



中测微格  
Zhongce Microgrid

# 毫米波准光计算与准光功率 合成系统

---

---

四川中测微格科技有限公司

2013年1月16日



## 汇报提纲

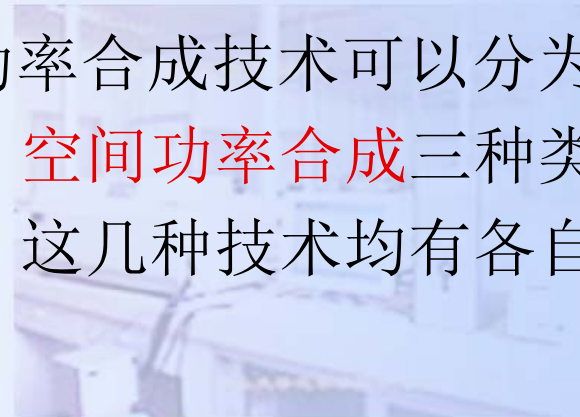
- 毫米波功率合成技术现状
- 准光功率合成技术方案
- 准光计算方法介绍
- 核心关键技术解决与成果
- 准光功率合成系统样机研制
- 实验室其它研究领域与产品

# 一、毫米波功率合成技术现状

测微格  
Zhongce Microgrid

固态功率源由于其可靠性是微波、毫米波电路最理想的功率源，但限于半导体工艺水平，固态功率源的输出功率随频率增加而降低，在毫米波频段，通常需要通过多个固态源的输出功率的合成才能满足系统的功率需求。

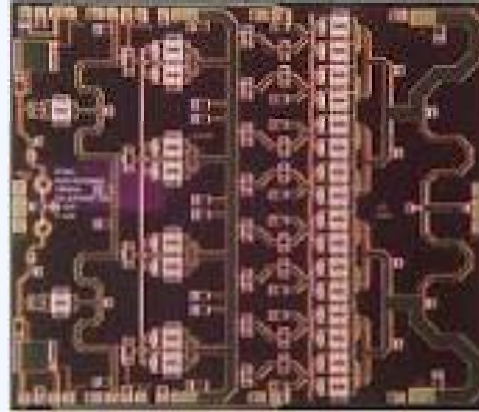
目前技术成熟的毫米波功率合成技术可以分为**芯片级功率合成**、**电路功率合成**、**空间功率合成**三种类型。根据频率及应用场景的不同，这几种技术均有各自成功的应用。



# 一、毫米波功率合成技术现状

Zhongce Microgrid

## 1. 芯片级功率合成



**优点：**芯片功率合成具有电路性能稳定、频率宽、效率高、体积小等特点。

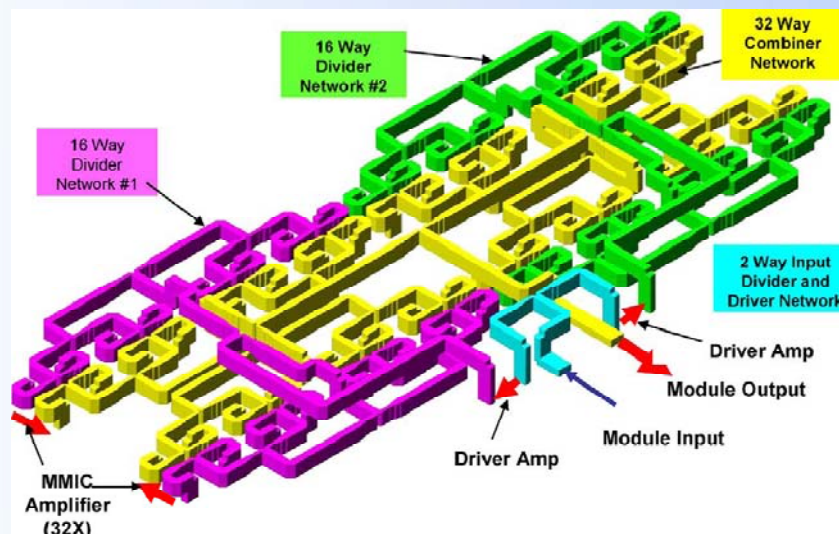
**局限性：**

- 管芯数量增多时会增大实现阻抗匹配的难度，芯片上制作无源匹配和合成传输线的面积也随之增大，导致传输损耗变大，合成效率低下，难以实现有效的多路合成。
- 当频率升高时，管芯之间距离很小，如果合成路数较多，散热问题将难以解决。一般在芯片级的功率合成中，合成级数一般不超过四级，仅靠芯片合成所提高的功率是很有限的。

# 一、毫米波功率合成技术现状

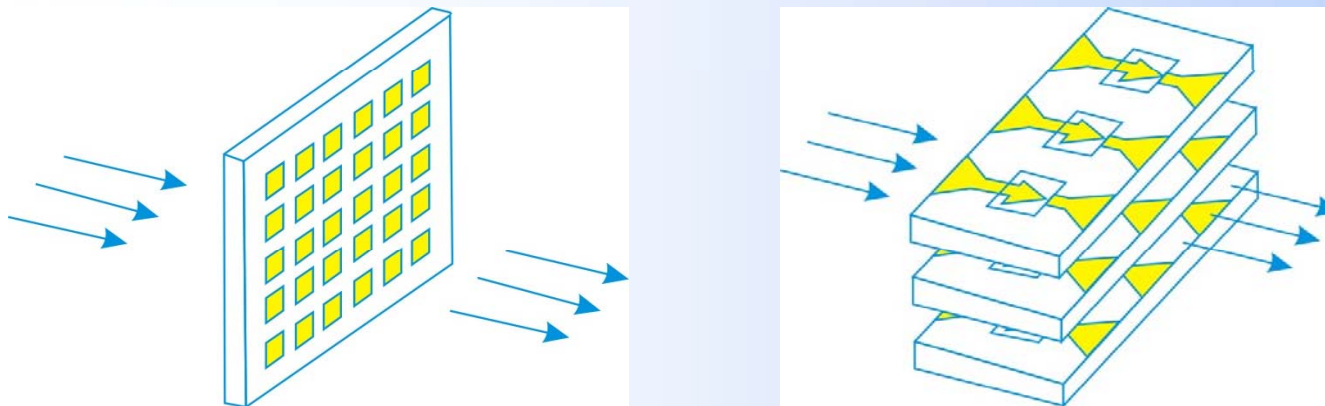
Zhongce Microgrid

## 2. 电路功率合成



- 谐振式功率合成将多个固态放大器的输出功率通过在谐振腔内特定模式耦合实现功率叠加。该结构的优点是：由于器件功率直接耦合到谐振腔内合成并输出，基本上没有路径损耗，合成效率高。主要缺点是，合成电路Q值高，工作频带窄，合成路数增多时合成效率降低严重。多路数合成时效率降低，可用于合成的器件数目受腔体模式问题限制。
- 非谐振式功率合成中，功率器件之间的间距不受限制，匹配性能好，散热易于实现，合成路数多。电路合成方式主要有多级树形结构和N-路结构两种。对毫米波N-路固态功率合成来说，随着支路数量的增多，相应的合成网络除了结构、工作带宽等原因外还存在模式问题、多路固态功率器件集成等问题。

## 3. 空间功率合成



虽然空间功率合成方案目前在X、Ka、V波段都有广泛的应用，但仍有明显的缺点。由于其通过天线阵列的方式实现放大器件功率的输出，为了避免阵列产生栅瓣而导致合成效率急剧下降，阵列中辐射单元和放大器间隔典型值为半个波长，最大不能超过一个波长，这导致器件散热难以很好解决，频率越高时散热和辐射效率越难以平衡。Sanders公司的V波段空间功率合成方案合成效率只有45%-50%。

## 4. 准光功率合成

为了在短毫米以上频段实现高路数的功率合成，出现了一类基于光学原理设计的功率合成方案，与光学系统类似，这些系统通过透镜、介质栅及金属反射面天线等相位元件控制电磁波能量分布，利用经过复杂优化的结构实现电磁波束在自由空间的分束与合成。目前已有报道的有全息栅式、傅立叶栅式、赋形反射面式三种，与以往空间功率合成方案相比，它们在设计原理、工作原理、系统结构上都有明显的不同，但三种方案之间又有内在的相似性。

此类准光功率合成方案在短毫米波以上极高频段、极高路数功率合成等极具发展潜力的方向具有突出优势，这就使得对准光功率合成技术的研究非常必要，有望为目前正在迅猛发展的3毫米电路系统、亚毫米波天文望远镜、太赫兹应用等系统提供高质量的固态源。

# 一、毫米波功率合成技术现状

Zhongce Microgrid

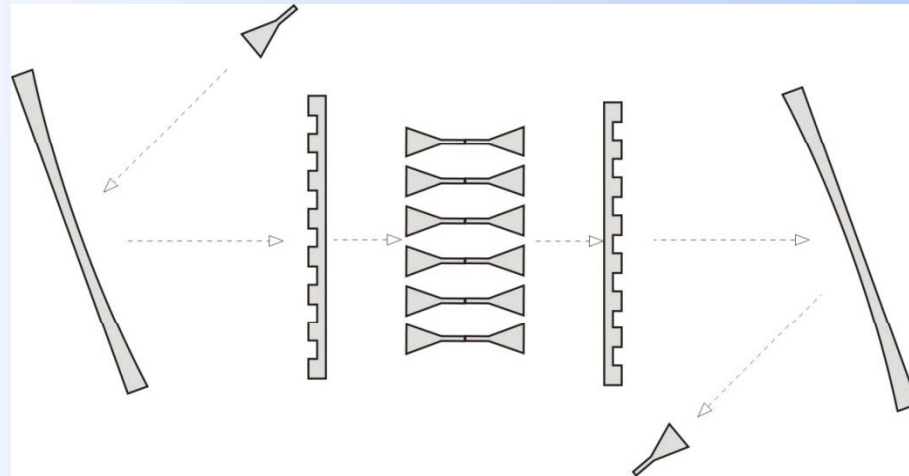
准光功率合成具有如下特征：

- 利用相位元件实现波束控制，相位元件包括透镜、介质栅、赋形反射面等；
- 对电磁波能量传递进行精确控制；
- 基于光学原理（标量衍射理论）设计；
- 理论上合成路数没有上限，路数增加不会造成设计难度的显著增加；
- 用于短毫米波、亚毫米波、太赫兹频段；
- 理论上固态源为平衡激励，每个固态源的激励功率与相位相同；
- 固态放大器阵列间距不受限制，并且与功率分配/合成模块相互独立，散热易于处理；
- 电尺寸较大，并且对结构参数具有低敏感度，对加工工艺要求低；



## 二、准光功率合成技术

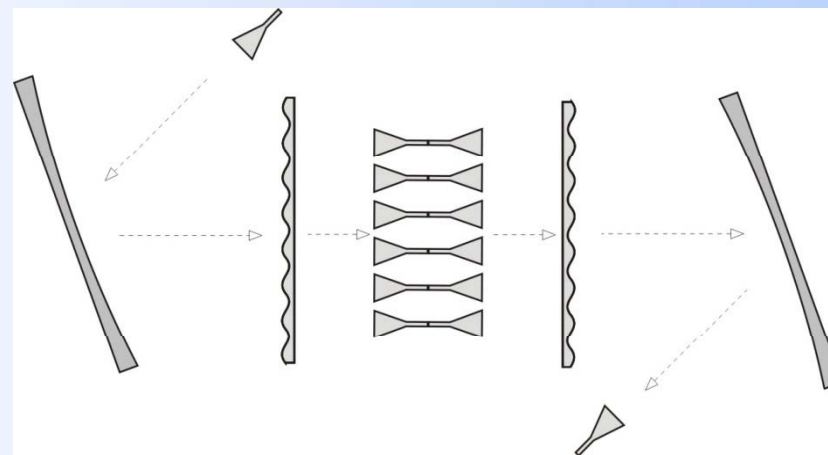
### 1. 泰伯光栅功率合成系统



该方案的优点是允许器件间足够的间隔以有效散热，功率分配幅度及相位一致、设计简单、重量轻、合成路数无上限等优点。2002年，德国团队研制出基于全息栅的150GHz的样机，实测合成效率77%，带宽4%。

泰伯栅其合成效率随栅的阶数增加而提高，8阶泰伯栅合成效率的理论值为95%，但是阶数越高加工难度越大，高阶数带来的额外效率增益有可能被加工误差所抵消。在全息栅系统的功率分配端，必须通过一个抛物反射面将从焦点发出的高斯波束转化称准平面波，接收天线阵列平面上波束强度从中间到边缘逐渐减弱，要么需要舍弃边缘的波束，要么使边缘放大器工作于非饱和输出状态，影响了系统的整体输出功率。此外介质栅还存在损耗较大、热性能及机械性能不佳导致易变形等缺陷，由于反射及接收单元之间存在光栅而增大了系统复杂度。

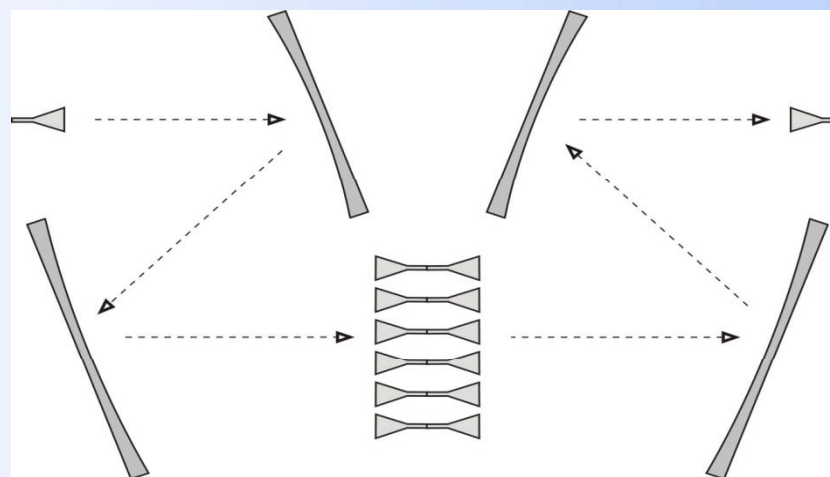
## 2. 傅里叶栅功率合成系统



傅立叶栅方案是相位连续变化的光栅。根据弗朗合费衍射原理，在均匀平面波的照射下，傅立叶栅的之后的复数光强是其相位分布的傅立叶变换。已报道490GHz，10个波束的傅立叶光栅，实测合成效率为84%。由于傅立叶栅基于弗朗合费衍射，波束阵列接收单元需处于光栅的远场才能具有足够的精度，所以傅立叶栅在短毫米波以上的高频段性能较好，并且只适于对电路体积要求并不特别敏感的应用上（如地面天文望远镜）。

傅立叶栅方案相比泰伯栅方案具有多种优势：连续相位栅表面更易于加工；相位栅可以通过投影的方式雕刻在抛物反射面上，这样抛物反射面同时完成准平面波生成及相位调制双重功能，这样即可取消介质栅结构，系统结构得以化简，并且可以避免介质损耗。但遗憾的是由于其原理性缺陷即只能工作于远场区，严重限制了应用范围。

## 3. 赋形反射面功率合成系统



赋形金属反射面式准光功率合成仅使用一个或两个具有起伏表面的金属反射镜即可将一个高斯波束转化为多个波束，并且波束路径上只有反射没有透射，进一步降低电磁波能量损耗。2003年德国团队提出了双反射面的功率分配\合成方案，采用基于比GO更准确的标量衍射算法优化的起伏表面双反射面取代了全息光栅来完成波束分束\合成的功能。2005年，研制了150GHz的9路合成系统样机，效率64.3%，输出功率158.3mW。

该方案的最大优点是由于其基于近场衍射理论，使整个系统更加紧凑，得以在200GHz以下的毫米波频段应用，目前是最佳准光候选方案，但其仍有明显缺陷：曲面的离散采样优化导致优化得到的曲面不平滑，不易加工，需要加入滤波处理后再次优化，但该优化迭代过程极难控制。

## ■ 标量衍射

惠更斯-菲涅尔原理是对光波的“标量”近似解释，因为光波的波长极短，人眼所能观测的现象都是远大于波长的量级，根据麦克斯韦方程，在均匀介质自由空间中电磁波的电场和磁场分量可以用同一个标量波动方程来描述，并且电场与磁场之间可以相互导出，也即单个标量分量也代表了光波的几乎全部特性。实验已经证明，只要衍射口径远大于波长、波源与观测点距离远大于波长，标量衍射是非常精确的。但是在尺寸比波长更小的微细结构中，标量衍射是不适用的。

在微波及毫米波低端，“小型化”往往是电路系统的一个重要指标，当然工作频率已经决定了系统的大致尺寸，小型化只能是电尺寸相对地小型化，而不是物理尺寸无限制地小型化。而在短毫米波及以上频段，由于波长只有1毫米左右，电尺寸小意味着更精细的结构、更敏感的设计公差、更复杂昂贵的加工工艺，所以“大”型化即电尺寸较大的系统方案反而具有优势。准光功率合成就是这一类型的方案，它在频率低端没有得以应用，并不是因为频率低时就没有准光现象，而是由于不够小型化而没有实用价值。反之亦然，目前在频率低端广泛使用的功率合成方案，因为其小型化特点，而不可能在频率高端得以应用。这正体现了本文所做研究的价值所在。

# 三、准光计算方法介绍与对比

Zhongce Microgrid

## ■ 标量衍射

### 标量衍射算法分类

	曲面	平面	近场	远场
瑞利-索末菲公式	√	√	√	√
菲涅尔衍射	×	√	√	√
弗朗合费衍射	×	√	×	√



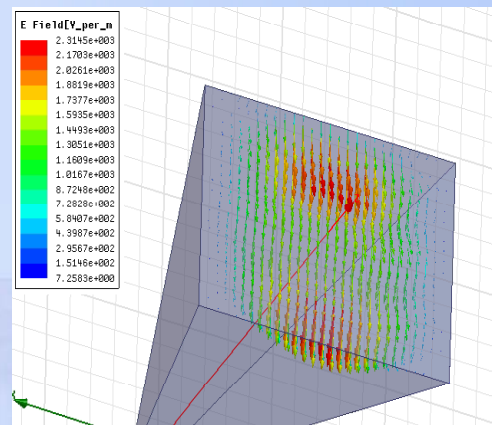
# 三、准光计算方法介绍与对比

Zhongce Microgrid

## ■ 标量衍射

### 标量衍射算法中的进一步近似

标量衍射仅利用了电场或而舍弃了另一个场分量，在赋形反射面与喇叭所构成的结构中，由于喇叭口径上的场极化纯度可以很高，如最佳增益喇叭天线口径面上的Ey场能量比例一般在95%以上（如图所示，多模喇叭天线可以更高），所以可以进一步近似，舍弃其它两个电场分量，仅用Ey场来表示喇叭口径场，但Ey场在弯曲的金属表面反射会引入少量的交叉极化分量，这也会引入少量的误差，所以赋形曲面要尽量保持平滑。



所以，在用惠更斯-菲涅尔原理来计算赋形反射面式准光系统的场分布时，除了标量衍射固有的误差外，还有喇叭口径场交叉极化、反射引入的交叉极化导致的误差，从对交叉极化的处理上来看，在仿真赋形反射面时，就计算精度而言，物理光学（PO）算法优于标量衍射理论，这一点在已经得到证实，PO与FDTD的仿真结果更接近，但标量衍射算法的误差也是可以接受的。但PO算法仿真要比标量衍射慢得多，选择标量衍射理论是在时间与精度之间的妥协。

## ■ 衍射高斯波束分析法

如果电磁波传播过程中，大部分能量都集中在传播轴的附近，在求解麦克斯韦方程时可作近轴近似，由此获得高斯波束。相对平面波而言，高斯波束在横向上的幅度是变化的，符合高斯分布；而相对理想点源（产生球面波）而言，高斯波束源的尺寸是有限大小的，其大小是利用幅度下降到传播轴上幅度的 $1/e$ 来表示。

普通波动方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

近轴波动方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

从近轴波动方程得到的解为高斯波束模，它是准光系统设计的基础。虽然很难定义一个严格的近轴近似的边界，但在一般情况下发散角在 $0.5\text{rad}$ 或 $30^\circ$ 之内都能得到比较好的近似。

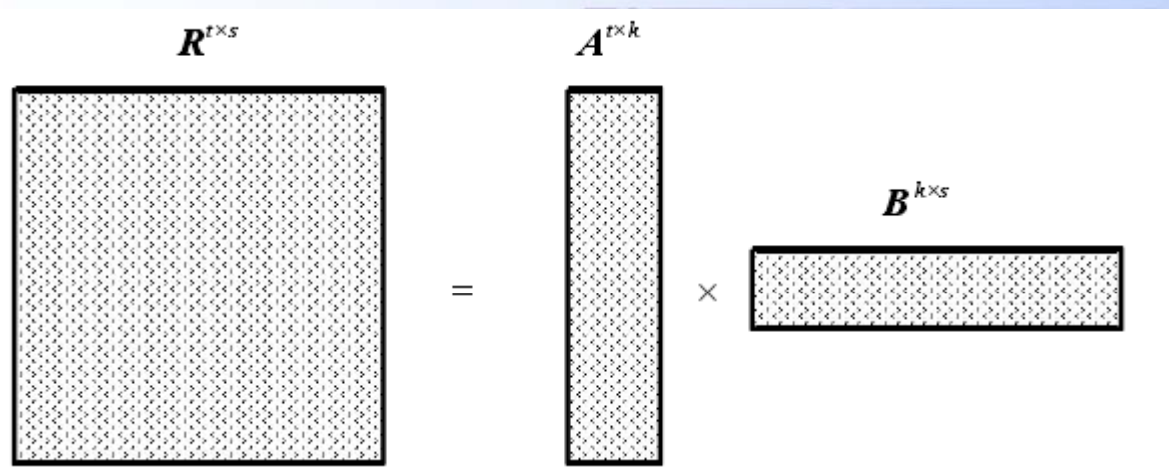
## ■ 衍射高斯波束分析法

- (1) 计算口径场的双窗函数
- (2) 将输入平面上的场进行离散化处理，并进行空间及角度采样，将场分解成高斯波束表示形式，使用双窗函数展开系数。
- (3) 进行空间尺度变换
- (4) 对每个高斯束跟踪其到反射镜面
- (5) 用圆对称高斯波束近似表示反射后的椭圆高斯波束
- (6) 确定与波束与镜面的交点最近的镜面边缘点
- (7) 在最近边缘点处用直线边缘近似曲面边缘，并利用边界衍射波条件来分析后向场。
- (8) 将反射场与衍射场叠加，产生出射面的场



## ■ H矩阵法加速矩阵计算

层次型矩阵的主要原理：用低秩近似方法去近似分解待求的矩阵的子块，例如若秩矩阵  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $k$  远小于  $n$ ，则存在两个矩阵  $B, C \in \mathbb{R}^{n \times k}$  使得可以看出矩阵的存储量为  $n^2$ ，总共的存储量为  $2kn$ ，从  $k$  远小于  $n$  可知，分解以后大大节省了存储量。在计算量方面，层次型矩阵也使得矩阵-向量乘积、矩阵-矩阵乘积、矩阵相加以及矩阵求逆的计算量可以达到  $O(kN \log N)$  量级。



## ■ 矢量衍射

(1) 模态理论

(2) 耦合波理论



# 四、核心关键技术解决与成果

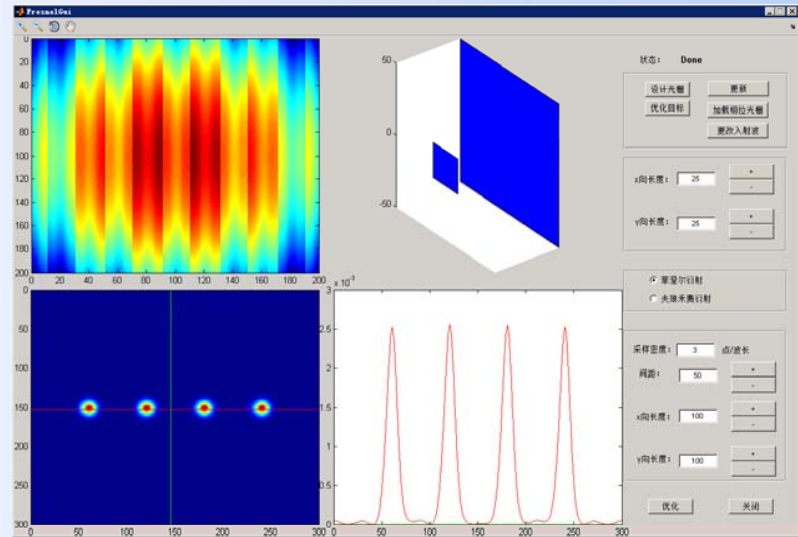
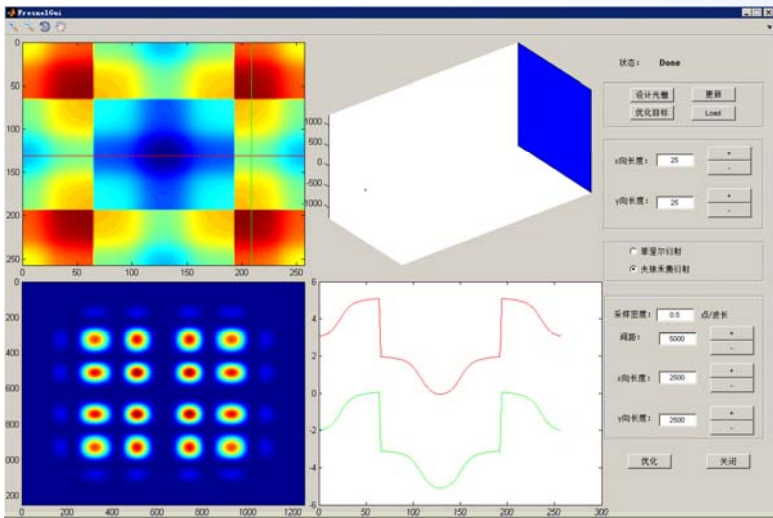
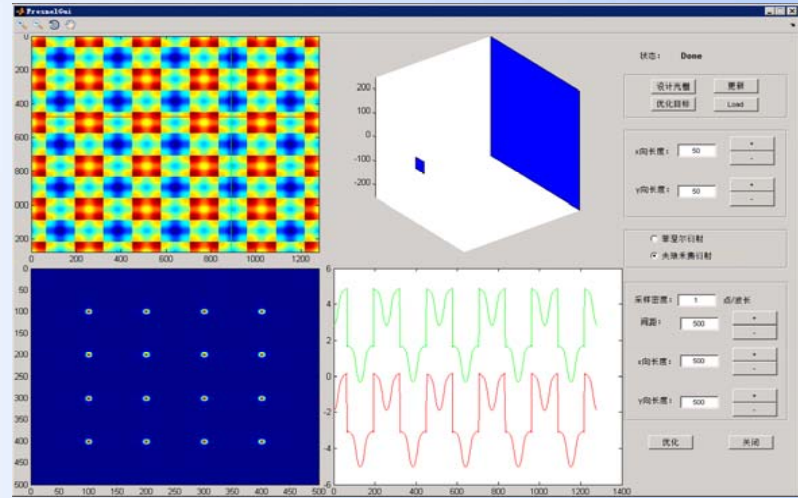
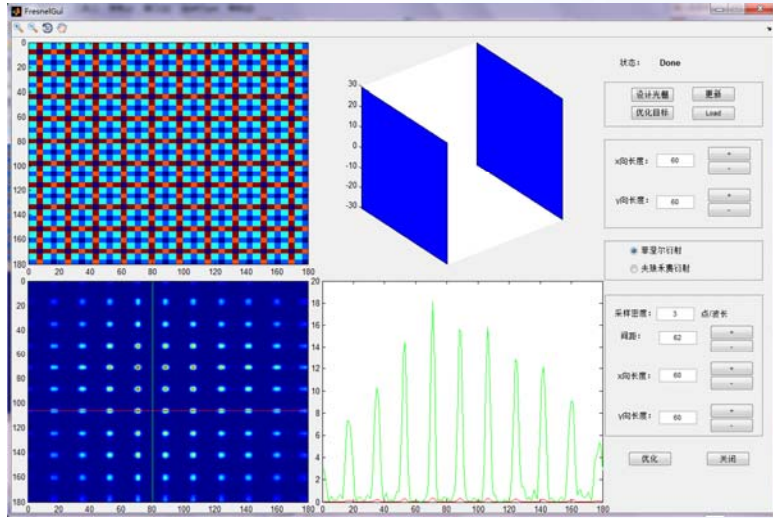


## 1. 毫米波准光并行仿真器界面

The screenshot displays the software interface for millimeter-wave quasi-optical parallel simulation, divided into several functional windows:

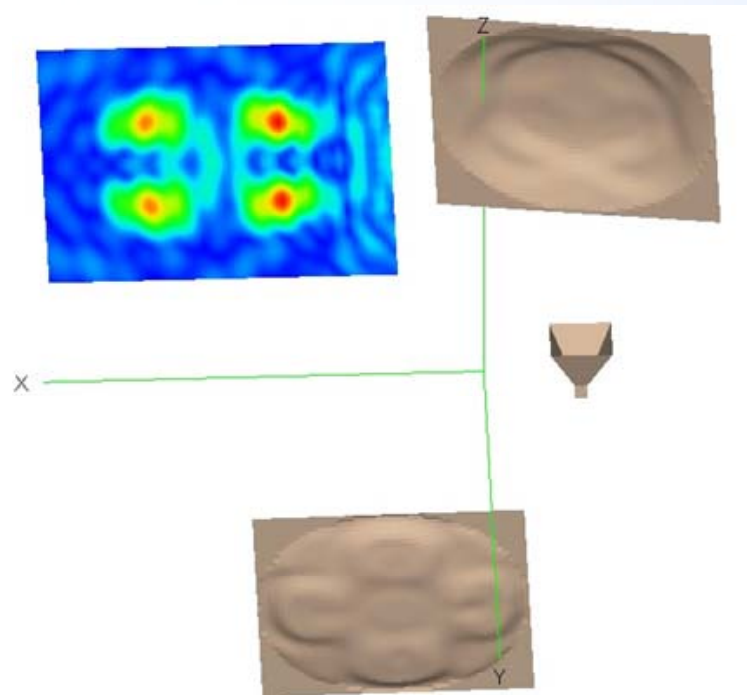
- System Structure (系统结构):** Shows a 3D schematic of the antenna system with a central feed and multiple radiating elements.
- Quasi-Optical Antenna Design (毫米波准光天线设计):** Contains parameters for antenna geometry and radiation patterns. Parameters include:  $\beta = 44.6027$ ,  $\alpha = 73.2485$ ,  $e = 0.29883$ ,  $c = 3.8250$ ,  $D = 15$ ,  $V_0 = 12$ ,  $d_c = 5$ ,  $L = 15$ ,  $\theta_{0, \beta} = 35$  degrees, and a sampling rate of 3. It includes a 3D plot of the radiation pattern and a detailed geometric diagram of the antenna structure.
- Optimization (优化):** Displays optimization statistics: Total Efficiency (总效率) 93.6357%, First Reflection (第一反射面) 85.0215%, Second Reflection (第二反射面) 72.0441%, and System (系统) 97.3541%. It also shows a surface curvature radius of 5 mm and buttons for initial data, start, and verification.
- Target Field Design (目标场设计):** Configures the target field distribution with a Gaussian distribution (高斯分布), a bandwidth of 2.5, 2 rows (行数), 2 columns (列数), and a grid spacing of 12. It features a 2D heatmap of the target field and a 3D plot of the resulting radiation pattern.
- HFSS Simulation (HFSS仿真):** Provides simulation parameters: Gain (增益) 20 dB, Frequency (频率) 300 GHz, and Waveguide (波导) type  $H_{12000} - V_{R3}$ . Dimensions include  $a = 0.8536$  mm,  $b = 0.4319$  mm, and a working frequency range of 217-330 GHz. It includes a 3D model of the waveguide and a 2D cross-sectional diagram.

# 四、核心关键技术解决与成果



# 四、核心关键技术解决与成集测微格

我们所开发软件与GMES（全波并行FDTD算法）、FEKO（物理光学与矩量法的混合算法）分别同时对照仿真一算例，如图5所示，整个模型电尺寸约为 $20\lambda \times 20\lambda \times 40\lambda$ 。

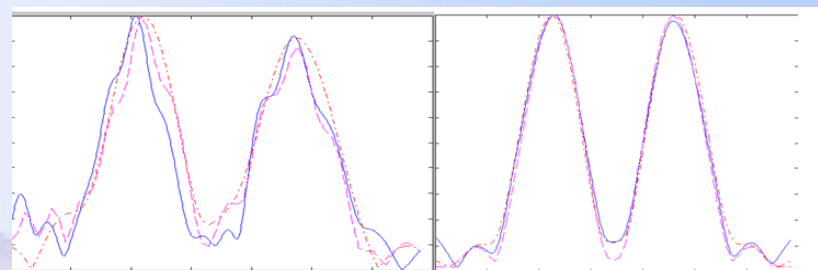
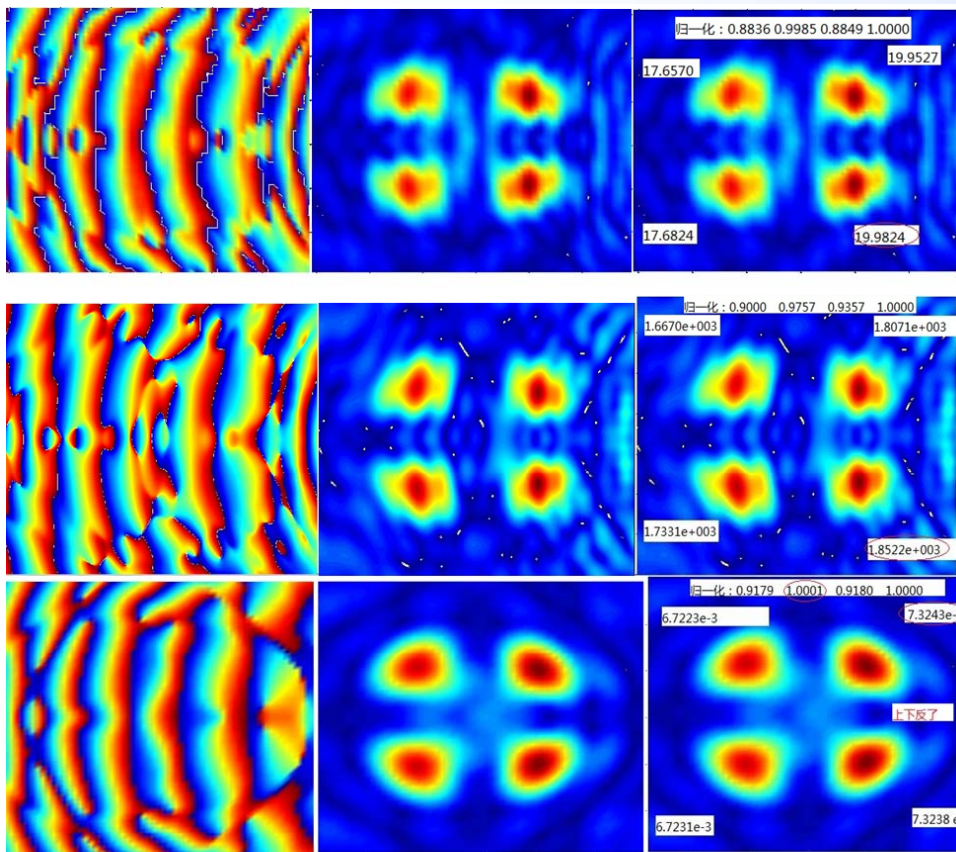


仿真消耗计算资源对比表

软件	内存占用峰值	CPU时间
GMES	128435 MByte	60进程*25小时
FEKO	727 MByte	8进程*2.472小时
本软件	1248 MByte	1进程*10秒左右

# 五、准光功率合成系统样机研制

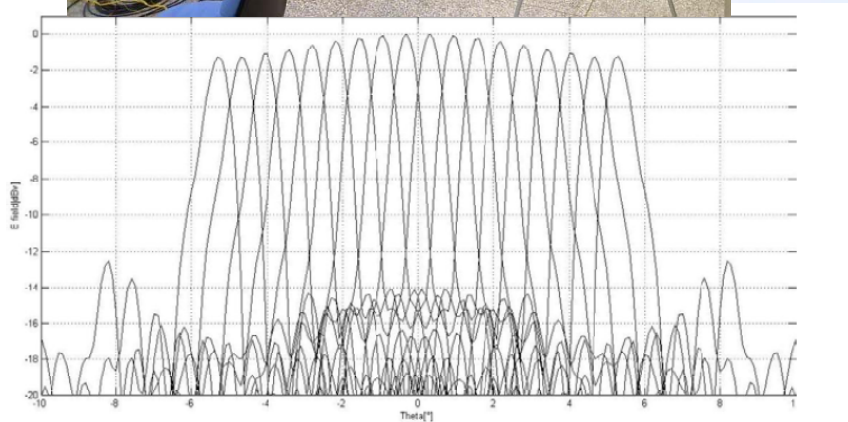
Zhongce Microgrid



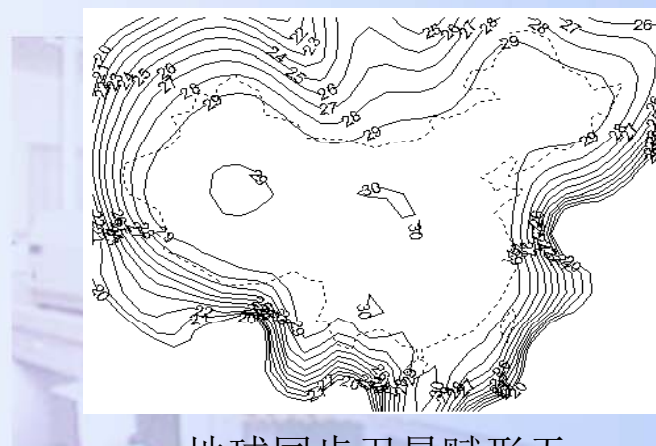
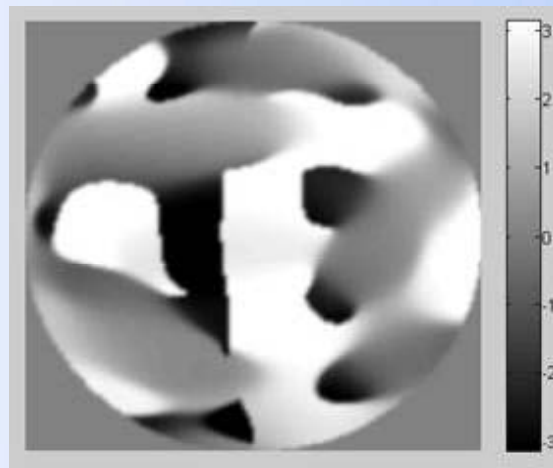
三款软件得出的成像面上xy电磁场分布对照图，其中（上feko，中gems，下为本软件）

# 四、核心关键技术解决与成集测微格

## 3. 核心技术应用于大型赋形天线设计



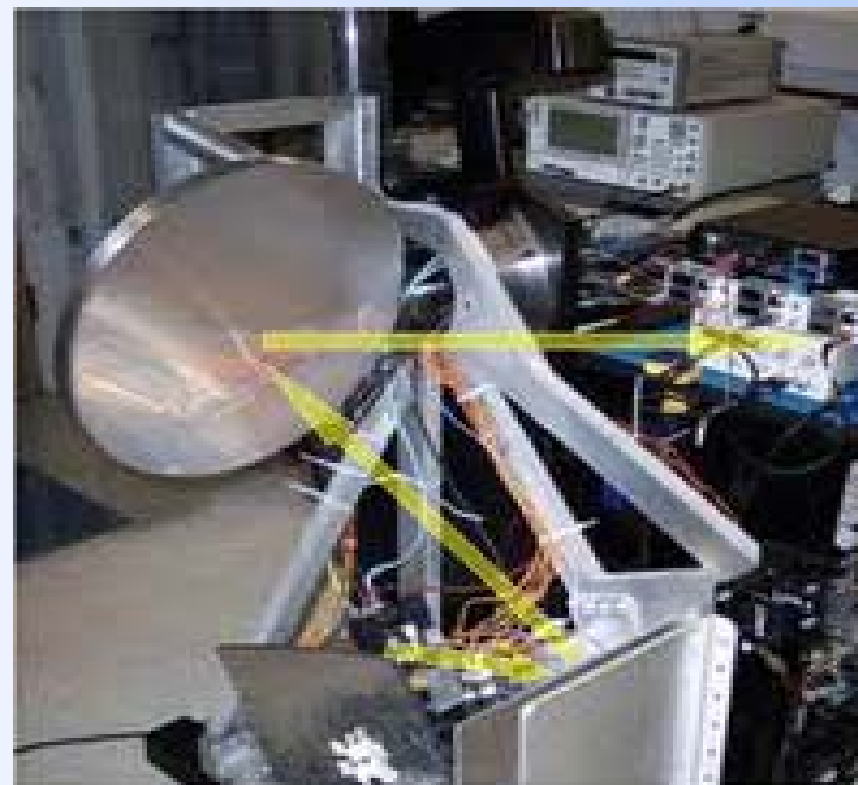
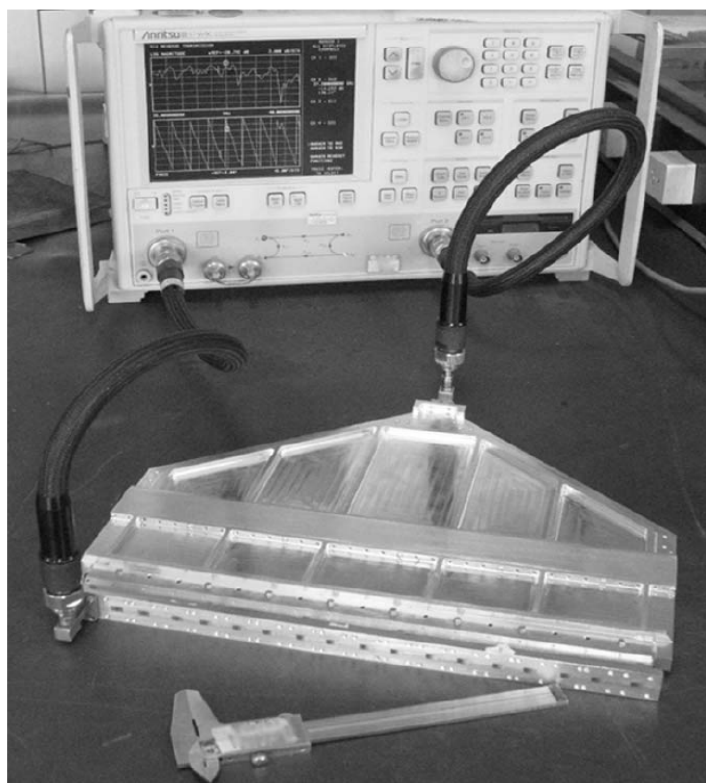
毫米波多波束透镜天线  
及多波束方向图



地球同步卫星赋形天  
线的相位轮廓及其方向图

# 五、准光功率合成系统样机研制测试微格

Zhongce Microgrid

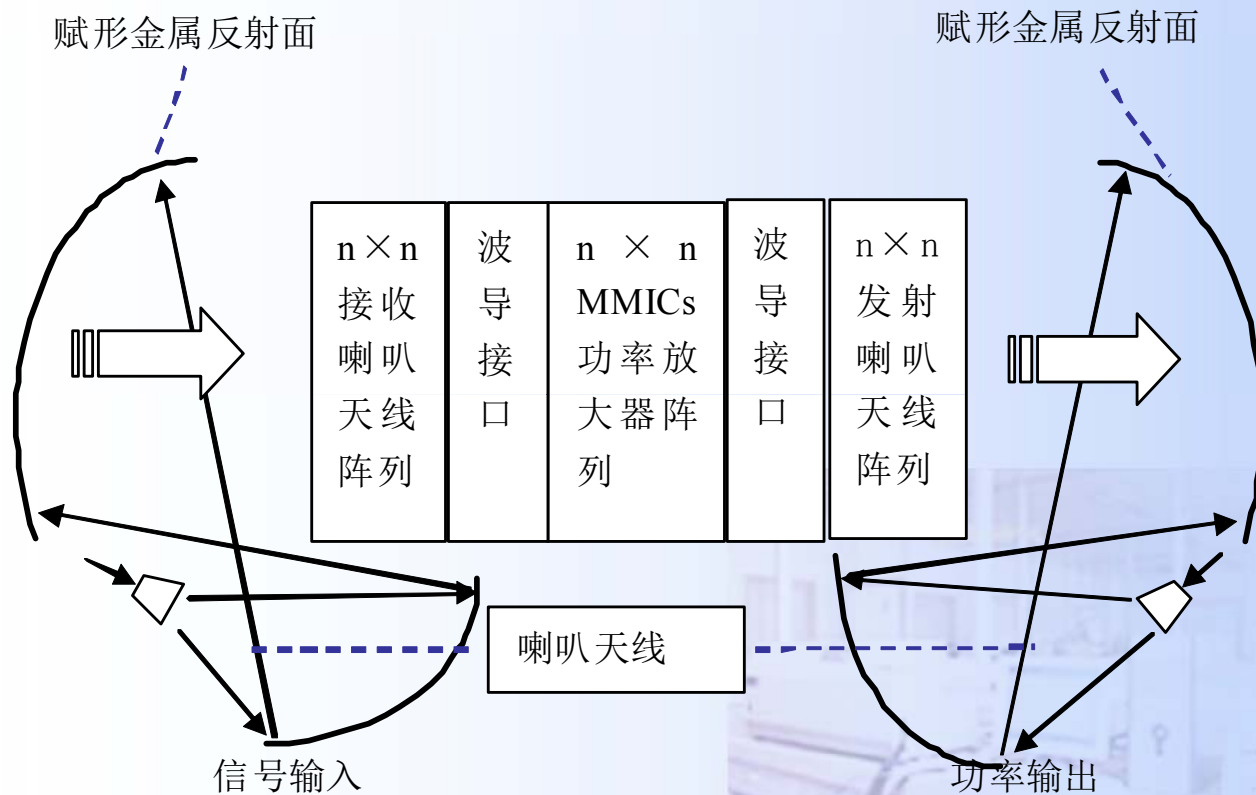


系统小规模单元测试，效果不错。



# 五、准光功率合成系统样机研制

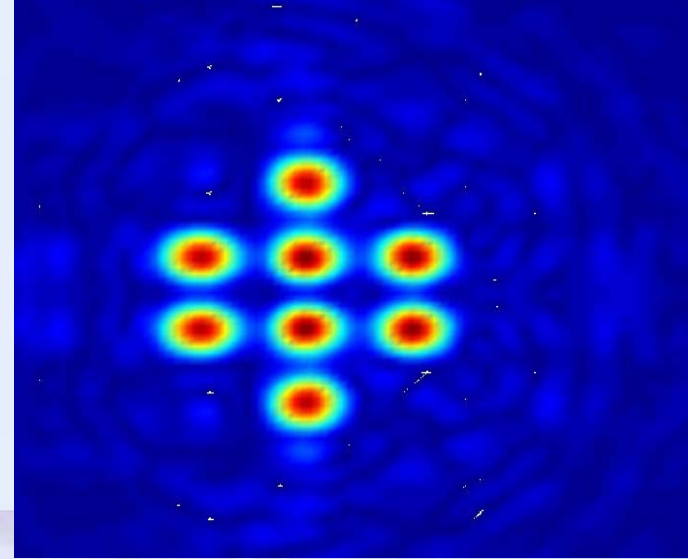
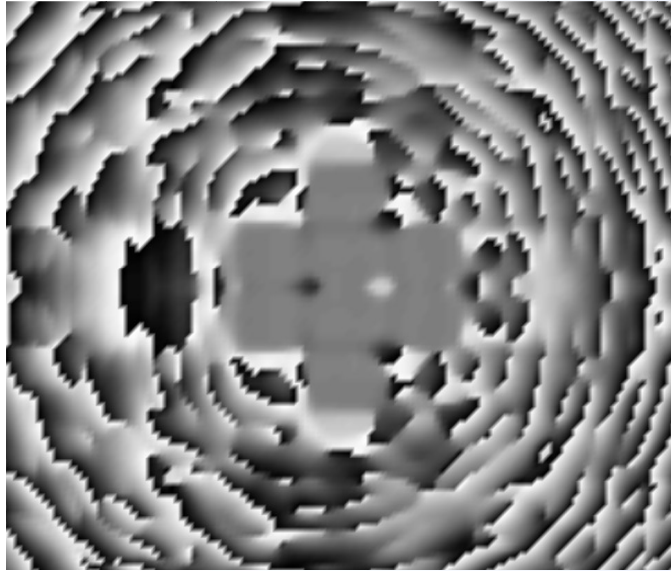
Zhongce Microgrid



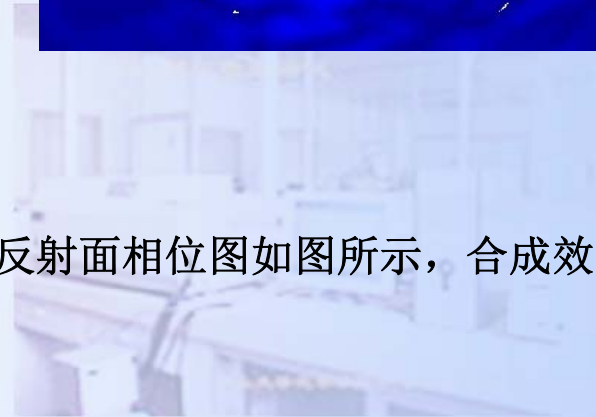
双反射面系统方案框图

# 五、准光功率合成系统样机研制

Zhongce Microgrid

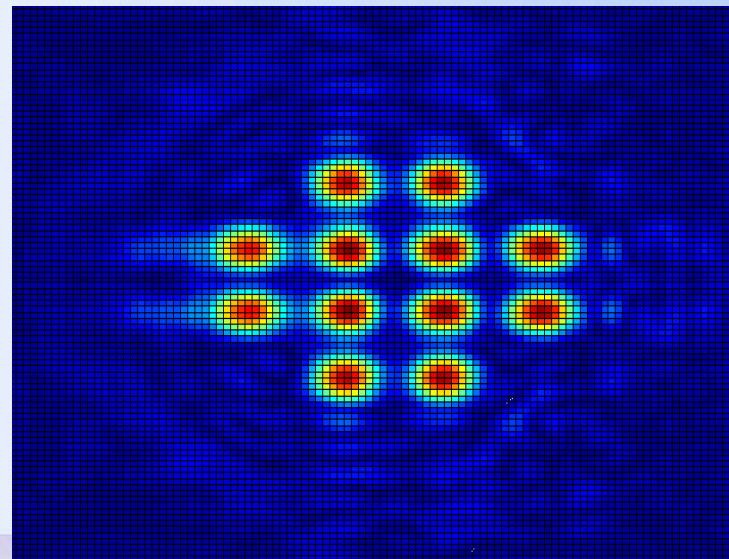
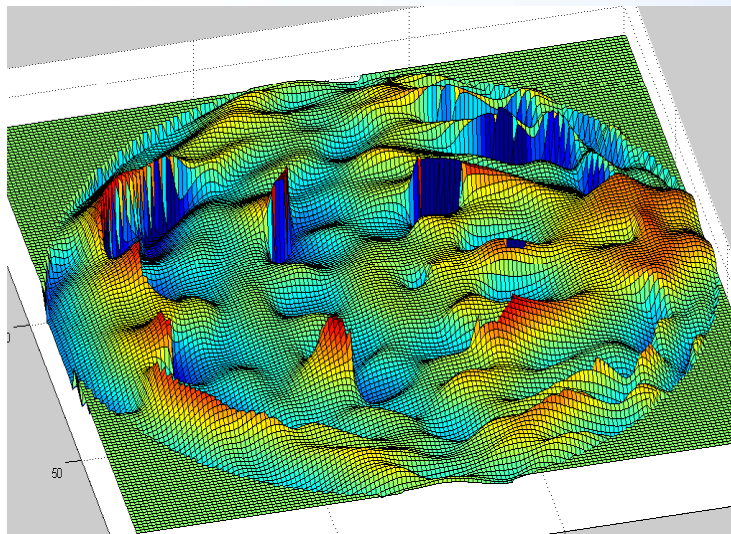


50波长双反射面，产生8个波束，其中某一反射面相位图如图所示，合成效率达96%



# 五、准光功率合成系统样机研制

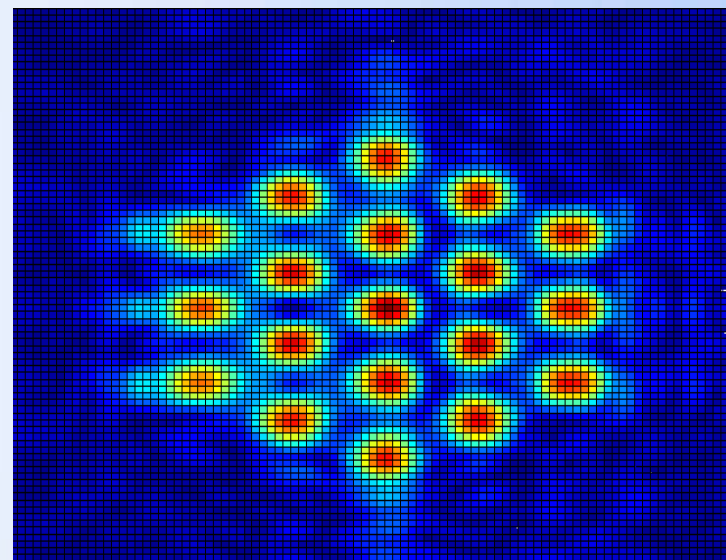
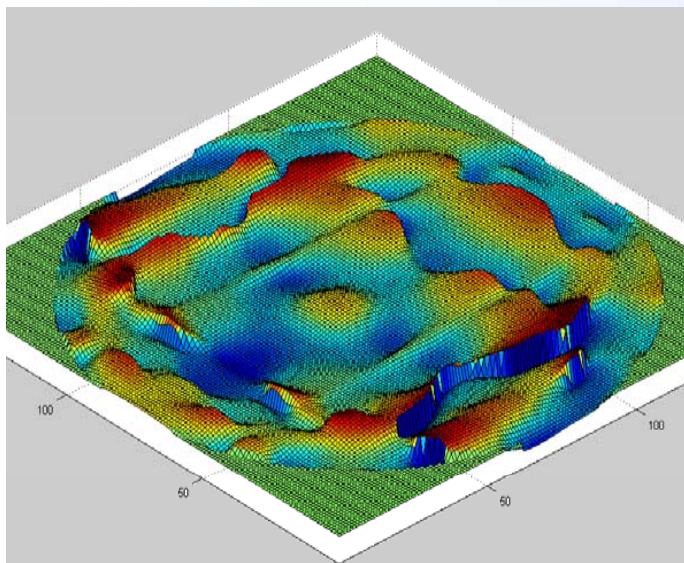
Zhongce Microgrid



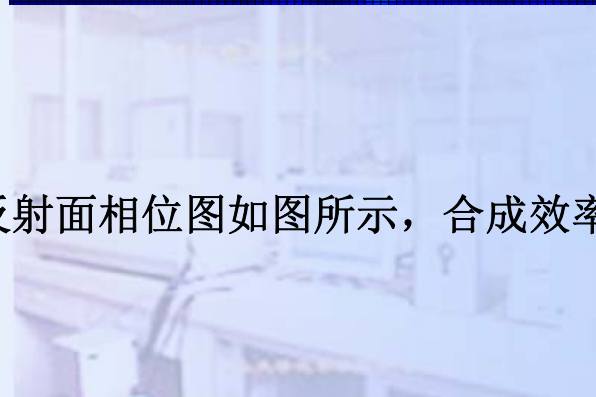
50波长双反射面，产生12个波束，其中某一反射面相位图如图所示，合成效率达92%

# 五、准光功率合成系统样机研制

Zhongce Microgrid

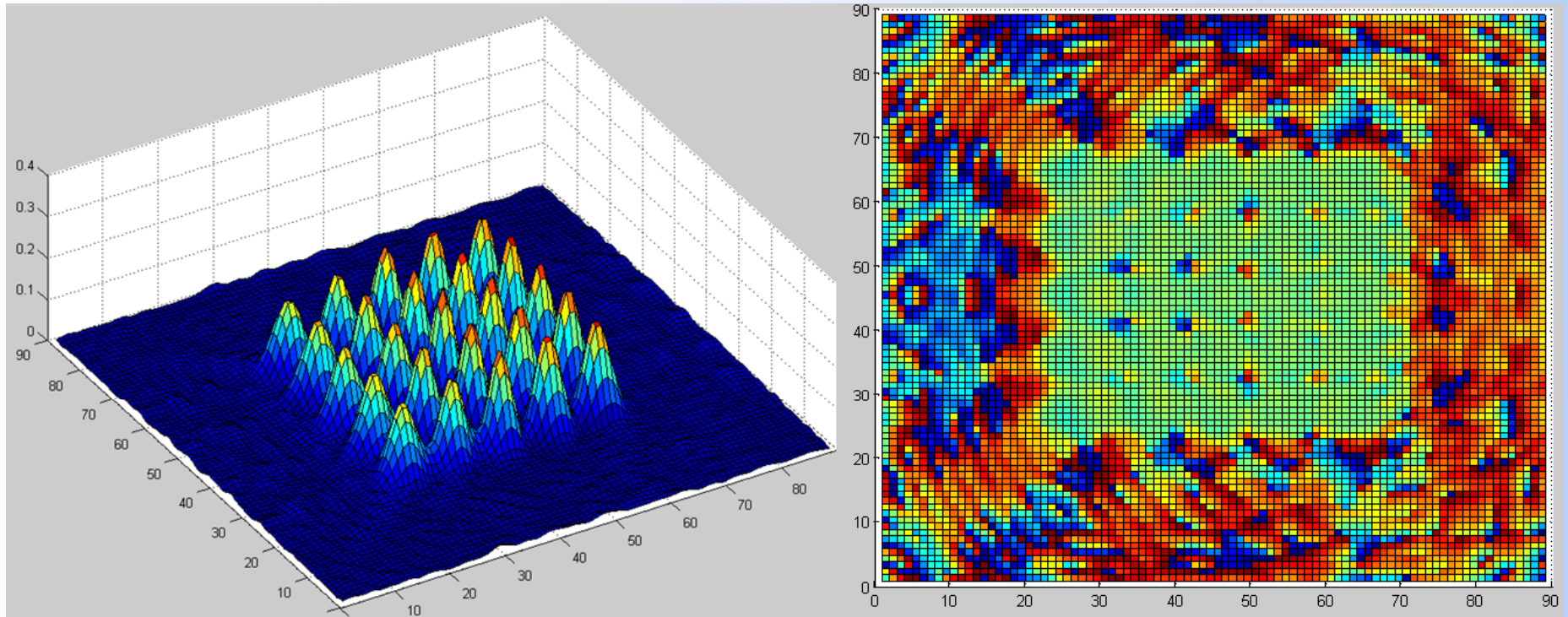


50波长双反射面，产生19个波束，其中某一反射面相位图如图所示，合成效率达90%



# 五、准光功率合成系统样机研制

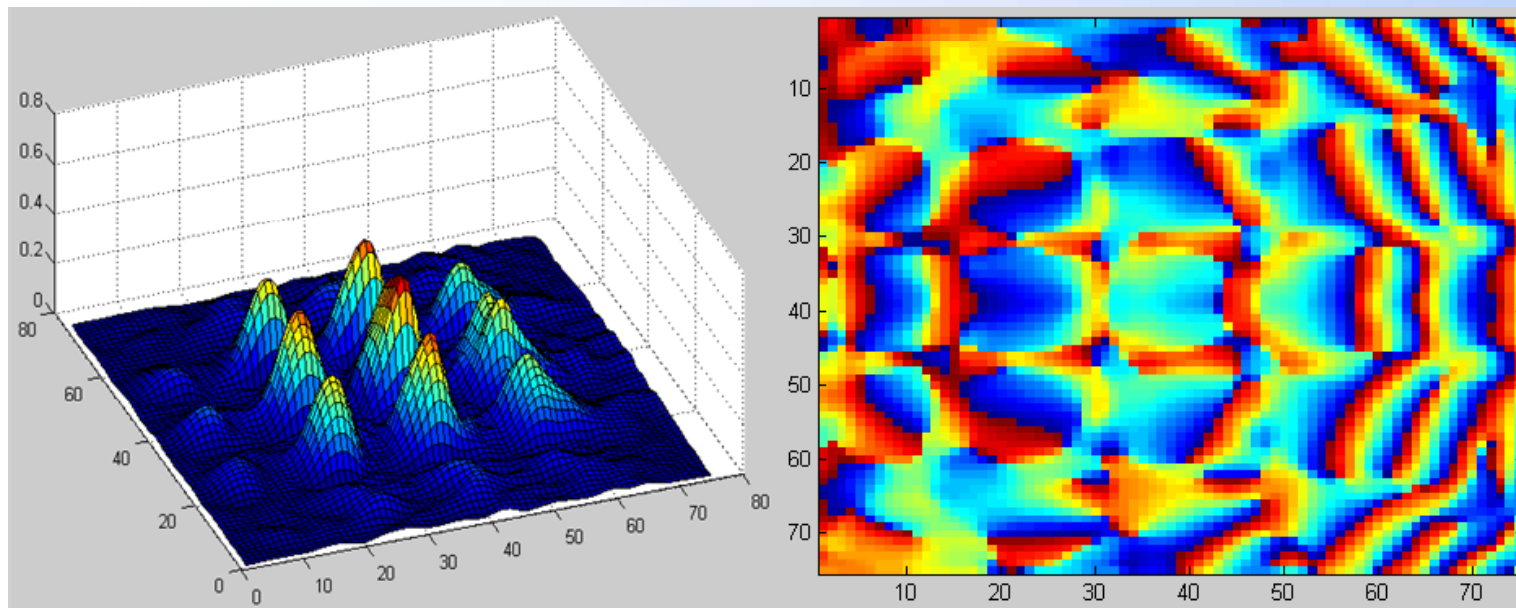
Zhongce Microgrid



50波长双反射面，产生25个波束，其中某一反射面相位图如图所示，合成效率达87%

# 五、准光功率合成系统样机研制

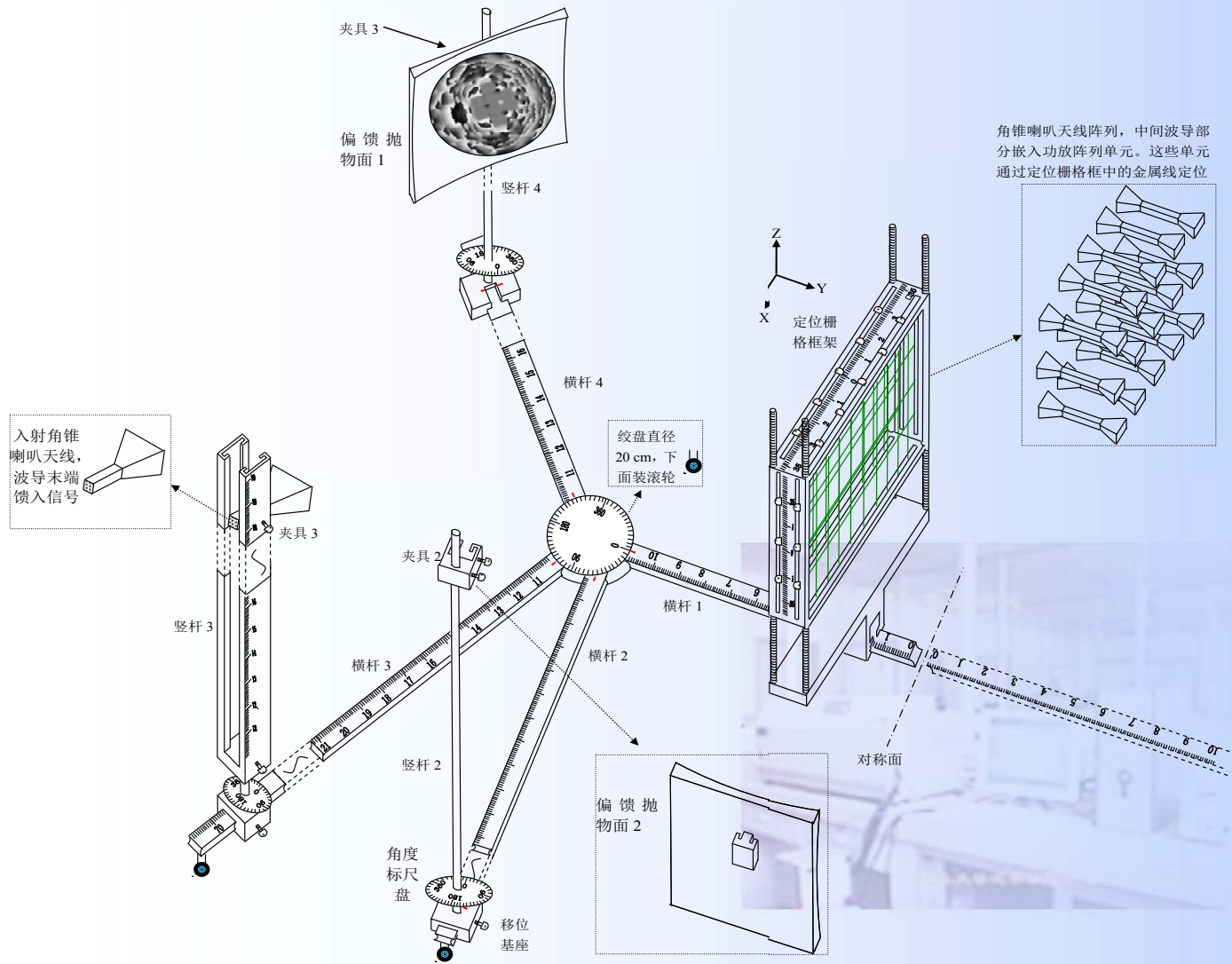
Zhongce Microgrid



50波长单反射面，产生9个波束，其中某一反射面相位图如图所示，合成效率达75%  
(这方面还在努力完善，使之效率达到85%以上)

# 五、准光功率合成系统样机研制

Zhongce Microgrid



保密原因，  
仅给出简  
单示意图！



中测微格  
Zhongce Microgrid

谢谢大家!

