



四川中测微格科技有限公司
www.hi-dingle.com



APDS技术在卡塞格伦天线系统设计中的应用

汇报内容

www.hi-dingle.com

1

应用背景简介

2

卡塞格伦天线系统的构建

3

高效馈源优选技术

4

一体化建模的**APDS**优化

5

总结

1.1 卡塞格伦天线简介

www.hi-dingle.com

□ 结构特点:

主反射面：大口径抛物面

副反射面：双曲面

馈源：高效率馈源



□ 应用背景:

卫星通信、远程通信

跟踪雷达、气象雷达



□ 技术要求:

高增益、高分辨率、低副瓣

1.2 卡塞格伦天线的特性

www.hi-dingle.com

较单反射面天线：

➤ 优点：

纵向尺寸短，便于安装；
可变因素多，设计自由度大；
漏失指向较高仰角，降低天线噪声温度；
适用于复杂馈源网络的天线。

➤ 缺点：

遮挡变大、近轴旁瓣变高；
必须使用强方向性馈源；
造价高。

1.3 卡塞格伦天线设计难点

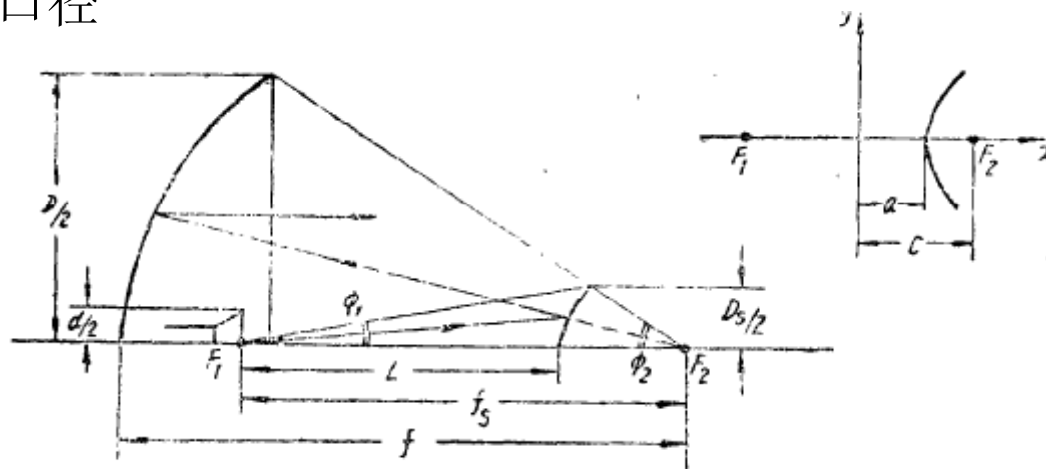
www.hi-dingle.com

➤ 设计原则:

最小遮挡、最佳照射。

➤ 设计难点:

- 1、遮挡尺寸制约天线效率、副瓣水平
- 2、最小遮挡原则制约馈源口径
- 3、反射面的赋形
- 4、高性能馈源设计
- 5、一体化建模优化



1.4 先进并行设计系统

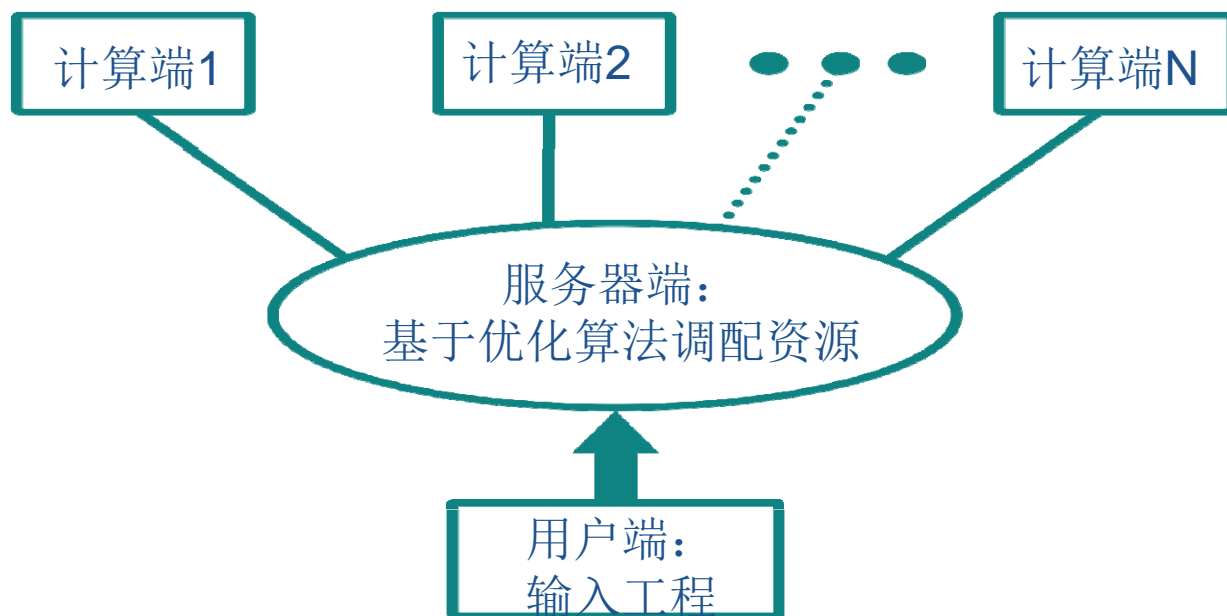
www.hi-dingle.com

➤ APDS特点

- ✓ 我公司自主研发
- ✓ 内部专题设计
- ✓ 兼容HFSS/FEKO/CST/ADS等
- ✓ 多进程协同工作
- ✓ 多工程同时运行

➤ 架构组成

- 用户端
- 服务器端
- 计算端



1.5 APDS 客户端工程界面

www.hi-dingle.com

先进并行设计系统

文件 模型 视图 优化 优先级设置 配置 帮助 关于

S参数专题 天线专题 天线罩专题 微波炉腔体专题 变量设置 目标设置 算法设置 导出工程 导出数据 开始优化 暂停优化 停止优化

优化专题选择 优化设置 导出 优化

工作台

- KSGL_LB_Medium_1224(天线专题)
 - 优化模型
 - 模型视图
 - 模型信息
 - 变量
 - port_ain=1.2mm
 - kk_ain=6mm
 - R_lb=25mm
 - R_waveguide=5mm
 - lb_ain=1.2mm
 - t_metal=1mm
 - l_Boun=0.8mm
 - tana=(kk_ain-lb_ain)/...
 - l_medium=1.2mm
 - t_medium=0.5mm

日志信息 优化信息 进度信息

优化状态: 优化中

工程名称: KSGL_LB_Medium_1224

工程类型: 天线专题

开始优化时间: 获取中...

已优化时长: 0小时:0分

迭代总数: 50, 当前进行第1代, 0%

群体样本数: 500, 当前代内完成样本数0个, 0%

中测微格——我们有一个梦想，我们一直努力着！ 连接服务器成功

汇报内容

www.hi-dingle.com

1

应用背景简介

2

卡塞格伦天线系统的构建

3

高效馈源优选技术

4

一体化建模的**APDS**优化

5

总结

2.1 卡塞格伦天线的最小遮挡

www.hi-dingle.com

■ 最小遮挡中的几何关系

$$\text{设 } D_s = \frac{D_f}{K}$$

存在如下关系，

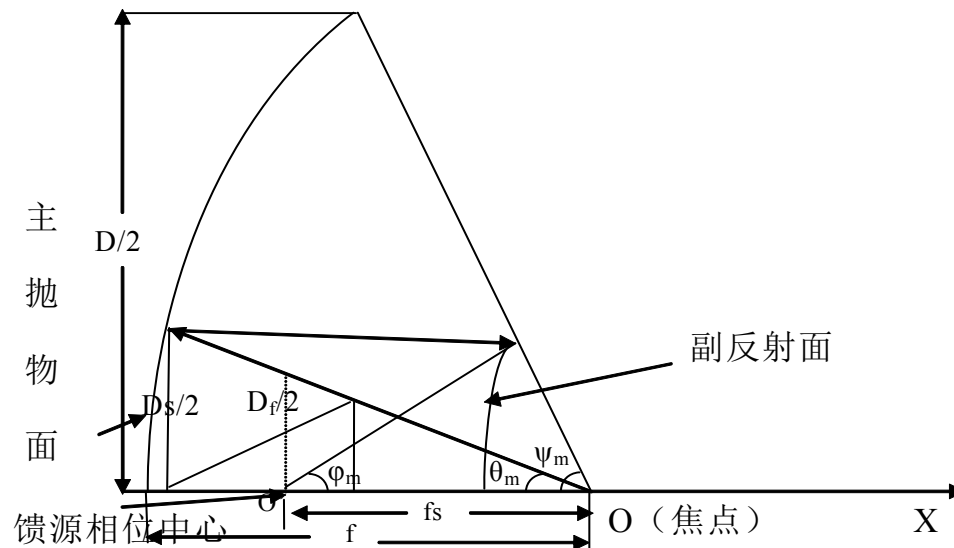
$$f_s = K f$$

$$\cot\varphi_m + \cot\psi_m = \frac{2f_s}{D_s}$$

$$a = \frac{D_s}{4} \left(\frac{1}{\sin\varphi_m} - \frac{1}{\sin\psi_m} \right)$$

$$f_s = 2c$$

$$D_s = \sqrt{\frac{2fD_f}{\cot\varphi_m + \cot\psi_m}}$$



■ 结论

- D 、 f 、 D_s 、 K 四个参数唯一确定天线系统结构，并使馈源口径尺寸被限制
- 初始 K 值可近似取为0.7
- 卡塞格伦天线系统构建属于多解问题

2.2 卡塞格伦天线的常规设计

www.hi-dingle.com

◆ 选定主镜参数

依据设计要求，选定主镜口径D和焦距f。

$$0.25 < f/D \leq 0.4, \quad \text{常取 } f=0.3D。$$

◆ 选定副镜参数

遵照最小遮挡原则，选定副镜口径

$$D_s=0.1D$$

根据经验，调试选择遮挡比例系数

$$K=0.7。$$

◆ 确定馈源尺寸

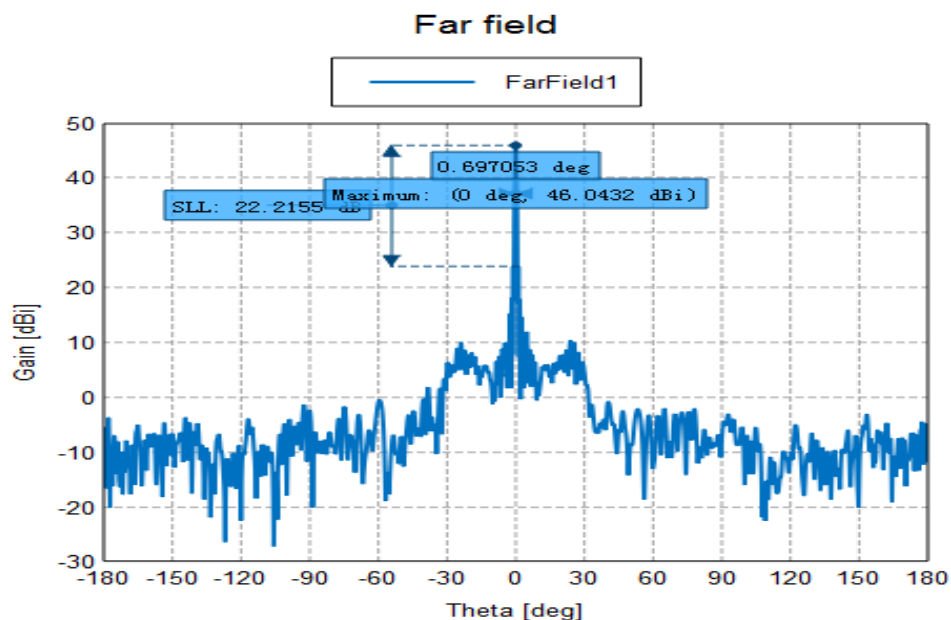
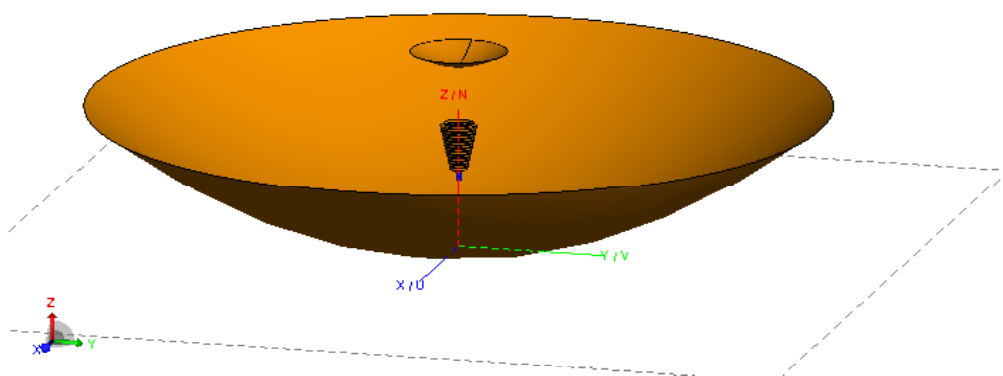
由参数几何关系，确定馈源尺寸要求；

选择馈源结构及尺寸；

仿真馈源方向图，调试K值。

2.3 卡塞格伦天线的设计案例

www.hi-dingle.com



Total Gain [dBi] (Frequency = 93 GHz; Phi = 0 deg) - KSG_L_APDS_P11_1216

■ 设计案例

● 要求:

最低工作频率为92GHz,

增益 $G \geq 42\text{dBi}$,

$$2\theta_{0.5} \leq 1^\circ$$

$$\text{SLL} \leq -24\text{dB}$$

口径尺寸 $\leq 320\text{mm} \times 320\text{mm}$

● 方案:

$D=300\text{mm}$, $f=90\text{mm}$,

$D_s=30\text{mm}$, $f_s=55.8\text{mm}$ ($K=0.62$)

馈源为波纹喇叭结构:

口径 $D_{1b}=4\text{mm}$,

半张角 $\arctan(0.2)$

2.4 卡塞格伦天线性能优化方案

www.hi-dingle.com

■ 高效馈源优化

性能要求：

方向图旋转对称、低副瓣、带宽足够、低交叉极化

馈源类型：

波纹喇叭、介质加载喇叭等

■ 反射面赋形

技术要点：

构建主反射面的赋形函数，以“泰勒级数+傅里叶级数”展开表征
结合馈源结构参数，一体化建模仿真优化

其他方案：

对主反射面数值剖分赋形或采用Zernike多项式展开
依据馈源方向图函数赋形双镜函数（忽略馈源遮挡、不易于优化）

汇报内容

www.hi-dingle.com

1

应用背景简介

2

卡塞格伦天线系统的构建

3

高效馈源优选技术

4

一体化建模的APDS优化

5

总结

3.1 馈源尺寸

www.hi-dingle.com

■ 主要结构参数

a_h : 喇叭口径外半径

Δ_h : 实际口径遮挡附加尺寸, 如壁厚、波纹喇叭槽深等

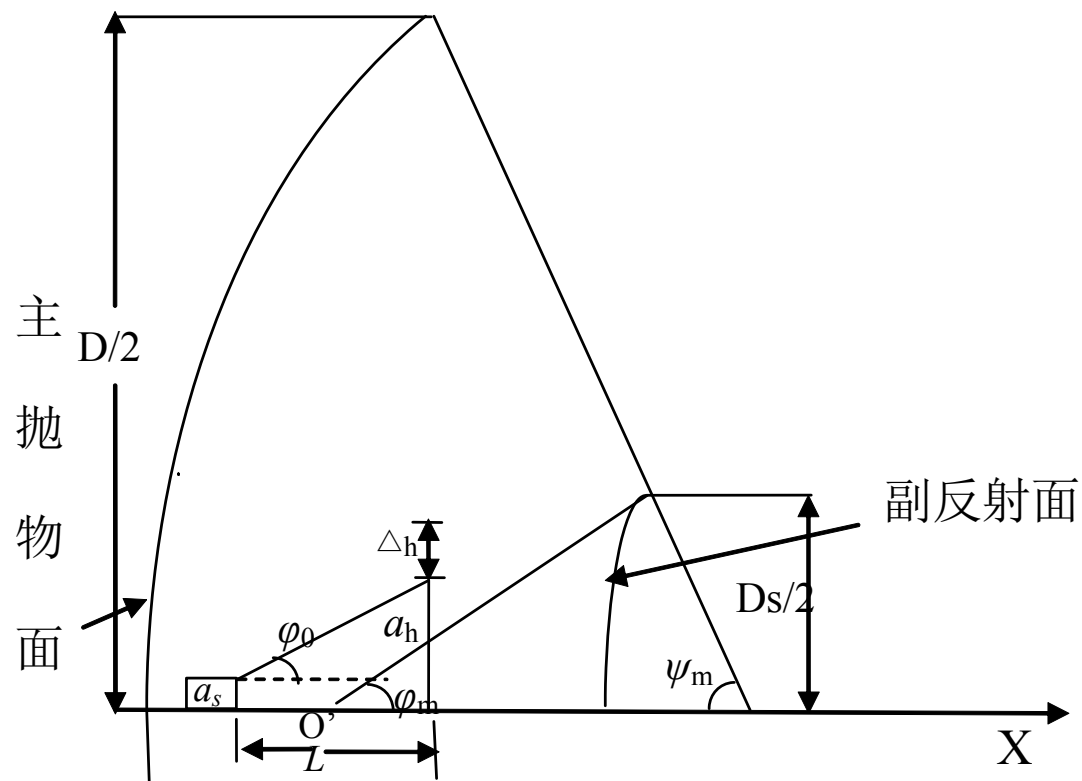
a_s : 馈电接口半径

L : 喇叭长度

φ_0 : 喇叭半张角

■ 考虑因素

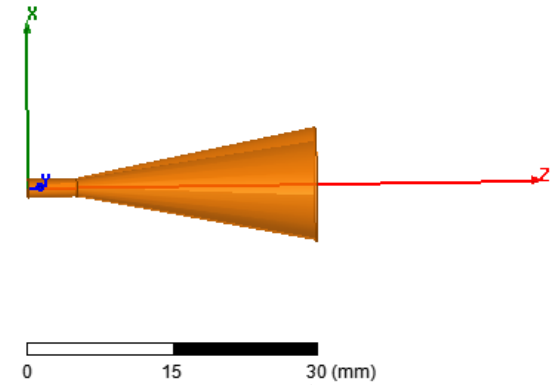
- 最小遮挡关系
- 馈电接口尺寸
- 加工精度
- 方向图性能



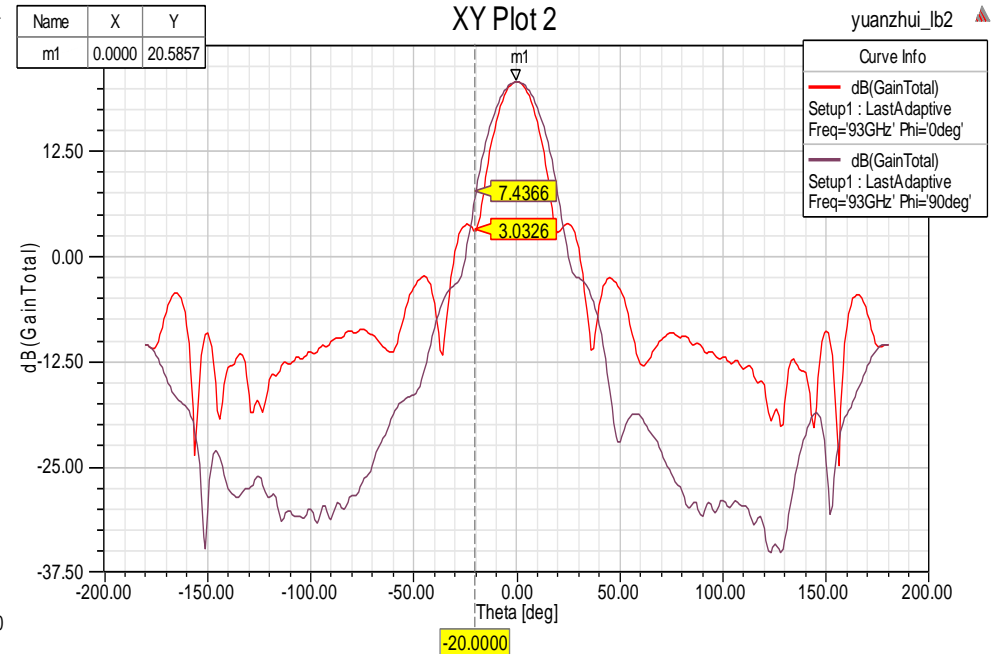
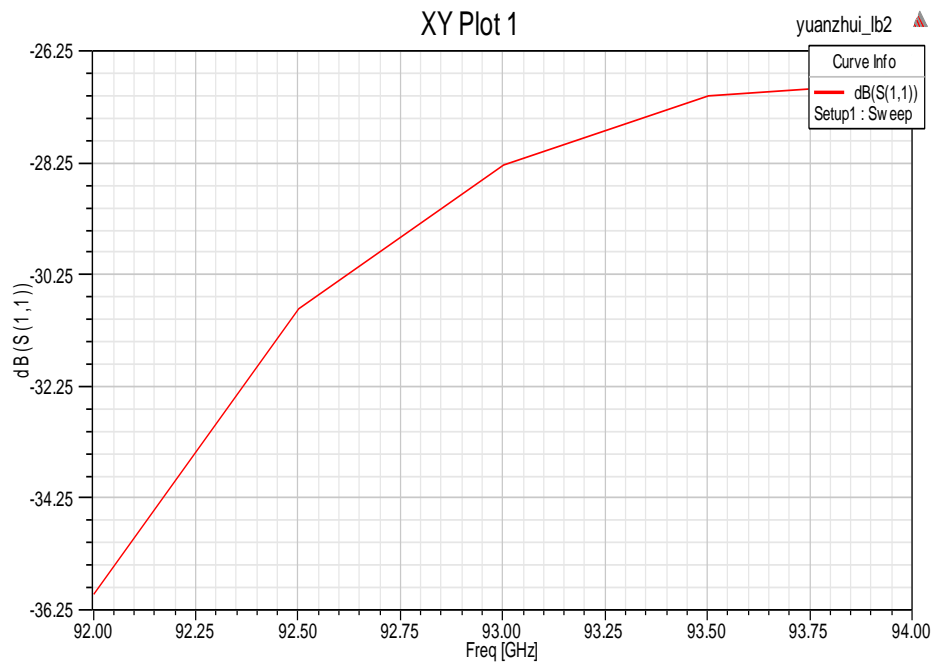
3.2 普通圆锥喇叭

www.hi-dingle.com

- 普通圆锥喇叭
- 方向图不符合旋转对称要求
- 口径大小与波束宽度负相关
- 结构简单，易于设计



普通圆锥喇叭模型



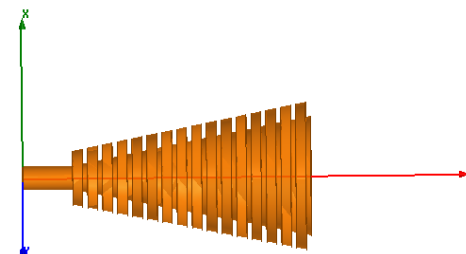
普通圆锥喇叭方向图

3.3 波纹喇叭

www.hi-dingle.com

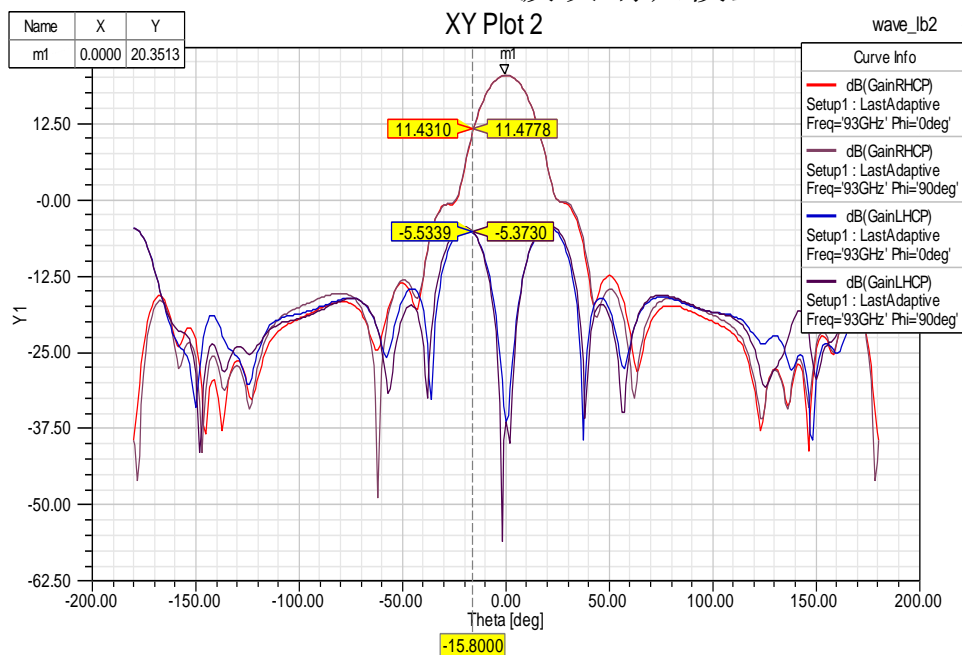
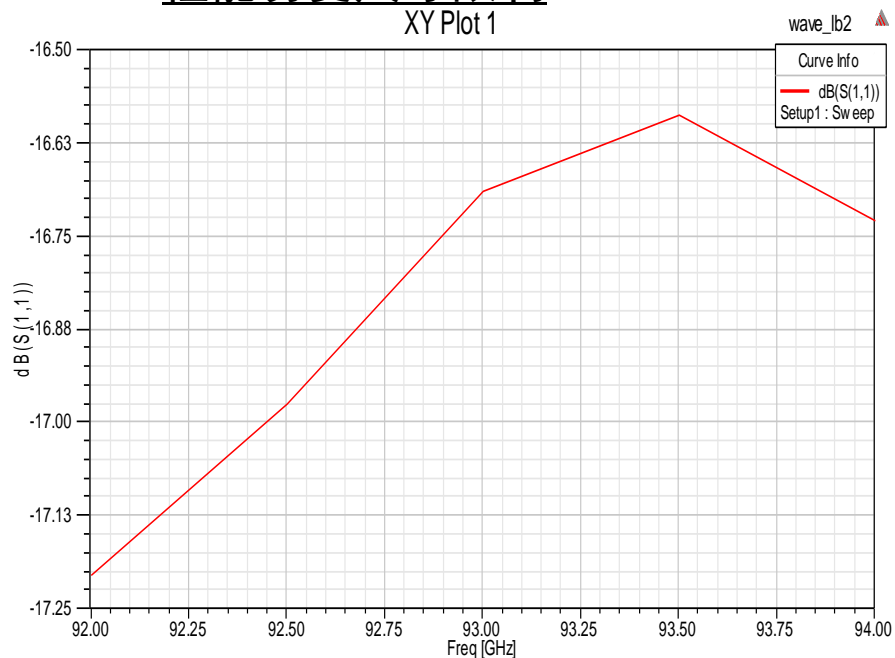
■ 波纹喇叭

- 卡塞格伦天线典型馈源、宽频特性
- 方向图旋转对称、低副瓣、低交叉极化
- 构型复杂，遮挡口径=辐射口径+壁厚+二倍槽深，



性能易受尺寸限制

波纹喇叭模型

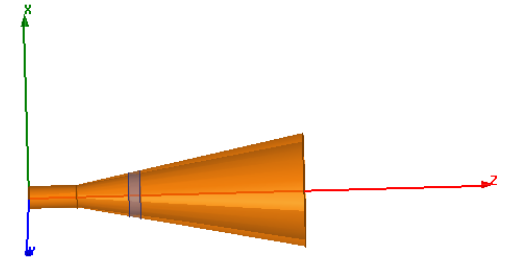


波纹喇叭方向图

3.4 介质加载喇叭

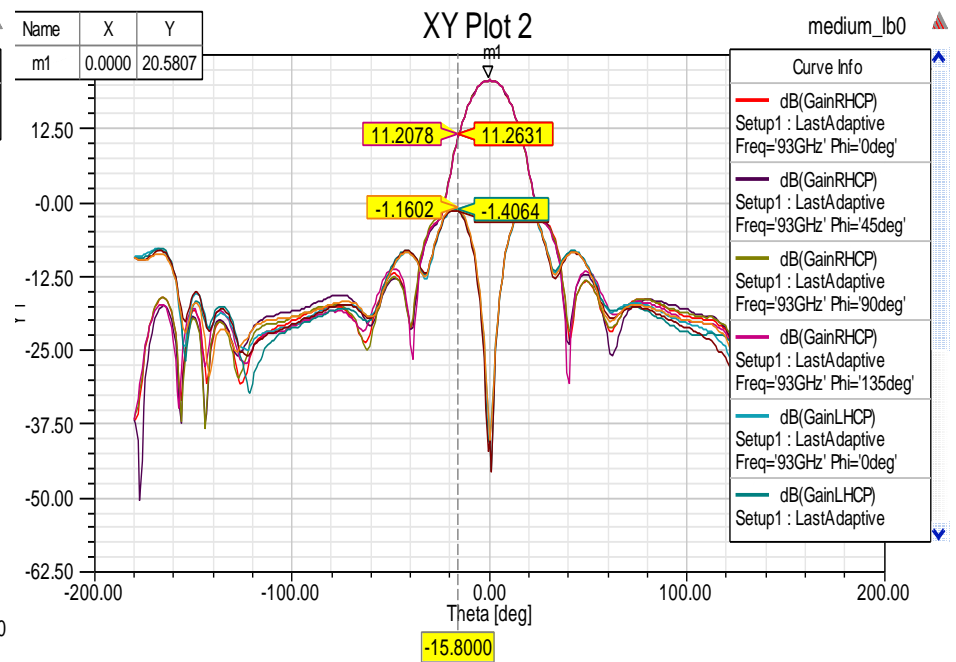
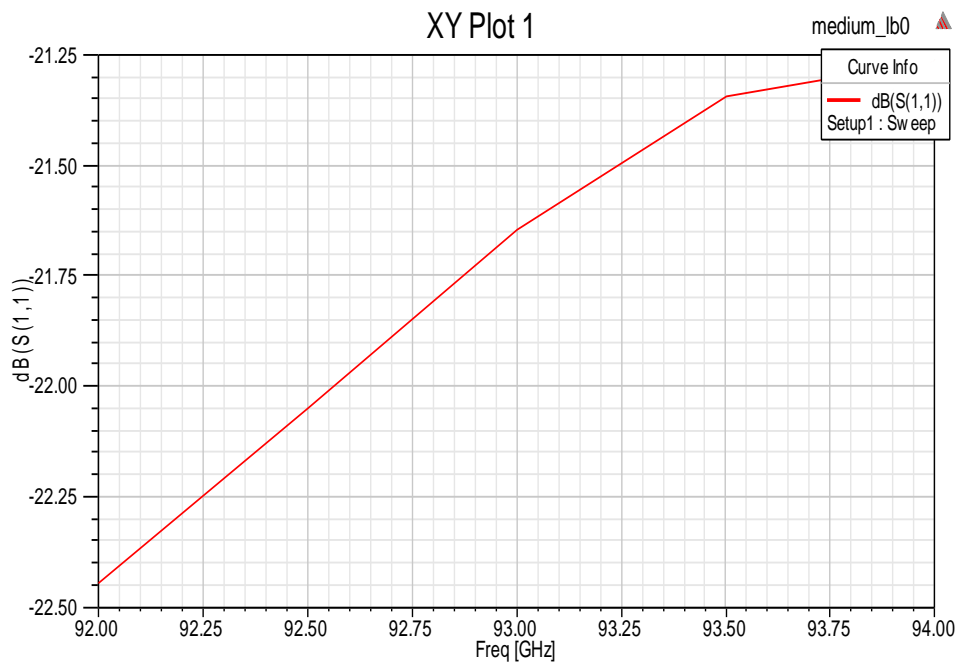
www.hi-dingle.com

- 介质加载喇叭
- 可能获得较好方向图特性、频带较宽
- 结构简单
- 无经验设计公式，难以设计



0 15 30 (mm)

介质加载喇叭



介质加载喇叭方向图

3.5 波纹喇叭设计

www.hi-dingle.com

➤ 设计思路

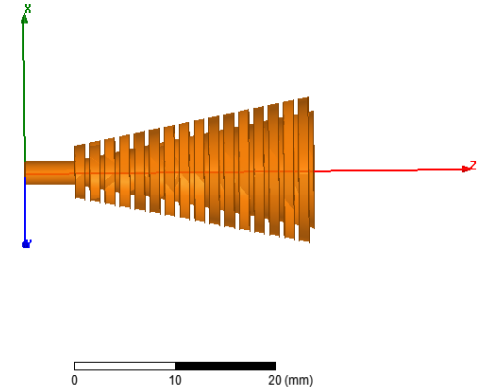
- 确定喇叭内口径 a_s
- 选定初始喇叭半张角 φ_0
- 选定波纹结构初始尺寸:

$$\text{槽深 } d_{wave} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{槽距 } p_{wave} \leq \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{槽宽 } w_{wave} = \frac{2}{3} p_{wave}$$

- 由最小遮挡关系所得最大口径尺寸选取合适的 a_h
- 调试各参数，确定较优结构。



3.6 介质加载喇叭设计

www.hi-dingle.com

➤ 设计思路

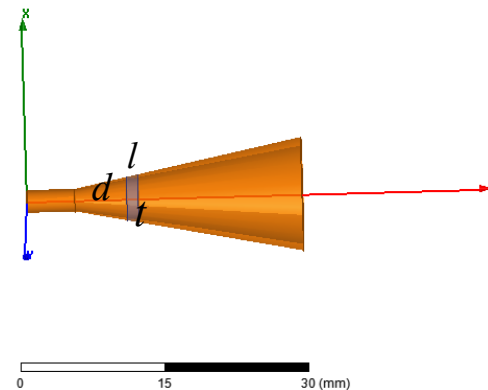
- 确定喇叭内口径 a_s
- 选定初始喇叭半张角 φ_0
- 任意选取介质环初始参数：

$$\text{位置 } d \in [0, L)$$

$$\text{长度 } l \in [0, L - d]$$

$$\text{厚度 } t \in [0, a_s]$$

- 由最小遮挡关系所得最大口径尺寸选取合适的 a_h
- APDS优化喇叭性能，确定最终结构参数。



3.7 介质加载喇叭的APDS优化

www.hi-dingle.com

➤ 模型创建

- ✓ 创建仿真模型：介质加载喇叭的HFSS或FEKO工程模型
- ✓ 在APDS用户端新建设计工程，导入待优化仿真模型

➤ 优化设置

- ✓ 配置APDS设置
- ✓ 设置优化变量
- ✓ 设置优化目标
- ✓ 配置优化算法
- ✓ 启动优化
- ✓ 获取优化工程数据



APDS用户端启动封面

3.8 介质加载喇叭的优化变量设置

www.hi-dingle.com

■ 设置依据

- ✓ 变量元素
- ✓ 变量取值范围
- ✓ 工程附加要求
- ✓ 经验

■ 示例变量

- 喇叭长度
- 介质参数
- 样本近600万



The screenshot displays the optimization settings interface of APDS. At the top, there are three main sections: '优化设置' (Optimization Settings) with icons for '变量设置' (Variable Settings), '目标设置' (Target Settings), and '算法设置' (Algorithm Settings); '导出' (Export) with icons for '导出工程' (Export Project) and '导出数据' (Export Data); and '优化' (Optimize) with icons for '开始优化' (Start Optimization), '暂停优化' (Pause Optimization), and '停止优化' (Stop Optimization). Below these sections is a table listing the optimization variables.

	变量名称	变量类型	单位	变量初始值	变量最小值	变量最大值	设置信息
1	R_lb	结构变量	mm	29	20	40	变量步长1
2	l_medium	结构变量	mm	1.2	0	10	变量步长0.1
3	t_medium	结构变量	mm	0.5	0.3	3	变量步长0.1
4	d_medium	结构变量	mm	3	0.5	10	变量步长0.1

APDS优化变量设置

3.9 介质加载喇叭的优化目标设置

www.hi-dingle.com

■ 预期性能

- ✓ 旋转对称方向图
- ✓ 低副瓣
- ✓ 低照射锥削
- ✓ 驻波性能良好

■ 目标要求

- 不圆度_低
- 副瓣抑制_低
- 波束宽度_窄
- 反射系数_低

The screenshot shows the optimization control panel with buttons for '变量设置' (Variable Settings), '目标设置' (Target Settings), '算法设置' (Algorithm Settings), '导出工程' (Export Project), '导出数据' (Export Data), '开始优化' (Start Optimization), '暂停优化' (Pause Optimization), and '停止优化' (Stop Optimization). Below the panel is a table of optimization goals.

目标类型	目标名称	目标值	目标约束
1 3dB主瓣宽度	3dB主瓣宽度目标2	3dB主瓣宽度<6	Phi切面=0 频率=92,92.5,93,93.5,94
2 副瓣抑制	副瓣抑制目标2	副瓣抑制>17	Phi切面=0 切面点-6~6 频率=92,92.5,93,93.5,94
3 不圆度	不圆度目标1	不圆度<0.1	Theta切面=4 切面点=0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,2...
4 不圆度	不圆度目标5	不圆度<0.15	Theta切面=10 切面点=0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,...
5 不圆度	不圆度目标3	不圆度<0.2	Theta切面=16 切面点=0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,...
6 不圆度	不圆度目标4	不圆度<0.25	Theta切面=30 切面点=0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,...
7 反射系数	反射系数目标1	反射系数S(1,1)<-17	频率=92,92.5,93,93.5,94

APDS优化目标设置

3.10 介质加载喇叭的优化算法配置

www.hi-dingle.com

■ 参数配置

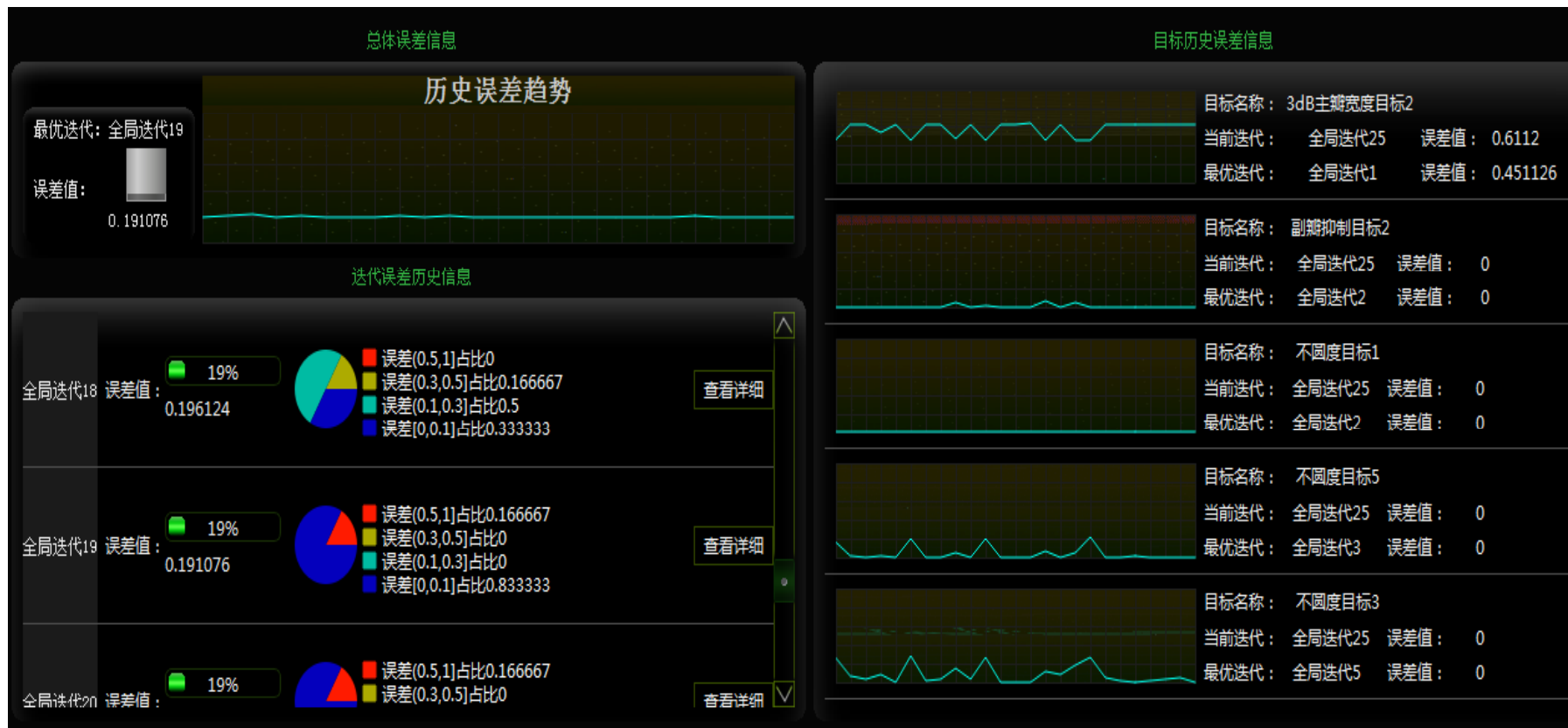
- 算法选择
- 种群大小
- 迭代次数
- 目标权重

全局优化算法 - 非支配遗传算法	
种群大小: 500	最大代数: 50
评价算法 - 加权求和法	
目标名称	权重
1 不圆度OutRoundnes...	1
2 不圆度OutRoundnes...	1
3 反射系数S(1,1)-17	3
4 不圆度OutRoundnes...	1
5 副瓣抑制SidelobeRe...	3
6 不圆度OutRoundnes...	1
7 3dB主瓣宽度3dbBea...	3

APDS优化算法设置

3.11 介质加载喇叭的APDS优化评价

www.hi-dingle.com



3.12 介质加载喇叭的APDS优化结果

www.hi-dingle.com

变量更新 列表 曲线

	迭代数	结构变量R_lb	构变量d_mediur	构变量l_mediur	构变量t_mediur
13	迭代13	24	2.4	1.7	1.1
14	迭代14	34	9.8	4.9	0.5
15	迭代15	25	2.2	4.6	1.2
16	迭代16	29	4.7	2.5	2.6
17	迭代17	34	2.4	10	2
18	迭代18	23	2.3	3	1.6
19	迭代19	26	2.2	2.9	1.4
20	迭代20	29	4.7	2.5	2.4
21	迭代21	25	2.2	2.5	1.5
22	迭代22	25	5.8	0	2
23	迭代23	25	5.4	0.2	1.9
24	迭代24	29	4.7	2.5	2.5
25	迭代25	25	5.8	0	2.1

介质加载喇叭结构参数

优化目标 副瓣抑制目标2

数据表 数据图

	迭代	92GHz	92.5GHz	93GHz	93.5GHz	94GHz
14	全局迭代14	36.7511	36.7064	36.7166	36.835	36.0279
15	全局迭代15	14.8953	14.9199	15.0257	15.4765	16.3844
16	全局迭代16	19.439	35.8459	35.9661	34.8315	33.0662
17	全局迭代17	14.2904	15.5789	16.7315	17.176	16.6547
18	全局迭代18	16.7077	17.2767	18.0381	18.6253	18.6773
19	全局迭代19	32.7441	32.5984	32.5099	32.3714	31.9403
20	全局迭代20	22.3705	33.6626	33.7106	32.9282	31.5352
21	全局迭代21	25.564	28.3482	28.72	28.9689	29.0958
22	全局迭代22	29.3882	29.3868	29.5159	29.7002	29.8562
23	全局迭代23	29.1743	29.1135	29.0184	28.9635	29.0322
24	全局迭代24	33.4358	33.6574	33.6982	33.0457	31.6447
25	全局迭代25	28.7007	28.6528	28.7408	28.8789	28.9029

介质加载喇叭性能数据

汇报内容

www.hi-dingle.com

1

应用背景简介

2

卡塞格伦天线系统的构建

3

高效馈源优选技术

4

一体化建模的**APDS**优化

5

总结

4.1 模型仿真精度与效率

www.hi-dingle.com

■ 仿真方案

➤ FEKO

➤ MOM/MLFMM+LE-PO

➤ 结合馈源金属结构一体化建模

表1-不同仿真条件下，同一数学原型的数值仿真结果

Method	PO	LE-PO_0.4λ	LE-PO_0.5λ	LE-PO_λ	LE-PO_def
SLL(dB)	-24.23	-24.27	-24.28	-24.06	-23.12
Gain(dBi)	46.27	46.21	46.17	45.75	44.49
Time	3Days	3h	2.1h	1.5h	1.1h

- 主抛物面剖分 $< 0.5\lambda$ 时，较PO方法，计算误差小于0.3%
- 主抛物面剖分 $=\lambda$ 时，计算误差小于1%，耗时低，适于APDS优化模型

4.2 主反射面的赋形

www.hi-dingle.com

◆ 赋形函数

原抛物线: $y = ax^2$, $x \in [0,1]$

赋形后:

$$y' = ax^2 + \sum_i^M a_i x^i + \cos \theta (0.5 - 0.5 \cos(\pi x))^p \sum_k^N c_k \sin(2\pi nkx)$$

$$x' = x - \sin \theta (0.5 - 0.5 \cos(\pi x))^p \sum_k^N c_k \sin(2\pi nk)$$

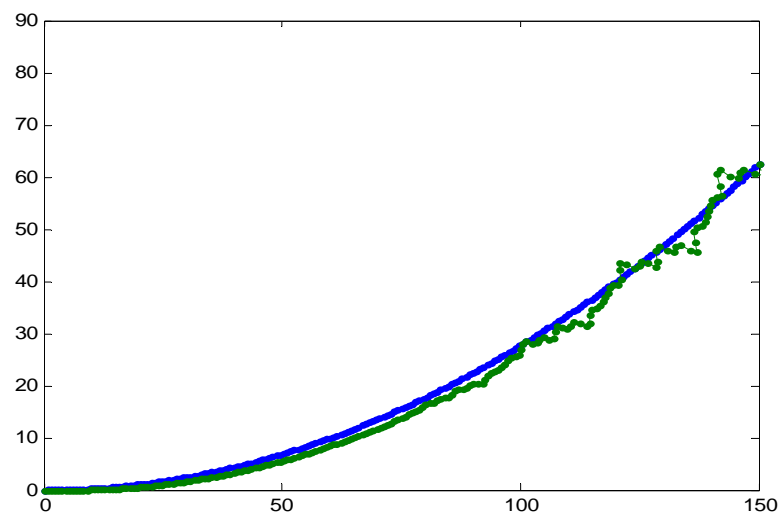
其中,

$$\tan \theta = \left(ax^2 + \sum_i^M a_i x^i \right)^t$$

$$\sum_i^M a_i = 1, \left| \frac{a_i}{a} \right| \leq 0.1, |c_i| \leq \lambda$$

M, p, N, n 均为整数, 取

$$M = 3, p \in [2,5], N = 7, n \in [0,8]$$

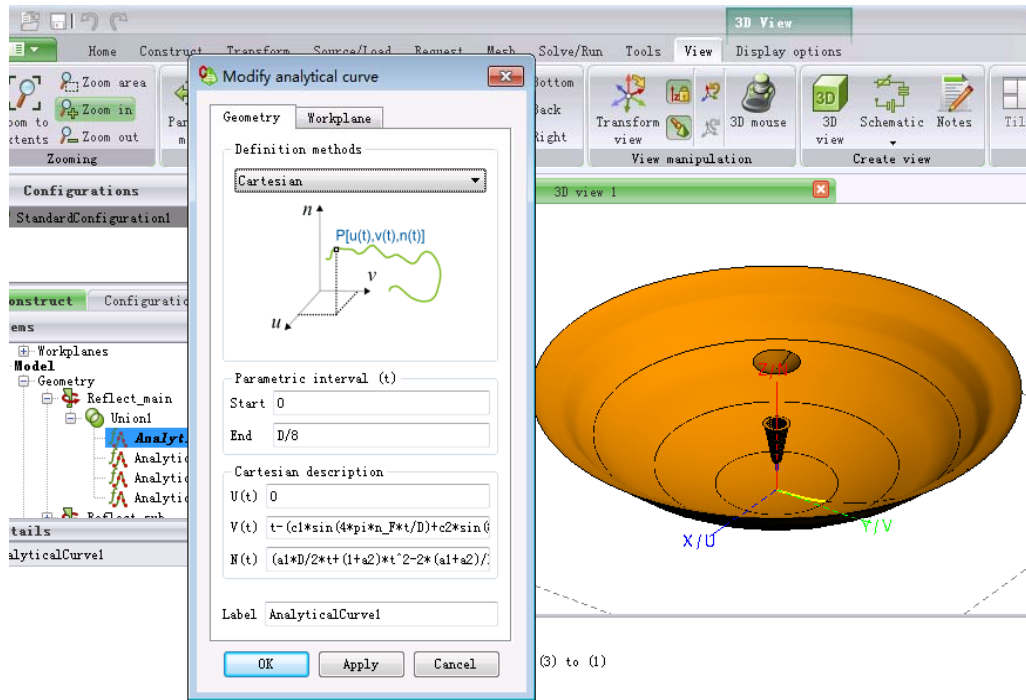


蓝色为原抛物线, 绿色为赋形曲线

4.3 赋形主反射面的建模

www.hi-dingle.com

➤ 全参量一体化建模



V(t):

$$t - (c1 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c2 \cdot \sin(8 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c3 \cdot \sin(12 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c4 \cdot \sin(16 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c5 \cdot \sin(20 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c6 \cdot \sin(24 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c7 \cdot \sin(28 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D)) \cdot (0.5 - 0.5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t / D))^{\wedge} n_{\text{mod}} \cdot \sin(\arctan(((D / 2 \cdot a1 + 2 \cdot (1 + a2) \cdot t - 6 \cdot (a1 + a2) / D \cdot t^2) / (4 \cdot f_D))))$$

N(t):

$$(a1 \cdot D / 2 \cdot t + (1 + a2) \cdot t^2 - 2 \cdot (a1 + a2) / D \cdot t^3) / (4 \cdot f_D) + (c1 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c2 \cdot \sin(8 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c3 \cdot \sin(12 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c4 \cdot \sin(16 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c5 \cdot \sin(20 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c6 \cdot \sin(24 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D) + c7 \cdot \sin(28 \cdot \pi \cdot n_F \cdot t / D)) \cdot (0.5 - 0.5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t / D))^{\wedge} n_{\text{mod}} \cdot \cos(\arctan(((D / 2 \cdot a1 + 2 \cdot (1 + a2) \cdot t - 6 \cdot (a1 + a2) / D \cdot t^2) / (4 \cdot f_D))))$$

- 赋形曲线分四段建模，克服FEKO建模挑战
- 喇叭口面附加遮挡尺寸，考虑壁厚槽深影响

4.4 赋形卡塞格伦天线的APDS优化

www.hi-dingle.com

◆ APDS优化方案

- 全参量
- 抑制副瓣为优化主要目标
- 优化目标含增益、反射系数

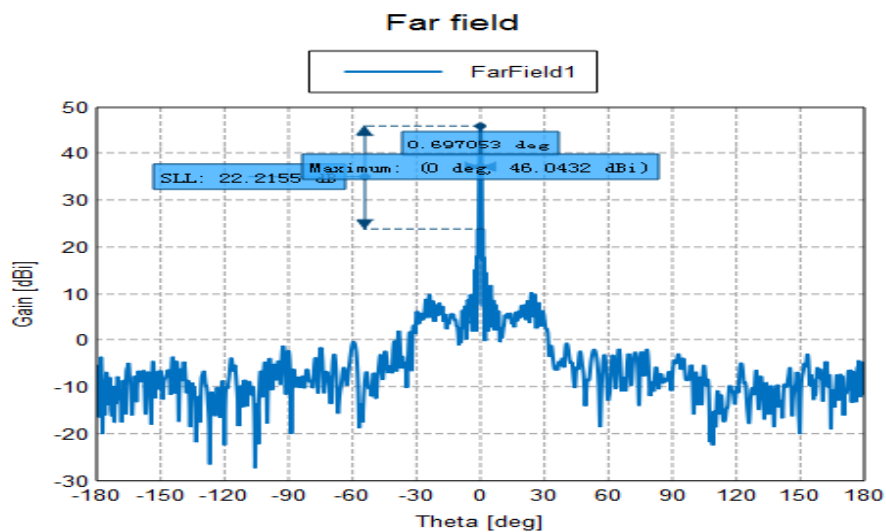
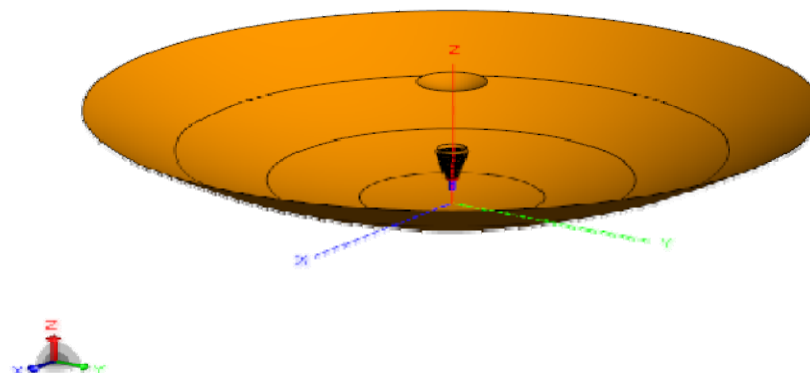
目标类型	目标名称	目标值	目标约束
1 反射系数	反射系数目标1	反射系数 $S(1,1) < -17$	频率=93
2 增益	增益目标1	增益 > 45	频率=93
3 副瓣抑制	副瓣抑制目标1	副瓣抑制 > 35	Phi切面=0 切面点-0.5~0.5 频率=93

	变量名称	变量类型	单位	变量初始值	变量最小值	变量最大值	设置信息
1	n_mod	结构变量	-	5	2	5	变量步长1
2	L_lb	结构变量	-	21.9	17.5	30.5	变量步长0.2
3	D	结构变量	-	310	300	310	变量步长2
4	w_wavelb	结构变量	-	1	0.8	1.1	变量步长0.1
5	z_lb	结构变量	-	18.4	16.2	20.2	变量步长0.2
6	c1	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05
7	a2	结构变量	-	-0.05	-0.1	0.1	变量步长0.005
8	a1	结构变量	-	0.02	-0.1	0.1	变量步长0.005
9	c2	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05
10	a_lb	结构变量	-	6	4	7	变量步长0.2
11	c6	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05
12	c7	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05
13	c4	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05
14	c5	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05
15	n_F	结构变量	-	1	1	8	变量步长1
16	d_wavelb	结构变量	-	1.3	0.8	1.5	变量步长0.1
17	c3	结构变量	-	0	-3	3	变量步长0.05

4.5 赋形卡塞格伦天线的优化结果

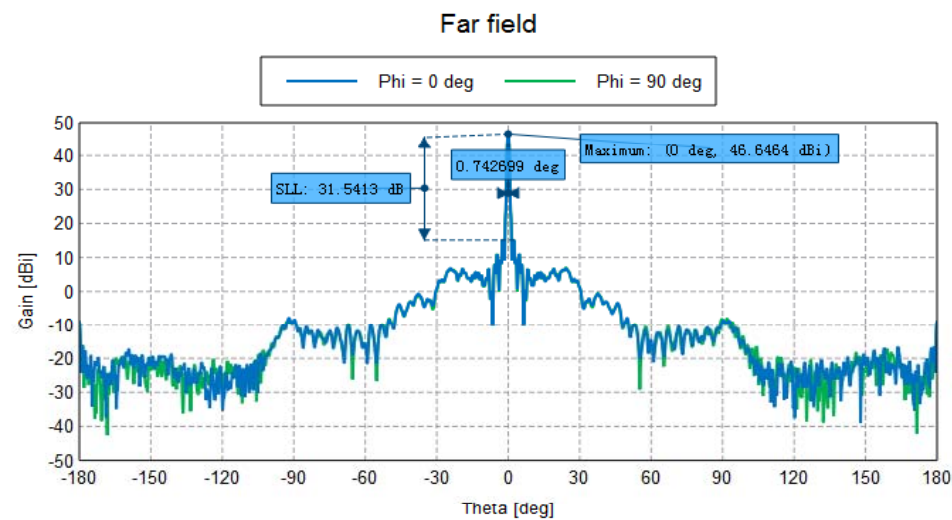
www.hi-dingle.com

◆ 暂优模型与结果



Total Gain [dBi] (Frequency = 93 GHz; Phi = 0 deg) - KSGI_APDS_P11_1216

优化前



Total Gain (Frequency = 93 GHz) - KSGI_APDS_P11_13best_max

优化后

汇报内容

www.hi-dingle.com

1

应用背景简介

2

卡塞格伦天线系统的构建

3

高效馈源优选技术

4

一体化建模的**APDS**优化

5

总结

5.1 赋形卡塞格伦天线的优势

www.hi-dingle.com

- ✓ 具有高效率馈源结构
- ✓ 主反射面赋形函数构型独特
- ✓ 副瓣抑制水平远远超过普通设计水平
- ✓ 其他方向图性能并未降低



5.2 APDS的应用优势

www.hi-dingle.com

- ✓ 快速设计高效馈源结构
- ✓ 实现多变量优化一体化建模的卡塞格伦天线系统
- ✓ 基于APDS平台设计的模型性能业内领先



谢谢大家!

