

(a) 三维远区方向图

(b) 二维远区方向图

图 9-11 相位分布 2 下，电磁超表面的远区方向图

9.4 Antenna Toolbox 的应用简介

Antenna Toolbox 提供了设计、分析单元天线和阵列天线并使其可视化的功能和应用程序，可以使用具有参数化几何结构的预定义单元或任意平面单元设计独立的天线或创建阵列天线。

9.4.1 Antenna Toolbox 中 pattern 函数的介绍

Antenna Toolbox 中的 pattern 函数是用来绘制天线或者天线阵在某个特定工作频率下的辐射方向图，在 Antenna Toolbox 中一般默认其远场半径为波长的一百倍。其一般格式为：

`pattern(object, frequency)`

其中 object 是某个已经定义了的天线或者天线阵的名称，frequency 是指定的工作频率。

`pattern(object, frequency, azimuth, elevation)` 是在指定方位角和仰角的情况下，绘制天线或者天线阵的方向图。

`patternCustom(magE, theta, phi)` 是绘制天线的 3 维电场方向图，magE 是在特定的方位角和仰角时的电场矢量。

`patternCustom(magE, theta, phi, Name, Value)` 可以使用额外选项来指定一个或者多个 name-value 组合。name-value 具有一定的关系，比如名称是方位角，相应的值就是方位角的取值，不同 name-value 之间使用逗号隔开，而且名称必须使用单引号。例如，
`patternCustom(MagE, theta, phi, 'CoordinateSystem', 'rectangular', 'Slice', 'phi', 'SliceValue', 0);`

该与用于在直角坐标系中绘制当方位角为零时的二维天线方向图

`patternAzimuth(object, frequency, elevation)` 是绘制在指定工作频率下的天线或者天线阵的二维方向图，如果仰角没有指定的话，默认为 0 度。

`Directivity = patternAzimuth(object, frequency, elevation)`，其返回值为某个天线或者天线阵在指定工作频率下的方向性系数，如果仰角没有指定的话，默认为 0 度。

`patternElevation(object, frequency, azimuth)` 是绘制在指定工作频率下的天线或者天线阵的二维方向图，如果方位角没有指定的话，默认为 0 度。

`directivity = patternElevation(object, frequency, azimuth)`，其返回值为某个天线或者天线阵在指定工作频率下的方向性系数，如果方位角没有指定的话，默认为 0 度。

以下是利用pattern函数绘制偶极子天线的3维电场方向图，MATLAB显示结果如图9-12所示。

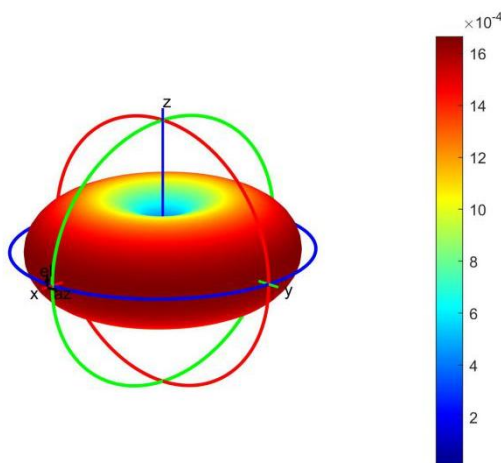


图 9-12 偶极子的三维方向图

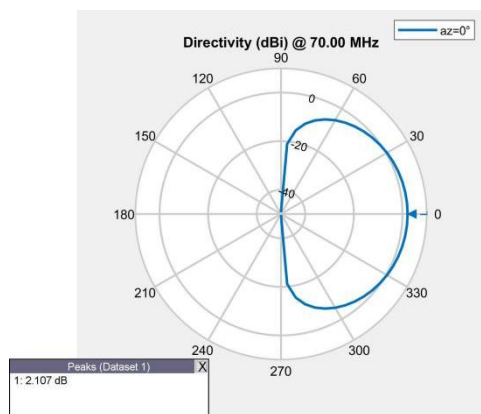
具体代码如下：

```
d = dipole; %定义一个偶极子天线d
[efield,az,el] = pattern(d, 75e6,'Type','efield'); %计算工作频率为75MHz时偶极子天线d
                                                    %的电场幅值,方位角和仰角
phi = az'; %提取天线的方位角
theta = (90-el); %提取天线的头顶仰角
MagE = efield'; %提取天线的电场强度
patternCustom(MagE,theta,phi); %绘制3维电场方向图
```

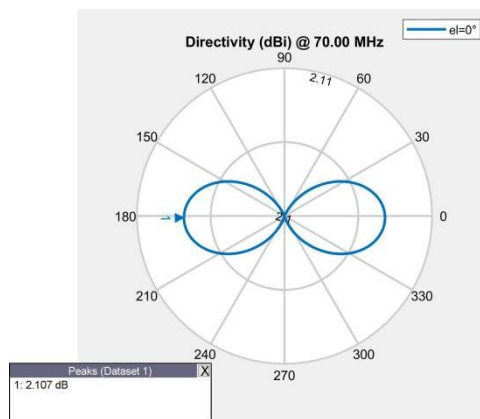
上面这个例子中使用了 `d = dipole` 这样的一条命令，用来定义一个偶极子天线 `d`，事实上，在 Antenna Toolbox 中还有很多类似的天线和天线阵可以直接定义，至于每个天线和天线阵的具体参数，可以参考 MATLABR2019a 帮助文件查阅。

此外，还可利用 `patternFromSlices` 函数进行2维方向图的3维方向图重构，MATLAB运行结果如图9-13所示。

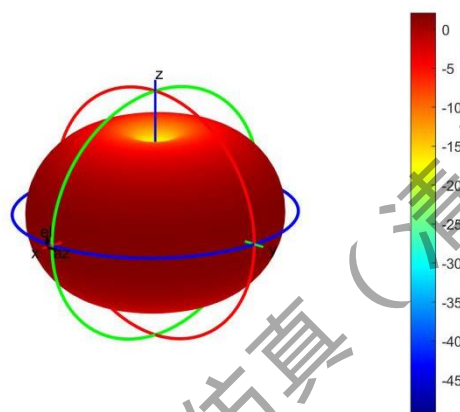
```
clear;
clc;
ant = dipole; %定义一个电偶极子天线
freq = 70e6; %频率
ele = -90:5:90; %仰角
azi = -180:1:180; %方位角
vertSlice = patternElevation(ant,freq,0,'Elevation',ele); %调用patternElevation函数创建2D图
theta = 90 - ele;
figure;
patternElevation(ant,freq,0,'Elevation',ele); %绘制2D方向图
figure;
patternAzimuth(ant,freq,0,'Azimuth',azi); %绘制2D方向图
patternFromSlices(vertSlice,theta); %调用patternFromSlices函数，利用2D方向图重构3D方向图
```



(a) 方位角方向图



(b) 仰角方向图



(c) 重构的三维方向图

图 9-13 偶极子的二维方向图及重构的三维方向图

9.4.2 天线的设计与分析

1. 天线的设计

下面将给出如何用 Antenna Toolbox 对天线进行建模及可视化的详细过程。

第一步，使用天线库定义单元天线

`hx=helix` %使用天线模型与分析库中的螺旋天线单元创建一个螺旋天线 `hx`

MATLAB 运行结果如下：

`hx =`

helix with properties:

Radius: 0.0220

Width: 1.0000e-03

Turns: 3

Spacing: 0.0350

WindingDirection: 'CCW'

FeedStubHeight: 1.0000e-03

GroundPlaneRadius: 0.0750

Tilt: 0

TiltAxis: [1 0 0]

Load: [1×1 lumpedElement]

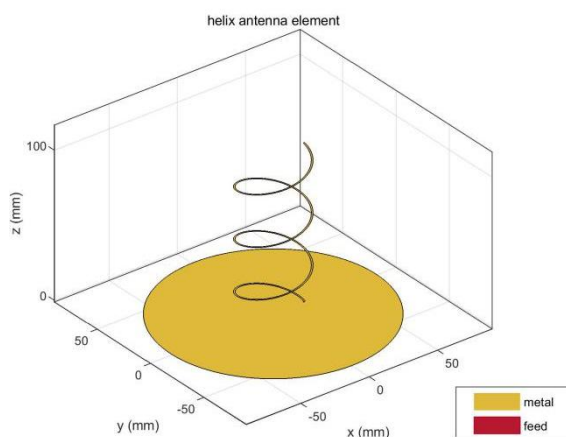


图 9-14 螺旋天线的结构

第二步，显示天线结构

show(hx) %显示螺旋天线 hx 的结构（一个螺旋天线包含一个螺旋型的导体和一个底平面，天线的底平面就是 xoy 平面）

MATLAB 运行结果如图 9-14 所示。

第三步，修正天线参数

hx = helix('Radius',28e-3,'Width',1.2e-3,'Turns',4)

%修正螺旋天线的参数（Radius = 28e-3, Width = 1.2e-3, Number of Turns = 4）

show(hx) %显示天线特性并观察天线结构的变化

MATLAB 运行结果如下，且修正后的螺旋天线的结构如图 9-15 所示。

hx =

helix with properties:

Radius: 0.0280

Width: 0.0012

Turns: 4

Spacing: 0.0350

WindingDirection: 'CCW'

FeedStubHeight: 1.0000e-03

GroundPlaneRadius: 0.0750

Tilt: 0

TiltAxis: [1 0 0]

Load: [1×1 lumpedElement]

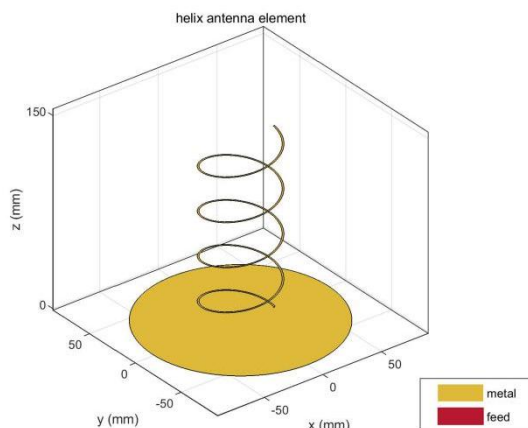


图 9-15 修正后的螺旋天线的结构

2. 天线的分析

1) 立体辐射图的绘制

使用 `pattern` 函数绘制螺旋天线的辐射方向图。天线辐射方向图是指在离天线一定距离处，辐射场的相对场强（归一化模值）随方向变化的图形，是对天线辐射特性的图形描述方法，可以从天线方向图中观察到天线的各项参数。

`pattern(hx,1.8e9)`

MATLAB 显示结果如图 9-16 所示。

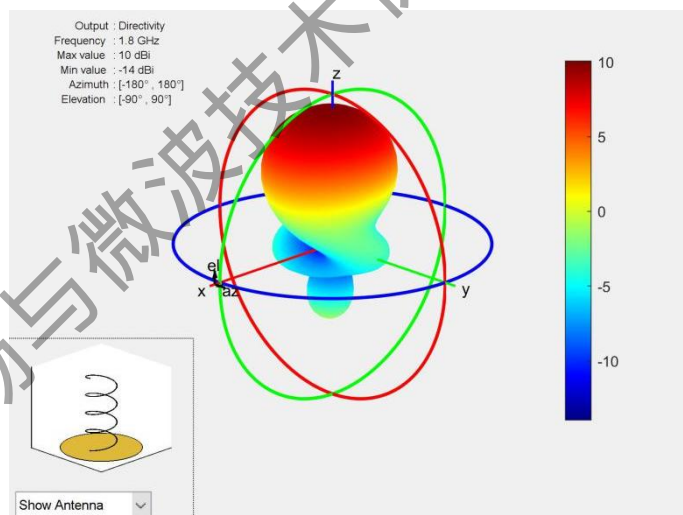


图 9-16 螺旋天线的立体辐射图

此外，还可以使用 `patternAzimuth` 和 `patternElevation` 函数绘制天线在特定频率下的二维辐射方向图，即方位角方向图和仰角方向图。天线方向图是表征天线辐射特性与空间角度关系的图形，然而通常采用通过天线最大辐射方向上的两个相互垂直的平面方向图来表示。

`patternAzimuth(sElem,FREQ)`函数是绘制天线 `sElem` 在特定工作频率 `FREQ` 下的二维方向图，该方向图是仰角为 0° 时的方位角方向图。

`patternElevation(sElem,FREQ)`函数是绘制天线 `sElem` 在特定工作频率 `FREQ` 下的二维方向图，该方向图是方位角为 0° 时的立体角方向图。

`patternAzimuth(hx,1.8e9)`

figure

patternElevation(hx,1.8e9)

螺旋天线的方位角方向图和仰角方向图分别如图 9-17 和 9-18 所示。

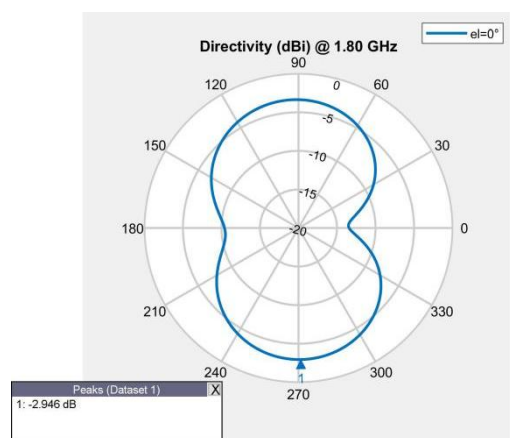


图 9-17 螺旋天线的方位角方向图

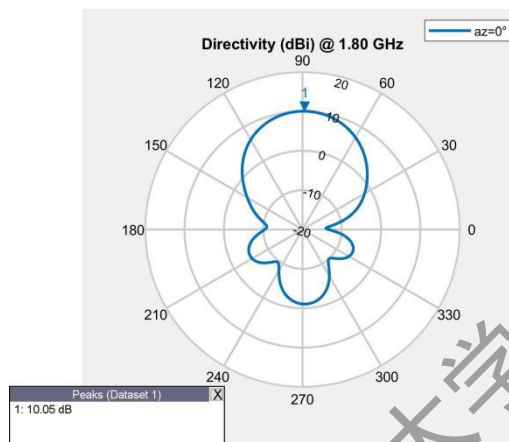


图 9-18 螺旋天线的立体角方向图

2) 计算天线的方向性系数

使用 pattern 函数中 Directivity name-value pair 计算天线的方向性系数。理想的点源天线辐射没有方向性，在各方向上辐射强度相等，立体辐射图是个球体。以理想的点源天线作为标准与实际天线进行比较，在相同的辐射功率下，某天线产生于某点的电场强度平方与理想的点源天线在同一点产生的电场强度的平方的比值称为该点的方向性系数。

Directivity = pattern(hx,1.8e9,0,90)

MATLAB 显示结果为：

```
Directivity =
    10.0430
```

3) 计算天线的电场和磁场

使用 EHfields 函数计算天线在空间一点的电场和磁场的 x , y , z 分量。

[E,H] = EHfields(hx,1.8e9,[0;0;1])

MATLAB 显示结果为：

```
E =
    -0.5241 - 0.5727i
    -0.8760 + 0.5252i
    -0.0036 + 0.0006i
H =
    0.0023 - 0.0014i
    -0.0014 - 0.0015i
    0.0000 - 0.0000i
```

4) 绘制天线的极化方式

使用 pattern 函数中 Polarization name-value pair 绘制天线的极化方式。根据天线在最大辐射（或接收）方向上电场矢量的取向，天线极化方式可分为线极化，圆极化和椭圆极化。线极化又分为水平极化，垂直极化和 $\pm 45^\circ$ 极化。反射天线和接收天线应具有相同的极化方式，一般地，移动通信中多采用垂直极化或 $\pm 45^\circ$ 极化方式。下面这个例子绘制的是螺旋天线的右旋圆极化方式的辐射方向图。

pattern(hx,1.8e9,'Polarization','RHCP')

MATLAB 运行结果如图 9-19 所示。

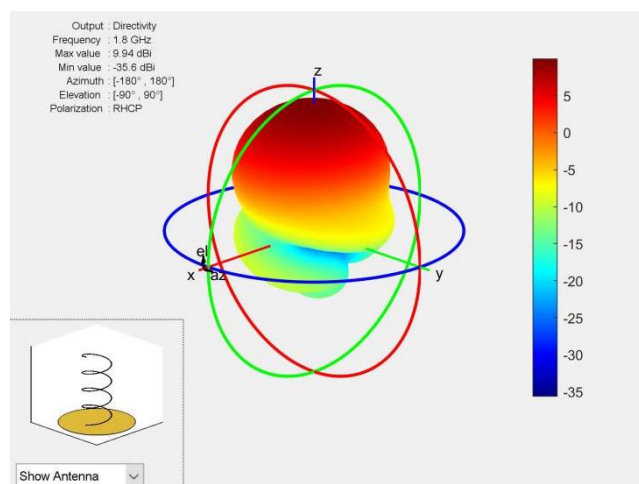


图 9-19 右旋圆极化方式的螺旋天线的辐射方向图

5) 计算天线的轴比

使用 `axialRatio` 函数计算天线的轴比。任意极化波的瞬时电场矢量的端点轨迹为一椭圆，椭圆的长轴 $2a$ 和短轴 $2b$ 之比称为天线的轴比 AR。椭圆极化波的特性可用三个参数来描述，即旋转方向、椭圆极化轴比及椭圆的倾角。其中旋转方向有左旋和右旋两个方向。轴比也是圆极化天线的一个重要的性能指标，它代表圆极化的纯度。当椭圆极化轴比为无穷大时，即为线极化；轴比为 1 时，即为圆极化。轴比不大于 3dB 的带宽，定义为天线的圆极化带宽。它是衡量通信设备对不同方向的信号增益差异性的重要指标。椭圆的倾角，表示的是椭圆长轴与 x 轴之间的夹角。下面的语句用来计算天线在特定方向的轴比。

```
ar = axialRatio(hx,1.8e9,20,30)
```

MATLAB 显示结果如下：

```
ar =  
23.6240
```

上述结果表明该螺旋天线在 1.8GHz 的频率下，在方位角 20 度，仰角 30 度的方向上，轴比为 23.624。

6) 计算天线的波瓣宽度

使用 `beamwidth` 函数计算天线的波瓣宽度。波瓣宽度是定向天线常用的一个很重要的参数，它是指天线的辐射方向图中低于峰值 3dB 处所成夹角的宽度。下面的语句用于计算天线在特定频率和方位下的波束宽度。

```
[bw, angles] = beamwidth(hx,1.8e9,0,1:1:360)
```

MATLAB 显示结果如下：

```
bw =  
57.0000  
angles =  
60 117
```

以上结果表明，该螺旋天线在 1.8GHz 频率下，在 0 度方位角对应的 xoz 平面上，对应的波束宽度为 57 度；其起始角度为 60 和 117 度。

7) 计算天线的输入阻抗

使用 `impedance` 函数计算并绘制天线的输入阻抗。天线和馈线的连接处称为天线的输入端或馈电点。对于线天线来说，天线输入端的电压与电流的比值称为天线的输入阻抗。对于口面型天线，则常用馈线上电压驻波比来表示天线的阻抗特性。一般情况下，天线的输入阻

抗是复数，实部称为输入电阻，以 R_i 表示，虚部称为输入电抗，以 X_i 表示。下面的语句用来绘制天线在某一频段的阻抗曲线。

```
impedance(hx,1.7e9:1e6:2.2e9)
```

MATLAB 运行结果如图 9-20 所示。

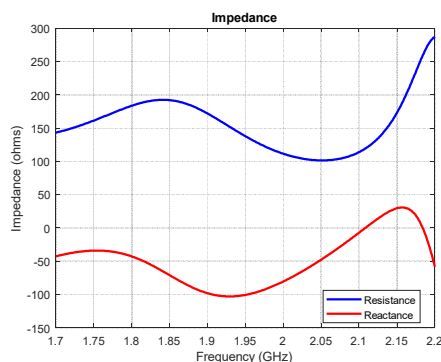


图 9-20 螺旋天线的输入阻抗

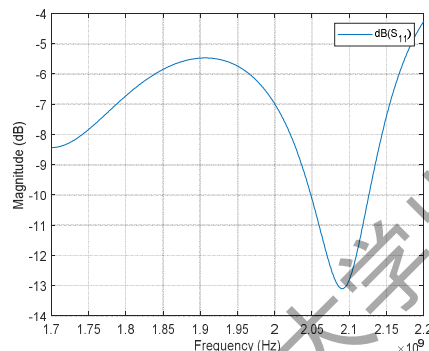


图 9-21 螺旋天线的反射系数

8) 计算天线的反射系数

可以使用 `sparameters` 函数计算天线的反射系数 S_{11} 。反射系数为反射波振幅与入射波振幅之比，它是用来衡量阻抗匹配优劣的一个参数。一般地，阻抗匹配的优劣用四个参数来衡量，即反射系数，行波系数，驻波比和回波损耗，这四个参数之间有固定的数值关系，使用哪一个均出于习惯。

```
S = sparameters(hx,1.7e9:1e6:2.2e9,72)
```

```
rfplot(S)
```

MATLAB 运行结果如下，且螺旋天线的反射系数如图 9-21 所示。

```
S =
```

```
sparameters: S-parameters object
```

```
NumPorts: 1
```

```
Frequencies: [501x1 double]
```

```
Parameters: [1x501 double]
```

```
Impedance: 72
```

```
rfparam(obj,i,j) returns S-parameter Sij
```

9) 计算天线的回波损耗

使用 `returnLoss` 函数计算并绘制天线的回波损耗。回波损耗是反射系数绝对值的倒数，以分贝值表示。回波损耗的值在 0dB 和无穷大之间，其值越大表示匹配越好。0 表示全反射，无穷大表示完全匹配。在移动通信系统中，一般要求回波损耗大于 14dB。下面的语句用于绘制天线在某一频段的回波损耗。

```
returnLoss(hx,1.7e9:1e6:2.2e9,72)
```

MATLAB 运行结果如图 9-22 所示。

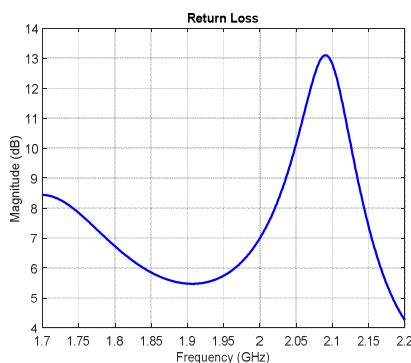


图 9-22 螺旋天线的回波损耗

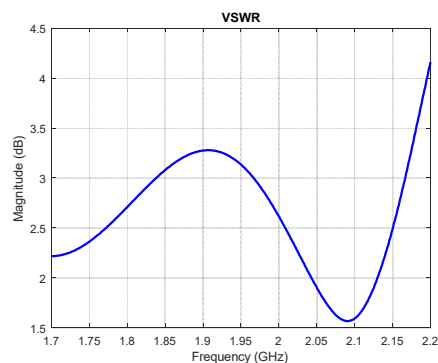


图 9-23 螺旋天线的驻波比

10) 计算天线的电压驻波比

使用 `vswr` 函数计算并绘制天线的电压驻波比 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)。电磁波从甲介质传导到乙介质中, 会由于介质不同使得电磁波的能量会有一部分被反射, 从而在甲区域形成“行驻波”。电压驻波比指的就是行驻波的电压峰值与电压谷值之比, 此值也可以通过反射系数的模值计算。电压驻波比 $VSWR = \text{电压最大值} / \text{电压最小值} = (1 + \text{反射系数模值}) / (1 - \text{反射系数模值})$ 。从能量传输的角度考虑, 理想的 VSWR 为 1:1, 此时为行波传输状态, 在传输线中, 称为阻抗匹配; 最差时 VSWR 为无穷大, 此时反射系数模值为 1, 为纯驻波状态, 称为全反射, 没有能量传输。由此可知, 驻波比越大, 反射功率越高, 传输效率越低。下面的语句用来计算天线在某一频段的电压驻波比。

```
vswr(hx,1.7e9:1e6:2.2e9,72)
```

MATLAB 运行结果如图 9-23 所示。

9.4.3 天线阵的设计与分析

1. 天线阵的设计

MATLAB 提供各种天线供用户选择。可以从目录中选择天线或确定自定义单元, 设计线形、矩形、圆形和共形等各种类型的天线阵列。下面这个例子将给出如何通过 Antenna Toolbox 创建及可视化一个天线阵。

第一步, 创建天线阵

使用阵列库中的 `rectangularArray` 创建一个矩形天线阵 `ra`, 一般默认天线单元为偶极子天线。

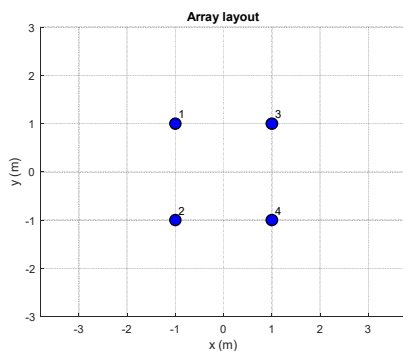


图 9-24 4 个偶极子单元天线构成的矩形天线阵的平面结构

```
ra=rectangularArray
```

MATLAB 运行结果为:

```

ra =
rectangularArray with properties:
    Element: [1×1 dipole]
    Size: [2 2]
    RowSpacing: 2
    ColumnSpacing: 2
    Lattice: 'Rectangular'
    AmplitudeTaper: 1
    PhaseShift: 0
    Tilt: 0
    TiltAxis: [1 0 0]

```

第二步，天线阵平面结构的可视化

使用 `layout` 函数在 xoy 平面绘制天线阵中每个单元天线的位置，一般默认矩形阵列是由 4 个偶极子单元天线构成的一个 2×2 的矩形。

```
layout(ra)
```

MATLAB 运行结果如图 9-24 所示。

第三步，天线阵立体结构的可视化

使用 `show` 函数展示矩形天线阵的立体结构。

```
show(ra)
```

MATLAB 运行结果如图 9-25 所示。

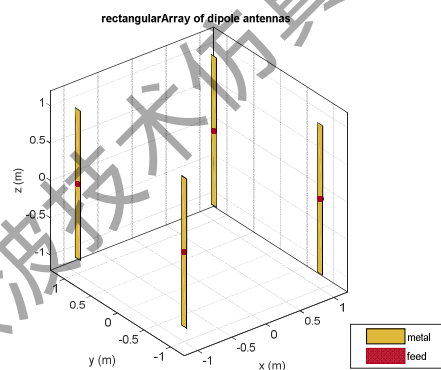


图 9-25 4 个偶极子单元天线构成的矩形天线阵的立体结构

2. 天线阵的分析

1) 绘制天线阵的辐射方向图

使用 `pattern` 函数绘制矩形天线阵在特定频率下的辐射方向图。

```
pattern(ra,70e6)
```

MATLAB 运行结果如图 9-26 所示。

使用 `patternAzimuth` 和 `patternElevation` 函数绘制矩形天线阵列在特定频率下的方位角方向图和仰角方向图，如图 9-27 和 9-28 所示。

```
patternAzimuth(ra,70e6)
```

```
figure
```

```
patternElevation(ra,70e6)
```

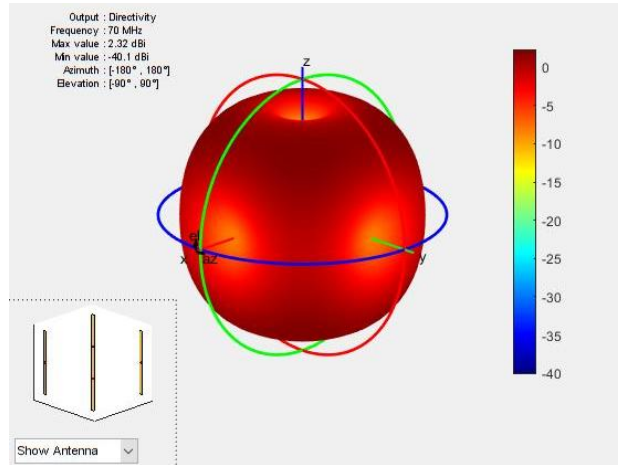
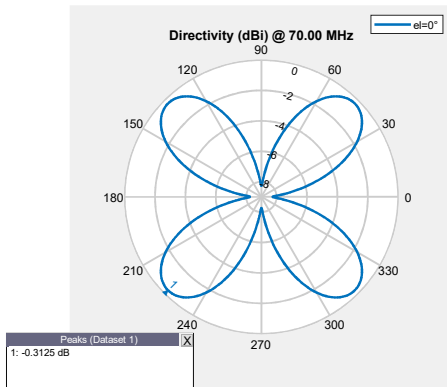
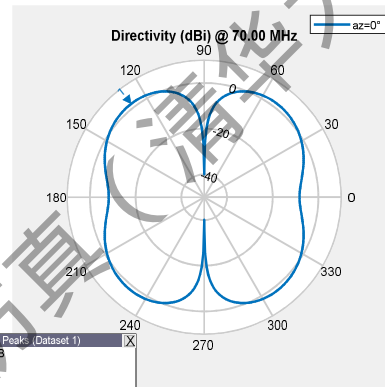


图 9-26 矩形天线阵的辐射方向图



9-27 矩形天线阵的方位角方向图



9-28 矩形天线阵的立体角方向图

2) 计算天线阵的方向性系数

使用 `pattern` 函数计算矩形天线阵在特定方向和频率下的方向性系数。

```
[Directivity] = pattern(ra,70e6,0,90)
```

MATLAB 运行结果如下:

```
Directivity =
```

```
-39.9599
```

3) 计算天线阵的电场和磁场

使用 `EHfields` 函数计算天线阵在空间中某一点的电场和磁场的 x , y , z 分量。

```
[E,H] = EHfields(ra,70e6,[0;0;1])
```

MATLAB 运行结果如下:

```
E =
```

```
-0.0000 - 0.0000i
```

```
-0.0000 + 0.0006i
```

```
-1.3273 - 0.0772i
```

```
H =
```

```
1.0e-05 *
```

```
-0.1281 - 0.3103i
```

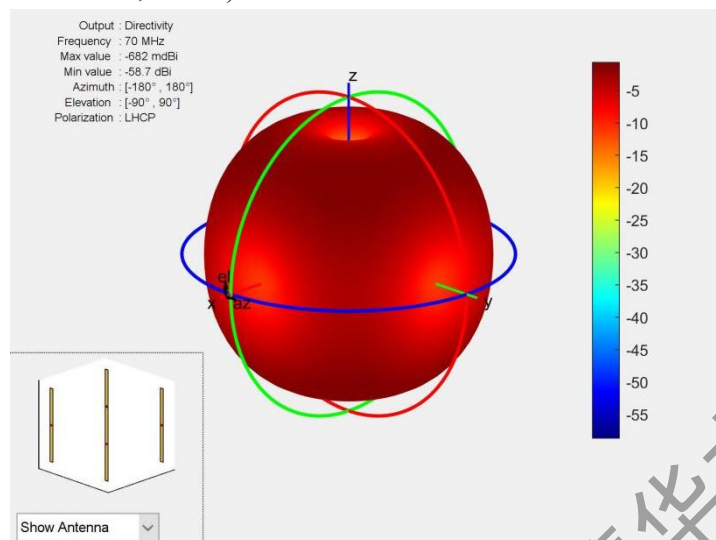
```
-0.0000 - 0.0000i
```

```
0.0000 + 0.0000i
```

4) 绘制天线阵的极化方式

使用 `pattern` 函数中的 Polarization name-value pair 绘制天线阵的不同极化方式的辐射方向图。图 9-29 给出的是矩形天线阵的左旋圆极化方式的辐射方向图。

`pattern(ra,70e6,'Polarization','LHCP')`



9-29 矩形天线阵的左旋圆极化方式的辐射方向图

5) 计算天线阵的波瓣宽度

使用 `beamwidth` 函数计算矩形天线阵的波瓣宽度。

`[bw,angles] = beamwidth(ra,70e6,0,1:1:360)`

MATLAB 运行结果为:

`bw =`

44.0000

44.0000

`angles =`

108 152

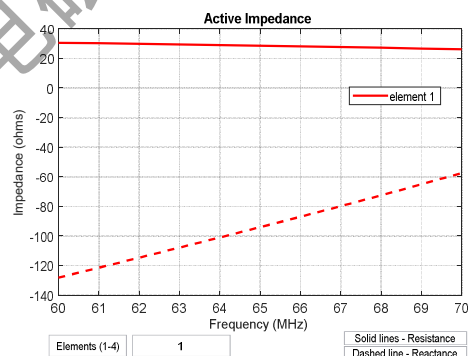
28 72

6) 计算天线阵的有源阻抗

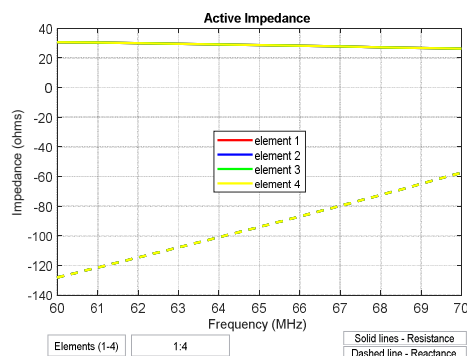
使用 `impedance` 函数计算并绘制天线阵的有源阻抗。有源阻抗或扫描阻抗指的是阵列天线中所有单元天线都被激活时的每个单元天线的输入阻抗。可以通过改变单元天线的序号来分别观察每个单元天线的输入阻抗,也可以通过改变单元天线的序号同时观察每个单元天线的输入阻抗。

`impedance(ra,60e6:1e6:70e6)`

单元天线 1 的输入阻抗如图 9-30 所示; 单元天线 1-4 的输入阻抗如图 9-31 所示。



9-30 矩形天线阵单元天线 1 的输入阻抗



9-31 矩形天线阵单元天线 1-4 的输入阻抗

7) 计算天线阵的反射系数

使用 `sparameters` 函数计算矩形天线阵的反射系数，并将其保存在一个结构中。对于 N 元天线阵来讲，包括如下反射系数， $S_{11}, S_{12}, S_{13} \cdots S_{NN}$ ，总共有 N^2 个。下面的语句就用来计算 4 元天线阵在某一个频段的反射系数，并利用 `rfplot` 函数将其绘制出来。函数中的数字 72 表示的是参考阻抗，用于计算相应的反射系数。

```
S = sparameters(ra,60e6:1e6:70e6,72)
```

```
rfplot(S)
```

MATLAB 运行结果如下，且矩形天线阵的反射系数如图 9-32 所示。

S =

sparameters: S-parameters object

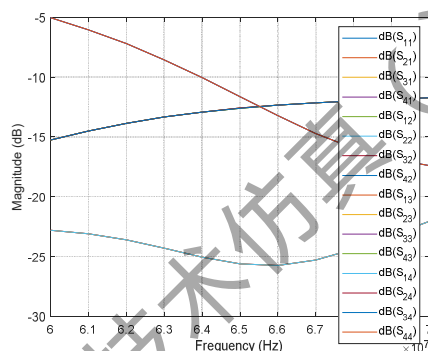
NumPorts: 4

Frequencies: [11×1 double]

Parameters: [4×4×11 double]

Impedance: 72

rfparam(obj,i,j) returns S-parameter S_{ij}



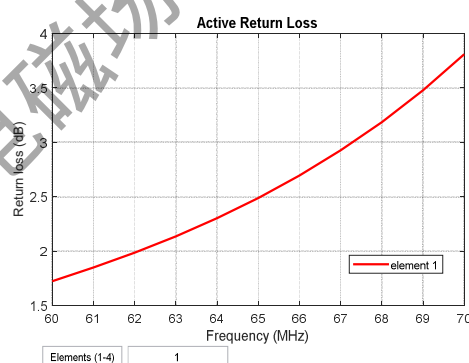
9-32 矩形天线阵的反射系数

8) 计算天线阵的回波损耗

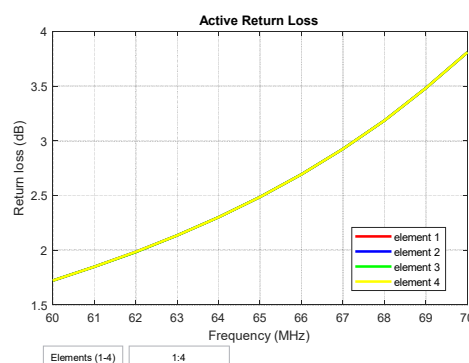
使用 `returnLoss` 函数计算并绘制阵列天线的回波损耗。同样地，可以通过改变单元天线的序号来分别观察每个单元天线的回波损耗，或者同时观察每个单元天线的回波损耗。

```
returnLoss(ra,60e6:1e6:70e6,72)
```

单元天线 1 的回波损耗如图 9-33 所示；单元天线 1-4 的回波损耗如图 9-34 所示。



9-33 矩形天线阵单元天线 1 的回波损耗



9-34 矩形天线阵单元天线 1-4 的回波损耗