

5G手机MIMO金属边框有源天线设计

况富强

济源职业技术学院 河南 济源 459000

摘要: 本文设计了一种覆盖5G低频段3.5GHz的六单元MIMO金属边框有源天线。该天线结构由六个单极子天线单元组成,主要通过切割手机的金属边框来实现5G低频段谐振,但受限于手机金属边框长度和手机净空空间。为了使天线能够在3.5GHz处的实现足够带宽的谐振,本文在天线前端设计了一套有源射频匹配电路,同时考虑到5G手机天线的工作效率,采用带阻结构来增加MIMO天线之间的隔离度。

关键词: 5G低频段,金属边框,匹配电路,隔离度

1 引言

对于5G智能手机来说,手机内各种天线总数为15到20根左右,因为手机中天线的主流频段有GSM850/900,DCS/PCS/UMTS2100、LTE700/2300/2500。除此之外,根据手机的其他应用需求,天线设计所需覆盖的频段还包括GPS、Wi-Fi、NFC等。如果要实施载波聚合或MIMO功能,天线总数还可能会增加到25根到30根左右。除了需要大量的天线外,所有的天线都必须符合相关的设计规范,其中包括带宽、自由空间的效率、天线之间的隔离度、方向图、功率谱密度和人体特别吸收率(SAR)。5G手机在NSA模式下,至少需要4个接收天线和1个发射天线,而在SA模式下,至少需要4个接收天线和2个发射天线。由于金属框架的金属尺寸比较长和在手机中的位置,其通常被作为大多数天线的最佳选择,特别是对于中低频段的5G主天线和分集天线来说。本文重点考虑SA模式下,5G手机金属边框天线的设计,也就是需要利用5G手机金属边框设计一个六阵元的MIMO天线。

2 5G手机金属边框天线结构设计及性能指标分析

本文设计的5G手机金属边框天线结构如图1所示,采用手机周围的金属边框作为天线的辐射体,天线的整体长度为L,宽度为W,金属边框的宽度为4mm。介质材料选用FR4,介电常数为4.4,损耗角正切为0.02,介质基板厚度为1mm。金属边框天线结构尺寸参数如下:W=86mm,L=156mm,WB=50mm,LB=100mm,wp=3mm,LA=43mm,Lambda=86mm,w0=1mm,SUBh=1mm。其中,LA为天线的长度,Lambda为自由空

间波长,w0为手机电池与PCB板之间的间距,wp为金属边框与手机PCB板之间的缝隙宽度,SUBh为介质板的厚度,P1、P2、P3、P4、P5、P6分别为六个天线单元的射频信号源馈电输入端口位置。

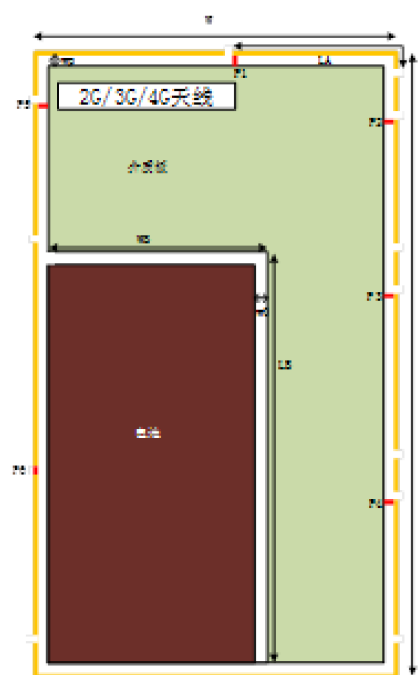


图1 5G手机金属边框天线结构

在设计中保持每个金属边框天线的辐射主体长度在半个波长即可,通过HFSS软件计算,天线S参数仿真结果如图2所示,从图2中可以看出,天线的谐振频率在4.35GHz附近,而本文的设计目标在3.5GHz附近,明显不符合设计要求,并且S44参数在4.35GHz附近高于-6dB,这就需要增加天线的物理长度以达到降低金属边框天线的谐振频率的目的,但是手机下方一般设计有话筒,对天线工作性能影响较大,所以不考虑在下方增加天线,所以受限于手机金属边框净空的尺寸而无法再

作者简介: 况富强,男,1985年生,助教,毕业于云南大学,研究方向:天线与射频电路设计。地址:河南省济源市济源大道中段88号济源职业技术学院,邮编:459000

增加天线的有效长度，所以需要考虑其他方式来降低谐振频率，比如在天线射频前端接入有源匹配网络来降低天线的谐振频率，以满足5G低频段3.4-3.6GHz的设计要

求，这样既能满足5G手机的设计频段要求，又可以不改变5G手机的结构和大小，还有利于在PCB介质基板上集成。

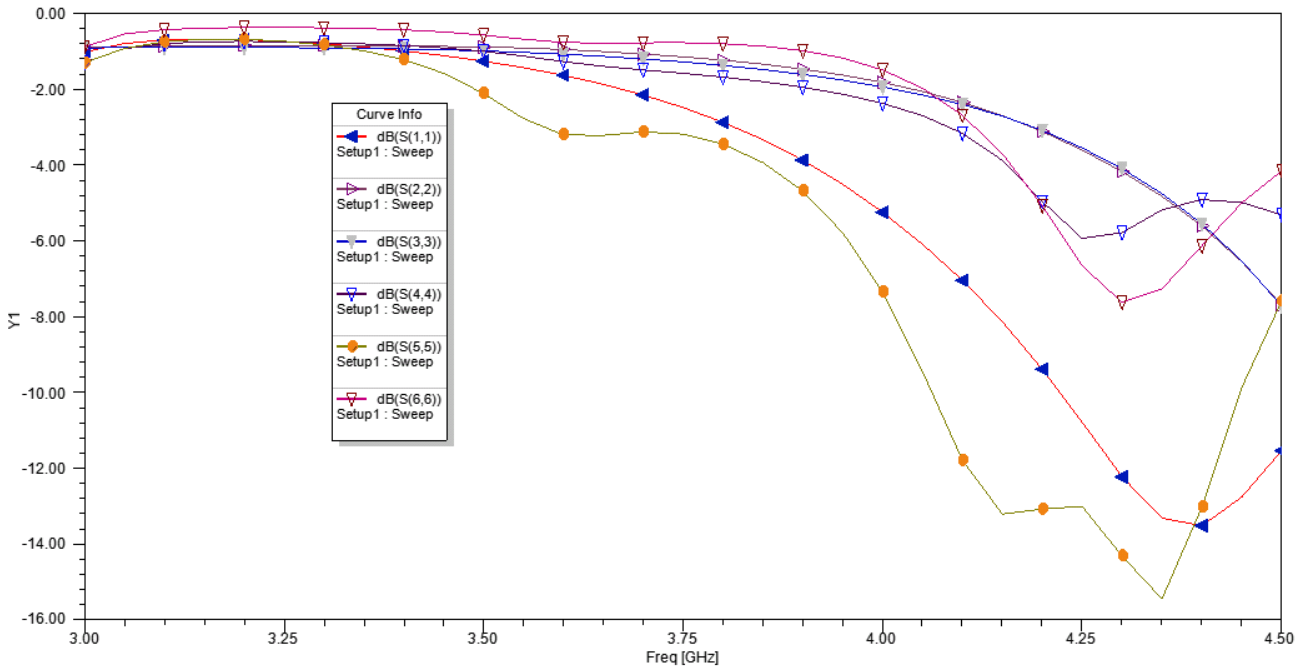


图2 5G手机金属边框天线仿真S参数

图3为六个天线单元同时被激励时的MIMO天线的3D辐射方向图，由图3可知，MIMO金属边框天线在各个方向近似形成全向辐射，具有很好的远场辐射特性。MIMO金属边框天线电流幅度主要集中分布在金属边框上，对PCB板影响基本可以忽略。下一步就需要考虑通过在天线前端设计一个匹配网络来降低天线的谐振频率，以满足5G手机的实际工作频段需求。

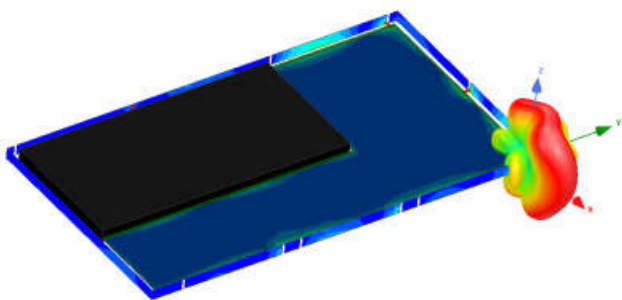


图3 5G手机金属边框天线电流幅度分布及3D方向图

图4、图5、图6、图7、图8、图9为六单元MIMO金属边框天线工作在3.5GHz，分别被单独激励时的天线方向图，此时 $\phi=0^\circ$ 或者 $\phi=90^\circ$ ， θ 取值范围为 0° 到 360° ，在 $\phi=0^\circ$ 或者 $\phi=90^\circ$ 处的天线方向图均具备良好的近似全向特性，可以满足5G手机的实际工作需求。

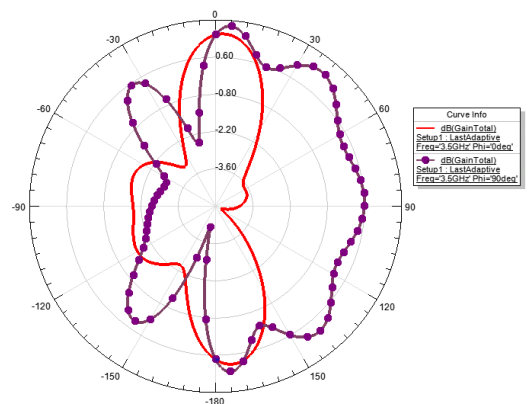


图4 P1天线方向图

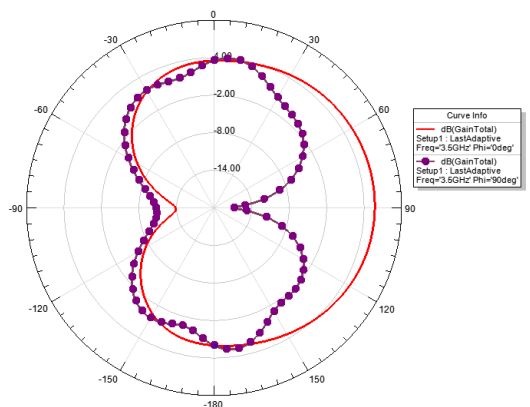


图5 P2天线方向图

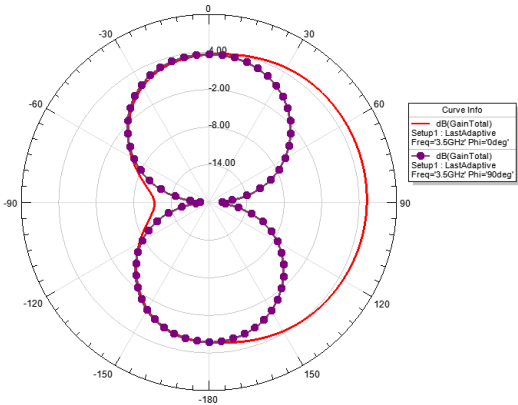


图6 P3天线方向图

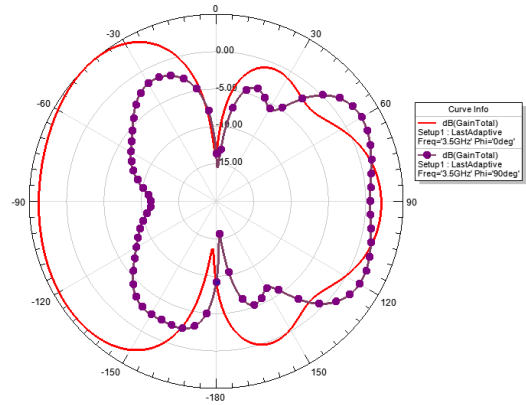


图8 P5天线方向图

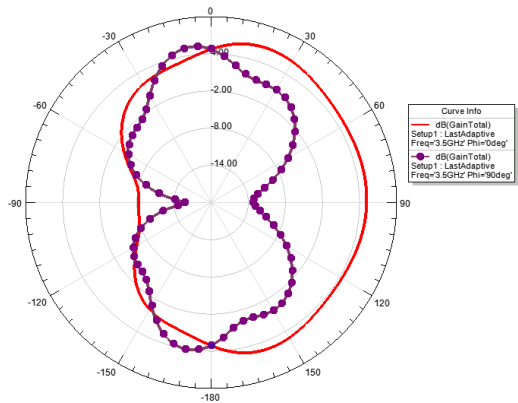


图7 P4天线方向图

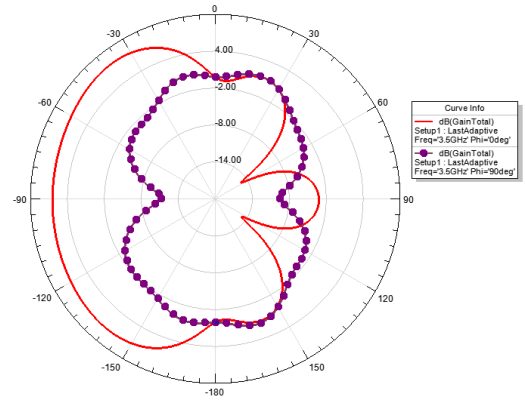


图9 P6天线方向图

3 5G 手机金属边框天线隔离度问题

在图10中可以看到5G手机金属边框天线六单元之间间隔距离较近，这也是受限于手机边框总体长度造成的，虽然天线单元之间有一段金属边框作为隔离带，但是总

体上天线单元之间的隔离度不会太高，各天线单元之间的隔离度如下图10所示，此时5G手机金属边框天线单元未加带阻结构。从图10中可以看到，天线单元在3.4-3.6GHz区间的隔离度均小于-17.31dB。

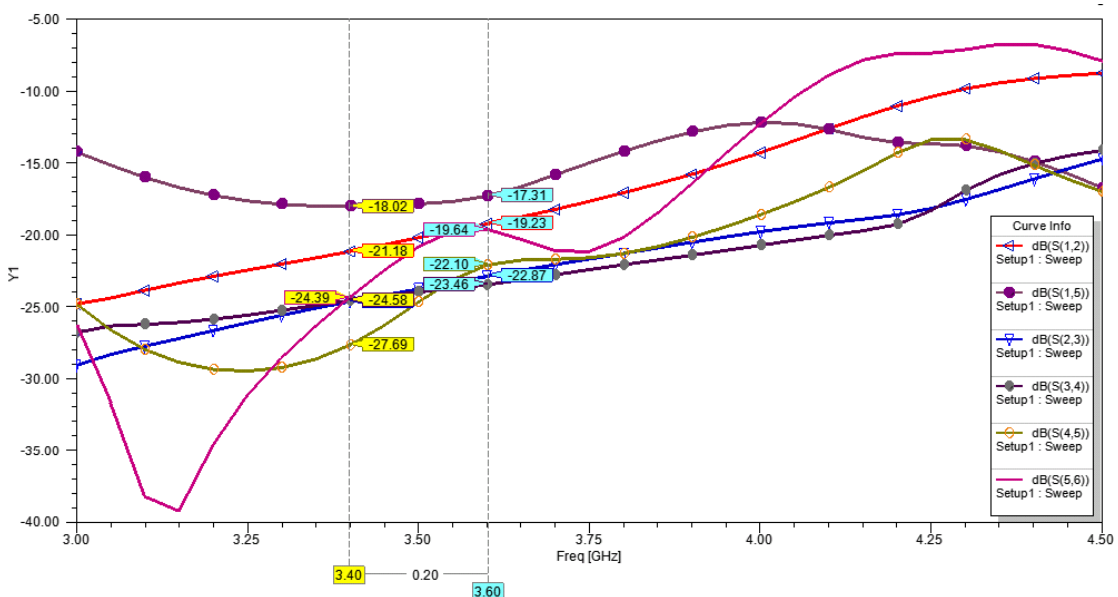


图10 5G手机金属边框天线单元隔离度 (未加带阻结构)

常见的多天线之间增加隔离度的方法有很多：1) 采用空间分集方式，即增加天线之间的物理距离或者改变天线的摆放位置；2) 采用极化分集的方式，即将两个天线垂直放置，使得天线上电流分布正交；3) 采用带阻结构，即利用超材料或者电磁带隙(EBG)等结构工作在其阻带内；4) 采用中和线方式；5) 采用谐振器方式；6) 采用电路网络方式，即在馈源端利用分支线耦合器增加隔离度。为了进一步改善天线单元之间的隔离度，需要考虑采用在天线单元之间做一些处理，即在天线单元之间增加带阻结构-金属分支线，可以将天线单元之间的隔离金属带与PCB板参考地连接起来，如图11所示。增加带阻结构以后，需要做进一步验证，看它对天线单元隔离度影响有多大。

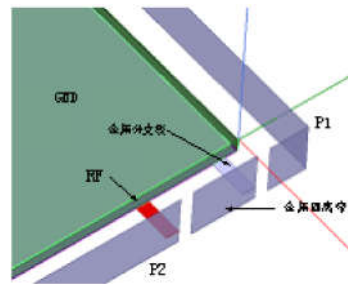


图11 5G手机金属边框天线金属分支线设计

图12是加入带阻结构以后，5G手机金属边框天线单元隔离度随着频率的变化曲线。从图12中可以看到，增加带阻结构以后，天线单元在3.4-3.6GHz区间的隔离度均小于-23.33dB，与原来相比，整体上隔离度增加了6dB，天线的辐射效率可以得到很大提升。

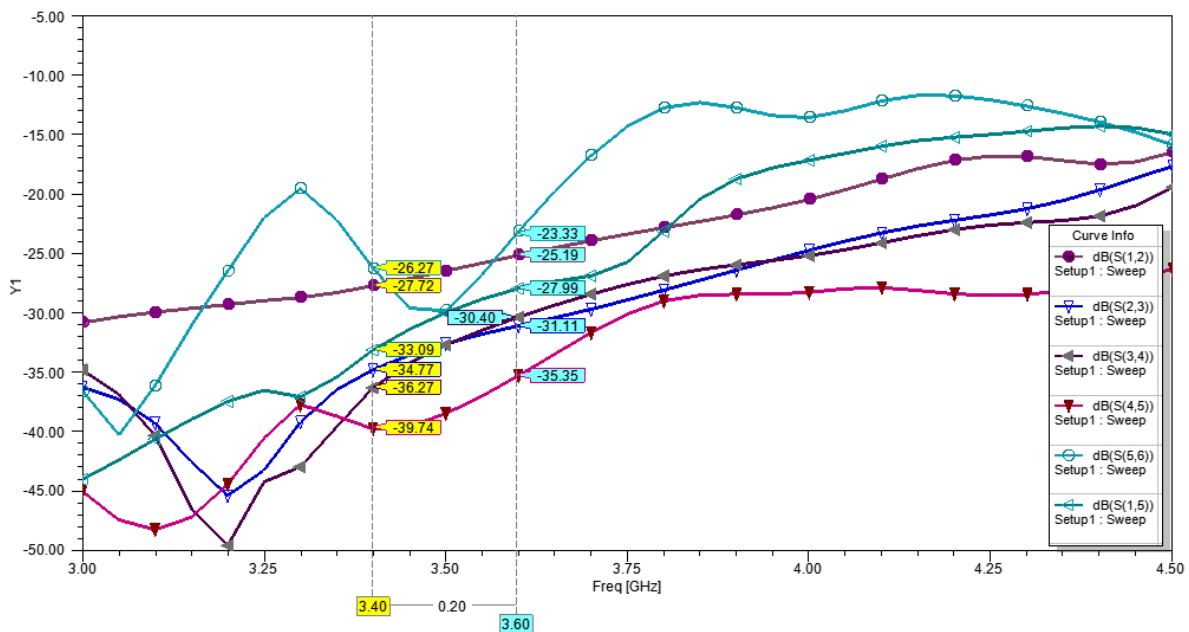


图12 5G手机金属边框天线单元隔离度 (加入带阻结构)

4 5G手机金属边框天线前端射频匹配电路设计

图1设计的天线尺寸一定，带宽不足，手机的尺寸直接限制了天线的尺寸大小，而天线的尺寸无法进一步增加，那么最直接有效的方式就可以通过射频匹配网络来拓展天线的带宽，从而实现5G手机低频天线的小型化设计，同时也可以达到提升射频系统的兼容性和匹配度的目的。

从HFSS仿真软件中导出S参数后，需要将天线的S参数导入到Advanced Design System软件中的原理图设计模块，利用其中的SNP六端口模块来辅助设计5G手机金属边框天线前端射频匹配电路。设计中同时需要借助史密斯圆图来完成天线六个端口前端射频电路的设计。通过观察发

现在3.5GHz处六个天线的去归一化S参数值分别为：

$$\begin{aligned} R1 &= 33.68 + j6.26 \\ R2 &= 63.39 + j14.28 \\ R3 &= 54.68 + j35.60 \\ R4 &= 54.04 + j40.60 \\ R5 &= 62.04 + j20.20 \\ R6 &= 56.84 + j8.69 \end{aligned}$$

以上S参数去归一化后，虚部均表现为容性。那么就需要在史密斯圆图中逆时针旋转到感性区间，通过并联一个电感可以实现，然后再通过感性区逆时针旋转到容性区间，这一步可以通过串联一个电容来实现，最后通过并联一个电感，逆时针旋转到中间的纯电阻50欧姆匹

配点。

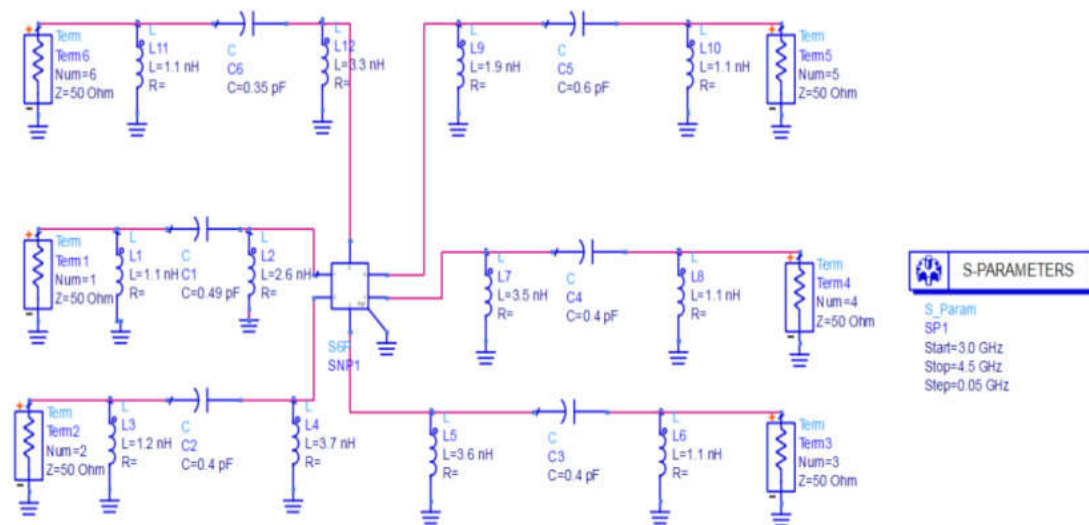


图4 金属边框天线前端射频匹配电路

通过史密斯圆图逆时针旋转完成R1、R2、R3、R4、R5、R6到50欧姆纯阻抗的匹配，匹配电路设计过程如下：1) 天线1输入阻抗R1到50欧姆的匹配，需要先并联一个电感L1=1.1nH，然后串联一个电容C1=0.49pF，最后再并联一个电感L2=2.6nH；2) 天线2输入阻抗R2到50欧姆的匹配，需要先并联一个电感L3=1.2nH，然后串联一个电容C2=0.4pF，最后再并联一个电感L4=3.7nH；3) 天线3输入阻抗R3到50欧姆的匹配，需要先并联一个电感L6=1.1nH，然后串联一个电容C3=0.4pF，最后再并联一个电感L5=3.6nH；4) 天线4输入阻抗R4到50欧姆的匹配，需要先并联一个电感L8=1.1nH，然后串联一个电容C4=0.4pF，最后再并联一个电感L7=3.5nH；5) 天线5输入阻抗R5到50欧姆的匹配，需要先并联一个电感L10=1.1nH，然后串联一个电容C5=0.6pF，最后再并联一个电感L9=1.9nH；6) 天线6输入阻抗R6到50欧姆的匹配，需要先并联一个电感L11=1.1nH，然后串联一个电容C6=0.35pF，最后再并联一个电感L12=3.3nH，最终设计的前端射频匹配电路如图4所示。

5 射频匹配电路加入前后天线 S 参数对比

从图2可以看出，天线在未加入前端射频匹配电路时，天线六个端口的谐振点都工作在4.35GHz附近，回波损耗均大于-16dB，但是P4端口S44参数过大，已经高于-6dB，无法满足设计要求；从图5可以看出，天线在加入前端射频匹配电路后，天线P1到P6六个端口的谐振点都工作在3.5GHz附近，回波损耗均小于-6dB，最小达到-27dB，已经远远优于未加入前端射频匹配网络时候的

最小回波损耗值。手机终端天线S参数一般要求小于-6dB即可，加入前端射频匹配电路的天线结构完全可以满足5G手机天线的辐射带宽要求。

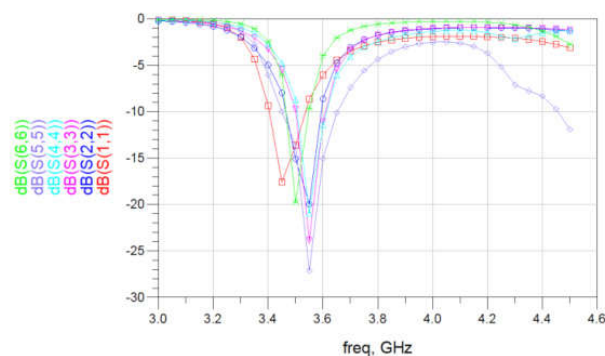


图5 加入前端射频匹配电路的天线S参数

后期加工样品时可以考虑将前端射频匹配电路与手机射频PCB板集成在一起，射频信号通过LCP软板拉远馈入天线信号接口处，这样既可以合理布放天线单元，又可以降低天线的射频信号的传输损耗。

6 结论

本文设计了一种覆盖5G低频段3.4-3.6GHz的六单元MIMO金属边框有源天线，天线结构主要通过切割手机的金属边框来实现。但受限于手机金属边框总长度和手机净空空间，为了使天线能够在3.5GHz处的实现自激振荡，于是在天线前端设计了一套射频匹配电路。通过射频匹配电路不但拓展了天线的工作带宽，还实现了5G低频天线的小型化设计，同时提升了射频系统的兼容性和匹配度，该天线结构可以考虑应用于Sub-6GHz的5G智能

手机中。

参考文献

[1]钟顺时.天线理论与技术[M].电子工业出版社, 2011.

[2]张宁,俱新德.天线的馈电技术[M].西安电子科技大学出版社, 2016.

[3]王建.阵列天线理论与工程应用[M].电子工业出版社, 2017.

[4]林辉,陈哲,袁涛.5G移动终端天线设计[M].人民

邮电出版社, 2021.

[5]沈凌志.加载金属边框手机天线研究[D].杭州:杭州电子科技大学, 2019.

[6]王伟.小型化多频金属边框手机天线设计[D].广州:华南理工大学, 2020.

[7]梁俊杰.4G/5G多频段金属边框小净空手机天线研究与设计[D].西安:西安电子科技大学, 2021.