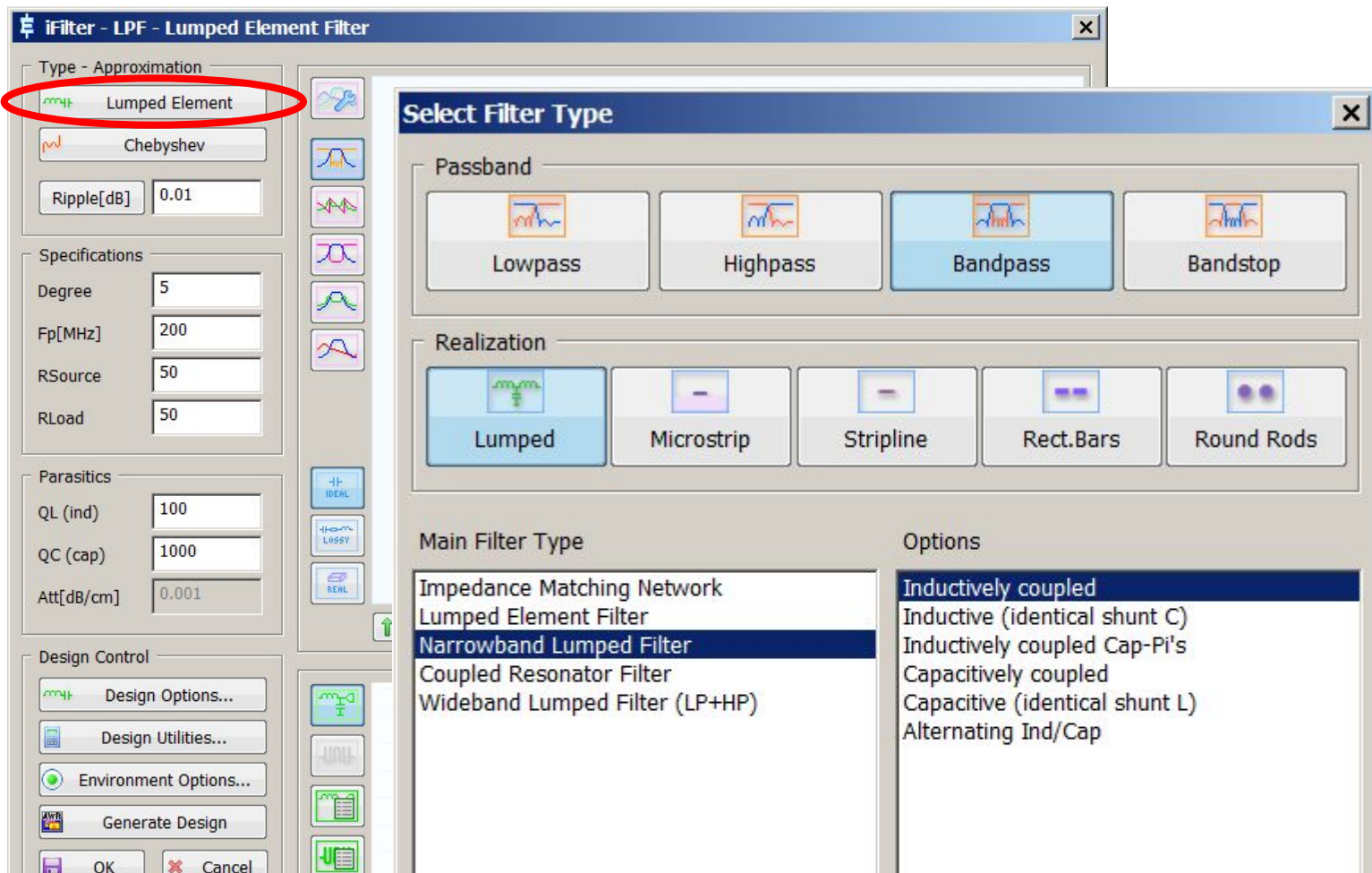
- Алгоритм синтеза фильтра обычный:
 - составление аппроксимации передаточной функции;
 - переход к функции импеданса портов;
 - определение номиналов элементов из функции импеданса.
- Синтез осуществляется по НЧ-прототипу. Используется два типа прототипов:
 - прототип на основе лестничного соединения последовательных индуктивностей и параллельных емкостей;
 - СВЧ-прототип. Содержит также инверторы импеданса/адмитанса и используется, в основном, для синтеза узкополосных полосовых фильтров.

Алгоритм синтеза фильтра

- Далее используется так называемое преобразование частоты. При этом индуктивность заменяется на:
 - индуктивность для ФНЧ;
 - емкость для ФВЧ;
 - последовательный LC-контур для полосовых фильтров;
 - параллельный LC-контур для режекторных фильтров.
- Емкость соответственно заменяется на:
 - емкость для ФНЧ;
 - индуктивность для ФВЧ;
 - параллельный LC-контур для полосовых фильтров;
 - последовательный LC-контур для режекторных фильтров.
- Инверторы заменяются на П-образные или Т-образные звенья для полосовых фильтров.
- Заключительный этап синтеза: ренормировка. Индуктивности умножаются, а емкости делятся на действительное волновое сопротивление источника и нагрузки.

Выбор элементной базы синтезируемого фильтра

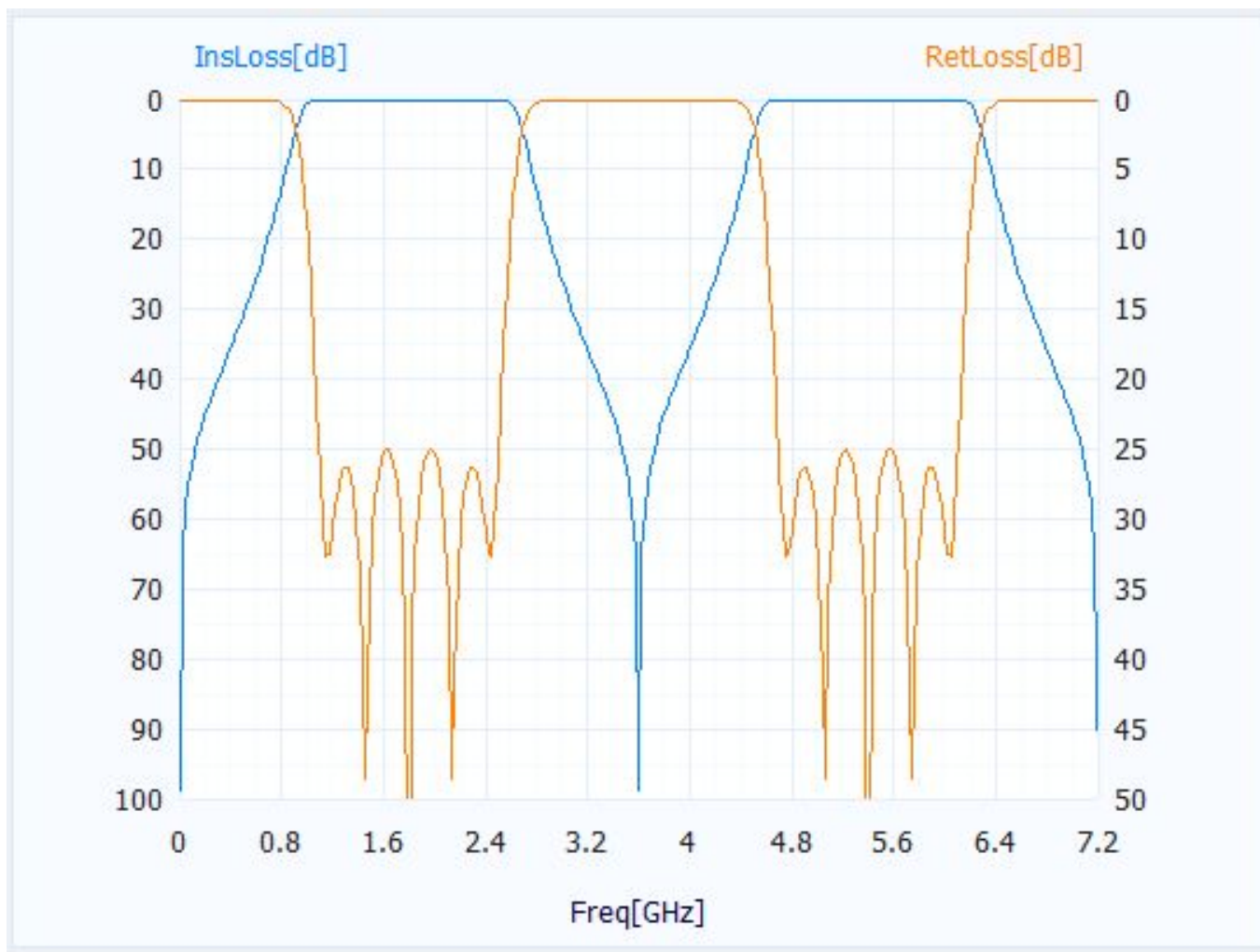
- Мастером iFilter могут быть синтезированы фильтры либо на сосредоточенных элементах, либо на распределенных структурах.



Синтез фильтров на распределенных элементах

- Фильтры на распределенных элементах получаются при каскадном соединении отрезков линии передачи, связанных линий.
- Используется два характерных элемента (шлейфа):
 - короткозамкнутая линия передачи как аналог индуктивности;
 - линия передачи на холостом ходу как аналог емкости.

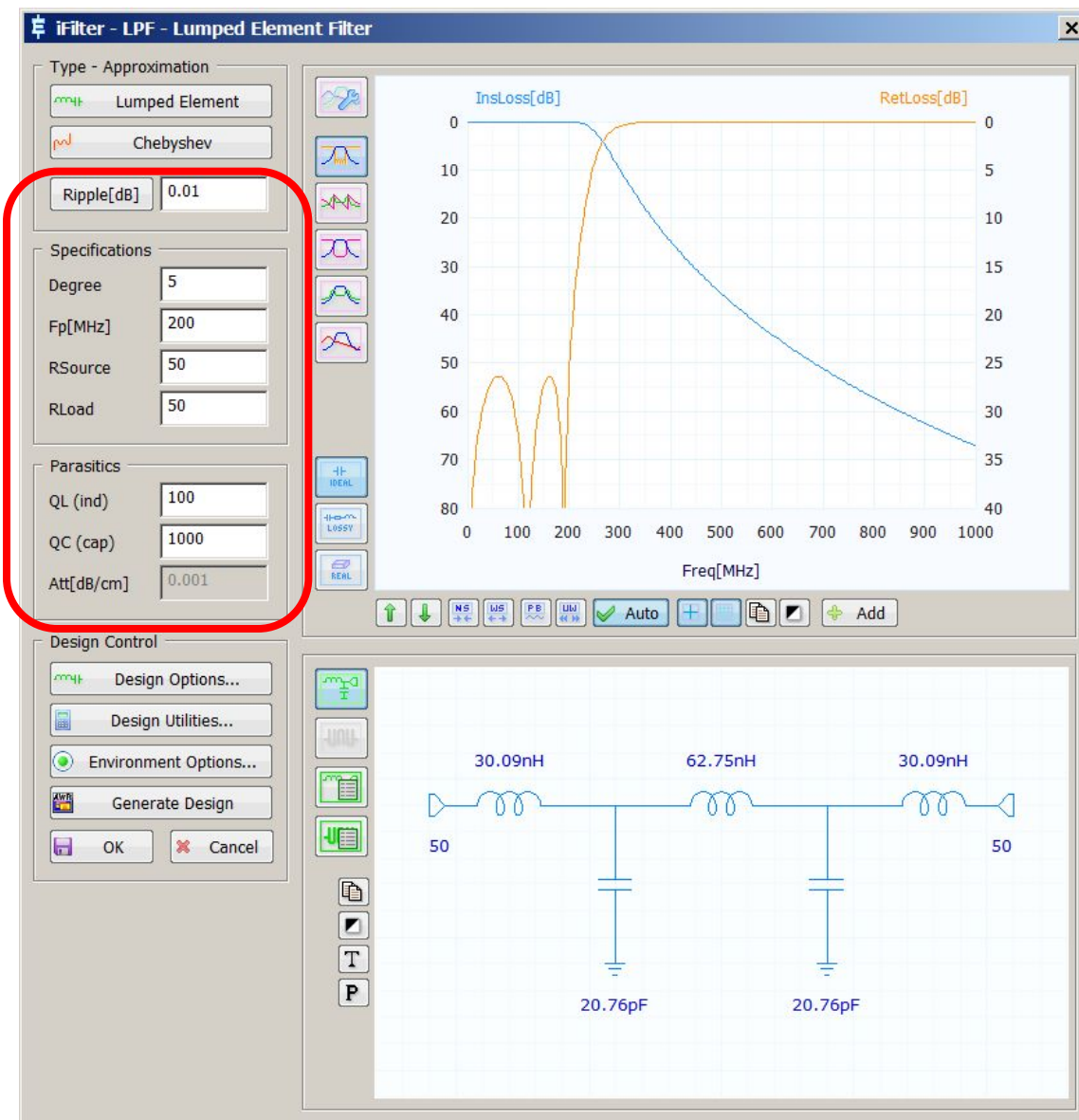
Периодичность передаточных характеристик распределенных фильтров



Три подхода к структурному синтезу распределенных фильтров

- Синтез LC-прототипа и замена индуктивностей и емкостей эквивалентными шлейфами.
- Замена индуктивностей высокоомными, а емкостей низкоомными линиями передачи.
- Использование связанных линий в сочетании с отрезками линий передачи или использование метода коэффициентов связи. Этот метод дает наиболее компактные схемы с наилучшими характеристиками.

Определение требований к фильтру

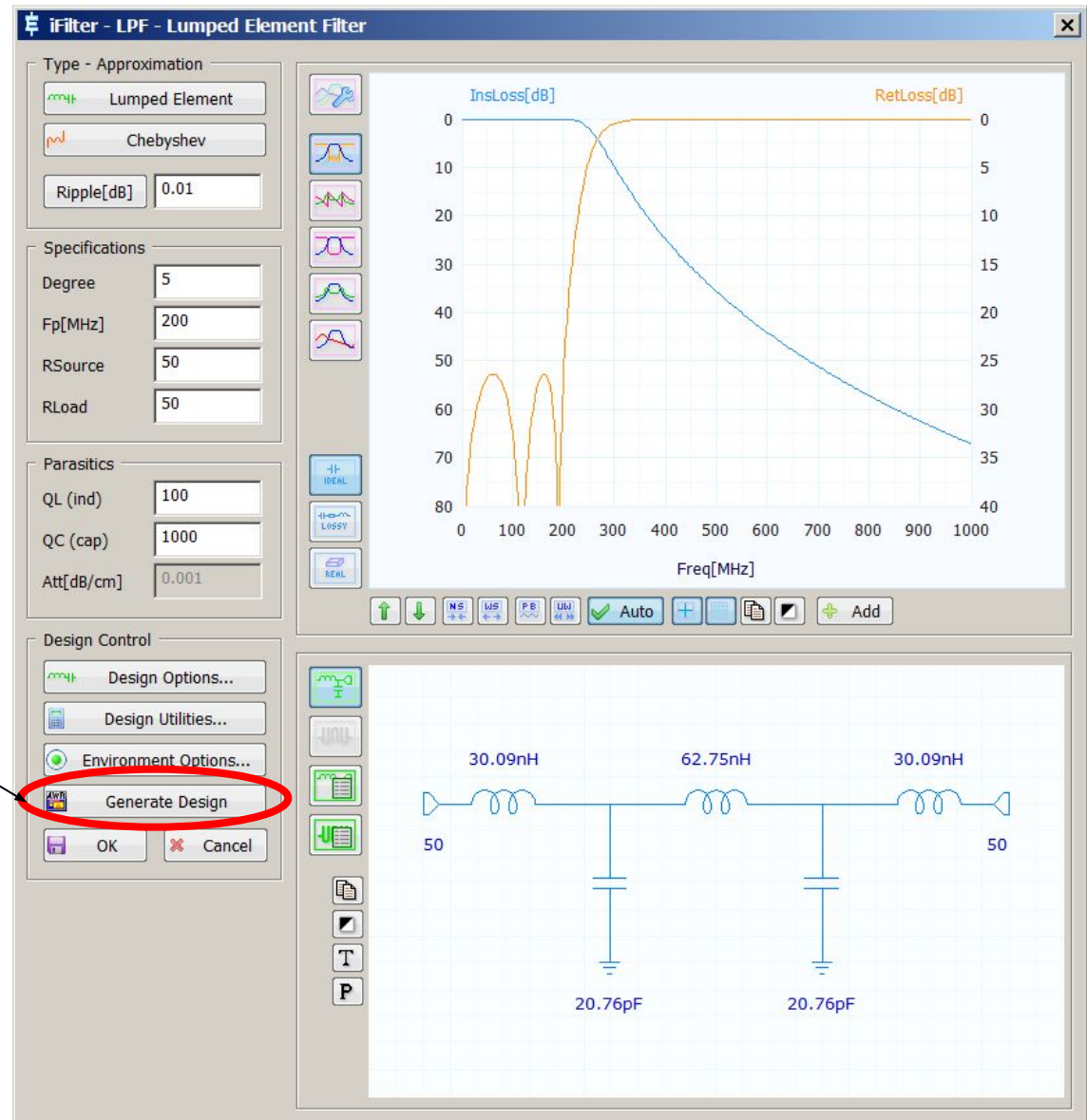


Основные исходные параметры для расчета фильтра

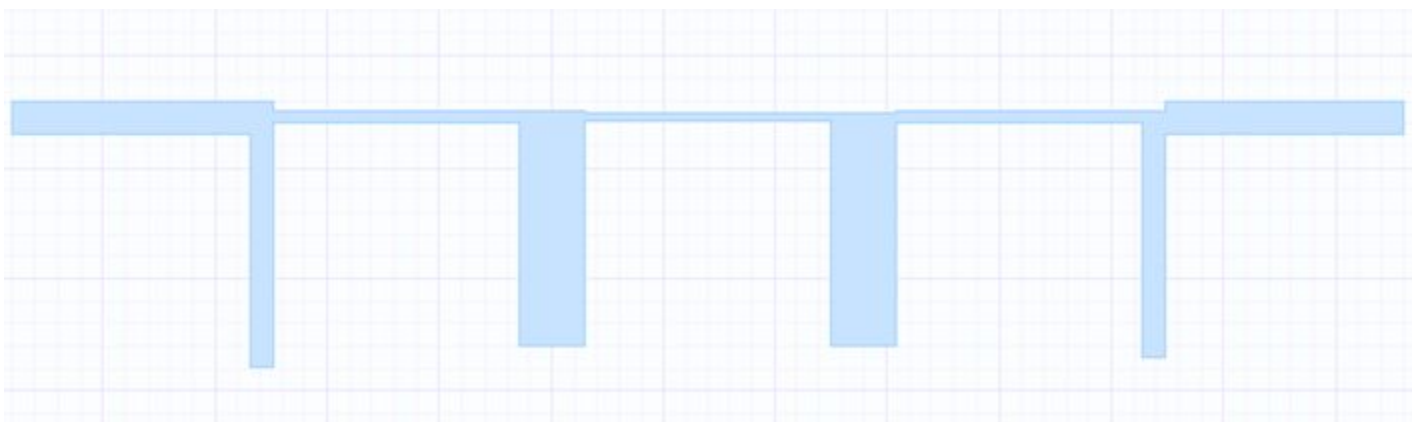
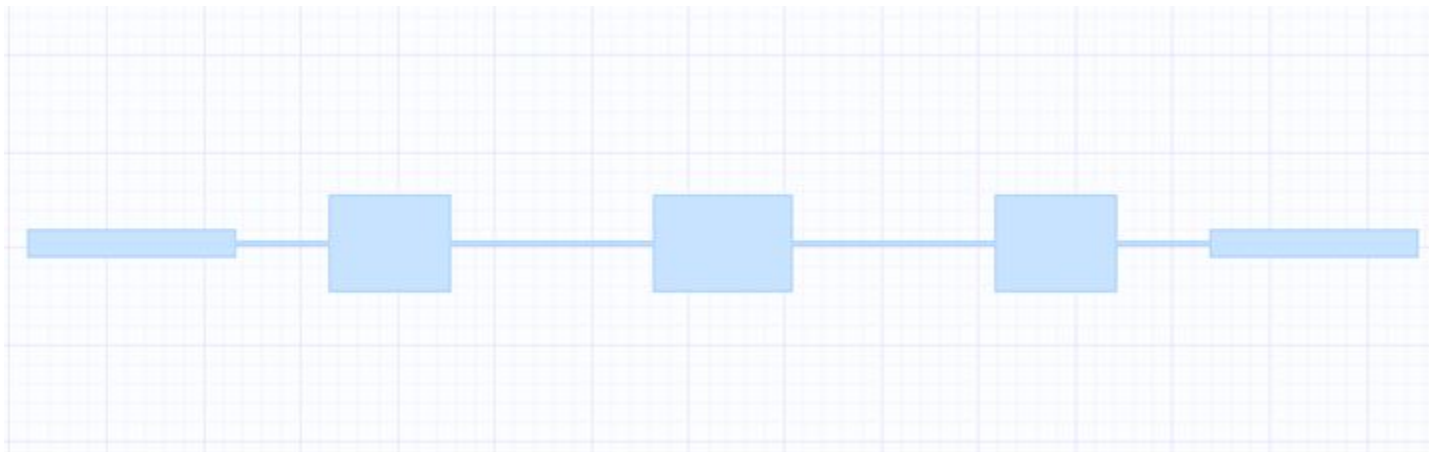
- Degree – порядок фильтра.
- F_p – частота среза по уровню Ripple для чебышевских и эллиптических фильтров и по уровню 3.011 дБ для остальных.
- F_0 – центральная частота полосовых и режекторных фильтров.
- BW – ширина полосы пропускания или заграждения для полосовых или режекторных фильтров.
- Stopband IL – пиковый уровень коэффициента пропускания в области задерживания для эллиптических фильтров.
- Low Zo, High Zo – наименьшее и наибольшее допустимые значения импеданса для распределенных фильтров.
- Reson Zo, Line Zo – импеданс на резонансной частоте для СВЧ-фильтров.
- RSource – волновое сопротивление источника.
- RLoad – волновое сопротивление нагрузки.
- QL, QC, TLatt – паразитные параметры, определяющие потери.

Запуск генерации схемы

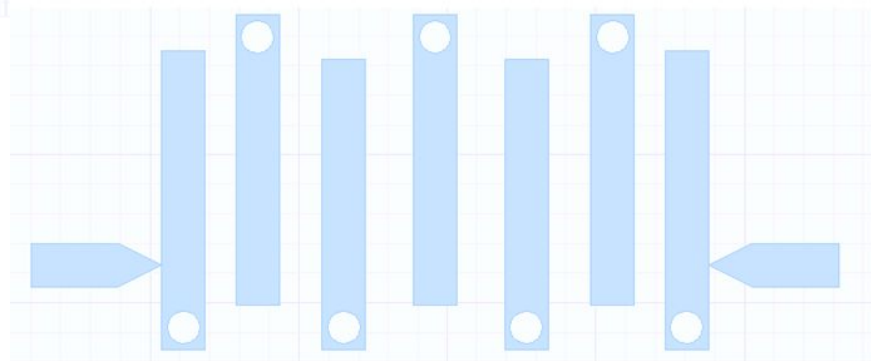
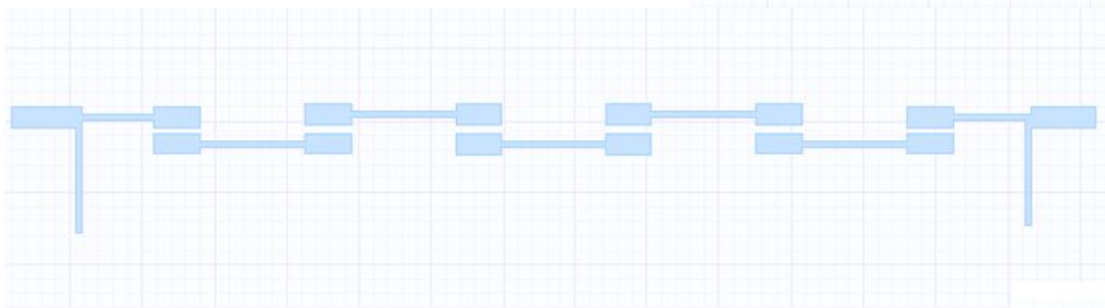
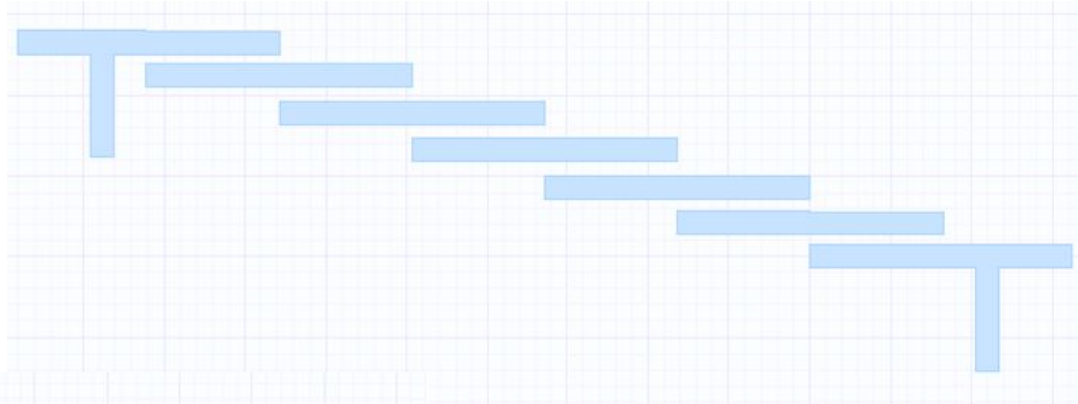
По нажатию кнопки автоматически создается проект с данной схемой и графиками S_{21} и S_{11} .



Примеры топологий распределенных ФНЧ, синтезированных в iFilter

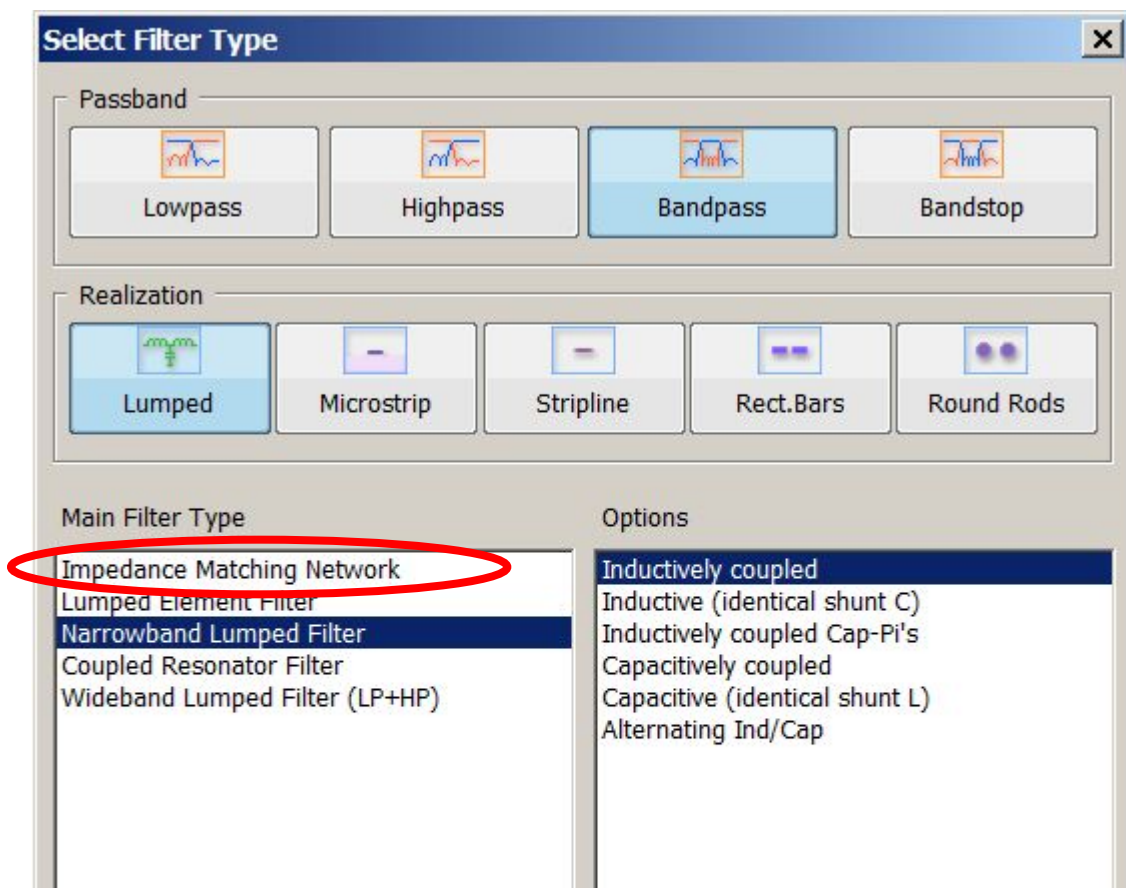


Примеры топологий полосовых распределенных фильтров, синтезированных в iFilter



Мастер синтеза согласующих цепей iMatch

- Данный мастер отображается, только если приобретена соответствующая опция FIL-300 или FIL-200 + FIL-050.
- Может работать либо как автономный мастер, либо в рамках iFilter, рассматривая согласующую цепь как особый тип фильтра:



Основное окно мастера iMatch

The screenshot displays the iMatch software interface, which is used for designing impedance matching networks. The window is titled "Matching" and contains several key sections:

- Specifications:** A panel on the left where users can define the design parameters. It includes an "Edit Terminations" button and input fields for:
 - Fo [GHz]: 0.5
 - Q: 1.5
 - # sections: 8
 - EL [deg]: 300
- Matching:** A section with icons for selecting different matching topologies such as "None", "L/Pi/T", "3-sec", "4-sec", "TL+Stub", and "Multi TL". A list of specific sections is shown below, including "L-section LP", "L-section HP", "Pi-section CLC", "Pi-section LCC", "Pi-section CLL", "Tee-section CCL", "Tee-section LCL", and "Tee-section LLC". A "Matching Options" button is also present.
- Reactance Cancellation:** A section for defining the cancellation method, with radio buttons for "Lumped (series)", "Lumped (shunt)", "Stub (shunt)", and "Transm. Line". It also includes input fields for "Line Imp[ohm]" set to 50.
- Plotting and Visualization:** The main area contains:
 - A graph showing "InsLoss[dB]" (Insertion Loss) and "ReLoss[dB]" (Reflection Loss) versus "Freq[GHz]". The x-axis ranges from 0.4 to 0.6 GHz, and the y-axis ranges from 0 to 60 dB.
 - A circuit diagram showing a series combination of a capacitor (101.3pF) and an inductor (1nH) connected between two 50 ohm ports.
 - A Smith chart at the bottom right, showing the impedance transformation path of the matching network.
- Navigation and Control:** A toolbar at the bottom of the plot area includes buttons for zooming (up/down arrows), navigation (NS, WS, WS), an "Auto" button, and other standard plot controls.

Определение необходимых параметров и характеристик для синтеза согласующей цепи

- Для синтеза согласующей цепи нужно определить:
 - импеданс нагрузки и источника сигнала;
 - тип секций согласующей лестничной цепи (Г-образная, П-образная, Т-образная или отрезки линий передачи с постоянным или переменным волновым сопротивлением);
 - количество секций.

определение импедансов нагрузки и источника

Matching

Specifications

Edit Terminations

Fo [GHz] 0.5

Q 1.5

sections 8

EL [deg] 300

Matching

None L/Pi/T

3-sec 4-sec

TL+Stub Multi TL

L-section LP

- L-section HP
- Pi-section CLC
- Pi-section LCC
- Pi-section CLL
- Tee-section CCL
- Tee-section LCL
- Tee-section LLC

Matching Options

Reactance Cancellation

Z1 Z2

Lumped (series)

Lumped (shunt)

Stub (shunt)

Transm. Line

Line Imp[ohm] 50 50

OK Cancel

InsLoss[dB] RetLoss[dB]

50 101.3pF 1nH 50

50 10 20 30 40 50 60

0.4 0.5 0.6

Auto

T H

определение
вида и
количества
звеньев

Определение импедансов источника и нагрузки

- Терминальные импедансы задаются либо в виде небольшой реактивной схемы, либо в виде считываемой из файла таблицы.

The dialog box 'Matching Terminations' is used for defining source and load impedances. It features two columns for Z1 (source) and Z2 (load), each with a list of impedance models and input fields for R, L, and C values. A central schematic shows a 50 Ohm source connected to a network 'N', which is then connected to a 1nH inductor and another 50 Ohm load. A table at the bottom right displays the frequency response data.

F [MHz]	Rin1	jXin1	Rin2	jXin2
400.000	50.000	0.000	50.000	2.513
410.000	50.000	0.000	50.000	2.576
420.000	50.000	0.000	50.000	2.639
430.000	50.000	0.000	50.000	2.702
440.000	50.000	0.000	50.000	2.765
450.000	50.000	0.000	50.000	2.827
460.000	50.000	0.000	50.000	2.890
470.000	50.000	0.000	50.000	2.953
480.000	50.000	0.000	50.000	3.016
490.000	50.000	0.000	50.000	3.079
500.000	50.000	0.000	50.000	3.142
510.000	50.000	0.000	50.000	3.204
520.000	50.000	0.000	50.000	3.267
530.000	50.000	0.000	50.000	3.330
540.000	50.000	0.000	50.000	3.393
550.000	50.000	0.000	50.000	3.456
560.000	50.000	0.000	50.000	3.519
570.000	50.000	0.000	50.000	3.581
580.000	50.000	0.000	50.000	3.644
590.000	50.000	0.000	50.000	3.707